نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۸۹۲-۱۸۸۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1881-1892

مقاله پژوهشی

ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل-۲ به منظور تهیه نقشه‌های تبخیر-تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر

حمید صالحی[۱]، علی شمس‌الدینی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۵

چکیده

روش‌های ریزمقیاس‌نمایی راه حل مناسبی را جهت رفع مشکل عدم وجود داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا ارائه می‌دهند و می‌توان با استفاده از این روش‌ها، تاحدودی نیاز به داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی- زمانی بالا به منظور پایش پدیده‌های طبیعی مانند تبخیر- تعرق را برطرف نمود. ماهواره سنتینل-۲ در سال ۲۰۱۵ در مدار قرار گرفت و از آن تاریخ امکان دسترسی به داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر را برای دوره بازگشت ۵ روزه فراهم آورده است. هرچند، سنسور این ماهواره قادر به برداشت داده‌های سنجش از دور در طول موج حرارتی نیست. هدف این مطالعه تهیه نقشه‌های تبخیر- تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر براساس ترکیب داده‌های مادیس و سنتینل-۲ برای اراضی کشت و صنعت امیرکبیر می‌باشد. بدین منظور از دو روش STARFM و TSHARP اصلاح شده به منظور ریزمقیاس نمایی داده‌های مادیس به داده‌های سنتینل-۲ استفاده گردید. بدین منظور ابتدا با استفاده از روش STARFM، باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک تصاویر مادیس به باندهای متناظر خود در تصاویر سنتینل-۲ ریزمقیاس نمایی شدند. سپس باندهای حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر با استفاده از روش TSHARP اصلاح شده تهیه گردیدند و در پایان با استفاده از الگوریتم سبال و باندهای ریزمقیاس نمایی شده سنتینل-۲ ،نقشه‌های تبخیر- تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر تولید شدند. مقایسه تبخیر- تعرق‌های ریزمقیاس نمایی شده با تبخیر- تعرق‌های بدست آمده با روش فائو- پنمن- مانتیث بیانگر میزان مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۶۴ میلیمتر در روز بود که نشان دهنده عملکرد خوب روش ارائه شده جهت تولید نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر- تعرق، ریزمقیاس‌نمایی، STARFM، TSHARP

مقدمه

میزان صحت در مدیریت منابع آب براساس معادلات بیلان انرژی سطح تابعی از میزان صحت داده‌های مستخرج از تصاویر سنجش از دور می‌باشد که به نوبه خود صحت آنها وابسته به قدرت تفکیک مکانی- زمانی داده‌های اپتیکی و مادون قرمز حرارتی (TIR) می‌باشد (Bisquert et al., 2016; Guzinski et al., 2013). به دلیل محدودیت‌های فنی، اکثر سنجنده‌های موجود بر روی ماهواره‌های در مدار، قادر نیستند تا به طور همزمان داده‌های اپتیکی و مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی- زمانی بالا جمع‌آوری کنند (قاسمیان و الیاسی، ۱۳۸۷). همچنین استفاده از داده‌های ماهواره‌ها به طور جداگانه برای برخی از برنامه‌ها و خدمات از جمله پایش روزانه میزان تبخیر- تعرق به دلیل تفاوت در زمان تصویربرداری آن‌ها مناسب نبوده و عدم دسترسی به باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی در کنار هم با قدرت تفکیک مکانی- زمانی بالا مانع از تهیه نقشه‌های تبخیر- تعرق روزانه با صحت بالا می‌گردد (Fisher et al., 2017; He et al., 2019). لذا به منظور حل این مسئله و دستیابی به تصاویری که به صورت همزمان دارای باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و حرارتی باشند، محققین سنجش از دور، روش‌های مختلفی را جهت ترکیب تصاویر ماهواره‌ای ارائه نموده‌اند (Ha et al., 2013).

به منظور ریزمقیاس نمایی تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و به صورت روزانه تحقیقاتی متعددی انجام شده است. گائو و همکاران به منظور دستیابی به تصاویر با قدرت تفکیک زمانی- مکانی بالاتر،

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: ali.shamsoddini@modares.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.20.1

الگوریتمی را برای ترکیب تصاویر سنجنده‌های +ETM و مادیس ارائه دادند. این الگوریتم که به اختصار STARFM[1] نام گرفت، برای پیش‌بینی باندهای بازتابندگی سنجنده +ETM به کار گرفته شد. در این تحقیق، برای پیش‌بینی بازتابندگی باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی +ETM در زمان ۲ (بیانگر روزی است که در آن تصویر لندست موجود نیست) از تصاویر مادیس، در زمان ۱ (بیانگر روزی است که در آن تصویر لندست موجود است) و زمان ۲ و تصویر +ETM در زمان ۱ استفاده نمودند. ایشان با مقایسه تصاویر ریزمقیاس شده با تصاویر به دست آمده از سنجنده +ETM نتایج را خوب ارزیابی نمودند (Gao et al., 2006). همچنین بررسی‌های کتابخانه‌ای نشان می‌دهند به منظور ریزمقیاس نمایی باندهای حرارتی، روش‌های مختلفی پیشنهاد گردیده است. این تکنیک‌ها به طور کلی بر این فرض استوار می‌باشند که دمای سطح زمین تابعی از پوشش گیاهی سطح زمین می‌باشد (Kustas, 2003; Bindhu, 2013). کاستاس و همکاران در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که این پتانسیل وجود دارد که با استفاده از رابطه بین NDVI[2] و دمای سطح زمین می‌توان قدرت تفکیک مکانی داده دمای سطح زمین را به قدرت تفکیک مکانی NDVI تبدیل نمود. این محققان روشی به نام DisTrad[3] برای تبدیل قدرت تفکیک مکانی TR به قدرت تفکیک مکانی NDVI ارائه نمودند (Kustas et al., 2003). آگام و همکاران توابع مبتنی بر ترکیب تصاویر به منظور اصلاح روش DisTrad برای ریزمقیاس کردن پیکسل‌های دمای سطحی در قدرت تفکیک‌های مکانی کمتر از ۱۰۰ متر را توسعه دادند و این روش را به TSHARP[4] تغییر نام دادند. در این تحقیق تبدیل قدرت تفکیک مکانی ۹۶۰ متر تصاویر حرارتی مادیس به ۲۴۰ متر دارای مجذور میانگین مربعات خطا ۱/۳۵-۰/۶۷ درجه سانتی‌گراد بود. علاوه بر این در این تحقیق تبدیل تصاویر حرارتی بدست آمده از داده‌های لندست با قدرت تفکیک مکانی ۶۰ و ۱۲۰ متر به قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر منجر به ایجاد مجذور میانگین مربعات خطا ۲/۳۹-۱/۸۰ درجه سانتی‌گراد شد (Agam et al., 2007). هورینا و همکاران روش معرفی شده توسط آگام و همکاران (۲۰۰۷) را به منظور ترکیب تصاویر سنتینل-۲ و سنتینل-۳ بکار بردند و باند حرارتی تصویر سنتینل-۳ با قدرت تفکیک مکانی ۹۶۰ متر را به قدرت تفکیک مکانی ۶۰ متر ریزمقیاس نمودند. آن‌ها در این تحقیق میانگین خطای مطلق تصویر حرارتی ریزمقیاس شده را در مقایسه با تصویر حرارتی بدست آمده از داده‌های لندست-۸ برابر ۱ درجه سانتی‌گراد عنوان کردند (Huryna et al., 2019).

ازجمله داده‌هایی که امروزه به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و نیز دسترسی رایگان به آن دارای کاربردهای زیادی در علوم زمین گردیده است، داده های سنتینل-۲ می‌باشد. اما این داده‌ها با وجود دارا بودن قدرت تفکیک مکانی بالا به منظور پایش روزانه پدیده تبخیر- تعرق دارای دو محدودیت مهم می‌باشند. محدودیت اول اینکه قدرت تفکیک زمانی این داده‌ها، ۵ روزه می‌باشد و در نتیجه برای پایش روزانه تبخیر- تعرق مناسب نیستند. همچنین این داده‌ها فاقد باند مادون قرمز حرارتی می‌باشند. در مقابل، تصاویر حاصل از ماهواره مادیس محدودیت‌های ذکر شده برای تصاویر سنتینل-۲ را ندارند ولی دارای قدرت تفکیک مکانی پایینی می‌باشند.

برای بدست آوردن تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای الگوریتم‌های متعددی ارائه شده است که از این میان می‌توان به الگوریتم سبال (SEBAL[5]) (Bastiaanssen, 2000)، الگوریتم سبس (SEBS[6]) (Su, 2002)، الگوریتم متریک (METRIC[7]) (Allen et al., 2007) و الگوریتم SSEBS[8] (Senay et al., 2007) اشاره نمود. در میان این روش‌ها، تحقیقات متعددی، روش سبال را به عنوان یک روش متداول و نیز دارای صحت مناسب به منظور محاسبه تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مختلف معرفی نموده‌اند (Hafeez et al., 2002; Chandrapala and Wimalasuriya, 2003; Li et al., 2008; Ramosa et al., 2008). در این تحقیقات عمدتا از مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از سبال با مقادیر تبخیر-تعرق بدست آمده با استفاده از معادله فائو-پنمن-مانتیث، و یا مقادیر حاصل از دستگاه سنتیلومتر[9]، استفاده شده است. با توجه به تحقیقات ارائه شده، از آنجایی که عملکرد مدل سبال به منظور تخمین تبخیر-تعرق واقعی خوب ارزیابی شده است لذا در تحقیق حاضر نیز از این مدل برای بدست آوردن تبخیر- تعرق واقعی استفاده شد. به منظور محاسبه تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش سبال، علاوه بر باند مادون قرمز حرارتی، باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی نیز نیاز است. سانچز و همکاران با اصلاح روش معرفی شده توسط آگام و همکاران (۲۰۰۷) و بکارگیری آن در ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل-۲ تصاویر حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ تولید نمودند این محققان با ارزیابی تصاویر حرارتی ریزمقیاس شده نتایج را خوب ارزیابی نمودند (Sanchez et al., 2020). تحقیقات فوق نشان می‌دهند با ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل-۲

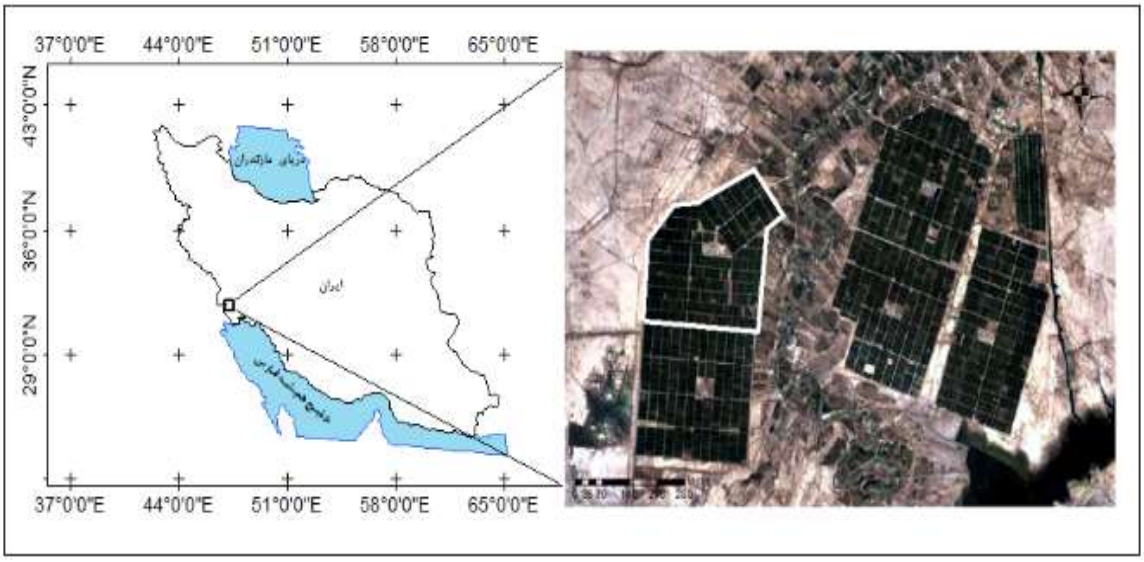
1- Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Mode
2- Normalized Difference Vegetation Index
3- Disaggregation Procedure for Downscaling Radiometric Surface Temperature
4- Sharpening thermal imagery
5- surface energy balance algorithm for land
6- Surface Energy Balance System
7- mapping evapotranspiration with internalized calibration
8- Simplified Surface Energy Balance System
9- Scintillometer

می‌توان تصاویر مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر شبیه‌سازی نمود. هرچند همانگونه که عنوان گردید به منظور تهیه نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش سبال داده‌های باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی نیز مورد نیاز می‌باشد. بررسی‌های مطالعات گذشته نشان می‌دهد که الگوریتم STARFM بر روی داده‌های مادیس و سنتیل-۲ به منظور ایجاد باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر و به صورت روزانه اعمال نشده است. تحقیق حاضر در نظر دارد تا چارچوبی را به منظور تهیه نقشه تبخیر-تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر ارائه نماید. بدین منظور ابتدا باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی مورد نیاز الگوریتم سبال را به صورت روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر از طریق اعمال الگوریتم STARFM بر روی داده‌های مادیس و سنتینل-۲ ریزمقیاس نمایی کند و سپس با استفاده از روش TSHARP اصلاح شده و بین دمای سطح زمین و NDVI دمای سطح زمین را به صورت روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر ایجاد نماید تا با استفاده از الگوریتم سبال تصاویر تبخیر- تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر تهیه گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، اراضی کشت و صنعت امیرکبیر می‌باشد. کشت و صنعت امیرکبیر و صنایع جانبی آن در جنوب استان خوزستان، در طول جغرافیایی ″۴۹ ′۱۶ °۴۸ شرقی و عرض جغرافیایی ″۲ ′۲ °۳۱ شمالی قرار دارد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

مساحت ناخالص اراضی این کشت و صنعت ۱۵۰۰۰ هکتار و مساحت خالص آن ۱۲۰۰۰ هکتار می‌باشد که به چندین قطعه ۲۵ هکتاری تقسیم‌بندی شده است (شکل ۱). در تحقیق حاضر مجموعه‌ای از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های زمینی شامل داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، برداشت‌های مزرعه‌ای مانند ارتفاع گیاهی در دوره‌های مختلف و داده‌های ماهواره‌ای شامل تصاویر مادیس در تاریخ‌های ۲۰۱۸/۰۷/۱۰ تا ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ و تصاویر سنتینل-۲ در تاریخ‌های ۲۰۱۸/۰۷/۱۰ و ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ و تصویر لندست ۸ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰ می‌باشند. در این تحقیق جهت تصحیح اثرات جوی تصاویر مادیس و لندست ۸ از روشی که توسط تاسومی و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده، استفاده گردید. همچنین به منظور تصحیح اتمسفری تصاویر سنتینل-۲ از افزونه sen2cor در نرم‌افزار SNAP استفاده شد. جدول ۱ مشخصات مربوط به باندهای سنتینل-۲ و مادیس را که در این تحقیق به منظور ریزمقیاس نمایی مورد استفاده قرار گرفته اند را نشان می دهد.

ریزمقیاس نمایی باندهای بازتابندگی با استفاده از الگوریتم STARFM

در سال ۲۰۰۶، محققان، به منظور دستیابی به تصاویر با قدرت تفکیک زمانی- مکانی بالاتر، الگوریتمی را برای ترکیب تصاویر سنجنده‌های ETM+ و مادیس ابداع کردند (Gao et al., 2006). این الگوریتم به اختصار STARFM نام گرفت. در تحقیق حاضر این الگوریتم به منظور ترکیب تصاویر سنتینل-۲ و مادیس در جهت ایجاد

باندهای اپتیکی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر بکار گرفته شد. الگوریتم مذکور یکی از الگوریتم‌های مبنایی و مرسوم در ادغام زمانی- مکانی تصاویر ماهواره ای می‌باشد. این الگوریتم بر مبنای محاسبه وزن‌های مناسب پیکسل‌های همسایه، مقدار پیکسل مرکزی را در تصویر سنتینل-۲ در زمان دوم پیش‌بینی می‌نماید. این الگوریتم به صورت یک پنجره متحرک بر روی تصویر طبقه بندی شده سنتینل-۲ در زمان اول، حرکت کرده و با توجه به تصاویر زمان اول و دوم مادیس و تصویر طبقه بندی شده سنتینل-۲ مربوط به زمان اول، تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا در زمان دوم را ریزمقیاس می‌نماید. در ارتباط با یک پیکسل غیر همگن مادیس رابطه زیر برقرار است (Gao et al., 2006):

$$L(x_i, y_j, t_0) = M(x_i, y_j, t_0) + L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k) \quad (۱)$$

که در آن (x_i, y_j) موقعیت پیکسل داده شده برای تصاویر سنتینل-۲ و مادیس، t_0 و t_k تاریخ اخذ دو تصویر مادیس و سنتینل-۲ می‌باشند. رابطه (۱) برای پیکسل‌های همگن در تصویر مادیس منطقی خواهد بود. اما باید توجه داشت که تمام پیکسل‌های مادیس همواره همگن و یکنواخت نیستند و ممکن است نوع پوشش زمین در طول دوره‌ی پیش بینی تغییر نماید. بدین منظور، با استفاده از یک تابع وزن، از اطلاعات همسایگی برای اصلاح بازتابندگی سطح کمک گرفته می‌شود (رابطه ۲):

$$L\left(x_{\frac{w}{2}}, y_{\frac{w}{2}}, t_0\right) = \sum_{i=1}^{w}\sum_{i=1}^{w}\sum_{k=1}^{n} W_{ijk} \times \left(M(x_i, y_j, t_0) + L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k)\right) \quad (۲)$$

در رابطه فوق w اندازه پنجره جستجوگر است و $\left(x_{\frac{w}{2}}, y_{\frac{w}{2}}\right)$ پیکسل مرکزی این پنجره متحرک می‌باشد. برای اطمینان از اینکه در رابطه (۲) اطلاعات صحیحی قرار گرفته و پیکسل‌های همسایه همگن هستند، تنها از پیکسل‌های طیفی مشابه (که به یک کلاس طیفی تعلق دارند) استفاده می‌شود. برای این منظور یک تصویر سنتینل-۲ طبقه‌بندی شده مورد نیاز خواهد بود. در تحقیق حاضر از الگوریتم IsoData که یک روش طبقه‌بندی نظارت نشده می‌باشد، به منظور یافتن پیکسل‌های طیفی مشابه استفاده شد. وزن W_{ijk}، میزان مشارکت پیکسل‌های همسایه مرکزی را در تخمین بازتابندگی بیان می‌کند. جهت کسب اطلاعات بیشتر در رابطه با این روش به صالحی و همکاران (۱۳۹۷) مراجعه شود.

جدول ۱- باندهای سنتینل-۲ و باندهای طیفی مشابه در داده‌های مادیس استفاده شده در این تحقیق به منظور ریزمقیاس نمایی

مادیس		سنتینل-۲	
پهنای باند (نانومتر)	شماره باند	پهنای باند (نانومتر)	شماره باند
۴۷۹-۴۵۹	۳	۵۲۳-۴۵۸	۲
۵۶۵-۵۴۵	۴	۵۷۸-۵۴۳	۳
۶۷۰-۶۲۰	۱	۶۸۰-۶۵۰	۴
۸۷۶-۸۴۱	۲	۹۰۰-۷۸۵	۸
۱۶۵۲-۱۶۲۸	۶	۱۶۵۵-۱۵۶۵	۱۱
۲۱۵۵-۲۱۰۵	۷	۲۲۸۰-۲۱۰۰	۱۲

ریزمقیاس نمایی باند حرارتی با روش TSHARP اصلاح شده

بیسکرت[1] و همکاران (۲۰۱۶) روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی را با بهره‌گیری از تصاویر مادیس و لندست در منطقه باراکس[2] مقایسه نمودند. در این تحقیق اصلاح شده روش ارائه شده توسط آگام و همکاران (۲۰۰۷) بهترین نتیجه را نشان داد. این روش براساس ایجاد یک رابطه خطی بین شاخص‌های NDVI و LST حاصل از تصاویر مادیس قرار دارد. سانچز و همکاران (۲۰۲۰) روش اصلاحی ارائه شده توسط بیسکرت و همکاران (۲۰۱۶) را به منظور ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل-۲ اصلاح نمودند و از آن به عنوان روشی برای بدست آوردن تصویر LST با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر استفاده نمودند. ایشان مراحل زیر را جهت اجرای این روش ارائه نمودند:

۱-تبدیل قدرت تفکیک مکانی NDVI بدست آمده از داده‌های سنتینل-۲ با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر و داده‌های مادیس با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر به قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر که به ترتیب با نمایه‌های $NDVI_{s2}$ و $NDVI_{MOD}$ مشخص می‌گردند.

۲- اصلاح اختلاف بین NDVIهای با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر بدست آمده از داده‌های مادیس و سنتینل-۲ که ناشی از اختلاف بین قدرت تفکیک طیفی، اثر اتمسفری و زاویه دید دو ماهواره می‌باشد. این کار از طریق نرمال‌سازی NDVI بدست آمده از داده‌های سنتینل-۲ ($NDVI_N$) انجام می‌شود.

1- Bisquert
2- Barrax

۳- به منظور اصلاح رابطه بین NDVI-LST نیاز به انتخاب پیکسل‌های خالص می‌باشد. این انتخاب براساس محاسبه یک مقدار مرجع از مقایسه بین $NDVI_{MOD}$ و $NDVI_N$ بدست می‌آید. این مقدار مرجع بنا بر پیشنهاد کاستاس و همکاران (۲۰۰۳) از نسبت بین انحراف معیار پیکسل‌هایی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر واقع در یک پنجره ۴×۴ و مقدار میانگین آن‌ها بدست می‌آید. در این مرحله پیکسل‌هایی که برای آنها مقدار این نسبت کمتر از یک چهارم مقدار مرجع باشند انتخاب می‌شوند.

۴-ایجاد یک رگرسیون خطی بین $NDVI_{MOD}$ و LST_{MOD} با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر با استفاده از پیکسل‌های خالص انتخاب شده و اعمال آن به $NDVI_N$ برای بدست آوردن یک تخمین اولیه از مقادیر LST با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر (LST_{prime}).

۵-با اعمال رابطه بین NDVI-LST بر روی $NDVI_{MOD}$ تصویر LST با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر بدست می‌آید و با محاسبه اختلاف بین LST اصلی و پیش‌بینی شده پارامتر LST باقیمانده (R_{LST}) بدست می‌آید. با اعمال مقادیر R_{LST} بر روی LST_{prime} تصویر LST با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر حاصل می‌شود.

الگوریتم سبال

مبنای الگوریتم‌های مبتنی بر داده های سنجش از دور برای محاسبه تبخیر- تعرق، معادله بیلان انرژی می‌باشد. معادله کامل بیلان انرژی به صورت ذیل بیان می‌گردد (Bastiaanssen et al., 1998):

$$R_n = G + H + \lambda ET + \left(\text{فتوسنتز}\right) + \left(\text{ذخیره گرما در زیست توده گیاه}\right) + \left(\text{جزء افقی گرمای آشکار و نهان}\right) + \quad (۳)$$

در رابطه فوق ، R_n تابش خالص، G شار گرمای خاک، H شار گرمای محسوس و λET شار گرمای نهان بوده و تمامی واحدها بر حسب وات بر متر مربع می‌باشند. در این معادله می‌توان از دو جزء فتوسنتز و ذخیره گرما در گیاه در معادله بیلان انرژی صرف نظر کرد. زیرا بیشتر گیاهان کمتر از یک درصد تشعشع خورشیدی رسیده به آن‌ها را در طول دوره زندگی خود برای فتوسنتز استفاده می‌کنند. ذخیره حرارت در گیاهان در طول روز قابل صرف نظر می‌باشد و تنها در زمانی که تغییر درجه حرارت سریع بوده (به ویژه هنگام طلوع و غروب خورشید) و مقادیر R_n، H و λET کوچک هستند، نسبتا حائز اهمیت است. همچنین جزء افقی گرمای آشکار و نهان نشان دهنده میزان خالص انرژی است که گیاه در راستای افقی تبادل می‌کند. در آب و هوای خشک این جزء ممکن است مساوی با تابش خالص گردد و به رغم اهمیتی که دارد، به علت عدم وجود راه ساده‌ای برای ارزیابی آن، معمولا در نظر گرفته نمی‌شود. باستیانسن و همکاران (۱۹۹۸) با توجه به این فرضیات در معادله بیلان و حذف این سه جزء از آن، الگوریتم انرژی سطح زمین با استفاده از محاسبات چند مرحله‌ای مبتنی بر روابط فیزیک را به نام سبال ارائه دادند. روابط موجود و روند محاسباتی برای هر کدام از پارمترهای R_n، G و H در باستیانسن و همکاران (۲۰۰۲) بطور کامل تشریح شده‌اند. همانگونه که در بخش مقدمه عنوان گردید به دلیل کارایی روش سبال در محاسبه تبخیر-تعرق واقعی، از این روش به منظور بررسی کارایی روش‌های ریزمقیاس نمایی STARFM و TSHARP برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر استفاده گردید.

ارزیابی صحت

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از روش STARFM، باندهای ریزمقیاس نمایی شده مادیس مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ با باندهای متناظر سنتینل-۲ که در همین تاریخ اخذ گردیده بودند، به صورت بصری و کمی مقایسه گردیدند. به منظور مقایسه کمی این داده ها، مجذور میانگین مربعات خطا و نیز ضریب تعیین استفاده گردید. به منظور ریزمقیاس‌نمایی باندهای حرارتی مادیس از روش TSHARP اصلاح شده که توسط سانچز و همکاران (۲۰۲۰) ارائه گردیده بود، استفاده شد. با توجه به اینکه هیچ رفرنسی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای ارزیابی باندهای حرارتی ریزمقیاس شده در دسترس نبود، صحت روش TSHARP اصلاح شده با استفاده از داده‌های لندست-۸ برای منطقه مورد مطالعه ارزیابی گردید. هورینا و همکاران (۲۰۱۹) نیز به منظور اثبات عملکرد مطلوب روش TSHARP در ریزمقیاس نمایی باندهای حرارتی سنتینل-۳ به قدرت تفکیک مکانی سنتینل-۲، از داده‌های لندست-۸ استفاده نمودند. پس از ریزمقیاس نمایی باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک، میانی (که معادل باندهای ۲، ۳، ۴، ۸، ۱۱، و ۱۲ سنتینل-۲ می‌باشند) و باند حرارتی، تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از مدل سبال محاسبه گردید. نقشه‌های تبخیر-تعرق بدست آمده از سبال، با محاسبه تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش فائو-پنمن- مانتیث بر اساس داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

شکل ۲ باندهای اصلی و ریزمقیاس نمایی شده سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۲ نشان دهنده مقادیر RMSE و R^2 برای باندهای ریزمقیاس شده سنتینل-۲ در مقایسه با باندهای منتاظر اصلی سنتینل-۲ و نیز شکل ۳ نشان دهنده نمودارهای نقطه‌ای دوبعدی آنها برای تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ می‌باشد. بدیهی است هر چه پراکندگی مقادیر پیکسل‌ها در نمودار نقطه‌ای به

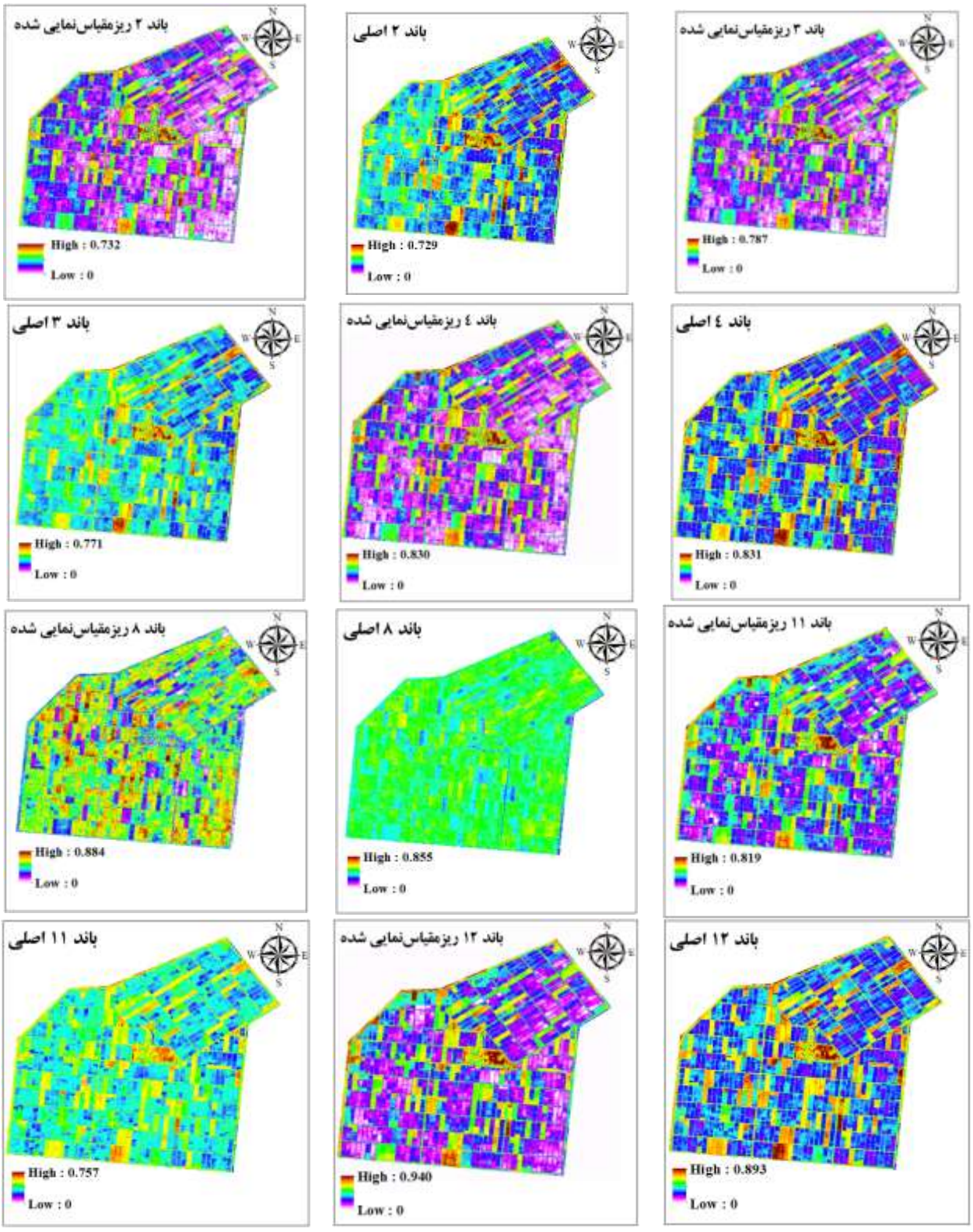
شکل قطری نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم بکار گرفته شده به منظور نشان دادن تغییرات مربوط به داده‌ها می‌باشد. مقایسه بصری باندهای اصلی و ریزمقیاس شده در شکل ۲ و ملاحظه مقادیر شاخص‌ها برای باندهای ریزمقیاس شده در جدول ۲ نشان دهنده صحت خوب الگوریتم STARFM در ریزمقیاس نمایی باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی سنتینل-۲ می‌باشد. با توجه به نتایج مطلوب حاصل، برای بازه زمانی ۲۰۱۸/۰۷/۱۰ تا ۲۰۱۸/۰۷/۱۵با استفاده از باندهای معادل مادیس همان تاریخ‌ها، ریزمقیاس نمایی انجام شد.

جدول ۲- مقایسه باندهای ریزمقیاس شده و باندهای اصلی سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵

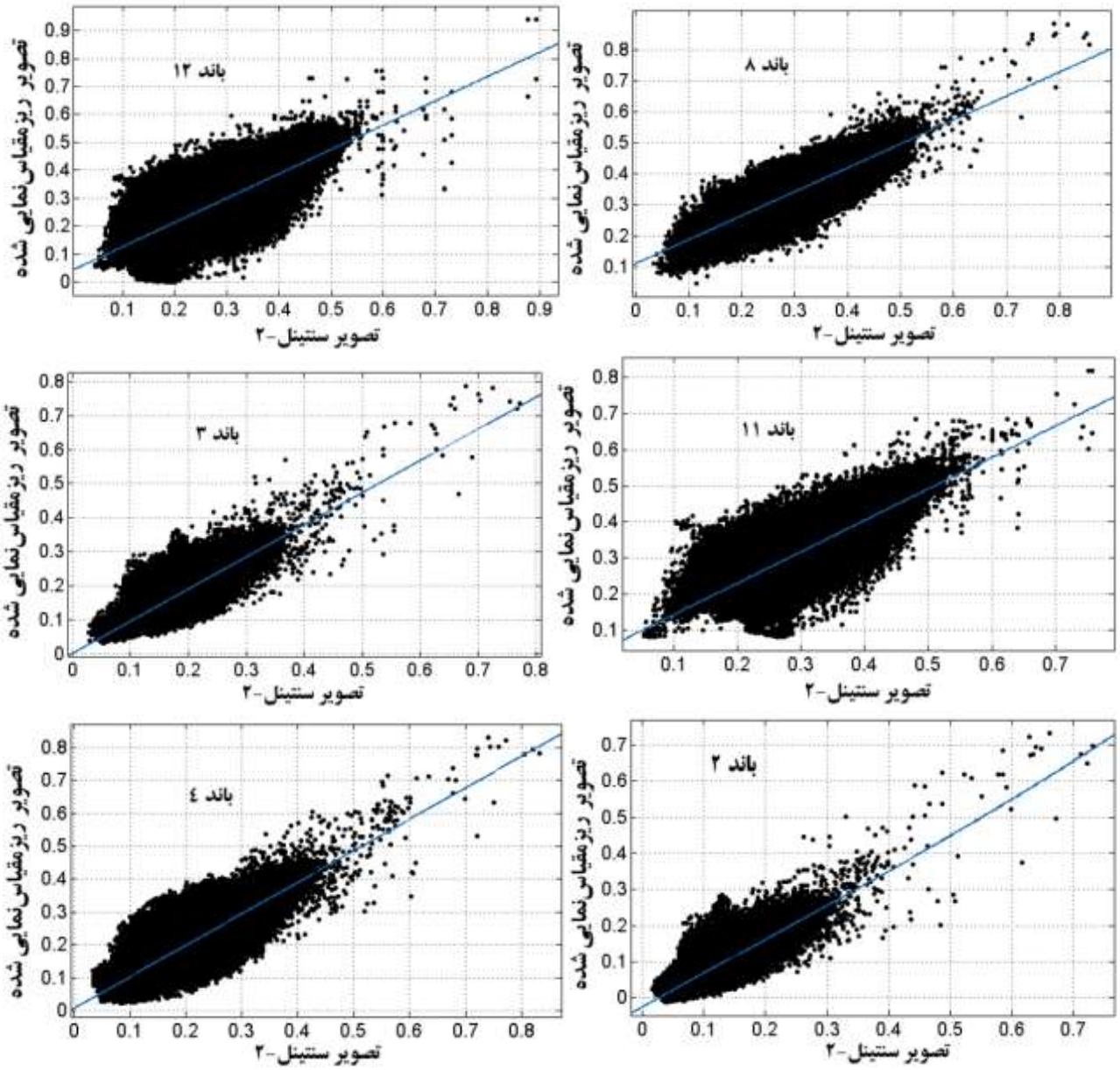
شماره باند	۲	۳	٤	۸	۱۱	۱۲
مجذور میانگین مربعات خطا	۰/۰۱۸	۰/۰۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۳۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۶
ضریب تعیین	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۸۳	۰/۶۳	۰/۷۲	۰/۷۷

با توجه به مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و نیز ضریب تعیین ارائه شده در جدول ۲ و همچنین مشاهده نمودارهای نقطه‌ای ارائه شده در شکل ۳ می‌توان به این نتیجه رسید که الگوریتم STARFM برای ریزمقیاس‌نمایی باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی روزانه تصویر سنتینل-۲ با استفاده از ترکیب داده‌های مادیس و سنتینل-۲ در منطقه مورد مطالعه نتایج رضایت بخشی داشته است. با مرور ادبیات انجام شده تاکنون کارایی این الگوریتم در تحقیقات گذشته به منظور برآورد باندهای اپتیکی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر با استفاده از داده‌های مادیس و سنتینل-۲ مورد بررسی قرار نگرفته بود. هرچند کارایی خوب این الگوریتم در ریزمقیاس‌نمایی باندهای بازتابندگی لندست با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در تحقیقات قبلی تایید شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات گائو و همکاران (۲۰۰۶)، هیلکر و همکاران (۲۰۰۹) و بهاندری و همکاران (۲۰۱۲) اشاره نمود. صالحی و همکاران (۱۳۹۷) نیز کارایی الگوریتم STARFM در ریزمقیاس‌نمایی باندهای بازتابندگی لندست-۸ را تایید نمودند. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود صحت الگوریتم STARFM برای ریزمقیاس نمایی باندهای مختلف متفاوت است که این تفاوت می‌تواند ناشی از دلایل مختلفی باشد. دلیل اصلی آن را می‌توان ناشی از عدم همپوشانی کامل باندهای متناظر سنتینل-۲ و مادیس از نظر طول موج طیفی دانست که این عدم همپوشانی کامل می‌تواند باعث تفاوت طیفی در باندهای متناظر شود و متعاقبا بر روی نتایج ریزمقیاس‌نمایی تاثیر گذار می‌باشد (Pohl and Van der Gerden, 1998). همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود کمترین مقدار همبستگی مربوط به باند ۸ (باند مادون قرمز نزدیک) سنتینل-۲ می‌باشد. در تحقیقی که توسط صالحی و همکاران (۱۳۹۷) انجام شد نیز کمترین مقدار همبستگی مربوط به باند ۵ (باند مادون قرمز نزدیک) ریزمقیاس نمایی شده تصویر لندست-۸ گزارش شد. اگرچه به دلیل وجود عوامل عدم قطعیت زیاد در فرایند ریزمقیاس نمایی یافتن علت اصلی این کاهش ضریب تعیین برای این باند مشکل است (صالحی و همکاران، ۱۳۹۷)، ولی یکی از دلایل این موضوع می‌تواند به حساسیت بالای باند مادون قرمز نزدیک به تغییرات گیاهی موجود در منطقه مورد مطالعه برگردد. حساسیت بالای این باند به تغییرات کلروفیل پوشش گیاهی (Mancino et al., 2020) موجب می‌گردد تا در یک پوشش کشاورزی، پیکسل‌هایی با مقادیر متفاوت بازتابندگی در این باند خصوصا در قدرت تفکیک مکانی بالا ایجاد شوند. این درحالیست که در باندهای دیگر خصوصا در باندهای مرئی تغییرپذیری پیکسل‌ها کمتر بوده و لذا در زمان ریزمقیاس نمایی، تغییرات زیاد باند مادون قرمز نزدیک نمی‌تواند به خوبی سایر باندها که دارای تغییرپذیری کمتری در محیط پوشش گیاهی می‌باشند، در باند ریزمقیاس شده مادون قرمز نزدیک نشان داده شود. الگوریتم STARFM وابستگی زیادی به یکنواختی ناحیه مورد مطالعه دارد و عدم یکنواختی یا وجود تنوع زیاد پوشش در منطقه می‌تواند نتایج حاصل از اعمال الگوریتم را متاثر سازد (Gao et al., 2006). لذا یکی از دلایل مهم برای دستیابی به صحت مناسب باندهای ریزمقیاس شده در این تحقیق را می‌توان ناشی از یکنواختی منطقه مورد مطالعه دانست.

همانگونه که بیان گردید، به منظور ارزیابی صحت روش TSHARP، با توجه به موجود بودن تصویر لندست-۸ برای تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰، LST حاصل از باند حرارتی مادیس برای این تاریخ و با استفاده از این روش ریزمقیاس نمایی گردید. مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و نیز ضریب تعیین برای این داده‌ها نسبت به LST حاصل از باند حرارتی لندست-۸ به ترتیب برابر ۲/۶۰ درجه کلوین و ۰/۶۵ بدست آمد. شکل ۴ نشان دهنده نمودار نقطه‌ای حاصل از رابطه بین پیکسل‌های LST ریزمقیاس شده و LST حاصل از داده حرارتی لندست-۸ می‌باشد. نتایج حاصل نشان دهنده عملکرد خوب روش TSHARP اصلاح شده در ریزمقیاس نمایی داده‌های حرارتی مادیس می‌باشد.



شکل ۲- باندهای اصلی و ریزمقیاس نمایی شده سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵

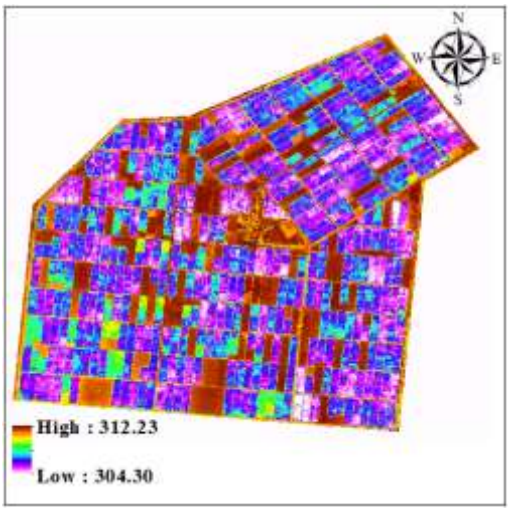


شکل ۳- مقایسه باندهای ریزمقیاس نمایی شده با باندهای تصویر سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵

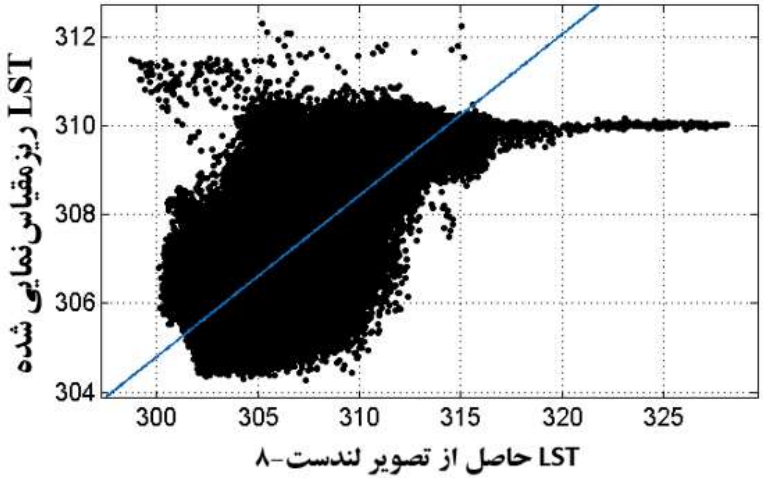
نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به منظور شبیه‌سازی تصاویر تبخیر- تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر با استفاده از تصاویر مادیس و سنتینل-۲ از دو الگوریتم STARFM و TSHARP به منظور شبیه‌سازی باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک، میانی و حرارتی مورد نیاز الگوریتم سبال استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

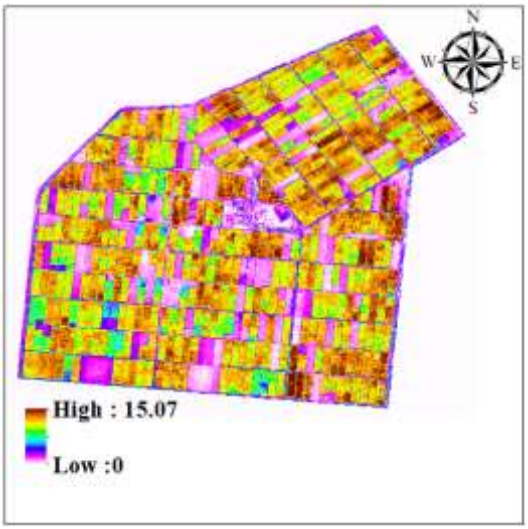
- الگوریتم STARFM در ریزمقیاس‌نمایی باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی سنتینل-۲ با استفاده از داده‌های مادیس در مناطق همگن دارای صحت خوبی می‌باشد.
- میزان صحت الگوریتم STARFM برای باندهای مختلف متفاوت است.
- روش TSHARP اصلاح شده در شبیه‌سازی باندهای حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر با استفاده از داده‌های مادیس و سنتینل-۲ دارای صحت خوبی می‌باشد.
- استفاده از الگوریتم‌های STARFM و TSHARP برای تولید تبخیر- تعرق‌های روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای مناطق همگن می‌تواند منجر به نتایج مناسبی شود.



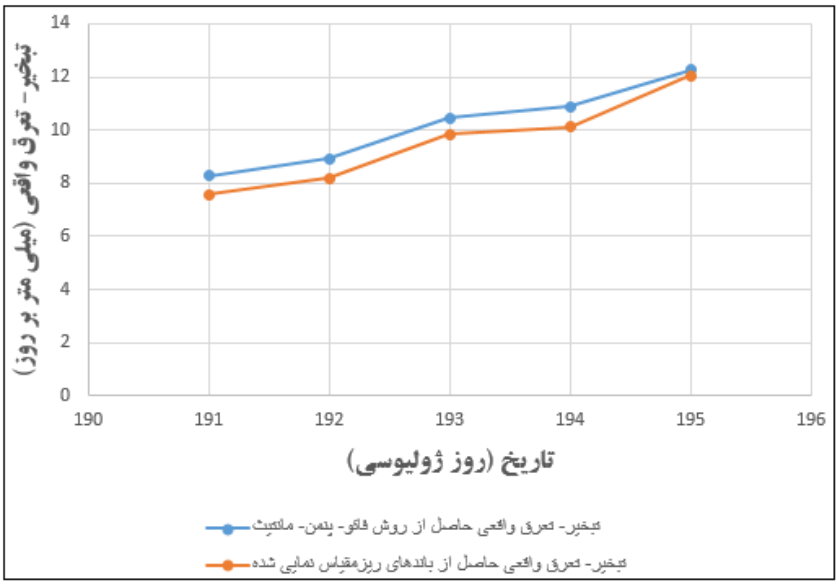
شکل ٤- مقایسه LST ریزمقیاس نمایی شده تصویر لندست-۸ با LST حاصل از تصویر لندست-۸ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰



شکل ٥- تصویر LST ریزمقیاس نمایی شده با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰



شکل ٦- توزیع مکانی تبخیر- تعرق روزانه حاصل از باندهای ریزمقیاس نمایی شده سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰



شکل ۷- مقایسه تبخیر- تعرق‌های روزانه حاصل از روش سبال با استفاده از باندهای ریزمقیاس نمایی شده (قرمز) و تبخیر- تعرق‌های حاصل از روش فائو- پنمن- مانتیث

در پایان توصیه می‌شود تا در تحقیقات آینده صحت الگوریتم‌های STARFM و TSHARP در مناطق غیرهمگن به منظور ایجاد نقشه‌های تبخیر- تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

صالحی، ح.، شمس‌الدینی، ع.، و میرلطیفی، س.م. ۱۳۹۷. ریزمقیاس‌نمایی تصویر مادیس به منظور تهیه نقشه تبخیر- تعرق روزانه با قدرت تفکیک تصویر لندست با استفاده از الگوریتم‌های SADFAT و STARFM. سنجش از دور و GIS ایران، شماره سوم، ۱۴۱-۱۲۳.

قاسمیان یزدی، م.ح.، و الیاسی، م. ۱۳۸۷. ادغام اطلاعات مکانی تصویر آیکونوس و اطلاعات طیفی تصاویر اسپات ۴، فصل‌نامه مدرس علوم انسانی، دوره ۱۴، شماره ۱، ۸۲-۵۷.

Agam, N., Kustas, W.P., Anderson, M.C., Li, F., and Neale, C.M.U. 2007. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. Remote Sens Environ 107:545–558.

Allen R.G., Tasumi M., and Trezza R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133:380–394.

Bastiaanssen W.G.M., Waters R., Allen R.G., Tasumi M., and Terzza R. 2002. Advanced training and user's manual of surface energy balance algorithms for Land. Nasa EOSDIS/Synergy Grant from the Raythoen Company through the Idaho Department of Water Resources1:1-98.

Bastiaanssen W., Menenti M., Feddes R., and Holtslag A. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 1, Formulation, Journal of Hydrology 212:198-212.

Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology 229: 87-100.

Bhandari, S., Phinn, S., and Gill, T. 2012. Preparing aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 102(D14): p. 16815-16830.

Bindhu, V.M., Narasimhan, B., and Sudheer, K.P. 2013. Development and Verification of a Non-Linear Disaggregation Method (NL-Distrad) to Downscale MODIS Land Surface Temperature to the Spatial Scale of Landsat Thermal Data to Estimate Evapotranspiration. Remote Sens. Environ. 135, 118–129.

Bisquert, M., Sanchez, J.M., and Caselles, V. 2016. Evaluation of Disaggregation Methods for Downscaling Modis Land Surface Temperature to Landsat Spatial Resolution in Barrax Test Site. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 9, 1430–1438.

Chandrapala, L., and Wimalasuriya, M. 2003. Satellite measurements supplemented with meteorological data to operationally estimate evaporation in Sri Lanka. Agricultural Water Management 58:89-107.

Fisher, J.B. 2017. The future of evapotranspiration:

Temperatures and Energy Fluxes from the Vegetation Index–Radiometric Temperature Relationship. Remote Sens. Environ. 85: 429–440.

Li, H., Zheng, L., Lei, Y., Li, C., Liu, Z., and Zhang, S. 2008. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. Agricultural Water Management 95:1271-1278.

Mancino, G., Ferrara, A., Padula, A., and Nole, A. 2020. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment, Remote Sens. 12(2): 291.

Pohl, C., and Van Genderen, J.L. 1998. Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications (Review Article), International Journal of Remote Sensing 19: 823-854.

Ramosa J.G., Cratchley C., Kay J.A., Casterad M.A., Martinez-Cob A., and Dominguez Z. 2008. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E, Spain. Agricultural Water Management Journal AGWAT-2701:15-26.

Sanchez, J.M., Galve, J.M., Gonzalez-Piqueras, J., Lopez-Urrea, R., Niclos, R., and Calera, A. 2020. Monitoring 10-m LST from the Combination MODIS/Sentinel-2, Validation in a High Contrast Semi-Arid Agroecosystem. Remote Sensing 12(9):1453.

Senay, G.B., Budde, M., Verdin, J.P., and Melesse, A.M. 2007. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. Sensors 7:979–1000.

Su, Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrol. Earth Syst. Sci. 6: 85–100.

Tasumi M., Allen R.G., and Trezza R. 2008. Atsurface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. Journal of Hydrologic Engineering 13(2):51-63.

Global Requirements for Ecosystem Functioning, Carbon and Climate Feedbacks, Agricultural Management, and Water Resources. Water Resour. Res. 53: 2618–2626.

Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., and Hall, F. 2006. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 44(8): 2207- 2218.

Guzinski, R., Anderson, M.C., Kustas, W.P., Nieto, H., and Sandholt, I. 2013. Using a Thermal Based Two Source Energy Balance Model with Time-Di_erencing to Estimate Surface Energy Fluxes with Day-Night MODIS Observations. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17: 2809–2825.

Ha, W., Gowda, P., and Howell, T.A. 2013. Review of Downscaling Methods for Remote Sensing-Based Irrigation Management: Part I. Irrig. Sci. 31: 831–850.

Hafeez, M., Chemin, Y., Van De Giesen, N., and Bouman, B. 2002. Field evapotranspiration estimation in central Luzon, Philippines using different sensors: Landsat 7 ETM+, Terra MODIS and ASTER. ISPRS/CIG conference July. P. 2002.

He, B.J., Zhao, Z.Q., Shen, L.D., Wang, H.B., and Li, L.G. 2019. An Approach to Examining Performances of Cool/Hot Sources in Mitigating/Enhancing Land Surface Temperature under Di_erent Temperature Backgrounds Based on Landsat 8 Image. Sustain. Cities Soc. 44: 416–427.

Hilker, T., Wulder, M.A., Coops, N.C., Seitz, N., White, J.C., Feng, G., Masek, J.G., and Stenhouse, G. 2009. Generation of dense time series synthetic Landsat data through data blending with MODIS using a spatial and temporal adaptive reflectance fusion model, Remote Sensing Environment, volume 113: 1988-1999.

Huryna, H., Cohen, Y., Karnieli, A., Panov, N., Kustas, W.P., and Agam, N. 2019. Evaluation of Tsharp Utility for Thermal Sharpening of Sentinel-3 Satellite Images Using Sentinel-2 Visual Imagery. Remote Sens., 11, 2304.

Kustas, W.P., Norman, J.M., Anderson, M.C., and French, A.N. 2003. Estimating Subpixel Surface

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1881-1892

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۸۹۲-۱۸۸۱

MODIS and Sentinel-2 Data Fusion For 10-m Daily Evapotranspiration mapping

H. Salehi[1], A. Shamsoddini[2]*
Recived: Oct.31, 2020 Accepted: Dec.05, 2020

Abstract

Downscaling methods seem to be a reasonable solution to solve the problem of having no simultaneous high spatial and temporal satellite data, and it is possible somehow to meet the requirement of having high spatial-temporal resolution satellite data for monitoring the natural phenomena such as evapotranspiration, through these methods. Sentinel-2 satellite launched in 2015 enables to provide 10-m spatial resolution data with a 5-day revisit time; however, its sensor does not acquire data in thermal infrared wavelength. This study aims to generate 10-m daily evapotranspiration maps based on Sentinel-2 and MODIS data fusion for Amir-Kabir Agroindustry farms. For this purpose, STARFM and improved TSHARP methods were applied for downscaling MODIS data to Sentinel-2 data. To achieve this goal, First, MODIS visible and near and middle infrared bands were downscaled by STARFM to 10-m spatial resolution. Then, improved TSHARP was applied for downscaling MODIS thermal band to 10-m spatial resolution and SEBAL algorithm fed by the downscaled bands, was used to produce daily evapotranspiration map with 10-m spatial resolution. Assessing downscaled evapotranspiration maps with those derived from FAO Penman-Monteith equation indicated a RMSE of 0.64 mm/day showing efficient performance of the downscaling framework proposed for 10-m daily evapotranspiration mapping in this study.

Keywords: Downscaling, Evapotranspiration, STARFM, TSHARP

1- Master of Agricultural Engineering (Irrigation), Tarbiat Modares University
2- Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Tarbiat Modares University
(*- Corresponding Author Email: ali.shamsoddini@modares.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۰۷-۱۸۹۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1893-1907

مقاله پژوهشی

ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی دو رقم زودرس و متوسطرس ذرت دانه‌ای در تراکم‌های مختلف کاشت تحت آبیاری بارانی

شکوه کریمی[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲*]، محمد مهدی نخجوانی مقدم[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۵

چکیده

برای دستیابی به عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری آب مناسب برای ذرت دانه‌ای، نیاز است عوامل مختلفی از جمله مقدار آب آبیاری، رقم و تراکم کشت این محصول در مناطق مختلف کشور بررسی شود. به دلیل هزینه‌بر و زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای، استفاده از مدل‌های گیاهی پیشنهاد شده است. از این رو، به منظور ارزیابی مدل گیاهی SWAP، آزمایشی دو ساله (۸۶-۱۳۸۵) برای دو رقم ذرت دانه‌ای (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام متوسطرس SC500 و زودرس SC302) تحت تراکم‌های کشت مختلف (D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ بوته در هکتار برای رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ بوته در هکتار برای رقم SC302) با مقادیر مختلف آبیاری (I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد آبیاری) در شهرستان کرج انجام شد. نتایج نشان داد، در رقم V1، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D3، مدل SWAP دقت بالاتری برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت داشت. در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت دانه‌ای، دقت مدل SWAP برای رقم V2، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D2 و در شبیه‌سازی بهره‌وری آب، دقت این مدل برای هر دو رقم، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D3 مناسب‌تر از سایر تیمارها بود. به‌طور کلی، براساس آماره میانگین مربعات خطای نرمال شده، دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای به ترتیب برابر با ۰/۱۴، ۰/۱۳ و ۰/۱۶ بود. کارایی این مدل نیز برای هر سه پارامتر ذکر شده در دسته عالی قرار داشت و مقدار آن برابر با ۰/۹۸ بود. بنابراین استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای تحت تیمارهای مذکور پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تراکم بوته، مدل‌سازی گیاهی، مقادیر آبیاری

مقدمه

ذرت دانه‌ای یکی از مهم‌ترین محصولات کشاورزی است که سهم عمده‌ای در تأمین نیازهای غذایی کشور دارد. این گیاه زراعی سازگاری مناسبی برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد ولی کاهش مصرف آب آبیاری در زراعت این گیاه سبب کاهش عملکرد و زیست‌توده آن می‌شود. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران لازم است واکنش عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای نسبت به مقدار آب آبیاری در هر منطقه تعیین شود (یعقوب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ Ahmadee et al., 2014). اگر مقدار مصرف آب به‌صورت دقیق تعیین شود؛ می‌توان با مقدار آب کمتر محصول مناسبی برداشت کرد (شهیدی و احمدی، ۱۳۹۴). با توجه به اینکه میزان تراکم و نوع رقم ذرت دانه‌ای بر واکنش این گیاه به مقدار آب آبیاری اثرگذار است؛ تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب عوامل مناسب برای زراعت آن در هر منطقه دشوار می‌شود. اگر برای بررسی اثر هر تیمار بر عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای آزمایش‌های مزرعه‌ای در هر منطقه انجام شود؛ وقت و هزینه بسیاری صرف می‌شود (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷). برای حل این مشکل، مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی ارائه شده‌اند که با سرعت و دقت بالا امکان بررسی اثر تیمارهای مختلف بر گیاه زراعی را ممکن می‌سازند (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷).

مدل شبیه‌سازی گیاهی SWAP به منظور مدل‌سازی روابط خاک و آب وگیاه و اتمسفر در دانشگاه واگنینگن هلند بسط داده شد (Van Dam et al., 1997). به دلیل دقت و کارایی این مدل گیاهی، محققان بسیاری از آن برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۳- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: a_eigder@ymail.com)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.29.0

بهره‌وری آب استفاده کرده‌اند (شهیدی و احمدی، ۱۳۹۳). از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات جنوبی و همکاران اشاره کرد. این محققان از مدل SWAP برای شبیه‌سازی برنج در شمال کشور تحت سناریوهای مختلف آبیاری استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار میانگین مربعات خطای نرمال‌شده[1] برای عملکرد برنج برابر با ۴/۹۴ درصد بود. به همین دلیل این محققان پیشنهاد کردند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری برای کشت برنج از این مدل استفاده شود (Jonubi et al., 2018). در تحقیقی دیگر، یانگ و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی زهکشی مزارع برنج استفاده کردند. این محققان نشان دادند که دقت مدل SWAP برای این هدف قابل قبول بود (Yong et al., 2016). ما و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گندم زمستانه پرداختند و نشان دادند که مقادیر RMSE و MRE برای عملکرد گندم به ترتیب برابر با ۲/۴ و ۸ درصد بود. براساس این نتایج، دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی گندم قابل قبول پیشنهاد شد (Ma et al., 2011) . در خصوص استفاده از مدل SWAP برای شبیه‌سازی ذرت دانه‌ای می‌توان به مطالعات. بن فنت و همکاران اشاره کرد (Bonefant et al., 2010). این محققان از این مدل در شمال ایتالیا استفاده کردند. نتایج این تحقیق حاکی از این بود که دقت مدل SWAP برای برآورد رطوبت خاک در مزرعه مطلوب بود. بنفتن و بوما با توجه به دقت مدل SWAP، از این مدل برای شبیه‌سازی اثرات کمبود آب بر عملکرد ذرت در شرایط تغییر اقلیم برای سناریوهای مختلف استفاده کردند (Bonefante and Bouma, 2015). امیری از مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب ذرت در شیراز استفاده کردند. این محققان نشان دادند که دقت این مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای مورد نظر قابل قبول بود (Amiri, 2016). امیری و شیرشاهی (۱۳۹۶) از مدل SWAP برای ارزیابی عملکرد ذرت دانه‌ای به میزان آب آبیاری استفاده کردند. نتایج این محققان نشان داد که تغییرات عملکرد شبیه‌سازی شده با داده‌های برداشت شده از مزرعه مطابقت داشت. همچنین با استفاده از آماره‌ی میانگین مربعات خطا[2] نشان دادند که دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده بسیار بالا بود. حسن لی و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی ذرت در شرایط آب شور استفاده کردند. این محققان نشان دادند که ضریب تبیین برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت برابر با ۰/۵۴ و دقت مدل بین ۱۹-۰/۳ درصد بود (Hassanli et al., 2016). ایشان از دو مدل AquaCrop و SALTMED نیز برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط مشابه استفاده کردند و گزارش کردند که دقت مدل SWAP بسیار بهتر از AquaCrop و مشابه مدل SALTMED بود ژائو و همکاران از مدل SWAP برای شبیه‌سازی رشد ذرت تحت شرایط کشت زیرپلاستیکی استفاده کردند و نشان دادند که که دقت این مدل برای شبیه‌سازی ذرت مناسب بود. این محققان با بهبود مدل SWAP مجدداً شرایط مورد نظر را شبیه‌سازی کردند. نتایج ایشان نشان داد که دقت شبیه‌سازی مدل جدید حدود ۸۲ درصد بهبود یافت (Zhao et al., 2020). زلیگر و همکاران از داده‌های ماهواره‌ای و مدل SWAP برای شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت کشت ذرت و برخی گیاهان زراعی استفاده کرده و دقت آن را مطلوب ارزیابی کردند (Zeyliger et al.., 2019).

مرور منابع نشان داد که با وجود مطالعات کافی در خصوص دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت، تاکنون تحقیقی روی این مدل برای شبیه‌سازی دو رقم زودرس و متوسطرس ذرت دانه‌ای در تراکم‌های مختلف کاشت تحت آبیاری بارانی انجام نشده است. بنابراین تحقیق حاضر برای ارزیابی مدل SWAP تحت شرایط اشاره شده انجام شد.

مواد و روش‌ها

مطالعات مزرعه‌ای

این آزمایش به صورت کرت‌های یکبار خرد شده[3] در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار و هر تکرار شامل ۹ واحد آزمایشی طی دو سال (۸۶-۱۳۸۵) در شهرستان کرج اجرا گردید. تیمارها شامل رقم ذرت (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده رقم متوسطرس SC500 و زودرس SC302) تحت سه سطح آبیاری (I1، I2 و I3 به ترتیب براساس ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه) و سه تراکم کشت (D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ بوته در هکتار برای رقم میان‌رس و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ بوته در هکتار برای رقم زودرس) بود (نخجوانی‌مقدم و همکاران، ۱۳۸۹؛ نخجوانی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۰). در هر دو سال انجام آزمایش در نیمه اول خرداد ماه زمین برای کشت آماده شد. عملیات کاشت به صورت دستی انجام شد. فاصله بین ردیف‌های کشت ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها در روی هر ردیف نیز بسته به نوع تراکم متغیر بود. برای کاشت بذر از نشانگر چوب استفاده شد. در هر چاله تعداد ۳ عدد بذر کاشته شد و در مرحله ۸ برگی تنک شد. در هر تیمار، ۵ ردیف به طول ۱۲ متر کشت شد که سه خط وسط، اصلی و دو خط کناری حاشیه بودند (نخجوانی‌مقدم و همکاران، ۱۳۸۹؛ نخجوانی‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۰). برای تعیین بافت و خصوصیات فیزیکی خاک محل انجام آزمایش نمونه‌هایی از اعماق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتی‌متری گرفته‌شد (جدول ۱).

1- Normalized Root Mean Square Error
2- Root Mean Square Error
3- Split plo

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش

عمق خاک (cm)	وزن مخصوص ظاهری خاک (g/cm3)	رطوبت حجمی در حد ظرفیت زراعی (%)	بافت خاک
۰-۲۰	۱/۳۶	۲۶/۳	لوم
۲۰-۴۰	۱/۴۲	۲۷	لوم
۴۰-۶۰	۱/۴۲	۲۸/۶	لوم

رطوبت‌سنجی خاک با دستگاه ترایم (TRImE-FM-2) ساخت شرکت IMKO انجام شد. این دستگاه رطوبت حجمی خاک را در لایه مورد نظر به روش انعکاس‌سنجی حوزه زمانی[1] (Time domain reflectometery) وبراساس میزان ثابت دی الکتریک خاک برآورد می‌کند. با توجه به خاک زراعی در مزرعه آزمایشی، رطوبت خاک با دستگاه ترایم تا عمق ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک و در لایه‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری قرائت گردید. برای آبیاری هر کرت فرعی از آبپاش برنجی قابل تنظیم مدل VYR 50 با مشخصات فنی؛ فشار کارکرد بین ۳ الی ۴/۵ اتمسفر، میزان آبدهی بین ۲۸ الی ۳۵ لیتر در دقیقه و شعاع پاشش بین ۱۰ الی ۱۵ متر،استفاده شد. بطوری‌که در هر یک از چهار گوشه فرعی و با فاصله ۱۲ متر از یکدیگر، یک آبپاش قرار گرفت. ارتفاع آبپاش نیز با توجه به ارتفاع گیاه در هر مرحله رشد متغیر بود. زمان آبیاری در تمامی تیمارهای آزمایشی بر اساس ۵۰ درصد متوسط میزان تخلیه مجاز رطوبتی، در مقدار رطوبت Qm، در تراکم‌های مختلف تیمار شاهد (تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی) در نظر گرفته شد. میزان آب مورد نیاز نیز بر اساس کمبود رطوبت خاک (SMD) در عمق توسعه ریشه (Dz) تا حد ظرفیت زراعی (FC) تعیین و با استفاده از کنتور حجمی در اختیار گیاه قرار گرفت (رابطه ۱).

$$I_n = SMD = (FC - Q_m).D_z \qquad (۱)$$

پس از استقرار کامل بوته‌ها و کسب اطمینان از اینکه بوته‌ها خطرات اولیه (آفات خاکزی و سرمای اول فصل) را گذرانده‌اند، اقدام به تنک‌کردن بوته‌های اضافی گردید. در هر چاله فقط یک بوته باقی گذاشته‌شد. مقدار کود مصرفی براساس آزمون خاک‌شناسی محاسبه شد و کود فسفات آمونیوم به مقدار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار به اضافه نیمی از کود اوره مورد نیاز (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) پیش از کاشت مورد استفاده قرارگرفت. نیمی دیگر از کود اوره (۲۰۰ کیلو گرم در هکتار) در مرحله ۹-۸ برگی به صورت سرک به مزرعه داده شد. در این آزمایش به غیر از سم علف کش از هیچ‌گونه سمی جهت مبارزه با آفات و بیماری‌ها استفاده نشد. در انتهای فصل نیز عملیات برداشت انجام شد و عملکرد و زیست‌توده توسط ترازو در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برای تعیین بهره‌وری آب از رابطه (۲) استفاده شد.

$$WP = \frac{Y}{W} \qquad (۲)$$

که در این معادله، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، Y عملکرد ذرت (کیلوگرم) و W مجموع بارندگی و آبیاری (متر مکعب) است. مقدار آب مصرفی برای دو رقم مورد استفاده در جدول‌های (۲) و (۳) و میانگین پارامترهای هواشناسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

مدل SWAP

در مدل SWAP، شبیه‌سازی رشد و تولید محصول به کمک فاکتورهای زراعی مشاهداتی در سطح مزرعه انجام می‌شود. در این مدل، دو روش ساده و تفضیلی برای مدل‌سازی گیاهان زراعی وجود دارد. یک مدل اختصاصی نیز برای شبیه‌سازی چمن در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش لازم بود اثر تراکم کاشت لحاظ شود؛ و این عامل بر پارامترهایی مانند کارایی تبدیل ماده جذب شده به ارگان‌های ذخیره‌ای و برگ اثر دارد، از مدل تفضیلی استفاده شد. در این مدل میزان جذب ناخالص از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$A_L = A_{\max}\left(1 - e^{\frac{\varepsilon_{PAR} PAR_{L,a}}{A_{\max}}}\right) \qquad (۳)$$

در این رابطه، AL نرخ جذب ناخالص (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر متر مربع بر روز)، Amax نرخ جذب ناخالص در شرایط نوری اشباع (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر متر مربع بر روز)، ε_{PAR} کارایی مصرف نور (کیلوگرم دی‌اکسید کربن بر ژول) و PAR تشعشع فعال برای فتوسنتز است.

تحلیل حساسیت مدل و ارزیابی مدل

پیش از واسنجی مدل SWAP تحلیل حساسیت این مدل نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی با استفاده از رابطه (۴) تعیین شد (Geerts et al., 2009):

$$Sc = \left|\frac{P_m - P_b}{P_b}\right| \times 100 \qquad (۴)$$

که در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، Pm مقدار

1- Time Domain Reflectometery

برآورد شده پارامتر مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و Pb مقدار برآورد پارامتر مورد نظر براساس داده ورودی پایه می باشد. برای تحلیل حساسیت مدل به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از پارامترهای ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده می‌شد و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته می‌شدند (Geerts et al., 2009). در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، Sc >۱۵ حساسیت بالا، ۲< Sc <۱۵ حساسیت متوسط، Sc<۲ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد.

پس از تحلیل حساسیت، واسنجی این مدل با استفاده از داده‌های سال اول انجام شد. سپس صحت‌سنجی مدل SWAP با استفاده از داده‌های سال دوم صورت گرفت. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مزرعه‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۵) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

جدول ۲- میزان آب آبیاری برای ذرت رقم SC500

سال اول					سال دوم				
ردیف	تاریخ آبیاری	آب آبیاری (میلی‌متر)			ردیف	تاریخ آبیاری	آب آبیاری (میلی‌متر)		
		تیمار ۱۰۰٪	تیمار ۱۲۵٪	تیمار ۷۵٪			تیمار ۱۰۰٪	تیمار ۱۲۵٪	تیمار ۷۵٪
۱	۳/۲۵	۱۱	۱۱	۱۱	۱	۳/۲۶	۱۲	۱۲	۱۲
۲	۳/۳۰	۱۵	۱۵	۱۵	۲	۳/۳۰	۱۵	۱۵	۱۵
۳	۴/۸	۱۵	۱۵	۱۵	۳	۴/۱۰	۱۵	۱۵	۱۵
۴	۴/۱۵	۱۰	۱۰	۱۰	۴	۴/۱۳	۷/۳	۷/۳	۷/۳
۵	۴/۱۹	۶	۷/۵	۴/۵	۵	۴/۱۹	۱۱	۱۱	۱۱
۶	۴/۲۶	۱۰	۱۰	۱۰	۶	۴/۲۳	۱۰	۱۰	۱۰
۷	۴/۲۹	۱۰	۱۰	۱۰	۷	۴/۳۰	۹	۱۱	۷
۸	۵/۳	۲۰	۲۵	۱۵	۸	۵/۲	۱۴	۱۹	۱۰
۹	۵/۷	۱۷/۵	۲۲	۱۳	۹	۵/۸	۱۹	۲۵	۱۴
۱۰	۵/۱۰	۲۴	۳۰	۱۸	۱۰	۵/۱۰	۹	۱۲	۶
۱۱	۵/۲۱	۲۷	۳۳	۲۰	۱۱	۵/۱۳	۱۶	۲۰	۱۲
۱۲	۵/۲۴	۲۲	۲۸	۱۷	۱۲	۵/۱۶	۱۹,۸	۲۴	۱۴/۵
۱۳	۵/۲۸	۳۰	۳۸	۲۳	۱۳	۵/۲۱	۱۴	۱۸	۱۰
۱۴	۶/۴	۳۱	۳۸	۲۳	۱۴	۵/۲۴	۱۳	۱۶	۱۰
۱۵	۶/۹	۲۳/۵	۲۹	۱۸/۵	۱۵	۵/۲۷	۲۶	۳۲	۲۰
۱۶	۶/۱۳	۲۰	۲۵	۱۵	۱۶	۵/۳۰	۱۷/۵	۲۱/۵	۱۳
۱۷	۶/۲۱	۳۰	۳۷/۵	۲۲/۵	۱۷	۶/۳	۲۴	۳۰	۱۸
۱۸	۶/۲۸	۲۴/۵	۳۰	۱۸	۱۸	۶/۶	۱۵/۶	۱۹/۵	۱۱/۷
۱۹	۷/۴	۲۴/۵	۳۰	۱۸	۱۹	۶/۱۰	۲۱	۲۵	۱۶
					۲۰	۶/۱۳	۱۶/۸	۲۰/۵	۱۲/۶
					۲۱	۶/۱۷	۱۷/۵	۲۲	۱۳/۵
					۲۲	۶/۲۰	۱۵	۱۹	۱۱/۳
					۲۳	۶/۲۶	۳۲	۴۰	۲۴
					۲۴	۷/۳	۲۶	۳۳	۱۹/۵
					۲۵	۷/۱۰	۲۰	۲۵	۱۵
					۲۶	۷/۱۷	۱۱	۱۴	۸
جمع کل		۳۷۱	۴۴۴	۲۹۶/۵	جمع کل		۴۲۶/۵	۵۱۶/۸	۳۳۶/۴
حجم آب مصرفی درهکتار		۸۵۸۸	۱۰۲۷۸	۶۸۶۳	حجم آب مصرفی درهکتار		۹۸۷۳	۱۱۹۶۳	۷۷۸۷

جدول ۳- میزان آب آبیاری برای ذرت رقم SC302

سال اول				سال دوم			
		آب آبیاری (میلی‌متر)				آب آبیاری (میلی‌متر)	
ردیف	تاریخ آبیاری	تیمار ۱۰۰٪	تیمار ۱۲۵٪	تیمار ۷۵٪	ردیف	تاریخ آبیاری	تیمار ۱۰۰٪	تیمار ۱۲۵٪	تیمار ۷۵٪
۱	۳/۲۵	۱۱	۱۱	۱۱	۱	۳/۲۶	۱۲	۱۲	۱۲
۲	۳/۳۰	۱۵	۱۵	۱۵	۲	۳/۳۰	۱۵	۱۵	۱۵
۳	۴/۸	۱۵	۱۵	۱۵	۳	۴/۱۰	۱۵	۱۵	۱۵
۴	۴/۱۵	۱۰	۱۰	۱۰	۴	۴/۱۳	۷/۳	۷/۳	۷/۳
۵	۴/۱۹	۹	۱۱	۷	۵	۴/۱۹	۱۱	۱۱	۱۱
۶	۴/۲۶	۱۰	۱۰	۱۰	۶	۴/۲۳	۱۰	۱۰	۱۰
۷	۴/۲۹	۱۰	۱۰	۱۰	۷	۴/۳۰	۹	۱۱	۷
۸	۵/۳	۲۴	۳۰	۱۸	۸	۵/۲	۱۴	۱۹	۱۰
۹	۵/۷	۲۷	۲۷	۱۶	۹	۵/۸	۱۹	۲۵	۱۴
۱۰	۵/۱۰	۲۱	۲۶	۱۶	۱۰	۵/۱۰	۹	۱۲	۶
۱۱	۵/۲۱	۲۸	۳۵	۲۱	۱۱	۵/۱۳	۱۶	۲۰	۱۲
۱۲	۵/۲۴	۲۲	۲۸	۱۷	۱۲	۵/۱۶	۱۹,۸	۲۴	۱۴/۵
۱۳	۵/۲۸	۳۱	۳۹	۲۳/۵	۱۳	۵/۲۱	۱۴	۱۸	۱۰
۱۴	۶/۴	۳۱	۳۸	۲۳	۱۴	۵/۲۴	۱۳	۱۶	۱۰
۱۵	۶/۹	۲۳/۵	۲۹	۱۸/۵	۱۵	۵/۲۷	۲۶	۳۲	۲۰
۱۶	۶/۱۳	۲۶	۳۲/۵	۱۹/۵	۱۶	۵/۳۰	۱۷/۵	۲۱/۵	۱۳
۱۷	۶/۲۱	۳۰	۳۷/۵	۲۲/۵	۱۷	۶/۳	۲۴	۳۰	۱۸
۱۸	۶/۲۸	۲۴/۵	۳۰	۱۸	۱۸	۶/۶	۱۵/۶	۱۹/۵	۱۱/۷
۱۹	۷/۴	۲۴/۵	۳۰	۱۸	۱۹	۶/۱۰	۲۱	۲۵	۱۶
۲۰					۲۰	۶/۱۳	۱۶/۸	۲۰/۵	۱۲/۶
۲۱					۲۱	۶/۱۷	۱۷/۵	۲۲	۱۳/۵
۲۲					۲۲	۶/۲۰	۱۵	۱۹	۱۱/۳
۲۳					۲۳	۶/۲۶	۳۲	۴۰	۲۴
۲۴					۲۴	۷/۳	۲۶	۳۳	۱۹/۵
۲۵					۲۵	۷/۱۰	۲۰	۲۵	۱۵
۲۶					۲۶	۷/۱۷	۱۱	۱۴	۸
جمع کل		۳۸۶/۵	۴۶۴	۳۰۹	جمع کل		۴۲۶/۵	۵۱۶/۸	۳۳۶/۴
حجم آب مصرفی درهکتار		۸۹۴۷	۱۰۷۴۱	۷۱۵۳	حجم آب مصرفی درهکتار		۹۸۷۳	۱۱۹۶۳	۷۷۸۷

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۵)$$

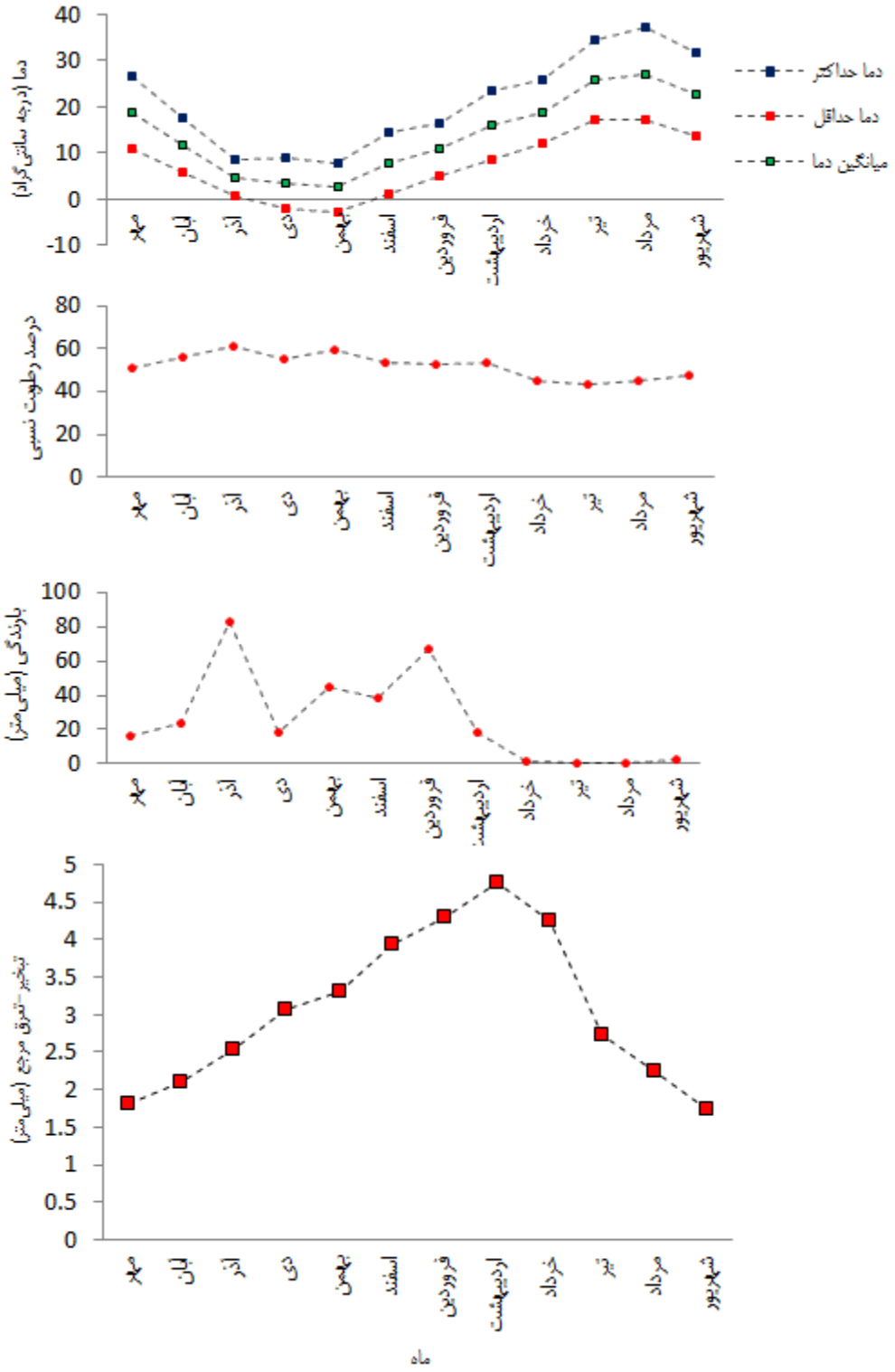
$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}}}{\overline{O_i}} \quad (۶)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)}{n} \quad (۷)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۸)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۹)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum (P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum (P_i - \overline{P})^2 \sum (O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۰)$$



شکل ۱- میانگین ماهیانه پارامترهای هواشناسی در منطقه مورد مطالعه

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار مشاهداتی، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر مشاهداتی و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان دهنده‌ی دقت عالی مدل است. هم چنین

مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل رشد گیاهی SWAP مقدار عامل مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که این مدل در برآورد عامل مورد نظر عدد کوچکتری به دست داده‌اند. مقادیر آماره‌هایEF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R2 نیز از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت و واسنجی

پیش از واسنجی مدل SWAP، حساسیت این مدل به تغییرات پارامترهای ورودی بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل SWAP نسبت به تغییرات اکثر پارامترهای ورودی حساسیت متوسط داشت (جدول ۴). به همین دلیل این پارامترها برای واسنجی مدل SWAP مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از داده‌های سال اول، واسنجی این مدل انجام شد. در مرحله واسنجی، مدل SWAP برای شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری آب به ترتیب دچار خطای بیش‌برآوردی، کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی شد (جدول ۵). دقت این مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد دانه و زیست‌توده خوب و برای شبیه‌سازی پارامتر بهره‌وری آب عالی بود. کارایی مدل SWAP برای شبیه‌سازی هر سه پارامتر مورد مطالعه مطلوب بود. بنابراین، مقادیر به دست آمده برای پارامترهای واسنجی شده (جدول ۶) به منظور صحت‌سنجی مدل SWAP با استفاده از داده‌های سال دوم مورد استفاده قرار گرفت.

عملکرد دانه

نتایج صحت‌سنجی عملکرد دانه ذرت به همراه مقادیر مشاهداتی آن در جدول (۷) نشان داده شده است. کمینه، بیشینه و متوسط مقادیر مشاهداتی عملکرد دانه ذرت به ترتیب برابر با ۶/۷۹، ۱۱/۶۲ و ۹/۰۸ تن در هکتار بود. همین مقادیر برای عملکرد دانه شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۶/۶، ۱۱/۶ و ۸/۹۸ تن در هکتار به دست آمد. متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه ذرت برابر با ۰/۶۸ تن در هکتار تعیین شد.

جدول ٤- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت

عامل	مقدارSc در حالت ۲۵٪+	مقدارSc در حالت ۲۵٪-	درجه حساسیت
بارفشاری برای شروع جذب آب توسط ریشه	۱/۷	۲/۵	کم-متوسط
بارفشاری برای شروع بهینه جذب آب توسط ریشه	۴/۸	۳/۰	متوسط
ضریب نابودی نور پخش شده	۲/۱	۱/۵	متوسط-کم
ضریب نابودی نور مستقیم	۲/۰	۲/۶	متوسط
وزن خشک اولیه گیاه	۱/۹	۲/۳	کم-متوسط
شاخص سطح برگ در جوانه‌زنی	۲/۲	۱/۰	متوسط-کم
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۱/۵	۱/۴	کم
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۳/۲	۲/۷	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۳/۴	۸/۹	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ریشه	۳/۱	۳/۹	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۲/۸	۱/۱	متوسط-کم
آستانه پایین دما برای مرگ برگ‌ها	۱/۹	۲/۵	کم-متوسط

جدول ٥- مقایسه آماری نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ذرت با مدل SWAP در مرحله واسنجی

پارامتر	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
عملکرد دانه (تن در هکتار)	۰/۰۶	۰/۹۸	۰/۱۱	۰/۹۹	۰/۹۹
زیست‌توده (تن در هکتار)	-۱/۱۹	۲/۰۰	۰/۱۲	۰/۹۸	۰/۹۹
بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۹۹	۰/۹۹

جدول ٦- مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل SWAP

توضیح عامل	مقدار		واحد	توضیح
	KSC 500	KSC 302		
بارفشاری برای شروع جذب آب توسط ریشه	−۲۰	−۲۰	سانتی‌متر	واسنجی
بارفشاری برای شروع بهینه جذب آب توسط ریشه	−۲۵	−۲۵	سانتی‌متر	واسنجی
ضریب نابودی نور پخش شده	۰/۶	۰/۶	-	واسنجی
ضریب نابودی نور مستقیم	۰/۶	۰/۶	-	واسنجی
وزن خشک اولیه گیاه	۵۰	۵۰	کیلوگرم بر هکتار	واسنجی
شاخص سطح برگ در جوانه‌زنی	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	متر مربع بر متر مربع	واسنجی
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۰/۴۵	۰/۴۵	کیلوگرم بر هکتار ساعت ژول مربع	واسنجی
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۰/۶۷۰	۰/۶۷۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۰/۶۵۱	۰/۶۶۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ریشه	۰/۶۹۰	۰/۶۹۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۰/۶۵۸	۰/۶۵۸	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
آستانه پایین دما برای مرگ برگ‌ها	۱۰	۱۰	درجه‌سانتی‌گراد	واسنجی
دمای تجمعی از گلدهی تا بلوغ	۷۷۰	۶۹۵	درجه سانتی‌گراد	واسنجی
دمای تجمعی از جوانه‌زنی تا گلدهی	۸۶۵	۸۰۰	درجه سانتی‌گراد	واسنجی
مقدار رطوبت باقیمانده	۰/۰۱	۰/۰۱	سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌مترمکعب	واسنجی
مقدار رطوبت اشباع	۰/۴۲	۰/۴۲	سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌مترمکعب	واسنجی
هدایت هیدرولیکی اشباع	۱/۱۰	۱/۱۰	سانتی‌متر بر روز	واسنجی
پارامتر α	۰/۰۲۰	۰/۰۲۰	-	واسنجی
پارامتر n	۱/۱	۱/۱	-	واسنجی

بنابراین نتیجه می‌توان گرفت که خطای مدل SWAP در برآورد عملکرد دانه قابل قبول بود. این نتایج از مقادیر خطای اعلام شده توسط محققان دیگر از جمله بنفنت و بوما، امیری و جنوبی کمتر بود (Bonefante and Bouma, 2015; Amiri; 2016 and Jonubi et al., 2018). کمتر بود. احتمالاً علت آن واسنجی بهتر مدل SWAP در این تحقیق بود. با این وجود، این محققان دقت مدل SWAP را در محدوده به دست آمده قابل قبول گزارش کردند. تفکیک تیمارهای مختلف در جدول (۸) نشان داده شده است. کمینه و بیشینه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه ذرت در رقم SC302 به ترتیب برابر با ۰/۰۲ و ۰/۹ تن در هکتار و در رقم SC500 به ترتیب برابر با ۰/۰۷ و ۱/۰۲ تن در هکتار به دست آمد. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه ذرت برای این دو رقم به ترتیب برابر با ۰/۰۷ و ۱/۰ تن در هکتار بود.

جدول ۷- مقایسه نتایج بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد ذرت (تن در هکتار) با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا	تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا
V1I1D1	۶/۸	۷/۹	۱/۸	V2I1D1	۶/۹	۶/۷	۰/۴
V1I1D2	۶/۹	۸/۲	۲/۲	V2I1D2	۷/۰	۷/۵	۰/۸
V1I1D3	۶/۹	۸/۱	۲/۰	V2I1D3	۶/۷	۷/۴	۱/۰
V1I2D1	۸/۳	۶/۶	۳/۱	V2I2D1	۹/۶	۸/۷	۱/۵
V1I2D2	۷/۷	۶/۹	۱/۴	V2I2D2	۹/۰	۸/۹	۰/۳
V1I2D3	۸/۵	۹/۳	۱/۳	V2I2D3	۱۰/۳	۱۱/۲	۱/۵
V1I3D1	۱۰/۲	۸/۹	۲/۲	V2I3D1	۱۰/۱	۱۰/۶	۰/۸
V1I3D2	۱۰/۵	۹/۷	۱/۵	V2I3D2	۱۱/۰	۱۱/۱	۰/۱
V1I3D3	۱۰/۲	۱۰/۳	۱/۲	V2I3D3	۱۱/۶	۱۱/۶	۰/۰

براساس این نتایج، دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی رقم SC302 بیشتر از رقم SC500 بود. چون این تحقیق در تابستان انجام شد و مدل SWAP به پارامترهای مرتبط با دما و جذب نور حساسیت زیادی دارد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۷)؛ دقت این مدل برای شبیه‌سازی رقم زودرس SC302 بهتر بود.

کمینه اختلاف بین مقادیر عملکرد دانه ذرت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در تیمارهای آبیاری I1، I2 و I3 به ترتیب برابر با ۰/۲۳، ۰/۱۸ و ۰/۰۲ تن در هکتار بود. بیشینه اختلاف به دست آمده برای تیمارها مذکور نیز به ترتیب برابر با ۱/۲۷، ۱/۷۸ و ۱/۳ تن بر هکتار به دست آمد. متوسط این اختلاف برای این تیمارها به ترتیب برابر با ۰/۸۰، ۰/۸۷ و ۰/۴۶ تن در هکتار تعیین شد. این نتایج نشان داد که گرچه رابطه منظمی بین مقدار آب آبیاری و دقت مدل SWAP وجود نداشت؛ با این وجود در تیمار آبیاری بیش از حد نیاز (I3)، مدل SWAP دقت بهتری نسبت به سایر تیمارها داشت. این نتایج با مشاهدات امیری و شیرشاهی (۱۳۹۶)، حسن لی و همکاران (Hasanli et al ., 2016) و ژائو و همکاران (Zhao et al., 2020) مطابقت داشت. روند منظمی بین مقدار تراکم و دقت مدل SWAP مشاهده شد. با افزایش مقدار تراکم بوته، اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه ذرت کاهش یافت. با توجه به کربن‌محور بودن مدل SWAP، علت آن تبدیل بیشتر انرژی دریاقتی خورشید به کربن (عملکرد) است. متوسط اختلاف عملکرد دانه بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای تیمارهای D1، D2 و D3 به ترتیب برابر با ۰/۹۵، ۰/۶۱ و ۰/۵۸ تن در هکتار به دست آمد.

جدول ۸- مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط اختلاف بین عملکرد دانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

پارامتر	تیمارها	کمینه	بیشینه	متوسط مشاهداتی	متوسط شبیه‌سازی	درصد خطا
رقم	V1	۰/۰۸	۳/۳۰	۸/۵	۸/۴	۰/۱
	V2	۰/۰۸	۲/۴۷	۹/۲	۹/۳	۰/۲
مقدار آبیاری	I1	۰/۰۸	۳/۳۰	۶/۹	۷/۶	۰/۰
	I2	۰/۱۲	۳/۶۸	۸/۹	۸/۶	۰/۱
	I3	۰/۰۸	۱/۸۶	۱۰/۶	۱۰/۴	۰/۲
تراکم	D1	۰/۱۶	۳/۶۸	۸/۷	۸/۲	۰/۲
	D2	۰/۰۸	۱/۶۷	۸/۷	۸/۷	۰/۲
	D3	۰/۰۸	۱/۷۳	۹/۱	۹/۷	۰/۲

جدول ۹- مقایسه نتایج بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده زیست‌توده ذرت با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا	تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا
V1I1D1	۱۵/۲	۱۱/۹	۵/۸	V2I1D1	۱۴/۰	۱۳/۲	۱/۳
V1I1D2	۱۴/۰	۱۳/۲	۱/۴	V2I1D2	۱۳/۶	۱۳/۵	۰/۱
V1I1D3	۱۲/۷	۱۴/۴	۳/۰	V2I1D3	۱۳/۷	۱۳/۹	۰/۳
V1I2D1	۱۹/۵	۱۵/۸	۶/۵	V2I2D1	۱۸/۹	۱۶/۴	۴/۰
V1I2D2	۱۷/۳	۱۶/۴	۱/۶	V2I2D2	۱۸/۰	۱۸/۱	۰/۲
V1I2D3	۱۶/۳	۱۷/۸	۲/۶	V2I2D3	۱۶/۹	۱۸/۵	۲/۷
V1I3D1	۲۰/۸	۲۱/۰	۰/۳	V2I3D1	۲۱/۷	۱۹/۸	۳/۲
V1I3D2	۲۰/۵	۲۱/۱	۰/۹	V2I3D2	۲۲/۲	۲۰/۵	۲/۹
V1I3D3	۲۰/۹	۲۰/۹	۰/۱	V2I3D3	۲۱/۹	۲۰/۶	۲/۲

زیست‌توده

بیشینه، کمینه و متوسط مقادیر زیست‌توده مشاهداتی ذرت به ترتیب برابر با ۱۲/۶، ۲۲/۱ و ۱۷/۹۸ تن در هکتار به دست آمد (جدول ۸). این مقادیر برای زیست‌توده شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۱۱/۹، ۲۱/۰۸ و ۱۷/۴۸ تن در هکتار بود. کمینه، بیشینه و متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی زیست‌توده ذرت به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۳/۶۸ و ۱/۲۴ تن در هکتار بود. بنابراین می‌توان نتیجه‌گرفت که دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت قابل قبول بود. این نتایج با گزارش منتشر شده توسط Zhao et al., (۲۰۲۰) مطابقت داشت.

تفکیک تیمارها به صورت رقم، مقدار آب آبیاری و تراکم بوته در جدول (۱۰) نشان داده شده است. مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای رقم SC500 به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۳/۳۰ و ۱/۴۱ تن بر هکتار و برای رقم SC302 به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۲/۴۷ و ۱/۱۱ تن بر هکتار بود. براساس این نتایج، دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی زیست‌توده رقم SC302 بهتر از رقم SC500 بود. کمینه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی زیست‌توده ذرت برای تیمارهای آبیاری I1، I2 و I3 به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۰۸ تن در هکتار به دست آمد. بیشینه اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی زیست‌توده ذرت برای تیمارهای مذکور به ترتیب برابر با ۳/۳۰، ۳/۶۸ و ۱/۸۶ تن در هکتار بود. متوسط این اختلاف نیز به ترتیب برابر با ۱/۱۵، ۱/۷۱ و ۰/۹۳ تن در هکتار تعیین شد. لیکن دقت مدل SWAP در تیمار I3 بیشتر از دو تیمار دیگر بود. تغییر تراکم بوته اثر منظمی بر دقت مدل SWAP نداشت. با این وجود، کمترین دقت شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت در تراکم D1 کمتر از دو تراکم دیگر بود.

جدول ۱۰- مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط اختلاف بین زیست‌توده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

پارامتر	تیمارها	کمینه	بیشینه	متوسط مشاهداتی	متوسط شبیه‌سازی	درصد خطا
رقم	V1	۰/۰۷	۱/۰۲	۱۷/۵	۱۶/۹	۰/۳
	V2	۰/۰۲	۰/۹	۱۷/۹	۱۷/۲	۰/۳
مقدار آبیاری	I1	۰/۲۳	۱/۲۷	۱۳/۹	۱۳/۳	۰/۱
	I2	۰/۱۸	۱/۷۸	۱۷/۸	۱۷/۲	۰/۲
	I3	۰/۰۲	۱/۳	۲۱/۳	۲۰/۶	۰/۰
تراکم	D1	۰/۲۳	۱/۷۸	۱۸/۳	۱۶/۴	۰/۴
	D2	۰/۰۹	۱/۲۷	۱۷/۶	۱۷/۱	۰/۴
	D3	۰/۰۲	۱/۱۸	۱۷/۱	۱۷/۷	۰/۳

بهره‌وری آب

بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ذرت دانه‌ی در جدول (۱۱) نشان داده شده است. کمترین، بیشترین و متوسط مقادیر بهره‌وری آب مشاهداتی به ترتیب برابر با ۰/۸۳، ۱/۱۰ و ۰/۹۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این مقادیر با استفاده از مدل SWAP به ترتیب برابر با ۰/۷۴، ۱/۱۸ و ۰/۹۹ کیلوگرم بر مترمکعب شبیه‌سازی شد. کمترین، بیشترین و متوسط اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱، ۰/۲۲۲ و ۰/۰۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد. مقایسه نتایج به دست آمده براساس تفکیک تیمارها در جدول (۱۲) نشان داده شده است. متوسط عملکرد رقم‌های SC500 و SC302 به ترتیب برابر با ۸/۵ و ۹/۲ تن در هکتار بود (جدول ۷). همچنین براساس جدول (۸)، اختلاف عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای هر دو رقم مورد مطالعه بسیار کم بود. با این وجود، چون رقم SC302 به مقدار آب بیشتری برای رشد نیاز داشت، دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب هر دو رقم مورد مطالعه تقریباً یکسان بود (جدول ۱۲). افزایش مقدار آب آبیاری نیز سبب کاهش اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی شد. این روند برای تراکم بوته نیز مشاهده گردید.

مقایسه کلی

مقایسه آماری نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت در مرحله صحت‌سنجی در جدول (۱۳) نشان داده شده است. براساس این نتایج، مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی و در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت دانه‌ای دچار خطای کم‌برآوردی شد. دقت این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت، براساس آماره‌های NRMSE و RMSE، در رتبه خوب قرار داشت. کارایی این مدل

برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت مطلوب بود. این نتایج با مشاهدات Bonefante and Bouma (2015)، Amiri (2016) و Jonubi et al. (2018) مطابقت داشت. دقت مدل SWAP برای شبیه‌سازی زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت در رتبه خوب قرار داشت. کارایی این مدل نیز برای شبیه‌سازی این دو پارامتر مطلوب بود.

جدول ۱۱- مقایسه نتایج بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بهره‌وری آب ذرت با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا	تیمار	مقدار مشاهداتی	مقدار شبیه‌سازی	درصد خطا
V1I1D1	۰/۹۴	۱/۰۷	۲/۲	V2I1D1	۰/۹۳	۱/۱۶	۳/۹
V1I1D2	۰/۹۵	۱/۱۱	۲/۸	V2I1D2	۰/۹۷	۱/۰۰	۰/۰
V1I1D3	۰/۹۴	۱/۱۰	۲/۷	V2I1D3	۰/۹۳	۰/۹۹	۱/۰
V1I2D1	۰/۹۰	۰/۹۳	۰/۳	V2I2D1	۱/۰۱	۱/۱۵	۲/۳
V1I2D2	۰/۸۳	۰/۷۴	۱/۷	V2I2D2	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۰
V1I2D3	۰/۹۲	۱/۰۰	۱/۳	V2I2D3	۱/۱۰	۱/۱۸	۱/۳
V1I3D1	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۵	V2I3D1	۰/۸۹	۰/۹۵	۱/۰
V1I3D2	۰/۹۴	۰/۸۷	۱/۳	V2I3D2	۰/۹۷	۱/۰۹	۱/۹
V1I3D3	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۰	V2I3D3	۱/۰۲	۱/۰۴	۰/۰

جدول ۱۲- مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط اختلاف بین بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل SWAP (V1 و V2 به ترتیب نشان دهنده ارقام SC500 و SC302؛ I1، I2 و I3 به ترتیب نشان دهنده مقادیر آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و D1، D2 و D3 به ترتیب نشان دهنده تراکم‌های ۷۵۰۰۰، ۸۵۰۰۰ و ۹۵۰۰۰ در رقم SC500 و ۸۰۰۰۰، ۹۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ در رقم SC302 هستند).

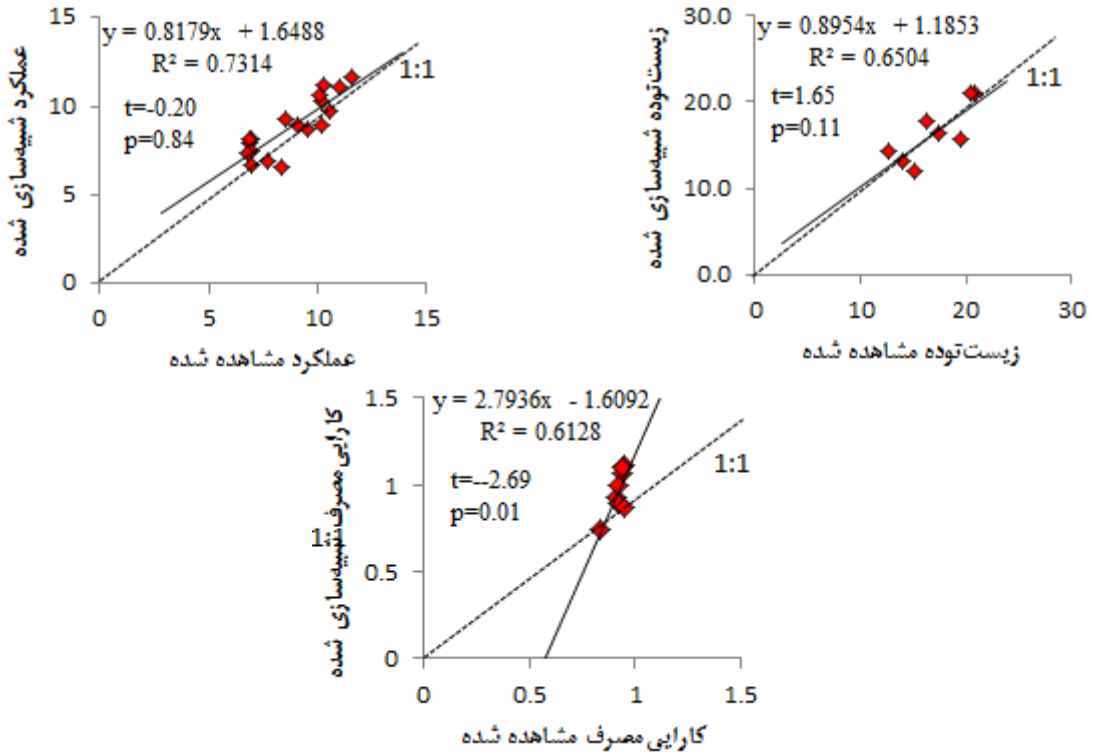
پارامتر	تیمارها	کمینه	بیشینه	متوسط مشاهداتی	متوسط شبیه‌سازی	درصد خطا
رقم	V1	۰/۰۰۱	۰/۱۲۷	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳	۰/۰۸۳
	V2	۰/۰۱۲	۰/۲۲۲	۰/۰۸۲	۰/۰۸۲	۰/۰۸۲
مقدار آبیاری	I1	۰/۰۲۳	۰/۲۲۲	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵	۰/۱۲۵
	I2	۰/۰۲۱	۰/۱۳۵	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴
	I3	۰/۰۰۱	۰/۱۱۳	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸	۰/۰۴۸
تراکم	D1	۰/۰۲۱	۰/۲۲۲	۰/۰۹۸	۰/۰۹۸	۰/۰۹۸
	D2	۰/۰۲۳	۰/۱۶۴	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵	۰/۰۸۵
	D3	۰/۰۰۱	۰/۱۵۷	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳	۰/۰۶۳

جدول ۱۳- مقایسه آماری نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ذرت با مدل SWAP در مرحله صحت‌سنجی

پارامتر	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
عملکرد دانه (تن در هکتار)	۰/۰۹	۱/۲۹	۰/۱۴	۰/۹۸	۰/۹۹
زیست‌توده (تن در هکتار)	-۱/۳۸	۲/۴۶	۰/۱۳	۰/۹۸	۰/۹۹
بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۹۸	۰/۹۹

نتایج همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است. براساس ضریب تبیین به دست آمده برای هر سه پارامتر، مدل SWAP توانایی لازم برای تطبیق نتایج عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت با مقادیر مشاهداتی را داشت. معادله خط حاصل از رگرسیون بین عملکرد دانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل SWAP نشان داد که این مدل در همه شرایط مقدار عملکرد را بیشتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی کرد. به همین دلیل این مدل برای هر شرایطی میزان عملکرد را بیشتر از مقدار واقعی تعیین می‌کند. در شبیه‌سازی بهره‌وری آب، تا مقدار ۰/۹۴ کیلوگرم بر متر مکعب، مدل SWAP دچار خطای کم‌برآوردی شد. برای بهره‌وری آب مشاهداتی بیشتر از ۰/۹۴ کیلوگرم بر متر مکعب، مقدار شبیه‌سازی شده برای این

پارامتر بیشتر از مقدار واقعی شد. با توجه به اینکه در اکثر تیمارهای مورد مطالعه مقدار بهره‌وری آب بیشتر از این مقدار بود، خطای کلی برای شبیه‌سازی این پارامتر از نوع بیش برآوردی محاسبه شد. در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت، تا مقدار ۱۱/۳۳ تن در هکتار، این مدل دچار خطای بیش‌برآوردی شد. برای مقادیر بیشتر از این مقدار، خطای مدل SWAP از نوع کم‌برآوردی بود. با توجه به اینکه مقدار زیست‌توده مشاهداتی ذرت در همه تیمارها بیشتر از این مقدار بود، بنابراین خطای محاسبه شده برای زیست‌توده ذرت از نوع کم‌برآوردی تعیین شد. بنابراین، در صورت استفاده از این مدل برای شرایط کم‌آبیاری و یا دیم، احتمالاً مقدار زیست‌توده بیشتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی می‌شود. براساس آزمون t، تفاوت معنی‌داری بین واریانس‌های عملکرد و زیست‌توده مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود نداشت. لیکن بین بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی تفاوت معنی‌داری وجود داشت. در نتیجه، اختلاف معنی‌داری بین همبستگی به دست آمده برای عملکرد و زیست‌توده مشاهده نشد ولی اختلاف معنی‌داری بین همبستگی به وجود بهره‌وری آب وجود داشت.



شکل ۲- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت با مدل SWAP؛ نتایج آزمون t و سطح معنی‌داری (مقدار p) بر روی نمودار نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور ارزیابی مدل SWAP برای شبیه‌سازی اثر رقم، تراکم و مقدار آب آبیاری بر عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب ذرت دانه‌ای انجام شد. برای شبیه‌سازی عملکرد دانه، مدل SWAP دقت بالایی برای رقم V1، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D3 داشت. در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت دانه‌ای، دقت مدل SWAP برای رقم V2، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D2 و در شبیه‌سازی بهره‌وری آب، دقت این مدل برای هر دو رقم، مقدار آب آبیاری I3 و تراکم D3 مناسب‌تر از سایر تیمارها بود. به‌طور کلی، این مدل گیاهی در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی و در شبیه‌سازی زیست‌توده ذرت دانه‌ای دچار خطای کم‌برآوردی شد. خطای مدل SWAP برای شبیه‌سازی هر سه پارامتر ذکر شده خوب بود. کارایی مدل SWAP برای شبیه‌سازی این پارامترها مطلوب بود. بنابراین می‌توان از این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب در شرایط مورد نظر استفاده کرد.

منابع

ابراهیمی‌پاک، ن.ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی‌سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت. حفاظت

منابع آب و خاک. ۸(۱): ۱۳۲-۱۱۷.

احمدی، م.، خاشعی‌سیوکی، ع. و سیاری، م.ح. ۱۳۹۵. بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (*Corocus sativus* L.) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. بوم‌شناسی کشاورزی. ۸(۴): ۵۲۰-۵۰۵.

اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. مدیریت آب در کشاورزی. ۵(۲): ۶۴-۵۳.

امیری، ا.، و شیرشاهی، ف. ۱۳۹۶. ارزیابی عملکرد ذرت دانه‌ای به مدیریت کم‌آبیاری با استفاده از مدل SWAP. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. ۱۱(۴): ۷۷۴-۷۵۹.

بادیه‌نشین، ع.، نوری، ح. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۳. بهبود برآورد عملکرد محصول در مدل شبیه‌سازی SWAP با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۴): ۳۸۸-۳۷۹.

شفیعی، م.، قهرمان، ب.، ثقفیان، ب.، داوری، ک. و وظیفه‌دوست، م. ۱۳۹۷. تحلیل حساسیت جامع پارامترهای گیاهی مدل WOFOST برای گیاهان ذرت و گندم در شبیه‌سازی عملکرد محصول. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹(۴):۸۳۹-۸۳۱.

شهیدی، ع.، و احمدی، م. ۱۳۹۳. آموزش تصویری مدل SWAP. انتشارات کلک زرین.

شهیدی، ع.، و احمدی، م. ۱۳۹۴. توابع تولید گیاهی در مناطق خشک. انتشارات دانشگاه بیرجند.

علیزاده، ح.، نظری، ب.، پارسی‌نژاد، م.، رمضانی‌اعتدالی، ه. و جانباز، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج. آبیاری و زهکشی ایران. ۴: ۲۸۳-۲۷۳.

محمدی، م.، داوری، ک.، قهرمان، ب.، انصاری، ح.، و حق‌وردی، ا. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش همزمان شوری و خشکی. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹(۳): ۲۹۵-۲۷۷.

نخجوانی‌مقدم، م.م.، دهقانی‌سانیج، ح.، اکبری، م.، و صدرقائن، س.ح. ۱۳۸۹. اثر سطوح مختلف آب بر کارایی مصرف آب رقم ذرت دانه‌ای زودرس ۳۰۲ در روش آبیاری بارانی. آب و خاک. ۲۴(۶): ۱۲۳۶-۱۲۴۵.

نخجوانی‌مقدم، م.م.، نجفی، ا.، صدرقائن، س.ح. و فرهادی، ا. ۱۳۹۰. اثر سطوح مختلف آبیاری و تراکم بوته بر عملکرد و اجزا عملکرد دانه و کارایی مصرف آب در ذرت دانه‌ای سینگل کراس ۳۰۲. به‌زراعی نهال و بذر (نهال و بذر). ۲۷-۲(۱): ۹۰-۷۳.

وطن‌خواه، ا.، و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در طول جویچه. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۷(۳): ۵۰۴-۴۹۵.

یعقوب‌زاده، م.، احمدی، م.، سیدکابلی، ح.، زمانی، غ. و امیرآبادی‌زاده، م. ۱۳۹۶. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص‌های ETDI و SPI. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴(۴): ۶۱-۴۳.

Ahmadee, M., Khashei Siuki, A., and Hashemi, S.R., 2014. The effect of magnetic water and calcific and potasic zeolite on the yield of Lepidium Sativum L, International journal of Advanced Biological and Biomedical Research 2(6): 2051-2060.

Amiri, E. 2017. Evaluation of water schemes for maize under arid are in Iran using the SWAP model. Communications in Soil Science and Plant Analysis 48(16): 1963-1976.

Bonefante, A., Basile, A., Acutis, M., Mascellis, R. De., Manna, P., Perego, A., and Terribile, F. 2010. SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in northern Italy. Agricultural Water Management 97(7): 1051-1062.

Bonefante, A., and Bouma, J. 2015. The role of soil series in quantitative land evaluation when expressing effects of climate change and crop breeding on future land use. Geroderma 250-260: 187-195.

Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., and Cusicanqui, JA. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with FAO-AquaCrop. Agronomy 101: 499-508.

Hassanli, M., Ebrahimian, H., Mohammadi, E., Rahimi, A., and Shokouhi, A. 2016. Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMED, and SWAP models. Agricultural Water Management 176: 91-99.

Jonubi, R., Rezaverdinejad, V., and Salemi, H. 2017. Enhancing field scale water productivity for several rice cultivars under limited water supply. Paddy and Water Environment 16(1): 125-141.

Ma, Y., Feng, Sh., Huo, Z., and Song, X. 2011. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. Mathematical and Computer Modeling 54(3-4): 1044-1052.

Van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J.G., Feddes, R.A., Kabat, P., van Walsum, P.E.V., Groenendijk, P., and van Diepen, C.A. 1997. Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University,

agrocoenosis using the SWAP model and ground and monitoring data. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 16(3): 33-43.

Zhao, Y., Mao, X., and Shukla, M.K. 2020. Heat dynamics and seed-maize growth under film mulching. Agricultural and Forest Meteorology. 108127: 292-293.

167 pp.

Yung, K., Anan, M., and Hamada, K. 2016. Evaluation of drainage ability of a shallow subsurface drain in a rotational rice paddy field. CIGR-AgEng Conference, 26-29 June 2016, Aarhus, Denmark. Pp. 1-9.

Zeyliger, A.M., Ermolaeva, O.S., Muzylev, E.L., Startseva, Z.P., and Sukharev, Yu.I. 2019. Computer analysis of water stress regimes of an irrigated

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1893-1907

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۰۷-۱۸۹۳

Evaluation of SWAP for Simulation of Median and Early Corn Cultivar under Different Plant Densities under Sprinkler Irrigatin

Sh. Karimi[1], A. Egdernezhad[2*], M.M. Nakhjavanimoghaddam[3]
Recived: Oct.25, 2020 Accepted: Dec.05, 2020

Abstract

Corn is one of the most important agricultural crops in Iran. In order to achieve appropriate yield, biomass and water use efficiency, it is necessary to evaluate the effect of irrigation amounts, cultivar types and plant densities on corn yield. Because of time-consuming and high cost in field studies, crop models have been proposed to study mentioned scenarios. In order to evaluate SWAP, a field study was conducted on two maize cultivars (V1 and V2 representing median cultivar SC500 and early cultivar Sc302, respectively) under different plant densities (D1, D2 and D3 representing 75000, 85000 and 95000 plants.ha-1, respectively, for SC500 and 80000, 90000 and 100,000 plants.ha-1 for SC302 cultivar) with different irrigation volumes (I1, I2 and I3 indicate as 75, 100 and 125% irrigation demand, respectively) in Karaj during two years (2006-2007). Results showed that SWAP had the best accuracy to simulate corn yield in V1, I3 and D3 in comparison to other treatments. SWAP accuracy was better in V2, I3 and D2 treatments for simulation of corn biomass. The model precision for water productivity was better in both cultivars, I3 and D3. In general, based on normalized root mean square error, the model accuracy for simulation of corn yield, biomass and water productivity were 0.14, 0.13 and 0.16, respectivly. SWAP efficiencies for mentioned parameters, with values equal to 0.98, were acceptable. So, it is proposed to use SWAP for simulation of yield, biomass and water use efficiency under above mentioned treatments.

Keywords: Copping model, Irrigation amount, Plant densities, Water productivity

1- M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
3- Assistant Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: a_eigder@ymail.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۱۹-۱۹۰۸

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1908-1919

مقاله پژوهشی

تعیین و ارزیابی آب کاربردی و بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در باغات انگور و گردو منطقه ملایر همدان

علی قدمی فیروزآبادی[1*]، سید محسن سیدان[2]، حمید زارع ابیانه[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۵

چکیده

استفاده بهینه و مناسب از منابع آب با توجه به بحران آب و خشکسالی‌های اخیر در کشور امری بسیار ضروری است. در این راستا استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری از جمله راهکارهایی است که به‌منظور افزایش بهره‌وری آب در کشور توسعه یافته است. لذا این تحقیق به‌منظور مقایسه میزان بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و سطحی و بازده تولید محصول در باغات انگور و گردو شهرستان ملایر از توابع استان همدان انجام شد. در این پژوهش حجم آب کاربردی در باغات مورد مطالعه با اندازه‌گیری دبی منبع آبی، تعداد آبیاری و ساعات آبیاری در هر نوبت محاسبه شد. نیاز آبی بر اساس آمار و اطلاعات هواشناسی سال‌های اخیر محاسبه و با میزان نیاز آبی برآورد شده در سند ملی آب مقایسه شد. بهره‌وری آب بر اساس میزان عملکرد محصول به ازای واحد حجم آب (CPD)، درآمد به ازای واحد حجم آب (BPD)، و بازده خالص به ازای واحد حجم آب (NBPD) محاسبه شد. نتایج تحقیق نشان داد که روش آبیاری قطره‌ای نسبت به روش آبیاری سطحی به‌ترتیب باعث کاهش ۴۰ و ۵۴ درصدی آب کاربردی محصول انگور و گردو شد. میزان بهره‌وری آب در باغات انگور و گردو در آبیاری قطره‌ای به‌ترتیب ۲۵/۱ و ۱/۸۱ و در آبیاری سطحی ۷/۸ و ۰/۸۸ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد. نیاز آبی محاسباتی بر اساس آمار و اطلاعات هواشناسی ده ساله اخیر در این دو محصول بیشتر از میزان ذکر شده در سند ملی آب بود. مقایسه میزان متوسط آب کاربردی با نیاز آبی محاسباتی حاکی از کم‌آبیاری در اغلب باغ‌های مورد مطالعه بود. مقایسه بهره‌وری اقتصادی آب در دو محصول نشان داد که این شاخص در روش آبیاری قطره‌ای به مراتب بالاتر از روش آبیاری سطحی است. میزان شاخص بازده خالص به ازای واحد آب کاربردی (NBPD) در روش آبیاری قطره¬ای در دو محصول انگور و گردو به‌ترتیب ۲۳۱ و ۱۱۷ و در روش آبیاری سطحی ۱۱۰ و ۱۱۵ هزار ریال بر متر مکعب تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، آبیاری سطحی، بازده خالص، عملکرد محصول

مقدمه

آب یکی از مهمترین و اساسی‌ترین عوامل حیات و پیشرفت جوامع بشری است. عمده‌ترین مصرف منابع آب کشور در بخش کشاورزی است. نتایج برخی گزارش‌ها حاکی از آن است که بیش از ۷۰ درصد از حجم آبی کاربردی در کشور در بخش کشاورزی استفاده می‌شود (ناصری و همکاران، ۱۳۹۶). ارزیابی‌های وضع موجود بیانگر آن است که در حال حاضر نرخ بهره‌برداری از منابع آب و خاک علیرغم بهبودهای مقطعی و جزئی (به خصوص در یک دهه اخیر) وضعیت مطلوبی نداشته و روند اصلاحات و ارتقاء بهره‌وری آب هنوز بطئی است (عباسی و همکاران، ۱۳۹۴). اثرات منفی ناشی از عدم بهره‌برداری مناسب از منابع آب و کاهش چشمگیر و کمبود این منابع بر روی درآمد، تولید و بازدهی در بخش کشاورزی نه تنها باعث دلسرد شدن بهره‌برداران کشاورزی و ایجاد مشکلات مالی فراوان برای آنها شده است، بلکه اقتصاد کشور را نیز برای دستیابی به توسعه پایدار با مشکل روبرو کرده است.

در استان همدان نیز مانند بسیاری از مناطق کشور بیشترین مصرف آب اختصاص به بخش کشاورزی دارد. درسال‌های اخیر، به دلیل کاهش بارندگی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، این استان با کاهش سالانه بیش از ۲۰۰ میلیون متر مکعب ذخیره آب‌های

۱- استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران
۲- استادیارپژوهش بخش تحقیقات اقتصادی،اجتماعی وترویج کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران
۳- استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: a.ghadami@areeo.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.30.1

زیرزمینی روبه‌رو شده است. هم اکنون دشت‌های استان از جمله دشت ملایر با محدودیت شدید آبی مواجه است (شرکت آب منطقه‌ای استان همدان، ۱۳۹۶). تغییرات سطح ایستابی این شهرستان نشان می‌دهد که متوسط کسری مخزن منابع آب زیرزمینی این شهرستان حدود ۲۵ میلیون متر مکعب است. میانگین افت سالانه بلند مدت سطح ایستابی دشت ملایر برابر با ۱/۲۵ – متر در سال است. با توجه به موارد فوق ضرورت استفاده مناسب از منابع محدود آب و افزایش بهره‌وری آب بیش از پیش نمایان می‌شود. در این راستا سامانه‌های نوین آبیاری در حال توسعه هستند. اطلاع از حجم آب کاربردی، بهره‌وری و نیاز آبیاری انگور و گردو در دو سستم آبیاری قطره‌ای و سطحی در شهرستان ملایر می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های استانی موثر و آگاهی از این اطلاعات می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی افزایش عملکرد انگور و گردو و ارتقای بهره‌وری آب این محصول باشد.

مولائی و مصطفی‌زاده (۱۳۸۶) در تحقیقی به بررسی راندمان وعملکرد روش آبیاری حوضچه‌ای و همچنین مقایسه آن با روش معمول (آبیاری سطحی) پرداخته‌اند. نتایج این ارزیابی نشان داد که متوسط راندمان آبیاری درختان گردو به روش حوضچه‌ای حدود ۹۰ درصد است، که نشان دهنده راندمان بالا در مقایسه با روش آبیاری قطره‌ای می‌باشد.

نعمت‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) در آزمایشی به‌منظور مقایسه سه روش آبیاری سطحی، قطره‌ای و پاششی (میکروجت) با طرح بلوک‌های کامل تصادفی به سه تکرار بر روی ژنوتیپ‌های جمع‌آوری شده گردو پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که میزان عملکرد برای سیستم آبیاری پاششی حدود ۲۳۵۰ کیلو در هکتار و برای قطره‌ای ۲۲۰۰ کیلو در هکتار و برای سیستم آبیاری سطحی ۱۵۵۰ کیلو در هکتار حاصل گردیده و میزان رشد رویشی در روش آبیاری سطحی به نسبت ۱۲ و ۱۵ درصد بترتیب کمتر از رشد رویشی سامانه‌های قطره‌ای و پاششی بوده است.

نتایج مطالعه دشتی و احمدآلی (۱۳۹۲) در ۹۰ باغ سیب در شهرستان ارومیه نشان داد که افزایش سود حاصل از بکارگیری هر متر مکعب آب در سیستم آبیاری میکرو به جای آبیاری سطحی، ۱۳۰۱ ریال می‌باشد. شاخص بهره‌وری آب برای سیستم میکرو ۱۶/۴ کیلوگرم و برای سیستم سطحی ۲۲/۲ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. بر اساس شاخص NBPD، به ازای هر واحد حجم آب کاربردی، سود خالص در سیستم آبیاری میکرو ۴۶۴۴۵ ریال و در سیستم آبیاری سطحی ۲۳۳۶۹ ریال به دست آمد.

نصیبی و همکاران (۱۳۹۲) به منظور بررسی تاثیر سطوح مختلف تنش خشکی و تعیین حد تحمل نهال‌های گردو، آزمایشی در قالب طرح کاملا تصادفی در یک گلخانه کاملا کنترل شده اجرا نمودند. در این پژوهش، سه سطح تنش خشکی شامل تیمار شاهد (۸۰ درصد ظرفیت زراعی)، تنش متوسط (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و تنش شدید (۲۰ درصد ظرفیت زراعی) اعمال شد. نتایج آنها نشان داد که نهال‌های گردو قادر به تحمل تنش خشکی متوسط در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز نمی‌باشند و این می¬تواند روی گیرایی پیوند و رشد پیوندک نیز تاثیر منفی بگذارد.

زمانی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی بهره‌وری اقتصادی آب در محصولات مختلف زراعی در دشت بهار پرداخته‌اند. در این تحقیق از شاخص های فیزیکی و مالی بهره‌وری آب شامل شاخص عملکرد به ازای واحد حجم آب (CPD)، درآمد به ازای واحد حجم آب (BPD)، و بازده خالص به ازای واحد حجم آب (NBPD)، برای محاسبه بهره‌وری آب استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان داد که بهره‌وری آب در شیوه‌های نوین آبیاری های بطور معنی‌داری بیشتر از روش آبیاری سنتی بود.

پروین و همکاران (۱۳۹۳) به منظور بررسی تاثیر سطوح مختلف تنش خشکی بر برخی پارامترهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گردوی ایرانی و تعیین حد تحمل نهال‌ها به این تنش، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملا تصادفی با نه تیمار و ۲۰ تکرار در یک گلخانه کاملا کنترل شده به اجرا در آوردند. در این پژوهش، سه سطح تنش خشکی شامل تیمار شاهد (۸۰ درصد ظرفیت زراعی)، تنش متوسط (۵۰ درصد ظرفیت زراعی) و تنش شدید (۲۰ درصد ظرفیت زراعی) اعمال شده و اندازه‌گیری ها در سه مرحله زمانی انجام شد. نتایج مربوط به شاخص‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نشان داد که این شاخص ها تحت تاثیر سطوح مختلف تنش خشکی واقع شدند و مشخص گردید که نهال‌های گردو قادر به تحمل تنش خشکی متوسط در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز نمی‌باشند.

نیکانفر و رضایی (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای بر روی درختان انگور به محاسبه بهره‌وری انگور پرداخت. بیشترین کارایی مصرف آب با ۲/۲ کیلوگرم بر مترمکعب آب مربوط به روش آبیاری قطره‌ای بود و کارایی مصرف آب در آبیاری بابلر ۲/۱۶ و در آبیاری سطحی حدود ۱/۴۸ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شد.

محمودیان و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی به بررسی اثرات برهمکنش کائولین و تنش خشکی بر چهار رقم گردوی ایرانی پرداختند این آزمایش در قالب طرح اسپلیت فاکتوریل در واحد زمان با چهار فاکتور شامل آبیاری در دو سطح ۱۰۰٪ و ۵۰٪ همراه با محلول‌پاشی کائولین در چهار غلظت صفر، ۲/۵ و ۷/۵ درصد چهار رقم گردوی ایرانی چندلر، فرانکت، K ۷۲ و ژنوتیپ بذری طی دو سال ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۲ با سه تکرار در کشت و صنعت شه‌میرزاد انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت کائولین و افزایش میزان آبیاری سطح معنی‌داری از غلظت کلروفیل و محتوای آب برگ بهبود یافت. بیشترین RWC، ۵۸/۲۸ درصد در چند لر و کمترین مقدار در فرانکت ۴۷/۵۶ درصد مشاهده شد. در مجموع نتایج تحقیق آنها نشان

داد که رقم چندلر نسبت به سایر ارقام مورد بررسی تحمل بیشتری نسبت به کم‌آبی دارد و از طرف دیگر می¬توان با کاربرد کائولین به غلظت ۵ درصد اثرات کم‌آبی و تنش گرمایی را بر ارقام گردو کم نمود.

رضوی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی اثر رژیم‌های آبیاری و روش‌های آبیاری در درختان جوان گردو پرداختند آزمایشی در قالب سه بلوک مجزای کامل تصادفی در چهار تکرار در ایستگاه کهریز ارومیه با سه روش آبیاری میکروجت، قطره¬ای و بابلر با سه تیمار آب آبیاری با مقادیر ۵۵، ۷۵ و ۱۱۰ درصد تبخیر تجمعی از تشتک کلاس A در درختان ۵ ساله گردو اجرا گردید که آب مصرفی سه تیمار مقدار آبیاری به‌ترتیب ۴۸۷۰، ۶۴۰۰ و ۹۲۵۰ متر مکعب در هکتار بوده است. براساس نتایج آزمایش، تیمار۷۵ درصد از جهت کارآیی مصرف آب در کلاس A قرار گرفت و برتری خود را نشان داد. لذا تیمار ۷۵ درصد به لحاظ صرفه جویی در مصرف آب توصیه می‌گردد. همچنین هر دو تیمار روش آبیاری میکروجت و بابلر از نظر کارآیی مصرف آب در کلاس A قرار گرفته‌اند. درخصوص کارآیی مصرف آب، روش آبیاری بابلر با مقدار آب ۷۵ درصد در کلاس A قرار گرفت. لذا برای آبیاری باغات گردو هر دو روش آبیاری بابلر و میکروجت با سطح مصرف آب ۷۵ درصد توصیه می‌گردد. آنها مقدار آب مورد توصیه برای نهال‌های پنج ساله گردو، را ۶۴۰۰ مترمکعب در هکتار بیان نمودند.

شاهرخ‌نیا و کرمی (۱۳۹۶) در بررسی تیمارهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی بر عملکرد کمی و کیفی انگور نشان داد که عملکرد کمی و کیفی انگور تحت تاثیر این تیمارها نبوده ولی تیمار تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی، حدودا نقطه آغاز تنش آبی در گیاه می‌باشد. بنابراین می¬توان گفت بهترین میزان آب آبیاری، معادل ۶۰ درصد نیاز آبی برآورد شده از روش پنمن مانتیث با حدود ۵۸۰۰ مترمکعب درهکتار می‌باشد.

کوهن و همکاران در تحقیقی اثر مقادیر مختلف آبیاری بر رشد و کمیت و کیفیت محصول درخت گردو در منطقه رویس اسپانیا را ارزیابی نمودند. این تحقیق روی درختان گردوی ۵ ساله با فواصل یکنواخت ۷×۶ متر در قطعه‌ای به وسعت ۰/۶ هکتار در یک خاک لوم شنی اجرا گردید. نتایج پژوهش آنها نشان داد که با ۳۰ درصد کاهش آبیاری سطح کل برگ، عملکرد و اندازه محصول کاهش می‌یابد و بیشترین عملکرد در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی حاصل می‌گردد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که کاهش ۲۰ درصدی آبیاری باعث کاهش اندک عملکرد شده اما کیفیت محصول بیشتر می‌گردد. بر اساس نتایج این تحقیق نیاز آبی خالص درخت گردو ۳۹۷۰ مترمکعب در هکتار برآورد گردید (Cohen et al., 1997).

یونوسا و همکاران روش های مختلف برآورد نیاز آبی انگور را مورد مطالعه و مقایسه قرار دادند آنها روش پنمن مانتیث را بعنوان روشی مناسب معرفی نمودند که با روشهای دیگر کمتر از ۱۰ درصد تفاوت دارد (Yunusa et al., 2000).

لامپینن و همکاران در تحقیقی مدیریت آبیاری درخت گردو را با استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق، خاک و گیاه در کالیفرنیای آمریکا انجام دادند. در این تحقیق از دستگاه نوترون متر و بلوک‌های گچی برای اندازه‌گیری رطوبت و از دستگاه بمب فشاری برای اندازه‌گیری پتانسیل آب ساقه استفاده گردید. بر این اساس برنامه‌ریزی آبیاری درختان موجود در باغ برای شرایط نرمال، کم‌آبیاری ملایم و کم‌آبیاری متوسط انجام شد و مقادیر آب آبیاری اعمال شده با استفاده از کنتور اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میزان آبیاری در تیمار شاهد ۱۱۱۲۰، کم‌آبیاری ملایم ۷۹۲۵ و کم‌آبیاری متوسط ۶۵۵۰ متر مکعب در هکتار می‌باشد. این در حالی است که میزان تبخیر و تعرق واقعی گیاه در محل مورد مطالعه معادل ۱۰۵۹۰ متر مکعب در هکتار برآورد گردید که نشان می‌دهد تیمار شاهد معادل ۵ درصد بیشتر آبیاری انجام شده و در دو تیمار دیگر به ترتیب ۲۵ و ۳۸ درصد کمتر آبیاری انجام شده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که اثرات کم‌آبیاری بر عملکرد کمی و کیفی گردو متفاوت است و بستگی به سن درخت، شرایط خاک و غیره دارد (Lampinen et al., 2004) .

فولتون و همکاران در تحقیقی ضرایب گیاهی و نیاز آبی را برای درختان گردو در کالیفرنیای آمریکا تعیین نمودند. بدین‌منظور از روش توازن انرژی برای تعیین ETc استفاده گردید. همچنین با تعیین مقادیر آب آبیاری و بارش رخ داده در منطقه، مقادیر ضریب گیاهی در طول فصل اندازه‌گیری شد و با مقادیر اندازه‌گری شده در گذشته مقایسه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر ضریب گیاهی در مرحله اولیه ۰/۶۳ در مرحله میانی ۱/۱۴ و در مرحله پایانی ۰/۶۰ است و مقدار نیاز آبی گیاه در طول فصل معادل ۱۰۵۱۰ متر مکعب در هکتار می‌باشد (Fulton, 2013).

چووین و همکاران در تحقیقی کاربرد دستگاه بمب فشاری قابل حمل برای تعیین نیاز آبی درختان گردو را در ایستگاه تحقیقاتی کریسی فرانسه، مورد ارزیابی قرار دادند، بدین‌منظور برای برنامه‌ریزی آبیاری سه روش بمب فشاری، تانسیومتر و بیلان آبی مورد مقایسه قرار دادند. برای هر تیمار ۱۱ درخت به صورت تصادفی انتخاب و بر اساس نتایج به دست آمده مقدار نیاز آبیاری برای تیمار بمب فشاری ۱۲۹، تیمار بیلان آبی ۱۱۸ و تیمار تانسیومتر ۶۰ متر مکعب برآورد گردید (Chauvin et al., 2006).

باچنر و همکاران در تحقیقی اثرات کم‌آبیاری تنظیم شده را بر دو رقم گردو در کالیفرنیای آمریکا مورد ارزیابی قرار دادند. بدین منظور کم‌آبیاری کنترل شده با اندازه‌گیری پتانسیل آب ساقه برای تنش‌های کم، متوسط و زیاد، برای دو رقم درخت گردو اعمال گردید. آزمایش

در یک باغ تجاری با فواصل درختان ۹/۱×۵/۵ متر در قالب یک طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار و چهار تکرار اجرا گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، مقدار آب آبیاری مورد استفاده در تیمارهای کم‌آبیاری ملایم، متوسط و زیاد به ترتیب ۱۰۷۰۰، ۷۱۳۰ و ۶۱۰۰ متر مکعب در هکتار تعیین گردید. همچنین مشخص شد که اعمال کم‌آبیاری برای درخت گردو مناسب نیست و باعث کاهش کمیت و کیفیت محصول می‌شود (Buchner et al., 2008).

گارسیا و همکاران (۲۰۱۲)، رومر و مارتینزکاتیلاس (۲۰۱۲) اثر مقادیر و زمان‌های مختلف آبیاری بر بازده اقتصادی انگور در منطقه ای نیمه گرم از جنوب شرقی اسپانیا را بررسی نمودند. تیمارهای آبیاری شامل ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد از آبی کامل انگور بود. نتایج نشان داد تیمار آبیاری ۶۰ درصد نیاز آبی بهترین تیمار از لحاظ عملکرد بوده و تنش شدید آبی از نظر کمی اقتصادی نبوده ولی کیفیت محصول را به اندازه‌ای افزایش داده که می¬تواند با تیمار ۶۰ درصد برابری نماید(Garcia et al., 2012; Romero and Martinez-Cutillas, 2021)

لیو در تحقیقی کاربرد روش آبیاری Straw pit (استفاده از پوشش پلاستیکی) در باغ گردو در فلات لوئیس چین، را مورد ارزیابی قرار داد. بدین منظور روشStraw pit، قطره‌ای، بارانی، غرقابی و دیم از لحاظ عملکرد و منافع اقتصادی را مقایسه نمود. نتایج اندازه‌گیری رطوبت در هر روش نشان داد که روش‌های قطره‌ای و بارانی بهترین روش می‌باشند و بعد از آن روش Straw pit است و دو روش دیم و آبیاری غرقابی برای توسعه و رشد بهینه درخت گردو مناسب نمی‌باشند(Liu, 2014).

پالیان و ماتئوس در مطالعه‌ای تأثیر بهینه‌سازی سامانه‌های آبیاری را بر بهره‌وری آب مورد ارزیابی قرار داده‌اند. در این مطالعه برای مقابله با بحران کمبود آب موارد زیر پیشنهاد شده است: ۱-استفاده بیشتر از آب مجازی ۲- بهبود کارایی اقتصادی آب ۳- بهبود کارایی فنی آب (Playan and Mateos, 2006).

فائو میانگین بهره‌وری آب در بخش کشاورزی ایران ۰/۲ دلار به ازای هر متر مکعب آب است که نسبت به میانگین جهانی آن اختلاف معنی‌دار و با کشورهای مانند فرانسه که بهره‌وری آب در بخش کشاورزی آن ۸/۸ دلار به ازای هر متر مکعب آب است اختلاف بسیار زیادی دارد (FAO, 2006).

برای تعیین آب کاربردی و بهره‌وری آب در محصولات باغی انگور، گردو در داخل و خارج از کشور مطالعات متعددی صورت گرفته است که بیشتر آنها در شرایط پژوهشی با تیمارهای آزمایشی و در ایستگاه‌های مراکز تحقیقاتی بوده است. در برخی موارد نیز تیمارهای کم‌آبیاری و سطوح مختلف آب برای یافتن سطح مناسب آب آبیاری در منطقهٔ مورد نظر بوده است. از طرفی در اکثر مطالعات انجام شده به بررسی بهره‌وری فیزیکی محصولات پرداخته شده است. در حالی که برای مقایسه محصولات مختلف کشاورزی بهتر است علاوه بر شاخص بهره‌وری فیزیکی از شاخص بهره‌وری اقتصادی نیز استفاده شود. لذا این تحقیق با هدف تعیین شاخص‌های فیزیکی و اقتصادی بهره‌وری آب، نیاز آبی به‌روز شده، و میزان بازده تولید در سطح باغ‌های انگور، گردو شهرستان ملایر انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور تعیین آب کاربردی و بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در باغات انگور و گردو شهرستان ملایر واقع در جنوب شرقی استان همدان طی سال‌های ۱۳۹۶ و۱۳۹۷ شهرستان انجام شد (شکل ۱). پژوهش از نظر میزان و درجه کنترل متغیرها، آزمایشی و تحلیلی، از نظر گردآوری داده‌ها، مزرعه‌ای و میدانی و از نظر تعمیم یافته‌ها از نوع پیمایشی[1] می‌باشد.

جامعه آماری، در این پژوهش مجموعه بهره‌برداران از باغات در دشت ملایر است. به‌منظور پوشش بهتر منطقه و در نظر گرفتن ناهمگنی که در میان کشاورزان مشاهده شد، تعیین نمونه به روش نمونه گیری تصادفی طبقه‌ای نسبتی[2] انجام گرفت. رابطه (۱) چگونگی تعیین تعداد نمونه را نشان می دهد.

$$n=\frac{N\times t^2\times s^2}{N\times d^2+t^2\times s^2} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱): n تعداد نمونه مورد نیاز، N تعداد چاه مورد بهره‌برداری در منطقه، t آماره t استیودنت، S واریانس نمونه اولیه، d خطای مورد نظر در برآورد را نشان می‌دهد.

جهت انجام این پژوهش پرسشنامه‌هایی تهیه و اطلاعاتی لازم جمع‌آوری شد. برای بررسی روایی پرسشنامه از نظرات کارشناسان اقتصادکشاورزی و آبیاری استفاده شد. به‌منظور بررسی پایایی سؤالات از آزمون آلفای کرونباخ محاسبه و برابر با ۰/۸ اندازه‌گیری شده است. مکان محل آزمایش، مختصات جغرافیایی باغات، نوع منبع آبی، نوع سیستم آبیاری، شوری منبع آبی در جداول ۱ و ۲ آمده است.

حجم آب کاربردی، بدون دخالت در برنامهٔ آبیاری بهره‌دار و تحت مدیریت باغداران اندازه‌گیری شد. سپس دبی منبع آبی، زمان هر نوبت آبیاری و تعداد نوبت‌های آبیاری در طول فصل زراعی تعیین شد. با استفاده از این داده‌ها، عمق آب آبیاری و حجم آب کاربردی در هر یک از باغات در طول فصل زراعی محاسبه شد. نیاز آبی گیاه مرجع به روش پن‌من–مانتیث با استفاده از داده‌های ۱۰ سال اخیر برای منطقهٔ موردنظر از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی تهیه و برآورد شد. نیاز آبی گیاه مرجع با اعمال ضریب گیاهی به نیاز آبی خالص گیاه تبدیل شد. با اعمال بارش موثر، نیاز خالص آبی به نیاز خالص آبیاری

1- Survey Research
2- Ratio stratified random sampling

تبدیل شد. بارندگی مؤثر به روش SCS برآورد شد (SCS, 1972). مقادیر نیاز خالص آبیاری با مقادیر سند ملی آب برای مناطق مورد مطالعه مقایسه شدند. میزان ضریب گیاهی مورد استفاده برای دو محصوال انگور و گردو در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (شهرستان ملایر)

جدول ۱- ضریب گیاهی مورد استفاده جهت محاسبه نیاز آبی گردو و انگور در طول دوره رشد

ماه	دهه	محصول	
		گردو	انگور
فروردین	اول	–	–
	دوم	–	–
	سوم	۰/۵	–
اردیبهشت	اول	۰/۵	–
	دوم	۰/۵	–
	سوم	۰/۵۴	۰/۴۸
خرداد	اول	۰/۶۳	۰/۵۶
	دوم	۰/۷۲	۰/۶۷
	سوم	۰/۸	۰/۷۸
تیر	اول	۰/۸۸	۰/۸۵
	دوم	۰/۹۶	۰/۸۷
	سوم	۱	۰/۸۷
مرداد	اول	۱	۰/۸۷
	دوم	۱	۰/۸۷
	سوم	۱	۰/۸۷
شهریور	اول	۱	۰/۸۷
	دوم	۱	۰/۸۶
	سوم	۱	–
مهر	اول	۰/۹۸	–
	دوم	۰/۹۲	–
	سوم	۰/۸۲	–
آبان	اول	۰/۷۱	–

در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای میزان حجم آب کاربردی با نصب کنتور یا اندازه‌گیری دبی قطره‌چکان‌ها، ساعت آبیاری در هر نوبت آبیاری و تعداد آبیاری در کل فصل تعیین شد.

پس از جمع‌آوری داده‌ها از مناطق مورد مطالعه، با استفاده از حجم آب کاربردی و عملکرد محصول هر باغ، بهره‌وری فیزیکی آب کاربردی (CPD)[1] محاسبه شد (رابطه ۲).

$$CPD(Ir) = \frac{Tp}{Tw(Ir)} \qquad (۲)$$

که در ان: TP: میزان محصول تولید شده (کیلوگرم در هکتار) و TWC حجم آب کاربردی متر مکعب در هکتار است.

همچنین بهره‌وری آب آبیاری و بارش موثر نیز از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$CPD(Ir + P) = \frac{Tp}{Tw(Ir+P)} \qquad (۳)$$

در این تحقیق علاوه بر محاسبه بهره‌وری فیزیکی، بهره‌وری اقتصادی آب نیز محاسبه شد. هدف از این روش تعیین میزان درآمد حاصله از هر متر مکعب آب است داده‌های هزینه، تولید و درآمد دو محصول گردو و انگور در باغات مورد مطالعه و با استفاده از پرسشنامه اخذ شد. از هزینه‌های تولید می‌توان به هزینه زمین، کودهای شیمیایی، سموم شیمیایی، آبیاری، نیروی کار، ماشین آلات، کود حیوانی، کودهای ریز مغذی اشاره نمود. در جدول ۲ بصورت مشروح میزان نهاده‌ها و هزینه تولید دو محصول گردو و انگور نشان داده شده است.

جهت تعیین بهره‌وری اقتصادی پس از انتخاب باغات و اخذ اطلاعات هزینه و درآمد، دو شاخص BPD و NBPD محاسبه شد.

1– Crop Per Drop

جدول ۲- هزینه تولید گردو و انگور به نفکیک نهاده های مورد مصرفی

محصول	انگور		گردو	
نهاده‌ها	مقدار/تعداد	هزینه (ریال)	مقدار/تعداد	هزینه (ریال)
کود فسفاته (کیلوگرم در هکتار)	۶۰۰	۱۱۰۰۰	۷۵۰	۱۱۰۰۰
کود ازته (کیلوگرم در هکتار)	۷۵	۷۷۰۰	۱۷۵	۷۷۰۰
کود پتاسه (کیلوگرم در هکتار)	۱۵۰	۱۵۰۰۰	۱۲۵	۱۵۰۰۰
کود ریز مغذی (کیلو گرم در هکتار)	۲۵	۷۵۰۰۰۰	۱۰۰	۱۱۵۰۰۰۰
کود حیوانی (کیلو گرم در هکتار	۴۰۰۰۰	۳۵۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۳۵۰۰۰۰
نیروی کار (نفر- روز)	۴۵	۱۵۰۰۰۰۰	۵۰	۱۵۰۰۰۰۰
سموم شیمیایی(کیلو گرم در هکتار)	۷	۲۵۰۰۰۰۰	۷	۳۲۰۰۰۰۰
آب (متر مکعب) روش سطحی	۴۲۴۱	۳۵۰۰	۴۵۷۱	۳۵۰۰
آب (متر مکعب) روش قطره ای	۲۵۳۶	۳۵۰۰	۲۱۰۷	۳۵۰۰
هزینه سیستم آبیاری قطره‌ای	–	۲۰۰۰۰۰۰۰	–	۲۰۰۰۰۰۰۰
زمین	–	۲۰۰۰۰۰۰۰	–	۲۰۰۰۰۰۰۰
عملکرد در روش آبیاری سطحی(کیلو گرم در هکتار)	۲۹۳۰۰	–	۲۳۴۴	–
عملکرد در روش آبیاری قطره‌ای (کیلو گرم در هکتار)	۳۷۲۰۰	–	۲۰۷۳	–
قیمت محصول(ریال در کیلو گرم)	۷۰۰۰۰	–	۸۰۰۰۰۰	–

شاخص سود ناخالص یا درآمد به ازای هر واحد حجم آب[1] (BPD): در این شاخص نسبت سود ناخالص به ازای هر واحد حجم آب کاربردی شده است (۴).

$$BPD = \frac{TR}{TW_C} \quad (۴)$$

که در آن: TR: کل درآمد حاصل از محصول به ازای هر واحد آب مصرفی و TW_c حجم آب کاربردی در هکتار است. بنابراین BPD، بهره‌وری آب کاربردی بر حسب ریال بر متر مکعب محاسبه می¬شود. اما ایراد این روش این است که هزینه تولید محصول در نظر گرفته نشده است (جعفر و فال سلیمان، ۱۳۸۷).

۲-سود خالص به ازای هر واحد حجم آب[2] (NBPD): در این شاخص در صورت کسر، سود خالص در نظر گرفته می‌شود:

$$NBPD = \frac{NB}{TW} \quad (۵)$$

که در آن: NB: سود خالص محصول و TWC حجم آب کاربردی در هکتار است. بنابر این NBPD، بهره‌وری آب بر حسب ریال بر متر مکعب است. این شاخص مناسب‌تر از شاخص BPD است.

نتایج و بحث

عملکرد، آب کاربردی و بهره‌وری آب

نتایج اندازه‌گیری آب کاربردی و بهره‌وری آب در باغات انگور و گردو با سیستم آبیاری قطره‌ای و سطحی در جدول ۳ ارائه شده است. تغییرات حجم آب کاربردی در باغات انگور و در دو سیستم آبیاری سطحی و قطره‌ای به‌ترتیب از ۱۰۸۰ تا ۸۶۴۰ و ۶۵۰ تا ۵۴۰۰ متر مکعب در هکتار بود، میانگین حجم آب کاربردی در باغات گردو در دو سیستم آبیاری سطحی و قطره‌ای ۴۵۷۱ و ۲۱۰۷ متر مکعب در هکتار بود (شکل ۲). میانگین عملکرد و بهره‌وری آب انگور در دو سیستم آبیاری سطحی و قطره‌ای به‌ترتیب ۲۹/۳، ۳۷ تن در هکتار و ۷/۸، ۲۵/۱ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد (جدول ۳). لذا در باغات انگور سیستم آبیاری قطره‌ای نسبت به سیستم آبیاری سطحی علاوه بر کاهش ۴۰ درصدی در آب کاربردی باعث افزایش ۲۰/۸ درصدی در عملکرد محصول و ۲۲۲ درصدی بهره‌وری آب آبیاری شده است. در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به‌علت اینکه فاصله آبیاری‌ها کوتاه و در نتیجه آبیاری در محدوده رطوبت سهل‌الوصول انجام می‌گیرد و گیاه کمتر با تنش رطوبتی مواجه است، همچنین توزیع آب، کود و سایر عناصر غذایی بصورت یکنواخت در باغ صورت می‌گیرد عملکرد محصول بیشتری نسبت به روش آبیاری سطحی حاصل می‌شود. در برخی باغات انگور کم‌آبیاری صورت گرفته بود که همین امر باعث کاهش میزان آب آبیاری و افزایش بهره‌وری آب شده بود. پژوهش‌های متعددی از حجم آب کاربردی در باغ‌های انگور در کشور انجام شده است که با نتایج این پژوهش به علت شرایط متفاوت در انجام پژوهش اختلاف دارند.

روحانی و همکاران (۱۳۸۷)در سال میزان بهره‌وری آب و حجم آب آبیاری انگور را به‌ترتیب ۱/۱۹ کیلوگرم بر متر مکعب و ۷۷۱۸ متر

1- Benefit Per Drop
2- Net Benefit Per Drop

مکعب در هکتار برآورد نمود. گردو را ۰/۳۵ و ۷۷۰۴ تعیین نمود

جلینی (۱۳۸۵) در پژوهشی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گلمکان وابسته به مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان به بررسی سه تیمار ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد آب مورد نیاز انگور با استفاده از آبیاری قطره‌ای میزان متوسط سه ساله آب کاربردی و بهره‌وری آب را، به‌ترتیب ۲۸۳۲، ۴۱۷۸ و ۵۴۶۲ متر مکعب در هکتار و ۱/۷۲، ۱/۸۴۴ و ۱/۵۷۴ کیلوگرم بر متر مکعب اعلام نمود. که اگر تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی را مشابه شرایط تحت مدیریت باغدار تصور نمائیم میزان آب کاربردی ۵۴۶۲ متر مکعب بیشتر از میزان آب کاربردی در این پژوهش (۴۵۷۱ متر مکعب در هکتار) است.

کریمی و باغانی (۱۳۸۹) در پژوهشی به تاثیر آبیاری در زمان‌های مختلف (مراحل فنولوژیک گیاه) و آبیاری بر حسب عرف محلی بر کمیت و کیفیت میوه پرداخت، میزان متوسط دو ساله حجم آب آبیاری و کارایی مصرف آب در تیمار آبیاری بر حسب عرف محلی را به‌ترتیب ۷۲۰۰ متر مکعب در هکتار و ۱/۲۷ کیلوگرم بر متر مکعب بیان داشتند. که با نتایج این پژوهش همخوانی ندارد.

دولتی‌بانه و نورجو (۱۳۹۰) در مطالعه‌ای در ایستگاه تحقیقاتی کهریز ارومیه به بررسی اثر سه تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی)، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای بر روی سه رقم انگور (قزل اوزوم، ریش بابا و رشه)، میزان آب کاربردی و بهره‌وری آب را به‌ترتیب ۴۰۸۶، ۳۰۶۴ و ۲۰۴۳ مترمکعب بر هکتار و میزان بهره‌وری آب را ۲/۷۶، ۳/۵۹ و ۴/۰۴ کیلوگرم انگور به ازای یک مترمکعب آب آبیاری گزارش نمودند. که میزان آب کاربردی در تیمار آبیاری کامل، حدود ۲ برابر میزان آب کاربردی با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای در این پژوهش (۲۱۰۷ متر مکعب در هکتار) است.

نیکانفر و رضایی (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای بر روی درختان انگور به محاسبه بهره‌وری انگور با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای، بابلر و آبیاری سطحی پرداختند. بیشترین کارایی مصرف آب با ۲/۲ کیلوگرم بر مترمکعب آب مربوط به روش آبیاری قطره‌ای و کارایی مصرف آب در آبیاری بابلر و سطحی به‌ترتیب ۲/۱۶ و ۱/۴۸ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش شد. میانگین حجم آب کاربردی در این پژوهش در روش‌های آبیاری قطره‌ای، بابلر و سطحی به‌ترتیب ۷۳۶۷، ۷۸۱۰ و ۱۳۲۶۷ مترمکعب بر هکتار گزارش شد.

شاهرخ‌نیا و کرمی (۱۳۹۶) بهترین میزان آب آبیاری انگور یاقوتی را، معادل ۶۰٪ نیاز آبی برآورد شده از روش پنمن مانتیث و حدود ۳۸۰۰ مترمکعب درهکتار گزارش کردند.

قاصدی یولقونلو و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ در تغییر روش آبیاری جویچه‌ای به آبیای قطره‌ای در ملایر همدان بیان داشتند، که شیوه‌های آبیاری قطره‌ای موجب سطحی شدن ریشه‌های تاک، نسبت به آبیاری جویچه‌ای گردید و نشان‌دهنده انعطاف پذیری رشد تاک در برای عوامل محیطی از جمله رطوبت خاک می‌باشد. میزان آب کاربردی در دو روش آبیاری قطره‌ای و سطحی را به‌ترتیب ۵۳۷۵ و ۳۶۲۵ متر مکعب در هکتار بیان گردید.

میانگین حجم آب کاربردی باغات گردو در دو روش آبیاری سطحی و قطره‌ای و به ترتیب برابر با ۴۵۷۱ و ۲۱۰۷ متر مکعب در هکتار است. به عبارت دیگر، کاربرد سیستم آبیاری قطره‌ای نسبت به سیستم آبیاری سطحی باعث کاهش ۵۴ درصدی در کاربرد آب شده است (شکل ۲). میانگین عملکرد محصول گردو در دو روش آبیاری سطحی و قطره‌ای به‌ترتیب ۲۳۴۴ و ۲۰۷۳ کیلوگرم در هکتار شد (جدول ۳). که با نتایج نعمت‌زاده و همکاران (۱۳۹۰) تفاوت دارد که از دلایل تفاوت در عملکرد، می‌توان به تفاوت در ارقام مورد مطالعه در منطقه اشاره نمود.

میزان بهره‌وری آب گردو در این پژوهش از ۰/۰۴ کیلوگرم بر متر مکعب تا ۳/۱۶ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بود. میانگین بهره‌وری آب گردو، در دو سیستم آبیاری سطحی و قطره‌ای به‌ترتیب ۰/۸۸ و ۱/۸۱ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد. نیکانفر و رضائی (۱۳۹۴) میزان بهره‌وری آب باغات گردو در دو سیستم آبیاری سطحی و قطره‌ای به‌ترتیب ۱/۴۸ و ۲/۲کیلوگرم برمترمکعب گزارش نمود.

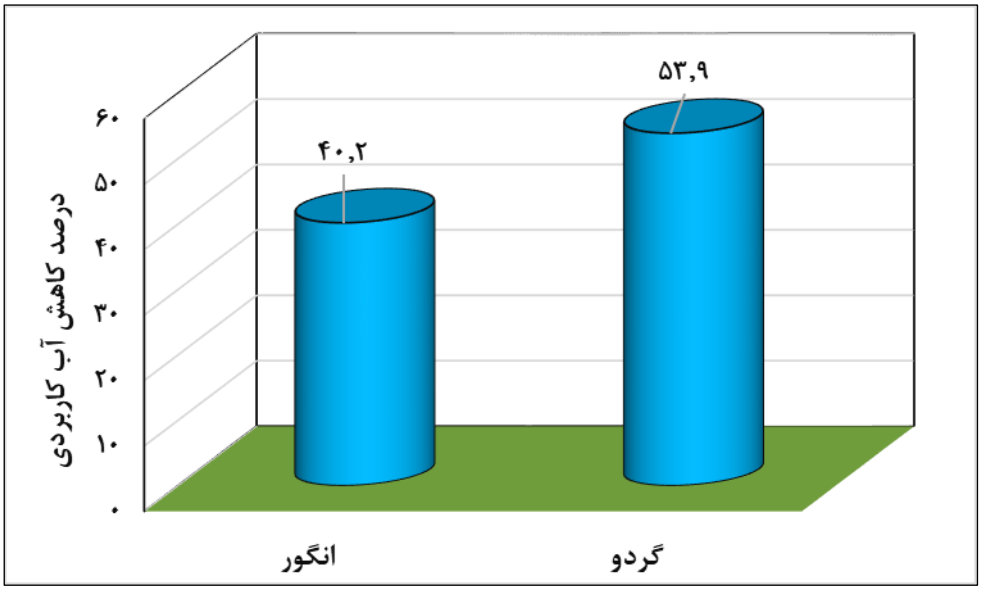
نتایج این پژوهش نشان داد که سیستم آبیاری قطره‌ای نسبت به سیستم آبیاری سطحی با کاهش ۵۴ درصدی در آب کاربردی، باعث افزایش حدود ۱۰۵ درصدی در بهره‌وری آب شده است. که با نتایج نیکانفر و رضایی (۱۳۹۴) مطابقت دارد.

مقایسه نیاز آبی محاسبه‌شده انگور با سند ملی آب

نیاز آبی محاسبه‌شده انگور با استفاده از روش پنمن مانتیث و سند ملی آب در سیستم آبیاری سطحی، به‌ترتیب ۷۴۳ و ۴۵۸ میلی‌متر و در سیستم آبیاری قطره‌ای به‌ترتیب ۵۲۰ و ۳۲۱ میلی‌متر تعیین شد (جدول ۴). این نتایج نشان می‌دهد که نیاز آبی محاسباتی به‌مراتب بیشتر از میزان نیازآبی ذکر شده در سند ملی آب است که با نتایج قدمی فیروزآبادی و جعفری (۱۳۹۸) همخوانی دارد. نیاز آبی محاسبه شده گردو با استفاده از روش پنمن مانتیث و سند ملی آب در جدول ۵ ارائه شده است. میزان نیاز آبی محاسبه شده گردو در دو سیستم آبیاری سطحی و قطره‌ای به‌ترتیب ۱۰۸۳ و ۵۳۵ میلی‌متر تعیین شد در صورتی که این میزان در سند ملی آب به‌ترتیب ۸۳۳ و ۴۱۲ میلی‌متر بود. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان نیاز آبی محاسبه شده بیشتر از میزان ذکر شده در سند ملی آب بود و این امر لزوم به‌روز شدن سند ملی آب را بیش از پیش می‌طلبد. قدمی فیروزآبادی و جعفری (۱۳۹۸) به نتایج مشابهی دست یافته‌اند.

جدول ۳- حجم آب کاربردی و بهره‌وری آب در باغات انگور و گردو

نوع محصول	نوع سیستم آبیاری	میزان شاخص	آب کاربردی (m^3/ha)	عملکرد (kg/ha)	بهره‌وری آب (kg/m^3)
انگور	سطحی	بیشترین	۸۶۴۰	۴۸۰۰۰	۱۶/۷
		کمترین	۱۰۸۰	۸۰۰۰	۴/۲
		متوسط	۴۲۴۲	۲۹۳۰۰	۷/۸
	قطره‌ای	بیشترین	۵۴۰۰	۲۸۰۰۰	۸/۴
		کمترین	۶۵۰	۵۰۰۰	۴۳/۱
		متوسط	۲۵۳۷	۳۷۰۰۰	۲۵/۱
گردو	سطحی	بیشترین	۱۰۲۰۶	۵۰۷۵	۳/۱
		کمترین	۱۶۲۰	۵۰۰	۰/۰۴
		متوسط	۴۵۷۱	۲۳۴۴	۰/۸۸
	قطره‌ای	بیشترین	۴۸۶۰	۳۱۹۰	۳/۱۶
		کمترین	۹۶۰	۷۵۰	۰/۱۵
		متوسط	۲۱۰۷	۲۰۷۳	۱/۸۱



شکل ۲- کاهش میزان آب کاربردی در روش آبیاری قطره ای نسبت به روش آبیاری سطحی

در شکل (۳) نیاز خالص آبیاری که از داده‌های هواشناسی ۱۰ سال اخیر به روش پن‌من مانتیث برآورد شده است و سند ملی آب (NETWAT)، برای دو محصول گردو و انگور ارائه شده است. نتایج نشان داد که تفاوت مقادیر برآورد شده به دو روش زیاد بود که استفاده از اطلاعات هواشناسی قدیمی در سند ملی آب، افزایش درجهٔ حرارت هوا و تغییرات بارندگی موثر در چند دههٔ اخیر از عمده‌ترین دلایل آن است.

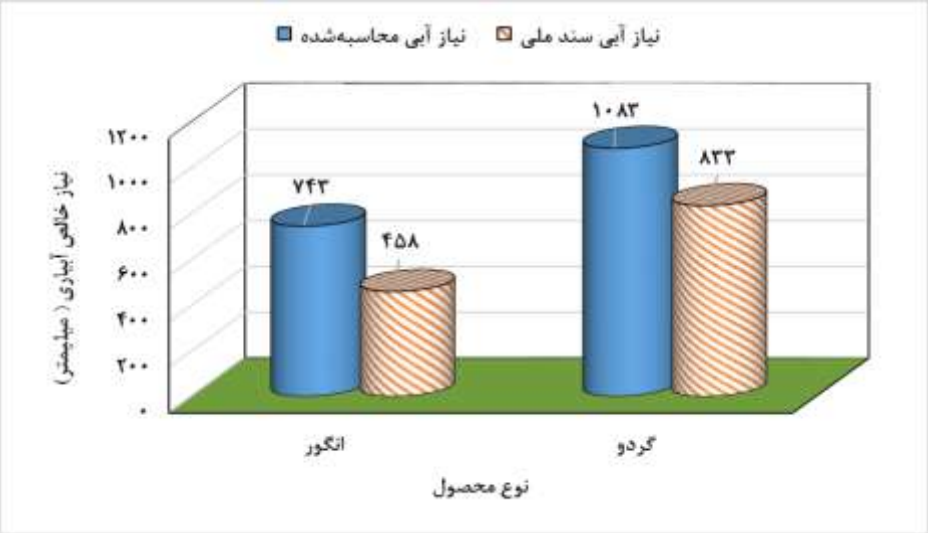
مقادیر برآورد شده به‌روش پنمن مانتیث برای محصول انگور با مقادیر ارائه شده توسط فائو مطابقت دارد. فائو مقادیر ۵ تا ۱۲ هزار مترمکعب بر هکتار را برای انگور در مناطق مختلف گزارش نموده است (Doorenbos and Kassam, 1979). شاهرخ‌نیا و کرمی (۱۳۹۶) نیازآبی انگور یاقوتی را به روش تخمینی در استان فارس را ۶۳۱۱ مترمکعب بر هکتار برآورد نمودند و بهترین میزان آب آبیاری را حدود ۵۸۰۰ متر مکعب در هکتار پیشنهاد نمودند.

مقادیر نیاز آبی برآورد شده به‌روش پنمن مانتیث برای باغات گردو حدود ۱۰۸۳ میلی‌متر که بیشتر از میزان تعیین شده در سند ملی آب (۸۳۳ میلی‌متر) است. روحانی و همکاران (۱۳۸۷) میزان آب آبیاری گردو و بهره وری آب را ۷۷۰۴ متر مکعب در هکتار و ۰/۳۵

کیلوگرم بر متر مکعب تعیین نمودند. یونسا و همکاران (۲۰۰۰) روش پنمن مانتیث را روش مناسبی برای تعیین نیاز آبی معرفی نمود. کوهن و همکاران (۱۹۹۷) در منطقه رویس اسپانیا، نیاز آبی خالص درخت گردو را ۳۹۷۰ متر مکعب در هکتار برآورد نمود. این در حالی‌است که که فولتون و همکاران (۲۰۱۳) مقدار نیاز آبی گردو را ۱۰۵۱ میلی‌متر (۱۰۵۱۰ متر مکعب در هکتار) گزارش نموده است که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. در بیشتر باغات انگور و گردو مورد مطالعه مقادیر نیاز خالص آبیاری سند ملی آب کمتر از مقادیر برآورد شده با روش پنمن–مانتیث با استفاده از داده‌های ده سال اخیر بود. از دلایل اصلی آن می‌توان به تغییر اقلیم و گرم‌تر شدن هوا در سه دههٔ اخیر و به تبع آن افزایش نیاز آبی گیاهان اشاره نمود.

جدول ٤- مقایسه نیاز آبی محاسبه‌شده انگور و مقادیر سند ملی آب

ردیف	نوع سیستم آبیاری	نیاز آبی محاسبه‌شده (mm)	سند ملی (mm)
انگور	سطحی	۷۴۳	۴۵۸
	قطره¬ای	۵۲۰	۳۲۱
گردو	سطحی	۱۰۸۳	۸۳۳
	قطره¬ای	۵۳۵	۴۱۲



شکل ۳- مقایسه نیاز آبی محاسبه شده به روش پنمن مانتیث با میزان سند ملی

با توجه به میزان عملکرد محصول، میزان آب کاربردی و قیمت محصول شاخص بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب محاسبه شده است. شاخص بهره‌وری فیزیکی (CPD) و بهره‌وری اقتصادی از منظر شاخص BPD و NBPD در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بهره‌وری فیزیکی در سامانه آبیاری قطره‌ای در هر دو محصول بیشتر از آبیاری سطحی است. همچنین در روش آبیاری قطره‌ای بهره‌وری فیزیکی در محصول انگور بیشتر از گردو است.

مقایسه بهره‌وری اقتصادی آب در دو محصول انگور و گردو، نشان داد که در روش آبیاری قطره‌ای این شاخص نسبت به سیستم آبیاری سطحی بالاتر است. میزان بهره‌وری اقتصادی از منظر شاخص NBPD در دو محصول انگور و گردو با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای به‌ترتیب ۲۳۱۰۰۰ و ۱۱۷۰۰۰ ریال تعیین شد. لذا می‌توان گفت که میزان درآمد خالص باغداران انگور حدود ۲ برابر باغداران گردو است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج تحقیق نشان داد که سیستم آبیاری قطره‌ای نسبت به روش آبیاری سطحی به‌ترتیب باعث کاهش ۴۰ و ۵۴ درصدی آب کاربردی محصول انگور، گردو شد. بهره‌وری آب در روش قطره‌ای بطور معنی‌داری بیشتر از روش آبیاری سطحی محاسبه شد. بیشترین بهره-وری آب مربوط به انگور به میزان ۲۵/۱ کیلوگرم بر متر مکعب و در روش آبیاری قطره‌ای و کمترین بهره‌وری در روش آبیاری سطحی گردو با ۰/۸۸ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد.

جدول ۵- میانگین بهره‌وری آب در محصولات باغی (سال ۱۳۹۸)

محصول	روش آبیاری	CPD (کیلوگرم بر متر مکعب)	CPD(Ir+P) (کیلوگرم بر متر مکعب)	BPD (ریال بر متر مکعب)	NBPD (ریال بر متر مکعب)
گردو	سطحی	۰/۸۸	۰/۵۸	۳۰۷۰۰۰	۱۱۵۷۰۰
	قطره‌ای	۱/۸۱	۰/۸۵	۵۹۰۰۰۰	۱۱۷۰۰۰
انگور	سطحی	۷/۸	۵/۹	۲۰۷۰۰۰	۱۱۰۰۰۰
	قطره‌ای	۲۵/۱	۱۳/۴	۴۳۹۰۰۰	۲۳۱۰۰۰

همچنین استفاده از آبیاری قطره‌ای در دو محصول انگور و گردو دارای توجیه اقتصادی است. همچنین نتایج حاکی از تفاوت معنی‌دار نیاز آبی محاسباتی و نیاز آبی ذکر شده در سند ملی آب، همچنین تفاوت معنی‌دار حجم آب آبیاری، بهره‌وری آب و نیاز آبی به‌روز شده در دو سامانه قطره‌ای و سطحی داشت. بنابراین تعیین نیاز آبی سایر محصولات باغی بر اساس آمار و اطلاعات هواشناسی سال‌های اخیر، آموزش و استفاده از روش‌های کم‌آبیاری به صورت دقیق و علمی با توجه به این‌که باغات انگور و گردو با کم‌آبیاری و تنش آبی مواجه هستند، برای کاهش اثرات مخرب تنش و افزایش بهره‌وری آب پیشنهاد می‌شود.

منابع

پروین، پ.، خضری، م.، و توسلیان، ا. ۱۳۹۳. بررسی تأثیر تنش خشکی بر برخی شاخص‌های ریخت‌شناسی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی دانهال گردوی ایرانی .دوره ۲۱، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۳، صفحه ۱-۲۵.

جعفریان، ج.، و فال سلیمان. م. ۱۳۸۷. بحران آب و لزوم توجه به بهره‌وری آب کشاورزی در نواحی خشک. مطالعه موردی: دشت بیرجند. جغرافیا و توسعه. شماره۱۱. ص:۱۱۵-۱۳۸.

دشتی جوزنی، ک.، و احمد آلی، ج. ۱۳۹۲. اندازه گیری بهره‌وری آب در سیستم آبیاری قطره‌ای و مقایسه آن با سیستم آبیاری سطحی در باغات سیب (مطالعه موردی شهرستان ارومیه). چهارمین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی. ۴۸۸-۴۸۱.

رضوی، ر.، طایفه رضایی، ح.، رضوی، ن.، و وطن‌خواه، ح. ۱۳۹۶. اثر رژیم‌های آبیاری بر روی رشد سرشاخه ها و کارآیی مصرف آب درختان جوان گردو درسه روش آبیاری، سومین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه (تقاضا محوری آب)، کرج، موسسه تحقیقات خاک و آب.

روحانی، ن.، یانگ، ه.، امین سیچانی، س.، افیونی، م.، موسوی، س.ف.، و کامگار حقیقی، ع. ۱۳۸۷. ارزیابی مبادله محصولات غذایی و آب مجازی با توجه به منابع آب موجود در ایران. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. سال دوازدهم/ . شماره چهل و ششم (ب).

زمانی، ا.، مرتضوی، س.ا. و بلالی، ح. ۱۳۹۳. بررسی بهره‌وری اقتصادی آب در محصولات مختلف زراعی در دشت بهار. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. جلد ۲۸. شماره یک:۶۲-۵۱.

شاهرخ نیا، م.ع. و کرمی، م.ج. ۱۳۹۶. بررسی اثر مقادیر مختلف آب آبیاری بر عملکرد انگور یاقوتی. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال هفتم، شماره بیست وهشتم. ۱۲۱-۱۰۸.

شرکت آب منطقه‌ای همدان. ۱۳۹۶. سیمای منابع آب استان همدان، معاونت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب.

نعمت زاده، ف.، عاطفی، ج. و دهقانی، ح. ۱۳۹۰. مقایسه سیستم‌های آبیاری مختلف در باغات گردو. طرح پژوهشی موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر. به‌شماره ثبت ۹۰/۸۳۱. ۹۵ ص.

قاصدی یولقونلو، س.، زارع ابیانه، ح.، نجاتیان، م. ع.، کریمی، ر.ا. و ملکی، م. ۱۳۹۹. اثر تغییر آبیاری جویچه‌ای به قطره‌ای بر آب کاربردی، کارایی مصرف آب و برخی صفات رشدی بوته‌های انگور. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۳۰ شماره ۱، صفحه‌های ۱۷۹ تا ۱۹۲.

محمودیان، م.، راحمی، م.، وحدتی، ک.، و یزدانی، ن. ۱۳۹۴. برهمکنش کایولین و تنش آبی بر عملکرد چند رقم گردوی ایرانی. نهمین کنگره علوم باغبانی ایران، اهواز، انجمن علوم باغبانی ایران و دانشگاه شهید چمران اهواز

مولائی، خ. و مصطفی‌زاده، ب. ۱۳۸۶. راندمان آبیاری درختان گردو به روش حوضچه‌ای. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. کرمان. دانشگاه شهید باهنر. انجمن مهندسی آبیاری و آب. https://www.civilica.com/Paper-ABYARI09-ABYARI09_165.html

ناصری، ا.، عباسی، ف.، و اکبری، م. ۱۳۹۶. برآورد آب کاربردی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، جلد ۱۸ شماره ۶۸، ص. ۳۲-۱۷.

نصیبی، ف.، خضری، م.، و پروین، پ. ۱۳۹۲. بررسی تاثیر تنش خشکی بر برخی پارامترهای مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گردو

(*Juglans regia* L.)، اولین همایش ملی الکترونیکی مباحث نوین در علوم باغبانی، جهرم، انجمن علمی مهندسی علوم باغبانی دانشگاه جهرم.

نیکان فر، ر. و رضایی، ر. ۱۳۹۴. واکنش درخت‌های مسن انگور به تغییر روش آبیاری سطحی به قطره¬ای یا بابلر. مجله علوم و فنون باغبانی ایران . ۱۶ (۲): ۱۶۱-۱۷۰.

Buchner, R., Fulton, A., and Gilles, C. 2008. Effects of Regulated Deficit Irrigation on Walnut (*Juglans regia*) Grafted on Northern California Black (*Juglans hindsii*) or Paradox Rootstock. Acta Hortic. 792: 141-146.

Chauvin, W., Améglio, T., Prunet, J.P., and Soing, P. 2006. Irrigation of Walnut Trees Managing the Water Potential. Proc. Vth Int. Walnut Symp., Eds. M.E. Malvolti and D. Avanzato, Acta Hort. 705, ISHS.

Cohen, M., Valancogne, C., Dayau, S., Ameglio, T., Cruiziat, P., and Archer, P. 1997. Yeild and Physiological Responses of Walnut Trees in Semi-Arid conditions: Application to Irrigation Scheduling. Proc. 2nd Int. Sym. On Irrigation of Hort. Crops, Acta Hort. 449 Vol. I. ISHS.

FAO .2006. Fao's Global Information System on Water and Agriculture. http://aquastat.

Fulton, A. 2013. Evaluating Water Requirements of Developing Walnut Orchards in the Sacramento Valley. Walnut Research Reports, California Walnut Board.

García, J.G., Martínez-Cutillas, A., and Romero, P. 2012. Financial analysis of wine grape production using regulated deficit irrigation and partial-root zone drying strategies, Irrigation Science, 30, 3: 179-188.

Liu, C. 2014. The Evaluation of Straw Pit Irrigation Method in Walnut Orchard in Loess Plateau Area. Proc. VIIth International Walnut Symposium, Ed.: Jianbao Tian, Acta Hort. 1050, ISHS.

Lampinen, B., Buchner, R., Fulton, A., Grant, J., Mills, N., Prichard, T., Schwankl, L., Shackel, K., Gilles, C., Little, C., Metcalf, S., Rivers, D., and Gamble, V. 2004. Irrigation Management in Walnut Using Evapotranspiration, Soil and Plant Based Data. An annual research report submitted to the California Walnut Board for 2004: 113-136.

Playan, E., and Mateos, L. 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water produvtivity. Colombo.Sri Lanka.26pp.

Romero, P., and Martinez-Cutillas, A. 2012. The effects of partial root-zone irrigation and regulated deficit irrigation on the vegetative and reproductive development of fieldgrown Monastrell grapevines, Irrigation Science, 30, 5: 377-396.

SCS. 1972. U.S. Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, Hydrology Section 4.

Yunusa, I.A.M., Walker, R.R., Loveys, B.R., and Blackmore, D.H. 2000. Determination of transpiration in irrigated grapevines: comparison of the heat-pulse technique with gravimetric andmicrometeorological methods.Irrigation Science. 20: 1–8.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1908-1919

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۱۹-۱۹۰۸

Determination and Evaluation of Applied Water and Physical and Economical Productivity of Water in Vineyards and Walnut Orchards of Malayer Region of Hamadan

A. Ghadami Firouzabadi[1]*, S.M. Seyedan[2], And H. Zareabyaneh[3]
Recived: Oct.17, 2020 Accepted: Nov.05, 2020

Abstract

Optimal and efficient application of water resources due to the recent water crisis and droughts in the country is very necessary. In this regard, the use of modern irrigation methods is one of the solutions that has been developed to increase water productivity in the country. Therefore, this study was conducted to compare the physical and economical efficiency of water in drip and surface irrigation systems and net benefit per cost in vineyards and walnut orchards. In this study, the volume of applied water was calculated by measuring the flow rate of the water source, the number of irrigations and the hours of irrigation in each irrigation. The water requirement was calculated based on the last 10 years of meteorological data and compared with the estimated water requirement in the national water document. Water productivity was estimated based on yield per unit volume of water (CPD), income per unit volume of water (BPD), and net yield per unit volume of water (NBPD). The results showed that drip irrigation method compared to surface irrigation method reduced the applied water of grape and walnut crops by 40 and 54%, respectively. Water productivity in vineyards and walnut orchards in drip irrigation system was calculated as 25.1 and 1.81 and in surface irrigation as 7.8 and 0.88 kg / m^3, respectively. Calculated water requirement based on the last ten years of meteorological data in these two products was greater than the value stated in the National Water Document. Comparison of the average amount of applied water with the calculated water requirement indicated a deficit irrigation in most of the studied gardens. Comparison of Economic productivity of water in the two crops showed that this index in drip irrigation method is much higher than surface irrigation method. Net yield index per unit of water used (NBPD) in drip irrigation method in grape and walnut crops are 231 and 117, respectively, and in surface irrigation method 110 and 115 thousand Rials per cubic meter.

Keywords: Drip irrigation, Surface irrigation, Net benefit per cost, Product yield

1- Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering Research, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Hamedan, Iran
2-Assistant Professor of Economic, Social and Extension Research Department, Hamedan Agricultural and Natural ResourcesResearch and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Hamedan, Iran
3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural.Bu- Ali Sina University, Hamedan, Iran
(*- Corresponding Autor Email: a.ghadami@areeo.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۳۸-۱۹۲۰

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1920-1938

مقاله پژوهشی

برآورد تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از پیش‌نگری‌های پروژه CORDEX و بررسی سهم متغیرهای هواشناسی در تغییرات آن (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه)

سمیّه حجابی[1*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۱

چکیده

تبخیر- تعرق مرجع (ET_o) یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در چرخه هیدرولوژیکی بوده و به عنوان سنجه‌ای از تقاضای تبخیر جو، در محاسبه بسیاری از شاخص‌های خشکسالی و خشکی و مطالعات مربوط به پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم استفاده شده است. بررسی اثر تغییر اقلیم بر ET_o برای مدیریت و برنامه‌ریزی بلندمدت منابع آب ضروری است. در این مطالعه، از پیش‌نگری‌های ریزمقیاس‌نمایی‌شده دو مدل اقلیمی EC-EARTH و GFDL-ESM2M (مبتنی بر سناریوی RCP8.5) تحت پروژه CORDEX استفاده شد و میزان ET_o در حوضه دریاچه ارومیه برای دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) و دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۰۶) با استفاده از روش تعدیل‌یافته پنمن- مانتیث فائو و با شمول اثرات افزایش غلظت گاز CO_2 جو بر میزان مقاومت روزنه‌ای گیاهان، برآورد شد. نتایج بررسی تغییرات ET_o در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، آینده میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۱) نسبت به دوره تاریخی حاکی از روند افزایشی ET_o سالانه به ویژه در آینده دور بود. تحلیل سهم متغیرهای هواشناسی در تغییرات ET_o سالانه نشان داد متغیرهای دمای بیشینه (با میانگین سهم ٪ ۹۱/۵۴)، دمای کمینه (با میانگین سهم ٪ ۳۷/۶۸) و غلظت گاز CO_2 جو (با میانگین سهم ٪ ۴۱/۴۰) بیشترین سهم را در تغییرات ET_o خواهند داشت. با این وجود، به دلیل روند افزایشی توسعه کشاورزی، اثرات آبیاری بر اقلیم و عدم شمول اثرات آبیاری در مدل‌های اقلیمی، پیش‌نگری تغییرات ET_o بر مبنای مدل‌های اقلیمی با عدم قطعیت‌هایی همراه است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق مرجع، تحلیل سهم، تغییر اقلیم، سناریوی RCP8.5

مقدمه

انتشار پیوسته گازهای گلخانه‌ای به جو منجر به گرمایش جهانی در دوره صنعتی شده و مطابق شبیه‌سازی‌های مدل‌های اقلیمی CMIP5 (فاز ۵ پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت‌شده)، تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، میانگین دمای هوای کره زمین در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ نسبت به دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۶، به میزان ۰/۴-۳/۸ °C افزایش خواهد داشت (IPCC, 2013). تغییر اقلیم سبب سطوح مختلفی از تغییرات در متغیرهای اقلیمی مانند تابش خورشیدی، دما، بارش، سرعت باد و رطوبت خواهد شد (IPCC, 2007) که این موضوع می‌تواند الگوی اکوهیدرولوژیکی کل جهان را تغییر داده و سبب مسائلی در منابع آب شود (Huo et al., 2013). از نگاه هیدرولوژیکی، می‌توان موجودی آب کره زمین را به‌صورت یک تعادل بین بارش (P) و تبخیر- تعرق پتانسیل (PET) بیان نمود (Roderick et al., 2014). اگرچه بارش یک متغیر قابل دیدبانی و یکی از خروجی‌های مستقیم مدل‌های اقلیمی است، PET اغلب نه قابل دیدبانی است و نه در مدل‌های اقلیمی به‌طور مستقیم استفاده یا تولید می‌شود. در نتیجه در مطالعات وابسته به PET (مانند محاسبه برون خط شاخص‌های خشکی، شاخص‌های خشکسالی و مدل‌های هیدرولوژیکی) یک مدل تبخیر- تعرق پتانسیل برای برآورد PET بر اساس متغیرهای هواشناسی حاصل از پیش‌نگری‌های مدل اقلیمی مورد نیاز است (Yang et al., 2019).

از میان روش‌های متعدد برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل، روش پنمن- مانتیث (Monteith, 1965) تقریب نسبتاً ساده و خطی‌شده از یک سیستم غیرخطی از معادلات فیزیکی حاکم بر ترازمندی انرژی، وضعیت ترمودینامیکی و پخشیدگی قائم گرما و بخار آب است که معمولاً در مدل‌های اقلیمی حل می‌شوند (Milly and Dunne,

۱- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email :s.hejabi@urmia.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.14.5

2016). تبخیر- تعرق مرجع (ET_o) نسخه ساده‌شده‌ای از روش پنمن- مانتیث است که توسط سازمان خواربار و کشاورزی (FAO) به منظور برآورد شدت تبخیر- تعرق از یک محصول مرجع فرضی با ارتفاع فرضی ۰/۱۲ m، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ $s\ m^{-1}$ و آلبیدوی ۰/۲۳ ارائه شده است که مشابه تبخیر- تعرق از یک سطح گسترده از چمن سبز با ارتفاع یکنواخت، با رشد فعال و خوب آبیاری‌شده است که به طور کامل سطح زمین را پوشانده است (Allen et al., 1998). ET_o نقش مهمی در برنامه‌ریزی آبیاری داشته و یکی از مؤلفه‌های مهم چرخه هیدرولوژیکی در بوم‌سازگان زراعی است (Wu et al., 2019) که به دلیل وابستگی آن به دمای هوا احتمالاً به شدت تحت تاثیر گرمایش جهانی قرار گیرد (Fan et al., 2016).

لی و همکاران پیش‌نگری‌های HadCM3 تحت سناریوی A2 و B2 را با استفاده از مدل آماری SDSM ریزمقیاس‌نمایی نمودند و نشان دادند که ET_o در چین روند افزایشی در قرن ۲۱ نشان خواهد داد و این روند برای سال‌های پس از ۲۰۵۰ و سناریوی A2 شدیدتر خواهد بود (Li et al., 2012). ترینک و همکاران با ریزمقیاس‌نمایی آماری برون‌دادهای ۹ مدل گردش عمومی جو CMIP3 میزان تغییرات ET_o را در دوره ۲۰۳۰-۲۰۲۰ و ۲۰۵۰-۲۰۴۰ نسبت به دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۰ در ۲۲ کشور منطقه خاورمیانه و آفریقای شمالی بررسی کردند. مقادیر سالانه ET_o در همه کشورها و برای هر دو دوره آینده افزایش معنی‌داری نشان داد (Terink et al., 2013). رحمان و همکاران روند آینده ET_o در بنگلادش را با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های CMIP5 تحت سناریوهای مختلف برای دوره ۲۰۹۹-۲۰۶۱ بررسی کردند و نشان دادند که در بیشتر بخش‌های کشور روند ET_o سالانه افزایشی است (Rahman et al., 2019). مطالعات انجام شده در ایران اغلب حاکی از افزایش ET_o در آینده است (بهمنش و همکاران، ۱۳۹۴؛ کلانکی و کاراندیش، ۱۳۹۴؛ گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷؛ حیدری تاشه کبود و خوشحو، ۱۳۹۸؛ باب الحکمی و همکاران، ۱۳۹۹). کاراندیش و موسوی با ریزمقیاس‌نمایی برون‌دادهای ۱۵ مدل گردش عمومی جو با استفاده از مدل LARS-WG تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 اثر تغییر اقلیم را بر ET_o در ۵۲ ایستگاه سینوپتیک سراسر ایران بررسی کردند. نتایج این مطالعه بیانگر روند افزایشی معنی‌دار ET_o تا پایان قرن ۲۱ در مورد اغلب مدل‌ها بود (Karandish and Mousavi, 2018). نوری و همکاران از طریق ریزمقیاس‌نمایی برون‌دادهای مدل‌های HadCM3 و CGCM3 تحت سناریوهای A2، B2 و A1B با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM مقدار ET_o را در مناطق نیمه‌خشک و مرطوب ایران برای دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۱ برآورد کردند و یک روند افزایشی معنی‌دار در آینده تحت همه سناریوها به دلیل افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی پیش‌نگری کردند (Nouri et al., 2018). لطفی و همکاران با استفاده از مدل LARS-WG و SDSM برون‌دادهای دو مدل HadGEM2 و CanESM2 را تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در مناطق غربی ایران ریزمقیاس‌نمایی نموده و نشان دادند که ET_o در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ نسبت به ۲۰۱۸-۱۹۸۹ به میزان ۱ تا ۷/۳ درصد افزایش نشان خواهد داد (Lotfi et al., 2020).

به طور کلی اغلب پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص اثر تغییر اقلیم بر ET_o در ایران مبتنی بر مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری و محدود به مطالعات در مقیاس محلی هستند. در روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی، مدل‌های اقلیم منطقه‌ای (RCM) با تفکیک مکانی بالا با استفاده از برون‌داد مدل‌های گردش عمومی جو به عنوان شرایط مرزی و اصول فیزیکی حاکم بر جو (شامل قوانین ترمودینامیکی و مکانیک سیالات) اقلیم محلی یا منطقه‌ای را بازتولید می‌کنند و به دلیل برخورداری از شبکه یاخته‌ای امکان تحلیل تغییرپذیری‌های مکانی را تسهیل می‌کنند. امبای و همکاران با استفاده از مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های ۲۰ مدل RCM تحت پروژه CORDEX و سناریوی RCP4.5 تغییرات بارش و ET_o را در غرب آفریقا بررسی کردند. نتایج نشان داد که به ازای ۲ °C افزایش دما در آینده، ET_o نسبت به دوره تاریخی روند افزایشی خواهد داشت (Mbaye et al., 2019). غلام‌پور شمامی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از پیش‌نگری‌های ریزمقیاس‌نمایی‌شده چند مدل اقلیمی CMIP5 به روش دینامیکی تحت پروژه CORDEX به ارزیابی بارش و ET_o در شرایط اقلیم فعلی و اقلیم آینده در استان کردستان پرداختند. نتایج حاکی از افزایش دما و ET_o در آینده نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۹۰ و نوسانات بارش در مورد تمامی ایستگاه‌ها و مدل‌های اقلیمی بود.

نتایج بسیاری از مطالعات انجام شده در مقیاس جهانی که از برون‌دادهای مدل‌های اقلیمی CMIP5 برای برآورد برون‌خط تبخیر-تعرق پتانسیل و شاخص‌های خشکی/ خشکسالی استفاده کرده‌اند، حاکی از روند افزایشی قابل توجه خشکی برای قرن ۲۱ است (Dai, 2013; Sherwood and Fu, 2014; Lin et al., 2015; Scheff and Frierson, 2015; Naumann et al., 2018). در حالی‌که این نتایج در تناقض با پیش‌نگری مستقیم مدل‌های CMIP5 در خصوص افزایش رواناب و کاهش خشکی در بسیاری از مناطق کره زمین است (Roderick et al., 2015; Swann et al., 2016). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این تناقض تا حدی ناشی از نادیده گرفتن اثر افزایش غلظت گاز CO_2 جو بر میزان مقاومت روزنه‌ای گیاهان است (Roderick et al., 2015; Milly and Dunne, 2016; Swann et al., 2016). لذا، لحاظ کردن تغییرات مقاومت روزنه‌ای در برآورد تبخیر- تعرق پتانسیل به منظور ارزیابی‌های صحیح‌تری از اثرات تغییر اقلیم توصیه شده است (Yang et al., 2019). داکستاسانتوس و همکاران با استفاده از برون‌داد سه

مدل گردش عمومی جو تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 تاثیر مقاومت روزنه‌ای بر برآورد ET_o برای دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۰ و تغییرات ET_o را نسبت به دوره تاریخی ۲۰۰۹-۱۹۸۰ در جنوب برزیل بررسی کردند. نتایج نشان داد که لحاظ کردن تغییرات مقاومت روزنه‌ای، شدت روند افزایشی ET_o در آینده را کاهش می‌دهد (da Costa Santos et al., 2020).

از نظر تغییر اقلیم، هر گونه تغییر در متغیرهای اقلیمی، تبخیر-تعرق و نیاز آبی محصول را تحت تاثیر قرار خواهد داد (Goyal, 2004). لذا، درک رابطه بین ET_o و متغیرهای اقلیمی در آینده به طراحی سازوکارهای مدیریت پایدار آب و پوشش گیاهی در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند، کمک خواهد کرد. سو و همکاران از طریق ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی برون‌دادهای دو مدل اقلیم جهانی ECHAM5 و HadCM3 میزان ET_o استان Zhejiang چین را برای دوره آینده ۲۰۴۰-۲۰۱۱ پیش‌نگری کرده و از طریق تحلیل حساسیت و تحلیل سهم متغیرهای هواشناسی در تغییرات ET_o نشان دادند که تغییرات ET_o در آینده اساساً ناشی از تغییرات سه متغیر تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و دمای کمینه روزانه است (Xu et al., 2014). دونگ و همکاران تغییرات و واداشت‌های پیشران ET_o را برای پیش‌نگری‌های آینده تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بررسی کردند و نشان دادند که روند افزایشی ET_o ناشی از افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی بوده و اثر افزایش سرعت باد با اثر کاهش تابش خورشیدی خنثی می‌شود (Dong et al., 2020). ژائو و همکاران با بررسی تغییرات زمانی- مکانی ET_o تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در چین نشان دادند که اگرچه بیشترین حساسیت ET_o به رطوبت نسبی است. مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده روند افزایشی ET_o در آینده میانگین دما است (Zhao et al., 2020).

علی‌رغم فراوانی مطالعات مربوط پیش‌نگری تغییرات ET_o تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، تاکنون مطالعه‌ای در مورد سهم متغیرهای هواشناسی کنترل‌کننده تغییرات آتی ET_o در ایران انجام نشده است و مطالعات انجام شده در مورد تحلیل سهم متغیرهای هواشناسی در روند ET_o (مانند Dinpashoh et al., 2011; Tabari et al., 2012; Nouri et al., 2017; Nouri and Bannayan, 2019)، محدود به دوره‌های تاریخی بوده و دوره‌های آینده را شامل نمی‌شوند.

هدف از مطالعه حاضر، استفاده از پیش‌نگری‌های ریزمقیاس‌نمایی شده دو مدل گردش عمومی جو تحت پروژه CORDEX و سناریوی RCP8.5 برای برآورد ET_o در محدوده حوضه دریاچه ارومیه، بررسی تغییرات میانگین سالانه ET_o و همچنین متغیرهای هواشناسی در سه دوره ۳۰ ساله ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ نسبت به دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۷۶ و بررسی سهم متغیرهای هواشناسی کنترل‌کننده تغییرات ET_o در آینده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

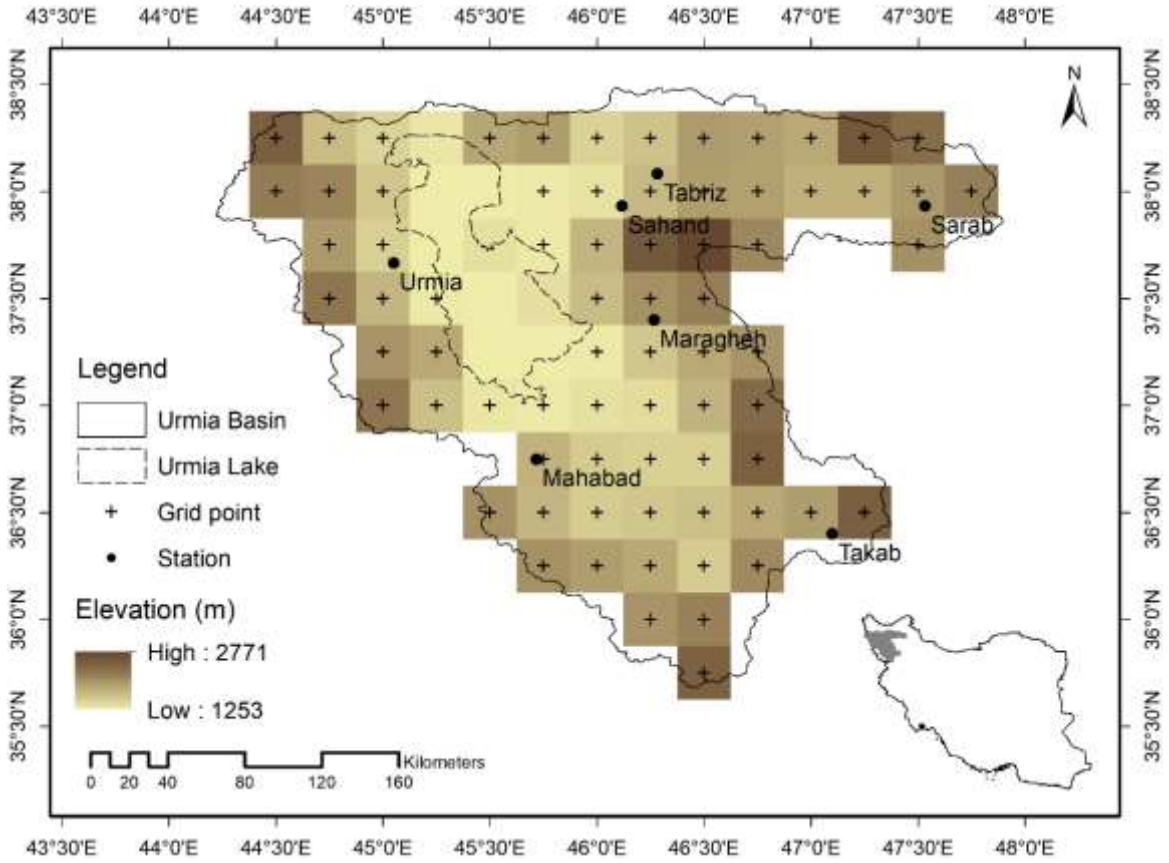
منطقه مورد مطالعه، حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در شمال غربی ایران است. این حوضه با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع یکی از شش حوضه آبریز اصلی ایران و یکی از بزرگترین دریاچه‌های فوق شور در جهان است که در سال‌های اخیر شدیداً با بحران خشک شدن مواجه شده است.

در این مطالعه از داده‌های شبکه‌ای پایگاه داده CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment) استفاده شد (Giorgi et al., 2009). برنامه CORDEX با استفاده از مدل‌های اقلیم منطقه‌ای مختلف و خروجی‌های چندین مدل گردش عمومی جو، پیش‌بینی‌های اقلیمی با مقیاس‌های مکانی بهتر را تولید می‌کند که مورد نیاز پژوهش‌های ارزیابی تاثیر و همچنین سازگاری با تغییر اقلیم است. مدل‌های اقلیم منطقه‌ای CORDEX در ۱۴ محدوده مختلف در سراسر جهان توسعه یافته‌اند که دو محدوده از آنها ایران را پوشش می‌دهند (منطقه ۶: منطقه آسیای جنوبی و منطقه ۱۳: منطقه خاورمیانه-آفریقای شمالی (Middle East-North Africa, MENA)). در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در محدوده MENA استفاده شد. محدوده MENA در فاصله عرض‌های جغرافیایی ۶/۶°S- تا ۴۴/۸۸°N و طول‌های جغرافیایی ۲۶/۴°W- تا ۷۵/۲۴°E قرار دارد. محصولات پروژه CORDEX-MENA شامل خروجی‌های مدل اقلیم منطقه‌ای RCA4 است که از دو مدل گردش عمومی GFDL-ESM2M و EC-EARTH به عنوان مدل پیشران استفاده می‌کند. تفکیک مکانی این دو مجموعه داده ۰/۲۲° و دارای مقیاس زمانی روزانه برای دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۷۶ و دوره آینده ۲۱۰۰-۲۰۰۶ تحت سناریوی RCP8.5 است. در این مطالعه، از متغیرهای روزانه دمای کمینه در ارتفاع ۲ متری (tasmin)، دمای بیشینه در ارتفاع ۲ متری (tasmax)، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (sfcWind)، رطوبت ویژه در ارتفاع ۲ متری (huss)، تابش موج کوتاه رو به پایین (rsds)، تابش موج کوتاه رو به بالا (rsus)، تابش موج بلند رو به پایین (rlds) و تابش موج بلند رو به بالا (rlus)، پس از اعمال تبدیل واحدهای لازم، استفاده شد. شکل ۱ موقعیت یاخته‌های شبکه مدل‌های اقلیم منطقه‌ای و ارتفاع متوسط هر یاخته را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. شایان ذکر است که تنها از یاخته‌هایی که در سطح خشکی هستند، استفاده شد و یاخته‌هایی که سطح دریاچه ارومیه را پوشش می‌دهند، در محاسبات لحاظ نشدند.

وجود اریبی نظام‌مند در مدل‌های اقلیمی مانع استفاده مستقیم از آنها می‌شود. روش متداول برای رفع این اریبی‌ها، مقایسه داده‌های شبکه‌ای تاریخی با داده‌های مشاهداتی متناظر ایستگاه‌های هواشناسی و استفاده از روش‌های تصحیح اریبی برای تولید داده‌های

اقلیمی تصحیح‌شده است. رابطه غیرخطی پنمن-مانتیث فائو وابسته به متغیرهای هواشناسی زیادی است و از طرفی رابطه تنگاتنگی بین متغیرهای هواشناسی وجود دارد. در تصحیح اریبی مستقل متغیرها، سازگاری متغیرها از دید هواشناسی لحاظ نمی‌شود. لذا، استفاده از متغیرهایی که به طور مستقل تصحیح اریبی شده‌اند، می‌تواند منجر به مقادیر غیر واقعی ET_o شود. بنابراین، در این مطالعه، به جای تصحیح اریبی مستقل متغیرهای هواشناسی، تصحیح اریبی روی مقادیر ET_o اعمال شد (Srivastava et al., 2015; Obada et al., 2017; Paredes et al., 2018). مقادیر ET_o یک بار با استفاده از داده‌های شبکه‌ای تاریخی و بار دیگر با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها برای دوره‌های آماری مشترک محاسبه شدند و از طریق مقایسه آنها، پارامترهای تصحیح اریبی در مقیاس زمانی ماهانه محاسبه شدند. با اعمال پارامترهای تصحیح اریبی بر مقادیر ET_o حاصل از داده‌های شبکه‌ای و با فرض عدم تغییر این پارامترها برای دوره آینده، تصحیح اریبی ET_o برای دوره‌های تاریخی و آینده انجام شد. برای این منظور، از داده‌های هواشناسی هفت ایستگاه سینوپتیک داخل حوضه دریاچه ارومیه استفاده شد. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک در شکل ۱ و مشخصات جغرافیایی و اقلیم ایستگاه‌ها بر اساس روش دمارتن در جدول ۱ نشان داده شده است. اقلیم غالب حوضه آبریز دریاچه ارومیه اقلیم نیمه خشک است.

داده‌های مورد استفاده شامل مشاهدات روزانه دمای کمینه (T_{min}) و دمای بیشینه (T_{max}) در ارتفاع ۲ متری، رطوبت نسبی (RH) در ارتفاع ۲ متری، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (u_{10}) و تعداد ساعات آفتابی (n) برای دوره آماری ۳۰ ساله ۲۰۱۸-۱۹۸۹ هستند که از سازمان هواشناسی جمهوری اسلامی ایران (IRIMO) تهیه شدند. داده‌های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (u_{10}) با استفاده از رابطه مقطع باد (Allen et al., 1998) به سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (u_2) تبدیل شدند.



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی حوضه دریاچه ارومیه، ایستگاه‌های سینوپتیک، یاخته‌های شبکه مدل‌های اقلیم منطقه‌ای و ارتفاع میانگین یاخته‌ها

جدول ۱- مشخصات ایستگاه های مورد مطالعه و اقلیم ایستگاه‌ها بر اساس روش دومارتن

استان	ایستگاه	اقلیم	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (m)
آذربایجان غربی	ارومیه	نیمه خشک	37° 39′ 31″	45° 03′ 19″	1328.0
	تکاب	نیمه خشک	36° 23′ 44″	47° 05′ 55″	1817.2
	مهاباد	نیمه خشک	36° 45′ 12″	45° 42′ 55″	1351.8
آذربایجان شرقی	تبریز	نیمه خشک	38° 07′ 19″	46° 14′ 32″	1361.0
	مراغه	نیمه خشک	37° 20′ 51″	46° 08′ 45″	1477.7
	سراب	نیمه خشک	37° 55′ 60″	47° 31′ 60″	1682.0
	سهند	خشک	37° 55′ 60″	46° 07′ 00″	1641.0

برآورد تبخیر-تعرق مرجع و تصحیح اریبی

معادله برآورد تبخیر-تعرق مرجع روزانه (ET_o) به روش پنمن-مانتیث فائو شامل دو مؤلفه تابشی (ET_{o_r}) و ایرودینامیکی (ET_{o_a}) بوده و به صورت زیر است (Allen et al., 1998):

$$ET_o=ET_{o_r}+ET_{o_a}=\frac{0.408\Delta(R_n-G)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)}+\frac{\gamma(\frac{900}{T_{mean}+273})u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \quad (۱)$$

که ET_o تبخیر-تعرق مرجع ($mm\ day^{-1}$)، R_n تابش خالص در سطح محصول ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، G شار گرمای خاک ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، T_{mean} میانگین دمای هوا در ارتفاع ۲ متری (°C)، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری ($m\ s^{-1}$)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع-دما ($kPa\ °C^{-1}$)، γ ثابت سایکرومتری ($kPa\ °C^{-1}$) است. جزئیات بیشتر در نشریه ۵۶ فائو آمده است (Allen et al., 1998).

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که محاسبه برون‌خط شاخص‌های خشکی/ خشکسالی که مبتنی بر ET_o به روش پنمن-مانتیث فائو و خروجی‌های مدل‌های اقلیمی هستند، به دلیل نادیده گرفتن اثر افزایش غلظت گاز CO_2 جو بر افزایش مقاومت سطحی، منجر به بیش‌برآورد روند خشکی برای قرن ۲۱ می‌شود (Roderick et al., 2015; Milly and Dunne, 2016; Swann et al., 2016). یانگ و همکاران با حل معکوس رابطه پنمن-مانتیث فائو بر اساس خروجی‌های ۱۶ مدل CMIP5، مقادیر مقاومت سطحی را برآورد کرده و با بررسی تغییرات بلندمدت مقاومت سطحی و غلظت گاز CO_2 جو، رابطه زیر را برای مقاومت سطحی به عنوان تابعی از غلظت گاز CO_2 جو بدست آوردند (Yang et al., 2019):

$$r_s([CO_2])=70+0.05([CO_2]-300) \quad (۲)$$

که r_s مقاومت سطحی بر حسب $s\ m^{-1}$ و $[CO_2]$ غلظت گاز CO_2 بر حسب ppm است. با ترکیب معادلات (۱) و (۲)، شکل تعدیل شده‌ای از رابطه پنمن-مانتیث فائو به صورت زیر ارائه شد (Yang et al., 2019):

$$ET_o=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma(\frac{900}{T_{mean}+273})u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+u_2[0.34+2.4\times10^{-4}([CO_2]-300)]} \quad (۳)$$

در مورد داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها، تابش خورشیدی (R_s) با استفاده از رابطه آنگستروم محاسبه شد:

$$R_s=(a+b\frac{n}{N})R_a \quad (۴)$$

که R_s تابش خورشیدی ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، R_a تابش ماوراء جو ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، n تعداد ساعات آفتابی واقعی (hr)، N حداکثر تعداد ساعات آفتابی ممکن (hr) و a و b ثابت‌های رگرسیونی هستند که در این مطالعه از مقادیر توصیه شده که به ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۰/۵ هستند، استفاده شد. در مورد داده‌های شبکه‌ای، R_s معادل متغیر rsds بوده و R_n از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_n=rsds-rsus+rlds-rlus \quad (۵)$$

برای تصحیح اریبی ET_o حاصل از داده‌های شبکه‌ای، از روش مقیاس‌گذاری استفاده شد. مقدار ET_o تصحیح اریبی‌شده در این روش از رابطه زیر بدست می‌آید (Obada et al., 2017):

$$ET_{o_{c,m,d}}=ET_{o_{RCM,m,d}}+\overline{ET}_{o_{OBS,m}}-\overline{ET}_{o_{RCM,m}} \quad (۶)$$

که $ET_{o_{c,m,d}}$ مقدار ET_o تصحیح اریبی‌شده برای روز d-اُم ماه m-اُم، $ET_{o_{RCM,m,d}}$ مقدار ET_o حاصل از داده‌های شبکه‌ای RCM برای روز d-اُم ماه m-اُم، پارامتر $\overline{ET}_{o_{OBS,m}}$ میانگین ET_o حاصل از داده‌های مشاهداتی برای ماه m-اُم و پارامتر $\overline{ET}_{o_{RCM,m}}$ میانگین ET_o حاصل از داده‌های شبکه‌ای RCM برای ماه m-اُم است.

پارامترهای تصحیح اریبی بر مبنای دوره آماری مشترک داده‌های شبکه‌ای تاریخی و داده‌های مشاهداتی یعنی دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۹ محاسبه شدند و بر مقادیر ET_o حاصل از داده‌های شبکه‌ای برای دوره‌های تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) و آینده (۲۱۰۰-۲۰۰۶) اعمال شدند.

برآورد سهم

در این مطالعه سهم متغیرهای دمای کمینه (T_{min}) و دمای بیشینه (T_{max}) در ارتفاع ۲ متری، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (u_2)، تابش خورشیدی (R_s)، رطوبت نسبی (RH) در ارتفاع ۲ متری و غلظت گاز CO_2 جو در تغییرات ET_o بررسی شد. سهم هر یک از متغیرهای هواشناسی در تغییرات ET_o به صورت زیر قابل بیان است:

$$dET_o \approx \frac{\partial ET_o}{\partial T_{max}} dT_{max} + \frac{\partial ET_o}{\partial T_{min}} dT_{min} + \frac{\partial ET_o}{\partial u_2} du_2 + \frac{\partial ET_o}{\partial R_s} dR_s + \frac{\partial ET_o}{\partial RH} dRH + \frac{\partial ET_o}{\partial CO_2} dCO_2 \quad (۷)$$

که dET_o تغییرات ET_o، $\frac{\partial ET_o}{\partial x_i}$ مشتق جزئی ET_o نسبت به متغیر x_i و dx_i تغییرات متغیر x_i و $c(x_i)=\frac{\partial ET_o}{\partial x_i} dx_i$ سهم متغیر x_i در تغییرات ET_o است.

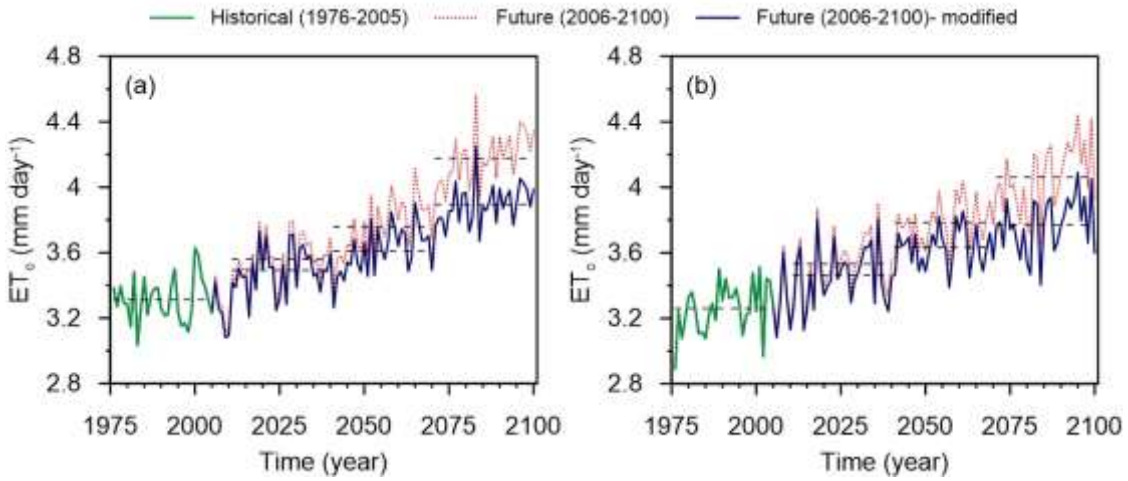
سهم نسبی متغیرها بر حسب درصد از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Dong et al., 2020):

$$C(x_i)=\frac{c(x_i)}{\sum_{i=1}^{6} c(x_i)} \times 100 \quad (۸)$$

سو و همکاران با مقایسه ضرایب حساسیت حاصل از داده‌های مشاهداتی، داده‌های تاریخی و آینده مدل اقلیم منطقه‌ای، نشان دادند که مدل‌های اقلیم منطقه‌ای قادر نیستند حساسیت ET_o به متغیرهای مختلف هواشناسی را به درستی شبیه‌سازی کنند و پیشنهاد کردند که برای تحلیل حساسیت و تحلیل سهم از ضرایب حساسیت حاصل از داده‌های مشاهداتی استفاده شود (Xu et al., 2014). لذا، در این مطالعه، برای محاسبه مشتقات جزئی، از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها برای دوره آماری ۲۰۱۸–۱۹۸۹ استفاده شد. پس از محاسبه میانگین مقادیر $\frac{\partial ET_o}{\partial x_i}$ ایستگاه‌ها، از این مقادیر برای کمّی نمودن سهم هر یک از متغیرهای هواشناسی در تغییرات میانگین بلندمدت ET_o نسبت به دوره تاریخی (۲۰۰۵–۱۹۷۶) استفاده شد. برای این منظور، ابتدا دوره آینده به سه دوره ۳۰ ساله، آینده نزدیک (۲۰۱۱–۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۷۰–۲۰۴۱) و آینده دور (۲۱۰۰–۲۰۷۱) تقسیم شد. سپس در مورد هر یک از یاخته‌ها مقادیر تغییرات میانگین بلندمدت متغیر هواشناسی نسبت به دوره تاریخی (dx_i) برای هر یک از سه دوره آینده محاسبه و با استفاده از رابطه (۷) سهم هر یک از متغیرهای هواشناسی در تغییرات ET_o برآورد شد. برای حصول اطمینان از اینکه مشتقات جزئی حاصل از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها می‌تواند سهم متغیرها را به درستی نمایش دهد، تحلیل سهم برای روند ET_o دوره تاریخی مدل اقلیمی انجام و صحت آن بررسی شد.

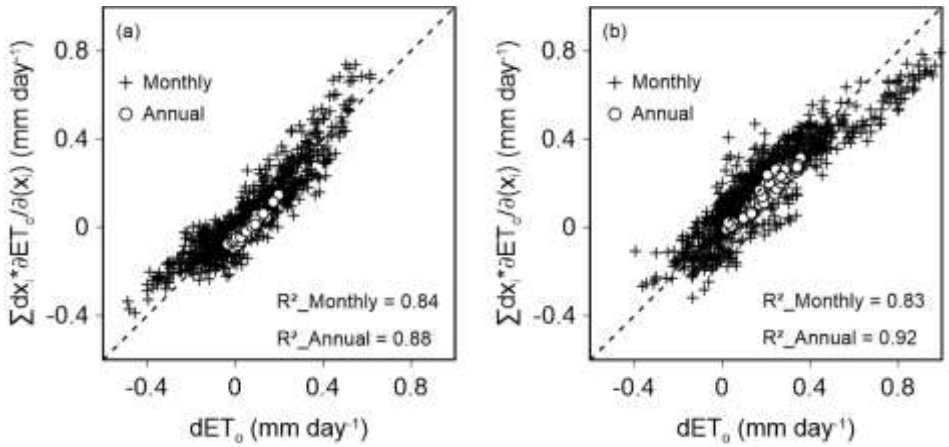
نتایج و بحث

نتایج مقایسه ET_o مبتنی بر داده‌های شبکه‌ای مدل‌ها و مشاهدات ایستگاه‌ها، برای دوره مشترک آماری ۲۰۰۵–۱۹۸۹، نشان داد که ET_o مبتنی بر مدل‌ها کمتر از ET_o مبتنی بر مشاهدات ایستگاه‌ها برآورد شده است. میانگین ET_o پیش از تصحیح اریبی، برای دوره مشترک آماری ۲۰۰۵–۱۹۸۹، در مورد یاخته‌های شبکه مدل EC-EARTH (GFDL-ESM2M) برابر ۲/۸۹ mm day^{-1} (۲/۸۶) است که پس از تصحیح اریبی برابر با میانگین ET_o مبتنی بر داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها (۳/۳۲ mm day^{-1}) شدند. شکل ۲ نمودارهای مربوط به میانگین مقادیر تصحیح اریبی شده ET_o برای همه یاخته‌های شبکه درون حوضه دریاچه ارومیه را برای دوره تاریخی (۲۰۰۵–۱۹۷۶) و دوره آینده (۲۱۰۰–۲۰۰۶) نشان می‌دهد. نمودارهای قرمز رنگ (نقطه‌چین) و آبی رنگ (خط ممتد) به ترتیب مبتنی بر رابطه اصلی و رابطه تعدیل شده پنمن- مانتیث فائو هستند. میانگین بلندمدت ET_o دوره تاریخی برای مدل‌های EC-EARTH و GFDL-ESM2M به ترتیب ۳/۳۱ mm day^{-1} و ۳/۲۶ mm day^{-1} است. مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که در مورد هر دو مدل، میزان ET_o در آینده روند افزایشی خواهد داشت. بهمنش و همکاران (۱۳۹۴) از طریق ریزمقیاس‌نمایی برون‌دادهای مدل HadCM3 بر مبنای سناریوهای A1B، A2 و B1 روند افزایشی برای ET_o ایستگاه ارومیه در قرن ۲۱ پیش‌نگری کردند. گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) نیز نشان دادند که تحت سناریوهای B1، A2، A1B و B2 میزان ET_o در حوضه دریاچه ارومیه بر مبنای پیش‌نگری‌های مدل HadCM3 در قرن ۲۱ روند افزایشی خواهد داشت. با توجه به شکل ۲، میزان ET_o مبتنی بر رابطه تعدیل‌شده همواره کمتر از میزان ET_o مبتنی بر رابطه اصلی است. در مورد مدل EC-EARTH (GFDL-ESM2M)، اختلاف دو نمودار از نظر میانگین بلندمدت ET_o برای سه دوره آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور به‌ترتیب برابر ۰/۰۷ mm day^{-1} (۰/۰۷)، ۰/۱۴ mm day^{-1} (۰/۱۵) و ۰/۲۸ mm day^{-1} (۰/۲۹) است. بنابراین میزان اختلاف دو نمودار به صورت تصاعدی بیشتر می‌شود؛ چرا که بر اساس سناریوی RCP8.5 غلظت گاز CO_2 جو در آینده با شیب تندشونده افزایش می‌یابد. لذا میزان مقاومت روزنه‌ای افزایش یافته و ET_o مبتنی بر رابطه تعدیل‌شده نسبت به ET_o مبتنی بر رابطه اصلی کاهش می‌یابد. در تایید مطالعه داکستاسانتوس و همکاران (da Costa Santos et al., 2020) لحاظ کردن اثر افزایش غلظت گاز CO_2 جو بر مقاومت روزنه‌ای، شدت روند افزایشی ET_o در آینده را کاهش می‌دهد.

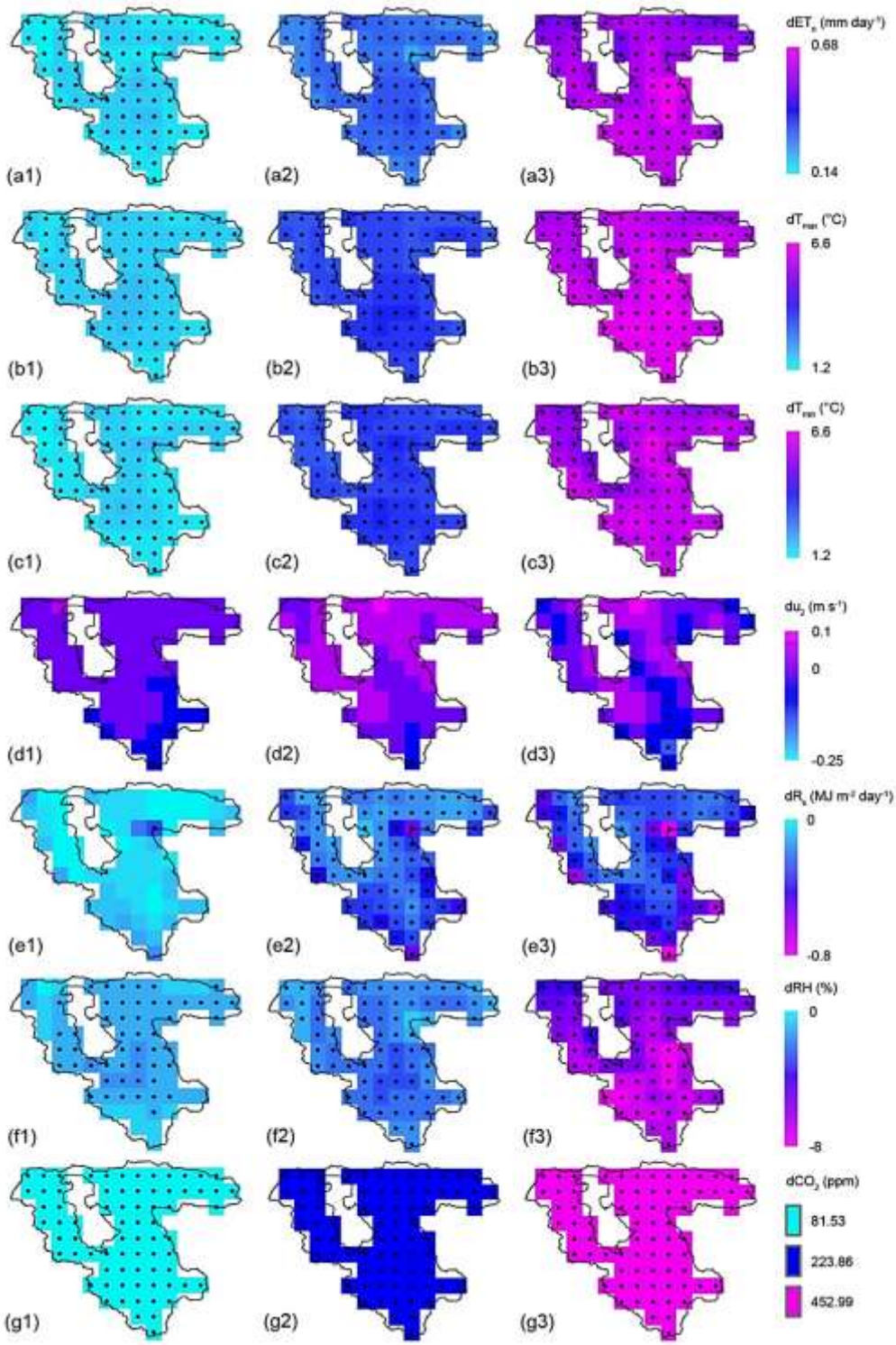


شکل ۲- میانگین مقادیر تصحیح اریبی شده ET_o برای همه یاخته‌های شبکه درون منطقه مطالعاتی در دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) و دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۰۶) مبتنی بر رابطه اصلی و رابطه تعدیل شده (modified) پنمن- مانتیث فائو برای مدل‌های EC-EARTH (a) و GFDL-ESM2M (b). خطوط منقطع نشان‌دهنده میانگین بلندمدت ET_o برای دوره‌های تاریخی، آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور است.

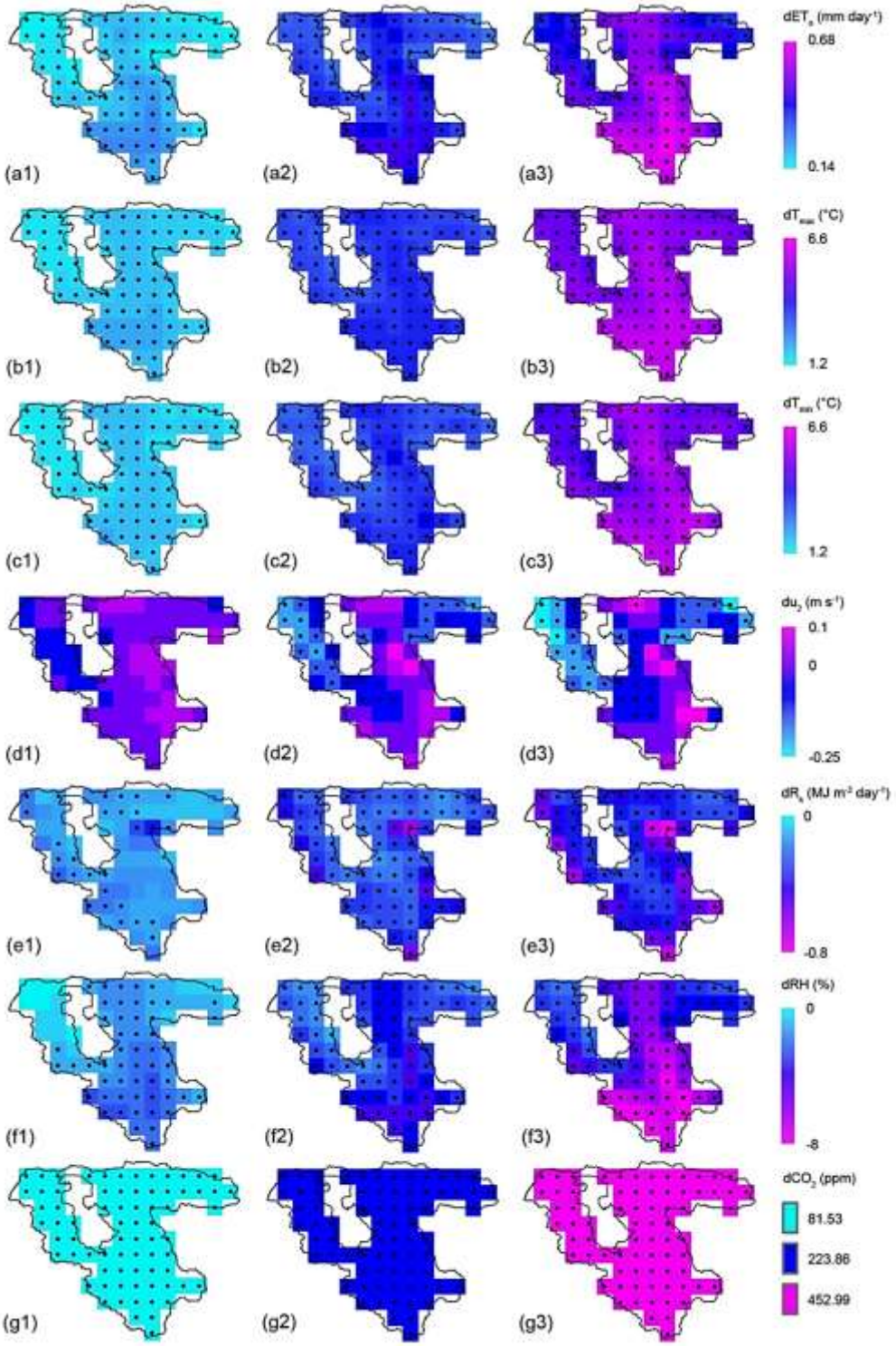
برای بررسی سهم متغیرهای مختلف هواشناسی (T_{max}، T_{min}، u_2، R_s، RH و CO_2) در تغییرات میانگین بلندمدت ET_o دوره آینده نسبت به دوره تاریخی، ابتدا مشتقات جزئی ($\frac{\partial ET_o}{\partial x_i}$)، با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها برای دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۸۹ محاسبه شد و میانگین مقادیر $\frac{\partial ET_o}{\partial x_i}$ ایستگاه‌ها بدست آمد. برای کسب اطمینان از کفایت مشتقات جزئی حاصل از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها در تحلیل سهم داده‌های شبکه‌ای مدل‌ها، در مورد هر یک از یاخته‌ها، روند تغییرات ET_o (dET_o) و همچنین متغیرهای هواشناسی (dx_i) برای دوره تاریخی مدل‌های اقلیمی محاسبه و با استفاده از میانگین مقادیر $\frac{\partial ET_o}{\partial x_i}$ ایستگاه‌ها سمت راست رابطه (۷) محاسبه و با مقادیر dET_o (سمت چپ رابطه ۷) مقایسه شد. شکل ۳ نمودار پراکنش مقادیر حاصل از سمت راست رابطه (۷) را در برابر مقادیر dET_o همه یاخته‌ها برای مقیاس زمانی ماهانه و سالانه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، در مورد هر دو مدل، اغلب نقاط پراکندگی مناسبی در اطراف خط ۱:۱ دارند. فاصله نقاط از خط ۱:۱ به ازای تغییرات بیش از ۰/۵ mm day^{-1} در ET_o بیشتر بوده؛ به طوری که به صورت کم‌برآوردهای آشکاری در مورد مدل GFDL-ESM2M قابل مشاهده است. به طور کلی، ضرایب تبیین مدل EC-EARTH (GFDL-ESM2M) برای مقیاس زمانی ماهانه و سالانه به ترتیب ۰/۸۳ (۰/۸۴) و ۰/۹۲ (۰/۸۸) است. لذا، در مورد هر دو مدل استفاده از مشتقات جزئی حاصل از داده‌های ایستگاه‌ها برای تحلیل سهم قابل اطمینان است.



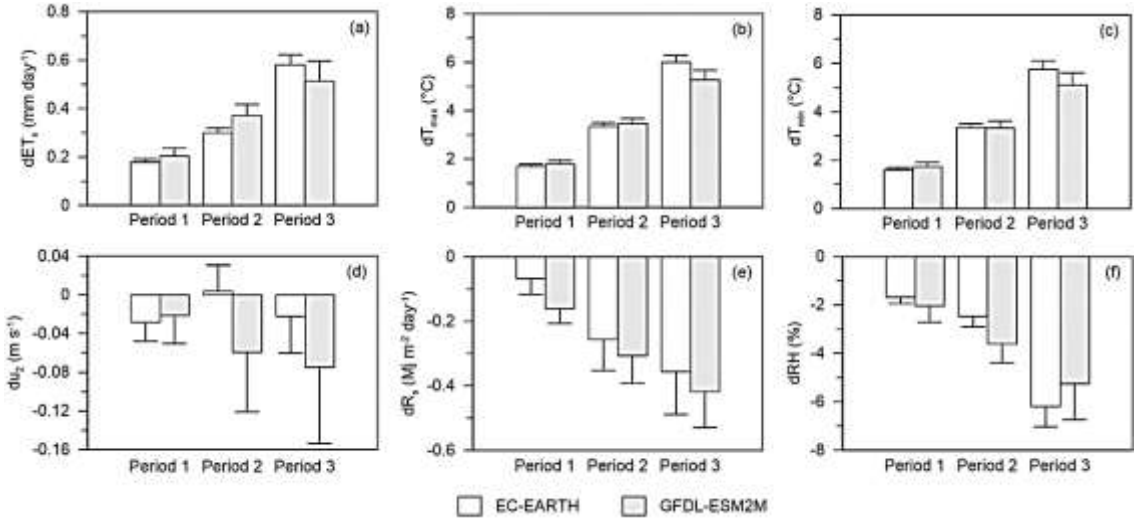
شکل ۳- رابطه مجموع سهم (mm day^{-1}) تغییرات متغیرهای هواشناسی در تغییرات ET_o با تغییرات ET_o در دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) در مقیاس زمانی ماهانه و سالانه برای یاخته‌های مدل‌های EC-EARTH (a) و GFDL-ESM2M (b) در منطقه مورد مطالعه



شکل ٤- نقشه‌های تفاضل مقادیر میانگین بلندمدت سالانه ET_0 (a)، دمای بیشینه (b)، دمای کمینه (c)، سرعت باد (d)، تابش خورشیدی (e)، رطوبت نسبی (f) و غلظت گاز CO_2 (g) دوره‌های آینده ۲۰۴۰-۲۰۱۱ (۱)، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ (۲) و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ (۳) نسبت به مقادیر متناظر آنها در دوره تاریخی (۱۹۷٦-۲۰۰۵) برای مدل EC-EARTH. نقاط نشان‌دهنده معنی‌دار بودن تفاضل‌ها در سطح معنی‌داری ٪ ٥ است.



شکل ۵- نقشه‌های تفاضل مقادیر میانگین بلندمدت سالانه ET_0 (a)، دمای بیشینه (b)، دمای کمینه (c)، سرعت باد (d)، تابش خورشیدی (e)، رطوبت نسبی (f) و غلظت گاز CO_2 (g) دوره‌های آینده ۲۰۴۰-۲۰۱۱ (۱)، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ (۲) و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ (۳) نسبت به مقادیر متناظر آنها در دوره تاریخی (۱۹۷۶-۲۰۰۵) برای مدل GFDL-ESM2M. نقاط نشان‌دهنده معنی‌دار بودن تفاضل‌ها در سطح معنی‌داری ۵ % است.



شکل ٦- نمودارهای مقایسه میانگین و انحراف معیار تفاضل مقادیر میانگین بلندمدت سالانه ET_o (a)، دمای بیشینه (b)، دمای کمینه (c)، سرعت باد (d)، تابش خورشیدی (e) و رطوبت نسبی (f) دوره‌های آینده ۲۰۴۰-۲۰۱۱ (Period 1)، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ (Period 2) و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ (Period 3) نسبت به مقادیر متناظر آنها در دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۷٦) برای یاخته‌های مدل‌های EC-EARTH و GFDL-ESM2M در منطقه مورد مطالعه

شکل ۴ و ۵ نقشه‌های تفاضل مقادیر میانگین بلندمدت سالانه ET_o و متغیرهای مختلف هواشناسی دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور نسبت به مقادیر متناظر آنها در دوره تاریخی را به ترتیب برای مدل EC-EARTH و GFDL-ESM2M نشان می‌دهند. نمودارهای مقایسه میانگین و انحراف معیار تفاضل‌ها نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. نقاط درون یاخته‌ها نشان‌دهنده این است که اختلاف میانگین‌ها در سطح ٪ ۵ معنی‌دار است. با توجه به شکل ۴(a1-a3) و شکل ۶(a) میانگین بلندمدت سالانه ET_o در همه یاخته‌های شبکه مدل EC-EARTH اختلاف معنی‌داری با دوره تاریخی دارد. میانگین بلندمدت سالانه ET_o دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور نسبت به دوره تاریخی به ترتیب به میزان $mm\ day^{-1}$ ۰/۱۸، $mm\ day^{-1}$ ۰/۳۰ و $mm\ day^{-1}$ ۰/۵۸ افزایش نشان می‌دهد. توزیع مکانی تفاضل‌ها در سطح حوضه تقریباً یکنواخت است به طوری که انحراف معیار تفاضل‌ها در دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور (به ترتیب $mm\ day^{-1}$ ۰/۰۱، $mm\ day^{-1}$ ۰/۰۲ و $mm\ day^{-1}$ ۰/۰۴) ناچیز است (شکل ۶a). در مورد مدل GFDL-ESM2M نیز اختلاف میانگین بلندمدت سالانه ET_o با دوره تاریخی در همه یاخته‌های شبکه در سطح ٪۵ معنی‌دار است (شکل ۵a1-a3). میانگین بلندمدت سالانه ET_o دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور نسبت به دوره تاریخی به ترتیب به میزان $mm\ day^{-1}$ ۰/۲۰ و $mm\ day^{-1}$ ۰/۳۷ و $mm\ day^{-1}$ ۰/۵۱ افزایش نشان می‌دهد. بنابراین مدل GFDL-ESM2M برای دوره‌های آینده نزدیک و میانی افزایش بیشتر و در مورد آینده دور افزایش کمتری را نسبت به مدل EC-EARTH پیش‌بینی می‌کند.

مقایسه توزیع مکانی تفاضل‌ها نیز بیانگر غیریکنواختی بیشتر تفاضل‌ها در میان یاخته‌های شبکه مدل GFDL-ESM2M نسبت به مدل EC-EARTH است به طوری که انحراف معیار تفاضل‌ها برای دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب برابر ترتیب $mm\ day^{-1}$ ۰/۰۴، $mm\ day^{-1}$ ۰/۰۵ و $mm\ day^{-1}$ ۰/۰۸ است (شکل ۶a). بنابراین بر اساس مدل GFDL-ESM2M میزان ET_o در نیمه جنوبی حوضه بیشتر از سایر نواحی حوضه تحت تاثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرند؛ در حالی‌که بر اساس مدل EC-EARTH میزان تاثیرپذیری ET_o از تغییر اقلیم در همه نواحی حوضه کم و بیش یکسان خواهد بود.

با توجه به شکل ۴(b1-b3) و ۴(c1-c3) میانگین بلندمدت سالانه دمای بیشینه و دمای کمینه بر اساس مدل EC-EARTH و تحت سناریوی RCP8.5 در تمامی نواحی حوضه و در تمامی دوره‌های آینده افزایش معنی‌داری خواهد داشت. به طوری که در مورد دمای بیشینه (دمای کمینه) میانگین افزایش دمای در دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب برابر ۱/۷۰ °C (۱/۵۸)، ۳/۳۳ °C (۳/۳۴) و ۵/۹۹ °C (۵/۷۶) خواهد بود (شکل ۶(b-c)). توزیع مکانی تفاضل‌ها در مورد هر دو دمای کمینه و بیشینه نسبتاً یکنواخت بوده و توپوگرافی حوضه اثر قابل توجهی روی توزیع مکانی تفاضل‌ها ندارد. در مورد مدل GFDL-ESM2M، نیز میانگین بلندمدت دمای بیشینه و کمینه افزایش معنی‌داری را در تمام یاخته‌های شبکه سطح حوضه نشان می‌دهد (شکل ۵(b1-b3) و ۵(c1-c3)) و میانگین افزایش

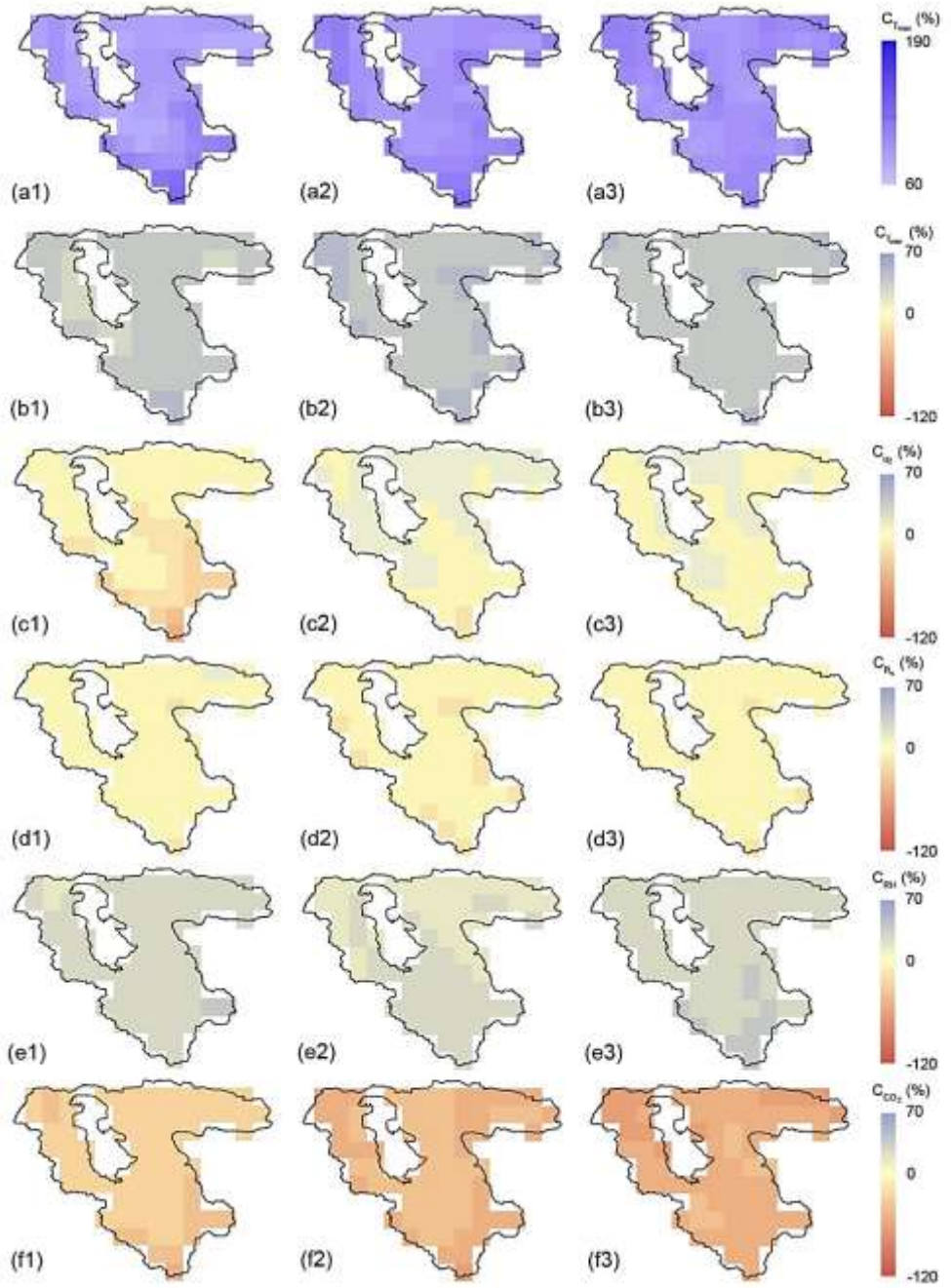
دمای بیشینه (دمای کمینه) در دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب ۱/۷۸ °C (۱/۷۲)، ۳/۴۷ °C (۳/۳۲) و ۵/۲۷ °C (۵/۱۰) خواهد بود (شکل ۶(b-c)). در مقایسه با مدل EC-EARTH، میزان افزایش دمای کمینه و بیشینه در دوره‌های آینده نزدیک و میانی اندکی بیشتر و در دوره آینده دور کمتر است؛ اما میزان تغییرپذیری مکانی در هر سه دوره آینده نسبت به مدل EC-EARTH بیشتر است. نقشه‌های توزیع مکانی تفاضل‌های دمای کمینه و دمای بیشنه و ET_o شباهت زیادی را نشان می‌دهد؛ به طوری که در مورد دمای کمینه و دمای بیشینه نیز نیمه جنوبی حوضه تاثیرپذیری بیشتری از تغییر اقلیم نشان می‌دهند. لذا، می‌توان تغییرات زمانی ET_o را تا حد زیادی به عامل دما نسبت داد. مدل EC-EARTH تقریباً در مورد کل حوضه، تغییر معنی‌داری در میانگین بلندمدت سالانه سرعت باد نشان نمی‌دهد (شکل ۴(d1-d3)) و انحراف معیار زیاد تفاضل‌ها حاکی از تغییرپذیری مکانی زیاد آنها است (شکل 6d). مدل GFDL-ESM2M کاهش معنی‌داری را در میانگین بلندمدت سرعت باد بویژه در یاخته‌های نیمه شمالی حوضه برای دوره آینده میانی ($m\ s^{-1}$ ۰/۰۶-) و آینده دور ($m\ s^{-1}$ ۰/۰۸-) نشان می‌دهد (شکل 5(d1-d3)). توزیع مکانی تفاضل‌ها بسیار متفاوت از مدل EC-EARTH است و علت این امر عدم قطعیت زیاد شبیه‌سازی سرعت باد در مدل‌های اقلیمی است (McVicar et al., 2012). شکل ۴(e1-e3) بیانگر پیش‌بینی کاهش میانگین بلندمدت سالانه تابش خورشیدی توسط مدل EC-EARTH در آینده است و تفاضل‌ها در همه یاخته‌های شبکه سطح حوضه در دوره‌های آینده میانی ($Mj\ m^{-2}\ day^{-1}$ ۰/۲۶-) و آینده دور ($Mj\ m^{-2}\ day^{-1}$ ۰/۳۶-) معنی‌دار است. وایلد و همکاران با بررسی روند تغییرات تابش خورشیدی تحت سناریوی RCP8.5 بر اساس ۳۹ مدل اقلیمی (از جمله EC-EARTH و GFDL-ESM2M) نشان دادند که علت روند کاهشی تابش خورشیدی، روند افزایشی ابرناکی است (Wild et al., 2015). میزان پیش‌بینی‌شده کاهش میانگین بلندمدت تابش خورشیدی نسبت به دوره تاریخی توسط مدل GFDL-ESM2M برای دوره‌های آینده نزدیک ($Mj\ m^{-2}\ day^{-1}$ ۰/۱۶-)، آینده میانی ($Mj\ m^{-2}\ day^{-1}$ ۰/۳۱-) و آینده دور ($Mj\ m^{-2}\ day^{-1}$ ۰/۴۲-) بیشتر از مدل EC-EARTH است (شکل 6e) و از نظر توزیع مکانی، یکنواختی بیشتری دارد (شکل 5(e1-e3)). در مورد هر دو مدل، توزیع مکانی تفاضل‌های تابش خورشیدی از توپوگرافی تبعیت می‌کند و در مناطق مرتفع‌تر میزان کاهش تابش خورشیدی بیشتر است. با توجه به شکل 6(f)، میانگین بلندمدت سالانه رطوبت نسبی طبق مدل EC-EARTH در هر سه دوره آینده نسبت به دوره تاریخی کاهش خواهد یافت (به ترتیب به میزان ٪ ۱/۶۹-، ٪ ۲/۴۸- و ٪ ۶/۱۹-) و میزان تفاضل‌ها در دوره آینده نزدیک در اغلب یاخته‌ها و در دوره‌های آینده میانی و دور در همه یاخته‌ها معنی‌دار است (شکل ۴(f1-f3)). میزان کاهش میانگین بلندمدت رطوبت نسبی نسبت به دوره تاریخی توسط مدل GFDL-ESM2M برای دوره‌های آینده نزدیک (٪ ۲/۰۵-) و آینده میانی (٪ ۳/۶۲-) بیشتر از مدل EC-EARTH و در مورد آینده دور (٪ ۵/۲۵-) کمتر از مدل EC-EARTH است (شکل 6f) و از نظر توزیع مکانی، تغییرپذیری بیشتری دارد (شکل 5(f1-f3)). از آنجا که در مورد غلظت گاز CO_2 از داده‌های میانگین جهانی توصیه شده توسط CMIP5 استفاده شده است، این داده‌ها برای هر دو مدل EC-EARTH و GFDL-ESM2M یکسان بوده و همچنین بر خلاف داده‌های مدل‌های اقلیمی به صورت شبکه‌ای نیستند؛ لذا دارای توزیع مکانی نیستند. مطابق شکل ۴(g1-g3) (یا شکل 5(g1-g3)) تفاضل میانگین بلندمدت سالانه غلظت گاز CO_2 جو در دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور نسبت به دوره تاریخی تحت سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۸۱/۵۳ ppm، ۲۲۳/۸۶ ppm و ۴۵۲/۹۹ ppm بوده و این تفاضل‌ها در سطح ٪ ۵ معنی‌دار هستند.

برای بررسی سهم هر یک از متغیرهای هواشناسی در تغییرات میانگین بلندمدت ET_o نسبت به دوره تاریخی، در مورد هر یاخته، میانگین مقادیر مشتقات جزئی ($\frac{\partial ET_o}{\partial x_i}$) ایستگاه‌ها در مقدار تفاضل متناظر (dx_i) ضرب شده و مقادیر $c(x_i)$ حاصل، بر مجموع مقادیر $c(x_i)$ (یعنی $\sum_{i=1}^{6} c(x_i) = \sum_{i=1}^{6} \frac{\partial ET_o}{\partial x_i} dx_i$) تقسیم شدند. مقادیر مثبت (منفی) سهم نشان‌دهنده این است که تغییر متغیر هواشناسی، سبب افزایش (کاهش) ET_o خواهد شد. شایان ذکر است که به دلیل منفی بودن سهم برخی متغیرها، نسبت مقادیر $c(x_i)$ به مجموع مقادیر $c(x_i)$ محدود به بازه صفر و ۱۰۰ درصد نبوده و می‌تواند مقادیری بیشتر از ۱۰۰ درصد یا کمتر از صفر درصد داشته باشد.

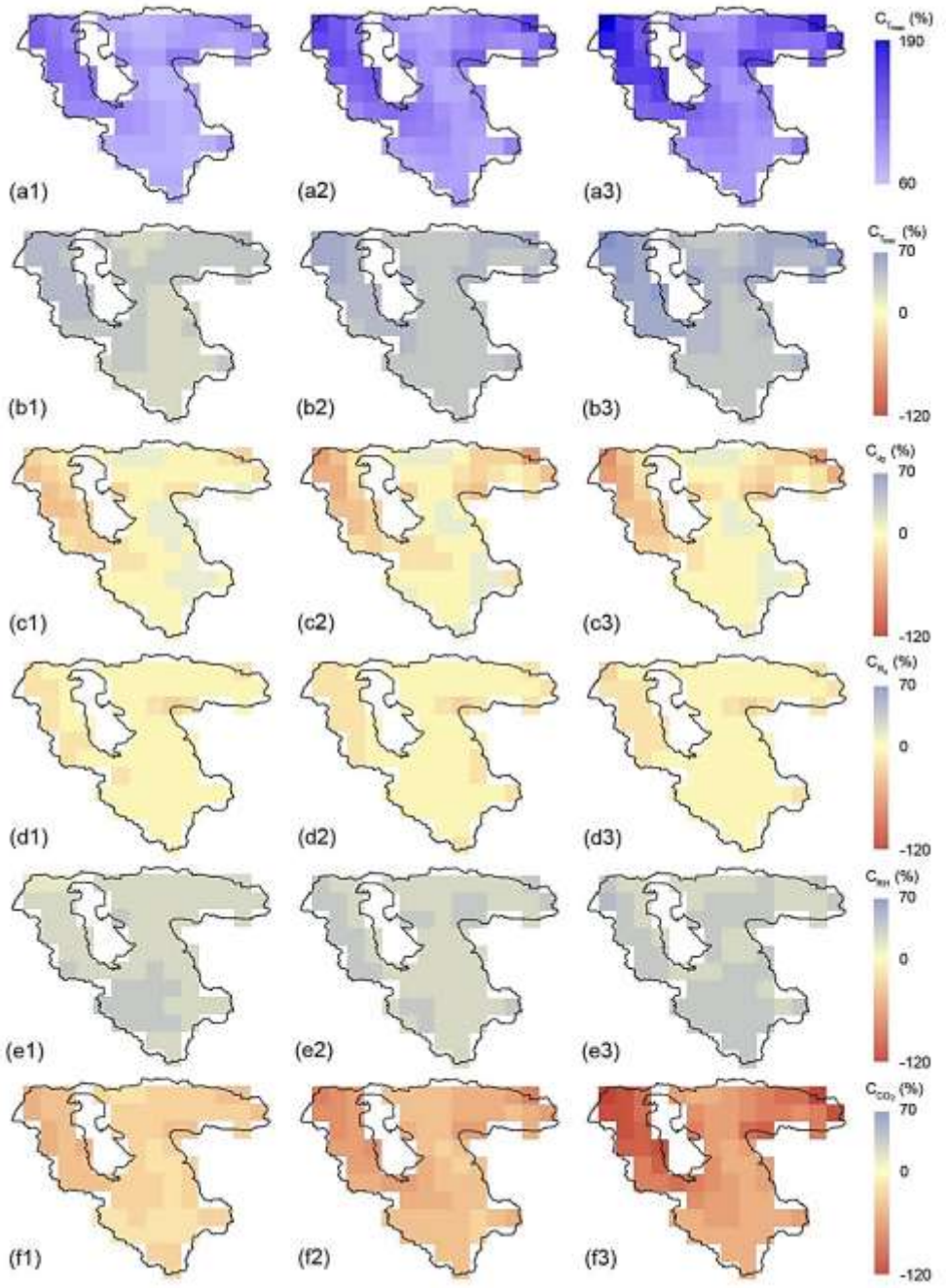
شکل‌های ۷ و ۸ نقشه درصد سهم متغیرهای هواشناسی در تغییرات میانگین ET_o سالانه دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور را نسبت به میانگین ET_o سالانه در دوره تاریخی برای مدل‌های EC-EARTH و GFDL-ESM2M نشان می‌دهند.

مقایسه نقشه‌های توزیع مکانی درصد سهم نشان می‌دهد که در مورد هر دو مدل EC-EARTH و GFDL-ESM2M سهم متغیر دمای بیشینه در تغییرات میانگین ET_o سالانه بیشتر از سایر متغیرها است. بعلاوه، سهم متغیر دمای بیشینه در همه یاخته‌ها مثبت است. یعنی افزایش دمای بیشینه در آینده سبب افزایش ET_o خواهد شد. بر اساس پیش‌نگری مدل EC-EARTH (مدل GFDL-ESM2M)، میانگین سهم دمای بیشینه در تغییرات ET_o در دوره آینده نزدیک، میانی و دور به‌ترتیب برابر ٪ ۸۲/۵۸، ٪ ۸۹/۰۹ و ٪ ۸۹/۰۴ (٪ ۸۱/۳۹، ٪ ۹۶/۰۶ و ٪ ۱۱۱/۰۶) خواهد بود (شکل ۹). با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، در مورد مدل EC-EARTH، بین دوره‌های آینده مختلف تفاوت زیادی از نظر سهم متغیر دمای بیشینه وجود ندارد اما در مورد مدل GFDL-ESM2M، سهم متغیر دمای بیشینه روند

افزایشی در طی سه دوره آینده دارد. توزیع مکانی سهم دمای بیشینه در مقایسه با سایر متغیرها تغییرپذیری بیشتری دارد. انحراف معیار سهم متغیر دمای بیشینه در دوره آینده نزدیک، میانی و دور به‌ترتیب برابر ٪ ۹/۴۴، ٪ ۶/۹۶ و ٪ ۵/۴۲ (٪ ۱۵/۶۷، ٪ ۱۹/۸۳ و ٪ ۲۷/۵۶) خواهد بود؛ لذا در مورد مدل GFDL-ESM2M تغییرپذیری مکانی سهم متغیر دمای بیشینه بیشتر از مدل EC-EARTH است.



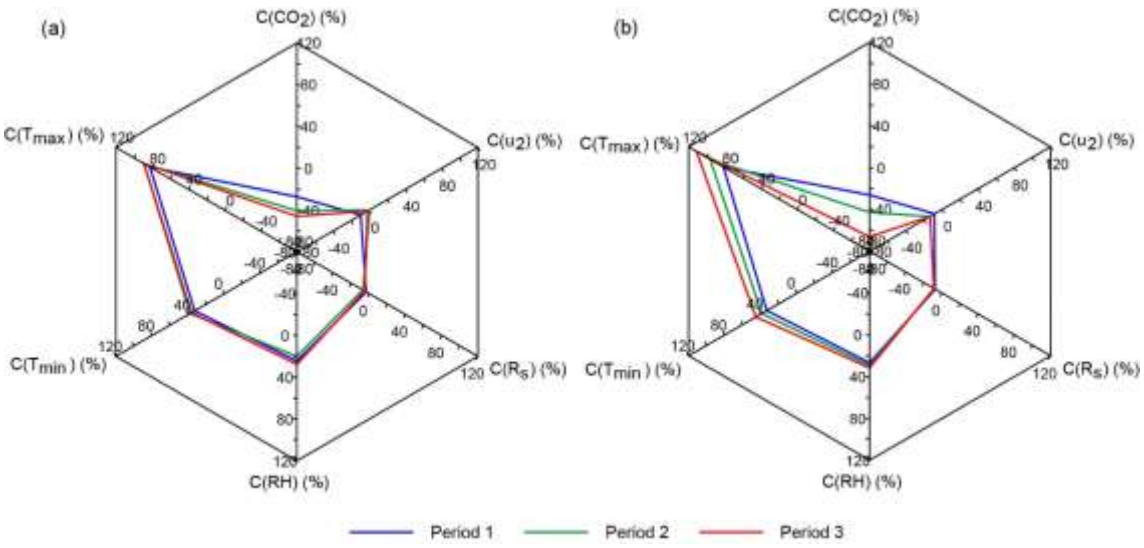
شکل ۷- نقشه درصد سهم نسبی (C %) متغیرهای هواشناسی دمای بیشینه (a)، دمای کمینه (b)، سرعت باد (c)، تابش خورشیدی (d)، رطوبت نسبی (e) و غلظت گاز CO_2 (f) در تغییرات میانگین ET_o سالانه دوره‌های آینده ۲۰۴۰-۲۰۱۱ (۱)، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ (۲) و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ (۳) نسبت به میانگین ET_o سالانه در دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) برای مدل EC-EARTH



شکل ۸- نقشه درصد سهم نسبی (C %) متغیرهای هواشناسی دمای بیشینه (a)، دمای کمینه (b)، سرعت باد (c)، تابش خورشیدی (d)، رطوبت نسبی (e) و غلظت گاز CO_2 (f) در تغییرات میانگین ET_o سالانه دوره‌های آینده ۲۰۴۰-۲۰۱۱ (۱)، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ (۲) و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ (۳) نسبت به میانگین ET_o سالانه در دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) برای مدل GFDL-ESM2M

سهم متغیر دمای کمینه نیز در همه یاخته‌ها مثبت است و در مورد هر دو مدل، سهم دمای بیشینه در تغییرات ET_o بیشتر از دمای کمینه است (بیش از ۲ برابر). به طوری‌که بر اساس پیش‌نگری مدل EC-EARTH (مدل GFDL-ESM2M)، میانگین سهم دمای کمینه در تغییرات ET_o در دوره آینده نزدیک، میانی و دور به‌ترتیب برابر ٪ ۳۲/۸۴، ٪ ۳۸/۲۵ و ٪ ۳۶/۵۷ (٪ ۳۳/۵۸، ٪ ۳۹/۰۹ و ٪ ۴۵/۷۴) خواهد بود (شکل ۹). جیان و همکاران نیز نشان دادند که دمای بیشینه سهم بیشتری نسبت به دمای کمینه در تغییرات ET_o دارد (Jian et al., 2020). در مورد سهم متغیر دمای کمینه نیز مشابه دمای بیشینه، تغییرپذیری مکانی در مورد مدل GFDL-ESM2M

بیشتر از مدل EC-EARTH است. متغیر دیگری که بیشترین سهم را در تغییرات ET_o دارد، غلظت گاز CO_2 جو است. سهم متغیر CO_2 در تمام یاخته‌ها منفی است؛ لذا افزایش CO_2 اثر کاهشی روی ET_o خواهد داشت. اسلام و همکاران نیز نشان دادند که افزایش غلظت گاز CO_2 جو سبب کاهش ET_o می‌شود (Islam et al., 2012). مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تقریباً اثر سهم مثبت دمای کمینه با اثر سهم منفی غلظت گاز CO_2 خنثی می‌شود. چرا که بر اساس پیش‌نگری مدل EC-EARTH (مدل GFDL-ESM2M)، میانگین سهم غلظت گاز CO_2 در تغییرات ET_o در دوره آینده نزدیک، میانی و دور به‌ترتیب برابر ٪ ۲۷/۰۸-، ٪ ۴۰/۷۱- و ٪ ۴۵/۸۱- (٪ ۲۵/۹۴-، ٪ ۴۲/۶۶- و ٪ ۶۶/۲۲-) خواهد بود (شکل ۹). علت تفاوت دو مدل از نظر میانگین سهم غلظت گاز CO_2 به ویژه در دوره آینده دور، ناشی از تفاوت دو مدل از نظر پیش‌نگری تغییرات u_2 به ویژه در مورد یاخته‌های نیمه شمالی حوضه است. این عامل سبب اختلاف دو مدل از نظر میزان سهم u_2 (و در نتیجه اختلاف در $(\sum_{i=1}^{6} c(x_i))$ می‌شود. لذا، علاوه بر تاثیر تفاوت دو مدل از نظر مقادیر $c(x_i)$ هر یک از متغیرها، اختلاف در $\sum_{i=1}^{6} c(x_i)$ نیز سبب تفاوت دو مدل از نظر میزان سهم نسبی $(C(x_i))$ متغیرها می‌شود. سهم متغیر رطوبت نسبی در همه دوره‌های آینده و همه یاخته‌ها مثبت و اندکی کمتر از سهم متغیر دمای کمینه است. به طوری که، میانگین سهم رطوبت نسبی در تغییرات ET_o بر اساس مدل EC-EARTH (مدل GFDL-ESM2M)، در دوره آینده نزدیک، میانی و دور به‌ترتیب برابر ٪ ۲۴/۵۹، ٪ ۱۹/۸۵ و ٪ ۲۷/۶۱ (٪ ۲۶/۶۰، ٪ ۲۹/۲۱ و ٪ ۳۱/۵۰) خواهد بود (شکل ۹). سهم رطوبت نسبی به طور کلی تغییرپذیری مکانی اندکی داشته و توزیع مکانی سهم رطوبت نسبی در مورد مدل EC-EARTH اندکی یکنواخت‌تر از مدل GFDL-ESM2M است. متغیری که کمترین سهم را در تغییرات ET_o دارد متغیر تابش خورشیدی است. سهم این متغیر تقریباً در همه یاخته‌ها منفی است و مشابه رطوبت نسبی تغییرپذیری مکانی اندکی دارد. میانگین سهم تابش خورشیدی در تغییرات ET_o بر اساس مدل EC-EARTH (مدل GFDL-ESM2M)، در دوره آینده نزدیک، میانی و دور به‌ترتیب برابر ٪ ۳/۴۴-، ٪ ۶/۸۸- و ٪ ۵/۲۰- (٪ ۷/۴۸-، ٪ ۸/۴۴- و ٪ ۸/۷۶-) خواهد بود (شکل ۹). عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی سرعت باد در توزیع سهم سرعت باد در تغییرات ET_o نیز نمایان است. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ توزیع مکانی سهم سرعت باد چه از نظر علامت و چه از نظر مقدار در یاخته‌های مختلف حوضه، دوره‌های آینده مختلف و در مدل‌های مختلف بسیار متفاوت است. میانگین سهم سرعت باد در تغییرات ET_o بر اساس مدل EC-EARTH (مدل GFDL-ESM2M)، در دوره آینده نزدیک، میانی و دور به‌ترتیب برابر ٪ ۹/۵۰-، ٪ ۰/۳۹ و ٪ ۲/۲۲- (٪ ۸/۱۵-، ٪ ۱۳/۲۵- و ٪ ۱۳/۳۱-) خواهد بود (شکل ۹).



شکل ۹- نمودارهای راداری میانگین سهم نسبی (% $C(x_i)$) متغیرهای دمای بیشینه (T_{max})، دمای کمینه (T_{min})، سرعت باد (u_2)، تابش خورشیدی (R_s)، رطوبت نسبی (RH) و غلظت گاز CO_2 در تغییرات میانگین بلندمدت سالانه ETo در دوره‌های آینده ۲۰۴۰-۲۰۱۱ (Period 1)، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ (Period 2) و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ (Period 3) نسبت به دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) برای یاخته‌های مدل‌های EC-EARTH (a) و GFDL-ESM2M (b) در منطقه مورد مطالعه

به طور کلی، مهم‌ترین متغیرهای موثر در تغییرات آینده ET_o در حوضه دریاچه ارومیه دمای بیشینه، دمای کمینه و غلظت گاز CO_2 جو است و متغیرهای رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد تاثیر کمتری روی تغییرات ET_o در آینده خواهند داشت. جیان و همکاران نیز نشان دادند که دمای بیشینه بیشترین سهم را در تغییرات ET_o خواهد داشت (Jian et al., 2020). ژائو و همکاران و دونگ و همکاران نیز با بررسی تغییرات زمانی- مکانی ET_o تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، دما را مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده روند افزایشی ET_o ذکر کردند (Zhao et al., 2020; Dong et al., 2020). در حالی‌که سو و همکاران نشان دادند که تغییرات ET_o در آینده با تغییرات تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و دمای کمینه در ارتباط است (Xu et al., 2014).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از پیش‌نگری‌های ریزمقیاس‌نمایی‌شده دو مدل EC-EARTH و GFDL-ESM2M تحت پروژه CORDEX با استفاده از نسخه تعدیل‌شده رابطه پنمن- مانتیث فائو و با شمول اثر افزایش غلظت CO_2 بر میزان مقاومت روزنه‌ای مقدار ET_o در یاخته‌های سطح حوضه دریاچه ارومیه تحت سناریوی RCP8.5 محاسبه و تغییرات میانگین بلندمدت ET_o سالانه در سه دوره آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور نسبت به دوره تاریخی بررسی شد و در ادامه، سهم تغییرات متغیرهای هواشناسی در تغییرات ET_o مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که در مورد هر دو مدل، میزان ET_o در آینده روند افزایشی خواهد داشت. با لحاظ کردن اثر افزایش CO_2 در مقاومت روزنه‌ای، در مقایسه با رابطه اصلی پنمن- مانتیث فائو، شدت کمتری برای روند افزایشی ET_o پیش‌نگری شد. میزان افزایش ET_o نسبت به دوره تاریخی، در دوره آینده دور بیشتر از دوره آینده میانی و در دوره آینده میانی بیشتر دوره آینده نزدیک خواهد بود. به طوری که در مورد مدل EC-EARTH (مدل GFDL-ESM2M) میانگین بلندمدت سالانه ET_o دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور نسبت به دوره تاریخی به ترتیب به میزان ۰/۱۸ mm day^{-1}، ۰/۳۰ mm day^{-1} و ۰/۵۸ mm day^{-1} (۰/۲۰ day^{-1} و ۰/۳۷ mm day^{-1} و ۰/۵۱ mm day^{-1}) افزایش نشان داد. مطالعات پیشین (بهمنش و همکاران، ۱۳۹۴؛ کلانکی و کاراندیش، ۱۳۹۴؛ گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷؛ حیدری تاشه کبود و خوشخو، ۱۳۹۸؛ غلام‌پور شمامی و همکاران، ۱۳۹۸؛ باب الحکمی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Scheff and Frierson, 2014; Karandish and Mousavi, 2018; Nouri et al., 2018, Lotfi et al., 2020) تاییدکننده یافته‌های این مطالعه مبنی بر روند افزایشی ET_o در آینده است. بررسی روند متغیرهای هواشناسی، در مورد هر دو مدل، حاکی از روند افزایشی دمای بیشینه و دمای کمینه و روند کاهشی رطوبت نسبی و تابش خورشیدی بود. اما روند تغییرات سرعت باد چه از نظر علامت و معنی‌داری و چه از نظر توزیع مکانی، تفاوت زیادی در دو مدل نشان داد. بررسی سهم متغیرهای هواشناسی در تغییرات ET_o نشان داد که متغیرهای دمای بیشینه، دمای کمینه و غلظت گاز CO_2 جو بیشترین سهم را در تغییرات ET_o خواهند داشت. افزایش دمای بیشینه میزان کمبود فشار بخار را افزایش داده و در نتیجه ET_o را افزایش می‌دهد (Liu and Sun, 2017; Scheff and Frierson, 2014; Zhao and Dai, 2015). افزایش غلظت گاز CO_2 جو سبب کاهش ET_o شده و میزان افزایش ET_o در اثر افزایش دما را شدیداً تعدیل می کند (Islam et al., 2012). فعالیت‌های بشری مانند آبیاری و جنگل‌کاری می‌تواند ET_o را در آینده تحت تاثیر قرار دهد؛ در حالی که این عوامل در مدل‌های اقلیمی لحاظ نشده‌اند. آبیاری، که در حال حاضر بخش بزرگی از مصارف آب را به خود اختصاص می‌دهد (ناصری و همکاران، ۱۳۹۶)، می‌تواند اقلیم منطقه را تحت تاثیر قرار داده و سبب تغییرات ET_o شود (Jian et al., 2020). چرا که افزایش تبخیر- تعرق و کاهش شار گرمای محسوس، ترازمندی انرژی را تحت تاثیر قرار داده و سبب سرد شدن جو (Decker et al., 2017) و افزایش رطوبت هوای نزدیک سطح زمین می‌شود (Huang and Ullrich, 2016). علاوه بر این، با افزایش زبری سطح زمین، در نتیجه توسعه اراضی کشاورزی و رشد گیاهان، سرعت باد ممکن است کاهش پیدا کند (Han et al., 2016). مجموعه این عوامل، بیانگر این است که آبیاری می‌تواند در طی فصل رشد سبب کاهش ET_o شود (Zhang et al., 2020). لذا، عدم در نظر گرفتن تاثیرات آبیاری در مدل‌های اقلیمی، ممکن است سبب عدم قطعیت‌هایی در مورد پیش‌نگری روند ET_o شود.

منابع

باب الحکمی، ع.، غلامی سفید کوهی، م.ع.، و عمادی، ع. ۱۳۹۹. اثر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق مرجع در استان مازندران، تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱ (۲): ۴۰۱-۳۸۸.

بهمنش، ج.، آزاد طلاتپه، ن.، منتصری، م.، رضایی، ح.، و خلیلی، ک. ۱۳۹۴. اثر تغییر اقلیم بر تبخیر- تعرق مرجع، کمبود بارندگی و کمبود فشار بخار هوا در ارومیه، نشریه دانش آب و خاک، ۲۵ (۲): ۹۱-۷۹.

حیدری تاشه کبود، ش.، و خوشخو، ی. ۱۳۹۸. تصویرسازی و پیش‌بینی تغییرات آتی تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس‌های فصلی

و سالانه در غرب ایران بر اساس سناریوهای انتشار RCP، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۵۳: ۱۷۶-۱۵۷.

غلام‌پور شمامی، ی.، مجنون حسینی، ن.، بذرافشان، ج.، شریف زاده، ف.، و کانونی، ه. ۱۳۹۸. ارزیابی بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در شرایط اقلیم فعلی و تغییر اقلیم آینده تحت پروژه CORDEX در نواحی عمده تولید محصولات دیم استان کردستان، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۱۰): ۲۵۹۴-۲۵۸۳.

کلانکی، م.، و کاراندیش، ف. ۱۳۹۴. پیش‌بینی اثرات بلندمدت تغییر اقلیم بر مولفه های اقلیمی در منطقه مرطوب، مهندسی آبیاری و آب ایران، ۲۰(۲): ۱۴۸-۱۳۱.

گودرزی، م.، صلاحی، ب.، و حسینی، س.ا. ۱۳۹۷. برآورد میزان تبخیر و تعرق در ارتباط با تغییرات اقلیمی در حوزه ی آبخیز دریاچه ارومیه، علوم و مهندسی آبخیزداری کشور، ۴۱: ۱۲-۱.

ناصری، ا.، عباسی، ف.، و اکبری، م. ۱۳۹۶. برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، جلد ۱۸ (۶۸): ۳۲-۱۷.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9): D05109.

da Costa Santos, L., José, J.V., Bender, F.D., Alves, D.S., Nitsche, P.R., dos Reis, E.F., and Coelho, R.D. 2020. Climate change in the Paraná state, Brazil: responses to increasing atmospheric CO_2 in reference evapotranspiration. Theoretical and Applied Climatology, 140: 55–68.

Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. Nature climate change, 3(1): 52-58.

Decker, M., Ma, S., and Pitman, A. 2017. Local land–atmosphere feedbacks limit irrigation demand. Environmental Research Letters, 12(5): 054003.

Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V.P., and Kahya, E. 2011. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. Journal of Hydrology 399(3-4): 422-433.

Dong, Q., Wang, W., Shao, Q., Xing, W., Ding, Y., and Fu, J. 2020. The response of reference evapotranspiration to climate change in Xinjiang, China: Historical changes, driving forces, and future projections. International Journal of Climatology 40(1): 235-254.

Fan, J., Wu, L., Zhang, F., Xiang, Y., and Zheng, J. 2016. Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956–2015. Journal of Hydrology, 542: 923–937.

Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G.R. 2009. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. World Meteorological Organization (WMO) Bulletin, 58(3): 175.

Goyal, R.K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). Agricultural water management, 69(1): 1-11.

Han, S., Tang, Q., Zhang, X., Xu, D., and Kou, L. 2016. Surface wind observations affected by agricultural development over Northwest China. Environmental Research Letters, 11(5): 054014.

Huang, X., and Ullrich, P.A. 2016. Irrigation impacts on California's climate with the variable-resolution CESM. Journal of Advances in Modeling Earth Systems 8(3): 1151-1163.

Huo, Z., Dai, X., Feng, S., Kang, S., and Huang, G. 2013. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. Journal of Hydrology 492: 24-34.

IPCC. 2013. Climate change 2013: The Physical Science Basis. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. (Eds.) Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge U.K.: Cambridge University Press.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.) Contribution of Working Group I to the 4^{th} Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.

Islam, A., Ahuja, L.R., Garcia, L.A., Ma, L., and Saseendran, A.S. 2012. Modeling the effect of elevated CO_2 and climate change on reference evapotranspiration in the semi-arid Central Great Plains. Transactions of the ASABE, 55(6): 2135-2146.

Jian, D., Ma, Z., Chen, L., Duan, J., Mitchell, D., Zheng, Z., Lv, M., and Zhang, H. 2020. Effects of 1.5° C and 2° C of Warming on Regional Reference Evapotranspiration and Drying: A Case Study of the Yellow River Basin, China. International Journal of Climatology. https://doi.org/10.1002/joc.6667.

Karandish, F., and Mousavi, S.S. 2018. Climate change

and future projections. Theoretical and Applied Climatology 133(1-2): 361-375.

Nouri, M., Homaee, M., and Bannayan, M. 2017. Quantitative trend, sensitivity and contribution analyses of reference evapotranspiration in some arid environments under climate change. Water Resources Management 31(7): 2207-2224.

Obada, E., Alamou, E.A., Chabi, A., Zandagba, J., and Afouda, A. 2017. Trends and changes in recent and future Penman-Monteith potential evapotranspiration in Benin (West Africa). Hydrology 4(3): 38.

Paredes, P., Martins, D.S., Pereira, L.S., Cadima, J., and Pires, C. 2018. Accuracy of daily estimation of grass reference evapotranspiration using ERA-Interim reanalysis products with assessment of alternative bias correction schemes. Agricultural Water Management 210: 340-353.

Rahman, M.A., Yunsheng, L., Sultana, N., and Ongoma, V. 2019. Analysis of reference evapotranspiration (ET_0) trends under climate change in Bangladesh using observed and CMIP5 data sets. Meteorology and Atmospheric Physics, 131(3): 639-655.

Roderick, M.L., Greve, P., and Farquhar, G.D. 2015. On the assessment of aridity with changes in atmospheric CO_2. Water Resources Research 51(7): 5450-5463.

Roderick, M.L., Sun, F., Lim, W.H., and Farquhar, G.D. 2014. A general framework for understanding the response of the water cycle to global warming over land and ocean. Hydrology and Earth System Sciences 18(5): 1575-1589.

Scheff, J., and Frierson, D.M. 2014. Scaling potential evapotranspiration with greenhouse warming. Journal of Climate 27(4): 1539-1558.

Scheff, J., and Frierson, D.M. 2015. Terrestrial aridity and its response to greenhouse warming across CMIP5 climate models. Journal of Climate 28(14): 5583-5600.

Sherwood, S., and Fu, Q. 2014. A drier future?. Science, 343(6172): 737-739.

Srivastava, P.K., Islam, T., Gupta, M., Petropoulos, G., and Dai, Q. 2015. WRF dynamical downscaling and bias correction schemes for NCEP estimated hydro-meteorological variables. Water Resources Management 29(7): 2267-2284.

Swann, A.L., Hoffman, F.M., Koven, C.D., and Randerson, J.T. 2016. Plant responses to increasing CO2 reduce estimates of climate impacts on drought severity. Proceedings of the National Academy of uncertainty and risk assessment in Iran during twenty-first century: evapotranspiration and green water deficit analysis. Theoretical and Applied Climatology 131(1-2): 777-791.

Li, Z., Zheng, F.L., and Liu, W.Z. 2012. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961–2009 and its projected changes during 2011–2099 on the Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology 154: 147-155.

Lin, L., Gettelman, A., Feng, S., and Fu, Q. 2015. Simulated climatology and evolution of aridity in the 21st century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 120(12): 5795-5815.

Liu, W., and Sun, F. 2017. Projecting and attributing future changes of evaporative demand over China in CMIP5 climate models. Journal of Hydrometeorology 18(4): 977-991.

Lotfi, M., Kamali, G.A., Meshkatee, A.H., and Varshavian, V. 2020. Study on the impact of climate change on evapotranspiration in west of Iran. Arabian Journal of Geosciences, 13(15): 1-11.

Mbaye, M.L., Sylla, M.B., and Tall, M. 2019. Impacts of 1.5 and 2.0° C Global Warming on Water Balance Components over Senegal in West Africa. Atmosphere 10(11): 712.

McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., and Van Niel, T.G. 2012. Less bluster ahead? Ecohydrological implications of global trends of terrestrial near-surface wind speeds. Ecohydrology 5(4): 381-388.

Milly, P.C., and Dunne, K.A. 2016. Potential evapotranspiration and continental drying. Nature Climate Change 6(10): 946-949.

Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. In Symposia of the society for experimental biology (Vol. 19, pp. 205-234). Cambridge University Press (CUP) Cambridge.

Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., Spinoni, J., Vogt, J., and Feyen, L. 2018. Global changes in drought conditions under different levels of warming. Geophysical Research Letters 45(7): 3285-3296.

Nouri, M., and Bannayan, M. 2019. Spatiotemporal changes in aridity index and reference evapotranspiration over semi-arid and humid regions of Iran: trend, cause, and sensitivity analyses. Theoretical and Applied Climatology 136(3-4): 1073-1084.

Nouri, M., Homaee, M., and Bannayan, M. 2018. Spatiotemporal reference evapotranspiration changes in humid and semi-arid regions of Iran: past trends

China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 119(5): 2174-2192.

Yang, Y., Roderick, M. L., Zhang, S., McVicar, T.R., and Donohue, R.J. 2019. Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO_2 in climate projections. Nature Climate Change 9(1): 44-48.

Zhang, X., Ding, N., Han, S., and Tang, Q. 2020. Irrigation-Induced Potential Evapotranspiration Decrease in the Heihe River Basin, Northwest China, as Simulated by the WRF Model. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 125(2): e2019JD031058.

Zhao, T., and Dai, A. 2015. The magnitude and causes of global drought changes in the twenty-first century under a low–moderate emissions scenario. Journal of Climate 28(11): 4490-4512.

Zhao, J., Xia, H., Yue, Q., and Wang, Z. 2020. Spatiotemporal variation in reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in China under future scenarios. International Journal of Climatology. https://doi.org/10.1002/joc.6429

Sciences 113(36): 10019-10024.

Tabari, H., Nikbakht, J., and Talaee, P.H. 2012. Identification of trend in reference evapotranspiration series with serial dependence in Iran. Water Resources Management 26(8): 2219-2232.

Terink, W., Immerzeel, W.W., and Droogers, P. 2013. Climate change projections of precipitation and reference evapotranspiration for the Middle East and Northern Africa until 2050. International journal of climatology, 33(14): 3055-3072.

Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., and Müller, B. 2015. Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. Solar Energy 116: 12-24.

Wu, H., Wang, X., Wang, Y., Xu, Y., and Han, X. 2019. Temporal variations in reference evapotranspiration in Hubei Province, China, from 1960 to 2014. Theoretical and Applied Climatology 135(1-2): 433-448.

Xu, Y. P., Pan, S., Fu, G., Tian, Y., and Zhang, X. 2014. Future potential evapotranspiration changes and contribution analysis in Zhejiang Province, East

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1920-1938

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۳۸-۱۹۲۰

Estimation of the Reference Evapotranspiration Using the Projections of CORDEX Project and Investigation of the Meteorological Variables Contribution in its Changes (Case Study: Lake Urmia Basin)

S. Hejabi[1]*

Recived: Oct.13, 2020 Accepted: Nov.01, 2020

Abstract

The reference evapotranspiration (ET_o) is one of the most important effective factors in hydrological cycle and has been used in the calculation of many drought and aridity indices and the studies related to the projection of climate change impacts. The investigation of climate change impact on ET_o is necessary for longterm scheduling and management of water resources. In this study, the downscaled projections of two climatic models of EC-EARTH and GFDL-ESM2M (based on RCP8.5 scenario) under CORDEX project were used and using the modified method of FAO Penman-Monteith and by considering the effects of the atmospheric CO_2 concentration on plants stomatal resistance, the ET_o was estimated for the historical period (1976-2005) and future period (2006-2100) in lake Urmia basin. The results of investigation of ET_o changes in three near-future (2011-2040), mid-future (2041-2070) and far-future (2071-2100) periods in comparison to the historical period revealed an increasing trend of ET_o especially for far-future. The contribution analysis of the meteorological variables in ET_o changes showed that the maximum temperature (with the average contribution of 91.54 %), the minimum temperature (with the average contribution of 37.68 %) and the atmospheric CO_2 concentration (with the average contribution of 41.40 %) will have the most contribution in ET_o changes. However, because of increasing trend of the agricultural development, the effects of irrigation on the climate and ignoring the irrigation effects in climatic models, projection of ET_o changes based on climatic models may be along with some uncertainties.

Keywords: Climate change, Contribution analysis, RCP8.5 Scenario, Reference evapotranspiration

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: s.hejabi@urmia.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۵۳-۱۹۳۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1939-1953

مقاله پژوهشی

ارزیابی اثرات بهره‌برداری از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود بر حیات تالاب انزلی

هادی مدبری[۱]، علیرضا شکوهی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۵

چکیده

در این مطالعه اثرات بهره‌برداری از شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود بر تالاب بین‌المللی انزلی در چارچوب IWRM بررسی می‌شود. بدین منظور ابتدا مقادیر شاخص‌های هیدرولوژیکی اعم از تراز سطح آب، مساحت و حجم تالاب انزلی با درنظر گرفتن شرایط اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی در دو سطح مطلوب و حداقل تعیین گردید. پس از بررسی شرایط کنونی تالاب، ارتباط بین جریان ورودی به تالاب با سیستم بهره‌برداری بالادست با استفاده از مدل WEAP شبیه‌سازی شد و مدل برای سناریوی مبنا با شاخص‌های آماری R2 و RMSE به ترتیب معادل ۰/۹۹ و ۰/۴۷ واسنجی گردید. نتایج تحلیل سناریوها در شرایط مختلف نشان داد که در حال حاضر حجم و تراز تالاب از نظر کمی بیشتر وابسته به تراز دریا بوده و دبی ورودی به تالاب فقط در شرایط سیلابی می‌تواند تأثیر خود را بر حجم و تراز تالاب نشان دهد. براساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت که حیات اکولوژیکی تالاب انزلی بیش از آنکه تحت تأثیر مدیریت کمی منابع آب در بالادست تالاب و برداشت آب از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود برای مصارف کشاورزی، دامپروری و آبزیان باشد از تخلیه تالاب به پایین دست تأثیر می‌پذیرد.

واژه‌های کلیدی: تالاب انزلی، خدمات اکولوژیکی، شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، مدل WEAP

مقدمه

به دلیل محدودیت منابع و ارزش اقتصادی روزافزون آب به عنوان یک زیرساخت اصلی برای توسعه کلیه بخش‌ها، مدت‌ها است که نیازهای اکولوژیک طبیعت نادیده گرفته شده و عملاً آبی که در سال‌های متمادی در اختیار طبیعت قرار داشته و موجب تکامل و تکوین اکوسیستم‌ها شده بود، به‌تدریج به مصارف انسانی تخصیص داده شده است. براثر این فرآیند برخی اکوسیستم‌های طبیعی آسیب‌های جدی دیده‌اند (Shokoohi and Amini, 2014). همچنین عدم توجه به مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) در سطح حوضه‌های آبریز سبب تخریب و از بین رفتن تالاب‌ها و خدمات اکوسیستمی مرتبط با آن‌ها شده و اثرات نامطلوب زیادی بر معیشت جوامع محلی برجای گذاشته است. در این راستا و در طی دو دهه اخیر تصمیم‌گیران در سطح مدیریت حوضه جهت رفع این چالش بزرگ به این نتیجه رسیدند که باید تا حد امکان از نگاه بخشی به مصرف‌کنندگان فاصله گرفته و مدیریت یک حوضه آبریز را به‌صورت یکپارچه در نظر گرفت (Meng et al., 2019). در کنفرانس سازمان ملل متحد در مورد محیط زیست و توسعه، حوضه آبریز به عنوان یک واحد مناسب برای تحلیل مسائل مدیریت جامع منابع آب شناخته شده است (Sandoval-Solis et al., 2015). عدم توجه به مدیریت آب در سطح حوضه آبریز باعث ایجاد مسائلی از قبیل تأثیرات نامناسب مصارف بالادست بر مصرف‌کنندگان پایین‌دست، عدم رعایت عدالت اجتماعی و بروز نابرابری‌ها، تأمین نشدن نیازهای حداقل زیست محیطی و تخریب محیط زیست و بهینه نبودن برآیندهای اقتصادی می‌شود (Vinten et al., 2019). استفاده از آب در یک بخش یا در یک سطح و مکان در حوضه آبریز، اثرات مستقیمی بر کیفیت و کمیت آب برای دیگر بخش‌ها و دیگر سطوح و مناطق حوضه دارد. یکی از ابعاد این اندرکنش‌ها، اثرات فعالیت‌ها در بالادست بر وضعیت پایین دست و دیگری تأثیرپذیری متقابل اقدامات بر وضعیت بین سطوح مختلف حوضه است (Zou et al., 2018). از این رو، لازم است که در مدیریت جامع منابع آب اثرات توسعه منابع آب در بالادست حوضه بر شرایط پایین‌دست بررسی شود. پژوهش حاضر در صدد ارزیابی اثرات بهره‌برداری از منابع آب سطحی در حوضه بالادست بر وضعیت تالاب انزلی است. با توجه به پیچیدگی و متنوع بودن منابع و مصارف در حوضه بالادست این تالاب و لزوم مطالعه یکپارچه پایین دست و بالادست، اساس پژوهش بر مبنای اصول IWRM گذاشته شد. برای انجام تحلیل جامع روی منابع و مصارف در بالادست و پایین دست نیاز به استفاده از نرم‌افزارهایی است که بتوانند این مهم را با احتساب کلیه پارامترهای بیلان منابع آب (در اینجا سطحی) به انجام برسانند. طی سال‌های گذشته نرم‌افزارها و

۱- عضو هیئت علمی پژوهشکده محیط زیست جهاد دانشگاهی، رشت، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.17.8

مدل‌های زیادی جهت مدیریت منابع آب توسعه داده شد. بسیاری از این مدل‌ها با شبیه‌سازی حوضه آبریز مشخص می‌نمایند که اگر از یک گزینه و سیاست خاص استفاده شود در طول زمان و در گستره مکان، احتمالاً چه اتفاقی خواهد افتاد. به همین دلیل در شبیه‌سازی معمولاً مسائل به‌صورت سناریوهای "اگر-آنگاه که" مطرح می‌گردند. درواقع به کمک این مدل‌ها می‌توان مسائل را مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار داد. یکی از این نرم‌افزارهای پرکاربرد و قدرتمند در این زمینه مدل WEAP بوده که از سال ۱۹۹۰ به بازار عرضه (Siber et al., 2005) و در حوضه‌های زیادی در سراسر جهان و ایران مورداستفاده قرارگرفته است. Li و همکاران در سال ۲۰۱۵ به ارزیابی کارآیی مدل WEAP در برآورد راهبرد مدیریت منابع آب در کشور چین پرداختند. این پژوهش در منطقه Shenzhen انجام شد که به عنوان یک منطقه ویژه اقتصادی شناخته شده است. در این منطقه به دلیل کمبود شدید آب، توسعه پایدار مناطق ساحلی شدیداً به خطر افتاده است. هدف از این پژوهش برآورد وضعیت تخصیص منابع آب در آینده در این منطقه و همچنین تعیین حقابه زیست‌محیطی مناطق ساحلی این منطقه بود. در این پژوهش از مدل WEAP به همراه سه سناریوی متفاوت در برآورد پایداری منابع محدود آبی منطقه استفاده شد. نتایج نشان داد که فشار وارده روی منابع آبی منطقه در آینده بسیار زیاد شده و نیاز به برنامه‌ریزی فوری دارد. Adgolign و همکاران در سال ۲۰۱۶ به مدل سازی منابع آب‌های سطحی و تخصیص آن در غرب اتیوپی با استفاده از مدل WEAP پرداختند. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی تأثیر توسعه منابع آبی جهت افزایش دسترسی به منابع آب در طول جریانات رودخانه‌ای و تعیین زیر حوضه‌های حساس به کمبود آب بود. در این بررسی از مدل WEAP برای شبیه‌سازی تخصیص منابع آب سطحی در سطح زیر حوضه‌ها و با توجه به میزان تقاضای آب پرداخته شد. جهت ارزیابی میزان نیاز آبی محصولات از نرم افزارهای ویژه استفاده شد. نتایج نشان داد که سه سناریوی مختلف را برای منطقه می‌توان فرض کرد که تا سال ۲۰۵۰ را پیش‌بینی کند. در آخرین سال سناریو، یعنی سال، ۲۰۵۰ میزان جریان سطحی رودخانه Didessa در حدود ۱۰ در صد کاهش خواهد یافت. Boukila-Hassane و همکاران در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی چشم انداز سیستم یکپارچه مدیریت آب در منطقه اوران پرداختند. در این بررسی از مدل WEAP استفاده شد. منطقه مورد مطالعه یکی از بزرگترین حوضه‌های جنوب الجزیره بود و بر اساس سناریوهای تعریف شده تا سال ۲۰۳۰ وضعیت منابع آب مشخص شد. هدف اصلی این بررسی ارزیابی استفاده از یک سیستم مدیریت یکپارچه در سراسر منطقه بود که بتواند تقاضای مناطق مختلف را از نظر فرآیندهای هیدرولوژیکی مورد توجه قرار دهد. نتایج نشان داد که حساسیت منطقه مورد مطالعه در مقابل فشارهایی که در آینده به منابع آبی منطقه وارد خواهد شد بسیار زیاد است. در نتیجه نیاز به ایجاد یک سیستم مدیریت یکپارچه تقاضای محلی و کشاورزی بسیار ضروری است. در ایران نیز، مرادی (۱۳۹۳) به ارزیابی مدیریت منابع آب با استفاده از مدل WEAP (مطالعه موردی حوضه کبودرآهنگ) پرداخت. با استفاده از این مدل ابتدا منابع و مصارف آب موجود در منطقه شبیه‌سازی گردید و مشخص شد که در حال حاضر در دشت کبودرآهنگ مدیریت منابع آب به خوبی صورت نمی‌گیرد و با ادامه شرایط موجود کسری مخزن آب زیرزمینی ادامه خواهد یافت. سپس برای بررسی وضعیت منابع و مصارف آب موجود در منطقه در سال‌های آینده تاثیر چهار سناریوی افزایش جمعیت، افزایش سطح زیرکشت کشاورزی، افزایش راندمان آبیاری و کاهش آب مورد نیاز نیروگاه شهید مفتح در بخش صنعت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش جمعیت تاثیر چندان زیادی بر کسری مخزن آب زیرزمینی ندارد ولی افزایش سطح زیرکشت کشاورزی موجب افت بیشتر مخزن زیرزمینی می‌شود. قره سوفلو و همکاران (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای به برنامه‌ریزی و تخصیص منابع آب تحت سناریوی مدیریتی WEAP در حوضه گرگانرود پرداختند. در این راستا ابتدا حوضه آبریز گرگانرود با استفاده از مدل WEAP شبیه‌سازی شد و مدل برای شرایط پایه و سه سناریوی مختلف اجرا گردید. نتایج نشان داد که از بین روش‌های هیدرولوژیکی به‌کارگرفته‌شده جهت حفظ نیازهای زیست‌محیطی پائین‌دست حوضه، روش 7Q10 در مقایسه با سایر روش‌ها مقادیر کمتری را در سال نشان داده و روش Q90 مقادیر بیشتری از سایر روش‌ها پیشنهاد می‌نماید. بر اساس سناریوهای شبیه‌سازی‌شده تنها در حالت اعمال نیاز زیست‌محیطی با روش 7Q10 امکان تأمین استاندارد نیازهای پیش‌بینی‌شده برای سدها و همچنین برداشت‌های مستقیم از حوضه میانی وجود دارد. همانند نیاز کشاورزی، نیاز صنعت نیز در تمامی سناریوها به‌جز سناریوی 7Q10 به‌طور کامل تأمین نمی‌شود و دارای کمبود قابل‌ملاحظه‌ای می‌باشد. این تحقیقات بیانگر توانائی نرم‌افزار WEAP به عنوان ابزاری کارآمد به منظور تصمیم‌گیری در مدیریت یکپارچه منابع آب می‌باشد.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی منابع و مصارف در چارچوب بیلان حوضه تالاب انزلی و ارزیابی گزینه‌های مختلف سناریوهای تخصیص منابع آب با مد نظر قرار دادن اصول IWRM در حوضه آبریز تالاب می‌باشد. در این مقاله نشان داده خواهد شد که تالاب در مقابل بهره‌برداری از منابع آب تغذیه‌کننده تالاب برای کشاورزی و با درصدی کمتر برای شرب و صنعت چه واکنشی نشان خواهد داد. در این حالت با اعمال تغییرات بر ورودی تالاب در محدوده‌ای متنوع و بخصوص در حالت حدی و خارج از توان تحمل تالاب (به‌وسیله جریان زیست‌محیطی تالاب تعریف خواهد شد)، میزان تأثیر متغیرهای مزبور بر کارکردها، خدمات و حیات تالاب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

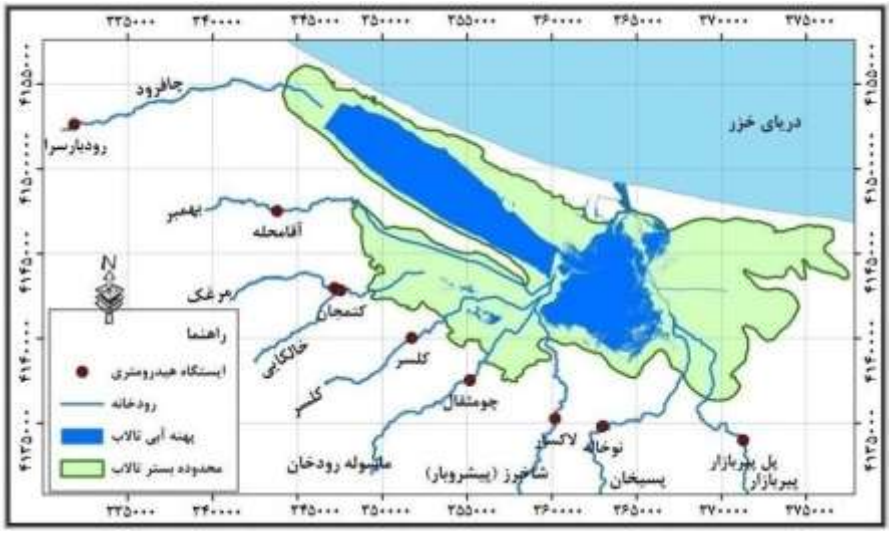
مدیریت یکپارچه منابع آب در حوضه تالاب انزلی، به دلیل تأثیر رودخانه‌های ورودی به تالاب بر روی حقابه زیست‌محیطی آن، مستلزم شناخت کلیه مصارف و منابع مربوط به حوضه تالاب شامل حوضه فومنات و بخشی از دشت مرکزی گیلان می‌باشد. ازآنجاکه کشاورزی اصلی‌ترین بخش مصرف در حوضه تالاب انزلی بوده و مهم‌ترین منبع تأمین آب این اراضی که عمدتاً اراضی شالیزاری می‌باشند، رودخانه‌های ورودی به تالاب و شبکه آبیاری سد سفیدرود می‌باشد لذا در این بخش، پس از معرفی موقعیت تالاب سعی گردید که درباره واحدهای عمرانی شبکه آبیاری سد سفیدرود در حوضه تالاب انزلی که به نحوی با حقابه زیست‌محیطی تالاب در تعارض هستند، توضیحاتی ارائه شود تا بتوان با نگاهی جامع، میزان تأثیر برداشت آب در بالادست را بر وضعیت تالاب در سناریوهای مدیریتی متفاوت تخمین زد.

محدوده مورد مطالعه

تالاب بین‌المللی انزلی در جنوب شرقی دریای خزر واقع گردیده و خدمات و کارکردهای بسیاری را به حاشیه‌نشینان خود ارائه می‌نماید. این تالاب با وسعتی در حدود ۱۵۰۰۰ هکتار یکی از ۲۴ تالاب بین‌المللی ایران است که در سال ۱۳۵۴ به همراه ۱۸ تالاب دیگر به دفتر کنوانسیون رامسر معرفی شد (Ashouri and Abdous, 2013).

رودخانه‌های ورودی به تالاب

مهم‌ترین رودخانه‌هایی که به تالاب انزلی می‌پیوندند از غرب به شرق شامل چافرود، بهمبر، مرغک، خالکایی، پلنگ‌ور، ماسوله‌رودخان، پیش رودبار (شاخرز)، پسیخان و پیربازار (مجموع دو شاخه سیاهرود و گوهررود) می‌باشند. این رودخانه‌ها تماماً دارای جریان دائمی بوده و از ارتفاعات جنوب غرب منطقه سرچشمه گرفته و در جهت شمال شرق جریان می‌یابند و پس از عبور از دشت فومنات و بخش مرکزی گیلان و تأمین نیاز آبی منطقه به تالاب انزلی می‌ریزند (JICA, 2005). شکل ۱ رودخانه‌های منتهی به تالاب انزلی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- رودخانه‌ها و ایستگاه‌های هیدرومتری مستقر بر آن‌ها در ورودی به تالاب انزلی (JICA, 2005)

واحدهای عمرانی در حوضه تالاب انزلی

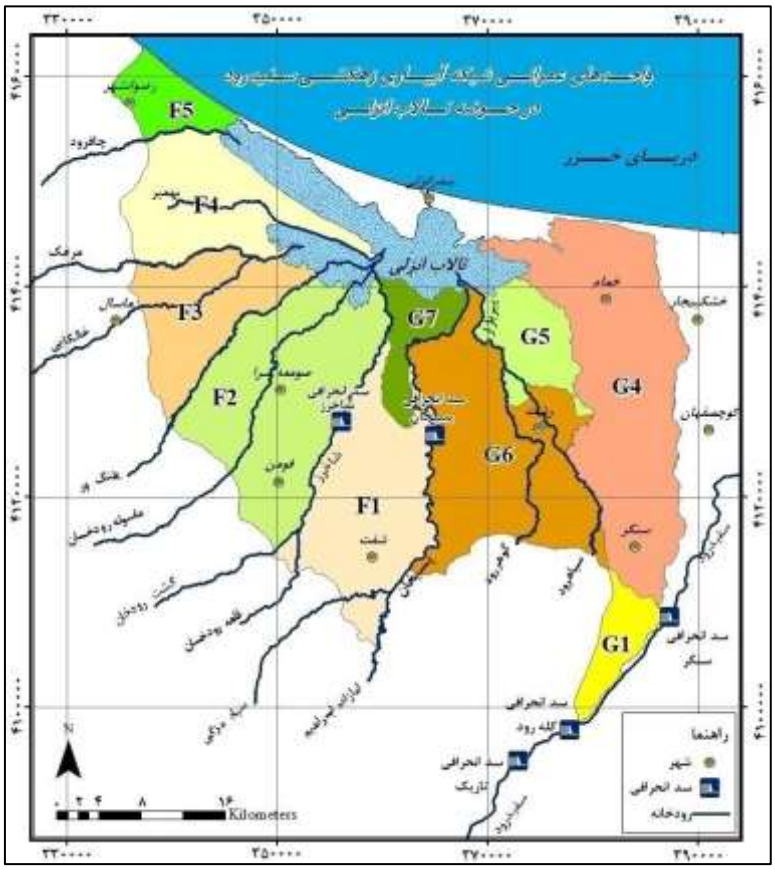
شکل ۲ واحدهای عمرانی موجود در شبکه آبیاری سفیدرود که در حوضه تالاب انزلی قرار دارند را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص می‌گردد تمامی واحدهای عمرانی بخش فومنات شامل F1، F2، F3، F4 و F5 و تعدادی از واحدهای عمرانی بخش مرکزی شامل G4، G5، G6 و G7 در حوضه تالاب انزلی قرار دارند. جدول ۱ مشخصات کلی واحدهای عمرانی ذکرشده و منابع و مصارف هر واحد را نشان می‌دهد.

روش انجام کار

پژوهش برای رسیدن به اهداف تعیین شده در سه گام انجام شده است:

جدول ۱- مشخصات کلی واحدهای عمرانی حوضه تالاب انزلی و منابع و مصارف هر واحد (پایگاه داده شرکت آب منطقه‌ای گیلان)

	منابع (حجم آب تحویلی برحسب میلیون متر مکعب)			مصارف (مساحت محصولات کشاورزی برحسب هکتار)		
	رودخانه ها	کانال فومن	کانال سنگر	کشت برنج	سایر محصولات و سایر کاربری‌ها	کل
F1	۶۵/۱	۸۶/۸	--	۱۶۴۶۸	۵۰۹۹	۲۱۵۶۷
F2	۶۲/۲	۱۱۷/۹	--	۱۹۶۸۴	۸۳۲۹	۲۸۰۱۳
F3	۵۲/۶	۵۷/۹	--	۹۲۰۸	۴۴۳۳	۱۳۶۴۱
F4	۳۲/۷	۹۴/۱	--	۷۹۸۷	۷۹۶۵	۱۵۹۵۲
F5	۵/۱	۲۹/۱	--	۳۴۲۷	۱۷۱۳	۵۱۴۰
G4	--	--	۲۳۷/۸	۲۴۴۳۱	۸۸۴۴	۳۳۲۷۵
G5	--	--	۵۵/۲	۵۶۶۶	۲۰۳۱	۷۶۹۷
G6	--	--	۲۲۱/۶	۱۳۲۲۹	۱۴۲۷۵	۲۷۵۰۴
G7	۴/۵	۳۷/۵	--	۴۵۴۹	۷۱۹	۵۲۶۸



شکل ۲- واحدهای عمرانی شبکه آبیاری سفیدرود در حوضه آبریز تالاب انزلی (مهندسین مشاور پندام، ۱۳۸۱)

تعریف شرایط هدف‌گذاری شده در تالاب انزلی به صورت سناریوهای مبنا در دو سطح حداقل و مطلوب

شرایط مطلوب اکوهیدرولوژیکی برای تالاب به نحوی تعریف می‌شود که با داشتن گونه گیاهی و یا جانوری شاخص نیاز آبی تالاب پاسخگوی گونه انتخابی موردنظر در بهترین شرایط باشد و هیچ‌گونه کاهش جمعیتی برای حضور آن گونه و یا آشیانه‌سازی آن در تالاب اتفاق نیفتد. همچنین شرایط حداقل اکوهیدرولوژیکی برای تالاب مقدار آب در کمترین میزانی است که اگر حجم یا سطح یا عمق آب از آن کمتر شود، گونه موردنظر دچار انقراض شده و یا به تالاب مراجعت ننماید. در این حالت حجم آب به‌دست‌آمده نسبت به شرایط نرمال کاهش قابل‌توجهی پیدا می‌کند.

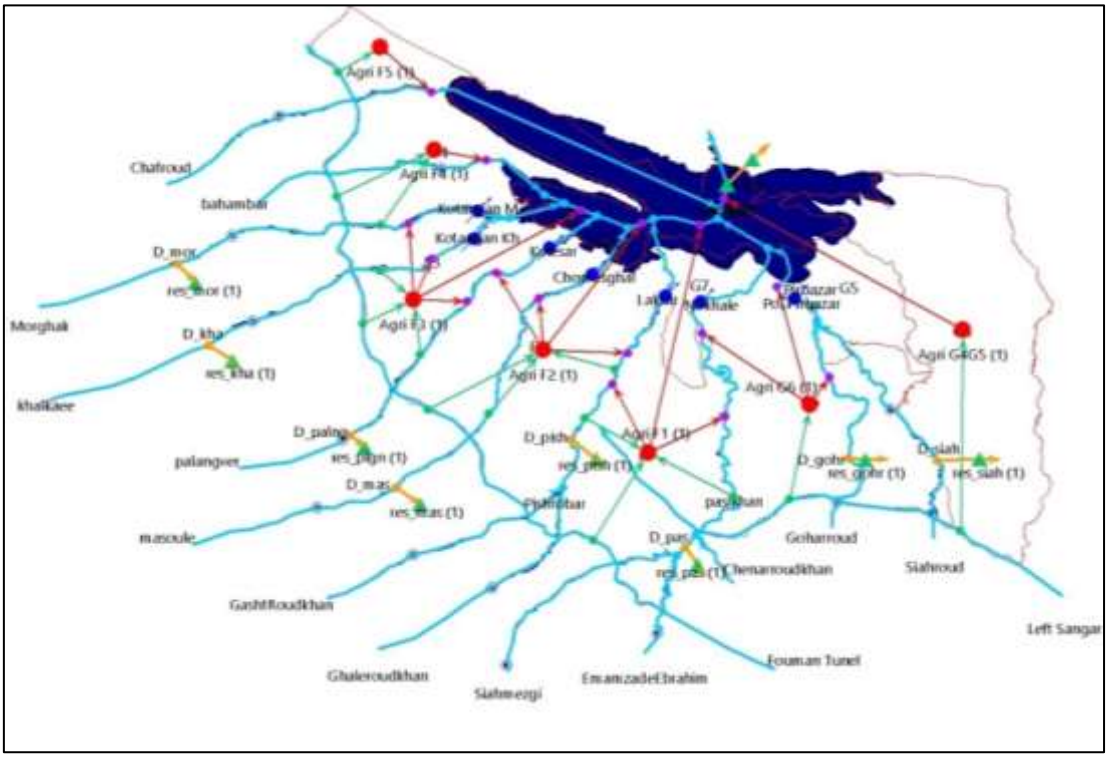
ارزیابی ارتباط بین جریان ورودی به تالاب با رژیم جریان بالادست

به‌منظور ارزیابی ارتباط بین جریان ورودی به تالاب با رژیم جریان بالادست آن در حوضه، مسائل مربوط به نیاز آبی، هم‌زمان با مسائل مربوط به منابع آب در شرایط مختلف هیدرولوژیکی و سناریوهای مدیریتی در حوضه آبریز با استفاده از مدل WEAP و در چند گام شبیه‌سازی شد. در تعریف هر مطالعه در مدل WEAP لازم است چهارچوب زمانی، مرزهای مکانی، اجزای سیستم و تنظیمات مساله انجام شود. وضع موجود که از آن می‌توان به‌عنوان گام واسنجی مدل در شرایط توسعه استفاده کرد، یک تصویر کلی از نیازهای آبی واقعی، بارهای آلودگی، منابع و تأمین سیستم را نشان می‌دهد. در شرایط موجود، فرضیات کلیدی برای بیان سیاست‌ها، هزینه‌ها و عواملی که بر نیاز، آلودگی، تأمین و هیدرولوژی مؤثرند، تعریف می‌شود. سناریوها در شرایط موجود ساخته می‌شوند و با استفاده از آن‌ها می‌توان اثر فرضیات یا سیاست‌های مختلف را بر میزان دسترسی و مصرف آب در آینده بررسی کرد. نهایتاً سناریوها با توجه به میزان آب، هزینه‌ها و سودها، سازگاری با اهداف زیست‌محیطی و حساسیت به عدم قطعیت در متغیرهای کلیدی ارزیابی می‌شوند. بنابراین قبل از برپایی مدل باید مسائل مدیریتی به شکل گزینه‌ها یا به‌عبارت‌دیگر سناریوهای مدیریتی تعریف گردد، چون بخشی از سیستم مربوط به همین گزینه‌های مدیریتی است و بستن سیستم بدون توجه به آن‌ها اشتباه می‌باشد. پس از بستن سیستم آنگاه نوبت برپایی مدل است. گام بعدی یعنی واسنجی و اعتبارسنجی مدل، قسمت اصلی کار محسوب می‌شود. واسنجی و اعتبارسنجی مدل با توجه به یک سری معیارها انجام می‌شود که انتخاب مناسب آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Siber et al., 2005). در این بخش مراحل مختلف کار با مدل WEAP شامل برپایی مدل، کالیبراسیون و تدوین سناریوهای مختلف برای تالاب انزلی به طور جداگانه شرح داده می‌شود.

برپایی مدل

مدل WEAP برای شروع بکار نیاز به تعریف سناریوی مبنا در یک سال خاص که کلیه اطلاعات مربوط بدان در دسترس باشد دارد. در مقاله حاضر به منظور به‌کارگیری مدل WEAP در حوضه آبریز تالاب انزلی، وضعیت شرایط تالاب در سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ به‌عنوان سناریوی مبنا در نظرگرفته شد. به منظور برپائی مدل، ابتدا مؤلفه‌های سیستم و تنظیمات مربوط به مساله معرفی شدند. مؤلفه‌های سیستم شامل مؤلفه رودخانه (شاخه‌های اصلی و فرعی رودخانه‌های منتهی به تالاب و کانال‌های آبرسان فومن و سنگر)، مؤلفه سنجش جریان (ایستگاه‌های هیدرومتری)، مؤلفه تقاضا (واحدهای عمرانی شبکه آبیاری زهکشی سفیدرود)، مؤلفه‌های برداشت (برداشت از رودخانه و کانال فومن و سنگر) و آب برگشتی (زهاب واحدهای عمرانی)، مؤلفه انحراف آب (برداشت آب به‌منظور پرورش ماهی و سایر مصارف) و مؤلفه مخزن (مخزن تالاب انزلی) می‌باشند.

مشخصات هندسی مخزن (تالاب انزلی) به‌صورت منحنی‌های حجم-ارتفاع برگرفته‌شده از نقشه‌ی DEM تالاب در قسمت مشخصات مؤلفه مخزن معرفی شد. با ایجاد مؤلفه‌های تقاضا برای هر یک از واحدهای عمرانی، مشخصات آن‌ها شامل سطح زیرکشت، نیاز آبی اراضی کشاورزی در طول دوره آبیاری، توزیع ماهانه نیاز آبی و درصد مصرف آب به‌منظور محاسبه آب برگشتی از آبیاری به مدل معرفی شدند. نیاز آبی هر واحد عمرانی عمدتاً از طریق کانال آبرسان اصلی (فومن و سنگر) و رودخانه‌ها تأمین می‌شود که با مؤلفه‌ی مربوطه، انتقال آب به هر واحد عمرانی تعریف گردید. به‌منظور محاسبه مقادیر رواناب سطحی در بازه‌ی بین ایستگاه هیدرومتری بالادست و پایین‌دست هر رودخانه، از ضرایب رواناب ماهانه هر ایستگاه هیدرومتری (مطالعات شرکت مهندسین مشاور آذر پیمایش، ۱۳۹۰) استفاده شد و مقادیر رواناب تولیدشده به‌عنوان دبی جریان در بازه‌ی Below River Head flow به مدل معرفی شدند. لازم به ذکر است که در مطالعات شرکت مشاور مذکور، برای هریک از ماه‌های سال در طول دوره آماری مشخص، مقادیر حجم جریان رودخانه استخراج‌شده و با ایجاد چندضلعی‌های تیسن در محیط GIS شعاع تأثیر ایستگاه‌های باران‌سنجی هر یک از زیرحوضه‌ها به‌دست‌آمده است و با استفاده از روش تیسن مقادیر بارش متوسط هر یک از حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها محاسبه و در مقایسه با مقادیر جریان، ضریب رواناب محاسبه‌شده است. مقادیر دبی کانال‌های چپ سنگر و فومن و حجم آب تحویل داده‌شده به هر واحد عمرانی بر اساس برنامه اجرایی شبکه آبیاری زهکشی در سال ۱۳۹۵ درنظر گرفته شد. درصد سهم آب برگشتی هر واحد که از طریق زهکش‌های اصلی به رودخانه‌ها و یا تالاب می‌ریزند بر اساس نسبت مساحت تحت پوشش زهکش‌های اصلی به مساحت واحد عمرانی در محیط GIS محاسبه شدند. شکل ۳ نحوه پیکره‌بندی منابع آب را در حوضه آبریز تالاب انزلی در مدل WEAP نشان می‌دهد.



شکل ۳- پیکره‌بندی منابع در حوضه آبریز تالاب انزلی در مدل WEAP

واسنجی مدل

واسنجی مدل فرآیندی است که در آن تعدادی از پارمترهای ورودی آنقدر تغییر داده می‌شوند تا مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده انطباق پیدا کنند. در این تحقیق، مقادیر منابع و مصارف رودخانه به عنوان پارامترهای واسنجی درنظر گرفته شدند. بدین منظور با دردست داشتن دبی ثبت شده در ایستگاه بالادست، مقدار برداشت آب از رودخانه برای مصارف کشاورزی و سایر ذینفعان بر اساس اطلاعات شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود و تغییر درصد آب برگشتی از کشاورزی و همچنین اعمال رواناب ناشی از بارندگی دبی رودخانه محاسبه شد. با مقایسه دبی شبیه‌سازی‌شده رودخانه در پایین دست با مقادیر ایستگاه آبسنجی فرآیند واسنجی در دوره آماری یک ساله صورت گرفت. برای ارزیابی کمی نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل از ضریب تبیین (R2) (معادله ۱) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (معادله ۲) استفاده گردید.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})(P_i-\overline{O})\right]^2}{\left[\frac{n\sum_{i=1}^{n}O_i^2-\left[\sum_{i=1}^{n}O_i\right]^2}{n-1}\right]\left[\frac{n\sum_{i=1}^{n}P_i^2-\left[\sum_{i=1}^{n}P_i\right]^2}{n-1}\right]} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

در این معادلات Oi و Pi به ترتیب مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهداتی و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

تدوین سناریوهای مختلف

سناریوهای موردنظر در ۳ بخش الف) به صورت ۵ ماه از سال آبی که مصادف با دوره کشت محصولات کشاورزی شامل ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر و مرداد، ب) ۷ ماهه دوم که برداشت از رودخانه به منظور مصارف در استخرهای پرورش ماهی یا شکار در اراضی شالیزاری شامل ماه‌های شهریور، مهر، آبان، آذر، دی، بهمن و اسفند می باشد و پ) حذف کل مصارف در کل سال مطابق جدول ۲ تدوین گردیدند. شایان ذکر است که در سناریوهای متعددی میزان برداشت در گامهای ۱۰ درصدی کاهش داده شد که با توجه به نتیجه بدست آمده برای سناریوی ۵ یعنی "حذف کلیه مصارف و برداشت‌ها" از ذکر نتایج آنها خودداری شده است.

جدول ۲- سناریوهای تدوین شده در طول سال آبی

ردیف	سناریو	
		سناریوی ۱: کاهش ۱۰ درصد از مساحت زیر کشت هر واحد عمرانی
الف	سناریوهای تدوین شده در ۵ ماه کشت اراضی شالیزاری	سناریوی ۲: کاهش ۱۰ درصد از نیاز آبی اراضی در طول دوره آبیاری
		سناریوی ۳: کاهش ۱۰ درصد از مصارف و برداشت از رودخانه برای کشاورزی
ب	سناریوی تدوین شده در ۷ ماه دیگر سال	سناریوی ۴: کاهش ۱۰ درصد از مصارف و برداشت از رودخانه برای پرورش ماهی و شکار
پ	سناریوی تدوین شده در کل سال	سناریوی ۵: حذف کل مصارف و برداشت از رودخانه‌ها در طول سال

ارتباط بین جریان رودخانه‌های ورودی به تالاب و شرایط اکوهیدرولوژیکی هدف‌گذاری شده در تالاب

پس از تدوین سناریوهای مختلف، محاسبات مربوط به حجم تالاب و تراز سطح آب آن به‌صورت ماهانه بر اساس تراز دریا و دبی ورودی به تالاب (از نتایج مدل) و تبخیر خالص از سطح آب تالاب انجام شد. با داشتن روابط سطح-حجم-ارتفاع تالاب انزلی (مدبری و شکوهی، ۱۳۹۸) و دبی ورودی به تالاب می‌توان حجم و مساحت تالاب را باتوجه به تراز سطح آب محاسبه نمود. اختلاف حجم مخزن بین دو ماه متوالی نشان‌دهنده مقدار حجم ذخیره‌شده و یا تخلیه‌شده در طول یک ماه می‌باشد. به عبارت ساده‌تر از تفاضل بین حجم ورودی به تالاب و حجم ذخیره شده در آن، میانگین حجم (دبی) خروجی از تالاب به‌صورت ماهانه بدست می‌آید. لازم به ذکر است، حجم آب ورودی به تالاب از مجموع حجم آب حاصل از دبی ماهانه رودخانه‌های ورودی به تالاب و حجم آب حاصل از مجموع میانگین ماهانه بارش و کسر کردن تبخیر مستقیم از سطح تالاب به دست آمده است.

نتایج و بحث

تعیین مساحت و حجم تالاب به روش جامع در شرایط مطلوب و حداقل

با توجه به مطالعات مدبری و شکوهی (۱۳۹۸) مقادیر سطوح مختلف شاخص‌های هیدرولوژیکی اعم از تراز سطح آب، مساحت و حجم تالاب در شرایط مطلوب اقتصادی-اجتماعی و اکولوژیکی در جدول ۲ آمده است. ازآنجایی‌که مقادیر به‌دست‌آمده شاخص‌های هیدرولوژیکی در رویکرد اقتصادی-اجتماعی از مقادیر متناظر آن در شرایط حداقل اکولوژیکی کمتر است لذا می‌توان استنباط نمود که با تأمین شرایط اکولوژیکی مناسب به‌منظور تعیین جریان زیست‌محیطی برای تالاب انزلی، عملاً وضعیت تالاب ازنظر عمق جریان و دیگر عوامل هیدرولوژیکی اثرگذار آن‌چنان تعریف می‌گردد که شرایط مناسب از نظر مطلوبیت موردنظر در توابع اجتماعی-اقتصادی نیز مهیا شود. انتخاب عمق آب مناسب می‌تواند در بخش‌های مختلف اقتصادی مانند گردشگری و ماهیگیری مؤثر باشد به‌طوری‌که رعایت این عمق آب سبب افزایش جمعیت، زادآوری و مهاجرت ماهی‌ها شده و افزایش رفاه عمومی را برای ماهیگیران به همراه دارد (مدبری و شکوهی، a- ۱۳۹۹). همچنین عمق آب مناسب انتخاب‌شده، سبب جلوگیری از اختلال در رفت‌وآمد قایق‌هایی که برای تفریح گردشگران در تالاب مهیا شده‌اند، و همچنین رونق گردشگری و اکوتوریسم می‌شود (مدبری و شکوهی، b- ۱۳۹۹).

جدول ۲- مقادیر تراز، سطح و حجم در شرایط مختلف اکولوژیکی تالاب (مدبری و شکوهی، a,b - ۱۳۹۹)

فیزیوگرافی تالاب	میانگین مقادیر سطوح شاخص هیدرولوژیکی مختلف درشرایط اکولوژیکی تالاب		میانگین مقادیر سطوح شاخص هیدرولوژیکی مختلف در شرایط مطلوب شاخص اقتصادی اجتماعی
	حداقل	مطلوب	شاخص گردشگری
تراز آب برحسب متر(m)	-۲۶	-۲۵/۷	-۲۶/۳
مساحت برحسب کیلومترمربع (Km2)	۱۰۲	۱۲۲	۹۰
حجم برحسب میلیون مترمکعب (MCM)	۱۸۲	۲۳۷	۱۳۰

تحلیل شرایط کنونی تالاب

به منظور تحلیل شرایط کنونی تالاب در وضعیت حاضر، ابتدا شرایط تالاب در سال ۱۳۹۵-۱۳۹۴ بررسی گردید و با توجه به دبی ورودی به تالاب و تراز دریا، تراز تالاب در سال آبی موردنظر محاسبه شد و آنگاه با استفاده از منحنی سطح-حجم-ارتفاع، مساحت و حجم تالاب در وضعیت حاضر مشخص گردید. جدول ۳ وضعیت تالاب را

در شرایط حاضر نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد تراز آب در حال حاضر ۲۶/۷۸- می‌باشد که سبب کاهش حجم تالاب به ۸۲ میلیون متر مکعب شده است. یکی از دلایل مهم این کاهش حجم تالاب می‌تواند کاهش تراز سطح آب دریای خزر باشد.

جدول ۳- وضعیت شاخص‌های هیدرولوژیکی تالاب در وضعیت حاضر

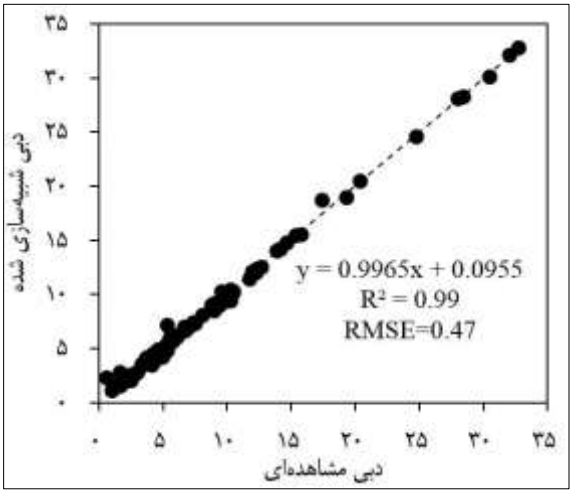
شرایط حاضر	تراز سطح آب(متر)	مساحت (کیلومترمربع)	حجم(میلیون مترمکعب)
سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴	۲۶/۷۸-	۶۱/۴۴	۸۲/۰۱

نتایج حاصل از شبیه‌سازی حوضه آبریز

در این مرحله اجزای بیلان یعنی مقدار آب ورودی به رودخانه‌های بالادست تالاب (به عنوان تأمین کننده اصلی آب تالاب) در یک دوره زمانی خاص، میزان استفاده بخش‌های مختلف از آب و درنهایت اندازه‌گیری مقدار آبی که در پایین‌دست رودخانه و یا درواقع ورودی تالاب باقی خواهد ماند، محاسبه شد. در نهایت با تعریف مؤلفه‌های بیلان و استفاده از مدل WEAP مشخص گردید که سهم هر بخش از ذینفعان از منابع تأمین‌کننده آب تالاب چقدر است.

واسنجی مدل WEAP در حوضه تالاب انزلی

به‌منظور واسنجی مدل، مقادیر دبی‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری پایین‌دست در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ به‌عنوان مقادیر مشاهده‌شده در نظر گرفته شد. در شش‌ماهه اول سال آبی با درنظر گرفتن مصارفی همچون پرورش ماهی و یا آبگیری اراضی شالیزاری برای شکار پرندگان و همچنین با تغییر در مقادیر رواناب سطحی، دبی رودخانه واسنجی شد. در شش‌ماهه دوم نیز بر اساس حداکثر ظرفیت برداشت سردهنه‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ موجود بر روی رودخانه‌ها و نیاز آبی ماهانه اراضی و همچنین سهم آب برگشتی به هر رودخانه، فرآیند واسنجی صورت گرفت. مقادیر نمایه‌های مربوط به واسنجی مدل برای ایستگاه‌های هیدرومتری پایین دست رودخانه‌های ورودی به تالاب مطابق شکل ۴ نشان داد که انطباق مطلوبی بین مقادیر محاسبه‌شده و اندازه گیری‌شده وجود داشته است و استفاده از این مدل جهت شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوها بلامانع می‌باشد.

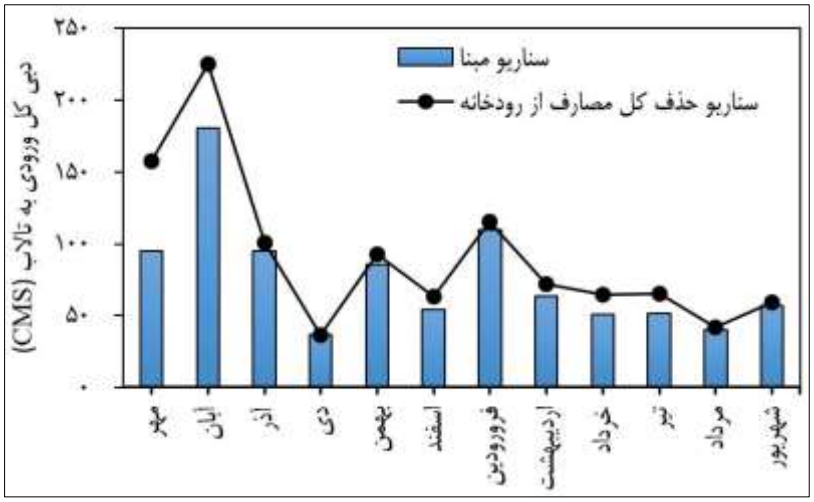


شکل ٤- مقایسه دبی شبیه‌سازی‌شده و دبی مشاهده‌ای (m3/sec) در ایستگاه آبسنجی

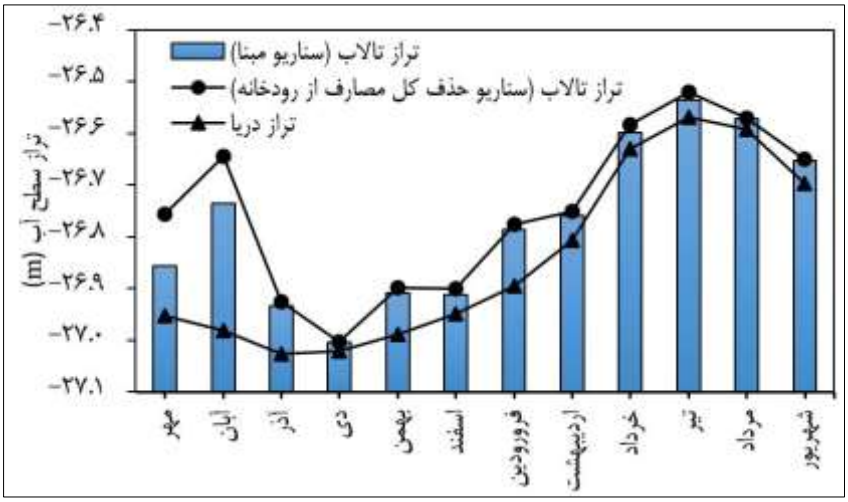
نتایج شبیه‌سازی مدل برای سناریوهای مختلف

در این مرحله با تعیین سناریوهای مختلف، تأثیر تغییر در مصارف و برداشت از رودخانه بر دبی کل ورودی به تالاب بررسی شد. مقایسه نتایج مدل در سناریوهای مختلف نسبت به سناریوی مبنا نشان داد که سناریوهای ۱ تا ۳ در جدول ۲ (یعنی کاهش ۱۰ درصدی سطح زیرکشت، نیاز آبی و تأمین آب) تغییر محسوسی بر دبی ورودی به تالاب و تراز تالاب در ۵ ماه کشت اراضی شالیزاری ایجاد نمی‌کند. همانطور که ذکر شد حجم آب ورودی به تالاب از مجموع حجم آب حاصل از دبی ماهانه رودخانه‌های ورودی به تالاب و حجم آب حاصل از مجموع میانگین ماهانه بارش با کم کردن تبخیر مستقیم در سطح تالاب به دست آمد. همچنین به منظور تخمین اثرات ناشی از اعمال تغییراتدر برداشت از رودخانه‌ها برای مصارف غیر کشاورزی، حجم و مساحت تالاب در ۷ ماه باقی‌مانده از مقایسه سناریوی ۴ (جدول ۲) و مبنا استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان بیان داشت

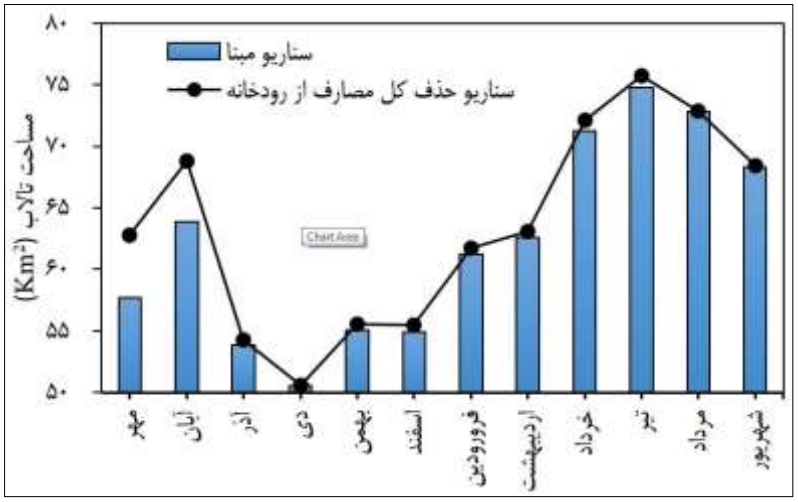
که کاهش برداشت آب از رودخانه در سناریوی ۴ نیز هیچ تغییری بر روی حجم آب تالاب ایجاد نمی‌کند. با توجه به نتایج بدست آمده، در مرحله بعد همان سناریوهای ۱ تا ۴ ولی با ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش برداشت از رودخانه‌های ورودی به تالاب نیز انجام پذیرفت که نتایج آن سناریوها هم نشان داد که تغییرات برداشت در رودخانه‌ها تاثیری معنی‌دار بر روی حجم و مساحت تالاب ندارد. با توجه به موارد ذکر شده نتیجه گرفته شد که سناریویی تحت عنوان سناریوی ۵ توسعه داده شود. این سناریو در یک حالت حدی به حذف کلیه مصارف و برداشت کشاورزی از رودخانه‌ها مبادرت می‌ورزد و در واقع به مفهوم قبول بهترین شرایط برای مقدار جریان ورودی به تالاب می‌باشد. بر این اساس در این سناریو کلیه برداشت‌ها از رودخانه در ۵ ماه از سال (مصارف کشاورزی) و ۷ ماه دیگر از سال (پرورش ماهی و شکار) حذف گردید. مقایسه نتایج سناریوی ۵ و سناریوی مبنا نشان داد که دبی کل ورودی به تالاب حدود ۶۳ مترمکعب بر ثانیه در ماه مهر و آبان و حدود ۱۵ مترمکعب بر ثانیه در ماه خرداد و تیر افزایش می‌یابد. نکته جالب توجه این بود که این افزایش دبی نیز تأثیر چندانی بر حجم و مساحت تالاب نداشت. شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ به ترتیب دبی کل ورودی به تالاب، تراز سطح آب، مساحت و حجم تالاب را در سناریوی حاضر و سناریوی ۵ یعنی حذف کلیه برداشت‌ها از مجموع رودخانه‌های ۹ گانه ورودی به تالاب را در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد.



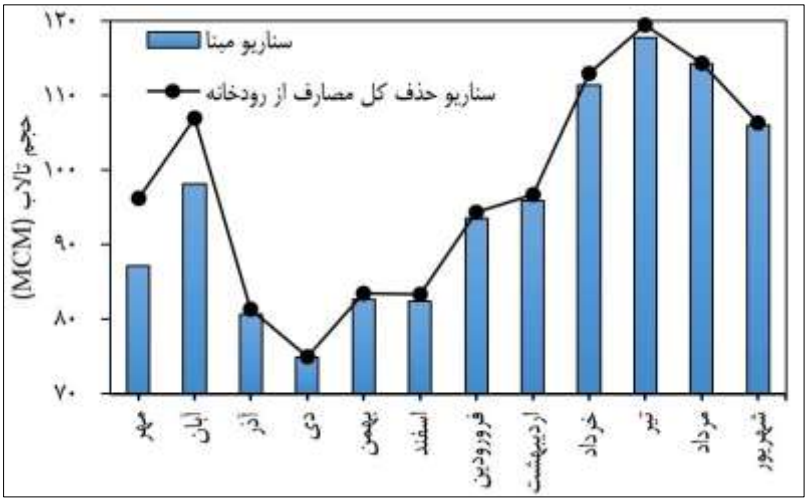
شکل ۵- مقایسه دبی کل ورودی به تالاب در سناریوهای مبنا و حذف کل مصارف از رودخانه



شکل ٦- مقایسه تراز سطح آب در دریا و سناریوهای مبنا و حذف کل مصارف از رودخانه



شکل ۷- مقایسه مساحت تالاب در سناریوهای مبنا و حذف کل مصارف از رودخانه



شکل ۸- مقایسه حجم تالاب در سناریوهای مبنا و حذف کل مصارف از رودخانه

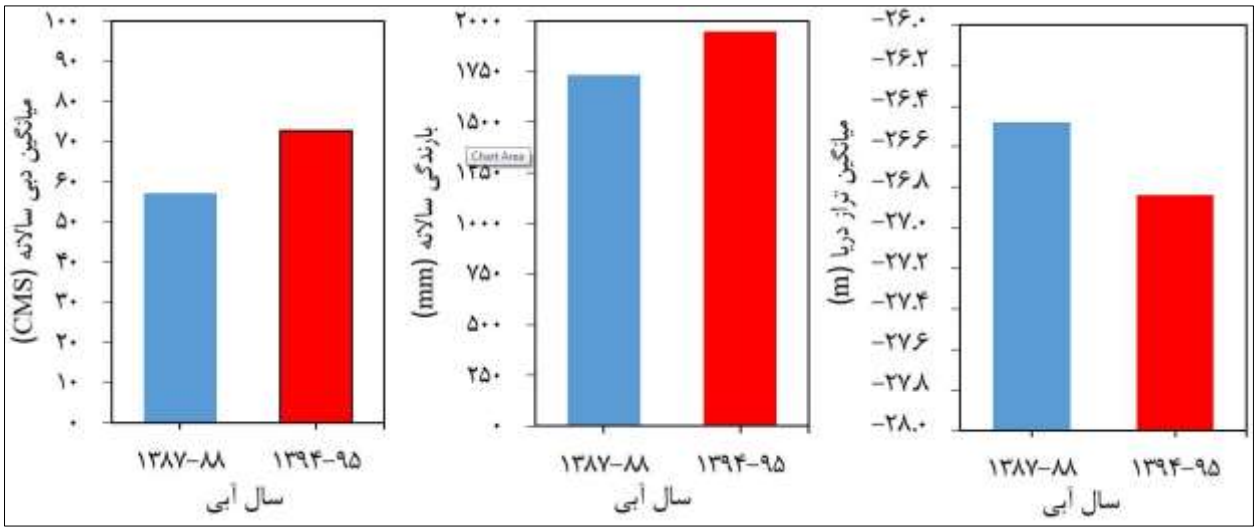
تعیین علل تغییرات احتمالی تالاب در شرایط حاضر با شرایط هدف‌گذاری شده و ارائه راه حلی برای بازگشت تالاب به شرایط مطلوب

مقایسه سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ که در آن حداقل شرایط اکولوژیکی برقرار است و شرایط حاضر (۹۵ -۱۳۹۴) نشان داد که تراز، مساحت و حجم آب تالاب کاهش‌یافته است. جدول ۴ مقادیر تراز سطح آب، مساحت و حجم تالاب را در سال‌های مورد مقایسه نشان می‌دهد.

جدول ٤- مقادیر تراز سطح آب، مساحت و حجم تالاب در سال‌های آبی ۸۸-۱۳۸۷ و ۹۵-۱۳۹٤

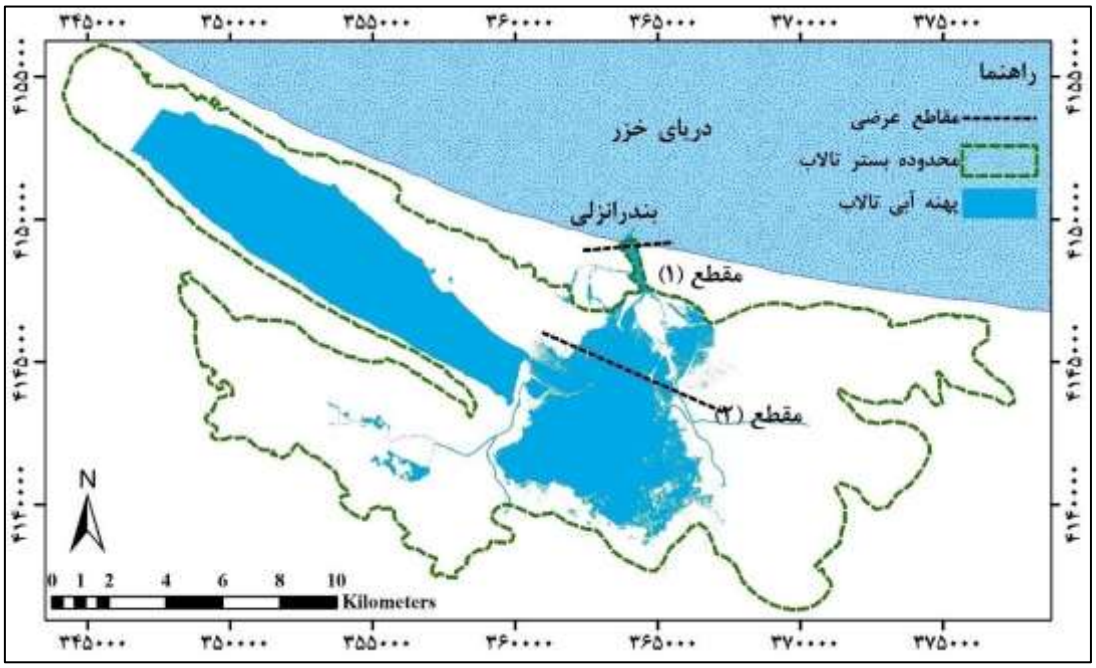
سال آبی		تراز سطح آب تالاب (متر)	مساحت تالاب (کیلومترمربع)	حجم تالاب (میلیون مترمکعب)
حداقل	۸۸-۱۳۸۷	-۲۶	۱۰۲	۱۸۲
حاضر	۹۵-۱۳۹۴	-۲۶/۷۸	۶۱	۸۲/۰۱

به‌منظور بررسی دلایل این تغییرات سه عامل مهم دبی ورودی به تالاب، بارندگی و تراز دریا درنظر گرفته شدند. همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد مقادیر بارندگی سالانه و دبی ورودی به تالاب در وضعیت حاضر افزایش یافته است اما تراز دریا حدود ۰/۳۶ متر نسبت به سال ۱۳۸۸ با کاهش روبرو شده است. اولین نتیجه‌ای که از این ارزیابی حاصل می‌گردد آن است که دبی ورودی به تالاب در مقابل تراز دریا، تأثیر زیادی بر روی تراز، مساحت و حجم تالاب ندارد.



شکل۹- مقایسه مقادیر بارندگی، دبی ورودی به تالاب و تراز آب دریا در سال‌های آبی ۸۸-۱۳۸۷ و ۹۵-۱۳۹٤

همچنین با برقراری معادله برنولی بین دو مقطع در انتهای کانال خروجی تالاب و داخل تالاب می‌توان رابطه میان اختلاف تراز سطح آب دریا و تالاب را بر حسب سرعت جریان خروجی و افت اصطکاکی جریان از تالاب تا دهانه خروجی تالاب که متصل به دریا است بدست آورد. شکل ۱۰، مقاطع فرضی انتخاب شده در انتهای کانال خروجی و داخل تالاب را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- مقاطع فرضی انتخاب شده در انتهای کانال خروجی و داخل تالاب

رابطه برنولی بین دو مقطع فرضی در انتهای کانال خروجی تالاب (مقطع ۱) و در داخل تالاب انزلی (مقطع ۲) ، مطابق با معادله ۳ برقرار است:

$$WL_2 + \frac{V_2^2}{2g} = WL_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_f \qquad (۳)$$

در معادله ۳، WL تراز سطح آب، V سرعت جریان، g شتاب

گرانش و hf افت اصطکاکی است. چون سرعت جریان در تالاب $\frac{V_2^2}{2g}$ خیلی کم است می‌توان از صرف‌نظر کرد در نتیجه با استفاده از معادله ۴، تراز سطح آب و معادله ۵، اختلاف تراز به دست می‌آید.

$$WL_2 = WL_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_f \quad (۴)$$

$$\Delta h = WL_2 - WL_1 = \frac{V_1^2}{2g} + h_f \quad (۵)$$

از آنجایی که اختلاف تراز سطح آب دریا و تالاب به‌سرعت جریان خروجی و افت اصطکاکی جریان از تالاب تا دریا بستگی دارد لذا کم بودن سرعت جریان در تالاب و کانال خروجی آن سبب ایجاد جریان زیربحرانی در مقطع خروجی شده که درنتیجه آن، تغییرات پایین‌دست (تراز سطح دریا) بر روی بالادست (تراز سطح تالاب) تأثیرگذار می‌باشد. نتایج بررسی تغییرات پایین‌دست (تراز سطح آب دریا) نشان داد که دامنه نوسان تراز دریای خزر در طول یک سال حدود ۰/۵ تا ۰/۶ متر است. در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ حداکثر افزایش ماهانه تراز دریا حدود ۰/۱۸ متر بین ماه‌های اردیبهشت و خرداد ثبت شده که طبق محاسبات باعث افزایش حجم تالاب به مقدار حدود ۱۴ میلیون مترمکعب در طی یک ماه شده است. با توجه به اینکه نوسان روزانه تراز دریا ناگهانی نبوده و در طول یک ماه به‌تدریج افزایش و یا کاهش می‌یابد، تالاب فرصت دارد تا با افزایش تراز دریا مقابله کرده و حتی با دبی میانگین ۳۶ مترمکعب بر ثانیه (حداقل دبی میانگین ماهانه در سال آبی ۹۵-۹۴) می‌تواند حجم خود را نسبت به تراز دریا افزایش دهد. براین اساس از نظر هیدرولیک جریان در مجاری روباز می‌توان گفت که با توجه به وجود جریان زیربحرانی در تالاب، تراز دریا به‌عنوان عامل کنترل جریان در پایین‌دست، شرایط هیدرولیکی تالاب را تحت تأثیر قرار می‌دهد و لذا به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که در حال حاضر حجم و تراز تالاب عملاً وابسته به تراز دریاست و دبی ورودی به تالاب فقط در شرایط سیلابی می‌تواند تأثیر خود را بر حجم و تراز تالاب نشان دهد. با توجه به اینکه کنترل تراز دریای خزر به‌عنوان یک عامل طبیعی غیرممکن است در نگاه اول اینطور به نظر می‌رسد که به‌منظور افزایش تراز و حجم تالاب باید دبی ورودی به آن افزایش پیدا کند، اما براساس نتایج سناریوی ۵ مشاهده شد که حتی حذف کل مصارف شامل کشاورزی، دامپروری و آبزیان از رودخانه‌های منتهی به تالاب نمی‌تواند باعث افزایش چشمگیر تراز و حجم تالاب شود. این امر نشان می‌دهد که بهره‌برداری از شبکه سفیدرود و مدیریت مصارف در بالادست از تأثیر معنی‌داری بر سطح آب تالاب و لذا ارائه خدمات اکولوژیکی آن و به عبارت بهتر حیات تالاب ندارد. این نتیجه‌گیری فقط از نظر کمی معتبر بوده و برای اظهار نظر قطعی باید به این نکته توجه داشت که اگرچه افزایش دبی رودخانه‌ها ازلحاظ کمی تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی تالاب ندارد اما می‌تواند ازلحاظ کیفی تأثیری بنیادین بر حیات تالاب داشته باشد (که بررسی آن نیازمند مطالعه‌ای دیگر است). با توجه به موارد ذکرشده می‌توان اینطور نتیجه‌گیری کرد که به‌منظور اصلاح شرایط تالاب در وضعیت حاضر، باید به نحوی خروجی تالاب را که با آب دریا ارتباط دارد، کنترل نمود و این کنترل چه به صورت سازه‌ای و چه به صورت غیرسازه‌ای نباید با مسائل مربوط به حفظ محیط زیست مغایرتی داشته باشد.

نتیجه‌گیری

بااینکه تالاب بین‌المللی انزلی به‌عنوان یک اکوسیستم آبی منحصربه‌فرد در شمال ایران خدمات زیادی را در اختیار همگان قرار داده است اما در سالیان اخیر تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی عدیده‌ای قرارگرفته و با توجه به باقی ماندن نام این تالاب در لیست مونترو به جرأت می‌توان گفت که ادامه حیات آن با خطراتی جدی مواجه می‌باشد. شرایط هیدرولوژیکی تالاب نقش کلیدی در کارکردهای وابسته به اکوسیستم‌های آبی جهت حفظ ارزش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی- اجتماعی ذینفعان مرتبط با تالاب دارد. در این راستا با توجه به آنکه در دیدگاه جامع‌نگر تالابها عموما یک المان پایین دستی در سیستم منابع آب به حساب می‌آیند، برای تحلیل شرایط هیدرولوژیکی ناظر بر خدمات اکوسیستمی و عملکرد تالاب لازم است شرایط مدیریت مصرف در بالادست مورد ارزیابی قرار گیرد. مهمترین مؤلفه بهره‌برداری از منابع آب بالادستی در حوضه تالاب انزلی که در پاره‌ای از موارد حوضه فومنات نیز نامیده میشود شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود می‌باشد که عملاً مهمترین شبکه آبرسانی برای اراضی کشاورزی غرب استان گیلان می‌باشد. در دیدگاه سیستمی که در این مطالعه برای تعریف مرزهای آن از اصول مرسوم در مدیریت جامع منابع آب استفاده شد، لازمه تعیین میزان اثرگذاری نحوه مدیریت مصرف به عنوان المان ورودی سیستم، در درجه اول شناخت شرایط کنونی حاکم بر آن و سپس تعیین دو حالت مبنای بهینه و حداقل قابل قبول برای کارکرد کل سیستم و یا هر جزء آن به تنهایی می‌باشد. براین اساس با توجه به اهداف مطالعه ابتدا مقدار حجم آب مورد نیاز برای حفظ کارکردها و خدمات اکوسیستم در دو شرایط حداقل و مطلوب برای اکوسیستم تالاب و جوامع محلی که با آن در ارتباط هستند، به دست آمد. سپس برای بررسی شرایط کنونی تالاب و ارزیابی اثر عملکرد مدیریت در حوضه بالادست با تأکید بر مهمترین مولفه آن یعنی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود بر اکوسیستم تالاب به مدل‌سازی حوضه آبریز بالادست تالاب به کمک مدل WEAP اقدام گردید و کلیه مولفه‌های سیستم شامل مؤلفه

رودخانه، مؤلفه سنجش جریان، مؤلفه تقاضا، مؤلفه‌های برداشت و آب برگشتی، مؤلفه انحراف آب و مؤلفه مخزن شبیه‌سازی شد. در مرحله بعد با تعیین سناریوهای مختلف در دوره کاشت و غیر کاشت اراضی شالیزاری، تأثیر تغییر در مصارف و برداشت از رودخانه بر دبی کل ورودی به تالاب و در راستای آن، حجم و مساحت و تراز تالاب بدست آمد. در این مرحله، سناریوهای ارائه شده شامل برداشت ۱۰ درصد، ۲۰ درصد و ۴۰ درصد در پارامترهای سطح زیرکشت، نیاز آبی محصولات کشاورزی و تامین آب در رودخانه‌های ورودی به تالاب به صورت عادلانه به‌طوری‌که میزان برداشت از همه بطور یکسان باشد، صورت گرفت. نتایج این سناریوها نشان داد که تغییرات در برداشت رودخانه‌های تاثیری بر روی حجم و مساحت تالاب ندارد. در مرحله بعد، سناریوهایی تحت عنوان حذف برداشت از رودخانه‌ها برای مصارف غیرکشاورزی و حذف کلیه مصارف و برداشت از رودخانه‌ها اعم از کشاورزی و غیرکشاورزی بررسی گردید. نتایج این سناریوها هم نشان داد که این افزایش دبی ورودی به تالاب نیز تاثیری بر حجم و مساحت تالاب ندارد. با توجه به نتایج اجرای سناریوهای متعدد برای سیستم هیدرولوژیکی موجود در مرزهای بالادست تالاب، مشتمل بر ۹ رودخانه دائمی و شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود می‌توان استنباط نمود که تأثیر حجم آب ورودی به تالاب(اعم از دبی رودخانه‌های ورودی به تالاب و بارش مستقیم بر روی تالاب) بر شرایط اکوهیدرولوژیکی تالاب نسبت به تراز سطح دریای خزر از اهمیت کمتری برخوردار است. در واقع می‌توان بیان نمود که دریای خزر به عنوان یک مخزن بزرگ و دینامیکی نقش مهمتری در تعیین و تثبیت تراز سطح آب تالاب به عنوان مهمترین مشخصه کمی ناظر بر شرایط اکوهیدرولوژیکی تالاب دارد. این نتیجه‌گیری می‌تواند بدان مفهوم باشد که اگر تنها از دیدگاه کمی به ارزیابی اثرات بهره‌برداری از شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود بر تالاب نگریسته شود شواهدی دال بر اثر منفی بهره‌برداری از این شبکه بر حیات تالاب وجود ندارد. این نتیجه‌گیری را نمی‌توان به ارزیابی اثرات شبکه از نظر کیفی تعمیم داد و این امر در تحقیقاتی دیگر باید مورد پرسش قرار گیرد. در این راستا باید به این سوال پاسخ داده شود که کاهش جریان ورودی به تالاب در اثر بهره‌برداری از شبکه در کنار برگشت پساب آلوده به سموم و کودهای شیمیایی و البته لحاظ داشتن پارامترهایی همچون خودپالایی طبیعی رودخانه‌های ورودی، به عنوان محمل پساب کشاورزی، و همینطور توان خودپالایی تالاب در فصول مختلف تا چه حد به زندگی تالابی صدمه وارد می‌نماید و میزان کاهش خدمات اکوسیستمی تالاب در حالتها و سناریوهای مختلف بهره‌برداری چه خواهد بود. نکته مهم دیگر قابل استنباط از نتایج این مطالعه آن است که اگرچه حجم آب ورودی به تالاب در مواقع سیلابی سبب می‌شود که تراز و حجم آب تالاب افزایش می‌یابد اما کاهش تراز سطح آب دریای خزر نسبت به تراز سطح تالاب در سال‌های اخیر سبب شده است که این مقدار حجم آب ورودی بر روی تالاب باقی نماند و پس از مدت کوتاهی (باتوجه به شدت سیلاب) در مدت چند روز یا هفته از تالاب خارج شده و به سمت دریای خزر روانه شود. این عملیات خروج آب از در یک تالاب ساحلی مانند تالاب انزلی تا زمانی که در مقطع خروجی تالاب و دریا تعادل هیدرولیکی برقرار شود ادامه می‌یابد. براین اساس حفظ اکوسیستم تالابی از نظر شرایط کمی،مدیریت سازه‌ای و جستجوی راه حلی برای مدیریت خروجی تالاب به دریا با حفظ و رعایت الزامات زیست محیطی می‌باشد.

منابع

شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان، ۱۳۹۶. پایگاه داده و اطلاعات شبکه آبیاری و زهشکی سفیدرود.

قره سوفلو، ج. ۱۳۹۵. برنامه‌ریزی منابع آب حوضه آبریز گرگانرود با رویکرد زیست‌محیطی با استفاده از مدل WEAP. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب. دانشگاه زابل.

شکوهی، ع.، و مدبری، ه. ۱۳۹۷. ارزیابی و مقایسه حساسیت مدل‌های NSFWQI و IRWQISC نسبت به پارامترهای کیفیت آب. مجله تحقیقات منابع آب ایران. (۵) ۱۴: ۱۲۴-۱۰۹.

مدبری، ه.، و شکوهی، ع. ۱۳۹۸. تعیین نیازآبی زیست محیطی تالاب انزلی با استفاده از روش‌های اکوهیدرولوژیکی. مجله تحقیقات منابع آب ایران. (۳) ۱۵: ۱۰۴-۹۱.

مدبری، ه.، و شکوهی، ع. ۱۳۹۹-a. ارزیابی اقتصادی تأثیرات کاهش حقابهٔ تالاب انزلی بر خدمات اکولوژیکی مؤثر بر معیشت و درآمد جوامع محلی. مجله اکوهیدرولوژی. (۲) ۷: ۴۹۶-۴۸۱.

مدبری، ه.، و شکوهی، ع. ۱۳۹۹-b. تعیین نیاز آبی تالاب انزلی بر اساس شاخص‌های اکوتوریسم در چارچوب IWRM. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. doi: 10.22059/ijswr.2020.303554.668633.

مرادی، ب. ۱۳۹۳ . مدیریت منابع آب با استفاده از مدل WEAP. (مطالعه موردی حوضه کبودرآهنگ). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده محیطزیست، دانشگاه ملایر.

مهندسین مشاور پندام، ۱۳۸۱. مطالعات بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرودگیلان، گزارش نهایی.

مهندسین مشاور آذرپیمایش، ۱۳۹۰. طرح مطالعات تعیین حد بستر و حریم تالاب انزلی. سازمان آب منطقه‌ای استان گیلان.

Adgolign, T.B., Rao, G.V.R.S., and Abbulu, Y. 2016. WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia.

Thomas, G.A., and Patiño-Gomez, C. 2013. Collaborative Modeling to Evaluate Water Management Scenarios in the Rio Grande Basin. JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc. 49(3): 639–653.

Shokoohi, A., and Amini, M. 2014. Introducing a new method to determine rivers' ecological water requirement in comparison with hydrological and hydraulic methods. International Journal of Environmental Science and Technology 11(3):747-756.

Sieber, J., Chris, S.D., and Huber-Lee, A. 2005. WEAP (Water Evaluation and Planning System), User guide for WEAP21. Stockholm Environment Institute. U.S. Center. USA.

Vinten, A., Kuhfussa, L., Shortalla, O., Stockana, J., Ibiyemi, A., Pohlea, I., Gabriel, M., Gunn, I., and May, L. 2019. Water for all: Towards an integrated approach to wetland conservation and flood risk reduction in a lowland catchment in Scotland. Journal of Environmental Management 246: 881-896.

Zou, Y., Duan, X., Xue, Z., Mingju, E., Sun, M., Lu, X. and Jiang, X. 2018. Water use conflict between wetland and agriculture. Journal of environmental management. 224: 140–146.

Sustainable Water Resources Management 2: 55-70.

Ashoori, A., and Abdoos, A. 2013. Important wetland habitats for the waterbirds of Guilan, Iran: Katibeh Guilan, 260 p.

Bouklia-Hassane, R., Yebdri, D., and Tidjani, A. E.-B. 2016. Prospects for a larger integration of the water resources system using WEAP model: a case study of Oran province. Desalination and Water Treatment 57: 5971-5980.

JICA, DOE, MOJA. 2005. The study on integrated management for ecosystem conservation of the Anzali Wetland in the Islamic Republic of Iran. Draft final report Vol. II: Maim report. Nippon Koei Co. 150p

Li, X., Zhao, Y., Shi, C., Sha, J., Wang, Z.-L. and Wang, Y. 2015. Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. Ocean & Coastal Management 106: 97-109.

Meng, B., Liu, J., Bao, K., and Sun, B. 2019. Water fluxes of Nenjiang River Basin with ecological network analysis: Conflict and coordination between agricultural development and wetland restoration. Journal of Cleaner Production. 213: 933-943.

Sandoval-Solis, S., Teasley, R.L., McKinney, D.C.,

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1939-1953

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۵۳-۱۹۳۹

Evaluation of the Effects of Exploitation of Sefidrood Irrigation and Drainage Network on the Life of Anzali Wetland

H. Modaberi[1], A. Shokoohi[2*]

Recived: Sep.29, 2020 Accepted: Nov.15, 2020

Abstract

In this study, the effects of the exploitation of the Sefidrood drainage irrigation network on Anzali International Wetland in the framework of IWRM are investigated. For this purpose, first, the values of hydrological indicators including water level, area, and volume of Anzali wetland were determined by considering economic, social and ecological conditions at the desired and minimum levels. After examining the current condition of the wetland, the relationship between the inflow to the wetland and the upstream exploitation system was simulated using the WEAP model and the model was calibrated for the baseline scenario with R2 and RMSE of 0.99 and 0.47, respectively. The results of scenario analysis in different conditions showed that currently the volume and level of the wetland are more dependent on the sea level and the inflow to the wetland only in flood conditions can show its effect on the volume and level of the wetland. Based on the results, it can be said that the ecological life of Anzali wetland is more affected by the discharge of the wetland to the Caspian Sea than by the quantitative management of water resources upstream of the wetland and water abstraction from Sefidrood irrigation and drainage network for agriculture, animal husbandry and aquaculture.

Keywords: Anzali wetland, Ecological services, Sefidrood irrigation and drainage network, WEAP model

1- Academic Center for Education Culture and Research (ACECR), Environmental Research Institute, Rasht, Iran
2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran
(*- Corresponding Author Email: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۶۳-۱۹۵۴

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1954-1963

مقاله پژوهشی

تأثیر فصل کشت و تنش آبی بر ارقام خیار گلخانه‌ای در منطقه سیستان

حلیمه پیری[1*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱

چکیده

برای بررسی اثر فصل کاشت و مقایسه عملکرد ارقام مختلف خیار گلخانه‌ای در شرایط تنش آبی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار در مجتمع گلخانه‌ای چاه‌نیمه واقع در شهرستان زهک استان سیستان و بلوچستان انجام گرفت. تیمارها شامل سه رقم خیار گلخانه‌ای منطقه سیستان (سینا، بارش و نگین)، سه سطح آب آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) و دو فصل کاشت (مرحله اول در هفته اول مهرماه و مرحله دوم در هفته سوم بهمن) بودند. برداشت محصول هر چهار روز یک‌بار انجام شد. وزن و تعداد میوه‌ها، قطر و طول خیار در هر کرت به دقت اندازه‌گیری شد. جهت مقایسه و تجزیه و تحلیل بهتر، میانگین داده‌های بازه زمانی ۱/۵ ماه بعد از اولین برداشت در هر دو فصل کشت مورد استفاده قرار گرفت. همچنین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آبیاری در پایان هر دو فصل محاسبه شدند. نتایج نشان داد اثرات فصل کشت، رقم و آب آبیاری در سطح احتمال پنج و یک درصد بر پارامترهای اندازه‌گیری شده تأثیر معنی‌دار داشتند. بیشترین مقدار پارامترهای اندازه‌گیری شده در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمدند که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار نداشت. عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری در فصل اول کشت به‌ترتیب ۱۴۴/۶ تن در هکتار و ۲۰/۴ کیلوگرم برمتر مکعب بود که نسبت به فصل دوم کشت (۱۲۸/۷ تن در هکتار و ۱۷/۳ کیلوگرم بر مترمکعب) بالاتر بود. ارقام مختلف در فصل اول و دوم کشت نتایج متفاوتی داشتند. رقم سینا در فصل اول کشت عملکرد (۱۵۸/۲ تن در هکتار) بهتری نسبت به سایر ارقام داشت. در فصل دوم کشت رقم بارش (۱۵۶/۴ تن در هکتار) نسبت به رقم سینا و نگین عملکرد بهتری داشت. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده، می‌توان مقدار مصرف آب آبیاری را تا ۷۵ درصد کاهش داد و از آب صرفه‌جویی شده در فصل دوم کشت استفاده نمود. همچنین با توجه به این‌که رقم سینا در فصل اول کشت و رقم بارش در فصل دوم کشت نتایج بهتری داشتند، از این دو رقم به‌ترتیب در این دو فصل، استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، عملکرد، رقم سینا، رقم بارش

مقدمه

از عوامل مهم در تولید و عملکرد مطلوب در گیاهان، تاریخ کاشت، رقم مناسب و سازگار با منطقه هستند. تاریخ کاشت مناسب، معمولا به‌صورت زمان لازم برای حداکثر تولید شاخ و برگ و حداکثر عملکرد اقتصادی درنظر گرفته می‌شود و از طریق آزمایشات تعیین می‌گردد. تاریخ کاشت مناسب، تاریخی است که در نتیجه آن تمامی عوامل محیطی (آب، نور و خاک) مورد استفاده گیاه جهت حداکثر تولید و عملکرد به‌کار می‌روند. از طرفی تاریخ کاشت باید به‌گونه‌ای تعیین گردد که گیاه زمان لازم برای جوانه‌زنی و رشد را داشته باشد و از حداکثر نور و درجه حرارت مناسب استفاده نماید و کیفیت محصول نیز مطلوب‌تر گردد (Abravesh, 2010). خیار با نام علمی *Cucumis sativus* L. یکی از گیاهان تیره کدوئیان است. خیار یکی از سبزی‌های مهمی است که در تمام طول سال امکان تولید گلخانه‌ای آن وجود دارد. مصرف تازه‌خوری خیار در تمام طول سال بر اهمیت تولید گلخانه‌ای آن افزوده است. توسعه تکنولوژی (تأسیس گلخانه و بهره‌برداری فشرده) و همچنین دوره رشد کوتاه این محصول (۱۵۰-۱۲۰ روز)، امکان کشت آن را در اکثر مناطق آب و هوایی فراهم کرده است. نور یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر رشد و تولید محصول خیار است (Gao et al., 2010). خیار از نظر فتوپریود، گیاهی بی‌تفاوت به طول روز است. اما مطالعات نشان داده‌اند که رشد و نمو گیاه خیار در شرایط طول روز بلند و شدت نور بالا، نسبت به طول روز کوتاه اثر به‌سزایی در میزان عملکرد آن خواهد داشت. همچنین مشخص شده است که طول روز یا درجه حرارت بر تعیین جنسیت گل در خیار اثر متقابل دارند. رشد میوه خیار وابسته به میزان مواد آسیمیلاته‌ای است که به سمت میوه حرکت می‌کند (Marcelis et al., 1995). بررسی‌ها نشان داده‌اند، در زمستان به‌علت آن‌که سرعت سنتز مواد آسیمیلاته پایین است، نمو جوانه گل نیز ضعیف است و در شرایطی که نور عامل محدودکننده باشد، افزایش سقط

۱- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
(*- نویسنده مسئول: (Email: H_piri2880@uoz.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.3.4

جوانه گل نیز موجب کاهش تعداد جوانه همسو با کاهش سنتز مواد فتوسنتزی می‌گردد (Mohammed and Amer, 2001). کاهش شدت تشعشعات به میزان یک درصد سبب کاهش عملکرد به میزان ۱/۲-۰/۶ درصد در خیار گلخانه‌ای شد (Marcelis et al., 2006). در سبزیجات دیگر از جمله بادمجان گزارش شده است که روزهای لازم تا رسیدن به میزان ۵۰ درصد گلدهی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تغییرات فصلی است و با میزان عملکرد ارتباط دارد و می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های برداشت استفاده گردند (Illangakoon et al., 2004). به‌طور معمول رشد گیاه با توجه به کمیت و کیفیت نور متفاوت است. کمیت نور از مواردی مانند طول روز، زاویه تابش خورشید، شرایط اتمسفر، تراکم گیاه، ساختار کانوپی، ساختار و نوع پوشش گلخانه تأثیر می‌پذیرد و کیفیت نور نیز تحت تأثیر زاویه تابش خورشید، شرایط اتمسفر، تراکم گیاه و میزان انعکاس از سطح خاک قرار دارد (Heuvelink and Dorais, 2003).

کمبود آب درمنطقه سیستان و شرایط بد آب و هوایی، باعث شده است تا کشت خیار در این منطقه به‌صورت گلخانه‌ای و دوبار در سال، انجام شود. کشت مرحله اول از مهرماه آغاز و تا اواسط بهمن ماه ادامه دارد. کشت مرحله دوم از اواسط بهمن آغاز و تا خرداد برداشت انجام می‌گیرد. در فصل اول کشت، هوا سرد و خشک و طول روز کوتاه می‌باشد. در فصل دوم کشت با نزدیک شدن به فصل بهار، هوا گرم‌تر شده و طول روز نیز بلندتر می‌شود. گلخانه‌داران منطقه عموماً از سه رقم خیار سینا، بارش و نگین برای کشت استفاده می‌کنند. با توجه به این‌که در فصل بهار کشاورزان با کمبود آب مواجه می‌شوند، محصولات آن‌ها اوایل اردیبهشت در اثر خشکی از بین می‌رود. در صورتی‌که اگر آب وجود داشته باشد، می‌توانند تا تیرماه برداشت محصول داشته باشند. در تحقیقی اثر مقادیر مختلف آب آبیاری روی خیار مورد بررسی قرار گرفت و این نتیجه بیان شد که با افزایش میزان آب مصرفی میزان محصول تولیدی افزایش یافت اما کیفیت محصول کاهش یافت (Warman and AngLopez, 2010). در بررسی تنش‌های آبی بر گیاه خیار نتایج نشان داد میزان کارآیی مصرف آب در تیمارهای پتانسیل آب خاک ۶۰، ۴۰ و ۸۰ سانتی‌بار به‌ترتیب ۹۶، ۸۴ و ۴۹ کیلوگرم بر متر مکعب آب بود. بنابراین مکش ۶۰ سانتی‌بار در افزایش کارآیی آب موثر بوده است (Moslehi et al., 2010). در تحقیقی، سه سطح تنش آبی (صفر، ۲۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) و سه سطح زئولیت (صفر، ۵ و ۱۰ گرم در هر کیلوگرم خاک) روی گیاه خیار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که تنش خشکی بر شاخص‌های تعداد میوه و طول میوه تأثیر معنی‌داری ایجاد نکرده، ولی بر عملکرد محصول و قطر میوه تأثیر معنی‌داری در سطح ۵٪ داشته است. بیشترین عملکرد محصول و تعداد میوه را سطح بدون تنش دارا بود. با توجه به این‌که بین دو سطح بدون تنش و مصرف ۷۵٪ نیاز آبی تفاوت معنی‌داری از لحاظ عملکرد محصول مشاهده نشد، بنابراین از نظر کارایی مصرف آب و کاهش آب مصرفی، بهینه‌ترین سطح تنش، سطح دو (۷۵ درصد نیاز آبی) است. همچنین با مصرف ۱۰ گرم زئولیت در یک کیلوگرم خاک، بیشترین عملکرد، تعداد میوه و طول میوه حاصل شد (Mohabbati et al., 2018). رییسی‌نژاد دوبنه و یزدان‌پناه تأثیر سطوح مختلف آب آبیاری و شوری را بر خیار گلخانه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد اعمال سطح آبیاری شده پس از ۳۰ میلی‌متر تبخیر از تشت در طول دوره رشد در سطح شوری ۲/۶ دسی زیمنس بر متر، نسبت به شرایط بهینه (اعمال سطح آبیاری شده پس از ۱۵ میلی‌متر تبخیر از تشت و شوری۰/۹ دسی‌زیمنس بر متر)، کاهش عملکرد چشمگیر نبود و می‌توان در شرایط بحرانی کمبود آب، این سطح آبیاری را به‌کار برد (Raisynejad Dobneh and Yazdanpanah, 2019).

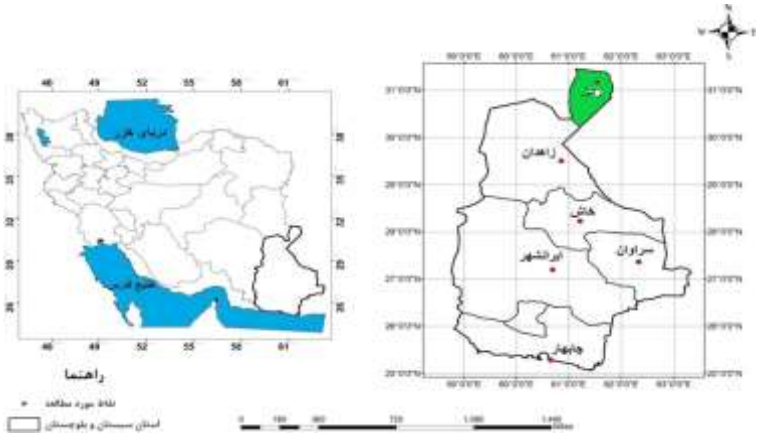
با توجه به این‌که در کشت دوم خیار در منطقه سیستان حجم آبی که در اختیار کشاورزان قرار می‌گیرد، کمتر است و محصولات آن‌ها اوایل اردیبهشت در اثر خشکی از بین می‌رود و همچنین با توجه به این‌که عملکرد ارقام در شرایط متفاوت آب و هوایی با یکدیگر فرق دارد، لذا در این تحقیق به بررسی عملکرد ارقام مختلف خیار گلخانه‌ای منطقه سیستان در دو فصل کشت در شرایط تنش آبی پرداخته شد تا در هر فصل رقم برتر از نظر عملکرد تعیین و معرفی گردد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در مجتمع گلخانه‌ای چاه‌نیمه واقع در شهرستان زهک استان سیستان و بلوچستان انجام شد. این منطقه در۶۱ درجه و ۶۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸۹ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۴۸۰ متر از سطح دریا قرار دارد. منطقه مطالعاتی دارای اقلیم گرم و خشک بوده و میزان بارندگی آن در سال کمتر از ۶۰ میلی‌متر است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد در منطقه مورد مطالعه، خیار در دو فصل کشت می‌گردد. شرایط آب و هوایی در این دو فصل متفاوت هستند و این تفاوت باعث اختلاف عملکرد ارقام خیار در دو فصل کشت می‌شود. داده‌های هواشناسی در دو فصل کشت در جدول ۱ آورده شده‌اند.

به‌منظورتعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، قبل از مراحل آماده‌سازی زمین نمونه‌های خاک برداشت و برخی خصوصیات آن‌ها تعیین شدند (جدول ۲).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- آمار هواشناسی طی دو فصل کشت در منطقه مورد مطالعه

میانگین پارامترهای هواشناسی		فصل ۱				فصل ۲			
		مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت
بیرون گلخانه	تبخیر(میلی‌متر)	۱۱/۲	۷/۲	۵/۵	۴/۵	۴/۲	۶/۷	۸/۳	۱۲/۴
	دما (سانتی‌گراد)	۲۳/۹	۱۵/۴	۱۰/۳	۸/۹	۱۳/۵	۱۶/۵	۲۳/۱	۲۹/۵
	رطوبت نسبی (درصد)	۲۳	۲۹	۴۲	۴۳	۵۳	۳۹	۴۳	۳۵
درون گلخانه	دما (سانتی‌گراد)	۲۵/۶	۲۱/۲	۱۹/۵	۱۸/۷	۱۹/۴	۲۱/۶	۲۶/۴	۳۰/۷
	رطوبت نسبی (درصد)	۲۹	۳۵	۵۳	۵۲	۵۴	۴۸	۴۶	۴۲

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک گلخانه

فصل	عمق نمونه برداری	سیلت	شن	رس	بافت خاک	فسفر	پتاسیم	نیتروژن کل	pH	EC
		درصد				(میلی‌گرم در لیتر)		درصد		(dS/m)
۱	۰-۳۰	۳۰	۶۰	۱۰	لوم شن	۲۶/۳	۳۱۷/۲	۱/۲	۷/۵	۱/۶
۲	۰-۳۰	۲۴	۶۳	۱۳	لوم شن	۲۵/۷	۳۲۴/۶	۱/۳	۷/۳	۱/۵

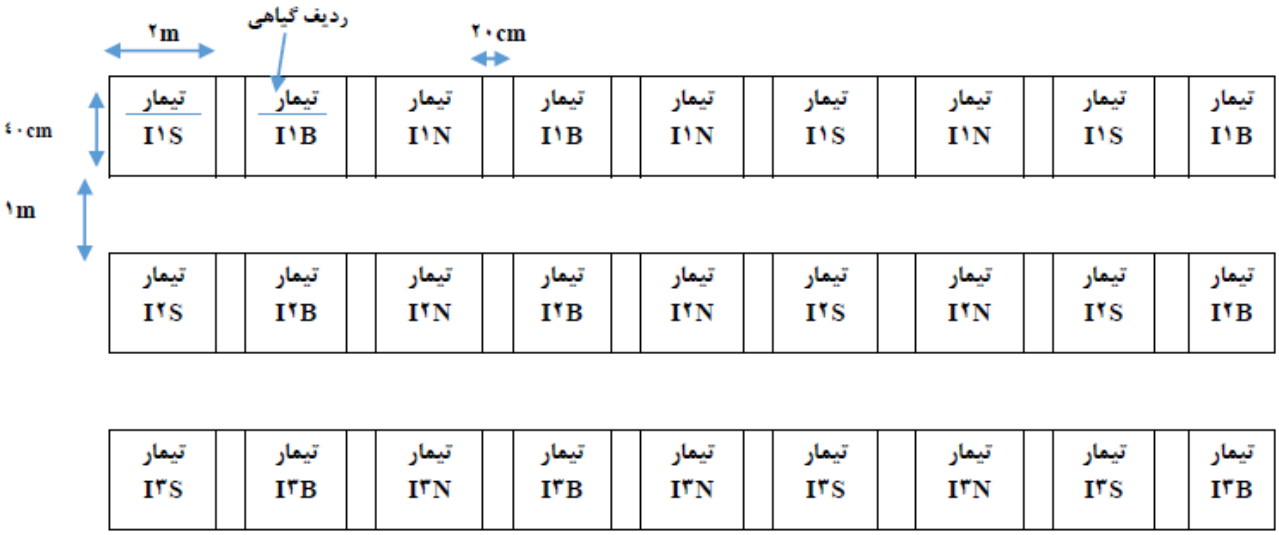
به‌منظور بررسی اثر فصل کاشت و مقایسه عملکرد ارقام مختلف خیار گلخانه‌ای در شرایط تنش آبی، آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار در گلخانه انجام گرفت. تیمارها شامل سه رقم خیار گلخانه‌ای منطقه سیستان (رقم‌های سینا، بارش و نگین)، سه سطح آب آبیاری (۱۰۰ درصد، ۷۵ درصد و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) و دو فصل کاشت (کشت مرحله اول در هفته اول مهرماه و کشت مرحله دوم در هفته سوم بهمن) بودند. کشت به صورت جوی و پشته انجام گرفت. ابتدا سه پشته در گلخانه مورد نظر انتخاب شد. فاصله پشته‌ها از یکدیگر یک متر بود. سپس روی این سه پشته کرت‌هایی به طول ۲ متر و عرض ۴۰ سانتی‌متر و به فاصله ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر جدا شدند. سپس بذر ارقام مختلف خیار به عمق ۳ سانتی‌متر و به فاصله ۳۰ سانتی‌متر در هر کرت کشت گردیدند. شکل (۱) شماتیک طرح را نشان می‌دهد.

حجم آب مورد نیاز

جهت تعیین حجم آب مورد نیاز برای آبیاری، تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از رابطه فائو- پنمن- مانتیث (رابطه ۱) به‌دست آمد (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn-G)+\gamma\frac{C_n}{T+273}U2(es-ea)}{\Delta+\gamma(1+C_d\,U2)} \quad (۱)$$

در این رابطه، ET_0: تبخیر و تعرق مرجع ($mm\ day^{-1}$)، Rn: تابش خالص ورودی به سطح گیاه ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، G: شار گرمای خاک ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، T_{mean}: میانگین دمای هوای روزانه (^0C)، U_2: میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($m\ s^{-1}$)، e_s: فشار بخار اشباع (KP_a)، ea: فشار بخار واقعی (KP_a)، es-ea: کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع (KPa^0C^{-1})، γ: ضریب سایکرومتری (KPa^0C^{-1})، C_n: ضریبی برای گیاه مرجع که مقدار آن ۹۰۰ است ($Kg^0KKj^{-1}day^{-1}$)، Cd: ضریب باد برای گیاه مرجع که مقدار آن ۰/۳۴ می‌باشد ($s\ m^{-1}$).



شکل ۱- شماتیک طرح

در این شکل I_1، I_2 و I_3 به ترتیب سطوح مختلف آبیاری، S رقم خیار سینا، B رقم خیار بارش و N رقم خیارر نگین می‌باشد.

تبخیر و تعرق گیاه با استفاده از رابطه (۲) به‌دست آمد.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (۲)$$

در این رابطه، ET_c تبخیر و تعرق گیاه (میلی‌متر در روز)، K_c ضریب گیاهی و ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز).

با توجه به این‌که تبخیر و تعرق گیاه مرجع درون گلخانه ۶۰ تا ۸۰ درصد تبخیر و تعرق آن در بیرون گلخانه است (Rouphael and Colla, 2005)، تبخیر و تعرق مرجع به‌دست آمده در ضریب ۰/۷ ضرب شد و سپس تبخیر و تعرق گیاه به‌وسیله آن محاسبه شد. پس از تعیین تبخیر و تعرق گیاه و با در نظر گرفتن راندمان آبیاری ۹۰ درصد برای پخش آب در مزرعه، حجم آب آبیاری با استفاده از رابطه (۳) تعیین و با استفاده از کنتورهای نصب شده روی هر یک از لوله‌های آبرسان، اندازه‌گیری و در اختیار گیاه قرار گرفت.

$$v = \frac{l \times s \times ETc}{Ea} \quad (۳)$$

در این رابطه V: حجم آب آبیاری (متر مکعب)، ETc : تبخیر و تعرق گیاه (متر در روز)، l: طول کرت (متر)، s: عرض کرت (متر) و Ea: راندمان سیستم است.

بهره‌وری آب (WP)

عبارت است از: نسبت محصول تولید شده به آب آبیاری که از رابطه (۴) به دست آمد (Peyro et al, 2009).

$$WP = \frac{Y}{IR} \quad (۴)$$

در این رابطه، WP: بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، Y: مقدار محصول برداشت شده (کیلوگرم) و IR: مقدار آب آبیاری (متر مکعب)

نمونه‌برداری گیاهی

اولین برداشت محصول در فصل اول کشت پس از ۵۰ روز از تاریخ کاشت (اول آذر) انجام و تا ۱۰ بهمن ادامه داشت. کشت مرحله دوم هفته سوم بهمن انجام شد. اولین برداشت کشت دوم ۴۵ روز پس از کشت (هفت فروردین) انجام و تا اوایل خرداد انجام شد. در هر تیمار۱۰بوته به‌طور تصادفی انتخاب شدند. برداشت هر چهار روز یک‌بار انجام شد تا میوه‌ها بیش از اندازه بزرگ نشوند و از حالت بازار پسندی خارج نگردند. وزن و تعداد میوه‌ها، قطر و طول خیار در هر کرت به دقت اندازه‌گیری شدند. جهت مقایسه و تجزیه و تحلیل بهتر، میانگین داده‌های بازه زمانی ۱/۵ ماه بعد از اولین برداشت در هر دو فصل کشت مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین عملکرد و بهره‌وری آب در پایان هر دو فصل محاسبه شدند. در پایان داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS ۹,۱ مورد تجزیه و تحلیل و میانگین‌ها نیز با آزمون دانکن، مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در جدول ۳ آورده شده‌اند. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر رقم، مقدار آب آبیاری و فصل کشت بر پارامترهای اندازه‌گیری شده در سطح احتمال

یک و پنج درصد، معنی‌دار بود. اثر متقابل رقم، آب آبیاری و فصل کشت نیز در سطح احتمال یک و پنج درصد بر پارامترهای اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود. اثر تکرار بر صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبود که نشان‌دهنده شرایط یکنواخت آزمایش برای همه تکرارها بوده است (جدول‌های ۳ و ۴).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) صفات کمی اندازه‌گیری شده

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن میوه	تعداد میوه	طول میوه	قطر میوه	عملکرد	بهره‌وری آب
R	۲	۱/۵ ns	۰/۵۳ns	۰/۰۳۷ ns	۱/۲۵ ns	۸۶/۳۲ ns	۲/۱۳ ns
A (رقم)	۲	۱/۲**	۱۲۱/۴*	۴۳/۴**	۱/۵۷**	۲۷۸۴۱**	۷/۸۵*
خطای a	۶	۱/۸	۴/۳	۱/۳	۲/۲۱	۵۲/۱۲	۱/۲۶
مقدار آب آبیاری (B)	۲	۲۵۴۶/۱۶*	۲۰۸/۶*	۲۸۴/۳۱**	۱/۹**	۲۳۴۵/۵۶**	۵۶۱/۲۹**
A*B	۴	۱۹۸۴۵/۱۲*	۴۶۸/۹*	۳۶/۸۷**	۱/۹۶**	۱۶۴۲/۰۳**	۵۴/۳۲**
R*B(A)	۱۲	۱۸۷۵/۶	۲/۳	۱/۰۱	۰/۰۲۵	۱/۰۸	۱/۶۵
C (فصل کشت)	۱	۰/۳۸**	۶۲/۵۴*	۷/۹۶**	۱/۱۴**	۶۵۸۴۱**	۰/۳۴*
A*C	۲	۰/۳۴*	۲۴/۳*	۲/۱*	۰/۵۲*	۱۵۴۲/۲**	۱/۶*
B*C	۲	۶۵۴/۳۶*	۶۷/۴**	۶/۸۵**	۱/۲۵**	۳۲۴/۱۸**	۱۹/۷۱*
A*B*C	۴	۲۳۶۸/۲۱*	۱۲۴/۰۴*	۱/۰۶*	۱۰/۱۳*	۲۴۵/۰۸**	۱۷/۳۸**
R*C(A)	۳۶	۰/۰۲۶	۴/۶	۰/۱۲	۱/۲	۸۵/۲	۱/۳۴
ضریب تغییرات(٪)		۴/۳۴	۴/۷	۳/۶	۴/۸	۶/۴	۹/۶۴

* و **معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد، ns عدم معنی‌داری

وزن میوه: جدول ۴ مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، اثرات رقم بر وزن میوه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد. بیشترین وزن میوه از خیار رقم سینا (۱۴۳/۸ گرم) به‌دست آمد. خیار رقم بارش با ۱۲۷/۴ گرم، کمترین وزن میوه را داشت. اثر مقدار آب آبیاری نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری وزن میوه کاهش یافت اما از این نظر بین تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. بیشترین وزن میوه از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (۱۴۹/۷ گرم) و کمترین از تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (۱۲۵/۳ گرم) به‌دست آمد. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد در شرایط اعمال تنش خفیف رطوبتی، مواد فتوسنتزی ایجاد شده در گیاه که مازاد بر رشد رویشی هستند، می‌توانند در اختیار اندام‌های زایشی گیاه قرار گیرد که از کاهش شدید میزان میوه و وزن آن در بوته جلوگیری نماید. این در حالی است که در شرایط اعمال تنش شدید رطوبتی، علاوه بر کاهش شدید رشد رویشی گیاه از جمله ارتفاع و شاخص سطح برگ، ریزش شدید گل‌هایی که باید به میوه تبدیل شوند نیز رخ می‌دهد (Douh et al., 2013; Amer et al., 2009) که با نتایج تحقیق هم‌خوانی دارد. اثر فصل کشت نشان داد بیشترین وزن میوه (۱۵۰/۶ گرم) ازفصل اول کشت به‌دست آمد. اثرات متقابل رقم و مقدار آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد بیشترین وزن میوه (۱۶۵/۵ گرم) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و رقم سینا به‌دست آمد که از این نظر با رقم نگین تفاوت معنی‌دار نداشت. همچنین وزن میوه در رقم سینا بین تیمار ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار نداشت. اثر متقابل رقم و فصل کشت (جدول ۶) نشان داد بیشترین وزن میوه در فصل اول کاشت از خیار رقم سینا (۱۶۵/۵ گرم) به‌دست آمد. در فصل دوم کشت، رقم سینا کمترین وزن میوه و خیار رقم بارش بیشترین وزن میوه (۱۵۲/۳ گرم) را داشت. بین مقادیر وزن میوه رقم نگین در هر دو فصل کشت تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. اثر مقدار آب آبیاری و فصل کشت (جدول ۷) نشان داد بیشترین مقدار وزن میوه از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و فصل اول کشت (۱۶۵/۵ گرم) به‌دست آمد. وزن میوه بین تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در فصل اول کشت و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در فصل دوم کشت تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت وزن میوه فصل دوم کشت در تیمار آبیاری کامل تقریبا مشابه وزن میوه در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه فصل اول کشت است. در فصل دوم کشت هوا بسیار گرم شده و این محدودیت باعث کاهش رشد گیاه و وزن میوه می‌گردد.

تعداد میوه: اثرات رقم بر تعداد میوه (جدول ۴) نشان داد بیشترین تعداد میوه (۱۴/۸) از رقم سینا برداشت شد. رقم بارش کمترین تعداد میوه را داشت. اثر مقدار آب آبیاری نشان داد بیشترین تعداد میوه از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد. با کاهش عمق آب آبیاری تعداد میوه کاهش یافت اما تفاوتی بین تعداد میوه در تیمار ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه مشاهده نشد. اثرات فصل کشت بر تعداد میوه نشان داد بیشترین تعداد میوه در فصل اول کشت بود. در فصل دوم کشت تعداد میوه به اندازه ۲۹/۴۵ درصد از تعداد میوه در

فصل اول کشت کمتر بود. اثرات متقابل رقم و آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد بیشترین تعداد میوه از رقم سینا و در سطح ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد اما از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار نداشت. رقم نگین و رقم بارش در رتبه دوم و سوم از نظر تعداد میوه قرار داشتند. اثرات متقابل رقم و فصل کشت (جدول ۶) نشان داد بیشترین تعداد میوه از رقم سینا در فصل اول کشت به‌دست آمد که از این نظر با رقم بارش در فصل دوم کشت تفاوت معنی‌دار نداشت. تعداد میوه در رقم سینا و نگین در فصل دوم کشت نسبت به فصل اول کشت به‌ترتیب ۲۰/۲۶ و ۱۸/۷۸ کاهش داشت. هوی پکان و تهونن (۲۰۰۸)(2008) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند سرعت توسعه مراحل نموی گیاه مانند بلوغ میوه توسط دما تعیین می‌شود. خیار رقم سینا در فصل اول کشت که دمای هوا نسبت به فصل دوم کشت کمتر بود، زودتر به گلدهی رسید که این مسئله، باعث زودرسی این رقم شد. هرچه میزان گلدهی در گیاهان تسریع گردد، مراحل مختلف تکامل جنسی آن نیز تسریع شده و توزیع مواد غذایی در مسیر اندام‌های زایشی تسریع می‌شوند (Mashayekhi and Moosavizadeh, 2009). اثرات متقابل فصل کشت و مقدار آب آبیاری (جدول ۷) نشان داد بیشترین تعداد میوه در فصل اول کشت و تیمار آبیاری کامل به‌دست آمد. بین تعداد میوه در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در فصل اول کشت و تعداد میوه در تیمار آبیاری کامل و فصل دوم کشت، تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد.

طول میوه: اثرات رقم در سطح احتمال پنج درصد بر طول میوه تأثیر معنی‌دار داشت. بیشترین طول میوه (۱۶/۱ سانتی‌متر) از رقم سینا به‌دست آمد. رقم بارش با ۱۲۷/۴ سانتی‌متر کمترین طول میوه را داشت (جدول ۴). مقدار آب آبیاری روی طول میوه تأثیر گذار بود. با کاهش مقدار آب آبیاری، طول میوه کاهش یافت. بیشترین مقدار طول میوه از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (۱۶/۶ سانتی‌متر) به‌دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌دار نداشت. مصلحی و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیق خود به نتایج مشابه دست یافتند. آن‌ها بیان کردند کاهش مقدار آب آبیاری تا ۶۰ سانتی‌متر، تأثیر معنی‌دار بر طول میوه خیار نداشت. اثر فصل کشت بر طول میوه نشان داد بیشترین طول میوه (۱۵/۴ سانتی‌متر) از فصل اول کشت به‌دست آمد. اثر متقابل آب آبیاری و رقم نشان داد بیشترین طول میوه (۱۶/۴ سانتی‌متر) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و رقم سینا به‌دست آمد. بین رقم سینا در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و رقم نگین در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار، مشاهده نشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت رقم سینا شرایط کم‌آبی را بهتر از رقم‌های دیگر تحمل می‌کند. کمترین مقدار طول میوه (۹/۱ سانتی‌متر) از رقم بارش در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد. اثر متقابل رقم و فصل کشت (جدول ۶) نشان داد بیشترین مقدار طول میوه (۱۶/۴ سانتی‌متر) از رقم سینا در فصل اول کشت به‌دست آمد که از این نظر با طول میوه رقم بارش در فصل دوم کشت (۱۵۲/۳ سانتی‌متر) تفاوت معنی‌دار نداشت. اثر متقابل فصل کشت و مقدار آب آبیاری (جدول ۷) نشان داد بیشترین طول میوه از فصل اول کشت و تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (۱۶/۴ سانتی‌متر) به‌دست آمد. بین تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و فصل اول کشت و تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در فصل دوم کشت، تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد و لذا می‌توان گفت، خیار در منطقه سیستان در فصل اول کشت نسبت به تنش آبی مقاوم‌تر از فصل دوم کشت است.

قطر میوه: اثرات رقم در سطح احتمال پنج درصد بر قطر میوه معنی‌دار بود. مطابق جدول ۴ بزرگترین قطر میوه از رقم سینا (۴/۲ سانتی‌متر) به‌دست آمد. بین رقم نگین و بارش از نظر قطر میوه تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. با کاهش عمق آب آبیاری، قطر میوه کاهش یافت. بیشترین قطر میوه (۴/۴ سانتی‌متر) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد و تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه کمترین قطر (۳/۲ سانتی‌متر) را داشت.

جدول ٤- مقایسه میانگین صفات کمی اندازه‌گیری شده

تیمارهای آزمایشی		وزن میوه (گرم)	تعداد میوه	طول میوه (سانتی‌متر)	قطر میوه (سانتی‌متر)	عملکرد (تن در هکتار)	بهره‌وری آب (کیلوگرم‌بر متر مکعب)
رقم	سینا	۱۴۳/۴/۸a	۱۴/۸a	۱۶/۱a	۴/۲a	۱۵۸/۲a	۲۱/۶a
	نگین	۱۳۲/۳b	۱۱/۵b	۱۴/۲b	۳/۳b	۱۳۵/۶b	۱۸/۵b
	بارش	۱۲۷/۴c	۹/۶c	۱۴/۶b	۳/۱b	۱۲۲/۳c	۱۶/۴c
مقدار آب آبیاری	۱۰۰درصد	۱۴۹/۷a	۱۵/۲a	۱۶/۶a	۴/۴a	۱۶۰/۶a	۲۴/۶۱b
	۷۵ درصد	۱۴۲/۳a	۱۳/۸a	۱۵/۵a	۳/۸b	۱۴۸/۴a	۳۰/۳a
	۵۰ درصد	۱۲۵/۳b	۹/۷b	۱۲/۴b	۳/۲c	۱۰۰/۳b	۳۰/۸a
فصل کشت	۱	۱۵۰/۶a	۱۴/۶a	۱۵/۴a	۳/۸a	۱۴۴/۶a	۲۰/۴a
	۲	۱۳۵/۶b	۱۰/۳b	۱۲/۷b	۳/۲b	۱۲۸/۷b	۱۷/۳b

میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل رقم و مقدار آب آبیاری (A×B) صفات کمی اندازه‌گیری شده

رقم	مقدار آب آبیاری	وزن میوه (گرم)	تعداد میوه	طول میوه (سانتی‌متر)	قطر میوه (سانتی‌متر)	عملکرد (تن در هکتار)	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر متر مکعب در هکتار)
سینا	۱۰۰ درصد	۱۶۵/۵a	۱۵/۲a	۱۶/۴a	۴/۲a	۱۶۰/۸a	۲۴/۷d
	۷۵ درصد	۱۵۲/۶a	۱۳/۷a	15/۲ab	۳/۷ab	۱۵۶/۴a	۳۲/۱b
	۵۰ درصد	۱۱۸/۸e	۹/۸c	۱۱/۶c	۳/۱c	۱۲۲/۳c	۳۷/۶a
نگین	۱۰۰ درصد	۱۵۱/۱a	۱۳/۲a	۱۵/۳ab	۳/۸ab	۱۴۸/۴b	۲۲/۳de
	۷۵ درصد	۱۴۴/۵b	۱۰/۶b	۱۳/۲b	۳/۱b	۱۳۲/۷c	۲۷/۲c
	۵۰ درصد	۱۱۲/۲f	۷/۵d	۱۰/۸cd	۲/۸c	۱۱۵/۶e	۳۵/۵a
بارش	۱۰۰ درصد	۱۳۸/۴c	۱۲/۴b	۱۳/۳b	۳/۶ab	۱۲۸/۷d	۱۹/۸e
	۷۵ درصد	۱۲۷/۵d	۹/۷c	۱۰/۸cd	۳/۲b	۱۱۶/۱e	۲۳/۸d
	۵۰ درصد	۱۰۸/۳f	۶/۵d	۹/۱d	۲/۷c	۱۰۳/۳f	۳۱/۷b

میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند

جدول ٦- مقایسه میانگین اثرات متقابل رقم و فصل کشت (A×C) صفات کمی اندازه‌گیری شده

فصل کشت	رقم	وزن میوه (گرم)	تعداد میوه	طول میوه (سانتی‌متر)	قطر میوه (سانتی‌متر)	عملکرد (تن در هکتار)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱	سینا	۱۶۵/۵a	۱۵/۳a	۱۶/۴a	۴/۱a	۱۶۱/۱a	۲۴/۵a
	نگین	۱۳۰/۶b	۱۳/۲b	۱۳/۲b	۳/۵b	۱۳۵/۴b	۲۰/۵b
	بارش	۱۱۸/۸c	۱۰/۴c	۱۱/۶c	۳/۱b	۱۲۲/۳c	۱۸/۸c
۲	سینا	۱۲۱/۴b	۱۲/۲b	۱۲/۳b	۳/۱b	۱۲۸/۷b	۱۶/۹b
	نگین	۱۲۵/۵b	۱۰/۷c	۱۱/۸c	۳/۲b	۱۳۱/۸b	۱۷/۷b
	بارش	۱۵۲/۳a	۱۴/۶a	۱۵/۷a	۳/۹a	۱۵۶/۴a	۲۰/۶a

میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرات متقابل فصل کشت و مقدار آب آبیاری (B×C) صفات کمی اندازه‌گیری شده

فصل کشت	مقدار آب آبیاری	وزن میوه (گرم)	تعداد میوه	طول میوه (سانتی‌متر)	قطر میوه (سانتی‌متر)	عملکرد (تن در هکتار)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب)
۱	۱۰۰ درصد	۱۶۵/۵a	۱۵/۶a	۱۶/۴a	۴/۲a	۱۶۰/۸a	۲۴/۵c
	۷۵ درصد	۱۳۶/۶b	۱۳/۱b	۱۳/۲b	۳/۵b	۱۴۵/۴b	۲۹/۵b
	۵۰ درصد	۱۱۸/۸c	۹/۲d	۱۱/۶c	۳/۱c	۱۲۲/۳c	۳۷/۶a
۲	۱۰۰ درصد	۱۴۵/۳b	۱۳/۸b	۱۴/۷b	۳/۶b	۱۵۱/۴b	۲۰/۷d
	۷۵ درصد	۱۲۵/۵c	۱۱/۵c	۱۲/۳bc	۳/۲c	۱۳۱/۸c	۲۳/۶c
	۵۰ درصد	۱۰۲/۴d	۷/۶e	۱۱/۸b	۳/۱c	۱۲۸/۷c	۳۴/۳b

میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

تأثیر فصل کشت (جدول ۴) نشان داد قطر میوه در فصل اول کشت بیشتر از قطر میوه در فصل دوم کشت است. اثرات متقابل رقم و آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد بیشترین قطر میوه (۴/۲ سانتی‌متر) از رقم سینا و تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد. بین رقم سینا و تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و رقم نگین و بارش با تیمار آبیاری کامل تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. همچنین مشاهده می‌گردد از نظر قطر میوه بین ارقام بارش و نگین در سطوح مختلف آب آبیاری تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. اثرات متقابل رقم و فصل کشت (جدول ۶) نشان داد بیشترین قطر میوه (۴/۱ سانتی‌متر) از فصل اول کشت و رقم سینا به‌دست آمد که با قطر میوه در فصل دوم کشت و رقم بارش (۳/۹ سانتی‌متر) تفاوت معنی‌دار نداشت. اثرات متقابل فصل کشت و مقدار آب آبیاری (جدول ۷) نشان داد بیشترین مقدار قطر میوه (۴/۲ سانتی‌متر) از فصل اول کشت و تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد. بین تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و فصل اول کشت و تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در فصل دوم کشت، تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد.

عملکرد: مطابق جدول ۴ بین ارقام مختلف از نظر عملکرد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد مشاهده شد. بیشترین عملکرد (۱۵۸/۲ تن در هکتار) از رقم سینا به‌دست آمد. رقم بارش با ۱۲۲/۳ تن در هکتار کمترین عملکرد را داشت. اثرات آب آبیاری نشان داد بیشترین مقدار عملکرد (۱۶۰/۶ تن در هکتار) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. کاهش عملکرد بین تیمار ۵۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه به‌علت رقابت شدید بین میوه‌های از قبل تشکیل شده و میوه‌های جدید است که از تشکیل گل و میوه جدید جلوگیری می‌کند (Mao et al., 2003). همچنین می‌توان گفت اعمال تنش شدید باعث ایجاد سلول‌های چروکیده و سست شدن دیواره سلولی شده و از آنجا که تا زمانی که سلول به اندازه کافی رشد نکند، فرآیند تقسیم سلول انجام نخواهد شد، لذا تأثیر کمبود آب بر رشد سلول بیشتر است که در نهایت منجر به کاهش سطح برگ می‌شود (Taiz and Ziger, 199). کاهش سطح برگ و ریزش برگ‌ها منجر به کاهش منبع فتوسنتزی و افت فعالیت آنزیم‌های موثر بر این فرآیند می‌گردد و در نتیجه عملکرد محصول کاهش می‌یابد (Paris et al., 2018). مقدار عملکرد بین دو فصل کشت متفاوت بود. بیشترین مقدار عملکرد از فصل اول کشت حاصل شد. اثرات متقابل آب آبیاری و رقم (جدول ۵) نشان داد بیشترین مقدار عملکرد (۱۶۰/۸ تن در هکتار) از رقم سینا و تیمار ۱۰۰ در صد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد تفاوت معنی‌دار نداشت. کمترین مقدار عملکرد (۱۰۳/۳ تن در هکتار) نیز از تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه و رقم بارش به‌دست آمد. اثرات متقابل رقم و فصل کشت (جدول ۶) نشان داد بیشترین عملکرد (۱۶۱/۱ تن در هکتار) از رقم سینا و فصل اول کشت به‌دست آمد که از این نظر با فصل دوم کشت و رقم بارش (۱۵۶/۴ تن در هکتار) تفاوت معنی‌دار نداشت. عملکرد رقم نگین در دو فصل کشت تفاوت معنی‌دار نداشت. اثرات متقابل فصل کشت و مقدار آب آبیاری (جدول ۷) نشان داد بیشترین مقدار عملکرد (۱۶۰/۸ تن در هکتار) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و فصل اول کشت به‌دست آمد. بین مقادیر عملکرد در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و فصل اول کشت با مقدار عملکرد در فصل دوم کشت و تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد.

بهره‌وری آب: اثرات رقم بر بهره‌وری آب نشان داد بیشترین بهره‌وری آب (۲۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب) از رقم سینا به‌دست آمد. کاهش مقدار آب آبیاری باعث افزایش بهره‌وری آب گردید. بیشترین مقدار بهره‌وری آب (۳۰/۸ کیلوگرم بر مترمکعب) از تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. تحقیقات نشان داده است اعمال کم‌آبیاری باعث استفاده بهینه از هر واحد آب آبیاری و افزایش بهره‌وری می‌شود (Doh et al., 2013; Mao et al., 2003). بنابراین در شرایط کمبود آب می‌توان با حذف آبیاری‌های کم‌بازده و یا با کاهش حجم آب آبیاری آگاهانه به گیاه اجازه داده شود تا با دریافت آب کمتر از نیاز، محصول خود را تا اندازه‌ای کاهش دهد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد و بهره‌وری آب را افزایش داد (Faramarzpour et al., 2012). اثرات متقابل آب آبیاری و رقم آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد بیشترین بهره‌وری (۳۷/۶ کیلوگرم بر متر مکعب) از رقم سینا در تیمار ۵۰ درصد مقدار آب آبیاری به‌دست آمد که از این نظر با تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه و رقم نگین (۳۵/۵ کیلوگرم بر مترمکعب) تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. اثرات متقابل فصل کشت و رقم (جدول ۶) نشان داد بیشترین بهره‌وری (۲۴/۵ کیلوگرم بر مترمکعب) از رقم سینا در فصل اول کشت به‌دست آمد که از این نظر با رقم بارش در فصل دوم کشت تفاوت معنی‌دار نداشت. بین رقم سینا و نگین در فصل دوم کشت تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. اثرات متقابل مقدار آب آبیاری و فصل کشت (جدول ۷) نشان داد بهره‌وری آب در هر دو فصل با کاهش مقدار آب آبیاری افزایش یافت. بیشترین بهره‌وری (۳۷/۶ کیلوگرم بر مترمکعب) از تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه و فصل اول کشت به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق نشان داد از نظر عملکرد، بالاترین عملکرد از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و فصل اول کشت به‌دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار نداشت. مقدار عملکرد در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در فصل دوم کشت با عملکرد در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار نداشت. بنابراین توصیه می‌شود در فصل اول کشت آبیاری به اندازه ۷۵ درصد انجام شود و از آب صرفه‌جویی شده در فصل دوم کشت که مشکل تأمین آب وجود دارد، استفاده شود. اثرات رقم نشان داد بهترین رقم در فصل اول کشت، رقم سینا بود و در فصل دوم کشت، رقم بارش عملکرد بهتری داشت. رقم نگین در هر دو کشت تقریبا عملکرد یکسانی داشت. با توجه به این‌که تاریخ کاشت یکی از اساسی‌ترین عامل‌ها در موفقیت کشاورزی است، لذا جهت رسیدن به عملکرد و بهره‌وری خوب، بایستی در فصل اول کشت از خیار رقم سینا و در فصل دوم کشت، از خیار رقم بارش استفاده شود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. کد پژوهانه UOZ-GR-9719-30

منابع

آبروش، ع. ۱۳۸۹. بررسی اثر تاریخ کاشت بر عملکرد و اجزاء عملکرد

ارقام ماش در شرایط آب و هوایی دزفول. فیزیولـــوژی گیاهـــان زراعی.۲(۸):۲۸-۱۴.

رئیسی‌نژاد دوبنه، ر.، و یـزدان‌پنـاه، ن. ۱۳۹۸. تـأثیر سـطوح مختلـف آبیاری و شوری بر عملکرد خیـار گلخانـه‌ای. آبیـاری و زهکشـی ایران. ۵(۱۳):۱۴۸۰-۱۴۷۱.

فرامرزپور، ع.، دلشاد، م.، و پارسانژاد، م. ۱۳۹۱. بررسی رشد، عملکرد و کارآیی مصرف آب خیـار گلخانـه‌ای در شـرایط مختلـف رطوبـت خاک با استفاده از تانسیومتر. علوم باغی ایران. ۴۳(۳): ۲۹۲-۲۸۵.

محبتـی. ع.ا.، نجفـی‌مـود، م.ح.، شـهیدی، ع.، و خاشـعی‌سـیوکی، ع. ۱۳۹۷. اثر متقابل سطوح مختلف تنش خشکی و کاربرد زئولیت بر عملکرد خیار گلخانه‌ای. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۹(۲): ۶۵-۵۵.

مشـــایخی، ک.، و موســـوی‌زاده، س.ج. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات تعداد، سطح برگ و وزن خشک‌بوته‌ها در سه رقم خیار. علـوم باغبـانی. ۲۳(۱): ۶۸-۵۷.

مصلحی، ش.، نجفـی، پ.، طباطبـایی، س.ج. و نورمهنـاد، ن. ۱۳۹۰. تأثیر تنش رطوبتی بر شاخص‌هـای رشد و عملکرد خیار گلخانه-ای. آب و خاک. ۲۵(۴): ۷۷۵-۷۷۰.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome. Pp: 156.

Amer, K., Midan, S., and Hatfield, J. 2009. Effect of deficit irrigation and fertilization on cucumber. Agronomy Journal 101: 1564-1556

Douh, B., Mguidiche, A., Bhouri-Khila, S., Mansour, M., Harrabi, R., and Boujlben, A. 2013. Yield and water use efficiency of cucumber (*Cucumis sativus* L.) conducted under subsurface drip irrigation system in a Mediterranean climate. Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology 2(4): 46-51.

Gao, L.H., Qu, M., Ren, H. Z., Sui, X.L., Chen, Q.Y. and Zhang, Z.X. 2010. Structure, function, application, and ecological benefit of a single-slope, energy-efficient solar greenhouse in China. Horticultural Technology 20: 626-631.

Heuvelink, L., and Dorais, M. 2003. Crop growth and yield. CAB International Wallingford, Oxon United Kingdom.

Hovi-Pekkanen T., and Tahvonen R. 2008. Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber. Scientia Horticulturae 116(2):152-161.

Illangakoon, T.K., Bandara, D.C. and Fonseka, H. 2004. Evaluation of physioagronomic and chemical traits in relation to the productivity of eggplant (*Solanum melongena* L.). Tropical Agriculture Reserch 16: 14-24.

Mao, X., Liu, M., Wang, X., Liu, C., Hou, Z., and Shi, J. 2003. Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain. Agricultural Water Management 61: 219-228.

Marcelis, L.F.M., Baan, E., and Hofman-Eijer, L.R. 1995. Growth and maintenance respiratory costs of cucumber fruits as affected by temperature and ontogeny and size of the fruits. Physiologia Plantarum 93: 484-492.

Marcelis, L.F.M., Broekhuijsen, A.G.M., and Meinen, E. 2006. Quantification of the growth response to light quantity of greenhouse grown crops. Journal of Acta Horticulture 711: 97-104.

Mohammed, H.M., and Amer, K.A. 2001. The productivity of eggplant (*Solanum melongena* L.) as affected by cultivar and planting date grown in sandy soil. Egyptian Journal Horticulture 28: 185-195.

Paris, P., Matteo, G.D., Tarchi, M., Tosi, L., Spaccino, L., and Lauteri, M. 2018. Precision subsurface drip irrigation increases yield while sustaining water use efficiency in Mediterranean poplar bioenergy plantations. Forest Ecology and Management 409: 749–756.

Payero, J.O., Melvin, S.R., Irmak, S., and Tarkalson, D. 2009. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. Agriculture Water Management 84: 101–112.

Rouphael, Y., and Colla, G. 2005. Radiation and water use efficiencies of greenhouse zucchini squash in relation to different climate parameters. European Journal of Agronomy 23: 183-194.

Taiz, L., and Ziger, E. 1991. Plant Physiology. Benjamin Publication. p. 346-356.

Warman, P.R., and AngLopez, M.J. 2010. Vermicompost derived from different feedstocks as a plant growth medium. Bioresource Technology 101: 4479–4483.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1954-1963

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۶۳-۱۹۵۴

Effect of Cultivation Season and Water Stress on Cultivars of Greenhouse Cucumbers in Sistan Region

H. Piri*[1]

Recived: Sep.24, 2020 Accepted: Nov.21, 2020

Abstract

In order to investigate the effect of planting season and compare the performance of different cultivars of greenhouse cucumbers in water stress conditions, thise experiment was performed as a factorial in a completely randomized design with three replications in the Chahanimeh greenhouse complex located in Zahak city of Sistan and Baluchestan province. The treatments included three cultivars of greenhouse cucumbers in Sistan region (Sina, Baresh and Negin cultivars), three irrigation water levels (100%, 75% and 50% plant water requirements) and two planting seasons (first stage cultivation in the first week of October the second stage in the third week of February). Harvesting was done every four days. The weight and number of fruits, the diameter and length of the cucumber in each plot were carefully measured. For better comparison and analysis, mean time data of 1.5 months after the first harvest were used in both planting seasons. Also, performance and water productivity at the end of both seasons were calculated. The results showed that the effects of planting season, cultivar and irrigation water at the probability level of five and one percent had a significant effect on the measured parameters. The highest value of the measured parameters was obtained in the treatment of 100% of the plant's water requirement, which was not significantly different from the 75% treatment of the plant's water requirement. Yield and productivity of irrigation water in the first season of cultivation were 144.6 ton/ha and 20.4 kg/m^3, respectively, which is higher than the second season of cultivation (128.7 ton/ha and 17.3 kg/m^3). Different cultivars had different results in the first and second seasons of cultivation. In the first season of cultivation, Sina yield (158.2 ton/ha) was better than other cultivars. In the second season, Baresh cultivar yield (156.4 ton/ha) was better than Sina and Negin. Therefore, according to the obtained results, the amount of water consumption can be reduced by 75% and the saved water can be used in the second season of cultivation. Also, considering that Sina cultivar had better results in the first planting season and Baresh cultivar in the second season, these two cultivars should be used in each season.

Keywords: Baresh cultivar, Sina cultivar, Yield, Water productivity

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol
(*- Corresponding Author Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۷۲-۱۹۶۴

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1964-1972

مقاله پژوهشی

اثر کم‌آبیاری تنظیم‌شده و آبیاری بخشی ریشه (ثابت و متغیر) بر خصوصیات رشدی ریشه در ذرت علوفه‌ای

نادر نادری[۱]، رامین فضل‌اولی[۲*]، علی شاهنظری[۳] و سعید خاوری خراسانی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۱

چکیده

مدیریت آبیاری یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر توسعه و گسترش ریشه گیاه است. هدف این پژوهش بررسی تاثیر تیمارهای مختلف کم‌آبیاری در روش آبیاری قطره‌ای سطحی بر چگونگی رشد و توزیع ریشه گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود. این پژوهش در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان‌رضوی طی سال زراعی ۱۳۹۳ اجرا گردید. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۹ تیمار در ۴ تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل آبیاری کامل (FI)، کم‌آبیاری تنظیم شده (DI) با تأمین ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی، آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر (PRD) و تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و آبیاری ناقص ریشه به‌طور ثابت (FPRD) و تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی بود. نیاز آبی بر اساس جبران کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت زراعی به کمک رطوبت سنج الکترومغناطیس تعیین و بوسیله کنتورهای حجمی اندازه‌گیری و در مزرعه توزیع شد. اولین تنش در مرحله ۶ برگی ذرت اعمال شد. دو هفته بعد از اعمال اولین تنش، در مرحله ۱۰ برگی بوته‌ها نمونه‌بردای ریشه انجام شد. در هر بار نمونه‌برداری صفات وزن خشک، حجم و نفوذ جانبی و عمقی ریشه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در همه تیمارها با کاهش میزان آب مصرفی، میانگین مقدار کلیه صفات مورد اندازه‌گیری کاهش یافت. تغییرات وزن خشک ریشه نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین روش‌های FI، PRD100 و PRD80 وجود نداشت. همچنین حجم ریشه تحت تأثیر کم آبی قرار گرفت اما کاربرد روش PRD80 مانع از بروز اثرات منفی کم آبی بر حجم ریشه شد. بنابراین در مقایسه با روش‌های DI و FPRD هنگام اعمال تنش آبی روش PRD از کارائی بهتری برخوردار است و جذب آب و مواد غذائی توسط ریشه در سطح بیشتری صورت خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: آبیاری یک در میان، توسعه ریشه، ذرت، نیاز آبیاری

مقدمه

کم‌بودن منابع آب شیرین از یک طرف و افزایش جمعیت از طرف دیگر نیاز به استفاده موثرتر از آب برای افزایش تولید را اجتناب ناپذیر می‌سازد (Debaeke and Aboudrare, 2004). برای مقابله با بحران کم آبی، کم‌آبیاری[۵](DI) به عنوان روشی برای استفاده بهینه از منابع آب پیشنهاد شده‌است تا بازده مصرف آب را افزایش دهد (سپاسخواه و همکاران، ۱۳۸۵). آبیاری ناقص منطقه ریشه[۶](PRD) روش کم‌آبیاری اصلاح شده‌است که در آن نیمی از ناحیه ریشه گیاه به‌طور متناوب آبیاری می شود. در دهه اخیر پژوهشگران در سراسر دنیا به‌خصوص در نواحی خشک و نیمه‌خشک این روش را به‌عنوان یک راهبرد آبیاری روی محصولات زراعی و باغی ارزیابی کرده اند (Ahmadi et al., 2010؛Sepaskhah et al., 2010). ذرت (*Zea maize* L.) گیاهی است که در سطح جهانی از نظر میزان تولید در واحد سطح بعد از گندم در رتبه دوم و از نظر سطح زیرکشت بعد از گندم و برنج جایگاه سوم را به خود اختصاص داده‌است. از کل ذرت مصرفی در دنیا حدود ۷۰ درصد آن جهت تغذیه دام و طیور تولید می‌گردد (خاوری خراسانی و قاضیان تفریشی، ۱۳۹۲). نادری و

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شاهرود، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۴- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: raminfazl@yahoo.com)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.21.2

5- Deficit Irrigation
6- Partial Root Drying (PRD)

همکاران (۱۳۹۴) اثر روش‌های مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت را در مشهد مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کاربرد روش PRD متغیر و تامین ۸۰ درصد نیاز آبی ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب به میزان ۱۴ درصد باعث کاهش معنی‌دار عملکرد و اجزای عملکرد ذرت نشده‌است.

صدرا نسب و همکاران (۱۳۹۳) اثر دو روش کم‌آبیاری ناقص ریشه (PRD) و کم‌آبیاری تنظیم‌شده (RDI) را بر روند رشد ریشه ذرت در شهر ساری بررسی کردند. جرم، حجم و سطح ریشه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر صفات ریشه به ترتیب مربوط به تیمارهای PRD و RDI با تامین ۵۵ درصد نیاز آبی بود. همچنین وزن و حجم ریشه در تیمار کم‌آبیاری موضعی ریشه بیشتر از تیمار کم‌آبیاری تنظیم شده بود. اکبری نودهی (۱۳۹۳) گزارش نمود اعمال تنش آبی قبل از مرحله گل‌دهی سبب کاهش شدید عملکرد و بهره‌وری آب ذرت شد. قیصری و همکاران (۱۳۹۲) در اصفهان نتیجه گرفتند بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی، سطح برگ و وزن خشک ریشه ذرت در مرحله شیری شدن دانه رخ داد. قدمی فیروزآبادی و همکاران (۱۳۹۳) در مورد آفتابگردان در ساری نتیجه گرفتند که تیمار کم‌آبیاری ناقص ریشه با تامین ۷۵ درصد نیاز آبی (PRD75) با توسعه یک سیستم مناسب ریشه و برگ، امکان استفاده بهتر از رطوبت موجود در خاک و نور خورشید را باوجود اعمال تنش رطوبتی فراهم آورد. وانگ و همکاران اثر کم‌آبیاری موضعی ریشه را بر رشد ریشه و اندام‌های هوایی ذرت در چین بررسی کردند. نتایج آزمایش نشان داد که روش آبیاری تاثیری بر بیوماس اندام‌های هوایی نداشت اما بیوماس ریشه با اعمال روش PRD افزایش یافت(Wang et al., 2012). اسفندیاری و همکاران (۱۳۹۱) مورفولوژی ریشه ذرت را تحت کودآبیاری با روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در کرج ارزیابی نمودند. نوارهای تیپ در عمق ۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک قرار گرفتند. نتایج نشان داد عمق توسعه ریشه در روش آبیاری سطحی تا مرحله ۲۰ روزگی به‌طور معنی‌داری بیشتر از روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بود، بعد از مرحله ۳۰ تا ۸۰ روزگی تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد مشاهده نشد. بیشترین درصد تجمع ریشه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در لایه ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری خاک اتفاق افتاد، در حالی‌که در روش سطحی در لایه ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری خاک بود. مرور منابع نشان داد که تا به حال مطالعات محدودی به منظور بررسی اثرات کم‌آبیاری به دو شکل تنظیم‌شده و آبیاری بخشی ریشه انجام شده است از سوی دیگر در بسیاری از مطالعات گذشته یکی از دلایل احتمالی برتری کم‌آبیاری ناقص ریشه، افزایش رشد ریشه‌ها تشخیص داده شد که این موضوع هنوز جای بررسی مفصل‌تری داشته است. بنابراین در این پژوهش، تأثیر اعمال تیمارهای کم‌آبیاری تنظیم شده، کم‌آبیاری ناقص ریشه به طور متغیر و کم‌آبیاری ناقص ریشه به طور ثابت در سیستم آبیاری قطره‌ای بر ریشه ذرت، مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر روش‌های مختلف اعمال کم آبی بر خصوصیات ریشه ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴، پژوهشی در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی طی سال زراعی ۱۳۹۳ اجرا گردید. با توجه به اینکه دو فاکتور شامل روش کم‌آبیاری و درصد آب آبیاری هر یک در سه سطح بررسی شد بنابراین آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در ۴ تکرار انجام شد. تیمارهای مورد بررسی عبارت بودند از تیمار آبیاری کامل (FI)، کم‌آبیاری تنظیم شده با تأمین ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی (DI)، آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر (PRD) و تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و آبیاری ناقص ریشه به‌طور ثابت (FPRD) و تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی. خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه تا عمق ۸۰ سانتی‌متر، پیش از شروع آزمایش تعیین گردید (جدول۱). خصوصیات کیفی آب مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. برای تهویه بهتر منطقه ریشه، بذرها روی پشته کاشته شد و فاصله خطوط کشت۵۰ سانتی متر (طبق عرف منطقه برای ذرت علوفه‌ای)، فاصله بوته‌ها روی ردیف کشت ۲۰ سانتی‌متر و طول خط کشت در هر تیمار به‌طور ثابت ۱۰ متر و تراکم نهایی مزرعه ۱۰ بوته در متر مربع بود (خاوری خراسانی و قاضیان تفریشی، ۱۳۹۲). آبیاری به روش قطره‌ای اجرا گردید. برای اعمال کم‌آبیاری تنظیم شده، یک نوار قطره‌ای تیپ برای هر ردیف کاشت در نظر گرفته شد. در تیمار آبیاری ناقص ریشه به‌طور ثابت، یک نوار قطره‌ای برای دو ردیف داخل جویچه در نظر گرفته شد. در این تیمار فاصله نوارهای تیپ از یکدیگر یک متر بود و گیاه همیشه ازیک سمت آبیاری گردید. در تیمار آبیاری ناقص ریشه به‌طور متغیر پس از هر نوبت آبیاری با استفاده از شیرهای ورودی لترال‌ها محل آبیاری از سمت مرطوب به سمت خشک تغییر یافت. در این تیمار فاصله نوارهای تیپ از یکدیگر نیم متر بود. آبیاری برای همه تیمارها با دور ثابت سه روز انجام شد. در روش آبیاری PRD، بعد از انجام دو بار آبیاری در یک سمت ریشه در دور آبیاری بعدی، تغییر شیفت آبیاری به سمت دیگر ریشه صورت می‌گرفت. بر اساس آزمون خاک مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفات آمونیوم و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم در هنگام کاشت به زمین داده شد. همچنین مقدار ۴۰۰ کیلوگرم کود اوره در سه نوبت (۱۰۰ کیلوگرم در ابتدای فصل رشد، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در مرحله ۸-۷ برگی و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار قبل از گلدهی) با استفاده از تانک کود داخل سیستم تزریق شد. عملیات وجین طی دو مرحله در مراحل ۴ و ۱۱ برگی با دست انجام شد. برای محاسبه نیاز آبی از تغییرات رطوبت درمنطقه توسعه ریشه استفاده شد. بدین منظور

میـزان رطوبـت خـاک در اعمـاق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰ و ۸۰-۶۰ سانتیمتر در منطقه توسعه ریشه (بین دو ردیـف لولـه فرعـی) توسـط رطوبـت‌سـنج الکترومغنـاطیس (TDR TRASE System 1) در دو تکرار اندازه‌گیری شد. حسگرهای رطوبت سنج در یک شـبکه ۱۰×۱۰ سانتی‌متری تا عمق ۸۰ سانتی‌متری در اطراف گیـاه کارگـذاری شـده بودند و گیاه در مرکز آنها قرار گرفته بود. نیـاز آبـی در تیمـار آبیـاری کامل از رابطه زیر تعیین گردید:

$$I_n = \sum_{i=1}^{m}((\theta_{FCi} - \theta_{BLi}) \times Di) \quad (۱)$$

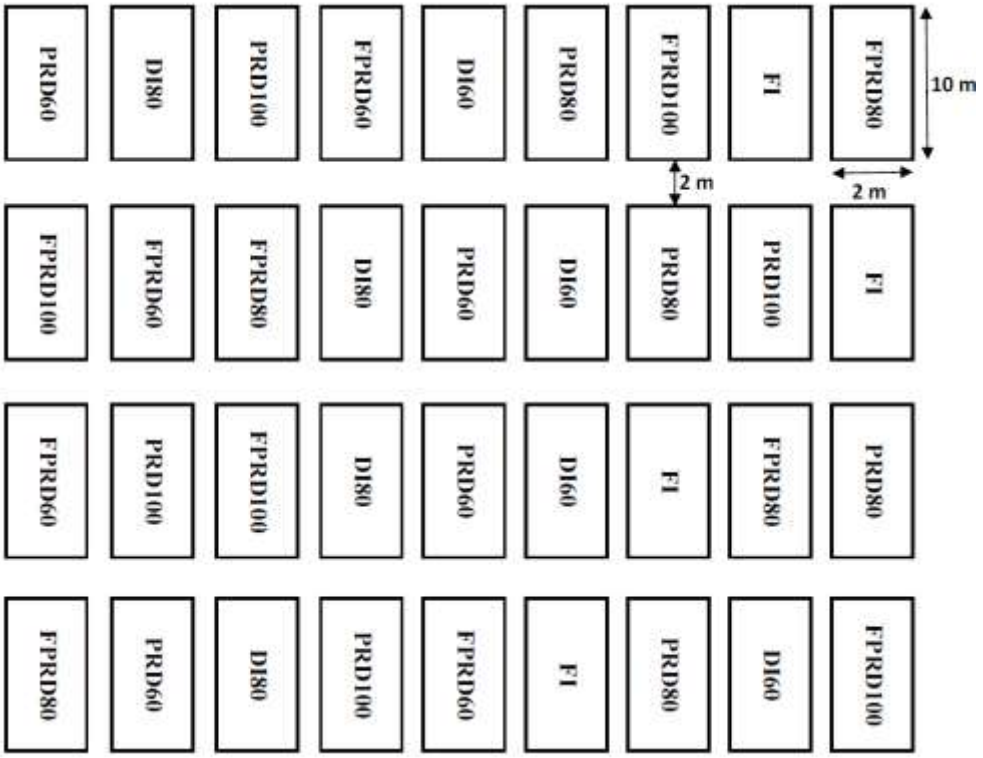
جدول ۱- خصوصیات خاک محل آزمایش

عمق (cm)	بافت	رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (٪)	رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی دائم (٪)	چگالی ظاهری (g/cm^3)
۰-۲۰	سیلتی لوم	۲۷/۹۰	۱۲/۲۰	۱/۴۱
۲۰-۴۰	سیلتی لوم	۲۹/۶۰	۱۲/۷۰	۱/۵۱
۴۰-۶۰	سیلتی لوم	۲۶/۶۰	۱۳/۳۰	۱/۴۵
۶۰-۸۰	سیلتی لوم	۲۶/۵۰	۱۲/۸۰	۱/۴۲

جدول ۲- نتایج آزمایش کیفیت آب آبیاری

EC(ds/m)	pH	کاتیون‌های محلول (meq/lit)				آنیون‌های محلول (meq/lit)		SAR
		Na	Mg	Ca	SO_4	CO_3+HCO_3		
۰/۸	۷/۸	۳	۲/۴	۲/۴	۱/۸	۲/۳۵		۱/۹۳

در این رابطه: In: نیاز آبیاری خالص(mm)، θ_{FCi}: میزان رطوبت ظرفیت زراعی برای هر لایه، θ_{BLi} : میزان رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری برای هر لایه، Di: عمق هر لایه ازخـاک(mm) و i شـماره هر لایه خاک. در ابتدای هر لوله نیمه‌اصلی یک کنتور قرار داده شد و با قرائت آنها قبل و بعد از آبیاری، حجم آب ورودی کنترل شد.



شکل ۱- نقشه اجرایی طرح در مزرعه

برای اندازه‌گیری خصوصیات ریشه ۲ هفته بعد از اعمال تیمارها نمونه‌برداری صورت گرفت سپس هر دو هفته یک بار نمونه‌برداری تکرار گردید. برای نمونه‌برداری از روش حفاری استفاده شد. برای آن‌که سیستم ریشه گیاه را نمایان سازیم خاک اطراف گیاه خارج شد به این صورت که با ایجاد ترانشه‌ای در اطراف ریشه گیاه، خاک اطراف ریشه‌ها خارج شد تا ریشه‌ها ظاهر گردند پس از آن‌که ریشه مربوط به هر کدام از تیمارهای آزمایش از خاک جدا و وزن تر آن اندازه‌گیری شد. برای تعیین حجم ریشه‌ها از جابجایی حجم آب در ظرف مدرج پس از وارد کردن ریشه‌های شسته شده استفاده شد (قانون ارشمیدس). سپس نمونه‌ها جهت اندازه‌گیری وزن خشک به مدت ۴۸ ساعت به آون منتقل شدند. از تقسیم وزن خشک ریشه به وزن خشک اندام هوایی نسبت ریشه به اندام هوایی بدست آمد (علیزاده، ۱۳۸۴).

نتایج و بحث

بررسی اثرات ساده تیمارها نشان داد که با افزایش میزان آب آبیاری تا سطح ۱۰۰ درصد وزن و حجم ریشه افزایش یافتند. به طوری که بیشترین مقدار این پارامترها در تیمار تامین ۱۰۰ درصد نیاز آبی مشاهده گردید در حالی که نسبت ریشه به اندام هوایی روند کاهشی داشت. همچنین در بین روش‌های مورد بررسی بیشترین مقدار صفات مورد بررسی در روش PRD وجود داشت. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول‌های ۳ و ۴) نشان داد برهمکنش روش آبیاری و سطح آبیاری بر وزن و حجم ریشه و نسبت ریشه به اندام هوایی و عملکرد در سطح ۵ درصد معنی‌دار گردید. بیشترین مقدار صفات مورد اندازه‌گیری مربوط به تیمار PRD و تامین ۱۰۰ درصد نیاز آبی بود، اگرچه بین این تیمار و روش FI تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد و در یک گروه آماری قرار گرفتند. همچنین بین روش‌های مورد استفاده در این آزمایش کمترین میزان صفات با اعمال روش FPRD در سطح آبیاری ۶۰٪ مشاهده گردید (جدول‌های ۵ و ۶). بررسی نتایج نشان داد که در شرایط کم آبی مقادیر اندازه‌گیری شده تمام صفات اندازه‌گیری شده ریشه در تیمار PRD نسبت به تیمارهای DI و FPRD بیشتر بود.

این نتیجه نشان می‌دهد که اگرچه در هر سه روش کم‌آبیاری گیاه با تنش مواجه می‌شود ولی احتمالاً نحوه تأثیرگذاری بر روند گسترش و توزیع ریشه متفاوت است. کم آبیاری در روش آبیاری متناوب به علت تر و خشک نمودن محدوده ریشه به صورت متناوب و آبیاری مجدد قسمت‌هایی از ریشه گیاه که در نوبت قبل خشک بوده‌اند، زمینه را برای برخی تغییرات فیزیولوژیکی فراهم آورده و می‌تواند باعث افزایش جذب آب و مواد غذایی گردد Kang and (Kang et al., 2000؛Zhang, 2004). مقادیر اندازه‌گیری شده وزن و حجم ریشه‌ها در تیمارهای مختلف در این پژوهش نیز موید این مطلب است (جدول‌های ۶ و ۷). از طرفی، کم‌آبیاری در روش آبیاری یک در میان ثابت به علت اینکه یک طرف ریشه تا انتهای دوره خشک است باعث می‌شود که روند رشد و گسترش ریشه گیاه در مواجهه با این ناحیه خشک متوقف شده و پس از مدتی ریشه‌ها شادابی خود را از دست داده و با از بین رفتن قسمت‌های پوسته ریشه عملاً ریشه‌ها کارایی خود را از دست بدهند و کمترین مقدار وزن و حجم ریشه‌ها در این پژوهش مربوط به روش FPRD بود. نتایج مشابه این پژوهش در مطالعات لیانگ و همکاران و سپاسخواه و احمدی نیز گزارش شده است Sepaskhah and Ahmadi, (Liang et al., 2008؛2010).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس وزن ریشه، حجم ریشه و نسبت ریشه به اندام هوایی

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات									
		وزن ریشه (gr)				حجم ریشه (cm^3)				عملکردعلوفه تر (t/ha)	نسبت ریشه به ساقه
		مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ٤	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ٤		
تکرار	۳	۲۲/۶۹*	۱۰/۱۶ns	۲۰/۴۳ns	۲۴/۳۳ns	۱۴۳/۱۳*	۶۷/۲۶*	۱۳۲/۸۴ns	۱۳۲/۸۲ns	۵۹/۴۷ ns	۰/۰۰۰۴۱۶ ns
روش آبیاری	۲	۵/۸۹ns	۴۰/۱۴**	۱۱۲/۹۴**	۱۷۹/۲۵**	۵۲/۶۴ns	۲۸۳/۸۵**	۷۷۲/۳۲**	۱۰۴۲/۸۶**	۴۱۹/۶۸**	۰/۰۰۶۰۶۵**
سطح آبیاری	۲	۱۴/۰۸ns	۸۳/۶۰**	۶۳۱/۱۲**	۷۰۰/۳۹**ns	۱۱۲/۰۰۸۵۳/۵۷**	۴۳۵۸/۲۷**	۵۳۵۵/۸۷**		۱۳۱۳/۶۸**	۰/۰۱۴۳۰۷**
سطح آبیاری × روش آبیاری	۴	۰/۸۸*	۳/۷۷*	۱۲/۸۳*	۲۰/۲۶*	۵/۷۴*	۲۸/۵۱*	۱۰۳/۲۴*	۱۲۳/۲۴*	۱۷/۳۹*	۰/۰۰۰۵۲۲*
خطا	۲۴	۳/۷۲	۴/۰۳	۸/۱۰	۱۰/۱۸	۲۳/۴۸	۲۶/۸۰	۵۲/۵۸	۵۲/۵۸	۲۳/۵۴	۰/۰۰۰۳۸۲
ضریب تغییرات		۹/۲۳	۷/۳۳	۷/۴۶	۷/۸۵	۹/۱۹	۷/۴۲	۸/۰۹	۷/۳۴	۸/۹۶	۹/۶۱

ns، * و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد است.

مقدار آب مصرفی

عمق آب مصرفی در تیمارهای مختلف و درصد آب صرفه‌جویی شده در کل فصل رشد و دوره اعمال تیمار در جدول ۴ ارایه شده است. در تیمارهایی که قرار بود ۱۰۰ درصد نیاز آبیاری گیاه تامین شود، حجم آب آبیاری براساس رساندن رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی انجام می‌شد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، با اعمال تیمارهای تأمین ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی در کل فصل رشد به ترتیب ۱۴/۲ و ۲۸/۴ درصد در میزان آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل صرفه‌جویی شد.

جدول ٤- عمق آب مصرفی در تیمارهای مختلف و درصد آب صرفه‌جویی شده

تیمار	عمق آب مصرفی در کل فصل رشد (mm)	میزان کاهش مصرف آب (%)
FI, PRD100, FPRD100	۸۳۲/۰	-----
DI80, PRD80, FPRD80	۷۱۳/۹	۱۴/۲
DI60, PRD60, FPRD60	۵۹۵/۷	۲۸/۴

عملکرد علوفه

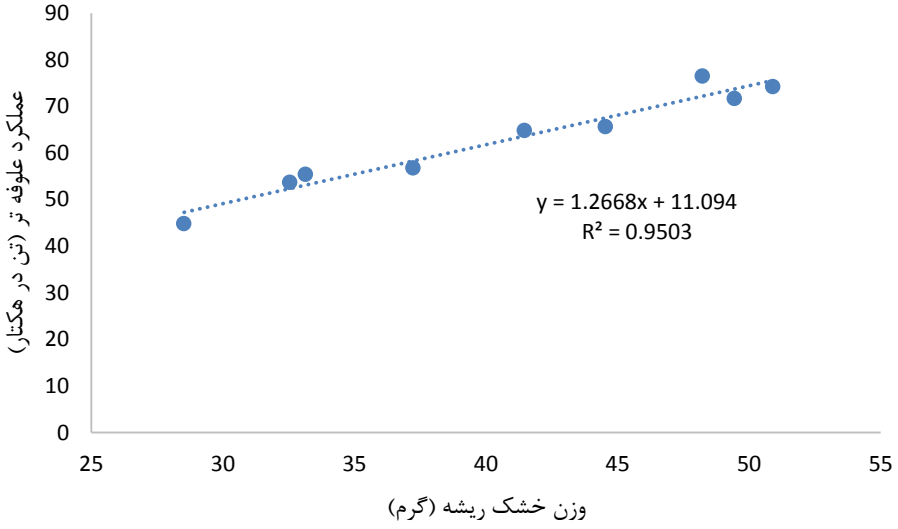
در جدول ۵ نتایج مقایسه میانگین برهمکنش روش و سطح آبیاری بر عملکرد علوفه تر ارایه شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین عملکرد علوفه تر با میانگین ۷۶/۵ تن در هکتار مربوط به تیمار آبیاری کامل بود که با تیمار کم آبیاری ناقص متغیر با ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی اختلاف معنی داری نداشت. کمترین میزان علوفه تر مربوط به تیمار FPRD60 بود که با نتایج اکبری نودهی (۱۳۹۳) مطابقت دارد. میزان عملکرد برای تیمار FPRD60 به‌ترتیب برابر ۴۴/۸ تن در هکتار بود. عملکرد علوفه تر در تیمار PRD80 به‌ترتیب برابر ۷۱/۷ تن در هکتار بود که تفاوت معنی‌داری با تیمار آبیاری کامل نداشت.

رابطه عملکرد علوفه تر با پارامترهای ریشه خطی بود که در شکل ۲ این رابطه برای وزن خشک ریشه و عملکرد علوفه تر ارائه شده است. ارتباط گیاه با آب و مواد غذایی از طریق ریشه صورت می‌گیرد. رشد بهتر سیستم ریشه، گسترش و افزایش وزن آن باعث جذب بیشتر آب و مواد غذایی و در نتیجه افزایش عملکرد گیاه می‌شود، این نتایج توسط خلیلی راد و همکاران (۱۳۸۹) نیز گزارش شده است.

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش روش و سطح آبیاری بر عملکرد علوفه تر (t/ha)

روش آبیاری	سطح آبیاری		
	۱۰۰	۸۰	٦٠
DI	۷۶/۵^{a}	۶۴/۸^{ab}	۵۳/۷^{c}
PRD	۷۴/۲^{a}	۷۱/۷^{ab}	۵۵/۴^{c}
FPRD	۶۵/۶^{b}	۵۶/۸^{c}	۴۴/۸^{d}

میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک در هر سال هستند فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشند.



شکل ۲- رابطه بین وزن خشک ریشه و عملکرد تر

وزن ریشه

روند تغییرات وزن خشک ریشه نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین روش‌های آبیاری کامل و PRD در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و دور آبیاری سه روزه وجود نداشت و به‌طور کلی با افزایش سن گیاه وزن خشک ریشه افزایش یافت (جدول ۶). بیشترین وزن خشک ریشه با میانگین ۵۰/۹۰ گرم مربوط به تیمار PRD در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد و نمونه گیری چهارم بود. کمترین وزن خشک ریشه نیز با میانگین ۱۸/۴۱ گرم در تیمار FPRD و سطح آبیاری ۶۰ درصد در نمونه‌گیری اول تولید شد (جدول ۶). در روش کم‌آبیاری ناقص ریشه تناوب خشک و تر شدن دو طرف ریشه سبب ترشح بیشتر ابسزیک اسید از بخش خشک ریشه و تغییر وضعیت آب در گیاه می‌شود و این کار به‌صورت سیگنال هیدرولیکی عمل کرده، و باعث ایجاد تعادل و تداوم رشد ریشه در شرایط خشک می‌شود (جنسن و همکاران، ۲۰۱۰).

جدول ٦- مقایسه میانگین برهمکنش سطح آبیاری و روش اعمال کم آبیاری بر وزن ریشه (gr)

روش آبیاری	سطح آبیاری	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم
	۱۰۰	۲۱/۳۰^{a}	۲۹/۷۸^{a}	۴۴/۲۴^{ab}	۴۸/۲۲^{a}
DI	۸۰	۲۱/۰۳^{b}	۲۶/۶۶^{bc}	۳۹/۱۸^{cd}	۴۱/۴۶^{ab}
	۶۰	۲۰/۴۱^{bc}	۲۵/۵۹^{de}	۳۱/۳۱^{ef}	۳۲/۵۴^{ab}
	۱۰۰	۲۲/۴۵^{a}	۳۱/۴۲^{a}	۴۶/۵۷^{a}	۵۰/۹۰^{a}
PRD	۸۰	۲۲/۱۴^{a}	۳۰/۴۹^{a}	۴۵/۲۴^{a}	۴۹/۴۴^{ab}
	۶۰	۲۰/۴۹^{bc}	۲۵/۷۰^{de}	۳۱/۶۸^{ef}	۳۳/۱۴^{ab}
	۱۰۰	۲۱/۲۰^{ab}	۲۸/۳۰^{ab}	۴۲/۱۴^{bc}	۴۴/۵۴^{ab}
FPRD	۸۰	۲۰/۶۶^{b}	۲۵/۸۸^{cd}	۳۵/۴۷^{de}	۳۷/۲۳^{ab}
	۶۰	۱۸/۴۱^{c}	۲۲/۴۶^{e}	۲۷/۴۸^{f}	۲۸/۵۲^{b}

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشند

وانگ و همکاران (۲۰۱۲) نیز اعلام کردند که روش PRD سبب افزایش بیوماس ریشه ذرت در شرایط خشکی می شود (Wang et al., 2012؛Jensen et al., 2010).

حجم ریشه

حجم ریشه تحت تأثیر کم آبی قرار گرفت اما کاربرد روش PRD و ایجاد تنش در سطح ۲۰٪ مانع از بروز اثرات منفی کم آبی بر حجم ریشه شد (جدول ۷). کاهش حجم ریشه در مواجهه با شرایط کم آبی توسط گنجعلی و همکاران (۱۳۸۹) گزارش شده‌است. گزارش شده که گرادیان هیدرولیکی خاک-ریشه در روش آبیاری PRD بیشتر از روش DI است (Liu et al., 2006). کمترین حجم ریشه با میانگین ۴۶/۱۷ سانتی‌متر مکعب توسط تیمار FPRD در سطح تامین ۶۰٪ نیاز آبی و در اولین نمونه برداری تولید شد و در گروه آماری b قرار گرفت. در طول فصل رشد حجم ریشه در همه تیمارها افزایش یافت اما در اثر مواجهه با کم آبی از افزایش حجم ریشه کاسته شد (جدول ۷). با رسیدن به پایان فصل تفاوت بین تیمارهای مختلف مشهود گردید به‌طوری‌که در نمونه‌برداری چهارم بیشترین حجم ریشه با مقادیر ۱۱۷/۶۰، ۱۲۰/۰۴ و ۱۲۴/۰۰ سانتی‌متر مربع به‌ترتیب در تیمارهای FI و PRD در سطوح ۸۰ و ۱۰۰ درصد مشاهده شد (جدول ۷). در میان پارامترهای ریشه، حجم ریشه نسبت به تیمارهای مختلف کم‌آبیاری تأثیر بیشتری پذیرفته بود و اثر تنش آبی بر روی آن بیشتر از سایر پارامترهای ریشه بود. تناوب خشک و تر شدن محیط ریشه در حفظ روند تولید اسید آبسزیک (ABA) توسط ریشه موثر است. چرا که ریشه‌ها برای مدت طولانی توانایی تولید ABA را حفظ نمی‌کنند (Loveys et al., 2000).

نسبت ریشه به اندام هوایی

مشاهدات نشان داد برهمکنش روش آبیاری و سطح آبیاری بر نسبت ریشه به اندام هوایی در سطح ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۳). در جدول ۸ نتایج مقایسه میانگین برهمکنش روش و سطح آبیاری بر نسبت ریشه به اندام هوایی ارایه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشترین مقدار نسبت ریشه به اندام هوایی به‌میزان ۰/۱۷۵ مربوط به تیمار PRD80 بود که با تیمار PRD60 اختلاف معنی‌داری نداشت اما با سایر تیمارها اختلافشان معنی‌دار بود. کمترین نسبت ریشه به اندام هوایی مربوط به تیمار FI بود که با نتایج پنگ و همکاران در یک راستا است (Peng et al., 2010).

جدول ۷- مقایسه میانگین برهمکنش سطح آبیاری و روش اعمال کم آبیاری بر حجم ریشه (cm^3)

روش آبیاری	سطح آبیاری	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم
DI	۱۰۰	۵۷/۴۶^{a}	۷۶/۸۱^{a}	۱۰۵/۷۳^{a}	۱۱۷/۶۰^{ab}
	۸۰	۵۲/۶۹^{ab}	۶۸/۳۵^{bc}	۹۱/۶۵^{bc}	۱۰۰/۲۶^{cd}
	۶۰	۵۱/۰۷^{ab}	۶۴/۰۱^{cd}	۷۱/۶۴^{de}	۷۸/۰۸^{f}
PRD	۱۰۰	۵۶/۳۵^{a}	۸۱/۱۴^{a}	۱۱۲/۱۳^{a}	۱۲۴/۰۰^{a}
	۸۰	۵۴/۶۵^{a}	۷۸/۶۰^{a}	۱۰۸/۱۸^{a}	۱۲۰/۰۴^{ab}
	۶۰	۵۱/۲۷^{ab}	۶۴/۱۷^{cd}	۷۲/۴۲^{de}	۸۰/۵۲^{ef}
FPRD	۱۰۰	۵۲/۹۵^{ab}	۷۲/۹۹^{ab}	۱۰۰/۷۱^{ab}	۱۱۰/۱۰^{bc}
	۸۰	۵۱/۷۹^{ab}	۶۴/۶۴^{cd}	۸۱/۶۰^{cd}	۸۹/۹۰^{de}
	۶۰	۴۶/۱۷^{b}	۵۷/۰۹^{d}	۶۲/۲۸^{e}	۶۸/۶۳^{f}

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک هستند فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشند.

افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی تحت شرایط تنش خشکی یک از راه‌های مقاومت به تنش خشکی است. در شرایط کمبود آب رشد برگ و ساقه نسبت به رشد ریشه بیشتر کاهش می‌یابد و به این وسیله گیاه سطح تبخیر را به حداقل ممکن می‌رساند. علاوه بر این کاهش توسعه برگ و ساقه میزان مصرف کربن و انرژی را در اندام-های هوایی کاهش می‌دهد و سهم بیشتری از مواد فتوسنتزی گیاه به رشد ریشه اختصاص می‌یابد و در نتیجه نسبت وزن ریشه به اندام هوایی افزایش می‌یابد (Michele et al., 2009). علاوه بر اینها در روش PRD تناوب خشک و تر نمودن منطقه ریشه باعث افزایش رشد ریشه و در نتیجه افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی در مقایسه با روش DI گردید.

جدول ۸- برهمکنش روش و سطح آبیاری نسبت ریشه به اندام هوایی

روش آبیاری	سطح آبیاری ۱۰۰	سطح آبیاری ۸۰	سطح آبیاری ۶۰
DI	۰/۰۸^{f}	۰/۱۴^{cd}	۰/۱۳^{d}
PRD	۰/۱۲^{de}	۰/۱۸^{a}	۰/۱۶^{ab}
FPRD	۰/۱۰^{e}	۰/۱۵^{b}	۰/۱۴^{c}

میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک در هر سال هستند فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ می‌باشند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ۹ تیمار شامل آبیاری کامل کم‌آبیاری تنظیم شده (DI) با تأمین ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی، آبیاری ناقص ریشه به طور متغیر (PRD) و تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی و آبیاری ناقص ریشه به طور ثابت (FPRD) و تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که اعمال تنش خشکی بر ویژگی‌های ریشه گیاه ذرت شامل طول، سطح، حجم، وزن تر و خشک از نظر آماری در سطح پنج درصد اثر معنی‌داری داشته و با اعمال تنش خشکی صفات مذکور در هر سه روش کم‌آبیاری کاهش می‌یابد؛ اما کاربرد روش PRD80 مانع از بروز اثرات منفی کم آبی بر حجم و سطح ریشه شد. رابطه عملکرد علوفه تر با پارامترهای ریشه خطی بود که این امر نشان می‌دهد پارامترهای ریشه در افزایش عملکرد اهمیت ویژه‌ای دارند. لذا برای شرایط مشابه در مقایسه با روش‌های DI و FPRD هنگام اعمال تنش آبی روش PRD از کارایی بهتری برخوردار است و با وجود اعمال شرایط کم‌آبیاری و تنش، ریشه گیاه از توسعه مناسب و خوبی برخوردار است. به بیان دیگر استفاده از این روش کم‌آبیاری و اعمال تنش ملایم تا حد ۲۰ درصد قابل توصیه است. تشدید بیشتر تنش خشکی باعث کاهش شدید صفات ریشه خواهد شد. بنابراین در راستای استفاده بهینه از منابع آب، کاربرد ۸۰ درصد آب آبیاری با روش PRD می‌تواند به عنوان راهکاری مناسب در شرایط بحران آب به کار رود.

منابع

اسفندیاری، ص.، دهقانی سانیج، ح.، علیزاده، ا. و داوری، ک. ۱۳۹۱. ارزیابی مرفولوژی ریشه ذرت تحت کودآبیاری با روش‌های قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶(۵): ۱۰۷۴-۱۰۶۴.

اکبری نودهی، د. ۱۳۹۳. تأثیر روش‌های آبیاری جویچه‌ای و کم‌آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت علوفه‌ای در مازندران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۷۰، ۲۵۴-۲۴۵.

خاوری خراسانی، س. و قاضیان تفریشی، ش. ۱۳۹۲. ذرت، به نژادی،

به زراعی و فرآوری. انتشارات سراوا. تهران.

سپاسخواه، ع.ر.، توکلی، ع.ر. و موسوی، س.ف. ۱۳۸۵. اصول و کاربرد کم‌آبیاری. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی. نشریه شماره ۱۰۰.

صدرا نسب، ز.، شاهنظری، ع.، ضیاتبار احمدی، م.خ. و کاراندیش، ف، ۱۳۹۳. بررسی روند رشد ریشه گیاه ذرت در دو روش کم آبیاری، نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۲): ۴۱۸-۴۰۹.

علیزاده، ا. ۱۳۸۴. رابطه آب و خاک و گیاه. چاپ چهارم. انتشارات دانشگاه امام رضا(ع).

قدمی فیروزآبادی، ع.، رائینی، م.، شاه‌نظری، ع. و زارع ابیانه، ح. ۱۳۹۳. تغییرات شاخص کلروفیل، شاخص سطح برگ و پارامترهای ریشه آفتابگردان در کم‌آبیاری تنظیم شده و کم‌آبیاری ناقص ریشه. نشریه فناوری تولیدات گیاهی. ۱۴ (۱): ۷۹-۶۹.

قیصری، م.، مجیدی، م.م.، زارعیان، م. ج.، میرلطیفی، م.، دوکوهکی، ح. و امیری، س. ۱۳۹۲. بررسی اثر تنش رطوبتی بر اندام هوایی و وزن ریشه ذرت علوفه‌ای در مراحل مختلف رشد. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۴(۴): ۳۴۶-۳۳۹.

گنجعلی، ع.، کافی، م.، و ثابت تیموری، م. ۱۳۸۹. تغییرات شاخص های فیزیولوژیکی ریشه و اندام هوایی نخود در واکنش به تنش خشکی. مجله تنش های محیطی در علوم زراعی، ۳(۱): ۴۵-۳۵.

نادری ،ن.، فضل اولی، ر.، ضیا تبار احمدی، م.خ.، شاهنظری، ع. و خاوری خراسانی، س. ۱۳۹۴. بررسی روش‌های مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت علوفه‌ای. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۹ (۳): ۵۳۰-۵۲۲.

Ahmadi, S.H., Andersen, M.N., Plauborg, F., Poulsen, RT., Jensen, CR., Sepaskhah, AR., and Hansen, S. 2010. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: yield and water productivity. Agriculture Water Management 97(11): 1923-1930.

Debaeke, P., and Aboudrare, A. 2004. Adaptation of crop management to water-limited environment. European Journal of Agronomy 21: 433-446.

Jensen, C.R., Battilani, A., Plauborg, F., Psarras, G., Chartzoulakis, K., Jovanovic, Z.G., and Andersen, M.N. 2010. Deficit irrigation based on drought tolerance and root signaling in potatoes and tomatoes. Agricultural Water Management 98: 403-413.

Kang, S., and Zhang, J. 2004. Controlled alternate partial root- Zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. 55(407):2437-2446.

Kang, S.Z. Shi, P., Pan, Y.H., Liang, Z.S., Hu, X.T., and Zhang, J. 2000b. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. Irrigation Science 19: 181-190.

Liang, Z., Kang, S., and Shi, P. 2008. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit. Scientia Agricultura Sinica 33(6): 26-33.

Liu, F., Shahnazari, A., Andersen, M.N., Jacobsen, S.E., and Jensen, C.R. 2006. Physiological responses of potato (*Solanum tubersum* L.) to partial root-zone drying: ABA signaling, leaf gas exchange, and water use efficiency. Journal of Experimental Botany 57: 3727-3735.

Loveys, B.R., Stoll, M., Dry, P.R., and McCarthy, M.G. 2000. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticulture crops. Acta Horticulture 537: 187-197.

Michele, A., Douglas, T., and Frank, A. 2009. The effects of clipping and soil moisture on leaf and root morphology and root respiration in two temperate and tow tropical grasses. Plant Ecology 200: 205-215.

Peng, Y., Niu, J., Peng, Z., Zhang, F., and Li, C. 2010. Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil. Field Crops Research. 115: 85-93.

Sepaskhah, A.R., and Ahmadi, S.H. 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. International Journal of Plant Production 4(4): 241-258.

Wang, Z., Liu, F., Kang, S., and Jensen, Ch.R. 2012. Alternate partial root-zone drying irrigation improves nitrogen in maize (*Zea mays* L.) leaves. Environmental and Exprimental Botany 75: 36-40.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1964-1972

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۷۲-۱۹۶۴

Effect of Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying (Fixed and Variable) on Root Growth Characteristics of Forage Maize

N. Naderi[1], R. Fazloula[2*], A. Shahnazari[3] and S. Khavari Khorasani[4]
Recived: Sep.21, 2020 Accepted: Nov.01, 2020

Abstract

Irrigation management is one of the most important factors affecting the development and expansion of the plant root. The aim of this study was to investigate the effect of different deficit irrigation treatments on the root characteristics of fodder maize (KSC 704) in surface drip irrigation system. This research was conducted in agricultural research center of Khorasan Razavi during the 2014 growing season. A factorial experiment based on randomized complete blocks design with nine treatments and four replications was carried out. Treatments included full irrigation (FI), deficit irrigation (DI) and replacements of 80 and 60% of total water requirement, partial root zone drying (PRD) at 100, 80 and 60% of water requirement and fixed partial root zone drying (FPRD) at 100, 80 and 60% of water requirement. Water requirement was determined based on compensation of soil moisture deficit using an electromagnetic moisture meter. Water was measured by volume meters and distributed in the field. The first stress was applied at the 6-leaf stage of maize. Two weeks after applying the first deficit irrigation treatment in the 10-leaf stage of the plants, the first root sampling performed. Dry weight and volume, lateral and deep penetration of roots were measured at each sampling. The results showed that in all treatments the average amount of all measured traits decreased with decreasing water consumption. There was no significant difference among root dry weight of FI, PRD100 and PRD80 treatments. Root volume was affected by water stress but application of PRD80 method prevented the negative effects of water stress on root volume. Therefore, PRD method is more efficient compared to DI and FPRD methods when applied water stress, and water and nutrients will be absorbed at a higher level by root.

Keywords: Alternative irrigation, Root development, Maize, Irrigation requirement

1- Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering Research, Semnan (Shahrood) Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahrood, Iran
2- Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3- Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
4- Assistant Professor, Department of Crop and Horticulture Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: raminfazl@yahoo.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۸۳-۱۹۷۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1973-1983

مقاله پژوهشی

ریزمقیاس نمایی تصاویر بازیابی مایکروویو غیرفعال رطوبت خاک در ابعاد مزرعه

محمد فشائی[۱]- سیدحسین ثنائی نژاد[۲]*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱

چکیده

رطوبت خاک از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات منابع آب و کشاورزی برخوردار است. طیف الکترومغناطیس مایکروویو، محدودیت‌های فیزیکی سایر امواج رادیومتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک را ندارد، اما غالبا دارای ابعاد پیکسل بسیار بزرگ (بیش از ۱۰ کیلومتر) هستند. در این پژوهش به منظور کاربرد داده‌های رطوبت خاکی دورسنجی در مقیاس مزرعه، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری میدانی رطوبت خاک در محدوده دشت نیشابور طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸، واسنجی داده‌های بازیابی سنجنده AMSR2 انجام شد. نتایج نشان داد که تغییرات ارتفاعی و پوشش گیاهی از جمله عوامل کلیدی تاثیرگذار بر دقت واسنجی به شمار می‌آیند. مبتنی بر نظریه اینرسی حرارتی و با کمک تصاویر سنجنده مودیس، اندرکنش‌های میانگین روزانه رطوبت خاک و اختلاف دمای روزانه سطح زمین در دو سنجنده MODIS و AMSR2 بررسی شد و با استفاده از آن روابط خطی ریزمقیاس نمایی تصاویر رطوبت خاک برای تبدیل ابعاد تصویر از ۲۵ کیلومتر به ۱۰۰۰ متر به دست آمد. بررسی شاخص‌های آماری R^2 با کمینه ۰/۷۳ و بیشینه ۰/۸۴، MAE و RMSE با دامنه تغییرات ۱/۶ تا ۴، نشان داد که الگوریتم استفاده شده در ریزمقیاس نمایی به خوبی قادر به بازتاب اندرکنش‌های بین بارش، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و تغییرات پروفیل دمایی کانوپی بوده و این ویژگی کاربرد آن را در تحلیل‌های هواشناسی کشاورزی تقویت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: امواج مایکروویو، رطوبت خاک سطحی، سنجش از دور، شاخص پوشش گیاهی، AMSR2

مقدمه

دید جامع و یکنواخت از نواحی مختلف زمین و تصویربرداری مکرر از مناطق وسیع و غیر قابل دسترس به همراه اطلاعات با فواصل زمانی منظم، علاوه بر هزینه کم و سهولت تهیه داده‌ها از ویژگی‌های مهم سیستم‌های سنجش از دور است که جایگاه آن را در تعیین خصوصیات سطحی خاک مانند رطوبت، متمایز کرده است. رطوبت خاک یکی از اجزای اصلی چرخه آب در طبیعت بوده و در پایش و پیش‌بینی خشکسالی به ویژه در اکوسیستم‌های کم‌آب نقش کلیدی ایفا می‌کند (D'Odorico et al., 2007؛ Moran et al., 2004؛ Peters-Lidard, 2008). با توجه به اینکه رطوبت خاک بر رشد گیاه و عملکرد آن تاثیر می‌گذارد لذا اغلب برای پایش خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین رطوبت خاک یک متغیر ویژه مهم برای نظارت بر پایداری و توسعه خشکسالی است (Boken et al., 2005؛ Wilhite, 2005؛ AghaKouchak, 2014).

با توسعه سریع فناوری سنجش از دور، دستیابی به داده‌های رطوبت خاک در مقیاس‌های بزرگ نیز سرعت یافت و الگوریتم‌های متعددی برای تولید داده‌های رطوبت خاک توسعه یافت. این الگوریتم‌ها غالبا مبتنی بر تصاویر طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک یا تابش‌های مایکروویو هستند. به ویژه اخیرا استفاده از اندازه‌گیری مایکروویو فعال و غیرفعال نیز مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. البته باید به این نکته توجه داشت که ابزارهای سنجش از دور غالبا قادر به اندازه‌گیری رطوبت سطح خاک هستند (Chen et al., 2016).

تکنیک‌های سنجش از دور معمولا داده‌های رطوبت خاک را برای یک گستره مکانی بزرگ و با قدرت تفکیک زمانی متوسط برای سطح زمین با هزینه‌های اندک ارائه می‌کنند (Mohanty et al., 2017). تخمین‌های رطوبت خاک غالبا از سه منبع مایکروویو، نوری و حرارتی تامین می‌شود (Peng and Loew., 2017). اغلب الگوریتم‌های مبتنی بر رطوبت خاک ماهواره‌ای، متکی بر تصاویر مایکروویو غیرفعال (Njoku et al., 2003)، مایکروویو فعال (Takada et al., 2009)، یا ترکیبی از داده‌های چندین سنجنده هستند (Entekhabi et al., 2010؛ Kim and Hogue, 2012). در مقایسه با سنجش از دور مایکروویو غیرفعال، سنسورهای حرارتی/نوری دارای توانایی

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: sanaein@gmail.com)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.28.9

بازیابی رطوبت خاک سطحی در مقیاس مکانی کوچک‌تر هستند. هرچند داده‌های ماهواره‌های حرارتی/نوری حساسیت بیشتری به عوامل محیطی از قبیل شرایط هواشناسی و پوشش گیاهی و وجود ابر و غبار دارند (Adegoke and Carleton, 2002).

اصول رطوبت خاک به دست آمده از تصاویر مایکروویو غیرفعال بستگی به رابطه بین گذردهی خاک و مقدار آب در خاک دارد. روابطی تجربی وجود دارند که دمای روشنایی مایکروویو غیرفعال را به رطوبت خاک مرتبط می‌سازند (Wang and Qu, 2009). کیم و همکاران دلایل تفاوت نتایج دو مدل پرکاربرد بازیابی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 که یکی به نام JAXA و دیگری LPRM نامیده می‌شود را بررسی کردند (Kim et al., 2015). نتایج حاکی از آن بود که روش LPRM از خطای RMSE کمتری نسبت به JAXA برخوردار است.

در حال حاضر ماهواره‌های متعددی مانند SMAP، SMOS، ASCAT، AMSRE، و ESA GGI وجود دارند که موفق شده‌اند با فاصله زمانی ۲ تا ۳ روزه بازیابی رطوبت سطحی خاک را ارائه کنند (Chen and Wang, 2018؛Montzka et al., 2017).

ضخامت بسیار کم لایه سطحی (۲ تا ۷ سانتی‌متر) که توسط ماهواره سنجش می‌شود، مقیاس بزرگ تصاویر ماهواره‌ای (حدود ۲۰ کیلومتر) و کیفیت پایین در شرایط خاص مثل پوشش گیاهی متراکم و کوهستانی بودن مناطق جزو بزرگ‌ترین محدودیت‌های فعلی تکنیک‌های تخمین رطوبت خاک با استفاده از سنجش از دور هستند (Dostálová et al., 2014؛ Brocca et al., 2017). به همین دلیل بخشی از پژوهش‌ها در حوزه رطوبت خاک و هواشناسی کشاورزی به ویژه در سال‌های اخیر به اعتبارسنجی، ریزمقیاس‌نمایی و یا تلفیق داده‌های سایر سنجنده‌های منابع طبیعی با تصاویر مایکروویو رطوبت خاک اختصاص یافته تا بتوان برای کاربری‌های مختلف از آن بهره برد.

برخی از پژوهگشران اقدام به اعتبارسنجی و ریزمقیاس نمایی تصاویر به روش های مختلف کرده اند. به طور مثال جامعی و همکاران (۱۳۹۶)، بازیابی های رطوبت خاک ماهواره اسموس را در پنج محدوده مطالعاتی غرب و جنوب غربی کشور اعتبارسنجی کردند و دریافتند بین برآوردهای رطوبت خاک اسموس و اندازه گیری‌های زمینی همبستگی خوبی (R: 0.75 - 0.88) وجود دارد. و یا فرخی و همکاران (۱۳۹۸)، داده‌های رطوبت خاک سطحی حاصل از سنجنده AMSR2 را مورد استفاده قرار داده و با اندازه‌گیری‌های زمینی برای دشت رفسنجان، مقایسه کردند. همچنین فنگ و لاکشمی بر اساس رابطه اینرسی حرارتی مابین تغییرات دمای روزانه و متوسط رطوبت خاک ترکیب شده با شرایط پوشش گیاهی، موفق به ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک سنجنده SMOS و AMSR-E از ۲۵ کیلومتر به ۱ کیلومتر شدند (Fang and Lakshm, 2014). در پژوهشی دیگر وانگ و همکاران تصاویر بزرگ مقیاس (۲۵ کیلومتر) رطوبت خاک به دست آمده از داده‌های مایکروویو را از طریق ادغام با تصاویر خشکی دما- پوشش گیاهی (TVDI) سنجنده مودیس، کوچک مقیاس (۱۰ کیلومتر) کردند (Wang et al., 2016). غفاری و همکاران (۱۳۹۹) نیز رطوبت خاک ماهواره فعال-غیرفعال رطوبت خاک (SMAP) را با استفاده از داده‌های MODIS ریزمقیاس کردند.

برخی دیگر از پژوهشگران نیز از داده های دورسنجی مایکروویو رطوبت خاک برای کاربرد در سایر حوزه ها بهره برده اند. به طور مثال عدنان و همکاران از داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR-E (عمق ۱ سانتی متری خاک) برای واسنجی مدل SWAT در چند حوضه آبریز در ایالت ایندیانا استفاده کردند (Adnan et al., 2016). مارتینز فرناندز و همکاران با استفاده از شاخص خشکی رطوبت خاک (SWDI) به دست آمده از داده‌های رطوبت خاک سنجنده SMOS خشکی کشاورزی را در اسپانیا پایش کردند (Martinez-Fernández et al., 2016). ژانگ و همکاران روشی را به منظور محاسبه شاخص SMSI (شاخص رطوبت اشباع خاک) با استفاده از داده‌های ماهواره MSG-SEVIRI ارائه کردند (Zhang et al., 2014). همچنین ژو و همکاران برای برآورد شاخص کمبود آب خاک (SWDI)، از مجموعه داده رطوبت خاک رادیومتر متر باند L سطح ۲ استفاده کردند (Zhu et al., 2019).

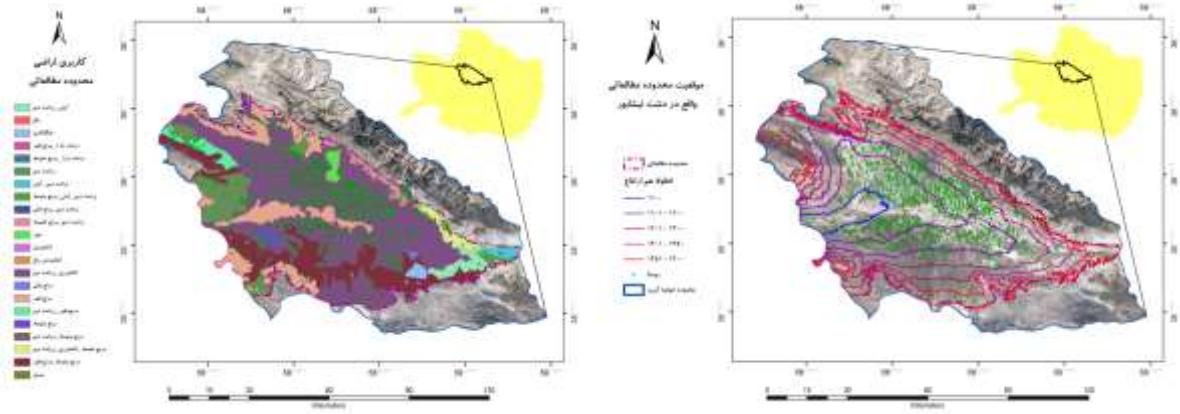
اگرچه رطوبت خاک را در مقیاس کوچک توسط سنجش از دور مایکروویو فعال نیز می توان بازیابی کرد، اما استفاده از داده‌های سنجش از دور فعال برای تخمین رطوبت خاک به دلیل وابستگی زیاد این داده ها به زبری سطح و پوشش گیاهی به سختی امکان‌پذیر است و تخمین های رطوبت خاک بازیابی شده از این طریق، دارای عدم قطعیت بیشتری هستند (Jagdhuber et al., 2019).

در این پژوهش با هدف دورسنجی رطوبت خاک برای کاربرد در علوم کشاورزی؛ داده‌های بازیابی رطوبت خاک مایکروویو غیرفعال سنجنده AMSR2 مورد استفاده قرار گرفت. برای دستیابی به این هدف، استفاده از داده‌های میدانی برای واسنجی تصاویر سنجنده AMSR2 و سپس ریزمقیاس نمایی داده ها مبتنی بر نظریه اینرسی حرارتی و با کمک تصاویر سنجنده MODIS، ضرورت یافت.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز نیشابور در طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۹ دقیقه واقع شده است. وسعت کل حوضه آبریز دشت نیشابور حدود ۷۳۵۰ کیلومتر مربع است. دشت نیشابور با وسعت ۳۴۷۷ کیلومتر مربع، ۴۷/۴۴ درصد مساحت حوضه آبریز نیشابور را تشکیل می‌دهد. (ولایتی، ۱۳۷۸)

در این پژوهش بخشی از دشت مورد استفاده قرار گرفت که دامنه تغییرات ارتفاع در آن از حدود ۳۰۰ متر تجاوز نکند. در این محدوده انواع کاربری اراضی شامل باغی، زراعی، کشاورزی دیم و آبی، مرتع فقیر و متوسط، درختزار، آیش، اراضی بایر، شهری و روستایی و ... در انواع دانه‌بندی خاک از ریزدانه تا درشت دانه به چشم می‌خورد. در شکل ۱ نقشه موقعیت محدوده مطالعاتی، خصوصیات توپوگرافی، کاربری اراضی و موقعیت روستاها نمایش داده شده است. بخش اعظم محدوده مطالعاتی به زراعت دیم و مراتع فقیر و متوسط اختصاص یافته است. توزیع جغرافیایی روستاها در این شکل می تواند به عنوان یک شاخص برای تحلیل بصری مطلوب بودن آب و خاک مورد توجه باشد.



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی، خصوصیات توپوگرافی، کاربری اراضی و موقعیت روستاها در محدوده مطالعاتی زیرمجموعه دشت نیشابور

داده‌های ماهواره‌ای

الف) سنجنده AMSR2: سنجنده AMSR2 نسخه جدیدتر سنجنده AMSR-E است که توسط JAXA طراحی و از سال ۲۰۱۲ روی ماهواره GCOM- W1 نصب شد تا گسیلش‌های ریزموج ضعیف را از سطح و جو زمین اندازه‌گیری نماید. این سنجنده از ارتفاع ۷۰۰ کیلومتری، اندازه‌گیری‌های دقیقی از شدت گسیلش و پراکندگی ریز موج ارائه می‌دهد. مکانیزم تصویربرداری کانونی، این سنجنده را قادر می‌سازد تا داده‌های شب و روز را در پوششی به وسعت ۹۹ درصد سطح زمین در طی ۲ روز ارائه دهد. این سنجنده در فرکانس‌های مشابه با AMSR-E فعال است. و برای تولید نقشه‌های بخار آب، آب مایع موجود در ابر، درجه حرارت سطح دریا، سرعت باد سطح دریاها، تمرکز یخ دریا، عمق برف و محتویات رطوبت خاک زمین مناسب است (NOAA, 2020).

محصول LPRM_AMSR2_SOILM3_001 یکی از محصولات سطح سوم سنجنده AMSR2 است که به صورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۲۵ در ۲۵ کیلومترمربع تولید می‌شود. پارامترهای سطح زمین شامل دمای سطحی، رطوبت خاک و موجودی آب گیاه توسط داده‌های مایکروویو غیرفعال سنجنده و با استفاده از الگوریتم بازیابی پارامترهای زمین (LPRM) حاصل می‌شود.

الگوریتم LPRM مبتنی بر یک مدل انتقال تابشی پیش‌رونده برای بازیابی رطوبت خاک سطحی و عمق نوری پوشش گیاهی عمل می‌کند. همچنین دمای سطح زمین نیز به صورت مجزا از باند Ka (۳۶/۵ گیگاهرتز) سنجنده AMSR2 به دست آمده است (De Jue and Owe, 2014). به منظور برآورد دو متغیر رطوبت خاک و دمای سطحی در محدوده مطالعاتی، از محصول فوق در دو گذر روز و شب استفاده شده است. تصاویر در بازه زمانی ۲۲ نوامبر ۲۰۱۷ (۱ آذر ۱۳۹۶) تا ۵ ژوئن ۲۰۱۸ (۱۵ خرداد ۱۳۹۷) و ۱ آوریل ۲۰۱۹ (۱۲ فروردین ۱۳۹۸) تا ۵ ژوئن ۲۰۱۹ (۱۵ خرداد ۱۳۹۸) از وب سایت داده‌های زمین به نشانی https://search.earthdata.nasa.gov و برای تمام روزها در بازه زمانی مذکور با فرمت NETCDF4 دریافت شده است.

ب) سنجنده MODIS: با توجه به ابعاد بزرگ تصاویر رطوبت خاک و دمای سطحی سنجنده AMSR2 (۲۵ کیلومتر) و از آن‌جایی‌که این داده‌ها در مقیاس مزرعه (کمتر از ۱۰۰۰ متر) مورد نیاز است لذا در این پژوهش پس از استخراج و واسنجی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2، عملیات ریزمقیاس نمایی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس انجام شده است. محصول دمای سطح زمین (LST: Land Surface Temperature) یکی از محصولات روزانه سنجنده مودیس در گروه MOD11 است که با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و با استفاده از الگوریتم روزنه مجزا (Split Window) بازیابی می‌شود. همچنین شاخص پوشش گیاهی اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) که در فواصل ۱۶ روزه و در تفکیک‌های مکانی متنوع تولید می‌شود، نیز در محصول MOD13 سنجنده مودیس ارائه می‌شود. هر دو محصول فوق در ابعاد ۱۰۰ متر (LST) و

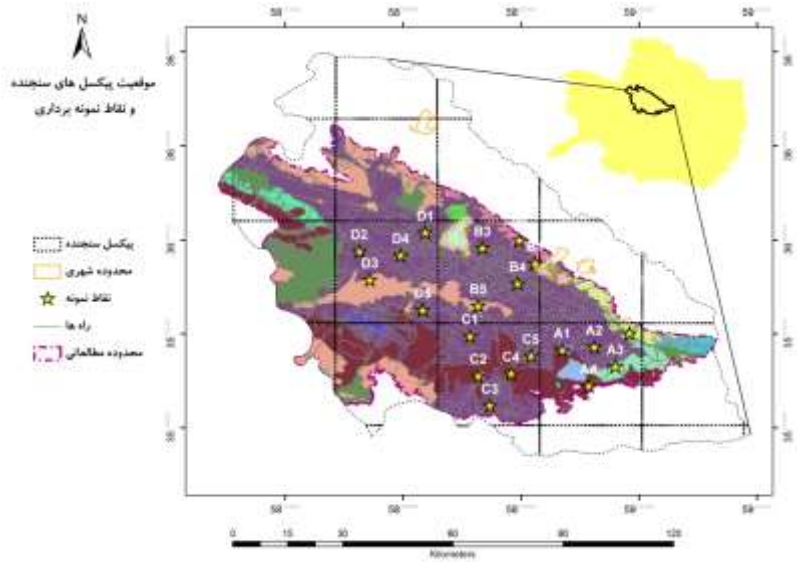
۲۵۰ متر (NDVI) از پایگاه داده‌های زمین دریافت شدند.

+ داده‌های هواشناسی: داده‌های ایستگاه هواشناسی همدیدی نیشابور واقع در بخش شمال شرقی محدوده مطالعاتی شامل بارش ۲۴ ساعته، دمای متوسط روزانه و دمای نقطه شبنم از اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی دریافت شد.

+ واسنجی اطلاعات رطوبت خاک سنجنده AMSR2: به منظور واسنجی داده‌های سنجنده AMSR2 پس از بر هم نهادن لایه‌های اطلاعاتی زیر، نقاط نمونه‌برداری در سطح محدوده مطالعاتی تعیین شد: ۱) لایه مرز محدوده مطالعاتی زیرمجموعه دشت نیشابور ۲) موقعیت مکانی پیکسل‌های سنجنده AMSR2 با ابعاد ۲۵ کیلومتر ۳) موقعیت مکانی پیکسل‌های سنجنده MODIS با ابعاد ۱۰۰۰ متر ۴) کاربری اراضی ۵) راه‌های اصلی و فرعی

با تلفیق لایه‌های فوق در محیط نرم افزار ArcMap 10.5 نقاط نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شد که به ازای هر پیکسل سنجنده AMSR2، ۵ نقطه وجود داشته باشد که این نقاط نماینده کاربری‌های اراضی غالب آن پیکسل باشند. در نهایت ۴ پیکسل که بیشترین پوشش در محدوده مورد نظر را داشتند گزینش شدند. سپس نقاط نمونه‌برداری با فرمت N_i نام‌گذاری شدند. که N نام پیکسل سنجنده AMSR2 واقع در محدوده مطالعاتی است و می‌تواند یکی از حروف A، B، C و D را اختیار کند. i شماره نقطه در هر پیکسل است. اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های خاک به صورت حجمی و به روش آون خشک انجام شده است. در طی مدت پژوهش ۵۶۰ نمونه خاک (۲۰ نمونه در ۲۸ نوبت) جمع آوری و اندازه‌گیری رطوبت خاک در محل آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد.

در شکل ۲ موقعیت پیکسل‌های AMSR2 و نقاط نمونه‌برداری نمایش داده شده است.



شکل ۲- نقشه موقعیت پیکسل‌های AMSR2 و نقاط نمونه‌برداری رطوبت خاک

به منظور بررسی رابطه خطی بین داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی؛ ابتدا ضریب وزنی هر یک از نقاط متناسب با مساحت تحت پوشش کاربری اراضی آن نقطه (شکل ۲) محاسبه شده و سپس میانگین وزنی رطوبت حجمی نقاط ۵ گانه داده‌برداری شده در هر پیکسل با مقدار رطوبت خاک به دست آمده از سنجنده AMSR2 مقایسه شده است.

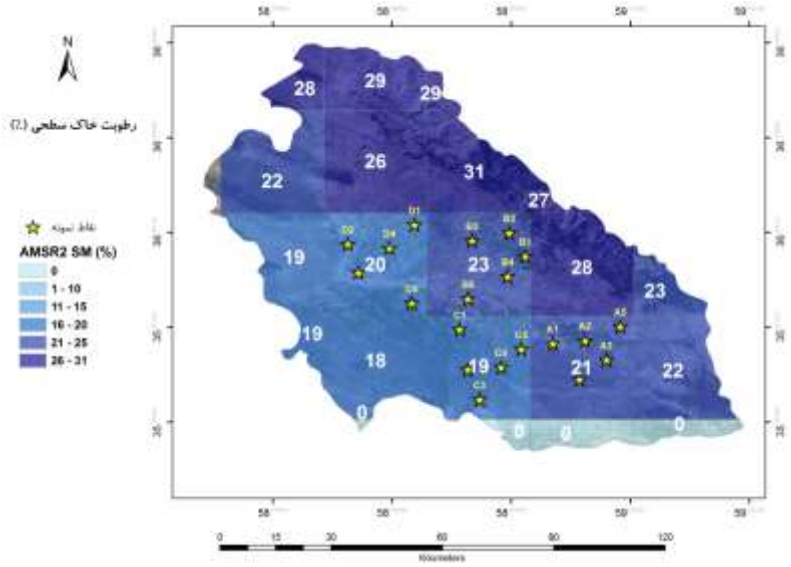
ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2: فنگ و همکاران؛ و فنگ و لاکشمی مدلی را برای ریزمقیاس نمایی داده‌های مایکروویو رطوبت خاک بزرگ مقیاس مبتنی بر دمای سطحی و پوشش گیاهی توسعه دادند (Fang et al., 2013؛ Fang and Lakshmi, 2014). این مدل بر نظریه اینرسی حرارتی استوار است که مقاومت حرارتی یک شی را بیان می‌کند. اینرسی حرارتی متناسب با رسانایی گرمایی، تراکم و ظرفیت گرمایی ویژه مواد است. ظرفیت گرمایی ویژه آب به طور عمومی بیشتر از خاک فاقد پوشش گیاهی است و این بدان معنی است که زمین خشک نسبت به زمین مرطوب سریعتر به تغییرات دما پاسخ می‌دهد. از این ویژگی می‌توان برای تبیین رابطه بین مقدار متوسط روزانه رطوبت خاک و تغییرات دمای سطح زمین استفاده کرد. رابطه خطی زیر بر همین اساس استوار است:

$$\theta^{av}_{(s,t)} = a_0 + a_1 \Delta Ts_{(s,t)} \quad (۱)$$

در رابطه فوق، $\theta^{av}_{(s,t)}$ میانگین رطوبت خاک روزانه (داده ماهواره‌ای یا ایستگاهی)، و $\Delta Ts_{(s,t)}$ نیز تغییرات روزانه دمای سطحی ثبت شده توسط ماهواره در طول مدت شبانه روز است. a_0 و a_1 به ترتیب شیب و عرض از مبدا خط برازش داده شده هستند. ابتدا با استفاده از رابطه فوق ارتباط بین تغییرات روزانه دمای سطحی و رطوبت خاک برآورد شده، سپس از همین رابطه برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از محصول دمای سطحی مودیس استفاده شده است.

نتایج و بحث

واسنجی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2: در شکل ۳ نمونه تصویر پهنه‌بندی داده رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 در تاریخ ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۷ نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمونه تصویر پهنه‌بندی داده رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 در تاریخ ١٤ اردیبهشت ۱۳۹۷

همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، در تاریخ ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۷، مقدار رطوبت خاک در ارتفاعات بیشتر از محدوده دشت است. حداقل مقدار رطوبت حجمی ثبت شده برابر با ۱۸ درصد و حداکثر آن ۳۱ درصد است. مقدار رطوبت در چهار پیکسل A، B، C و D به ترتیب برابر با ۲۱، ۲۳، ۱۹ و ۲۰ درصد است و متوسط رطوبت در این چهار پیکسل برابر با ۲۱ درصد است.

با توجه به اختلاف‌های موجود در نوع پوشش کاربری هر یک از پیکسل ها؛ بر این اساس برازش رابطه خطی بین داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 [که زین پس با نام اختصاری AMSR2 SM یاد می‌شود] ابتدا با میانگین وزنی رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی [که زین پس با نام اختصاری In-situ SM نمایش داده می‌شود] به ازای هر پیکسل صورت گرفته و سپس رابطه خطی برای کل محدوده مطالعاتی محاسبه شد.

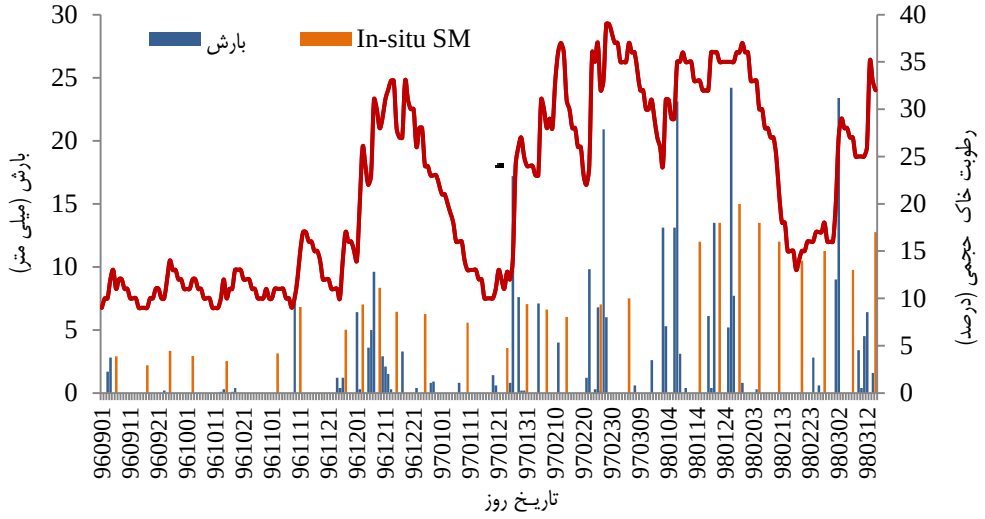
در شکل ۴ نمودار سری زمانی تغییرات سه متغیر بارش، AMSR2 SM و In-situ SM ارائه شده است. محور عمودی سمت راست بیانگر تغییرات متغیر رطوبت خاک حجمی (بر حسب درصد) مربوط به داده‌های ماهواره‌ای (منحنی قرمز) و داده‌های میدانی (ستون‌های نارنجی) و محور عمودی سمت چپ نیز بیانگر میزبان بارش ثبت شده در محل ایستگاه هواشناسی بر حسب میلی متر است (ستون آبی). همان‌طور که مشاهده می‌شود هر سه متغیر از روند مشابهی تبعیت کرده و می‌توان گفت تغییرات عامل بارش، تاثیر واضحی بر تغییرات رطوبت خاک In-situ SM و AMSR2 SM داشته است.

در هر سه متغیر یک نقطه اوج در بازه‌های زمانی نیمه اسفند ۱۳۹۶، اواسط اردیبهشت ۱۳۹۷ و اواخر فروردین ۱۳۹۸ به چشم می‌خورد. همچنین متغیر رطوبت خاک از کاهش نزولات جوی در اوایل زمستان ۱۳۹۶ و اوایل بهار ۱۳۹۷ تاثیر پذیرفته است. در شکل ۵ نتایج برازش رابطه خطی بین In-situ SM و AMSR2 SM نمایش داده شده است.

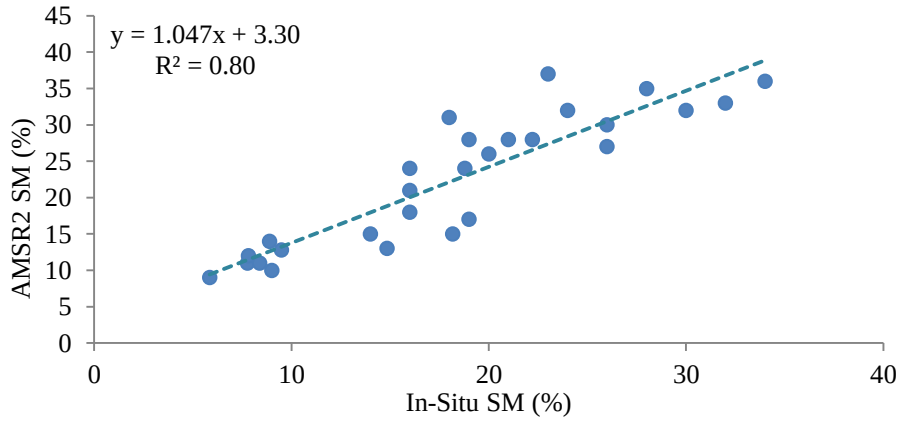
برازش رابطه خطی با ضریب شیب خط ۱/۰۴، عرض از مبدا ۳/۳۰، و ضریب رگرسیون ۰/۸۰ می‌تواند بیانگر وجود ارتباط فیزیکی قوی بین این دو متغیر بوده و با توجه به ضریب شیب خط برازش یافته که به عدد ۱ نزدیک است می‌توان عمده اختلاف بین داده‌ها را ناشی از بیش برآورد مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنجنده

AMSR2 نسبت به داده‌های میدانی دانست (تقریبا برابر با عرض از مبدا به میزان ۳/۳۰ واحد رطوبت خاک). نتایج برازش رابطه خطی بین داده‌های ماهواره‌ای و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی به ازای هر یک از چهار پیکسل A، B، C و D در شکل ۶ ارائه شده است.

در شکل فوق، بیشترین میزان همبستگی بین دو متغیر In-situ SM و AMSR2 SM در پیکسل D با ضریب تبیین ۰/۸۴ و کمترین میزان همبستگی در پیکسل A با ضریب تبیین ۰/۷۳ به چشم می‌خورد. به منظور ریشه‌یابی دلیل اختلاف واکنش به امواج الکترومغناطیسی در ۴ پیکسل مذکور، اختلاف وضعیت پوشش گیاهی و کاربری اراضی در آن‌ها بررسی شده است. در جدول ۱ خصوصیات آماری دامنه تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در محدوده مطالعاتی مربوط به سنجنده مودیس ارائه شده است.



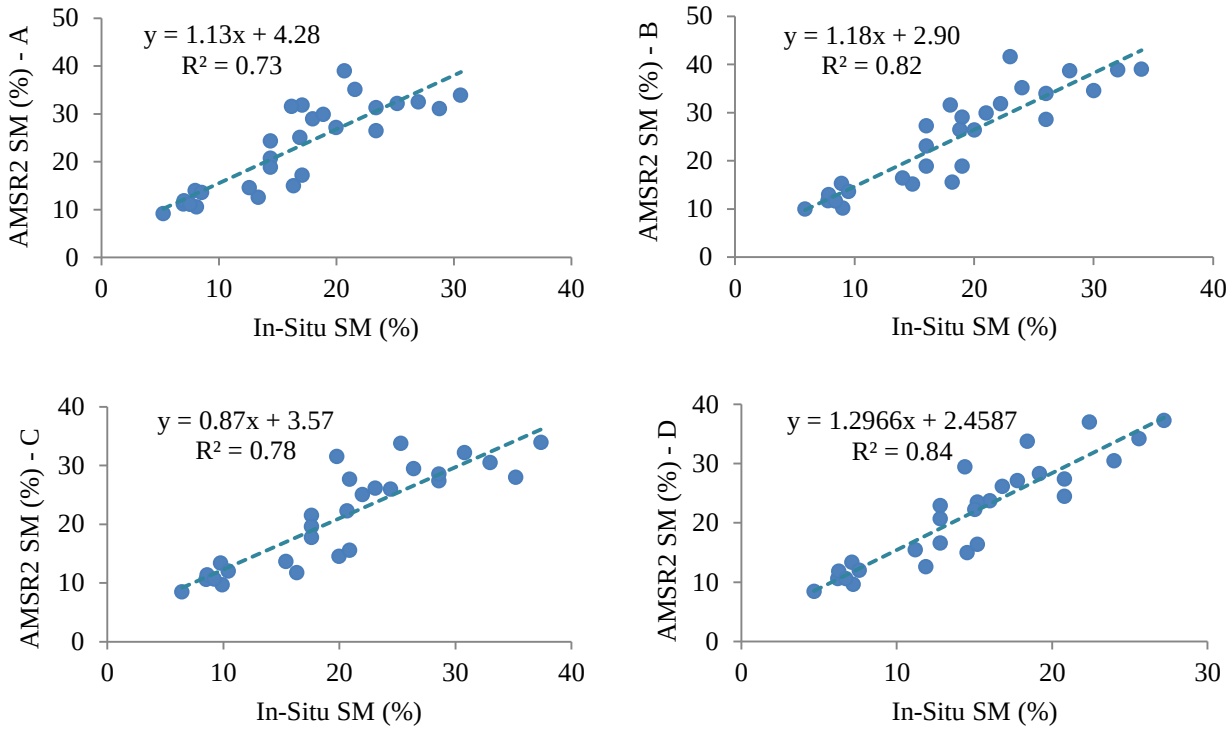
شکل ٤- سری زمانی تغییرات سه متغیر بارش، AMSR2 SM و In-situ SM



شکل ٥- برازش رابطه خطی بین AMSR2 SM و Insitu SM (میانگین پیکسل‌ها)

جدول ۱- خصوصیات آماری تغییرات شاخص پوشش گیاهی NDVI در پیکسل‌های A، B، C و D

پیکسل	شاخص پوشش گیاهی (NDVI)			
	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
A	۰/۵۳	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۸
B	۰/۶۲	۰/۰۵	۰/۱۷	۰/۰۶
C	۰/۶۷	۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۰۵
D	۰/۵۷	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۳



شکل ٦- برازش رابطه خطی مجزا برای ٤ پیکسل A، B، C و D بین AMSR2 SM و Insitu SM

جدول ۲- خصوصیات آماری برازش رابطه خطی بین AMSR2 SM و In-Situ SM در پیکسل‌های A، B، C و D

نام پیکسل	ضریب تبیین (R2)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین قدر مطلق خطا (MAE)	میانگین In-Situ SM
A	۰/۷۳	۴/۰	۳/۳	۱۶
B	۰/۸۲	۳/۸	۳/۲	۱۸
C	۰/۷۸	۲/۱	۱/۶	۲۰
D	۰/۸۴	۳/۹	۳/۴	۱۵

مطابق شکل ۲ و جدول ۱ مشاهده می‌شود بیشترین تنوع کاربری اراضی در پیکسل A و کمترین آن در پیکسل D به چشم می‌خورد. خصوصیات آماری شاخص NDVI نشان می‌دهد پیکسل A از بیشترین مقدار و پیکسل D از کمترین میزان انحراف معیار برخوردار است. که این می‌تواند بیانگر میزان پراکندگی مقادیر حول میانگین باشد که فزونی آن در پیکسل A بیانگر تنوع و دامنه تغییرات وسیع‌تر پوشش گیاهی است. با بررسی مجدد شکل ۱ می‌توان دریافت بیشترین شیب تغییرات ارتفاع مربوط به پیکسل A و کمترین آن مربوط به D است.

در جدول ۲ خلاصه بررسی شاخص‌های آماری مربوط به دقت برازش رابطه خطی ارائه شده است. در این جدول مقادیر خطاهای RMSE و MAE در محدوده ۱/۶ تا ۴ هستند که می‌توان در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌ها (۱۵ تا ۲۰) قابل قبول دانست. در پیکسل C با توجه به بیشتر بودن میانگین رطوبت خاک، اگر چه مقدار ضریب تبیین به دست آمده از پیکسل‌های B و D کمتر است اما مقادیر خطای RMSE و MAE کمتری نیز به دست آورده است. لذا می‌توان گفت گرچه رابطه برازش یافته قادر است حداکثر ۷۸ درصد تغییرات رطوبت خاک ماهواره‌ای را با تغییرات داده‌های میدانی تفسیر کند اما خط برازش داده شده رابطه ریاضی مناسبی بین متغیر مستقل و وابسته برقرار کرده و نقاط متناظر کمترین فاصله از این خط را دارا هستند.

در مراحل بعدی این پژوهش از روابط رگرسیون به دست آمده در شکل ۶، به عنوان ضرایب واسنجی داده‌های AMSR2 استفاده شده است.

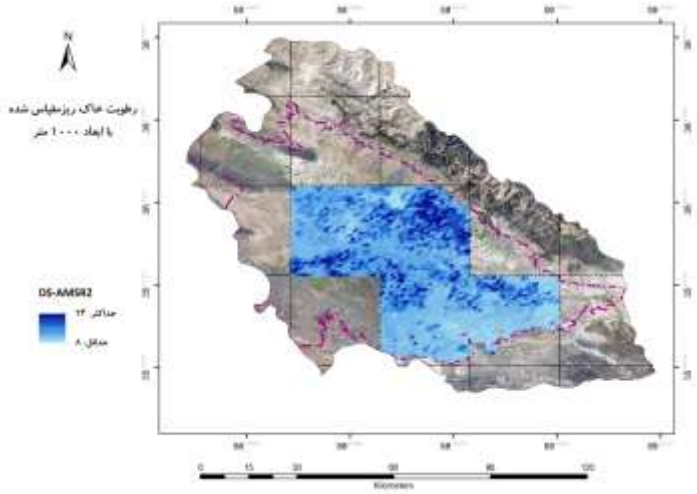
ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک: در گام نخست رابطه بین تغییرات روزانه دمای سطحی و رطوبت خاک در سنجنده AMSR2 استخراج شده است. در جدول ۳ شیب خط و عرض از مبدا روابط به دست آمده برای پیکسل‌های A تا D ارائه شده است.

جدول ۳- خصوصیات آماری رابطه خطی تغییرات روزانه دما و AMSR2 SM

پیکسل	شیب خط	عرض از مبدا	ضریب تبیین
A	-۲/۴۴	۳۹/۸	۰/۸۱
B	-۲/۳۰	۴۱/۷۶	۰/۹۵
C	-۲/۶۷	۴۵/۷۳	۰/۸۸
D	-۲/۲۳	۵۰/۹۷	۰/۹۵

از آن جایی که اختلاف روزانه دمای سطحی رابطه عکس با میانگین رطوبت خاک سطحی دارد لذا در جدول ۳ کلیه ضرایب به دست آمده منفی است. همچنین کمترین ضریب تبیین به پیکسل A و بیشترین مقدار آن به پیکسل D و B تعلق دارد. تغییرات دما و رطوبت خاک هر دو تحت تاثیر عامل ارتفاع و پوشش گیاهی دستخوش تغییر می‌شوند لذا در این مورد نیز مشابه نتایج بخش قبل، می‌توان کمینه و بیشینه ضرایب تبیین را به تفاوت پیکسل‌ها از نظر پوشش گیاهی و دامنه تغییرات ارتفاعی ارتباط داد.

در گام بعدی، از روابط فوق برای محاسبه رطوبت خاک ریزمقیاس شده در ابعاد ۱۰۰۰ متر استفاده شده است. در شکل ۷ نمونه تصویر پهنه بندی شده رطوبت خاک ریزمقیاس شده سنجنده AMSR2 (DS-AMSR2) ارائه شده است. همچنین به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از ریزمقیاس‌نمایی، از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک میدانی استفاده شد. در جدول ۴ خلاصه شاخص‌های آماری اعتبارسنجی نتایج ارائه شده است.



شکل ۷- نمونه نقشه پهنه‌بندی رطوبت خاک ریزمقیاس شده سنجنده AMSR2 (DS-AMSR2)

جدول ٤- خصوصیات آماری برازش رابطه خطی بین DS-AMSR2 SM و In-Situ SM در پیکسل‌های A تا D

نام پیکسل	ضریب تبیین (R2)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین قدر مطلق خطا (MAE)	میانگین In-Situ SM
A	۰/۸۲	۴/۱	۳/۰	۱۶
B	۰/۹۶	۳/۱	۲/۸	۱۸
C	۰/۸۹	۱/۹	۱/۱	۲۰
D	۰/۹۶	۲/۹	۲/۳	۱۵

در این جدول گرچه شاخص‌های RMSE و MAE از وضعیتی مشابه واسنجی داده‌های بزرگ مقیاس سنجنده AMSR2 برخوردار هستند اما ضرایب تبیین به دست آمده بهبود قابل توجهی پیدا کرده است. اگرچه همچنان کمترین میزان ضریب تبیین مربوط به پیکسل A است اما مقدار آن از ۰/۷۳ در تصاویر بزرگ مقیاس به ۰/۸۲ در تصویر ریزمقیاس شده افزایش پیدا کرده است. نتایج مشابه این جدول با جدول ۲ و بهبود نسبی شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که الگوریتم پیاده‌سازی شده برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2، با کمک تصاویر مودیس، انطباق مناسبی بر فیزیک آب، خاک و تغییرات دمایی سطح زمین داشته و کاربرد آن موفقیت‌آمیز بوده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به نقش کلیدی پارامتر رطوبت خاک در مطالعات منابع آب، هواشناسی، کشاورزی و اقلیم شناسی؛ الگوریتم‌های متنوعی

توسعه یافته که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم پارامتر رطوبت خاک را با کمک تصاویر ماهواره‌ای در این مطالعات مداخله می‌دهد. در این پژوهش با هدف کاربرد داده‌های بازیابی رطوبت خاک مایکروویو غیرفعال در تخمین رطوبت خاک در مقیاس مزرعه، از تصاویر سنجنده AMSR2 و همچنین تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد. در گام نخست محدوده مطالعاتی دشت نیشابور انتخاب و با کمک نمونه‌برداری میدانی، داده‌های استخراج شده از ماهواره واسنجی شد. در گام دوم با استفاده از الگوریتم‌های ریزمقیاس نمایی و با کمک تصاویر مودیس، ابعاد تصاویر از ۲۵ کیلومتر به ۱۰۰۰ متر ریزمقیاس و نتایج آن صحت‌سنجی شد.

نتایج واسنجی رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 بیان‌گر آن است که با در نظر گرفتن مقادیر خطاهای برازش رابطه خطی بین داده‌های دورسنجی و اندازه‌گیری شده میدانی، مقدار RMSE و MAE در محدوده ۱/۶ تا ۴ درصد محاسبه شد که می‌توان این میزان خطا را در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌ها (۱۵ تا ۲۰) قابل قبول دانست. همچنین کمترین ضریب تبیین ۷۳ برای پیکسل A از پیکسل‌های چهارگانه و بیشترین آن ۸۴ درصد برای پیکسل D محاسبه شد و این یعنی حداقل ۷۳ درصد تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی، در داده‌های دریافت شده از سنجنده AMSR2 منعکس شده است. روند تغییرات رطوبت خاک دورسنجی، تطبیق خوبی با روند تغییرات سایر متغیرهای محیطی به ویژه بارش داشت. همچنین این فرضیه تقویت شد که دو عامل پوشش گیاهی و تغییرات ارتفاعی سطح زمین از جمله عوامل موثر در اعتبارسنجی و واسنجی داده‌های دورسنجی رطوبت خاک محسوب می‌شوند.

در نهایت می‌توان گفت فرآیندی که در این پژوهش به کار گرفته شد در اقلیم های مشابه می‌تواند از نتایج قابل قبولی برخوردار بوده و به ویژه در حوزه کشاورزی که خلا وجود داده‌های پهنه بندی شده رطوبت خاک وجود دارد، تا حد زیادی این خلا را جبران نماید.

منابع

جامعی، م.، موسوی بایگی، م.، علیزاده، ا. و ایران نژاد، پ. ۱۳۹۶. اعتبارسنجی بازیابی‌های رطوبت خاک ماهواره مایکروویو اسموس، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۱(۲):۶۷۲-۶۶۰.

غفاری، ا.، داوری، ک. و فریدحسینی، ع. ۱۳۹۹. توسعه الگوریتم‌های بهبود یافته برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با استفاده از داده ماهواره‌های نوری/حرارتی، نشریه علمی-پژوهشی آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴(۲):۶۶۰-۶۵۰.

فرخی، م.، انصاری، ح. و فرید حسینی، ع. ۱۳۹۸. تلفیق بازیابی‌های سنجنده AMSR2 با محصولات دورسنجی مودیس به منظور برآورد رطوبت خاک با وضوح بالا، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۲):۶۹۸-۶۸۷.

ولایتی، س. ۱۳۷۸. بررسی عوامل مؤثّر بر تغییرات کیفی آبخوان نیشابور، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، (۱۴۹):۱۳۴-۱۱۹.

Adegoke, J.O., and Carleton, A.M. 2002. Relations between Soil Moisture and Satellite Vegetation Indices in the U.S. Corn Belt. Journal of Hydrometeorology 3:395-405.

Adnan, M., Merwade, V., and Yu, Z. 2016. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed / in-situ soil moisture. Journal of Hydrology 536:192–207.

AghaKouchak, A. 2014. A baseline probabilistic drought forecasting framework using Standardized Soil Moisture Index: Application to the 2012 United States drought. Hydrol. Earth Syst. Sci. 18(7):2485–2492.

Boken, V.K. 2005. Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study. Oxford Univ. Press. New York. 496.

Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., and Tarpanelli, A. 2017. Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities. Water. 9(2):140.

Chen, J., Wen, J., and Tian, H. 2016. Representativeness of the ground observational sites and up-scaling of the point soil moisture measurements. Journal of Hydrology 533:62–73.

Chen, L. and Wang, L. 2018. Recent advance in earth observation big data for hydrology. Big Earth Data. 1–22.

De Jue, R.D., and Owe, M. 2014. AMSR2/GCOM-W1 surface soil moisture (LPRM) L3 1 day 25 km x 25 km ascending V001, Edited by Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) (Bill Teng). Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Greenbelt. MD. USA.

D'Odorico, P., Caylor, K., Okin, G.S., and Scanlon T. M. 2007. On soil moisture-vegetation feedbacks and their possible effects on the dynamics of dryland ecosystems. J. Geophys. Res. 112(G04010).

Dostálová, A., Doubková, M., Sabel, D., Bauer-Marschallinger, B., and Wagner, W. 2014. Seven years of advanced synthetic aperture radar (ASAR) global monitoring (GM) of surface soil moisture over Africa. Remote Sens. 6(8):7683–7707.

Entekhabi, D., Reichle, R.H., Koster, R.D., and Crow, W.T. 2010. Performance metrics for soil moisture

826.

Njoku, E.G., Jackson, T.J., Lakshmi, V., Chan, T.K., and Nghiem, S.V. 2003. Soil moisture retrieval from AMSR-E. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 41(2):215–229.

NOAA Office of Satellite and Product Operation (OSPO) website, About AMSR-2, https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/gpds/about_amsr2.html. Date of Visit: 2020-05-13.

Peters-Lidard, C.D., Mocko, D.M., Garcia, M., Santanello, J.A., Tischler, M.A., Moran, M.S., and Wu, Y. 2008. Role of precipitation uncertainty in the estimation of hydrologic soil properties using remotely sensed soil moisture in a semiarid environment. Water Resour. Res. 44(W05S18).

Peng, J., and Loew, A. 2017. Recent advances in soil moisture estimation from remote sensing. Water 9(7):530–534.

Takada, M., Mishima, Y., and Natsume, S. 2009. Estimation of surface soil properties in peatland using ALOS/PALSAR. Landscape Ecol. Eng. 5(1):45–58.

Wilhite, D. A. 2005. Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues. CRC Press. 86:432.

Wang, L., and Qu, J.J. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. Front. Earth Sci. Chin. 3(2):237–247.

Wang, J., Ling, Z., Wang, Y., and Zeng, H. 2016. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Improving spatial representation of soil moisture by integration of microwave observations and the temperature– vegetation– drought index derived from MODIS products. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 113:144–154.

Zhang, D., Li, Z. L., Tang, R., Tang, B.H., and Wu, H. 2014. A remote sensing technique to determine the soil moisture saturation index. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research. 978-1-4799-5775-0/14. 3280.

Zhu, Q., Luo, Y., Xu, Y., Tian, Y., and Yang, T. 2019. Satellite Soil Moisture for Agricultural Drought Monitoring: Assessment of SMAP-Derived Soil Water Deficit Index in Xiang River Basin. Remote Sensing.

retrievals and application requirements. J. Hydrometeorol 11(3):832–840.

Fang, B., and Lakshmi, V. 2014. Soil moisture at watershed scale : Remote sensing techniques. Journal of Hydrology 516:2014:258–272.

Fang, B., Lakshmi, V., Bindlish, R., Jackson, T. J., Cash, M. and Basara, J. 2013. Passive Microwave Soil Moisture Downscaling Using Vegetation Index and Skin Surface Temperature. Vadose Zone Journal.

Jagdhuber, T., Konings, A.G., McColl, K.A., Alemohammad, S.H., Das, N.N., Montzka, C., Link, M., Akbar, R., and Entekhabi, D. 2019. Physics-Based Modeling of Active and Passive Microwave Covariations Over Vegetated Surfaces. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 57:788-802

Jian, P., Alexander, L., Olivier, M., and C., V.N.E. 2017. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. Reviews of Geophysics 55:341-366.

Kim, J., and Hogue, T. 2012. Improving spatial soil moisture representation through integration of AMSR-E and MODIS products. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens 50(2):446–460.

Kim, S., Liu, Y.Y., Johnson, F. M., Parinussa, R.M., and Sharma, A. 2015. Remote Sensing of Environment a global comparison of alternate AMSR2 soil moisture products: Why do they differ? Remote Sensing of Environment 161:43–62.

Martinez-Fernández, J., González Zomora, A., Sánchez, N., and Gumuzzio, A. 2016. Remote Sensing of Environment Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water De fi cit Index. Remote Sensing of Environment 177:277–286.

Mohanty, B.P., Cosh, M.H., Lakshmi, V. and Montzka, C. 2017. Soil moisture remote sensing: state-of-the-science. Vadose Zone J. 16(1):1–9.

Montzka, C., Bogena, H.R., Zreda, M., Monerris, A., Morrison, R., Muddu, S., and Vereecken, H. 2017. Validation of spaceborne and modelled surface soil moisture products with cosmic-ray neutron probes. Remote Sens. 9(2):103–136.

Moran, M.S., Peters-Lidard, C.D., Watts, J.M., and McElroy, S. 2004. Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. Can. J. Remote Sens. 30(5):805–

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1973-1983

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۹۸۳-۱۹۷۳

Downscaling Retrievals of the AMSR2 Passive Microwave Soil Moisture Imagery to Farm Scale

M. Fashaee [1], S.H. Sanaei-Nejad [2]*

Recived: Sep.21, 2020 Accepted: Dec.01, 2020

Abstract

Soil moisture is of particular importance in the study of water resources and agriculture. The microwave electromagnetic spectrum does not have the physical limitations of other radiometric spectral in measuring soil moisture, but they often have very large pixel dimensions (more than 10 km). In this study, in order to apply soil moisture remote sensing data at the farm scale, using field soil moisture measurement data in the Nishabour plain during 2017-2019, calibration of AMSR2 retrieval data was performed. It turned out that altitude and vegetation changes are among the key factors affecting calibration accuracy. Based on the theory of thermal inertia and with the help of MODIS sensor images, the interactions of the average daily soil moisture and the daily surface temperature difference between the two MODIS and AMSR2 sensors were investigated. Using it, downscaling linear relationships of soil moisture images were obtained to convert the image dimensions from 25 km to 1000 m. Validation of R2 statistical indices with a minimum of 0.73 and a maximum of 0.84, MAE and RMSE with a range of 1.6 to 4, showed that the algorithm used in the downscaling is well able to reflect the interactions between rainfall, soil moisture, vegetation and changes in canopy temperature profile and this feature reinforces its application in agrometeorological studies.

Keywords: AMSR2, Downscaling, Microwave spectra, Remote sensisng, Surface soil moisture

1- Ph.D. Student of Water Science and Engineering Department, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad
2- Professor of Water Science and Engineering Department, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: sanaein@gmail.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۰۲-۱۹۸۴

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1984-2002

مقاله پژوهشی

ترسیم حریم کمّی چاه‌های برداشت به کمک الگوریتم گام تصادفی و مدل شبیه‌ساز FeFlow

ناهید مجیدی خلیل آباد[۱]، علی محتشمی[۲]، ابوالفضل اکبرپور[۳*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۴

چکیده

ترسیم و تعیین حریم کمّی چاه‌ها از جمله اقداماتی است که باید در هر آبخوان صورت بگیرد. روش‌های مورد استفاده به منظور رسم این محدوده در دو بخش ساده و پیچیده قرار می‌گیرند. در بخش ساده از چندین رابطه ریاضی و در بخش پیچیده از مدل‌های عددی استفاده می‌شود. در این پژوهش برای اولین بار با استفاده از الگوریتم گام تصادفی و مدل عددی اجزاء محدود، حریم کمّی چاه‌های موجود در یک آبخوان استاندارد محصور و آبخوان آزاد بیرجند تعیین و ترسیم شدند. پس از مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی در دوره ۱۲ ماهه ۱۳۹۰-۱۳۹۱ به کمک شبیه‌ساز FeFlow، حریم کمّی برای چاه‌ها ترسیم شدند. در آبخوان استاندارد حریم کمّی برای هر سه چاه بهره‌برداری به صورت جداگانه در دو دوره ۵۰ و ۱۸۰ روزه ترسیم شدند. نتایج نشان دادند که کشیدگی حریم برای هر سه چاه به سمت قسمتی از آبخوان می‌باشد که سطح آب زیرزمینی بالاتری نسبت به بقیه مناطق دارد. همچنین در مناطقی از آبخوان که قابلیت انتقال بیشتری دارند، حریم عریض‌تر بوده و با ورود به مناطقی با قابلیت انتقال کمتر، از عرض آن کاسته و باریک‌تر می‌شود به طوریکه در چاه شماره دو عرض حریم در منطقه ۳، ۳۰۲/۸۶ متر بوده و این در حالی است که در منطقه ۲ که قابلیت انتقال کمتری دارد، ۲۶۷/۴۶ متر می‌باشد. در آبخوان بیرجند که شامل ۱۹۰ حلقه چاه است، ۵ چاه به طور دلخواه انتخاب شدند و حریم کمّی برای آن‌ها در دو دوره پنج و سی ساله ترسیم شدند. نتایج نشان دادند که کشیدگی حریم به سمت مرزهای هد ثابت مطابق با الگوی جریان بوده و دو پارامتر دبی و هدایت هیدرولیکی نقش بسزایی در شکل آن دارد. به طوریکه در چاه شماره ۵، که کمترین دبی برداشت را دارد، طول حریم در دوره ۵ ساله حداقل مقدار یعنی ۳۶۴/۶۲ متر داشته است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان محصور و آزاد، الگوریتم گام تصادفی، ترسیم حریم کمّی، مدل عددی اجزاء محدود (FeFlow)

مقدمه

در مناطقی که منابع آب سطحی وجود ندارد و یا محدود هستند، منابع آب زیرزمینی به عنوان تنها منبع قابل دسترس و تامین کننده نیازهای بشر مورد استفاده قرار می‌گیرد. استحصال آب زیرزمینی امروزه تنها از طریق حفر چاه در آبخوان‌ها صورت می‌پذیرد. نکته اصلی در حفر چاه‌های جدید، توجه به عدم تجاوز چاه‌های جدید به حریم چاه‌های قبلی هستند، این امر ضرورت تعیین و ترسیم حریم کمّی چاه‌ها را در آبخوان‌ها نشان می‌دهد. مهمترین عوامل موثر در شکل و گسترش حریم کمّی چاه‌ها مولفه‌های هیدرودینامیکی آبخوان هستند. پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی، قابلیت انتقال و ضریب ذخیره نقش مهمی در تعیین این محدوده دارند که باید مورد توجه کارشناسان آب قرار گیرد.

همانطور که بیان شد، تعیین ناحیه دقیق حریم کمّی و کیفی چاه‌ها بسیار حائز اهمیت است، زیرا که کوچک محاسبه شدن این ناحیه و در نظر گرفتن آن برای سناریوهای مدیریتی احتمال افزایش ریسک کار را بالا برده، همچنین بزرگ محاسبه شدن این محدوده مشکلات و معایب مربوط به خود را دارد (Ferreira et al., 2004; Sabetraftar, 2013). بنابراین نیاز است حالت بهینه آن تعیین گردد. روش‌های متنوع و مختلفی جهت محاسبه این ناحیه پیشنهاد و استفاده شده است، در دو قسمت روش‌های ساده و روش‌های پیچیده قرار می‌گیرند (Goodarzi and Eslamian, 2019). روش‌های ساده شامل چندین رابطه ریاضی هستند که می‌توان به روش‌های زیشارد، کمفورت، شولتز، کوساکین و شنیبلی اشاره کرد که اکثراً وابسته به پارامترهای شعاع چاه و هدایت هیدرولیکی منطقه چاه هستند و روش‌های پیچیده منظور همان روش‌های عددی مورد استفاده در این حوضه می‌باشند. امروزه محققین از مدل‌هایِ عددی، جهت تعیین و

۱- کارشناسی ارشد منابع آب، مرکز پژوهشی آب و محیط زیست شرق، مشهد، ایران
۲- دانشجوی دکتری عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۳ - استاد تمام دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: akbarpour@birjand.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.13.4

ترسیم حریم کمّی و کیفی چاه‌ها استفاده می‌کنند. این مدل‌ها، معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی را بسته به نوع مدل عددی به گره‌ها و یا المان‌ها اعمال می‌کند و سپس با استفاده از روش‌های حل ماتریسی، ماتریس مجهول که همان سطح آب زیرزمینی است را محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های موجود دیگر، حریم کمّی چاه مربوطه، تعیین و مشخص می‌گردد. قابل ذکر است مدل‌های عددی به دلیل در نظر گرفتن گرادیان هیدرولیکی، انواع شرایط مرزی و پارامترهای هیدرولیکی دارای تطابق بیشتری با شرایط واقعی هیدروژئولوژیکی دارد و بهترین روش جهت تعیین حریم کمّی هستند (سامانی و کامرانی ۱۳۹۵).

مطالعات متعددی جهت ترسیم حریم کمّی صورت گرفته است. میلر ناحیه حفاظتی چاه را به کمک دو روش شعاع ثابت[1] و حل تحلیلی ترسیم نمود؛ و نتایج بدست آمده را برای دوره‌های کوتاه مدت و بلند مدت مقایسه کرد. نتایج نشان دادند که روش شعاع ثابت (حالت ماندگار) برای دوره‌های طولانی مدت خطای زیادی را به همراه دارد و مناسب برای این امر نمی‌باشد (Miller, 2003). مونانته و فریبرا از روش‌های مختلفی جهت ترسیم ناحیه حفاظتی چاه در آبخوان مانتِمور نووو در کشور پرتغال بهره بردند. روش‌های مورد استفاده آن‌ها به ترتیب روش شعاع ثابت، دو روش حل تحلیلی به نام‌های ویزلینگ[2] و کِریجمَن-لوبوفریبرا[3] و یک روش عددی به نام آسموین (ASMWIN)[4] بودند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش عددی نتایج بهتری در ترسیم ناحیه حفاظتی از خود نشان می‌دهد (Moinante and Lobo-Ferreira, 2005). پوچالسکی نشان داد که حریم تعیین شده به کمک مدل‌های عددی انطباق خوبی با حریم واقعی چاه دارند بنابراین ترسیم حریم به کمک این مدل‌ها را قابل اعتمادترین روش جهت تعیین این محدوده معرفی کرد (Puchalski, 2009). سیراکاس و لاشنوپولوس به کمک مدل عددی مادفلو ناحیه زون گیرش چاه‌های شرب آبخوان موندانیان در یونان را تعیین و ترسیم کردند و سپس به کمک آن مناطق مستعد آلودگی را مشخص نمودند (Siarkos and Lationopoulos, 2012). دانگ و همکاران ناحیه حفاظتی را تنها برای یک چاه از منطقه بیجین در چین رسم نمودند. آن‌ها روش‌های متفاوتی را بدین منظور مورد استفاده قرار دادند. روش اصلاح شده شعاع ثابت، روش ترکیبی[5]، روش حل تحلیلی و دو روش عددی، یکی به صورت قطعی و دیگری به صورت تصادفی، روش‌های مورد استفاده آن‌ها در این امر بود. نتایج حاکی از برتری روش‌های عددی در ترسیم ناحیه حفاظتی چاه بود (Dong et al., 2013). زارعی دودجی و سامانی یک راه حل تحلیلی جهت تعیین ناحیه حریم در دو آبخوان محصور و آزادِ جزیره‌ای شکل که حاوی چهار چاه بهره‌برداری بود ارائه کردند و در پژوهش خود در مورد قابلیت و کارایی این روش بحث کردند و نهایتاً نتایج را مناسب و رضایت‌بخش توصیف کردند (Zarei-Doudeji and Samani, 2014). سامانی و کامرانی (۱۳۹۵) به کمک مدل مادفلو در نرم‌افزار GMS سطح آب زیرزمینی را در بازه زمانی ۸۹-۸۰ در آبخوان آسپاس استان فارسی، مدل‌سازی کرد. پس از اجرای مدل و بهینه‌سازی پارامترهای ورودی آن به کمک ModPath، حریم کمّی تمامی چاه‌های آب شرب موجود در محدوده مورد مطالعه را تعیین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که گسترش حریم تابع دو عامل شیب هیدرولیکی و مرزهای تغذیه‌ای است و با توجه به این دو عامل الگوی گسترش زون گیرش تغییر می‌کند. زارعی دودجی و سامانی در مطالعه‌ای دیگر یک راه حلی تحلیلی ارائه کردند که به کمک آن می‌توانستند ناحیه حفاظتی چاه را برای هر نوع آبخوانی که هندسه مستطیل دارد ترسیم کند و آن را به صورت گرافیکی نمایش دهد. فرمولی که ارائه کردند با افزایش تعداد چاه‌ها، تغییر مکان آن‌ها، تغییر شرایط مرزی و حتی تغییر نوع چاه (از بهره برداری به تزریق و بالعکس) منعطف عمل می‌کرد (Zarei-Doudeji and Samani, 2016).

فئو و همکاران بر اساس یک برنامه نوشته شده در زبان برنامه نویسی پایتون و نرم افزار GMS ناحیه حفاظتی چاه را برای یک آبخوان شرایط ماندگار ترسیم کردند. آن‌ها برای صحت سنجی کارشان ناحیه حفاظتی را برای ۴ مثال ساده محاسبه کردند و با حل تحلیلی مقایسه کردند. یک آبخوان همگن با یک چاه، یک آبخوان ناهمگن با یک چاه، دو آبخوان دیگر با چهار چاه یکی درجهت جریان و دیگری در خلاف جهت جریان، ۴ مثال ساده‌ای بودند که از آن در جهت اعتبارسنجی کارشان استفاده کردند. نتایج آن‌ها انطباق خوبی را با نتایج حل تحلیلی نشان می‌داد (Feo et al., 2017). استابولتیزیدیس و دوکو حریم کیفی چاه‌ها را در یک آبخوان واقعی در کشور چین ترسیم کردند، آن‌ها از نرم افزار WHaEM استفاده کردند، این نرم افزار از روش تحلیلی و شعاع ثابت حریم کمّی و کیفی چاه را محاسبه می‌کند. آن‌ها با استفاده از نتایج گرفته شده از مدل، موفق به برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری جهت کاهش ورود آلودگی به آبخوان شدند (Staboultzidis and Dokou, 2017).

گودرزی و اسلامیان عملکرد مدل‌های مادفلو و وَم (WhAEM[6]) را در تعیین ناحیه حفاظتی چاه‌های شرب دشت نجف آباد مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها این محدوده را برای بازه‌های زمانی دو، پنج و ده ساله ترسیم و مشخص نمودند. آن‌ها سطح آب زیرزمینی

1- Fixed Radius
2- Wyssling method
3- Krijgsman and Lobo-Ferreira method
4- Aquifer Simulation Model for Windows (ASMWIN)
5- Hybrid method
6- Well Head Protection Analytical Element Method

را به کمک هر دو مدل مادفلو و وم شبیه‌سازی کردند و سپس ناحیه حفاظتی را به صورت مجزا به کمک هر دو روش ترسیم کردند. نتایج آن‌ها نشان داد هر دو روش و مدل استفاده شده موثر در تعیین این ناحیه هستند (Goodarzi and Eslamian, 2019). محتشمی و همکاران (۲۰۱۹) به کمک مدل عددی بدون شبکه، حریم کمّی دو آبخوان را در شرایط غیرماندگار بررسی کردند. یک آبخوان، محصور استاندارد بوده و دیگری آزاد واقعی بود. نتایج آن‌ها نشان داد که گسترش حریم کمّی بیشتر تابع هدایت هیدرولیکی نسبت به آبدهی ویژه است.

در رابطه با مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی با استفاده از روش عددی المان محدود در نرم‌افزار FeFlow مطالعات اندکی انجام شده است. ژاوو و همکاران الگوی تغییرات پوشش گیاهی را با توجه به شرایط آب و هوایی در عمق‌های متفاوت آب زیرزمینی در مناطق بیابانی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند مهمترین فاکتور که بر روی سطح آب و متعاقباً بر روی پوشش گیاهی موثر است، حجم آب‌های زیرزمینی پمپاژ شده می‌باشد. در این تحقیق روش GIS با مدلFeFlow آب زیرزمینی ترکیب شده و تاثیرات تغییر پوشش گیاهی و آب‌های زیرزمینی به طور همزمان بررسی شده است. نتایج نشان دادند که سطح آب‌های زیرزمینی در حاشیه و قسمت‌های بالای سطح آبخوان روند کاهشی دارد و این کاهش باعث شوری زمین‌های آبرفتی و از بین رفتن پوشش گیاهی منطقه شده است (Zhao et al., 2005). سرور و اِگر شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی را با استفاده از FeFlow در حوضه سند پاکستان انجام دادند و یک مدل پیش‌بینی به کمک آن ارائه کردند. این مطالعه نشان داد که میزان پمپاژ بیش از مقدار حال حاضر می‌تواند منابع را به خطر بیندازد. همچنین اصلاح الگوی کشت می‌تواند بهترین روش برای مدیریت بهتر منابع آب مورد استفاده در این منطقه باشد (Sarwar and Eggers, 2006). ترفری و مافل به این نتیجه رسیدند که مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی نیاز به طیف وسیعی از داده‌ها دارد و FeFlow یک سیستم پیشرفته مدل آب زیرزمینی بر مبنای المان محدود است که بسته‌های گسترده و وسیعی از ویژگی‌ها را دارد، از جمله مدل‌سازی جریان‌ها در مناطق اشباع و غیر اشباع و انتقال آلودگی‌ها که با بکارگیری این طیف وسیع مدل پیش‌بینی مناسبی ارائه می‌کند. این برنامه از سال ۱۹۷۹ توسط موسسه برنامه‌ریزی و تحقیقات سیستم‌های منابع آب برلین در آلمان که بخشی از DHI می‌باشد درحال توسعه می‌باشد (Trefry and Muffel, 2007). اشرف و احمد در منطقه دوابین پاکستان سناریوهای مختلفی برای مطالعه تاثیر شرایط بد اقلیمی و آب و هوایی بر آب‌های زیرزمینی در نظر گرفتند. نتایج مطالعات آن‌ها اطلاعات مفیدی درمورد رفتار آبخوان جهت ساماندهی طرح‌های مدیریتی ارائه می‌کرد (Ashraf and Ahmad, 2008).

در این مطالعه برای اولین بار به کمک شبیه‌ساز FeFlow (بر اساس روش عددی اجزاء محدود) و الگوریتم گام تصادفی، جریان آب زیرزمینی در دو آبخوان استاندارد و واقعی مدل‌سازی می‌شود و سپس حریم کمّی چاه‌ها برای آن‌ها ترسیم و تعیین می‌شوند. همچنین به منظور بررسی توانایی و دقت شبیه‌ساز استفاده شده، سطح آب مدل‌سازی شده به کمک آن با نتایج شبیه‌سازهای قبلی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. از مزایای دیگر این شبیه‌ساز نسبت به شبیه‌سازهای قبلی می‌توان به قابلیت آن جهت ترسیم حریم کمّی هر نوع آبخوان، در هر نوع شرایط، ماندگار و غیرماندگار و در هر بازه زمانی اشاره کرد، زیرا که شبیه‌سازهای پرکاربرد قدیمی همچون GMS حریم را در شرایط ماندگار ترسیم می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

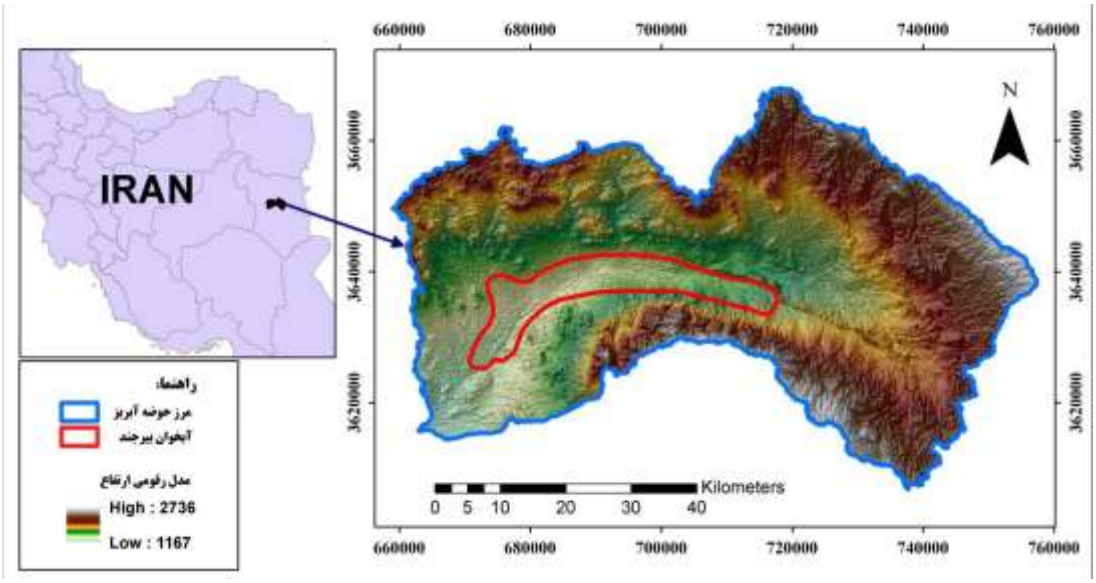
محدوده مطالعاتی آبخوان، در قسمت شمالی با مختصات تقریبی ’۳۲ و °۳۴ تا °۳۳و ’۸ عرض شمالی، °۵۸ و ’۴۱ تا °۵۹ و ’۴۴ شرقی قرار گرفته است (فرپور و همکاران، ۱۳۹۷). آبخوان آزاد دشت بیرجند با مساحت ۲۶۵ کیلومتر مربع در استان خراسان جنوبی واقع گردیده است (شکل ۱). دشت بیرجند طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزو مناطق خشک محسوب می‌شود. گفتنی است بیشترین ارتفاع در گوشه جنوب شرقی محدوده و کمترین آن در جنوب غربی است. به عبارتی شیب عمومی زمین از سمت شرق به سمت غرب می‌باشد (Mohtashami et al., 2017).

این آبخوان شامل ۱۹۰ چاه بهره‌برداری و ۱۰ چاه مشاهده‌ای است که موقعیت هر کدام از این چاه‌ها در آبخوان در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است. در این شکل چاه‌های بهره‌برداری مربع و به رنگ آبی هستند و چاه‌های مشاهده‌ای دایره‌ای و به رنگ قرمز دارند. همچنین در این شکل فلش‌هایی ترسیم شده‌اند که مرزهای هد ثابت را مشخص می‌کنند. در این آبخوان ۱۰ منطقه وجود دارد که شرایط مرزی در آن‌ها از نوع هد ثابت هستند. نُه منطقه جبهه ورودی به آبخوان بوده و یک منطقه که در سمت جنوبی غربی واقع شده است جبهه خروجی آبخوان می‌باشد.

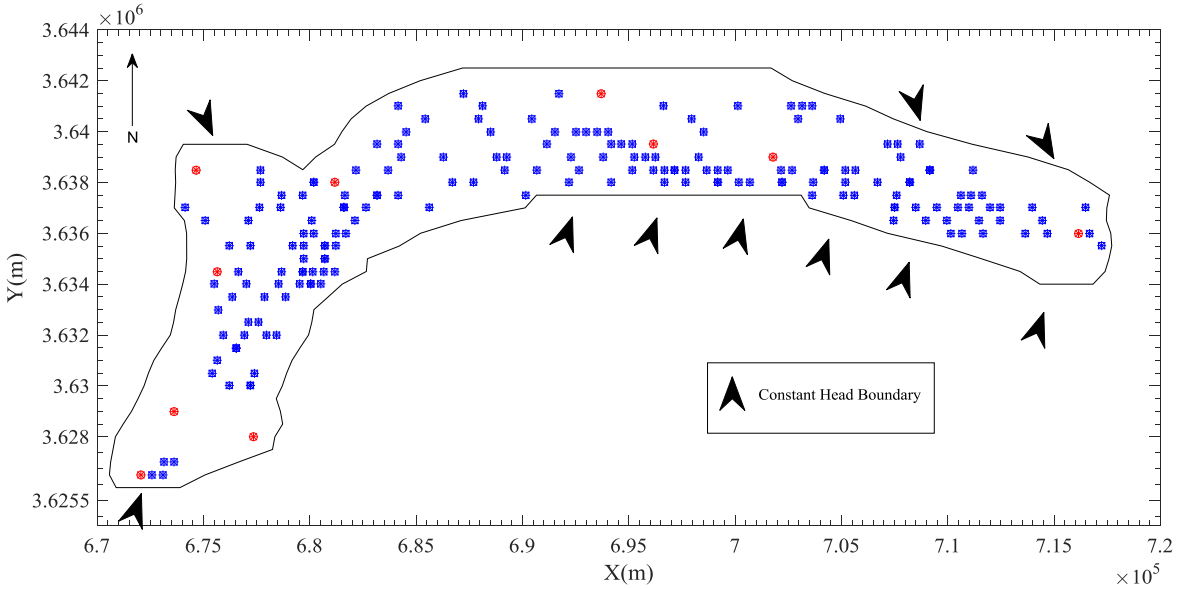
شبیه‌ساز FeFlow[1]

شبیه‌ساز Feflow، یک سامانه تعاملی برای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی به روش المان محدود می‌باشد که قادر است جریان زیرسطحی و انتقال آلودگی را در شرایط سه بعدی و دو بعدی در حالت اشباع یا غیراشباع، شرایط ماندگار یا غیرماندگار، انتقال جرم و عناصر واکنشی[2] را در محیط متخلخل مدل‌سازی کند.

1- Finite Element Subsurface Flow and Transport System
2- Reaction Element



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخوان بیرجند (Sadeghi Tabas et al., 2016)



شکل ۲- موقعیت چاه‌های بهره برداری (نقاط آبی) و چاه‌های مشاهده‌ای (نقاط قرمز) (محتشمی و همکاران، ۱۳۹۹)

این شبیه‌ساز رفتار آب زیرزمینی و حرکت آلاینده‌های این محیط را در توزیع زمانی و مکانی دلخواه توصیف می‌کند که کمک شایانی در برنامه‌های پایش آبخوان‌ها دارد. رابط کاربری پیشرفته این نرم‌افزار با داده‌های GIS و CAD از مزایای آن است. همچنین وجود ابزارهای گرافیکی جهت ایجاد شبکه‌های المان محدود، اعمال ویژگی‌های متفاوت زون‌ها و ایجاد شرایط مختلف مرزی، ورودی و درون‌یابی داده‌ها و متصل شدن به GIS، استفاده از الگوریتم‌های عددی مختلف و تکنیک‌های قوی تحلیل شبیه‌سازی و تحلیل تفسیر داده‌های به هنگام[1] از مولفه‌های اصلی FeFlow است. اولین نسخه نرم افزار در سال ۱۹۷۹ میلادی توسعه پیدا کرد و در سال ۲۰۱۳ کتابی با نام این نرم افزار در انتشارات اشپرینگر منتشر شد که محدوده وسیعی از مسائل فیزیکی و مفهومی محیط متخلخل را شامل می‌شود (Diersch, 2013). روش عددی استفاده شده در این شبیه‌ساز، اجزاء محدود بوده که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

1- Real Time Data

روش اجزای محدود[1]

روش اجزاء محدود یا روش المان محدود روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و حل معادله‌های انتگرالی است. اساس کار این روش حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی که با روش‌های عددی مانند اویلر حل می‌شوند، می‌باشد. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مسئله مهم رسیدن به معادله ساده‌ای است که از نظر عددی پایدار باشد. روش‌هایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد، که روش اجزاء محدود یکی از بهترین آن‌هاست. این روش در مورد مسائلی که مرزها نامنظم است یا در مسائلی که در محیط جریان ناهمگن و ناهمسانگرد می‌باشد انعطاف پذیری بالایی دارد. همچنین روش‌های اجزای محدود امکان حل مسائل دوگان [2]، مثل انتقال آلاینده یا مرزهای متحرک مانند تحرک سطح ایستابی را نیز فراهم می‌آورد. در نهایت انتخاب روش حل مسائل، بستگی به عواملی مثل پیچیدگی مسئله و کاربر پسند بودن هر کدام از روش‌ها دارد (Diersch, 2013).

معادله حاکم بر آب زیرزمینی در آبخوان محصور

معادله حاکم بر آب زیرزمینی در حالت دو بعدی برای یک آبخوان محصور در حالت غیرماندگار به شکل رابطه ۱ است (Bear, 1979; Dupuit, 1863).

$$k_x \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right) + k_y \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial H}{\partial y}\right) = S\frac{\partial H}{\partial t} + Q \times \delta(x - x_w)(y - y_w) + q \quad (۱)$$

که در آن شرایط اولیه از حالت ماندگار بدست می‌آید و در رابطه قرار می‌گیرد. شرایط مرزی برای معادله ۱ می‌تواند تنها از نوع هد ثابت(دیریشلت)، جریان ثابت(نیومن) و یا ترکیبی از این دو باشد. در این معادله، H سطح آب زیرزمینی وابسته به x و y است؛ k ضریب هدایت هیدرولیکی، k_x در جهت افقی و k_y در جهت عمودی؛ S ضریب ذخیره، Q دبی متمرکز (با علامت منفی در صورت چاه بهره‌برداری و با علامت مثبت در صورت چاه تزریق) و q دبی گسترده مانند باران یا تبخیر است.

پس از گسسته سازی کامل معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی به یک دسته معین معادله خطی به شکل $KU = F$ رسیده (Doulabi et al., 2019) که فرم گسسته شده هر پارامتر در روابط ۲ تا ۴ نشان داده شده است:

$$[K] = k\left[\iint_{\Omega} \frac{\partial W_i}{\partial x}\frac{\partial \emptyset}{\partial x}d\Omega + \iint_{\Omega} \frac{\partial W_i}{\partial y}\frac{\partial \emptyset}{\partial y}d\Omega\right] - \iint_{\Omega} W_i S_y\left(\frac{1}{\Delta t}\right)d\Omega \quad (۲)$$

$$[U] = H^{n+1} \quad (۳)$$

$$[F] = \iint_{\Omega} W_i S_y\left(\frac{H^n}{\Delta t}\right)d\Omega + Q \times \delta(x - x_w)(y - y_w) \quad (۴)$$

ماتریس K ماتریس سختی، F ماتریس بار و U ماتریس مجهول(سطح آب زیرزمینی در دوره بعدی) است.

معادله حاکم بر آب زیرزمینی در آبخوان آزاد

بر اساس فرض دوپوئی و معادلات پیوستگی زمانی که آبخوان آزاد باشد، معادله حاکم رابطه ۵ خواهد بود (Bear, 1979; Dupuit, 1863).

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x H\frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y H\frac{\partial H}{\partial y}\right) = \frac{S_y \partial H}{\partial t} + R \quad (۵)$$

که در آن S_y، آبدهی ویژه می‌باشد.

نهایتا پس از گسسته‌سازی به روش باقی‌مانده‌وزنی به همان دستگاه معادلات خطی $KU = F$ رسیده که هر کدام از پارامترها در روابط ۶ تا ۸ تعریف می‌شوند:

$$[K] = -2k\left[\iint_{\Omega} \frac{\partial W_i}{\partial x}H^n\frac{\partial \emptyset}{\partial x}d\Omega + \iint_{\Omega} \frac{\partial W_i}{\partial y}H^n\frac{\partial \emptyset}{\partial y}d\Omega\right] - 2\iint_{\Omega} W_i S_y\left(\frac{1}{\Delta t}\right)d\Omega. \quad (۶)$$

$$[U] = H^{n+1}. \quad (۷)$$

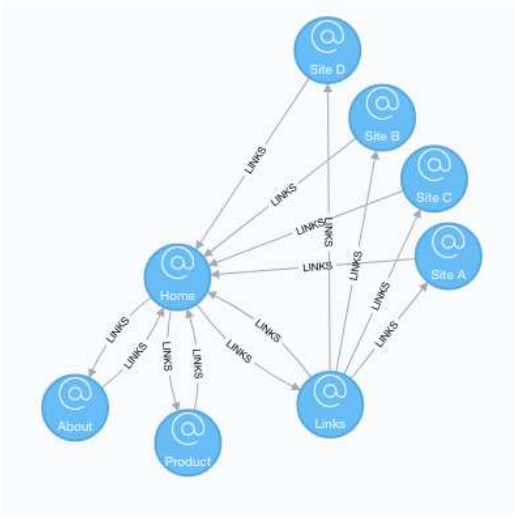
$$[F] = -2\iint_{\Omega} W_i S_y\left(\frac{H^n}{\Delta t}\right)d\Omega + 2\iint_{\Omega} W_i R d\Omega. \quad (۸)$$

الگوریتم گام تصادفی[3]

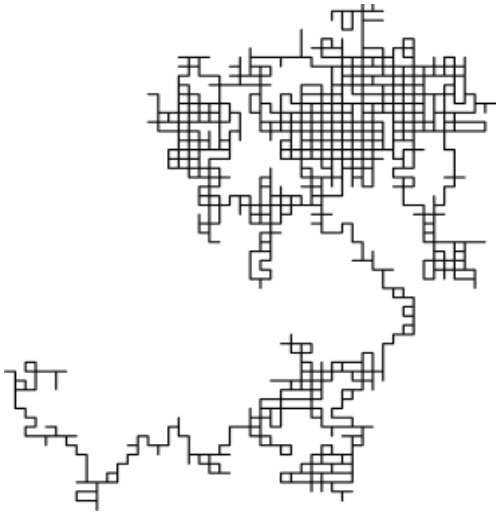
روش گام تصادفی الگوریتمی است که مسیر را به صورت تصادفی ارائه می‌کند؛ به این معنی که با شروع مسیر از یک نقطه به عنوان مبدا، نقطه‌ای دیگر در همسایگی آن به صورت تصادفی و یا بر اساس یک تابع توزیع احتمال انتخاب شده و این روند تا نقطه مقصد ادامه می‌یابد. گام تصادفی برای اولین بار توسط کارل پیرسون در سال ۱۹۰۵ ارائه شد (Pearson, 1905). این الگوریتم توسط پژوهشگران در دو دهه گذشته به دلیل کارایی بالای آن بسیار مورد استفاده قرار

1- Finite Element Method
2- Coupled
3- Random Walk Algorithm

گرفته است. از این الگوریتم در عملیات مسیریابی استفاده می‌شود، به عنوان مثال در علم بیولوژی به منظور شبیه‌سازی و یافتن مسیر حرکت حیوانات، از این روش بهره می‌برند. الگوریتم این روش در شکل ۳ نشان داده شده است. شبیه‌ساز FeFlow به کمک این الگوریتم حریم کمّی چاه‌های بهره برداری را تعیین و ترسیم می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۳- نمایش نحوه مسیر یابی توسط گام تصادفی((Pearson, 1905

آبخوان استاندارد

آبخوان محصور استانداردی برگرفته از مطالعه شریف و همکاران در شکل ۴ به نمایش گذاشته شده است. ابعاد این آبخوان و ضخامت آن به ترتیب ۱۰۰۰×۱۸۰۰ مترمربع و ۱۰ متر می باشد. همچنین ضریب ذخیره برای آبخوان ۰/۰۰۰۴ است (Sharief et al., 2008). آبخوان از دو آکی‌تارد که در شکل ۴ با رنگ کِرِمی متمایز شده‌اند با دبی ۰/۰۰۰۲۴ و ۰/۰۰۰۱۲ متر بر روز بارندگی، تغذیه می‌شود. سه چاه بهره‌برداری در مختصات‌های (۸۰۰،۲۰۰)، (۸۰۰،۸۰۰) و (۱۴۰۰،۶۰۰) وجود دارند که به ترتیب با دبی ۲۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ متر مکعب بر روز آب پمپاژ می‌کنند و در شکل ۴ با رنگ مشکی مشخص شده‌اند. همچنین یک چاه تغذیه به رنگ سبز در شکلی ۴ در موقعیت (۴۰۰،۸۰۰) قرار دارد و آبخوان را به نرخ ۸۰۰ مترمکعب بر روز تغذیه می‌کند. شرایط در آبخوان به صورت ناهمسانگرد و غیرهمگن بوده، به طوریکه آبخوان به سه منطقه با ضرایب انتقال مختلف تقسیم شده است؛ همچنین ضرایب انتقال در جهات افقی و عمودی در هر منطقه با هم متفاوت می باشد. شرایط مرزی برای مرزهای چپ و راست از نوع هد ثابت با مقادیر به ترتیب ۱۰۰ و ۹۵ متر می‌باشد. همچنین مرزهای شمالی و جنوبی از نوع بدون جریان و یا نفوذناپذیر هستند. قابل ذکر است این آبخوان سه چاه مشاهداتی در موقعیت‌های (۴۰۰،۶۰۰)، (۶۰۰،۱۰۰۰) و (۴۰۰،۱۶۰۰) دارد.

جدول ۱ مقادیر ضریب انتقال را برای سه منطقه آبخوان نشان می‌دهد:

نتایج و بحث

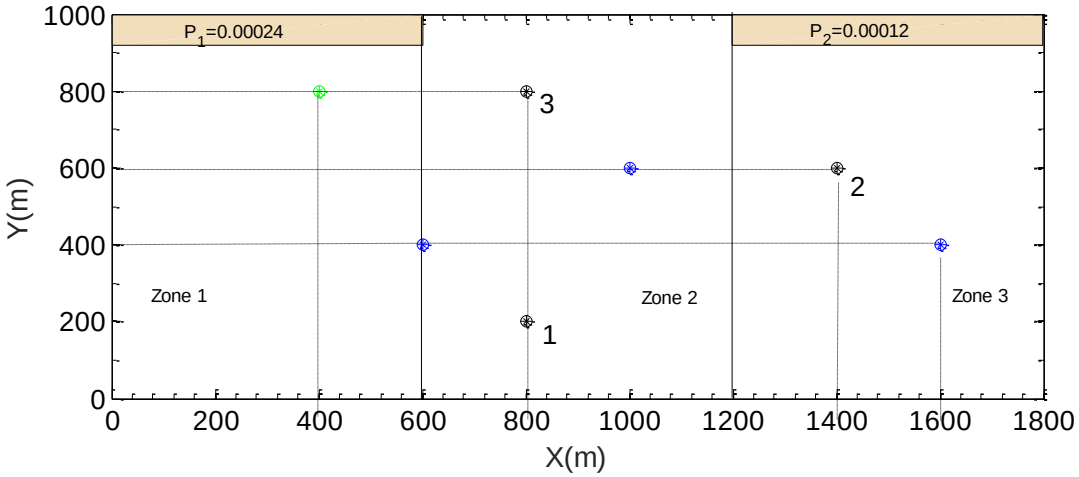
به منظور مدل‌سازی به کمک روش عددی المان محدود در شبیه‌ساز FeFlow، در مرحله اول آبخوان شبکه‌بندی می‌شود، انتخاب نوع شبکه مورد استفاده در آبخوان‌هایی با هندسه پیچیده تاثیر بسزایی در نتایج دارد. در این پژوهش شبکه‌بندی آبخوان به کمک مثلث بندی نامنتظم صورت گرفت. شکل ۵ شبکه‌بندی دامنه آبخوان محصور را نشان می‌دهد.

همانطور که از شکل پیداست با فاصله گرفتن از مرزها تراکم المان‌ها بیشتر شده و شبکه‌ها ریزتر می‌شوند. اطلاعات ورودی از قبیل مکان و دبی چاه‌های برداشت و چاه تزریق، تعیین مرزهای آبخوان، قابلیت انتقال، ضریب ذخیره و شرایط اولیه با توجه به اطلاعات مساله وارد می‌شوند. لازم به ذکر است منطقه مورد بررسی غیرایزوتوپیک یا انیزتروپیک بوده و مقادیر ضریب انتقال در دو جهت افقی و عمودی متفاوت می‌باشند.

شکل ۶-الف شرایط مرزی هد ثابت (دیریشلت) را در آبخوان با نماد دایره آبی مشخص کرده است که با توجه به اطلاعات مساله در مرزهای شرقی و غربی اعمال شده‌اند. لازم به ذکر است. مرزهای غربی هد ۱۰۰ متر و مرزهای شرقی هد ۹۵ متر دارند. همچنین مرزهای جریان صفر (نیومان) را که با نماد ضربدر قرمز متمایز شده‌اند نشان داده شده است. در این مرزها هیچ گونه ورود و خروج جریانی صورت نمی‌گیرد. اعمال دبی برداشت چاه‌های بهره‌برداری و دبی تزریق چاه تزریق نیز مشخص شده است. نقاط قرمز که قسمت بالایی آن فلشی دارد، چاه‌ها را نشان می‌دهد. تفاوت چاه‌های برداشت

و تزریق در اعمال علامت آن است. علامت دبی برای چاه‌های برداشت، منفی و برای چاه تزریق مثبت می‌باشد. در قسمت ب شکل ۶ مناطقی از آبخوان که درآن‌ها بارندگی صورت گرفته را نشان می‌دهد که با رنگ‌های قرمز و سبز از هم متمایز شده‌اند. رنگ قرمز و سبز تزریق به آبخوان از طریق بارندگی به اندازه ۰/۰۰۰۲۴ و ۰/۰۰۰۱۲ متر بر روز را نشان می‌دهد و رنگ بنفش زمینه، شبکه‌بندی و المان‌های آبخوان را مشخص می‌کند. از آن‌جایی که آبخوان انیزتروپیک بوده، ضرایب انتقال آبخوان در جهات افقی و عمودی متفاوت می‌باشند، قسمت الف شکل ۶ نسبت انیزتروپی (حاصل کسر ضریب انتقال ماکزیمم به ضریب انتقال مینیمم) سه منطقه آبخوان را نشان می‌دهد.

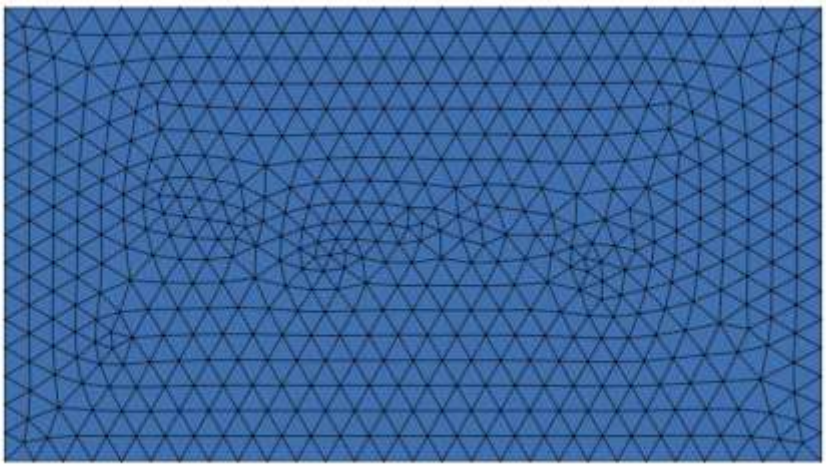
سطح آب زیرزمینی به کمک FeFlow در یک دوره ۱۰۰۰۰ روزه (سی ساله) مدل‌سازی و محاسبه شد و بر اساس آن درونیابی سطح آب صورت گرفت. شکل ۷ نتایج این درونیابی به همراه کانتورهای هم سطح آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.



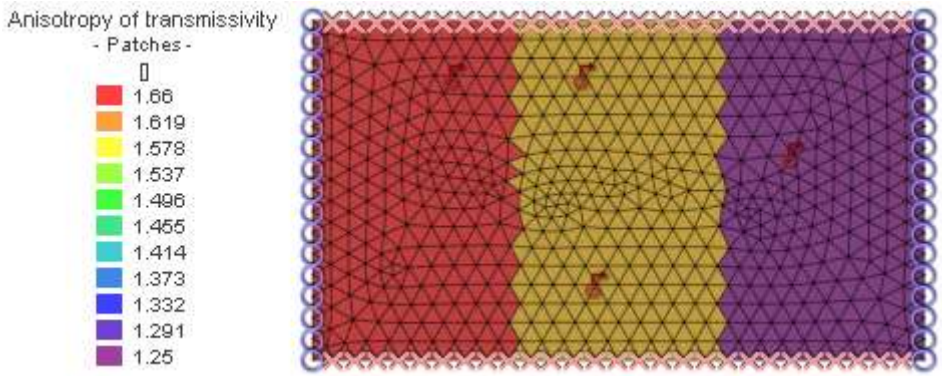
شکل ٤- نمایش آبخوان محصور استاندارد

جدول ۱- مشخصات پارامترهای موجود در آبخوان

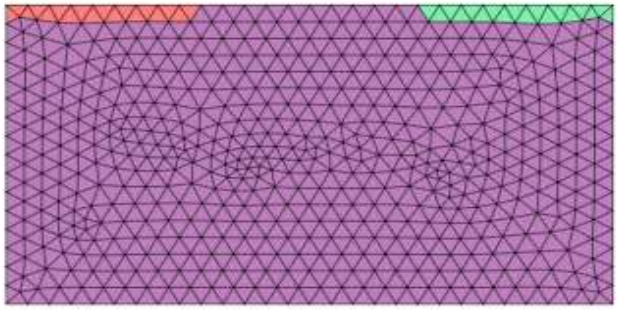
مشخصات آبخوان	منطقه ۱	منطقه ۲	منطقه ۳
ضریب انتقال افقی(متر مربع بر روز)	۵۰۰	۴۰۰	۲۵۰
ضریب انتقال عمودی(متر مربع بر روز)	۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰
تخلخل	۰/۲	۰/۲۵	۰/۱۵



شکل ۵- شبکه‌بندی آبخوان به کمک مدل اجزاء محدود

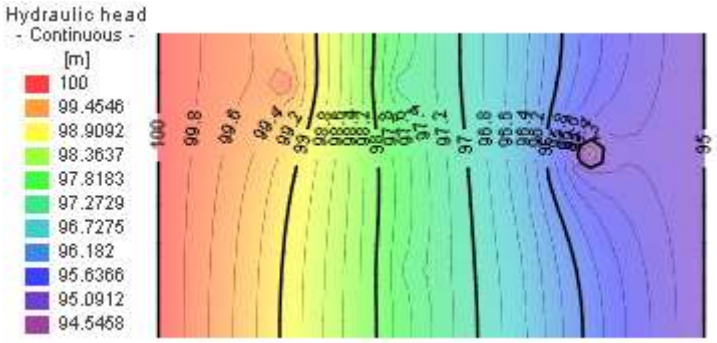


(الف)



(ب)

شکل ٦- ورود اطلاعات ورودی به مدل اجزاء محدود



شکل ۷- محاسبه سطح آب زیرزمینی به کمک مدل FeFlow

همانطور که از شکل پیداست سطح آب زیرزمینی در مرزهای هد ثابت پس از گذشت دوره ۱۰۰۰۰ روزه، بدون تغییر بوده به‌طوری‌که مرزهای غربی سطح آب زیرزمینی آن‌ها ۱۰۰ متر و مرزهای شرقی ۹۵ متر هستند. با عبور از غرب آبخوان به شرق آن از تراز سطح آب زیرزمینی کاسته شده به‌طوری‌که کمترین مقدار آن در چاه سوم واقع در موقعیت (۶۰۰، ۱۴۰۰) است و مقدار آن ۹۴/۵۴ متر می‌باشد و بیشترین سطح آب مربوط به قسمت چاه تزریق است که مقداری برابر با سطح آب مرزهای غربی دارد. یکی از علل چشمگیر نبودن افت سطح آب در این دوره ۱۰۰۰۰ روزه، مقدار بالای حجم آب تزریق شده به آبخوان از طریق چاه تزریق است.

به منظور بررسی دقت مدل از سه معیار خطای مطلق، خطای میانگین مطلق و خطای جذر میانگین مربعات استفاده شد و سطح آب زیرزمینی مدل‌سازی شده با سطح آب زیرمینی مشاهده شده مورد مقایسه قرار گرفت. این سه معیار از اصلی‌ترین شاخص‌های بررسی دقت آب زیرزمینی هستند و از روابط ۹ تا ۱۱ بدست می‌آیند (Sadeghi tabas et al., 2016).

$$ME = \frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}(h_o - h_s)}{m \times n} \qquad (۹)$$

$$MAE = \frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}|h_o - h_s|}{m \times n} \quad (۱۰)$$

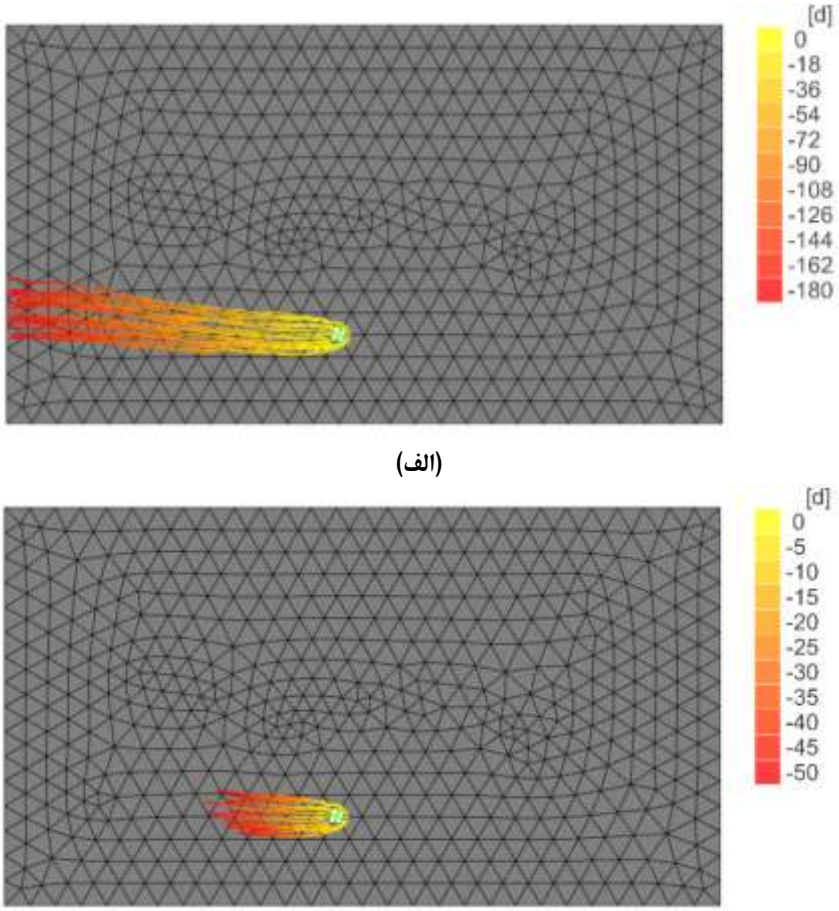
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}(h_o - h_s)^2}{m \times n}} \quad (۱۱)$$

که در آن h_o و h_s به ترتیب سطح آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است و m و n به ترتیب تعداد گام‌های زمانی و تعداد پیزومترهاست. با توجه به روابط ۹ تا ۱۱ این خطاها محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲- محاسبه معیار های خطا

معیار خطا	روش اجزاء محدود FeFlow	روش تفاضل محدود GMS (Sharief et al., 2008)
خطای میانگین(متر)	۰/۰۰۱۶	۰/۰۲۱
خطای مطلق میانگین(متر)	۰/۰۰۲۸	۰/۰۴۵
خطای جذر میانگین مربعات(متر)	۰/۱۴۱	۰/۲۴۹

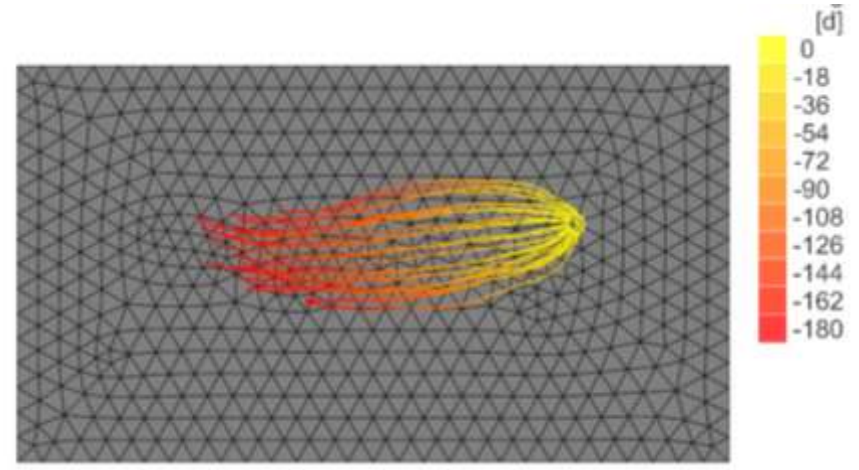
پس از مدل‌سازی سطح آب، حریم کمّی چاه‌ها به تفکیک هر چاه رسم می‌شود. شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ حریم کمّی را به ترتیب برای چاه‌های ۱، ۲ و ۳ برای دو دوره ۱۸۰ و ۵۰ روزه نشان می‌دهد.



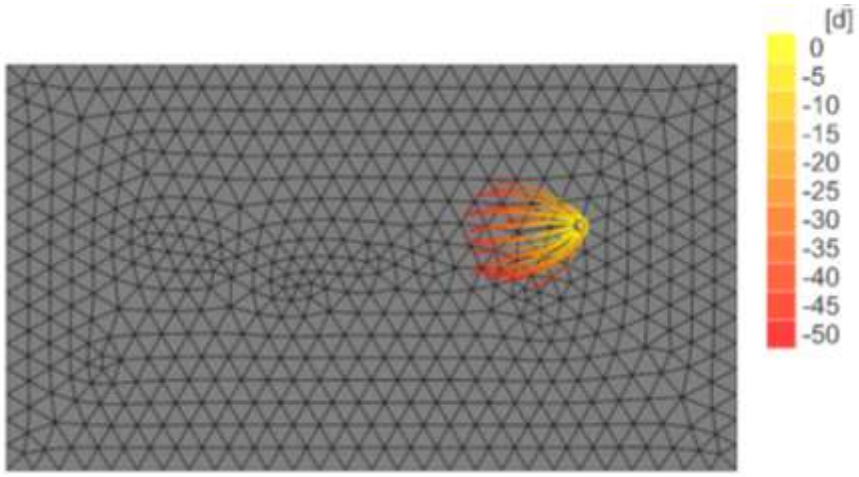
شکل ۸- ترسیم حریم کمّی چاه یک. الف)دوره ۱۸۰ روزه. ب) دوره ۵۰ روزه.

شکل ۸ حریم کمّی چاه شماره یک را در دو دوره ۵۰ و ۱۸۰ روزه نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، کشیدگی حریم به سمت قسمتی از آبخوان است که تراز آب زیرزمینی در آن جا بالاترین مقادیر را دارد. طول و عرض اولیه حریم در حالت ۱۸۰ روزه به ترتیب ۸۶۷/۴۴ و ۱۱۰/۰۱متر می‌باشد و این در حالی است که در دوره ۵۰ روزه این مقادیر، ۳۱۲/۸۳ و ۱۱۰/۰۱ متر می‌باشند. طول حریم کمتر شده ولی عرض آن بدون تغییر باقی مانده است. همانطور که مشخص است گسترش عرضی حریم چاه شماره یک در منطقه یک به علت ضرایب انتقال بالاتر آن نسبت به منطقه دو بیشتر می‌باشد.

در ادامه شکل ۹ حریم کمّی چاه شماره دو را که در منطقه سه قرار گرفته است نشان می‌دهد.



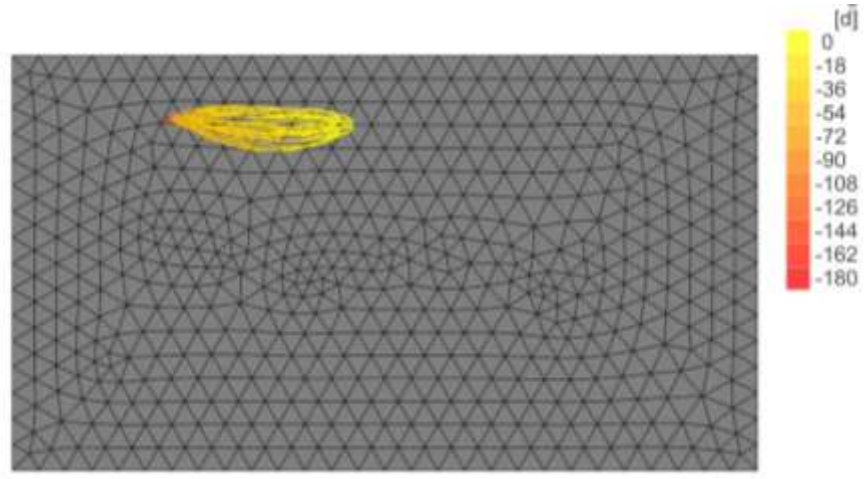
(الف)



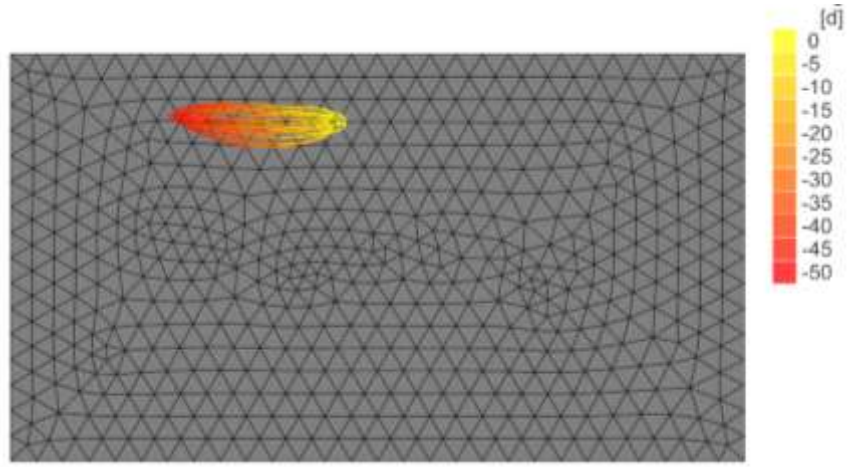
(ب)

شکل ۹- ترسیم حریم کمّی چاه دو. الف)دوره ۱۸۰ روزه. ب) دوره ۵۰ روزه

عرض حریم تشکیل شده برای این چاه نسبت به دو چاه دیگر بیشتر بوده و این ناحیه با ورود به منطقه دو آبخوان باریک شده و این مهم در شکل ۹-الف کاملا آشکار است. علت این امر، افزایش قابلیت انتقال پذیری در منطقه دو نسبت به منطقه سه می‌باشد. کشیدگی محدوده حریم به سمت سطح بالاتر آب زیرزمینی به عبارتی مرز غربی آبخوان است. عرض اولیه و طول حریم در دو حالت الف و ب به ترتیب۳۲۹/۲۳، ۹۸۱/۵۹ متر و ۳۰۲/۸۶، ۲۹۰/۴۱ می‌باشد. در ادامه، حریم برای چاه شماره سه که در منطقه دو واقع شده است رسم می‌گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- ترسیم حریم کمّی چاه سه. الف)دوره ۱۸۰ روزه. ب) دوره ۵۰ روزه

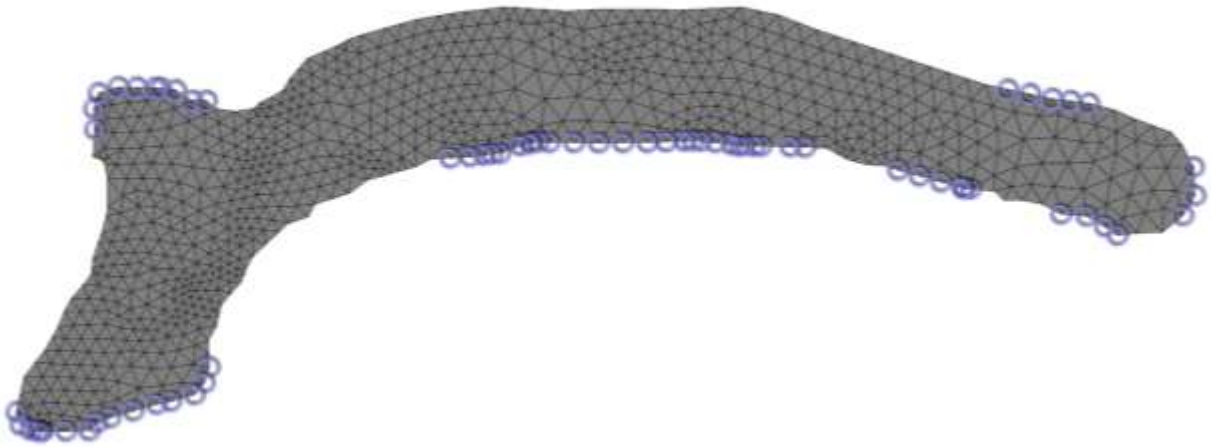
همانطور که از شکل پیداست، عرض اولیه و طول حریم در دو حالت الف و ب تغییری نکرده است، دلیل این امر سطح بالای آب زیرزمینی در این منطقه می باشد؛ که آن هم به سبب وجود چاه تزریق در نزدیکی این منطقه است که با تزریق آب به آبخوان موجب عدم کاهش سطح آب در این قسمت شده و نتیجتا شکل حریم بعد از گذشت ۱۸۰ روز هیچ تغییری نسبت به دوره ۵۰ روزه ندارد.

بنابراین در یک نتیجه‌گیری کلی کشیدگی حریم به سمت مناطق با سطح آب زیرزمینی بالاتر است. چاه‌های یک و دو به سمت غرب آبخوان (هد ثابت ۱۰۰ متر) و چاه سه به سمت چاه تزریق است. عرض حریم همچنین علاوه بر اینکه به مقدار دبی پمپاژ چاه‌ها بستگی دارد، عامل اصلی موثر در آن قابلیت انتقال و به تبع آن هدایت هیدرولیکی است؛ چرا که ضخامت آبخوان ثابت است. همچنین طول و عرض حریم بدست آمده از مدل FeFlow برای چاه‌های آبخوان در جدول ۳ ذکر شده است.

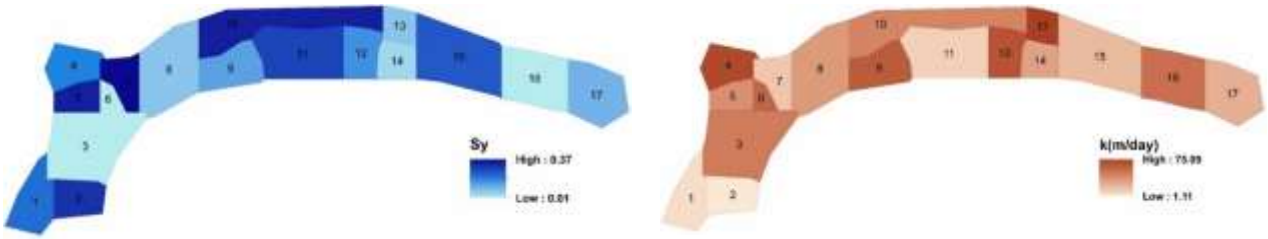
جدول ۳- عرض و طول حریم در دو دوره ۵۰ و ۱۸۰ روزه به تفکیک چاه‌ها

شماره چاه	دبی برداشت (متر مکعب بر روز)	دوره ۵۰ روزه		دوره ۱۸۰ روز	
		طول حریم (متر)	عرض اولیه حریم (متر)	طول حریم (متر)	عرض اولیه حریم (متر)
۱	۲۰۰	۳۱۲/۸۳	۱۱۰/۰۱	۸۶۷/۴۴	۱۱۰/۰۱
۲	۵۰۰	۲۹۰/۴۱	۳۰۲/۸۶	۹۸۱/۵۹	۳۲۹/۲۳
۳	۷۰۰	۳۴۱/۴۶	۱۰۱/۳۲	۳۴۱/۴۶	۱۰۱/۳۲

تمامی گام‌های مدلسازی برای آبخوان واقعی، آبخوان آزاد بیرجند، نیز انجام گرفت. محدوده مطالعاتی به شبیه‌ساز معرفی شد، سپس شرایط مرزی برای مساله تعریف شدند. شکل ۱۱ محدوده‌های هد ثابت آبخوان را نمایش می‌دهد که برگرفته از اطلاعات ذکر شده در قسمت مواد و روش‌هاست. اطلاعات ورودی همچون هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، مقادیر دبی چاه‌ها و بارندگی به مدل شبیه‌ساز وارد شدند. قابل ذکر است داده‌های هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه مطابق با پژوهش صادقی طبس و همکاران که این مقادیر را واسنجی نمودند وارد مدل شد. شکل ۱۲ نقشه هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه را به ترتیب برای آبخوان نشان می‌دهد. مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه بین ۷۵/۰۹ و ۱/۱۱ متر بر روز تغییر می‌کند. بیشترین آن مربوط به زون ۱۳ و کمترین آن مربوط به زون ۲ می‌باشد. همچنین در مورد آبدهی ویژه، بیشترین این مقدار برای زون ۷ و کمترین آن برای زون ۳ می باشد.



شکل ۱۱- شرایط مرزی هد ثابت تعریف شده در مدل FeFlow



شکل ۱۲- مقادیر واسنجی شده الف) هدایت هیدرولیکی ب) آبدهی ویژه

مدلسازی در یک دوره یک ساله (۹۲-۹۱) با گام زمانی ماهانه صورت گرفت و سطح آب زیرزمینی برای کل منطقه محاسبه شد. نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۱۳ به تصویر کشده شده است.

شکل ۱۳ سطح آب زیرزمینی مدلسازی شده در آبخوان بیرجند را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، بیشترین سطح آب مربوط به نواحی شرقی بوده و با حرکت از شرق به غرب از مقدار سطح آب زیرزمینی کاسته شده و در نواحی جنوب غربی کمترین مقدار سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌شود.

نتایج بدست آمده از شبیه‌ساز FeFlow با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند و خطاهای اشاره شده در روابط ۹-۱۱ در جدول ۴ محاسبه شدند.

حال به کمک الگوریتم گام تصادفی، حریم کمّی برای ۵ چاه دلخواه از آبخوان ترسیم شدند. انتخاب چاه‌ها به صورت دلخواه بوده و سعی شده است کل مناطق آبخوان را پوشش دهد. ترسیم این ناحیه برای یک دوره پنج ساله و سی ساله در نظر گرفته شده و در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. جدول۵ مشخصات چاه‌های انتخابی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- سطح آب مدل‌سازی شده به کمک شبیه‌ساز FeFlow

جدول ٤- محاسبه معیارهای خطا

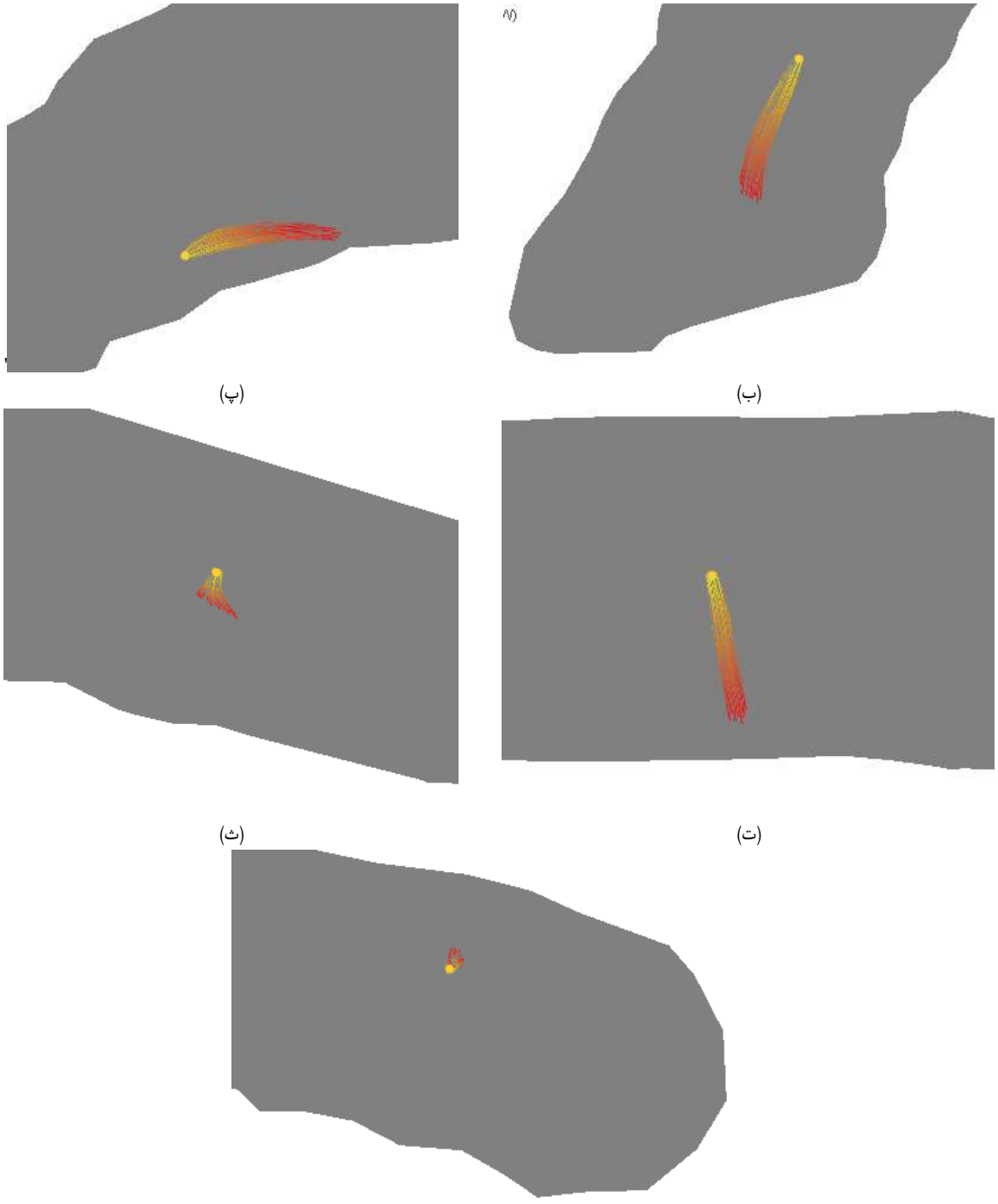
معیار خطا	روش اجزاء محدود FeFlow	روش تفاضل محدود GMS (Mohtashami et al., 2017)
خطای میانگین(متر)	۰/۱۱۲	۰/۱۵۹
خطای مطلق میانگین(متر)	۱/۰۲	۱/۴۳۴
خطای جذر میانگین مربعات(متر)	۰/۹۵۱	۱/۱۹۷

جدول ۵- مشخصات چاه‌های انتخابی

شماره چاه	دبی در هر ماه (مترمکعب در روز)	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)	آبدهی ویژه	گرادیان هیدرولیکی
۱	۷۵۶	۳۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۵
۲	۳۵۲/۸	۲۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۰۳
۳	۱۲۹/۶	۴/۹۸	۰/۳۳	۰/۰۰۲
۴	۷۶/۸	۱۴/۰۳	۰/۳۱	۰/۰۰۲
۵	۴۶/۸	۱۲/۴۳	۰/۰۳	۰/۰۰۲

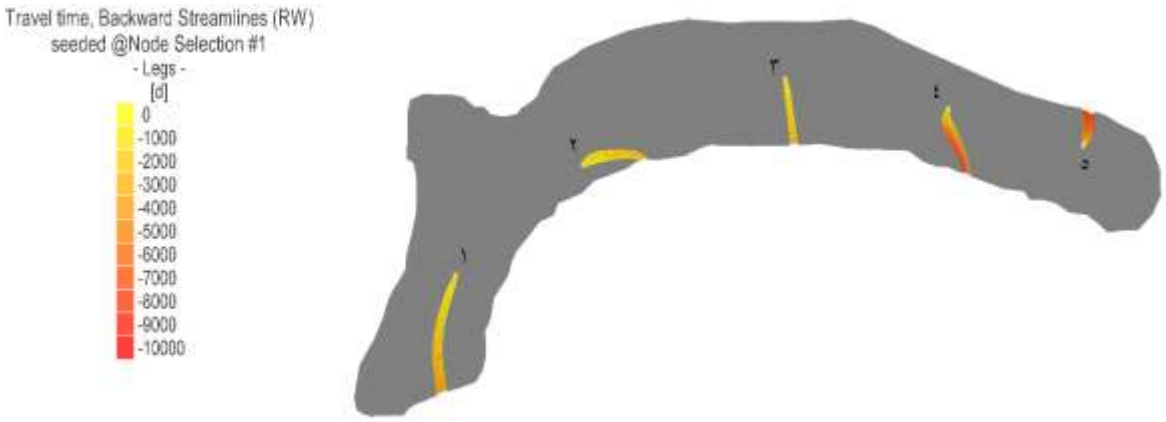


(الف)



شکل ١٤- حریم کمّی ۵ چاه انتخابی در دوره ۵ ساله

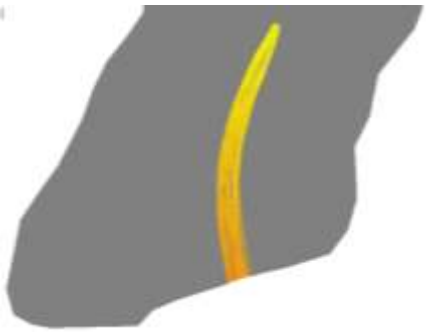
همانطور که از شکل پیداست کشیدگی این ناحیه، برای سه چاه یک، دو و سه نسبت به بقیه چاه‌ها بیشتر است. علت آن دبی بیشتر و هدایت هیدرولیکی بالاتر در آن قسمت می‌باشد که موجب شده افت سطح آب زیرزمینی در آن منطقه و به تبع ناحیه حریم کشیده‌تر شود. طول حریم برای سه چاه یک، دو و سه به ترتیب ۲۹۹۸/۱۴، ۲۶۵۵/۱۷ و ۲۳۰۰/۴۹ متر است و این در حالی است که این اندازه برای چاه‌های ۴ و ۵ ، ۶۹۴/۳۲ و ۳۶۴/۶۲ متر می‌باشد. روند گسترش حریم به سمت مناطقی است که شرایط مرزی هد ثابت دارند. در ادامه حریم برای یک دوره سی ساله ترسیم شده است.


Travel time, Backward Streamlines (RW)
seeded @Node Selection #1
- Legs -
[d]
0
-1000
-2000
-3000
-4000
-5000
-6000
-7000
-8000
-9000
-10000

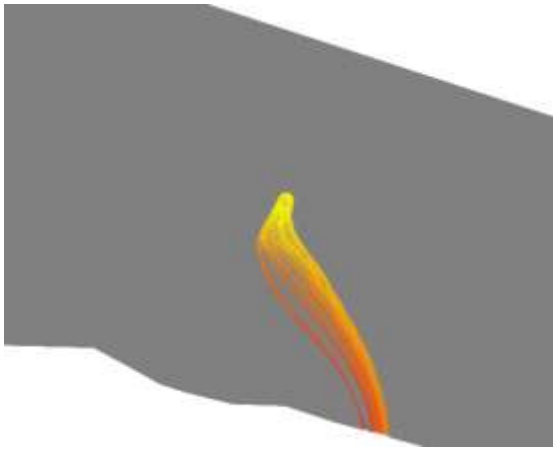
(الف)



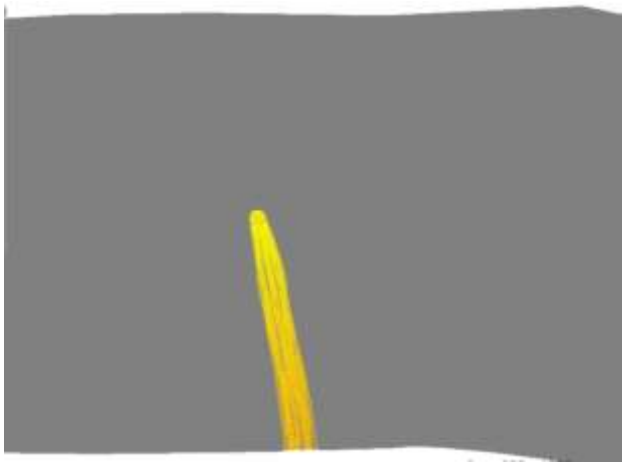
(پ)



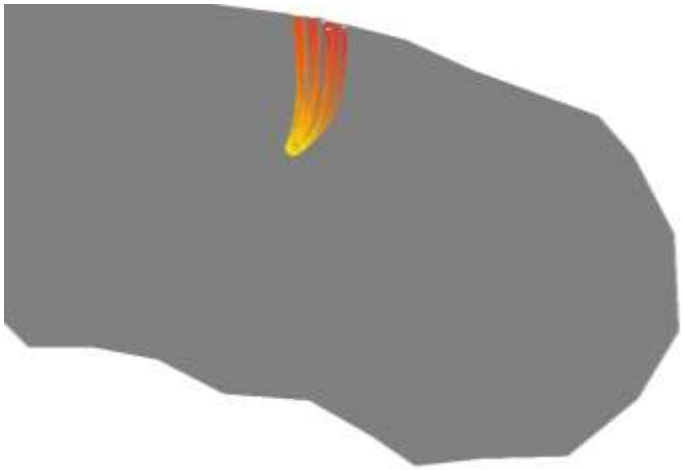
(ب)



(ث)



(ت)



(ج)

شکل ۱۵- الف) ترسیم حریم کمّی برای ۵ چاه دلخواه. ب) حریم کمّی چاه ۱. پ) حریم کمّی چاه ۲. ت) حریم کمّی چاه ۳. ث) حریم کمّی چاه ٤. ج) حریم کمّی چاه ۵

شکل ۱۵ حریم پنج چاه دلخواه را در آبخوان بیرجند برای یک دوره سی ساله نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۵، هندسه حریم کمّی چاه‌ها تابع مرزهای تغذیه می‌باشد. در شرایط عادی، حریم کمّی در جهت خلاف شیب جریان آب زیرزمینی ناحیه‌ای گسترش می‌یابد ولی تحت تاثیر مرزهای تغذیه‌ای می‌تواند منحرف و با الگوی جریان محلی منطبق شود. این اتفاق برای هر پنج چاه آبخوان بیرجند رخ داده و مطابق با الگوی جریان و تحت‌تاثیر مرزهای هد ثابت قرار گرفته‌اند. به طوریکه حریم هر پنج چاه به سمت این مرزها کشیده شده است. چاه اول به محدوده هد ثابت شماره ۱۰، چاه دوم به محدوده ۱، چاه سوم به محدوده ۲، چاه چهارم به محدوده ۴ و چاه پنجم به محدوده ۷ هد ثابت منحرف شده است.

نکته دیگر چاه‌های شماره ۴ و ۵ هستند، که با توجه به رنگ حریمشان در مدت زمان بیشتری به محدوده هد ثابت می‌رسند و دلیل آن دبی کمتر به همراه هدایت هیدرولیکی کمتر آن منطقه و محدوده است. رنگ نارنجی متمایل به قرمز حریم در این دو چاه گواه این قضیه است.

نتیجه‌گیری

ترسیم حریم کمّی به کمک مدل‌های عددی همواره انطباق مناسبی با واقعیت آن دارد. در این مطالعه به کمک روش اجزاء محدود در شبیه‌ساز FeFlow و الگوریتم گام تصادفی، حریم کمّی چاه‌های موجود در یک آبخوان محصور استاندارد و آبخوان آزاد بیرجند ترسیم شدند. در آبخوان استاندارد از آن‌جایی که به صورت غیرایزوتروپیک بوده از سه منطقه با ضرایب انتقال متفاوت تشکیل شده است. چاه یک و سه در منطقه دو و چاه دو در منطقه سه قرار گرفته‌اند. نتایج ترسیم حریم در آبخوان استاندارد نشان دادند که: ۱- با گذشت زمان طول حریم چاه‌های یک و دو افزایش می‌یابد به طوریکه برای چاه یک، این مقدار از ۳۱۲/۸۳ متر به ۸۶۷/۴۴ متر و برای چاه دوم از ۲۹۰/۴۱ متر به ۹۸۱/۵۹ متر می‌رسد. از آن‌جایی که کشیدگی حریم به سمت مرز غربیست، نشان‌دهنده تمایل کشیده شدن حریم به سمت مناطقی است که سطح آب بالاتری دارند. ۲- عرض حریم وابسته به قابلیت انتقال‌پذیری منطقه است به طوریکه با افزایش قابلیت انتقال یک منطقه عرض حریم بیشتر شده و این درحالی است که با ورود حریم به منطقه با قابلیت انتقال کمتر، از میزان عرض حریم کاسته می‌شود. به طوریکه در چاه شماره ۱، که در منطقه دو واقع است حریم عرض ۱۱۰/۰۱ متر را داشته و این درحال است که در منطقه سه عرض آن به ۱۲۴/۵۲ متر می‌رسد. افزایش ۱۴/۵۱ متری عرض حریم گواه این قضیه می‌باشد، زیرا که قابلیت انتقال در منطقه ۲ بیشتر از منطقه ۱ است. همچنین نتایج در ترسیم حریم در آبخوان بیرجند نشان دادند شکل حریم به مقدار زیادی وابسته به قابلیت انتقال پذیری و یا هدایت هیدرولیکی آبخوان است. با توجه به بررسی شکل گسترش حریم در دو دوره ۵ و سی ساله برای ۵ چاه انتخابی در آبخوان آزاد بیرجند، مشخص شد که کشیدگی این محدوده به سمت مناطقی از مرز هد ثابت بوده و مطابق با الگوی جریان می‌باشد. به طوریکه در دوره ۵ ساله، جهت کشیدگی حریم به سمت مناطق هد ثابت است، و در دوره سی ساله با افت بیشتر سطح آب، حریم دیگر به این مناطق رسیده است. نکته دیگر تاثیر دبی چاه بر شکل حریم است. به طوریکه در چاه شماره ۵، که دبی برداشت آن نسبت به بقیه چاه‌ها کمترین است، طول حریم آن در دوره ۵ ساله ۳۶۴/۶۲ متر می‌باشد.

منابع

سامانی، ن.، و کامرانی، ص. ۱۳۹۵ .ارزیابی حریم کمی و کیفی چاه های آب شرب نسبت به نیترات مطالعه موردی: دشت آسپاس شهرستان اقلید، استان فارس .زمین شناسی کاربردی پیشرفته. ۶(۲) :۲۹-۴۰.

فرپور، ا.، رمضانی، ی. و اکبرپور، ا .۱۳۹۷. شبیه‌سازی عددی روند تغییرات کروم در آبخوان دشت بیرجند .نشریه علمی پژوهشی آبیاری و زهکشی ایران.۱۲(۵):۱۲۰۳-۱۲۱۶.

محتشمی، ع.، هاشمی منفرد، س.آ.، عزیزیان، غ.ز. و اکبرپور، ا. ۱۳۹۸. محاسبه بیلان آب زیرزمینی به کمک روش عددی (MLPG مطالعه موردی :آبخوان آزاد بیرجند). نشریه علمی-پژوهشی آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۴):۱۴۶۰-۱۴۷۴

Ashraf, A., and Ahmad, Z. 2008. Regional groundwater flow modelling of Upper Chaj Doab of Indus Basin, Pakistan using finite element model (Feflow) and geoinformatics. Geophys. J. Int. 173(1):17–24.

Bear, J. 1979. Hydraulics of groundwater. the University of Michigan: McGraw-Hill International Book Co.

Diersch, H.J.G. 2013. FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer Science & Business Media.

Dong, Y., Xu, H., and Li, G. 2013. Wellhead protection area delineation using multiple methods: a case study in Beijing. Environ Earth Science 70:481-488.

Doulabi, F., Akbarpour, A., Akbari, M., and Mohtashami, M. 2019. Numerical Simulation of Groundwater Recharge by Injection Wells with Using Meshless Local Petrov-Galerkin. Iranian Journal of Irrigation & Drainage 13(5):1246-1256.

Dupouit, J., 1863. Estudes Theoriques et Pratiques sur le Mouvement desEaux. Paris: Dunod.

Feo, A., Zanini, A., Petrella, E., and Celico, F. 2017. A Python Script to Compute Isochrones for MODFLOW. Groundwater 10:1-7.

Ferreira, J.P., Krijgsman, B., and Feseker, T. 2004. Models for wellhead protection in regional unconfined aquifers and stratified aquifers. Geofísica Internacional 43(4):651-665.

Goodarzi, M., and Eslamian, S.S. 2019. Evaluation of WhAEM and MODFLOW models to determine the protection zone of drinking wells. Environmental Earth Sciences 78:195-203.

Miller C. 2003. A comparison of wellhead protection area delineation methods for public drinking water systems in Whatcom County. Washington Journal Environ Health 66(2):17-23.

Mohtashami, A., Akbarpour, A., and Mollazadeh, M. 2017. Development of two dimensional groundwater flow simulation model using meshless method based on MLS approximation function in unconfined aquifer in transient state. Journal of Hydroinformatics 19(5):640-652.

Mohtashami, A., Akbarpour, A., and Mollazadeh, M. 2017. Modeling of groundwater flow in unconfined aquifer in steady state with meshless local Petrov-Galerkin. Modares Mechanical Engineering 17(2):393-403.

Mohtashami, A., Hashemi Monfared, S.A., Azizyan, G., and Akbarpour, A. 2019. Determination the capture zone of wells by using meshless local Petrov-Galerkin numerical model in confined aquifer in unsteady state (Case study: Birjand Aquifer). Iranian Journal of Ecohydrology 6(1):239-255.

Moinante, M., and Lobo-Ferreira, J. 2005. On wellhead protection assessment methods and a case-study application in Montemor-o-Novo, Portugal. In: The fourth inter-celtic colloquium on hydrology and management of water resources. 21-34.

Pearson, K. 1905. The problem of the random walk. Nature 72(1867):342.

Puchalski, G. 2009. Wellhead protection plan for the city of Barrett, s.l.: Minnesota Department of Health.

Sabetraftar, A. 2013. Guidelines for determining the protection zone of groundwater. Iran's Ministry of Energy. 621.

Sadeghi Tabas, S., Samadi, S.Z., Akbarpour, A., and Pourreza Bilondi, M. 2016. Sustainable groundwater modeling using single-and multi-objective optimization algorithms. Journal of Hydroinformatics 18(5):1-18.

Sharief, S.M., Eldho, T.I., and Rastgoi, A.K. 2008. Optimal Pumping Policy for Aquifer Decontamination by Pump and Treat Method. ISH Journal of Civil Engineering 14(2):1-17.

Siarkos, I., and lationopoulos, P. 2012. Delineation of wellhead protection zones for the control of point pollution sources in the aquifer of N. Greece. European Water 40:3-17.

Staboultzidis, A.G., and Dokou, Z. 2017. Capture Zone Delineation and Protection Area Mapping in the Aquifer of Aia, Crete, Greece. Enviromental process. 4(1):95-112.

Sarwar, A., and Eggers, H. 2006. Development of a conjunctive use model to evaluate alternative management options for surface and groundwater resources. Hydrogeological Journal 14(8):1676–1687.

Shaped Aquifers: Modeling and Application. International Journal of Science Technology and Society. 3.

Zhao, C., Wang, Y., Chen, X,I., and Li, B. 2005. Simulation of the effects of groundwater level on vegetation change by combining FEFLOW software, Ecollogical Modelling 187(2–3):341–351.

Trefry, M.G., and Muffels, C. 2007. FEFLOW: A finite-element ground water flow and transport modeling tool. Groundwater 45(5):525-528.

Zarei-Doudeji, S., and Samani, N. 2014. Capture zone of a multi-well system in bounded peninsula-shaped aquifers. Journal of Contamination Hyrology 164:114-124.

Zarei-Doudeji, S., and Samani, N. 2016. Capture Zone of a Multi-Well System in Bounded Rectangular-

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 1984-2002

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۰۲-۱۹۸۴

Determination of Well's Capture Zones Using Random Walk Algorithm and FeFlow Simulation Model

N. Majidi Khalilabad[1], A. Mohtashami[2], A. Akbarpour[3*]
Recived: Sep.19, 2020 Accepted: Nov.24, 2020

Abstract

Determination of wells' capture zones are one of the important issues which must be considered in every aquifers. Methods used for depicting this area divides into two simple and complex methods. Through the simple one several mathematical equations utilized and in the complex method, numerical models are applied. In this study, for the first time, the capture zone of the extraction wells in a standard confined aquifer and Birjand unconfined aquifer was determined using Feflow simulation model. After the simulation procedure in the period of 1390-1391 with monthly time step, the groundwater head is obtained, then the capture zone for each well was depicted. In confined aquifer this area individually determined for 3 extraction wells in two periods of 50 and 180 days. The results showed that the extension of the capture zone for all three wells is toward the part of the aquifer with higher groundwater level. Also, the results revealed that, in areas of the aquifer with higher transmissivity coefficient, the zone is more extended and for the areas with lower transmissivity coefficient, its width decreases and becomes narrower. For instance in second well the width of capture zone in the third zone is 302.86 m, however, it is 267.46 m in the second zone. In Birjand aquifer which consists of 190 extraction wells, 5 wells were chosen randomly to depict capture zone for them in five years and thirty years period. The results revealed that the extension of the capture zones were corresponded to the flow direction. Also, extraction rate of wells and hydraulic conductivity coefficient were two effective parameters in the shape of these zones. As the fifth well in Birjand aquifer with the least value of discharge rate had the smallest length of capture zones among all the wells.

Keywords: Confined and Unconfined Aquifer, Depiction of the Capture Zone, Finite Element Numerical Model, Random Walk Algorithm

1- Research Assistant in East Water & Environment Research Institute (EWERI)
2- Ph.D. Student of Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan
3- Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand
(*- Corresponding Author Email: akbarpour@birjand.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۱۲-۲۰۰۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2003-2012

مقاله پژوهشی

ارزیابی شاخص‌های مدیریت آب آبیاری در تولید انگور (مطالعه موردی استان مرکزی)

مصطفی گودرزی[1*]، فریبرز عباسی[2]، ابوالفضل هدایتی‌پور[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۴

چکیده

حجم آب کاربردی محصولات کشاورزی به‌عنوان یکی از شاخص‌های ارزیابی استفاده بهینه از منابع آب نقش مهمی در مدیریت و برنامه‌ریزی‌های کلان در حوزه مدیریت و مهندسی آب دارد. این تحقیق، باهدف اندازه‌گیری آب کاربردی و ارزیابی راندمان کاربرد و بهره‌وری آب انگور تحت مدیریت باغدار در استان مرکزی به‌عنوان یکی از قطب‌های تولید انگور کشور اجرا گردید. تاکستان‌های مورد مطالعه در سطح استان طوری انتخاب شدند که عوامل مختلف ازجمله روش آبیاری، بافت خاک، نوع منبع آب (سطحی یا زیرزمینی) و کیفیت آب آبیاری را پوشش دهند. باغات منتخب در طول فصل رشد مورد پایش قرار گرفتند و مواردی نظیر مدت زمان آبیاری، مقدار آب آبیاری، دور آبیاری و غیره یادداشت‌برداری شد. نتایج نشان داد که دور آبیاری در باغات انگور استان برای سامانه‌های آبیاری مختلف بین ۶ تا ۲۰ روز متغیر است و متوسط عمق آب آبیاری نیز بین ۳۰ تا ۱۸۵ میلی‌متر بود. نتایج نشان داد که حجم آب آبیاری باغات انگور در سطح استان بسته به روش آبیاری، نوبت آبیاری و نحوه مدیریت باغ متفاوت بوده و حجم آن از ۵۹۷۳ تا ۱۸۱۶۸ متر مکعب در هکتار متغیر بود. راندمان کاربرد آب آبیاری در باغات موردمطالعه از ۳۵ تا ۱۰۰ (به علت کم‌آبیاری) درصد متغیر و متوسط آن ۶۳ درصد بود. بهره‌وری آب نیز برای این محصول در سطح استان مرکزی بین ۱/۱ تا ۳/۷ با متوسط ۲/۶۲ کیلوگرم بر متر مکعب در نوسان بود. به‌طورکلی نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در سطح استان مرکزی نشان می‌دهد که صرف‌نظر از روش آبیاری مورداستفاده، مدیریت آبیاری توسط کشاورز نقش مهمی در میزان آب کاربردی در تاکستان‌های موردمطالعه دارد. نتایج این تحقیق بیانگر قابلیت اجرای کم‌آبیاری در سطح تاکستان‌های استان است، لذا ترویج و آموزش کم‌آبیاری به روش صحیح و کاربردی به باغداران می‌تواند باعث افزایش قابل‌توجه بهره‌وری آب در تولید انگور گردد.

واژه‌های کلیدی: آب کاربردی، بهره‌وری، نیاز آبی، تاکستان

مقدمه

با توجه به روند روزافزون نیاز بخش‌های مختلف به آب، مشکل خشکسالی و کمبود آب در سال‌های آینده حادتر خواهد شد. در چنین شرایطی یکی از راهکارهای مؤثر و عملی استفاده بهینه و صرفه‌جویی در مصرف آب است. مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی که بخش عمده‌ای از مصارف آب در ایران و جهان را نیز شامل می‌شود، می‌تواند بسیار مؤثر و راهگشا باشد. تخمین نسبتاً دقیق و یا تعیین شاخص‌های مدیریت مصرف آب ازجمله مقدار آب مصرفی، راندمان آبیاری و بهره‌وری آب محصولات زراعی و باغی مختلف در کشور از مهم‌ترین ابزارها و شاخص‌های کلیدی در برنامه‌ریزی‌های کلان مربوط به تأمین، تخصیص و مصرف اصولی از آب در بخش‌های مختلف ازجمله کشاورزی است. حجم آب مصرفی محصولات کشاورزی به‌عنوان یکی از شاخص‌های ارزیابی استفاده بهینه از منابع آب نقش بسیار مهمی در مدیریت و برنامه‌ریزی‌های کلان در حوزه مدیریت و مهندسی آب دارد.

انگور (*Vitis vinifera* L.) یک گیاه چوبی چندساله است که تولید میوه آن اقتصادی می‌باشد. انگور ازنظر ارزش غذایی و خواص بهداشتی دارای فواید فراوانی بوده و در آب انگور علاوه بر آب و قند، و اسیدهای مختلف، املاح معدنی نظیر آهک، منیزیم، آهن، منگنز و سیلیس وجود دارد. با توجه به کمبود آب در بسیاری از نقاط دنیا، بررسی میزان نیاز آبی انگور نیز مانند سایر محصولات مورد توجه قرار گرفته است. درختان انگور نسبت به سایر گیاهان، به کمبود آب مقاومت بیشتری نشان می‌دهند (شاهرخ‌نیا و کرمی، ۱۳۹۶).

۱- عضو هیات علمی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران
۲- استاد موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- عضو هیات علمی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: goodarzimustafa@gmail.com
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.11.2

پژوهش‌ها نشان داده است که حداکثر نیاز آبی انگور وقتی است که تخلیه مجاز رطوبتی خاک در حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد آب قابل استفاده گیاه باشد. بدیهی است در دورهٔ رسیدگی و برداشت محصول تخلیه مجاز رطوبتی بیش از این مقدار نیز می‌تواند باشد (Doorenbos and Kassam, 1979). نیاز آبی انگور از ۳۸۲۰ متر مکعب در هکتار در اردبیل تا ۱۲۱۷۰ مترمکعب در هکتار در کهنوج (استان کرمان) متغیّر است (فرشی و همکاران، ۱۳۷۶).

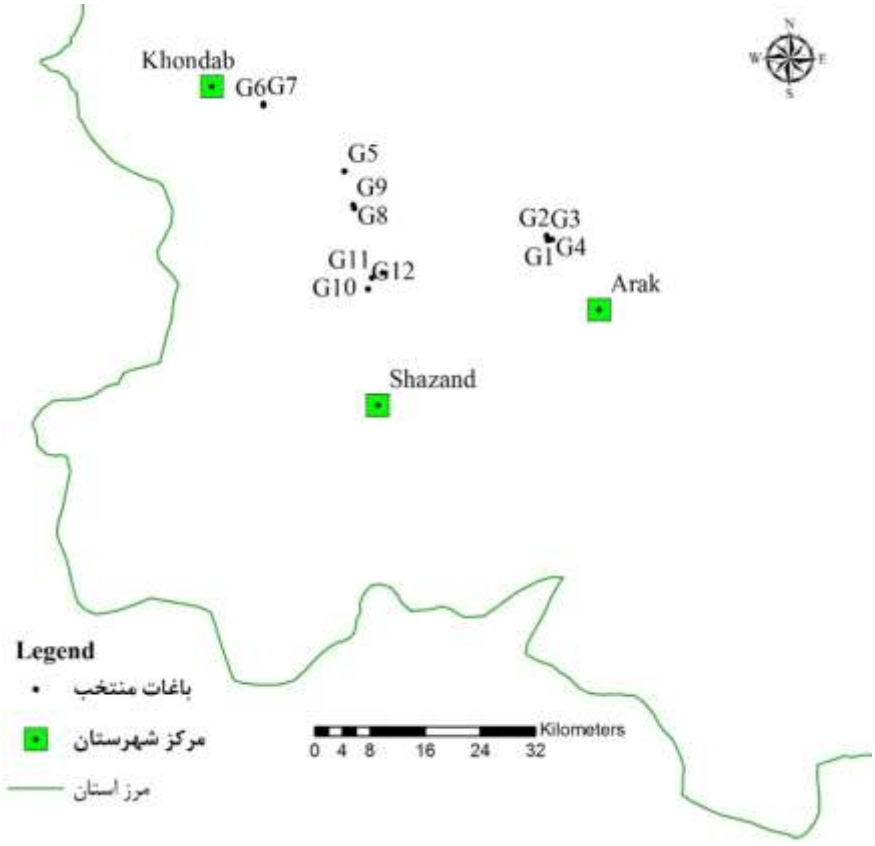
آراجو و همکاران در تحقیقی در کالیفرنیای آمریکا به مقایسه تأثیر دو روش آبیاری شیاری و قطره‌ای بر راندمان مصرف آب در درخت انگور پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که آب کاربردی برای هر درخت در روش قطره‌ای معادل ۳۹۰۵ لیتر و در آبیاری جویچه‌ای برابر با ۴۶۲۲ لیتر بود، اما مقادیر کارایی مصرف آب در هر دو روش یکسان به دست آمد (Araujo et al., 1995). ویلیامز و همکاران، مقدار آب مصرفی درخت انگور در ۳ سال اول استقرار درخت را توسط یک لایسیمتر بزرگ وزنی در کالیفرنیای آمریکا اندازه‌گیری نمودند. بدین منظور ۲ درخت انگور در یک لایسیمتر به ابعاد ۲×۴×۲ متری کشت گردید. همچنین با استفاده از مقادیر تبخیر و تعرق واقعی اندازه‌گیری شده مقادیر ضریب گیاهی را نیز تعیین نمودند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مقدار آب مصرفی از زمان کاشت تا شکوفه‌دهی ۳۰۰ میلی‌متر و از جوانه‌زنی تا برداشت میوه به‌ترتیب برای سال اول و دوم ۴۰۶ و ۵۸۴ میلی‌متر بود. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که میزان تبخیر سطحی در آبیاری سطحی انگور به حدود ۵۰ درصد نیاز آبی انگور در سال اول توسعه آن می‌رسد. بیشتر باران در سال دوم و سوم نیز صرف تبخیر از سطح خاک می‌گردد. ضریب گیاهی نیز در سال اول بین ۰/۱ تا ۰/۴ و در سال دوم به حدود ۰/۷ می‌رسد (Williams et al., 2003a). ویلیامز و همکاران در تحقیقی مقدار آب مصرفی درخت انگور بالغ را توسط یک لایسیمتر وزنی بزرگ در کالیفرنیای آمریکا اندازه‌گیری نمودند. بر اساس نتایج به دست آمده حداکثر مصرف آب روزانه درخت انگور به ترتیب در سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۱، ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ برابر با ۶/۱، ۶/۴، ۶ و ۶/۷ میلی‌متر بود. همچنین، مقدار آب مصرفی سالانه درخت انگور در سال اول معادل ۷۱۸ میلی‌متر و در سال‌های بعدی بین ۸۱۱ تا ۸۶۵ میلی‌متر بود. همچنین حداکثر ضریب گیاهی در سال اول آزمایش ۰/۸۷ و در سال‌های بعد به‌ترتیب ۱/۰۸، ۰/۹۸ و ۱/۰۸ بود (Williams et al., 2003b). ویلیامز و آیرس در تحقیقی میزان مصرف آب درخت انگور تحت تأثیر اعمال اسید جیبرلیک و حلقه‌برداری از درخت را اندازه‌گیری نمودند. بدین منظور از یک لایسیمتر وزنی بزرگ برای اندازه‌گیری آب مصرفی درخت در سه سال شامل سال اول تأثیر حلقه برداری و کاربرد جیبرلیک اسید، سال دوم فقط حلقه برداری و سال سوم بدون اعمال جیبرلیک اسید و حلقه برداری، استفاده گردید. بر اساس نتایج به دست آمده میزان مصرف آب درخت انگور در سال اول تا سوم به ترتیب برابر با ۸۳۸، ۷۰۸ و ۹۳۶ میلی‌متر بود. بر این اساس مشخص شد که حلقه‌برداری از درخت می‌تواند باعث کاهش مصرف آب گردد (Williams and Ayars, 2005).

جلینی (۱۳۸۵)، در تحقیقی به بررسی تأثیر مقدار آب آبیاری و روش آبیاری قطره‌ای بر عملکرد انگور و کارآیی مصرف آب پرداخت. این تحقیق در ایستگاه تحقیقات کشاورزی گلمکان استان خراسان رضوی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و به‌صورت فاکتوریل در چهار تکرار اجرا شد. فاکتورهای مورد ارزیابی شامل سه سطح آبیاری (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد آب مورد نیاز گیاه) و استفاده از آبیاری قطره‌ای به دو روش آبیاری (قطره‌ای و نواری تیپ) بود. نتایج نشان داد که بین دو روش آبیاری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد، اما بین سطوح مختلف آبیاری اختلاف معنی‌دار است. نتایج نشان داد که کارایی مصرف آب در سطوح ۷۵ و ۵۰ درصد نسبت به سطح ۱۰۰ درصد به ترتیب حدود ۱۷ و ۹ درصد بیشتر بوده است. نیکان‌فر و رضایی (۱۳۹۴)، واکنش درختان مسن انگور به تغییر روش آبیاری سطحی به قطره‌ای یا بابلر را بررسی نمودند. در این تحقیق با هدف افزایش صرفه‌جویی در مصرف آب اثرات سه روش آبیاری سطحی، بابلر و قطره‌ای با تأمین نیاز آبی کامل درخت انگور در شهرستان میاندوآب مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین کارایی مصرف آب با ۲/۲۱ کیلوگرم بر مترمکعب مربوط به روش آبیاری قطره‌ای بود. در روش آبیاری بابلر این شاخص برابر با ۲/۱۶ و در آبیاری سطحی برابر با ۱/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب بود. مقدار آب مصرفی اندازه‌گیری شده توسط کنتور در هر هکتار برای آبیاری سطحی معادل ۳۹۸۰۰ متر مکعب، برای آبیاری بابلر ۲۳۴۳۰ مترمکعب و برای آبیاری قطره‌ای برابر با ۲۲۱۰۰ متر مکعب بود. بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق، با توجه به کاهش نسبتاً کم عملکرد و نیز حفظ و حتی بهبود بسیاری از ویژگی‌های کیفی انگور، تغییر روش آبیاری از سطحی به بابلر برای تاکستان‌های مسن توصیه شده است.

نتزر و همکاران، نیاز آبی انگور را در ۶ فصل توسط لایسیمتر حجمی در جنوب فلسطین اشغالی اندازه‌گیری نمودند و با استفاده از روش پنمن مانتیث مقادیر ضریب گیاهی را نیز مشخص کردند. بر اساس نتایج به دست آمده حداکثر مقادیر نیاز آبی روزانه در فصل‌های مختلف بین ۷/۲۶ تا ۸/۵۹ میلی‌متر در روز و نیاز آبی کل در فصل‌های مختلف بین ۱۰۸۷ تا ۱۳۴۸ میلی‌متر متغیر بود. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیق آن‌ها استفاده از ضرایب گیاهی به دست آمده از آزمایش‌های لایسیمتری برای محاسبه نیاز آبیاری درخت انگور پیشنهاد شد (Netzer et al., 2009). اینتریگلیولو و همکاران در تحقیقی میزان نیاز آبی انگور را در نیویورک آمریکا بین ۱ تا ۲/۹ میلی‌متر در روز محاسبه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از چمن به‌عنوان گیاه مرجع برای تعیین نیاز آبی درخت

انگور با توجه به مقادیر ضریب گیاهی مناسب نیست و نیز به دلیل رابطه ضریب گیاهی با کمبود فشار بخار در منطقه مورد بررسی، نیاز به تحقیقات بیشتری در این زمینه وجود دارد (Intrigliolo et al., 2009).

ویلاگرا و همکاران در تحقیقی مقادیر نیاز آبی و ضریب گیاهی انگور را در شیلی تعیین نمودند. این تحقیق در یک باغ تجاری با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای انجام شد. در این تحقیق برای تعیین تبخیر و تعرق واقعی از روش ادی و برای تعیین تبخیر و تعرق پتانسیل از روش پنمن مانتیث استفاده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار نیاز آبی انگور ۸۱۰ میلی‌متر به دست آمد. همچنین مشخص گردید که مقادیر ضریب گیاهی به دست آمده در این تحقیق با مقادیر پیشنهادی فائو برابر نیست (Villagra et al., 2014). ویلیامز و فیدالیبس در تحقیقی مقدار آب مصرفی انگور را با استفاده از لایسیمتر تعیین نمودند. آن‌ها مقدار آب مصرفی انگور در سه سال ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ را به‌ترتیب ۹۵۲، ۹۴۳ و ۹۵۲ میلی‌متر برآورد نمودند (Williams and Fidelibus, 2016). این اندازه‌گیری‌ها به‌طور عمده در شرایط تاکستان‌های پژوهشی بوده و میزان آب کاربردی در تاکستان‌های تحت مدیریت بهره‌برداران ارائه نشده است. بنابراین، این تحقیق با هدف اندازه‌گیری مستقیم و مزرعه‌ای میزان آب کاربردی انگور تحت مدیریت باغدار در چند شهرستان استان مرکزی اجرا گردید.



شکل ۱- موقعیت مکانی باغات انگور مورد مطالعه در استان مرکزی

مواد و روش‌ها

این پروژه در ۱۲ تاکستان در دشت‌های مهم تولید انگور در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در استان مرکزی اجرا گردید. بر اساس آمارنامه کشاورزی ۹۶-۹۵ سطح کل باغات انگور در استان مرکزی ۱۵۱۸۴/۷ هکتار است که در این بین سه شهرستان اراک، شازند و خنداب دارای بیشترین سطح زیرکشت هستند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵). باغات منتخب برای اندازه‌گیری با هماهنگی مراکز خدمات و مدیریت‌های جهاد کشاورزی طوری انتخاب شدند که اغلب شرایط ازجمله بافت خاک و مدیریت‌های مختلف، شوری‌های آب و خاک مختلف، روش‌های آبیاری متنوع و غیره را پوشش دادند (شکل ۱). شاخص‌های مورد نظر از جمله آب کاربردی، بدون دخالت در برنامهٔ آبیاری آن‌ها و تحت مدیریت کشاورزان اندازه‌گیری شد. بدین‌صورت که ابتدا در هر یک از شهرستان‌های مورد مطالعه، باغات انگور با

هماهنگی مراکز خدمات و مدیریت‌های جهاد کشاورزی انتخاب و حجم آب داده‌شده بدون دخالت در برنامهٔ آبیاری باغداران اندازه‌گیری گردید. بدین منظور ابتدا مقدار دبی منبع آب (کانال، چاه، قنات و یا چشمه) با وسیله مناسب (فلوم و کنتور) در هر کدام از باغات منتخب اندازه‌گیری شد. پس از تعیین میزان دبی آب ورودی به باغ با پایش دقیق برنامه آبیاری باغ شامل زمان هر نوبت آبیاری، تعداد دفعات آبیاری در طول سال و همچنین اندازه‌گیری سطح زیر کشت محصول، حجم آب کاربردی محصول انگور برای هر کدام از باغات منتخب در طول فصل اندازه‌گیری شد. همچنین در هر کدام از باغات مواردی نظیر بافت خاک، هدایت الکتریکی خاک و آب آبیاری و ... اندازه‌گیری گردید.

در این تحقیق بارندگی مؤثر به روش SCS برآورد شد (SCS, 1972). نیاز آبی گیاه به روش پن‌من–مانتیث با استفاده از داده‌های سال زراعی جاری و ۱۰ سال اخیر برای منطقهٔ مورد نظر از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی تهیه و برآورد گردید. نیاز آبی گیاه مرجع با اِعمال ضریب گیاهی (Allen et al., 1998) به نیاز آبی خالص گیاه تبدیل شدند. عملکرد محصول در پایان فصل زراعی نیز اندازه‌گیری و بهره‌وری آب در هر یک از مناطق و تاکستان‌های مورد مطالعه محاسبه و مقایسه شد.

راندمان کاربرد آب در مزرعه با استفاده از نسبت نیاز خالص آبیاری (به روش پنمن–مانتیث با استفاده از داده‌های سال زراعی جاری) به حجم آب داده شده توسط بهره‌برداران برای هریک از تاکستان‌های مورد مطالعه برآورد و تحلیل شد. این روش متوسطی از شاخص راندمان کاربرد آب را در فصل زراعی ارائه می‌دهد. شاخص بهره‌وری آب از نسبت مقدار عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار) به حجم آب کاربردی (مترمکعب در هکتار) به دست آمد؛ به‌عبارت‌دیگر شاخص بهره‌وری آب در تولید انگور از رابطه زیر تعیین شد:

$$WP=\frac{CY}{CW} \quad (۱)$$

که در آن:

WP= بهره‌وری آب در تولید انگور (کیلوگرم بر متر مکعب آب کاربردی)

CY= عملکرد انگور (کیلوگرم در هکتار در سال)

CW= حجم آب کاربردی در تولید انگور (متر مکعب در هکتار در سال)

جدول ۱- مشخصات عمومی باغات انگور منتخب

کد باغ	آدرس(شهر- روستا)	سطح زیر کشت (ha)	بافت خاک	شوری خاک(dS/m)	شوری آب آبیاری (dS/m)	سن درختان (Year)	آرایش کاشت (m×m)
G1	روستای هزاوه- اراک	۵	لوم شنی	۱/۰۳	۰/۴۱	۷	۳×۲
G2	روستای هزاوه- اراک	۸	لوم رس شنی	۲/۱۴	۰/۴۱	۱۳	۳×۱/۸
G3	روستای هزاوه- اراک	۱	لوم رس شنی	۰/۴۵	۰/۴۱	۱۴	۳×۱/۸
G4	روستای هزاوه- اراک	۵	رس شنی	۱/۲۱	۰/۵۵	۱۵	۳×۲
G5	روستای جاورسیان- خنداب	۱	لوم رس شنی	۲/۹۰	۰/۹۸	۱۰	۳×۱/۵
G6	روستای گازران- خنداب	۲	لوم رس شنی	۰/۷۵	۰/۶۰	۸	۳×۲
G7	روستای گازران- خنداب	۲	رس شنی	۱/۰۸	۰/۶۰	۹	۳×۱/۸
G8	روستای ایوندنو- خنداب	۰/۵	لوم رس شنی	۰/۷۸	۰/۵۸	۱۰	۴×۳
G9	روستای ایوندنو- خنداب	۶	لوم رس شنی	۱/۸۱	۰/۶۷	۱۲	۴×۳
G10	روستای خسبیجان- شازند	۹	لوم رس شنی	۲/۱۶	۰/۵۲	۱۶	۴×۲
G11	روستای خسبیجان- شازند	۱	رس شنی	۳/۲۷	۰/۷۰	۳۰	۴×۲
G12	روستای خسبیجان- شازند	۸	رس شنی	۱/۲۱	۰/۴۵	۱۲	۴×۲/۵

نتایج و بحث

بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که در اغلب تاکستان‌های مورد بررسی شوری آب آبیاری و شوری عصاره اشباع خاک تاکستان‌ها از کیفیت خوبی برخوردار بود. متوسط هدایت الکتریکی آب آبیاری ۰/۵۸ و حداقل و حداکثر آن به ترتیب برابر با ۰/۴۱ و ۰/۹۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. با توجه به کیفیت آب آبیاری، شوری خاک تاکستان‌های مورد مطالعه هم از وضعیت خوبی برخوردار بود. بدین صورت که متوسط هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک ۱/۵۶ و حداقل و حداکثر آن به ترتیب برابر با ۰/۴۵ و ۲/۹ دسی‌زیمنس بر متر بود (جدول ۱).

در جدول (۲) نتایج اندازه‌گیری آب کاربردی باغات انگور در استان مرکزی ارائه شده است. میانگین حجم آب کاربردی انگور در مناطق مورد مطالعه در استان ۱۰۱۰۳ مترمکعب در هکتار بود. همچنین، بیشترین و کمترین حجم آب کاربردی به ترتیب برابر با ۵۹۷۳ و ۱۸۱۶۸ مترمکعب در هکتار بود. بر این اساس، بیشترین حجم آب کاربردی در روش آبیاری سطحی و کمترین آن در روش آبیاری قطره‌ای بوده است. متفاوت بودن حجم آب آبیاری علاوه بر تأثیر روش آبیاری مورد استفاده به نحوه مدیریت باغدار از جمله زمان انجام اولین آبیاری، دور آبیاری، زمان پایان آبیاری در انتهای فصل و حقابه در دسترس باغدار بستگی داشت.

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری آب کاربردی باغات انگور در استان مرکزی

کد باغ	روش آبیاری	تاریخ اولین آبیاری	دور آبیاری (day)	متوسط عمق آب هر آبیاری (mm)	تعداد کل نوبت‌های آبیاری	حجم آب آبیاری در طول فصل (m^3/ha)
G1	قطره‌ای	۱۳۹۸/۰۳/۰۱	۱۲	۴۹/۸	۱۲	۵۹۳۷
G2	سطحی	۱۳۹۸/۰۲/۳۰	۱۲	۱۳۱/۱	۱۲	۱۵۶۱۹
G3	سطحی	۱۳۹۸/۰۲/۲۱	۱۲	۱۴۰/۴	۱۳	۱۸۱۶۸
G4	سطحی	۱۳۹۸/۰۳/۱۵	۱۱	۹۲/۲	۱۵	۱۲۸۱۰
G5	سطحی	۱۳۹۸/۰۲/۲۰	۲۰	۸۴/۹	۸	۷۰۵۴
G6	سطحی	۱۳۹۸/۰۲/۱۰	۹	۴۶/۵	۱۴	۶۵۱۶
G7	سطحی	۱۳۹۸/۰۲/۱۰	۹	۸۶/۷	۱۲	۱۱۲۷۶
G8	قطره‌ای	۱۳۹۸/۰۲/۲۰	۶	۲۹/۵	۲۴	۷۰۲۲
G9	سطحی	۱۳۹۸/۰۳/۰۱	۹	۷۵/۸	۱۴	۱۰۶۱۷
G10	سطحی	۱۳۹۸/۰۲/۲۴	۱۲	۱۲۷	۱۰	۱۲۷۰۰
G11	سطحی	۱۳۹۸/۰۳/۱۵	۲۰	۱۸۴/۹	۶	۱۱۶۹۳
G12	سطحی	۱۳۹۸/۰۲/۲۵	۱۴	۱۱۴/۳	۹	۹۸۳۳

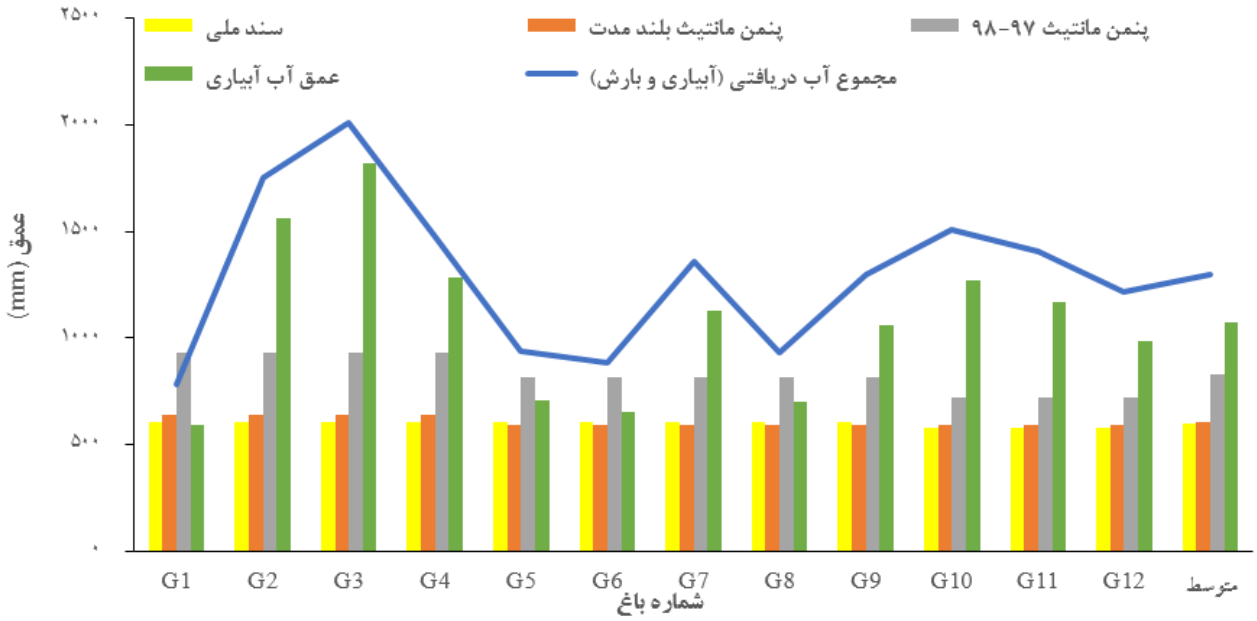
اعداد و ارقام مختلفی در خصوص میزان حجم آب کاربردی در باغات انگور در کشور گزارش شده است که به‌طور عمده در شرایط تاکستان‌های پژوهشی و با اعمال سطوح مختلف آب بوده، و مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج این تحقیق شاید منطقی نباشد. با این وجود به نتایج برخی از آن‌ها در ادامه اشاره شده است. نیکان‌فر و رضایی (۱۳۹۴)، متوسط سه سالهٔ حجم آب کاربردی انگور در میاندوآب را برای روش‌های آبیاری قطره‌ای، بابلر و سطحی را به‌ترتیب برابر با ۷۳۶۷، ۷۸۱۰ و ۱۳۲۶۷ مترمکعب بر هکتار گزارش نمودند. شاهرخ‌نیا و کرمی (۱۳۹۶) میانگین دو سالهٔ حجم داده‌شده به یک باغ انگور را در قیر و کارزین استان فارس با روش آبیاری قطره‌ای ۸۶۶۰ مترمکعب بر هکتار با مدیریت باغدار گزارش نمودند.

بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که باغداران تقریباً در تمام آبیاری‌ها ساعت آبیاری یکسانی را اعمال می‌نمایند و تنها چیزی که بر مقدار آبیاری آن‌ها تأثیر می‌گذارد، دبی دریافتی از منبع آب است. از طرفی در تمامی باغ‌ها به‌صورت حقابه‌ای آب دریافت می‌شود و اصولاً به نیاز آبی و حتی بارش مؤثر به طور علمی و اصولی توجهی نمی‌شود. همچنین مشاهدات و ارزیابی‌ها نشان داد که مدیریت آبیاری تأثیر زیادی بر مصرف آب در سطح منطقه دارد. به‌گونه‌ای که با توجه به زمان شروع آبیاری در ابتدای فصل، مدت زمان آبیاری، روش آبیاری، دور آبیاری و زمان قطع آبیاری در انتهای فصل، مقادیر آب کاربردی مختلفی برای سامانه‌های مختلف به دست آمد. دور آبیاری در باغات انگور مورد ارزیابی برای آبیاری قطره‌ای بین ۶ تا ۱۲ روز و برای آبیاری سطحی بین ۹ تا ۲۰ روز متغیر بود. علاوه‌براین، بسته به زمان شروع آبیاری در ابتدای فصل و قطع آبیاری در انتهای فصل و دور آبیاری، تعداد دفعات آبیاری برای آبیاری قطره‌ای بین ۱۲ تا ۲۴ نوبت و برای آبیاری سطحی بین ۶ تا ۱۵ نوبت

متغیر بود. همچنین بررسی‌ها نشان داد که به دلیل مسن بودن اکثر باغات در سطح استان، باغداران تمایل چندانی برای استفاده از آبیاری قطره‌ای ندارند و استفاده از آبیاری قطره‌ای در تاکستان‌ها در سطح استان محدود است.

نیاز آبی باغات انگور در استان مرکزی بر اساس روش سند ملی آب کشور ۶۰۷-۵۸۱ میلی‌متر است، درحالی‌که بر اساس روش پنمن مانتیث با داده‌های هواشناسی بلند مدت ۶۳۸-۵۹۳ میلی‌متر و بر اساس داده‌های هواشناسی سال زراعی اجرای پروژه ۹۳۳-۷۲۰ میلی‌متر بود. همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که با توجه به نحوه مدیریت باغ‌ها میزان عملکرد در باغ‌های انگور در سطح استان متفاوت است. متوسط عملکرد محصول برابر با ۲۴/۹ تن در هکتار و حداقل و حداکثر آن نیز به ترتیب برابر با ۱۴/۹ و ۳۶/۱ تن در هکتار بود.

در شکل ۲ نمودار نیاز آبی به روش‌های مختلف، عمق آب آبیاری اعمال شده و مجموع آب دریافتی شامل آبیاری و بارش مؤثر در باغ‌های انگور استان مرکزی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد مقادیر آب کاربردی در باغات مختلف متفاوت است که علت آن روش آبیاری مورد استفاده و مدیریت آبیاری توسط باغدار بود. به عنوان مثال در مقایسه دو باغ G1 و G3 که بیشترین اختلاف آب کاربردی را دارند علت کمتر بودن آب کاربردی در باغ G1 بر اساس نتایج جدول ۲ استفاده از روش آبیاری قطره‌ای، شروع دیرتر آبیاری‌ها در ابتدای فصل و تعداد آبیاری کمتر در کل فصل بوده است. متوسط نیاز آبی به روش سند ملی، پنمن مانتیث بلند مدت و پنمن مانتیث سال زراعی اجرای پروژه به ترتیب برابر با ۶۰۰، ۶۰۹ و ۸۳۰ میلی‌متر بوده است. ناصری و همکاران (۱۳۹۷)، مقدار نیاز خالص آبیاری انگور در استان مرکزی را بر اساس نتایج گزارش فرشی و همکاران (۱۳۷۶)، روش پنمن مانتیث بلند مدت و پنمن مانتیث ۱۰ ساله به ترتیب ۶۹۱، ۴۸۵ و ۴۶۹ میلی‌متر برآورد نمودند. باوجوداین، بر اساس نتایج تحقیق حاضر متوسط عمق آب آبیاری در اکثر باغ‌ها از مقدار نیاز آبی خالص بیشتر است. باوجوداین بایستی به این نکته توجه نمود که در روش‌های پنمن مانتیث و سند ملی طول دوره رشد و ضرایب گیاهی متناظر آن‌ها با واقعیت منطقه همخوانی ندارد. لذا، برای برآورد دقیق‌تر نیاز آبی با این روش‌ها بایستی طول دوره رشد و ضرایب متناظر برای منطقه اصلاح گردد. نکته قابل‌توجه دیگر در ارتباط با عمق آبیاری در سال زراعی تحقیق این است که با توجه به بارش‌های بسیار خوب زمستانه و بهاره در سال زراعی تحقیق (۱۳۹۸-۱۳۹۷) در سطح استان، اکثر باغداران دیرتر آبیاری باغ‌های انگور را شروع کردند و این بیانگر آن است که در اکثر باغ‌های مورد ارزیابی در سال‌های نرمال میزان آبیاری بیشتر از مقادیر بیان شده در این تحقیق است.



شکل ۲- مقایسه نیاز آبی خالص و عمق آب آبیاری در باغات انگور منتخب استان مرکزی

شاخص راندمان کاربرد برای همه تاکستان‌های مورد مطالعه برآورد شد. مقدار میانگین شاخص راندمان کاربرد آبیاری در طول فصل برای تاکستان‌های مورد مطالعه بین ۳۵ تا ۱۰۰ درصد متغیر و متوسط آن ۶۳ درصد بود (شکل ۳). دلیل زیاد بودن شاخص راندمان کاربرد در برخی از تاکستان‌های مورد مطالعه، اعمال کم‌آبیاری ناخواسته بوده است. برخی از بهره‌برداران آب کافی برای آبیاری

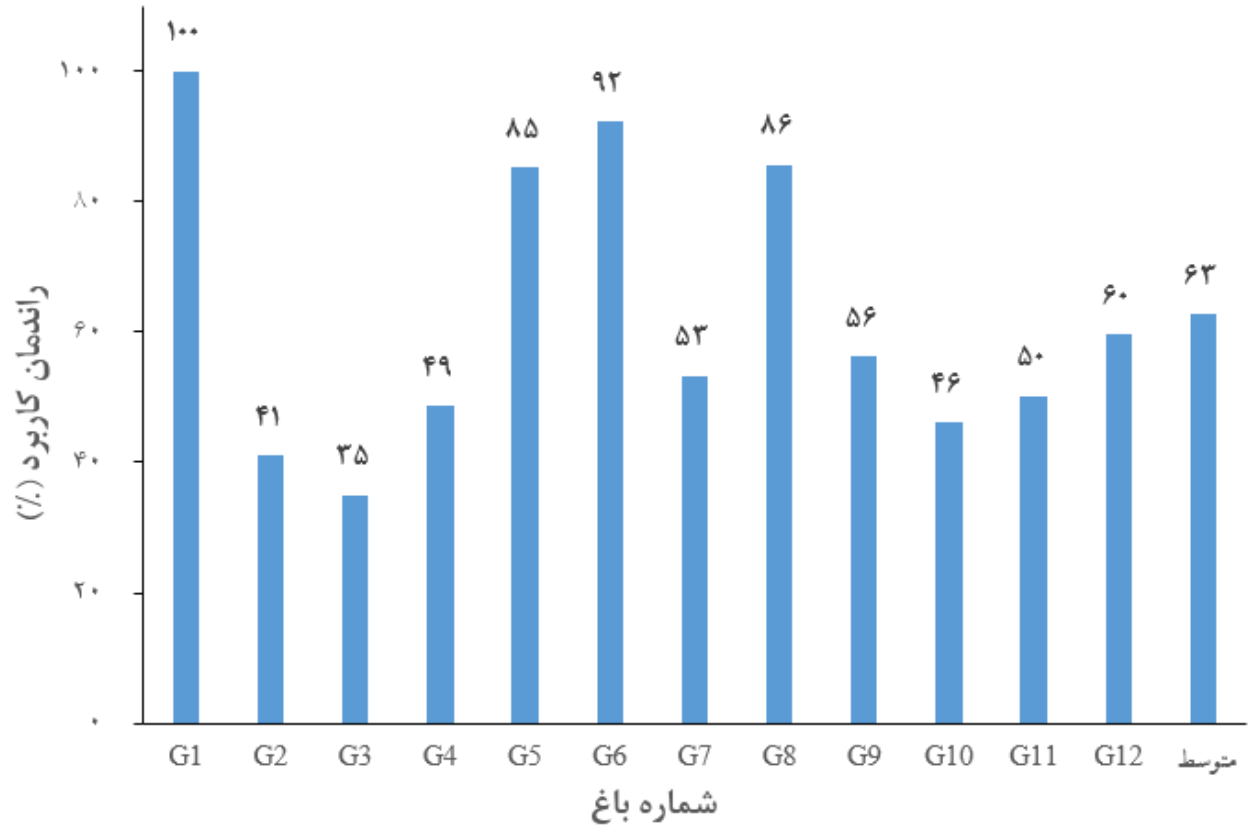
تاکستان‌های خود در اختیار نداشتند و یا مقداری از آب را به کشت محصولات دیگر اختصاص می‌دادند، لذا میانگین راندمان کاربرد این تاکستان‌ها بالا بوده و به طور ناخواسته در این باغ‌ها کم آبیاری اعمال شده است. با این حال، متوسط راندمان کاربرد برای محصولات باغی در کشور ۶۶/۳ درصد توسط عباسی و همکاران (۱۳۹۵) گزارش شده است که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. همچنین، عباسی و همکاران (۱۳۹۵) متوسط راندمان کاربرد را در استان مرکزی ۶۱ درصد برآورد نمودند.

میانگین شاخص بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری کل (آب آبیاری و باران مؤثر) در باغات مورد مطالعه به ترتیب ۲/۰۹ و ۲/۶۲ کیلوگرم بر مترمکعب است (شکل ۴). با توجه به اینکه آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه و تنش رطوبتی انجام نمی‌شود گیاه در مقاطعی آب بیشتری دریافت و در مقاطعی آب کمتر از حد مورد نیاز دریافت می‌کند و این مسئله باعث کاهش بهره‌وری آب و متغیر بودن آن در سطح منطقه شده است. این نتایج بیانگر قابلیت اجرای کم‌آبیاری در سطح تاکستان‌های استان است، لذا ترویج و آموزش کم‌آبیاری به روش صحیح و کاربردی به باغداران می‌تواند باعث افزایش قابل‌توجه راندمان کاربرد و بهره‌وری آب در تولید انگور گردد.

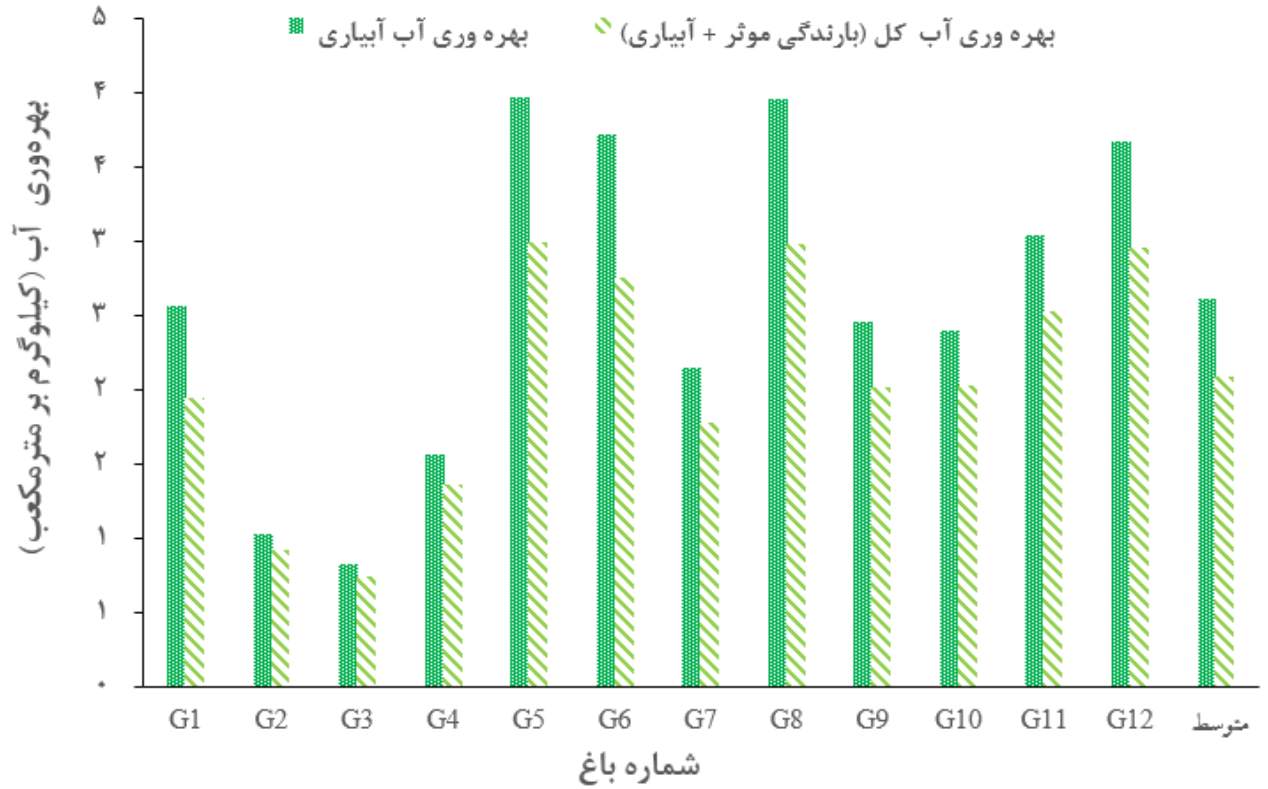
با توجه به مسن بودن اکثر باغات در سطح استان مرکزی، باغداران تمایل چندانی به استفاده از آبیاری قطره‌ای در تاکستان‌ها ندارند. باوجوداین، نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار متوسط حجم کل آبیاری، راندمان کاربرد و بهره‌وری آب در باغات آبیاری قطره‌ای به ترتیب برابر با ۶۴۸۰ مترمکعب، ۹۳ درصد و ۲/۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب و در باغات آبیاری سطحی ۱۱۶۳۴ مترمکعب، ۵۷ درصد و ۲/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود، که نشان دهنده برتری روش آبیاری قطره‌ای نسبت به سطحی بود.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که میزان آب کاربردی باغات انگور در استان مرکزی متفاوت است و بسته به روش آبیاری، تعداد نوبت‌های آبیاری، زمان شروع آبیاری در ابتدای فصل، زمان قطع آبیاری در انتهای فصل، میزان حقابه و منابع آب در دسترس و نحوه مدیریت باغ، بین ۵۹۷۳ تا ۱۸۱۶۸ مترمکعب در هکتار است. میانگین مجموع میزان آب کاربردی و بارش مؤثر در باغات انگور در استان مرکزی از نیاز آبی واقعی گیاه بیشتر است.



شکل ۳- شاخص راندمان کاربرد آب آبیاری در تاکستان‌های مورد مطالعه



شکل ٤- شاخص بهره‌وری آب در تاکستان‌های مورد مطالعه

به‌طورکلی نتایج نشان داد که مدیریت آبیاری تأثیر زیادی بر کاربرد آب در سطح منطقه دارد. با توجه به اینکه اکثر باغ‌ها به‌صورت حقابه‌ای آب دریافت می‌کنند اصولاً به نیاز آبی و حتی بارش مؤثر توجه ویژه‌ای نمی‌شود و میزان دسترسی به آب بیشترین تأثیر را در مصرف آب دارد. لذا گیاه در مقاطعی آب بیشتری دریافت و در مقاطعی آب کمتر از حد مورد نیاز دریافت می‌کند و این باعث کاهش بهره‌وری آب می‌گردد. پیشنهاد می‌شود به‌منظور کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری آب، تحویل آب به باغداران در طول فصل مدیریت شود و حقابه متناسب با نیاز آبی به آن‌ها تحویل داده شود. نتایج تحقیق نشان داد که با توجه به حقابه‌ای بودن و کمبود آب در سطح استان پتانسیل اعمال کم‌آبیاری در باغات انگور استان وجود دارد و اعمال کم آبیاری علمی و دقیق باعث افزایش بهره‌وری آب در تولید انگور می‌گردد. همچنین استفاده از سامانه‌های آبیاری نوین با توجه به شرایط باغ و با اصول صحیح بهره‌برداری و کاربرد روش‌های بهبود آبیاری سطحی (روش کاهش جریان، آبیاری موجی، استفاده از هیدروفلوم)، برای بهبود راندمان آبیاری و کاهش مصرف آب در سطح استان پیشنهاد می‌گردد.

منابع

احمدی، ک.، قلی‌زاده، ح.، عبادزاده، ح.، حاتمی، ف.، حسین‌پور، ر.، کاظمی‌فرد، ر. و عبدشاه، ه.، ۱۳۹۵. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۴. وزارت جهاد کشاورزی و معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، دفتر فناوری اطلاعات و ارتباطات. جلد سوم: محصولات باغی، ص ۲۵۳.

جلینی، م. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر روش آبیاری قطره‌ای و سطوح مختلف آب بر عملکرد و کارایی مصرف آب انگور. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۷(۲۸): ۷۸-۶۹.

شاهرخ‌نیا، م. و کرمی، م. ۱۳۹۶. بررسی اثر مقادیر مختلف آب آبیاری بر عملکرد انگور یاقوتی. فصلنامه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۷(۲۸): ۱۲۲-۱۰۸.

عباسی، ف.، سهراب، ف. و عباسی، ن. ۱۳۹۵. ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۷(۶۷): ۱۲۸-۱۱۳.

فرشی، ع.ا.، شریعتی، م.، جارللهی، ر.، قائمی، م.ر.، شهابی‌فر، م. و تولایی، م.م. ۱۳۷۶. برآورد آب مورد نیاز گیاهان زراعی و باغی کشور. نشر آموزش کشاورزی.

ناصری، ا.، عباسی، ف.، اکبری، م.، عباسی، ن. و سهراب، ف. ۱۳۹۷. برآورد مقدار مصرف آب در بخش کشاورزی. گزارش نهایی پروژه

تحقیقاتی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

نیکان‌فر، ر. و رضایی، ر. ۱۳۹۴. واکنش درختان مسن انگور به تغییر روش آبیاری سطحی به قطره‌ای یا بابلر. مجله علوم و فنون باغبانی ایران. ۱۶(۲): ۱۷۰-۱۶۱.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrig. Drain. Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.

Araujo, F., Williams, E.L., and Matthews, A.M. 1995. A comparative study of young 'Thompson Seedless' grapevines (*Vitis vinifera* L.) under drip and furrow irrigation. II. Growth, water use efficiency and nitrogen partitioning. Scientia Horticulturae 60(3-4): 251-265.

Doorenbos, J. and Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper, 33, p. 257.

Intrigliolo, D.S., Lakso, A.N., and Piccioni, R. M. 2009. Grapevine cv. 'Riesling' water use in the northeastern United States. Irrigation Science 27(3): 253-262.

Netzer, Y., Yao, C., Shenker, M., Bravdo, B., and Schwartz, A. 2009. Water use and the development of seasonal crop coefficient for superior seedless grapevines trained to an open-gable trellis system. Irrigation Science 27(2): 109-120.

SCS, 1972. U.S. Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, Hydrology Section 4.

Villagra, P., Cortázar, G.V., Ferreyra, R., Aspillaga, C., Zúñiga, C., Ortega-Farias, S., and Sellés, G. 2014. Estimation of water requirements and Kc values of 'Thompson Seedless' table grapes grown in the overhead trellis system, using the Eddy covariance method. Chilean Journal of Agricultural Research 74(2): 213-218.

Williams, L.E., and Ayars, J.E. 2005. Water use of Thompson seedless grapevines as affected by the application of gibberellic acid (GA3) and trunk gridling-practices to increase berry size. Agricultural and Forest Meteorology 129(1-2): 85-94.

Williams, L.E., Phene, C.J., Grimes, D.W., and Trout, T.J. 2003a. Water use of young Thompson seedless grapevines in California. Irrigation Science 22(1): 1-9.

Williams, L.E., Phene, C.J., Grimes, D.W., and Trout, T.J. 2003b. Water use of mature Thompson seedless grapevines in California. Irrigation Science 22(1): 11-18.

Williams, L.E., and Fidelibus, M.W. 2016. Measured and estimated water use and crop coefficients of grapevines trained to overhead trellis systems in California's San Joaquin Valley. Journal of Irrigation Science. 34(6): 431-441.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2003-2012

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۱۲-۲۰۰۳

Evaluation of Irrigation Water Management Indices in Grape Production (Case Study in Markazi Province)

M. Goodarzi[1*], F. Abbasi[2], A. Hydayatipour[3]
Recived: Sep.12, 2020 Accepted: Nov.24, 2020

Abstract

The volume of applied water in the agriculture as an indicator to evaluate the optimal use of water resources, plays an important role in macro management and planning in the field of water management and engineering. Experimental grape orchards were selected across the Markazi province to cover various factors including irrigation methods, soil texture, type of water source (surface or groundwater) and irrigation water quality. Selected orchards were monitored during the growing season 2018-2019, and different parameters such as irrigation dates, amount of irrigation, irrigation duration, and so on were recorded. The results showed that the irrigation interval in the grape orchards varied from 6 to 20 days and the average irrigation water depth was between 30 and 185 mm. The results showed that the amount of irrigation water consumption of grape orchards in the Markazi province was different depending on the type of irrigation systems, the number of irrigation and management of the orchard, and its amount varied from 5973 to 18168 m^3/ ha. Also, the application efficiency of irrigation in the studied orchards varied from 35 to 100 percent, average being 63%. The water productivity for this crop varied from 1.1 to 3.7 kg/m^3 and its average was 2.62 kg/m^3 in the Markazi province. Overall, the results of the measurements carried out at the Markazi province showed that regardless of the type of irrigation system used, the irrigation management by the farmer plays an important role in total water use in the orchards.

Keywords: Irrigation water, Water productivity, Water requirement, Vineyard

1- Faculty Member, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran
2- Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3- Faculty Member, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran
(*- Corresponding Author Email: goodarzimustafa@gmail.com

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۲۴-۲۰۱۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2013-2024

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی تغییرات گرادیان هیدرولیکی جریان غیرماندگار درون مصالح زهکشی تحت فشار

رعنا نصیری[۱]، هادی نوروزی[۲*]، جلال بازرگان[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۳۰

چکیده

تحلیل جریان غیرماندگار با استفاده از معادلات سنت ونانت انجام می‌شود. محاسبه شیب خط انرژی (S_f) از اهمیت بالایی در تحلیل جریان غیرماندگار برخوردار است. از آنجاییکه در محیط متخلخل درشت‌دانه، S_f برابر با گرادیان هیدرولیکی (i) است، محاسبه i اهمیت بالایی دارد. در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی ثبت شده در سیلندری فولادی به قطر ۱۶ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر که ۴۰ سانتی‌متر آن از سنگریز با سه دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت پر شده، به بررسی جریان غیرماندگار در محیط متخلخل تحت فشار پرداخته شده‌است. جهت بهینه‌یابی ضرایب رابطه دوجمله‌ای فورشهایمر که در جریان ماندگار (a, b) و رابطه سه‌جمله‌ای که در جریان غیرماندگار کاربرد دارند (a, b, c) از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده‌است. نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که، مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) در حالت استفاده از رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به رابطه دوجمله‌ای جهت محاسبه گرادیان هیدرولیکی جریان غیرماندگار، در مصالح ریزدانه ۱۴/۵، در مصالح با اندازه متوسط ۱۴/۷ و در مصالح درشت‌دانه ۱۲/۲ درصد بهبود یافته است. مقدار جمله‌ی سوم رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی ((cdv/dt)/i) در مصالح ریزدانه ۷/۲۳، در مصالح با اندازه متوسط ۱۴/۷۹ و در مصالح درشت‌دانه ۱۷/۰۱ درصد به‌دست آمده است. به‌عبارت دیگر، از آنجاییکه با افزایش قطر مصالح، کارایی رابطه غیر خطی (غیر دارسی) نسبت به رابطه خطی (دارسی) افزایش می‌یابد، جمله سوم رابطه سه‌جمله‌ای نیز تاثیر بیشتری در محاسبات گرادیان هیدرولیکی دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، جریان غیر ماندگار، گرادیان هیدرولیکی، مصالح زهکشی تحت فشار، رابطه سه‌جمله‌ای

مقدمه

مصالح درشت‌دانه سنگریزه‌ای کابردهای فراوانی در رشته‌های مهندسی دارد. از این نوع مصالح جهت فیلتراسیون، ساخت گابیون، پوشش کانال‌ها، حوضچه‌های آرامش، آبگیرها و سدهای پاره‌سنگی و کنترل سیل استفاده می‌شود.

در محیط ریزدانه جریان به‌صورت ورقه‌ای (آرام) بوده و در آن‌ها رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان به‌صورت خطی بوده و از قانون دارسی (رابطه ۱) تبعیت می‌کند (McWhorter et al., 1977)، در حالی‌که در محیط درشت‌دانه به‌دلیل وجود منافذ، سرعت جریان بالا بوده و جریان تمایل به آشفتگی دارد (Hansen et al., 1995)، به‌همین دلیل رابطه بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان به‌صورت غیرخطی بوده و از قانون غیر دارسی نیز تبعیت می‌کند. روابط مربوط به محاسبه گرادیان هیدرولیکی در محیط غیردارسی به دو گروه توانی و دو جمله‌ای مطابق روابط ۲ و ۳ طبقه‌بندی شده‌است (Forchheimer, 1901; Leps, 1973; Stephenson, 1979).

$$i = \left(\frac{1}{k}\right)V \quad (۱)$$

$$i = mV^n \quad (۲)$$

$$i = aV + bV^2 \quad (۳)$$

رابطه دوجمله‌ای با استفاده از آنالیز ابعادی توسط (Ward 1964) و با استفاده از معادلات ناویر استوکس توسط (Ahmed and

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان
۲- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان
۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان
(*- نویسنده مسئول: (Email: hadinorouzi72@gmail.com
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.24.5

Sunada, 1969) اثبات شده و نسبت به رابطه نمایی دقت بالا و کارایی بهتری دارد (Stephenson, 1979; Leps, 1973).

معادله جامعی با در نظر گرفتن اثرات جریان غیرماندگار توسط Polubarinova-Kochino (1952) به‌صورت رابطه (۴) بیان شده است (Hannoura and McCorcoudale, 1985):

$$i = aV + bV^2 + c\left(\frac{dV}{dt}\right) \qquad (۴)$$

که ضریب جمله سوم (c) به صورت رابطه (۵) بیان می شود:

$$c = \frac{n + C_m(1-n)}{ng} \qquad (۵)$$

که در آن C_m تعیین کننده سهمی از سیال است که با ارتعاش دانه مرتعش می‌گردد. به‌عبارتی C_m بیانگر جرم اضافه شده می‌باشد.

هانورا و مک کورپودالا (۱۹۸۵)در پژوهش خود که با داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفته‌است، مقدار C_m را ناچیز و قابل صرف نظر بیان کردند. به‌عبارتی، با حذف مقدار C_m از رابطه (۵)، جمله سوم رابطه (۴) را می‌توان به‌صورت رابطه (۶) بیان کرد:

$$c\left(\frac{dV}{dt}\right) = \frac{1}{g}\left(\frac{dV}{dt}\right) \qquad (۶)$$

در روابط فوق، v: سرعت جریان (m/s)، k: قابلیت هدایت هیدرولیکی (s/m)،i: گرادیان هیدرولیکی، m و n مقادیری وابسته به خصوصیات محیط متخلخل، سیال و جریان بوده در حالیکه a و b ضرایبی هستند که تابعی از خصوصیات محیط متخلخل و سیال هستند.

شکری و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی آزمایشگاهی جریان غیرماندگار در محیط متخلخل درشت‌دانه سطح آزاد پرداختند و نتایج آنها بیانگر آن است که جمله‌ی سوم ($c\left(\frac{dV}{dt}\right)$) تاثیر چندانی در دقت محاسبات ندارد.

علاوه بر تقسیم‌بندی مذکور، جریان در محیط درشت‌دانه را می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم‌بندی کرد (صالحی و همکاران ۱۳۸۴):

الف: جریان آزاد از درون و روی لایه‌های درشت‌دانه مانند گابیون‌ها و سدهای سنگریزه‌ای که در این لایه‌ها جریان از یک طرف با محیط آزاد در تماس می‌باشد.

ب: جریان تحت فشار از درون لایه‌های درشت‌دانه مانند فیلترهای درشت‌دانه‌ی سدهای خاکی و لایه‌های درشت‌دانه‌ی محصور بین قسمت‌های بتنی و ریزدانه‌ی سازه‌های هیدرولیکی، در این لایه‌ها جریان از همه طرف با یک لایه‌ی غیر قابل نفوذ یا لایه‌ی با نفوذپذیری بسیار کم نسبت به مصالح سنگریزه‌ای در تماس می‌باشد.

حسینی و جوی در پژوهشی به توسعه مدلی غیرماندگار برای جریان از میان محیط متخلخل درشت دانه همگن پرداختند. این مدل بر اساس روابط اساسی سنت ونانت و معادله فورشهایمر شکل گرفته و در آن از روش حل عددی چهارنقطه‌ای تفاضلات محدود استفاده شده‌است (Hosseini and Joy, 2007).

صلاحی و همکاران (۱۳۹۳) با اجرای یک سری آزمایش در سیلندر افقی تحت فشار از محیط‌های سنگ‌دانه‌ای به بررسی روابط مختلف ارائه شده در زمینه‌ی گرادیان هیدرولیکی جریان‌های غیردارسی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت منفذی جریان رابطه‌ای غیرخطی برقرار می‌شود و رابطه‌ای تجربی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت منفذی ارائه دادند.

اورگان (۱۹۵۲) با عبور دادن گاز نیتروژن از میان استوانه‌ای به مساحت ۷/۲۴ سانتی‌متر مربع که با سنگ‌دانه پر شده، به بررسی ضرایب رابطه دوجمله‌ای گرادیان هیدرولیکی پرداخته و رابطه (۷) را جهت محاسبات ضرایب a, b ارائه کرد:

$$a = 150\frac{\upsilon(1-n)^2}{d^2 g n^3}, b = 1.75\frac{(1-n)}{gdn^3} \qquad (۷)$$

وارد (۱۹۶۴) رابطه (۸) را که با استفاده از آنالیز ابعادی قابل اثبات است، جهت محاسبه ضرایب a, b در محیط متخلخل سطح آزاد ارائه کرد.

$$a = \frac{\upsilon}{gk} \quad , b = \frac{C'_w}{g\sqrt{k}} \qquad (۸)$$

مک کارکودال و همکاران (۱۹۷۸) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی که بر روی سنگدانه‌های شکسته و رودخانه‌ای انجام شده، رابطه (۹) را ارائه کردند:

$$a = 70\frac{\upsilon}{gnR_h^2} \quad , b = \frac{0.81}{gn^{0.5}R_h} \qquad (۹)$$

احمد و ساناداً (۱۹۶۹) رابطه (۱۰) را جهت محاسبه ضرایب a, b و با استفاده از معادلات ناویر–استوکس اثبات کردند.

$$a = \frac{\mu}{\rho gk} \quad , b = \frac{1}{g\sqrt{ck}} \qquad (۱۰)$$

کواکس (۱۹۸۰) مجموعه‌ای از داده‌ها با دامنه تغییرات عدد رینولدز ۱۰ تا ۱۰۰ (مطابق تعریف ایشان از عدد رینولدز) را بررسی و رابطه‌ای مشابه رابطه ارگان به‌صورت رابطه (۱۱) ارائه کرد:

$$a = \frac{144\nu(1-n)^2}{gn^3 d^2}, b = \frac{2.4(1-n)}{gn^3 d} \qquad (۱۱)$$

رابطه ارائه شده توسط Ergun–Reichelt برای ضرایب a, b به‌صورت رابطه (۱۲) می‌باشد (Fand and Thinakaran, 1990):

$$a = 214\frac{M^2(1-n)^2\nu}{gn^3d^2}\quad b = 1.57\frac{M(1-n)}{gn^3d}$$
$$M = 1+\frac{2}{3}\frac{d}{D(1-n)} \qquad (۱۲)$$

روابطه (۷ الی ۱۲) و روابط متعددی از جمله روابط ارائه شده توسط (Stephenson, 1979; Sidiropoulou et al., 2007; Sedghi and Rahimi, 2011)، جهت محاسبه ضرایب رابطه دوجمله‌ای (a, b) و در شرایط جریان ماندگار ارائه شده‌است.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر جمعیت است و در حال حاضر در مسائل بهینه‌سازی مهندسی عمران و مهندسی منابع آب مانند عملکرد مخزن (Nagesh Kumar and Janga Reddy, 2007)، مدیریت کنترل سیل (Meraji, 2004)، مدیریت کیفیت آب (Afshar et al. 2011; Lu et al., 2002; Chau, 2005) و بهینه‌یابی ضرایب روش ماسکینگام (Chu and Chang, 2009; Moghaddam et al., 2016; Bazargan and Norouzi, 2018; Norouzi and Bazargan, 2020) کاربرد دارد.

به‌همین دلیل در پژوهش حاضر، جهت بهینه‌یابی ضرایب رابطه دوجمله‌ای فورشهایمر (رابطه ۳) و ضرایب رابطه سه‌جمله‌ای Polubarinova-Kochino (رابطه ۴) از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده‌است.

گرادیان هیدرولیکی در محیط متخلخل درشت‌دانه برابر با شیب خط انرژی (S_f) است (Stephenson, 1979; Bari and Hansen, 2002; Bazargan and Shoaei, 2006). محاسبه گرادیان هیدرولیکی در تحلیل جریان ماندگار (استفاده از دو روش تئوری جریان‌های متغیر تدریجی که جریان را به‌صورت یک بعدی تحلیل می‌کند و حل معادله پارکین که جریان را به‌صورت دو بعدی تحلیل می‌نماید) و جریان غیر ماندگار (حل معادلات سنت ونانت) اهمیت بالایی دارد. به‌همین دلیل در پژوهش حاضر، تاثیر جمله‌ی سوم رابطه سه جمله‌ای (رابطه ۴) در تحلیل جریان غیر ماندگار درون محیط متخلخل درشت‌دانه تحت فشار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بررسی شده‌است.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر از داده‌های آزمایشگاهی ثبت شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه زنجان استفاده شده‌است. آزمایش‌ها درون سیلندری فولادی به قطر ۱۶ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر که ۴۰ سانتی‌متر آن از سنگدانه پر شده، انجام شده و جهت ایجاد جریان غیرماندگار با استفاده از روش ثقلی، مخزنی در ارتفاع ۱۳ متری از ورودی سیلندر و بر روی پشت بام قرار داده‌شده‌است. مخازن مورد استفاده و سیلندر فولادی مذکور در شکل ۱ نشان داده‌شده‌است. مشخصات مصالح استفاده شده در سه اندازه ریز، متوسط و درشت در جدول ۱ و منحنی دانه‌بندی در شکل ۲ آورده شده‌است. همچنین مقادیر مربوط به گرادیان هیدرولیکی (i) بر حسب سرعت جریان (V) برای سه‌دانه‌بندی مذکور در شکل ۳ ارائه‌شده‌است. شایان ذکر است، جهت اندازه‌گیری دبی در زمان‌های مختلف که توسط دوربین‌های فیلمبرداری صورت گرفته، از روش حجمی و برای اندازه‌گیری عمق آب، از پیزومترهایی که در ابتدا و انتهای سیلندر نصب گردیده، استفاده شده‌است. به‌عبارت دیگر، ابتدا با استفاده از پمپ قرار گرفته در آزمایشگاه، آب به مخزن روی پشت بام منتقل شده و سپس با استفاده از روش ثقلی، جریان غیرماندگار از درون سیلندر فولادی عبور داده شده و تغییرات دبی و عمق آب (پیزومترهای ورودی و خروجی) در زمان‌های مختلف با استفاده از فیلمبرداری توسط دوربین ثبت شده و سپس دبی با استفاده از روش حجمی محاسبه گردید.

جدول ۱- مشخصات مصالح آزمایشگاهی

مصالح	d_0 (mm)	d_{10} (mm)	d_{30} (mm)	d_{50} (mm)	d_{60} (mm)	d_{100} (mm)	ضریب یکنواختی (-)	ضریب انحنا (-)	تخلخل (-)
ریزدانه	۴	۷	۱۰	۱۲/۵	۱۴/۵	۲۲	۱/۶۹	۰/۶۹	۰/۳۵۸
اندازه متوسط	۴/۷۵	۱۴/۵	۱۸/۵	۱۹	۲۱/۳	۳۲	۱/۱۶	۰/۹۵	۰/۴۱۰
درشت‌دانه	۱۲/۷	۲۲/۷	۲۳/۹	۲۲	۲۵/۰۵	۳۲	۱/۱۱	۰/۹۹	۰/۴۴۸

در جدول ۱، ضریب یکنواختی (C_u) برابر با $\frac{D_{60}}{D_{10}}$ و ضریب انحنا (C_c) برابر با $\frac{(D_{30})^2}{D_{10}*D_{60}}$ است.



الف- مخزن و سیلندر قرار گرفته در آزمایشگاه

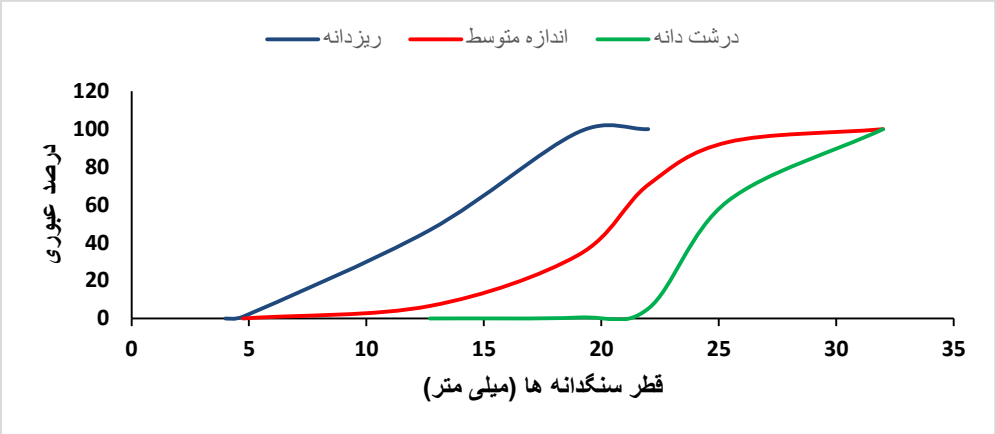


ب- مخزن قرار گرفته در پشت بام



ج- سیلندر فولادی

شکل ۱- نمای کلی دستگاه‌های آزمایشگاهی



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح مختلف

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[1]

این الگوریتم برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهارت و کندی معرفی شد (Eberhart and Kennedy, 1995). الگوریتم ازدحام ذرات یک الگوریتم جست‌وجوی مبتنی بر جمعیت است که همانند الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی مورچه‌ها، زنبور عسل و ... الهام گرفته از طبیعت می‌باشد که بر پایه هوش جمعی و رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها طرح‌ریزی شده است. از مزایای الگوریتم ازدحام ذرات می‌توان به ساختار و پیاده‌سازی ساده، تعداد کم پارامترهای قابل کنترل و سرعت همگرایی بالا و همچنین بازده محاسباتی بالا اشاره کرد.

در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله t+1 ام از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شوند. اگر منظور از z مولفه iام بردار z باشد، آنگاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارت‌اند از (Eberhart and Kennedy, 1995):

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1 r_1\left(x_j^{iBest}[t] - x_j^i[t]\right) + c_2 r_2\left(x_j^{gBest}[t] - x_j^i[t]\right) \quad (۱۳)$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (۱۴)$$

که w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعداد تصادفی در بازه‌ی (0,1) با توزیع یکنواخت و همچنین c_1 و c_2 پارامترهای یادگیری هستند که باعث می‌شوند نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و در این‌صورت جستجوی کامل‌تری روی فضای مربوطه انجام پذیرد، مقدار این پارامترها در بازه (0,2) انتخاب می‌شوند. c_1 (پارامتر شناختی) ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 (پارامتر اجتماعی) ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد. در معادله فوق با گذشت زمان اگر ذره‌ای دارای تابع هزینه‌ای کمتر (یا تابع سودی بیشتر) از x_j^{gBest} باشد جایگزین این ذره خواهد شد و مقدار هزینه و موقعیت این ذره به‌روزرسانی خواهد شد.

معادله به‌روزرسانی سرعت دارای سه مؤلفه می‌باشد. مؤلفه اول این معادله هم‌راستا با سرعت ذره در مرحله قبلی می‌باشد و به همین دلیل این مؤلفه به مؤلفه اینرسی موسوم است. مؤلفه مذکور نمایان‌گر تمایل ذرات گروه برای حفظ جهت حرکت خود در فضای جست و جو می‌باشد.

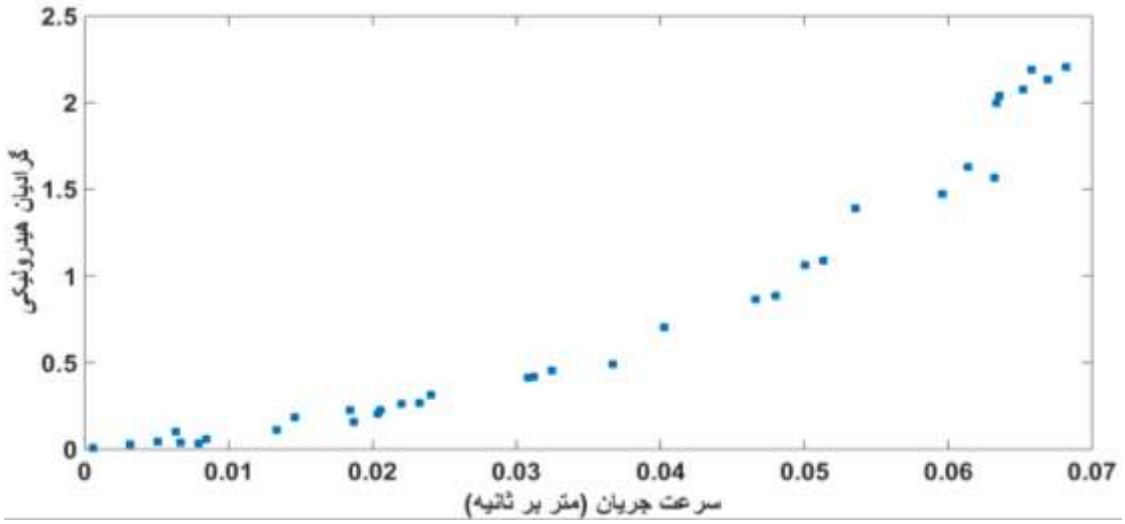
همان‌طور که در معادله (۱۳) مشاهده می‌شود، عملکرد الگوریتم تحت تأثیر بهترین موقعیت هر ذره (بهترین تجربه انفرادی ذره) و همچنین موقعیت بهترین ذره در همسایگی (بهترین تجربه جمعی) همان ذره می‌باشد. به‌عبارتی هر ذره با نسبت خاصی، به سمت بهترین مقدار خود و به سمت بهترین ذره همسایگی خود جذب می‌شود. به همین جهت مؤلفه‌های این معادله به مؤلفه شناختی[1] و مؤلّفه اجتماعی[2] موسوم می‌باشد (Shi and Eberhart, 1998; Di Cesare et al., 2015).

به طور کلی مراحل شبیه‌سازی الگوریتم مورد نظر به شرح زیر می‌باشد:

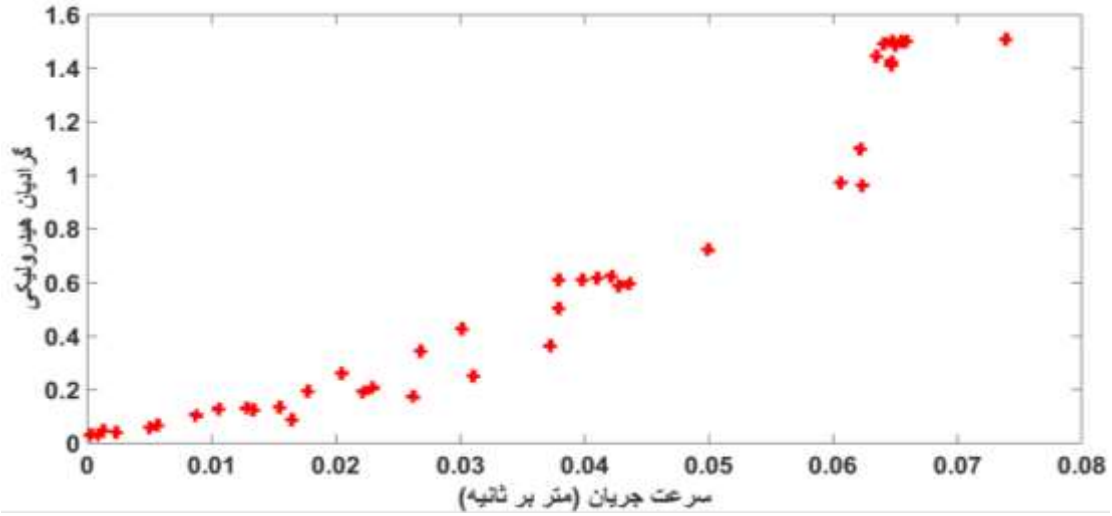
۱) ایجاد جمعیت اولیه به‌طور تصادفی.
۲) تخصیص شایستگی بر مبنای رتبه جبهه مغلوب نشده و فاصله ازدحامی آنها
۳) انتخاب بهترین ذره براساس فاصله ازدحامی
۴) به‌روزرسانی c_1، c_2 و w_i.
۵) به‌روزرسانی سرعت، موقعیت ذره و آرشیو الگوریتم
۶) تکرار مراحل قبل تا رسیدن به شرط توقف

1- Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm

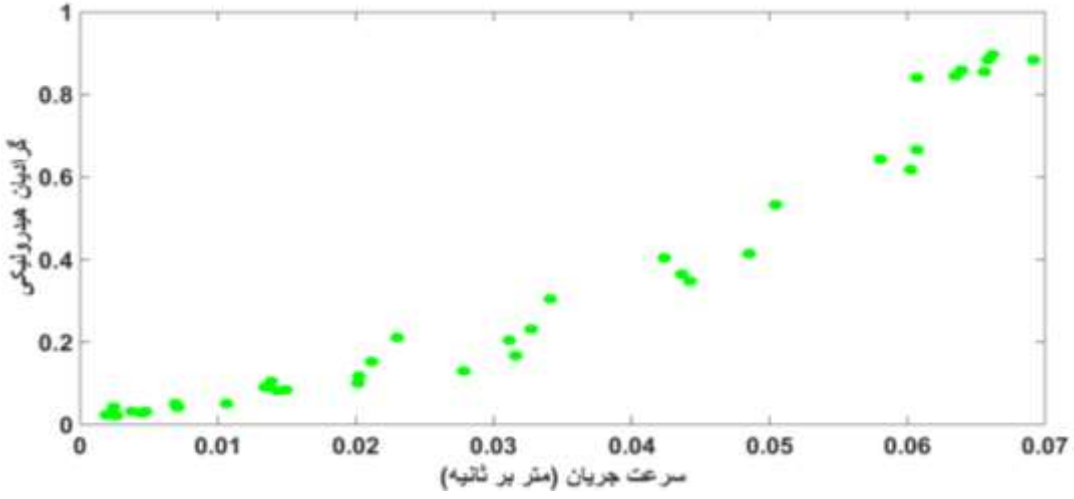
1- Cognitive component
2- Social component



الف- ریزدانه

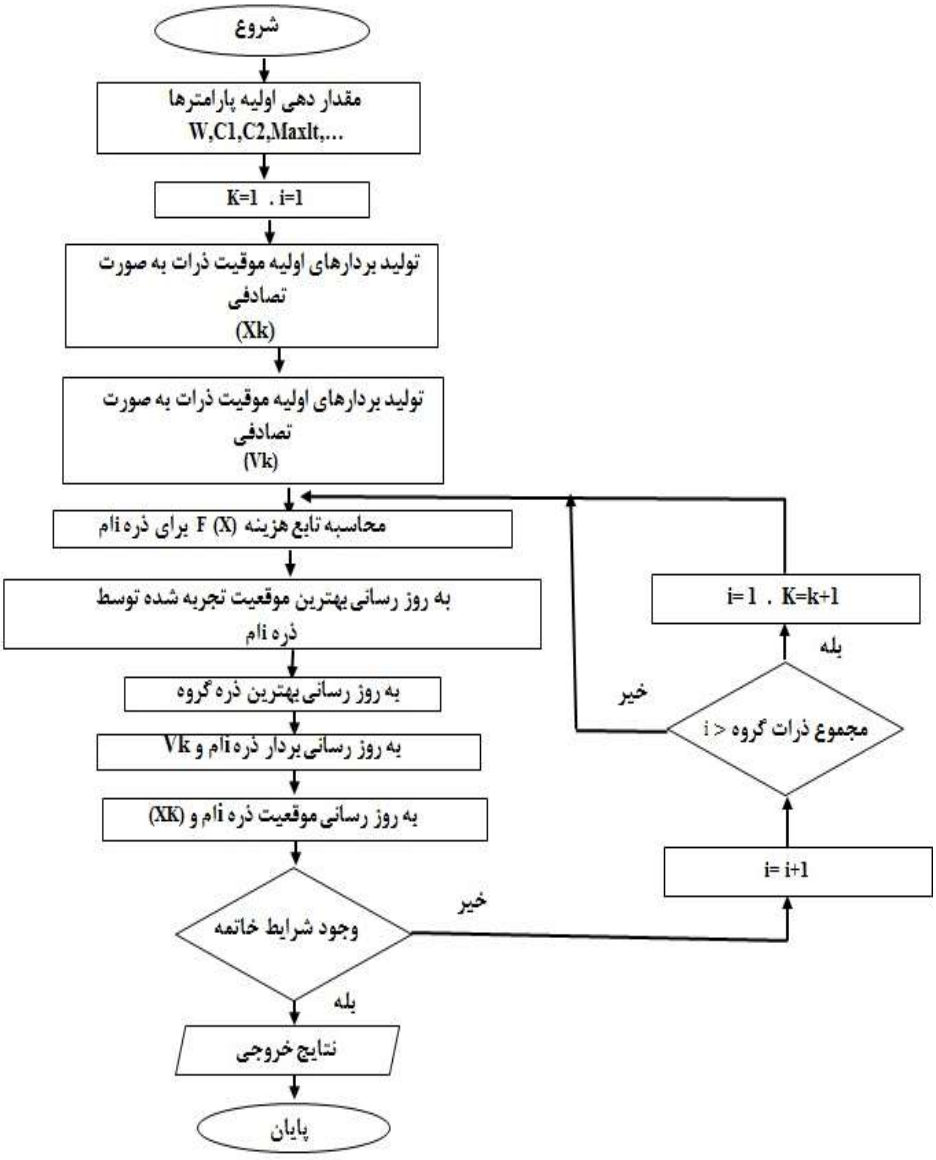


ب- اندازه متوسط



ج- درشت‌دانه

شکل ۳- گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان ثبت شده در آزمایشگاه



شکل ۲- روندنما الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

برای ارزیابی مقادیر بهینه ضرایب رابطه دوجمله‌ای (a, b) و سه‌جمله‌ای (a, b, c)، از کمینه کردن مقدار مجموع انحراف مطلق (SAD) که به‌صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود، به عنوان تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده‌است:

$$SAD = \sum_{i=1}^{n} |i_i - I_i| \qquad (۱۵)$$

که در آن I_i ، i_i به‌ترتیب گرادیان هیدرولیکی مشاهداتی و گرادیان هیدرولیکی به‌دست آمده با استفاده از رابطه سه‌جمله‌ای (محاسباتی) هستند.

روندنما استفاده شده در پژوهش حاضر جهت بهینه‌یابی ضرایب رابطه سه‌جمله‌ای (a, b, c) با استفاده از الگوریتم PSO و تابع هدف SAD در شکل ۲ ارائه شده است.

نتایج و بحث

مصالح سنگریزه‌ای کاربرد فراوانی در مهندسی و به‌خصوص در طراحی سازه‌های هیدرولیکی دارد. از جمله جریان تحت فشار عبوری از محیط سنگریزه‌ای، می‌توان فیلترهای درشت‌دانه‌ی سدهای خاکی و لایه‌های درشت‌دانه‌ی محصور بین قسمت‌های بتنی و ریزدانه‌ی سازه‌های هیدرولیکی را نام برد. سازه‌های مذکور، بایستی در شرایط جریان غیرماندگار نیز کارایی خود را حفظ نمایند. جهت تحلیل جریان غیرماندگار، از معادلات سنت ونانت استفاده می‌شود و محاسبه شیب

خط انرژی در حل معادلات مذکور، اهمیت بالایی دارد. از آنجایی‌که در محیط متخلخل درشت‌دانه، شیب خط انرژی (S_f) برابر با گرادیان هیدرولیکی (i) می‌باشد (Stephenson, 1979; Bari and Hansen, 2002; Bazargan and Shoaei, 2006). به‌همین دلیل، یکی از مهم‌ترین پارامترها در بررسی جریان غیرماندگار در محیط سنگریزه‌ای در حالت جریان آزاد و تحت فشار، محاسبه گرادیان هیدرولیکی می‌باشد. در پژوهش‌های قبلی (شکری و همکاران ۱۳۹۰، Hannoura and McCorquodale, 1985) که در محیط متخلخل سطح آزاد در حالت جریان غیرماندگار انجام شده، مقدار جمله‌ی سوم رابطه سه جمله‌ای (رابطه ۴)، بسیار ناچیز بیان شده‌است و یا برای تحلیل جریان غیرماندگار، از ضرایب a, b به‌دست آمده از جریان ماندگار (Hosseini and Joy, 2007) استفاده شده‌است. در حالیکه نتایج پژوهش حاضر که در محیط تحت فشار (سیلندر فولادی) انجام شده، بیانگر آنست که، در محیط سنگریزه‌ای تحت فشار، عملکرد رابطه سه جمله‌ای (رابطه ۴) نسبت به رابطه دوجمله‌ای (رابطه ۳)، از دقت بالاتری برخوردار است.

مقادیر مربوط به ضرایب رابطه دو جمله‌ای (a, b) که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) بهینه‌یابی شده و همچنین مقادیر مربوط به میانگین خطای نسبی (MRE) مربوط به هر سه دانه‌بندی (ریزدانه، اندازه متوسط و درشت‌دانه) در جدول ۲ بیان شده‌است.

جدول ۲- مقادیر ضرایب a, b بهینه‌یابی شده و مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) گرادیان هیدرولیکی

مصالح	a (s/m)	b (s^2/m^2)	MRE %
ریزدانه	۳/۷۲	۳۴۹/۹۹	۱۵/۹۵
اندازه متوسط	۷/۳۸	۱۷۶/۲۹	۲۵/۱۱
درشت‌دانه	۵/۳۲	۹۳/۱۹	۱۹/۷۸

چنانچه به‌جای استفاده از رابطه دوجمله‌ای، از رابطه سه‌جمله‌ای جهت برآورد گرادیان هیدرولیکی استفاده شود، مقادیر بهینه مربوط به ضرایب a, b, c که با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌یابی شده و همچنین مقادیر مربوط به MRE در جدول ۳ بیان شده‌است.

جدول ۳- مقادیر بهینه ضرایب رابطه سه جمله‌ای و مقادیر میانگین خطای نسبی (MRE) گرادیان هیدرولیکی

مصالح	a (s/m)	b (s^2/m^2)	c (s^2/m)	MRE %
ریزدانه	۲/۷۲	۳۶۶/۳۹	۱۰/۴۹	۱۳/۶۳
اندازه متوسط	۳/۸۱	۲۴۹/۵۱	۳۹/۱۹	۲۱/۴۱
درشت‌دانه	۲/۵۰	۱۴۶/۰۱	۲۵/۱۶	۱۷/۳۶

طبق جداول ۲ و۳، مقادیر مربوط به گرادیان هیدرولیکی جریان غیرماندگار-غیردارسی در محیط متخلخل تحت فشار در حالت استفاده از رابطه‌ی سه‌جمله‌ای نسبت به رابطه دوجمله‌ای از دقت بیشتری برای هر سه دانه‌بندی برخوردار است.

در پژوهش انجام شده توسط هانورا و مک کورکودال که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در محیط تحت فشارانجام شده، مقدار ضریب C_m که در رابطه (۵) بیانگر جرم اضافه شده می‌باشد، در بازه ۰ تا ۱/۵ بیان شده‌است (Hannoura and McCorquodale, 1985). در حالی‌که نتایج پژوهش حاضر، بیانگر مقادیر متفاوتی به شرح جدول ۴ برای ضریب مذکور در هر سه دانه‌بندی می‌باشد.

مقدار ضریب جمله‌ی سوم (c)، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و الگوریتم PSO بهینه‌یابی شده‌است. سپس طبق رابطه (۵)، با داشتن مقادیر ضریب c و تخلخل (n) هر یک از مصالح، می‌توان مقدار ضریب C_m را محاسبه کرد. نتایج آزمایشگاهی در حالت جریان غیرماندگار در محیط متخلخل تحت فشار بیانگر آن است که، مقدار ضریب c قابل صرف نظر کردن نبوده و از آنجاییکه مقدار ضریب C_m نیز رابطه مستقیم با ضریب c دارد، با افزایش مقدار ضریب c، مقدار ضریب C_m نیز افزایش یافته‌است.

جدول ٤- مقادیر ضریب جرم اضافه شده (C_m) در دانه‌بندی‌های مختلف

مصالح	n (-)	c (s^2/m)	C_m (-)
ریزدانه	۰/۳۵۸	۱۰/۴۹	۵۷/۳۸
اندازه متوسط	۰/۴۱۰	۳۹/۱۹	۲۶۷/۱۶
درشت‌دانه	۰/۴۴۸	۲۵/۱۶	۲۰۰/۳۲

در شرایطی رابطه سه‌جمله‌ای (رابطه ۴)، دقت بیشتری نسبت به رابطه دوجمله‌ای (رابطه ۳) دارد که حاصل‌ضرب مقدار c در dv/dt در

محاسبه گرادیان هیدرولیکی تاثیر داشته‌باشد. در جدول ۵، مقادیر میانگین هر یک از ضرایب رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی محاسباتی برای هر سه نوع مصالح بیان شده‌است.

جدول ۵- مقادیر میانگین درصد نسبت ضرایب رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی

مصالح	$(aV/i)*100$	$(bV^2/i)*100$	$(c(dV/dt)/i)*100$
ریزدانه	۲۲/۰۱	۷۰/۷۶	۷/۲۳
اندازه متوسط	۲۸/۵۷	۵۶/۶۴	۱۴/۴۹
درشت‌دانه	۳۳/۴۹	۴۹/۵۰	۱۷/۰۱

با افزایش قطر مصالح، رابطه خطی (دارسی) کارایی خود را از دست داده و از رابطه غیر خطی (غیر دارسی) جهت تحلیل جریان عبوری از محیط متخلخل استفاده می‌شود. به‌عبارتی، سرعت جریان در مصالح ریزدانه (دارسی) به صورت آرام بوده و تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان نیز به تبع آن به‌صورت خطی می‌باشد. در حالیکه با افزایش قطر مصالح، جریان علاوه بر حالت آرام، در ناحیه انتقالی و آشفته نیز می‌توان قرار گیرد. در این حالت (محیط متخلخل درشت‌دانه)، تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان از حالت خطی خارج شده و به سمت غیر خطی شدن سوق پیدا می‌کند و جهت تحلیل آن از رابطه دوجمله‌ای و نمایی در حالت ماندگار که رابطه دوجمله‌ای دقت بیشتری نسبت به رابطه نمایی دارد، استفاده می‌شود. جهت تحلیل جریان غیرماندگار در محیط متخلخل درشت‌دانه تحت فشار، نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که با افزایش قطر مصالح، مقدار ترم سوم رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، با افزایش قطر مصالح، تاثیر جمله‌ی سوم (cdV/dt) در محاسبه تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان افزایش یافته و جریان به سمت غیر خطی شدن سوق می‌یابد و رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به رابطه دوجمله‌ای از دقت بالاتری برخوردار است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به بررسی و تحلیل جمله‌ی سوم رابطه سه‌جمله‌ای و تاثیر آن بر روی دقت محاسبات گرادیان هیدرولیکی در حالت جریان غیرماندگار در محیط متخلخل درشت‌دانه تحت فشار (سیلندر فولادی) و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی پرداخته شده‌است. به‌طور کلی، نتایج پژوهش حاضر شامل موارد زیر می‌باشد:

۱) چنانچه از رابطه دوجمله‌ای جهت محاسبه گرادیان هیدرولیکی استفاده شود، میانگین خطای نسبی (MRE) برای مصالح ریزدانه، اندازه متوسط و درشت‌دانه به‌ترتیب ۱۵/۹۵، ۲۵/۱۱ و ۱۹/۷۸ درصد و در حالت استفاده از رابطه سه‌جمله‌ای، مقادیر مذکور به‌ترتیب ۱۳/۶۳، ۲۱/۴۱ و ۱۷/۳۶ درصد به‌دست آمده‌است.

۲) در پژوهش صورت گرفته در محیط متخلخل سطح آزاد، مقدار ضریب C_m که در رابطه مربوط به ضریب c استفاده می‌شود، در بازه ۰ تا ۱/۵ بیان شده‌است. در حالیکه نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که، مقدار ضریب C_m در مصالح ریزدانه ۵۷/۳۸، در مصالح با اندازه متوسط ۲۶۷/۱۶ و در مصالح درشت‌دانه ۲۰۰/۳۲ به‌دست آمده‌است.

۳) با افزایش قطر مصالح، رابطه غیر دارسی (غیر خطی) نسبت به رابطه دارسی (خطی) کارایی بیشتری دارد. به‌همین دلیل، جمله‌ی سوم نسبت به گرادیان هیدرولیکی $(cdv/dt)/i)*100)$، در مصالح ریزدانه ۷/۲۳، در مصالح با اندازه متوسط ۱۴/۷۹ و در مصالح درشت‌دانه ۱۷/۰۱ درصد می‌باشد.

محاسبه تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به‌سرعت جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه برای تحلیل جریان غیر ماندگار با استفاده از معادلات سنت ونانت اهمیت بالایی دارد. نتایج پژوهش حاضر بیانگر آن است که رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به رابطه دوجمله‌ای از دقت بالاتری در محاسبات مربوط به تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به سرعت جریان برخوردار است. به‌عبارت دیگر، استفاده از رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به رابطه دوجمله‌ای، در مصالح ریزدانه ۱۴/۵، در مصالح با اندازه متوسط ۱۴/۷ و در مصالح درشت‌دانه ۱۲/۲ درصد باعث بهبود نتایج شده‌است. همچنین، مقدار ترم سوم رابطه سه‌جمله‌ای نسبت به گرادیان هیدرولیکی با افزایش قطر مصالح، افزایش یافته‌است.

منابع

شکری، م.، صبور، م.، بیات، ح.، و صادقیان، ج. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی جریان غیرخطی غیرماندگار در محیط متخلخل سنگریزه‌ای. مجله آب و فاضلاب. ۲۳(۴): ۱۰۵-۱۱۵.

صلاحی، م.، صدقی اصل، م.، و پرویزی، م. ۱۳۹۳. مطالعه آزمایشگاهی جریان غیردارسی درون مصالح متخلخل دانه ای. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵ (۴): ۴۱۳-۴۲۲.

صالحی، ر.، رحیمی، ح.، و امید، م.ح. ۱۳۸۴. بررسی جریان آشفته

درون محیط های متخلخل سنگریزه ای تحت فشار. مجله علـوم کشاورزی ایران. ۲۶(۲): ۲۶۳-۲۷۱.

Afshar, A., Kazemi, H., and Saadatpour, M. 2011. Particle swarm optimization for automatic calibration of large scale water quality model (CE-QUAL-W2): Application to Karkheh Reservoir, Iran. Water resources management, 25(10), 2613-2632.

Ahmed, N., and Sunada, D.K. 1969. Nonlinear flow in porous media. Journal of the Hydraulics Division 95(6): 1847-1858.

Bari, R., and Hansen, D. 2002. Application of gradually-varied flow algorithms to simulate buried streams. Journal of Hydraulic Research 40(6): 673-683.

Bazargan, J., and Norouzi, H. 2018. Investigation the Effect of Using Variable Values for the Parameters of the Linear Muskingum Method Using the Particle Swarm Algorithm (PSO). Water Resources Management 32(14): 4763-4777.

Bazargan, J., and Shoaei, S.M. 2006. Discussion, "Application of gradually varied flow algorithms to simulate buried streams." IAHR J. of Hydraulic Research 44(1): 138-141.

Chau, K. 2005. A split-step PSO algorithm in prediction of water quality pollution. In International Symposium on Neural Networks (pp. 1034-1039). Springer, Berlin, Heidelberg.

Chu, H.J., and Chang, L.C. 2009. Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model. Journal of Hydrologic Engineering 14(9):1024-1027.

Di Cesare, N., Chamoret, D., and Domaszewski, M. 2015. A new hybrid PSO algorithm based on a stochastic Markov chain model. Advances in Engineering Software 90: 127-137.

Eberhart, R., and Kennedy, J. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. In MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science (pp. 39-43). IEEE.

Ergun, S. 1952. Fluid Flow through Packed Columns. Chemical Engineering Progress 48: 89–94.

Fand, R. M., and Thinakaran, R. 1990. The influence of the wall on flow through pipes packed with spheres.

Forchheimer, P. 1901. Wasserbewagung Drunch Boden, Z.Ver, Deutsh. Ing., 45: 1782-1788.

Hannoura, A.A., and McCorquodale, J.A. 1985. Rubble Mounds: Hydraulic Conductivity Equation, J. Waterway, Port, Costal and Ocean Engineering, ASCE, 111(5): 783-799.

Hansen, D. Garga, V. K. and Townsend, D. R. 1995. Selection and application of a one-dimensional non-Darcy flow equation for two-dimensional flow through rockfill embankments. Canadian Geotechnical Journal 32(2): 223-232.

Hosseini, S.M., and Joy, D.M. 2007. Development of an unsteady model for flow through coarse heterogeneous porous media applicable to valley fills. International Journal of River Basin Management 5(4): 253-265.

Kovács, G. 1980. Developments in water science: seepage hydraulics. Elsevier Scientific Publishing Company.

Kumar, D.N., and Reddy, M.J. 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE 133 (3), 192–201.

Leps, T.M. 1973. Flow through rockfill, Embankment-dam engineering casagrande volume edited by Hirschfeld, RC and Poulos, SJ.

Lu, W.Z., Fan, H.Y., Leung, A.Y.T., and Wong, J.C.K. 2002. Analysis of pollutant levels in central Hong Kong applying neural network method with particle swarm optimization. Environmental Monitoring and Assessment 79(3): 217-230.

Mccorquodale, J.A., Hannoura, A.A.A., and Sam Nasser, M. 1978. Hydraulic conductivity of rockfill. Journal of Hydraulic Research 16(2): 123-137.

McWhorter, D.B., Sunada, D.K., and Sunada, D.K. 1977. Ground-water hydrology and hydraulics. Water Resources Publication. LLC. U.S.Library.

Meraji, S.H. 2004. Optimum design of flood control systems by particle swarm optimization algorithm, (Doctoral dissertation, M. Sc. thesis, Iran University of Science and Technology).

Moghaddam, A., Behmanesh, J., and Farsijani, A. 2016. Parameters estimation for the new four-parameter nonlinear Muskingum model using the particle swarm optimization. Water Resources Management 30(7): 2143-2160.

Nagesh Kumar, D., and Janga Reddy M. 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. J Water Resour Plan Manag 133:192–201.

Norouzi, H., and Bazargan, J. 2020. Flood routing by linear Muskingum method using two basic floods data using particle swarm optimization (PSO) algorithm. Water Supply.

Sedghi-Asl, M., Rahimi, H. 2011. Adoption of

Shi, Y., and Eberhart, R. 1998. A modified particle swarm optimizer. In 1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360) (pp. 69-73). IEEE.

Ward, J.C. 1964. Turbulent flow in porous media. Journal of the Hydraulics Division. 90(5): 1-12.

Manning's equation to 1D non-Darcy flow problems. Journal of Hydraulic Research 49(6): 814-817.

Stephenson, D.J. 1979. Rockfill in hydraulic engineering. Elsevier scientific publishing compani. Distributors for the United States and Canada.

Sidiropoulou, M.G., Moutsopoulos, K.N., and Tsihrintzis, V.A. 2007. Determination of Forchheimer equation coefficients a and b. Hydrological Processes: An International Journal 21(4): 534-554.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2013-2024

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۲۴-۲۰۱۳

Experimental Study of Hydraulic Gradient Changes in Unsteady flow within Confined Drainage Materials

R. Nasiri[1], H. Norouzi[2]*, J. Bazargan[3]
Recived: Sep.09, 2020 Accepted: Oct.21, 2020

Abstract

Unsteady flow analysis is performed using the equations of St. Venant. Calculating the slope of the energy line (S_f) is of great importance in the analysis of unsteady flow. Since S_f is equal to the hydraulic gradient (i) in a coarse porous media, the calculation of i is of great importance. In the present study, using experimental data recorded in a steel cylinder with a diameter of 16 cm and a length of 70 cm, 40 cm of which is filled with rockfill with three small, medium, and large grains, investigated the unsteady flow in a confined porous media. The particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to optimize the Forchheimer binomial relation coefficients used in steady flow (a, b) and the triplet relation used in unsteady flow (a, b, c). The results of the present study indicate that the values related to the mean relative error (MRE) in the case of using a triple relation to the binomial relation to calculate the hydraulic gradient of unsteady flow, in small materials 14.5, in medium materials 14.7 and in large material, it has improved by 12.2%. The value of the third sentence is a triple relation to the hydraulic gradient ((cdv/dt)/i) in 7.23% in small materials, 14.79% in medium materials, and 17.01% in large materials. In other words, since with increasing the diameter of the material, the efficiency of the nonlinear (non-Darcy) relation increases compared to the linear (Darcy) relation, the third sentence of the triple relation also has a greater effect on the hydraulic gradient calculations.

Keywords: Confined drainage materials, Hydraulic gradient, Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm, Triple relation, Unsteady flow

1- Post Graduate Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
2- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
(*- Corresponding Author Email: hadinorouzi72@gmail.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۳۶-۲۰۲۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2025-2036

مقاله پژوهشی

تأثیر آبیاری ناحیه‌ای ریشه و آب مغناطیس بر خصوصیات رشدی گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) در شرایط گلخانه

سیما صالحی تیزآبی[۱]، مرتضی گلدانی[۲*]، جعفر نباتی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲۶

چکیده

یکی از راهکارهای افزایش کیفیت آب آبیاری، مغناطیس کردن آن می‌باشد. پژوهشی در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۹۸-۱۳۹۷ به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه روش آبیاری (آبیاری متداول، آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر) و سه سطح آب مغناطیس (آب معمولی، آب مغناطیس شده یک بار گذر با شدت ۰/۳۶۷ تسلا و ۰/۶۳۳ تسلا) با چهار تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که در روش آبیاری متداول و آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷ تسلا بیشترین ارتفاع بوته (۱۱۰ cm)، وزن خشک اندام هوایی (۴۱/۹$g.plant^{-1}$)، وزن خشک ریشه (۱۷/۴$g.plant^{-1}$) و حجم ریشه (۱۳۷$cm^3.plant^{-1}$) به‌دست آمد. در روش آبیاری متداول و آب مغناطیس شده با شدت ۰/۶۳۳ تسلا بیش‌ترین سطح برگ (۲۵/۴$cm^2.plant^{-1}$)، وزن کل میوه (۵۰۸g)، لیکوپن (۴۸/۶$mg.gfw^{-1}$)مشاهده شد. در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و آب مغناطیس شده با شدت۰/۳۶۷ تسلا بیشترین غلظت کلروفیل b (۰/۴۸۹$mg.gfw^{-1}$) و وزن تک میوه (۴۸/۰ g) و در شدت۰/۶۳۳ تسلا بیشترین درصد ماده خشک میوه (۱۱/۱) مشاهده شد. بیشترین میزان کارایی مصرف آب زیست‌توده کل (۳۶/۶g/liter) در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و آب شاهد مشاهده گردید. در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر و آب مغناطیس شده با شدت۰/۳۶۷ تسلا بیشترین نسبت برگ به ساقه (۱/۳۷$g.plant^{-1}$)، نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی (۳/۱۴$g.plant^{-1}$) و طول ریشه (۵۳/۲cm) مشاهده گردید. بیشترین میزان محتوی رطوبت نسبی آب برگ در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر و آب مغناطیس شده با شدت۰/۶۳۳ تسلا مشاهده شد. به‌طور کلی روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت نسبت به روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر وزن کل میوه در هر بوته و کارایی مصرف آب زیست توده بالاتری داشت و هر دو شدت ۰/۳۶۷ و ۰/۶۳۳ تسلا آب مغناطیس توانست منجر به بهبود صفات مذکور گردد و اثرات ناشی از تنش خشکی را کاهش دهد که استفاده از این روش سالم ،آسان و بی خطر برای محیط زیست توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تسلا، روش‌های آبیاری، کارایی مصرف آب، لیکوپن، محتوی رطوبت نسبی آب برگ

مقدمه

خشکی جزئی منطقه ریشه (PRD[۴])یا (آبیاری ناحیه‌ای ریشه) یک روش آبیاری است که نصف ریشه در معرض خشکی قرار می‌گیرد در حالی‌که نیمه باقی‌مانده به‌طور کامل آبیاری می‌شود. در این روش فقط قسمتی از ریزوسفر ریشه با درصدی از آب آبیاری به روش معمول، آبیاری می‌شود و به‌طور متناوب پس از اینکه قسمت باقی‌مانده ریشه به مقدار مشخصی از رطوبت رسید تناوب آبیاری عوض می‌شود (Zegbe et al., 2006). ناحیه‌ای از سیستم ریشه که در معرض خشک شدن قرار می‌گیرد با ارسال پیام‌هایی به اندام‌های هوایی باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌شود. آبیاری ناحیه‌ای ریشه، با موفقیت در تعداد زیادی از محصولات زراعی و در سیستم‌های مختلف تولید استفاده شده است. تعدادی از پژوهش‌ها با PRD نشان داد که اصلی‌ترین مزیت آبیاری PRD کاهش مصرف آب برای آبیاری است (Sepaskhah and Ahmadi, 2012). آبیاری ناحیه‌ای ریشه در گوجه‌فرنگی باعث صرفه‌جویی در مصرف آب شده است و به تولیدکنندگان این امکان را می‌دهد که از ۲۵ تا ۵۰ درصد آب کم‌تری استفاده کنند بدون اینکه کاهش قابل توجهی در عملکرد داشته باشند (Wang et al., 2010). روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه باعث افزایش عملکرد در محصولات پنبه

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه اگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- دانشیار گروه اگروتکنولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- استادیار گروه پژوهشی بقولات پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: goldani@um.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.27.8
4- Partial root-zone drying

(*Gossypium herbaceum*)، گندم (*Triticum aestivum* L)، نیشکر (*Saccharum officinarum*)، سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum*) شد (Thind et al., 2010؛ Slatni et al., 2011؛ شینی دشتگل و همکاران، ۱۳۸۸). مطابق با تحقیقات انجام شده یکی از روش‌هایی که باعث بهبود کمیت و کیفیت محصول می‌شود آبیاری با آب مغناطیس شده است (نایب لویی و همکاران،۱۳۹۰). محققان بیان کرده‌اند که اثر میدان مغناطیسی روی آب منجر به تغییراتی در ساختار یون هیدراته و همچنین خواص فیزیکی و شیمیایی و رفتار نمک‌های معدنی محلول و تغییر در رسوب مواد شیمیایی می‌شود (Mosin and Ignatov, 2014). همچنین آب پس از عبور از یک میدان مغناطیسی می‌تواند خواص خود را تا مدتی حفظ کند به اصطلاح آب دارای حافظه می‌باشد (Chibowski and Szcze, 2018). آبیاری با آب مغناطیس شده یکی از با ارزش‌ترین فناوری‌های پیشرفته است که باعث صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش کیفیت و عملکرد گیاهان می‌شود (Hozayn et al., 2013). همچنین با تغییر در خواص مولکول‌های آب منجر به کاهش تنش سطحی، کاهش گرانروی، افزایش قابلیت انحلال پذیری، افزایش نفوذپذیری و بهبود اکسیژن نیز می‌شود از این رو عناصر معدنی را به آسانی در دسترس گیاهان قرار می‌دهد (Khalil et al., 2016). کاربرد تکنولوژی میدان مغناطیسی در کشاورزی یک روش غیر مرسوم، سالم، اقتصادی و محیط‌زیستی محسوب می‌شود که منجر به بهبود مشخصات آب و خاک شده و در نهایت باعث بهبود رشد، عملکرد و بهره‌وری آب می‌شود (Hozayn et al., 2013). بررسی شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی بر عملکرد گیاه تربچه(*Raphanus sativus*) نشان داد که آب مغناطیس شده تأثیر مثبتی بر عملکرد گیاه داشته و بیشترین تأثیر نیز مربوط به شدت میدان مغناطیسی ۰/۶۳۳ تسلا بود (متانت و همکاران، ۱۳۹۷). استفاده از آب مغناطیس شده می‌تواند نقش موثری در انواع شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه گوجه‌فرنگی داشته باشد (رستگار و صادقی، ۱۳۹۴). همچنین بررسی اثر آب مغناطیسی و تنش شوری بر خصوصیات جوانه‌زنی لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) نشان داد که قرار گرفتن آب آبیاری با تیمارهای شوری در معرض میدان مغناطیسی می‌تواند اثرات منفی شوری را بر شاخص‌های جوانه‌زنی کاهش دهد و نقش مهمی در بهبود جوانه‌زنی و تسریع رشد گیاهچه لوبیا ایفا کند (گلدانی و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به موارد فوق هدف از این مطالعه بررسی برهم‌کنش روش‌های آبیاری ناحیه‌ای مختلف و سطوح مختلف آب مغناطیس بر صفات کمی و کیفی گوجه‌فرنگی و یافتن راهکاری برای تولید بهتر کمی و کیفی محصول گوجه‌فرنگی با مصرف آب کمتر در شرایط گلخانه بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در سال ۱۳۹۷ به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. سه تیمار روش آبیاری شامل (آبیاری متداول، آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت (یک طرف گلدان به‌طور ثابت آبیاری می‌شد) و آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر (یک نوبت یک طرف گلدان آبیاری انجام می‌گرفت در مرحله بعد آبیاری طرف دیگر گلدان آبیاری می‌شد) بود. سه سطح آب مغناطیس شامل (آب معمولی، آب مغناطیس شده یک بار گذر با شدت ۰/۳۶۷ و ۰/۶۳۳ تسلا) بود. ابتدا بذرها در سینی‌های نشا با بستر کوکوپیت، پرلیت کشت شدند۳۰ روز بعد زمانی که گیاهچه‌ها به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر رسیدند به گلدان‌هایی با ابعاد ۲۳*۲۱ حاوی بستر شن، ماسه، خاک باغچه و کود حیوانی به نسبت ۲/۱:۱:۱:۱ بود منتقل شدند، میزان عناصر خاک قبل از کاشت و ویژگی‌های آب آبیاری تعیین شد (جدول ۱ و ۲) و بنابر نتایج آزمایش میزان کود مورد نیاز به خاک اضافه شد، که در ابتدا ازکودهای حاوی فسفر بیشتر برای توسعه و تثبیت بهتر ریشه استفاده شد سپس در طی فصل رشد ازکودهای ریز مغذی عناصر ماکرو و میکرو و اسید هیومیک استفاده شد.

جدول ۱- برخی خصوصیات شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

بافت خاک	سیلت	شن	رس	ماده آلی (٪)	pH	EC(dS.m^{-1})	N (%)	P(mg.kg^{-1})	K(mg.kg^{-1})
Loamy sand	۱۳/۳۷	۸۲/۴۰	۴/۲۳	۱/۲۱	۸/۸۰	۰/۸۱۷	۰/۰۶۳	۱۳/۷	۱۸۵

جدول ۲- برخی خصوصیات شیمیایی آب استفاده شده در آزمایش

SO4	HCO3	pH	EC(dS.m^{-1})	Mg	Ca (meq/L)	K	Na	Cl
۲/۷۵	۷/۸۳	۷/۹۴	۱/۲	۲/۹۱	۴/۴۲	۰/۶۲۱	۴/۱۲	۲/۴۳

گلدان‌ها توسط ورق‌های پلی‌کربنات به دو قسمت مجزا تقسیم شد تا آبیاری ناحیه‌ای و خشک کردن جزئی ریشه به‌طور ثابت و متغیر اعمال شود. در هنگام انتقال نشاء به گلدان ریشه گیاه نیز به دو قسمت تقسیم شد و در گلدان‌های مذکور کشت صورت گرفت. حدود

۱۰ روز بعد و پس از استقرار کامل گیاه تیمارها اعمال شد، در تمام طول دوره رشد شرایط یکسان برای همه تیمارها فراهم شد و عملیات داشت شامل مبارزه با آفات و امراض و کودهی به‌طور یکسان صورت گرفت. به منظور تعیین نیاز آبی گیاه به وسیلهٔ تشتک تبخیر مستقر در گلخانه و از طریق فرمول (۱) محاسبه شد.

$$ET_C=k_c\ k_p\ E_{pan} \quad (۱)$$

در این معادله K_C ضریب گیاهی گوجه‌فرنگی، K_P، ضریب تشتک تبخیر E_P، تبخیر از سطح تشتک بود Blanco and (Folegatit., 2003). برای تعیین زمان آبیاری رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (FC) و تخلیه مجاز رطوبتی (MAD) گوجه فرنگی محاسبه شد. در ادامه با دستگاه رطوبت‌سنج (TDR[1]) میزان رطوبت خاک در همه گلدان‌ها مورد بررسی قرار گرفت و هنگامی که به حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (۵۰ درصد ازکل رطوبت قابل دسترس گیاه در ناحیه ریشه) رسید آبیاری انجام شد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۴). برای تهیه آب مغناطیسی از سیستمی با قابلیت چرخشی و شدت میدان مغناطیسی مختلف که در دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با شماره ثبت اختراع ۲۰۴۷۷ بود استفاده شد. مقدار آب مورد نیاز با دستگاه مغناطیس کننده در دو شدت ۰/۳۶۷ و۰/۶۳۳ تسلا و شدت جریان عبوری آب ۵۰ هرتز مغناطیسی شده و براساس نیاز آبی گیاه گلدان‌ها آبیاری گردید. در مراحل مختلف رشد مراقبت‌های زراعی برای همه تیمارها به‌طور یکنواخت اعمال شد.در انتهای فصل رشد و پس از رسیدگی فیزیولوژیک پس از اعمال تیمارهای آبیاری رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی با استفاده از روش (Dere, et al., 1998). اندازه‌گیری شد. برای این منظور از ۱۰۰ میلی‌گرم برگ جوان کاملاً توسعه‌یافته استفاده شد و رنگ‌دانه‌ها با استفاده از اتانول ۹۶ درصد استخراج شد. میزان جذب در طول‌موج ۶۴۸ و ۶۶۴ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر انجام شد. بر اساس معادله (۲) و (۳) غلظت کلروفیل a , b محاسبه گردید (Porra., 2002).

$$Chla = ۱۳/۳۶\times A\ ۶۶۴ - ۵/۱۹\times A۶۴۸ \quad (۲)$$

$$Chlb = ۲۷/۴۳\times A۶۴۸ - ۸/۱۲\times A۶۶۴ \quad (۳)$$

برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC) از جوان‌ترین برگ کاملاً توسعه یافته، نمونه‌هایی تهیه و توزین شد و وزن تر آن‌ها ثبت شد. این نمونه‌ها به مدت یک شب در آب مقطر در دمای چهار درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از حذف رطوبت سطحی، وزن آماس آن‌ها توسط ترازوی دیجیتالی ثبت شد. سپس نمونه‌های برگ به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. در نهایت مقدار نسبی آب برگ از طریق معادله شماره (۴) محاسبه شد (Paknejad et al., 2007).

$$RWC\ (\%) = F_w - D_w / S_w - D_w \times 100 \quad (۴)$$

در این معادله F_w، وزن‌تر برگ بلافاصله بعد از نمونه‌برداری، D_w، وزن خشک برگ بعد از قرار گرفتن در آون، S_w، وزن اشباع برگ بعد از قرار گرفتن در آب مقطر (تورژسانس) بود.در انتهای فصل رشد ارتفاع بوته اندازه‌گیری شد. برای محاسبه سطح برگ از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (Delta T) استفاده شد.در انتهای آزمایش بوته‌های گوجه‌فرنگی از هر گلدان خارج و وزن‌تر و خشک اندام هوایی و اندام زیرزمینی، تعداد میوه در بوته، وزن تک میوه با ترازوی دیجیتالی و حجم ریشه با روش ارشمیدس و طول ریشه توسط خط کش در هر گلدان اندازه‌گیری شد. عملکرد میوه هر گلدان از ابتدا تا انتهای دوره رشد اندازه‌گیری شد. درصد ماده خشک میوه پس از برش میوه و قرارگیری به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. مقدار لیکوپن میوه توسط روش Barba et al., (2006) در طول‌موج ۵۰۳ نانومتر تعیین شد. کارایی مصرف آب آبیاری با استفاده از معادله (۵) محاسبه شد (Payero et al., 2009).

$$WUE=Y/I \quad (۵)$$

در این معادله WUE، کارایی مصرف آب زیست‌توده کل برحسب کیلوگرم محصول در لیتر آب مصرفی، Y عملکرد محصول برحسب کیلوگرم I، حجم آب آبیاری در طول فصل رشد برحسب لیتر بود. به طور کل میزان آب مصرفی در کل دوره رشدی گیاه گوجه‌فرنگی برای روش آبیاری متداول ۲۲/۱۲۵ لیتر و برای روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و متغیر ۱۱/۶۲۵ لیتر بود.

تجزیه و تحلیل داده‌ها و مقایسه میانگین‌ها توسط نرم‌افزار Minitab 17 انجام شد. مقایسه میانگین با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که ارتفاع بوته تحت تأثیر معنی‌دار اثر متقابل روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار گرفت (جدول ۳). بیش‌ترین وکم‌ترین ارتفاع بوته به ترتیب در روش آبیاری متداول و آب مغناطیسی شده با شدت ۰/۳۶۷ تسلا و روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و آب مغناطیسی شده با شدت ۰/۶۳۳ تسلا مشاهده شد (جدول ۴). نتایج نشان دادکه استفاده از آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷ تسلا در روش آبیاری متداول و روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت منجر به افزایش ۱۸ و ۸ ٪ ارتفاع بوته گردید اما در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر ارتفاع بوته کاهش ۱۲٪ نشان داد که نشان دهنده این بود که گیاه نسبت به دو روش آبیاری دیگر بیشتر تحت تنش بوده است (جدول ۴). مقایسه میانگین ارتفاع بوته در بین سطوح مختلف آب مغناطیس نشان داد که شدت ۰/۳۶۷ تسلا منجر به افزایش ارتفاع بوته بیشتری نسبت به

1- Time-Domain Reflectometry

شدت ۰/۶۳۳ تسلا شده است (جدول ۴). با توجه به جدول موجود ارتفاع بوته در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و متغیر و در مقایسه بین آب شاهد نسبت به آب مغناطیس شده۰/۶۳۳ تسلا چون گیاه با تنش خشکی مواجه بود ارتفاع بوته کاهش یافت و آب مغناطیس شده نتوانست اثرات تنش خشکی را کاهش و بهبود دهد (جدول ۴). گیاه برای زنده ماندن در هنگام مواجهه با تنش، مواد غذایی و انرژی را به جای استفاده در جهت رشد، به مکانیسم‌های نگهداری کننده در مقابل تنش منتقل می‌کند. به همین دلیل رشد کم یکی از مکانسیم‌های گیاه برای زنده ماندن در شرایط تنش می‌باشد (Khalid, 2006).

جدول ۳- منابع تغییر، درجه آزادی و سطح احتمال اثر روش‌های مختلف آبیاری ناحیه‌ای ریشه و سطوح مختلف آب مغناطیس بر صفات کمی گیاه گوجه‌فرنگی

اثر تیمارها	درجه آزادی (df)	ارتفاع بوته	سطح برگ	محتوی نسبی آب برگ	کلروفیل a	کلروفیل b	وزن خشک برگ در بوته	وزن خشک ساقه در بوته	وزن خشک اندام هوایی
روش آبیاری(MI)	۲	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۳۱^{ns}	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**
آب مغناطیس(W)	۲	۰/۰۱**	۰/۶۰^{ns}	۰/۲۱^{ns}	۰/۲۷^{ns}	۰/۰۱**	۰/۲۳^{ns}	۰/۷۸^{ns}	۰/۹۲^{ns}
MI×W	٤	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۱۰^{ns}	۰/٤۷^{ns}	۰/۰۱**	۰/۱۱^{ns}	۰/۰٦^{ns}	۰/۰۹^{ns}
خطا (E)	۲۷	–	–	–		–	–	–	–
ضریب تغییرات CV%		۸/٦٤	۷/۸	۹/٤٤	۳/۳۷	۹/۳۷	۹/۰۱	۱۵/۲	۱۳/۷

*، ** و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و غیر معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد

سطح برگ تحت تأثیر معنی‌دار اثر متقابل روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار گرفت (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین سطح برگ نشان داد که در بین روش‌های مختلف آبیاری بیش‌ترین و کم‌ترین میزان سطح برگ به ترتیب در روش آبیاری متداول و روش آبیاری بخش ریشه به‌طور ثابت و آب مغناطیس شده با شدت۰/۶۳۳ تسلا مشاهده شد (جدول ۴). در روش آبیاری متداول میزان سطح برگ در شدت ۰/۳۶۷ و ۰/۶۳۳ تسلا به ترتیب ۱۱ و ۳۹ ٪ نسبت به آب معمولی (شاهد) افزایش یافت اما در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و متغیر میزان سطح برگ به علت وجود تنش خشکی روند نزولی داشت و آب مغناطیس شده نتوانست اثرات تنش خشکی را تعدیل کند (جدول ۴). پاسخ گیاه در هنگام بروز تنش خشکی، کاهش سطح برگ بوده که کاهش میزان تعرق را به همراه دارد تا میزان آب موجود در داخل اندام‌ها حفظ شود از دلایل کاهش سطح برگ می‌توان به کاهش آماس سلولی و پتانسیل فشاری در برگ اشاره کرد، به‌طوری که این کاهش منجر به کاهش فتوسنتز شده و به تبع آن مقدار مواد فتوسنتزی برای رشد برگ کاهش می‌یابد و نهایتاً منجر به کاهش سطح برگ می‌شود (نیکبخت و همکاران، ۱۳۹۳). محتوی نسبی آب برگ تحت تأثیر معنی‌دار روش‌های مختلف آبیاری قرار گرفت (جدول ۳). بررسی نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان محتوی نسبی آب برگ در بین روش‌های مختلف آبیاری به ترتیب در روش آبیاری متداول، روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر و روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت بود و آب مغناطیس شده با شدت۰/۶۳۳تسلا نسبت به آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷تسلا منجر به افزایش بیشتر محتوی رطوبت نسبی گردید (جدول۴). در روش‌های آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و متغیر و آب مغناطیس شده از تیمار شاهد به ۰/۳۶۷و ۰/۶۳۳ تسلا محتوی نسبی آب برگ روند افزایشی داشت که میزان افزایش آن در روش آبیاری ناحیه‌ای به‌طور ثابت و متغیر به ترتیب ۱۶٪ و ۸٪ بود (جدول ۴). ابتدایی‌ترین عکس العمل درونی بروز تنش‌های اسمزی مانند خشکی در بسیاری از گیاهان سبب تقلیل پتانسیل آبی و در نتیجه افت RWC می‌باشد (سرافراز اردکانی و همکاران، ۱۳۹۷). آب مغناطیس شده می‌تواند با تغییر خواص آب باعث تضعیف پیوند واندروالسی و تقویت پیوندهای هیدروژنی شود. به دلیل تغییرات فیزیکی و شیمیایی آب آبیاری و کوچک‌تر شدن مولکول‌های آب و افزایش توانایی جذب آب توسط گیاه RWC افزایش می‌یابد (Ali Al-Jubouri and Hamza, 2012) نتایج به‌دست آمده با نتایج سایر پژوهشگران برای گیاه گوجه‌فرنگی مطابقت داشت (Selim and El-Nady, 2011). میزان کلروفیل a تحت تأثیر معنی‌دار روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار نگرفت (جدول۳). اما غلظت کلروفیل b تحت تأثیر معنی‌دار برهم‌کنش روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار گرفت (جدول ۳). بیش‌ترین میزان کلروفیل b در بین روش‌های مختلف آبیاری به ترتیب در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت، روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور

متغیر و آبیاری متداول مشاهده شد (جدول ۴). مقایسه شدت‌های مختلف آب مغناطیس بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت کلروفیل b را به ترتیب در شدت ۰/۳۶۷ تسلا و شاهد نشان داد. استفاده از آب مغناطیس شده منجر به افزایش غلظت کلروفیل b در تمام روش‌های آبیاری شد که در روش آبیاری متداول ۶۱ ٪ در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و متغیر به ترتیب ۲۱٪ و ۱۰ ٪ افزایش یافت (جدول ۴). یکی از تغییرات بیوشیمیایی در گیاهانی که در شرایط تنش‌های محیطی نظیر خشکی و شوری قرار دارند، تولید گونه‌های فعال اکسیژن با افزایش انتقال الکترون به مولکول اکسیژن است که گیاه برای جلوگیری از آسیب این گونه‌های فعال اکسیژن با افزایش میزان کلروفیل b سعی می‌کند تا میزان آسیب به گیاه را به حداقل برساند (فتحی–امیرخیز و همکاران، ۱۳۹۰). وزن خشک اندام هوایی تحت تأثیر معنی‌دار روش‌های مختلف آبیاری قرار گرفت (جدول ۳). بررسی نتایج نشان داد که در بین روش‌های مختلف آبیاری بیش‌ترین میزان وزن خشک اندام هوایی به ترتیب در روش آبیاری متداول، روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر و روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت بود (جدول ۶).

جدول ٤- اثر روش‌های مختلف آبیاری ناحیه‌ای ریشه و سطوح مختلف آب مغناطیس بر ویژگی‌های کمی گیاه گوجه‌فرنگی

صفات	شدت آب مغناطیسی (T)	روش آبیاری			میانگین
		آبیاری متداول	آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت	آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر	
ارتفاع بوته (cm)	۰	^{ab}۹۳/۰	^{c}۷٤/۲	^{bc}۸۲/٦	^{A}۸۳/۲
	۰/۳٦۷	^{a}۱۱۰	^{bc}۸۰/۲	^{c}۷۲/٦	^{A}۸۷/٦
	۰/٦۳۳	^{bc}۸۰/۰	^{c}٦۹/٥	^{bc}۷۷/۲	^{B}۷٥/٥
	میانگین	$^{(A)}$۹٤/۳	$^{(B)}$۷٤/٦	$^{(B)}$۷۷/٥	
سطح برگ (cm^2)	۰	^{ac}۱٦٤۰/۲۱	^{bc}۱٤۱٦/۲۳	^{ab}۲۲۰٥/۲٥	^{A}۱۷٥۳/۸۹
	۰/۳٦۷	^{ac}۱۸۲۹/٥٦	^{c}۱۲٦٦/٥٤	^{ac} ۱۸۸۲/٦۱	^{A}۱٦٥۹/٥۷
	۰/٦۳۳	^{a}۲٥٤٤/٦۱	^{c}۱۲۱٤/۳۲	^{ac}۱٦۷۲/٤۲	^{A}۱۸۱۰/٤٥
	میانگین	$^{(A)}$۲۰۰٤/۷۹	$^{(B)}$۱۲۹۹/۰۳	$^{(A)}$۱۹۲۰/۰۹	
محتوی نسبی آب برگ (٪)	۰	^{ab}۸۰/۸	^{b}٦۲/۰	^{ab}۷٤/٤	^{A}۷۲/٤
	۰/۳٦۷	^{b}۸۱/۱	^{ab}۷۲/٦	^{ab}۷۳/۲	^{A}۷٥/٦
	۰/٦۳۳	^{ab}۸٤/۳	^{ab}۷۱/٤	^{a}۷۹/۹	^{A}۷۸/٥
	میانگین	$^{(B)}$۸۲/۱	$^{(B)}$٦۸/۷	$^{(A)}$۷٥/۸	
کلروفیل b ($mg.gfw^{-1}$)	۰	^{b}۰/۲٦۲	^{ab}۰/٤۰٤	^{a}۰/٤۳۷	^{B}۰/۳٦۸
	۰/۳٦۷	^{a}۰/٤۲٤	^{a}۰/٤۸۹	^{a}۰/٤۲۱	^{A}۰/٤٤٥
	۰/٦۳۳	^{ab}۰/۳۹٥	^{ab}۰/۳۸۷	^{a}۰/٤٦٤	$^{A B}$۰/٤۱٥
	میانگین	$^{(B)}$۰/۳٦۰	$^{(A)}$۰/٤۲۷	$^{(A)}$۰/٤٤۰	
وزن خشک برگ ($g.plant^{-1}$)	۰	^{a}۱۹/٦	^{c}۹/۷	^{b}۱۳/۲	^{A}۱٤/۲
	۰/۳٦۷	^{a}۲۰/۸	^{c}۱۰/۰	$^{b c}$۱۲/٥	^{A}۱٤/٤
	۰/٦۳۳	^{a}۱۷/۸	^{c}۹/۹۹	$^{b c}$۱۲/۸	^{A}۱۳/٥
	میانگین	$^{(A)}$۱۹/٤٥	$^{(C)}$۹/۹۲	$^{(B)}$۱۲/۹	
وزن خشک ساقه ($g.plant^{-1}$)	۰	^{a}۱۸/۹	^{b}۸/۲۱	^{b}۱۸/۸	^{A}۱۳/۳
	۰/۳٦۷	^{a}۲۱/۱	^{b}۸/۲۰	^{b}۹/٦۲	^{A}۱۲/۹
	۰/٦۳۳	^{a}۲۱/٤	^{b}۹/۲۷	^{b}۱۰/۰	^{A}۱۳/٥
	میانگین	$^{(A)}$۲۰/٥	$^{(C)}$۸/٥٦	$^{(B)}$۱۰/٥	

* در هر صفت میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

همچنین در تمام روش‌های آبیاری آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷تسلا نسبت به آب شاهد منجر به افزایش وزن خشک اندام هوایی شد که میانگین وزن خشک اندام هوایی در روش آبیاری متداول ۲/۱ برابر روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و ۱/۶ برابر روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر بود (جدول ۶).

در این آزمایش آب مغناطیس شده باعث کاهش اثرات تنش شد (جدول ۶). افزایش کلروفیل در هنگام استفاده از میدان مغناطیسی می‌تواند ناشی از افزایش جذب مواد مغذی مورد نیاز مانند منیزیم و نیتروژن برای تشکیل کلروفیل شود (Alzubaidy, 2014). همچنین آب مغناطیس شده باعث افزایش جذب مواد غذایی از طریق ریشه‌ها شده که منجر به کاهش اثر تنش خشکی شده است .Marei et al,) (2014. نسبت وزن برگ به ساقه تحت تأثیر معنی‌دار روش‌های مختلف آبیاری قرار گرفت (جدول ۵). مقایسه میانگین نسبت وزن برگ به ساقه نشان داد که در بین روش‌های آبیاری مختلف بیشترین نسبت وزن برگ به ساقه به‌ترتیب در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر و روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و روش آبیاری متداول بود (جدول ۶). در روش آبیاری متداول و آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت استفاده از آب مغناطیس شده روند کاهشی نشان داد ، که کاهش نسبت وزن برگ به ساقه به ترتیب در آبیاری متداول ۲۵ ٪ و آبیاری ناحیه‌ای به‌طور ثابت ۱۳٪ بود اما در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر در آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷ تسلا نسبت به تیمار شاهد نسبت وزن برگ به ساقه ۲۹٪ افزایش یافت (جدول ۶). مغناطیس کردن آب منجر به افزایش نظم در آرایش مولکول‌های آب و در نتیجه افزایش حلالیت آب می‌شود. حلالیت بیشتر آب باعث حل شدن کاتیون‌ها و آنیون‌های بیشتر شده و گیاه قادر است مواد غذایی بیشتری جذب کند (Ali Al-Jubouri and Hamza., 2012). نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی تحت تأثیر معنی‌دار اثر متقابل روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار گرفت که متأثر از روش‌های آبیاری مختلف بود (جدول ۵). بیش‌ترین نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر و آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷تسلا بود و کمترین نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷ تسلا بود (جدول ۶). نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی نیز مانند نسبت وزن برگ به ساقه در روش‌های آبیاری متداول و آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت در شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده روند کاهشی داشت اما نسبت اندام هوایی به اندام زیرزمینی در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر در آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷ تسلا نسبت به شاهد هفت درصد افزایش یافت (جدول ۶). وزن خشک ریشه تحت تأثیر معنی‌دار برهم‌کنش روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس قرار گرفت که متأثر از روش‌های آبیاری مختلف بود (جدول ۵). در تمام روش‌های آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده وزن خشک ریشه روند افزایشی داشت که در روش آبیاری متداول ۳۱٪ در روش آبیاری ناحیه‌ای به‌طور ثابت ۱۱٪ و در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر ۶۰٪ افزایش یافت (جدول ۶). معمولاً افزایش تنش خشکی کاهش وزن خشک ریشه را در پی دارد. با افزایش شدت تنش خشکی فتوسنتز برگ کاهش می‌یابد. با کاهش فتوسنتز برگ به دلیل تنش خشکی احتیاجات قندی برای تنظیم اسمزی در گیاه زیاد می‌شود که این پدیده توقف رشد اجتناب ناپذیر ریشه را در پی دارد Keshavarset) al., 2012). اما در این آزمایش آب مغناطیس شده منجر به کاهش اثرات تنش خشکی شده است و باعث افزایش وزن خشک ریشه شد (جدول۶). احتمالاً اثرات آب مغناطیس شده به عنوان یک عامل محافظ در برابر کمبود آب عمل می‌کند .Selim and El-Nady,) (2011. همچنین آب مغناطیس شده باعث افزایش وزن، طول و قطر ریشه و علاوه برآن کارایی مصرف آب در بخش کشاورزی را نیز بالا می‌برد (Hozayn et al., 2013).

طول ریشه تحت تأثیر معنی‌دار روش‌های مختلف آبیاری قرار گرفت (جدول ۵). نتایج بررسی‌ها نشان داد که در تمام روش‌های آبیاری در شدت۰/۳۶۷ تسلا نسبت به شاهد طول ریشه افزایش پیدا کرده است که در آبیاری متداول ۴/۳ ٪ در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت ۱/۴٪ و در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر ۱/۹٪ طول ریشه افزایش یافته است. افزایش طول ریشه ممکن است به دلیل گسترش دیواره سلول‌های جنینی و افزایش فعالیت آمیلازی بر اثر میدان مغناطیسی باشد (Bilalis et al., 2012). حجم ریشه تحت تأثیر معنی‌دار برهم‌کنش روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار گرفت (جدول ۵). بیشترین میزان حجم ریشه مربوط به روش آبیاری متداول و آب شاهد و کمترین حجم ریشه در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر و آب مغناطیس شده با شدت۰/۳۶۷تسلا مشاهده شد (جدول ۶). در روش آبیاری متداول حجم ریشه در شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده ۸/۱ ٪ کاهش یافت اما در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و متغیر به ترتیب ۲۰٪ و۷۵ ٪ حجم ریشه افزایش یافته است (جدول ۶). آب مغناطیس شده با افزایش تقسیم سلولی منجر به افزایش حجم ریشه می‌شود که با نتایج (Rochalska et al., 2008) در گیاه چغندرقند مطابقت دارد.

جدول ۵- منابع تغییر، درجه آزادی و سطح احتمال اثر روش‌های مختلف آبیاری ناحیه‌ای ریشه و سطوح مختلف آب مغناطیس بر صفات کمی وکیفی گیاه گوجه‌فرنگی

اثر تیمارها	درجه آزادی (df)	نسبت وزن برگ به ساقه	نسبت اندام هوایی به زیرزمینی	وزن خشک ریشه	طول ریشه	حجم ریشه	وزن تک میوه	درصد ماده خشک میوه	لیکوپن	وزن کل میوه در بوته	WUE زیست توده کل
روش آبیاری (M)	۲	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۳*	۰/٤۰^{ns}	۰/۷۰^{ns}	۰/۰۱**	۰/۰۱**
آب مغناطیس (w)	۲	۰/۲۷^{ns}	۰/۱٦^{ns}	۰/۰۷^{ns}	۰/۱۸^{ns}	۰/۰۱**	۰/۱۳^{ns}	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۱۲^{ns}
(MI*w)	٤	۰/۱٦^{ns}	۰/۰۲*	۰/۰۱**	۰/۸۰^{ns}	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۰۱**	۰/۱۱^{ns}
خطای کل (E)	۲۷	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
CV%ضریب تغییرات		۱۷/٦	۱٤/۱	۱۳/۳	۹/۲۵	۸/۱۲	۱٦/۳	۸/۱۹	۱٦/۲	۱٤/۲	

*. ** و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و غیر معنی‌دار در سطح پنج درصد

بررسی نتایج نشان داد که وزن تک میوه تحت تأثیر معنی‌دار برهم‌کنش روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار گرفت که متأثر از روش‌های مختلف آبیاری بود (جدول ۵). بیشترین و کمترین وزن تک میوه در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷ و ۰/۶۳۳ تسلا مشاهده شد (جدول ۶). در تمام روش‌های آبیاری وزن تک میوه در شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده نسبت به آب (شاهد) افزایش یافته است که این افزایش در روش آبیاری متداول و در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر و آب مغناطیس شده با شدت۰/۶۳۳تسلا وزن تک میوه ۲۴٪ و۱۶٪ بود اما وزن تک میوه در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت در شدت ۰/۳۶۷ تسلا ۲۵٪ افزایش داشت (جدول ۶).

جدول ٦- اثر روش‌های مختلف آبیاری ناحیه‌ای ریشه و سطوح مختلف آب مغناطیس بر ویژگی های کمی وکیفی گیاه گوجه‌فرنگی

صفات	شدت آب مغناطیسی (T)	روش آبیاری			میانگین
		آبیاری متداول	آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت	آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر	
وزن خشک اندام هوایی (g.plant^{-1})	۰	^{a}۳۸/٦	^{c}۱۷/۹	^{b}۲٦/۱	۲۷/۵^{A}
	۰/۳٦۷	^{a}٤۱/۹	^{c}۱۸/۲	$^{b\,c}$۲۲/۲	۲۷/٤^{A}
	۰/٦۳۳	^{a}۳۹/۳	^{c}۱۹/۲	$^{b\,c}$۲۲/۹	۲۷/۱^{A}
	میانگین	$^{(A)}$۳۹/۹	$^{(C)}$۱۸/٤	$^{(B)}$۲۳/۷	
وزن برگ/ساقه (g.plant^{-1})	۰	^{ab}۱/۰۵	^{ab}۱/۲۰	^{ab}۱/۰٦	^{A}۱/۱۰
	۰/۳٦۷	^{ab}۰/۹۸۸	^{ab}۱/۲۳	^{a}۱/۳۷	^{A}۱/۱۹
	۰/٦۳۳	^{b}۰/۸٤۳	^{ab}۱/۰۸	^{ab}۱/۲۹	^{A}۱/۰۷
	میانگین	$^{(B)}$۰/۹٦۵	$^{(A)}$۱/۱۷	$^{(A)}$۱/۲٤	
اندام هوایی/اندام زیرزمینی (g.plant^{-1})	۰	^{ab}۲/۹۵	^{ab}۲/۰۳	^{ab}۲/۹۳	^{A}۲/٦٤
	۰/۳٦۷	۲/٤۳^{ab}	^{b}۱/۸۲	^{a}۳/۱٤	^{A}۲/٤٦
	۰/٦۳۳	^{ab}۲/۸۵	^{ab}۱/۹۹	^{b}۱/۹۲	^{A}۲/۲۵
	میانگین	$^{(A)}$۲/۷۵	$^{(B)}$۱/۹۵	$^{(A)}$۲/٦٦	
وزن خشک ریشه (g.plant^{-1})	۰	^{b}۱۳/۲	^{cd}۸/۹۲	^{cd}۹/۰۵	^{A}۱۰/٤

	۰/۳۶۷	^{a}۱۷/٤	$^{b\,d}$۹/۹۸	^{d}۷/٤٦	^{A}۱۱/٦
	۰/٦۳۳	^{ab}۱۳/۷	$^{b\,d}$۹/۸۷	^{bc}۱۲/۰	^{A}۱۱/۸
	میانگین	$^{(A)}$۱٤/۸	$^{(B)}$۹/۵۲	$^{(B)}$۹/۵۱	
طول ریشه (cm)	۰	^{a}٤٦/۲	^{a}۵۲/۵	^{a}۵۲/۵	^{A}۵۰/٤
	۰/۳٦۷	^{a}٤۸/۰	^{a}۵۳/۲	^{a}۵۳/۰	^{A}۵۱/٤
	۰/٦۳۳	^{a}٤۱/٤	^{a}۵۲/۲	^{a}۵۰/۰	^{A}٤۷/۸
	میانگین	$^{(B)}$٤۵/۲	$^{(A)}$۵۲/٦	$^{(A)}$۵۱/۸	
حجم ریشه($cm^3.plant^{-1}$)	۰	^{a}۱۳۷	^{de}۷٦/۲	^{de}۸۰/۰	^{B}۹۷/۹
	۰/۳٦۷	^{ab}۱۲۷	^{de}۷۵/۰	^{e}٦۱/۸	c۸۸/۰
	۰/٦۳۳	^{a}۱۲۹	^{cd}۹۰/۰	^{bc}۱۰۸	^{A}۱۰۹
	میانگین	$^{(A)}$۱۳۱	$^{(B)}$۸۰/٤	$^{(B)}$۸۳/٤	
وزن تک میوه($g.plant^{-1}$)	۰	^{b}۳۰/٦	^{ab}۳۸/۱	^{b}۲۹/۸	^{A}۳۲/۸
	۰/۳٦۷	^{b}۲۹/۷	^{a}٤۸/۰	^{ab}۳٤/۸	^{A}۳۷/۵
	۰/٦۳۳	^{ab}۳۸/۳	^{b}۲۹/۲	^{ab}۳٤/۸	^{A}۳٤/۱
	میانگین	$^{(A)}$۳۲/۹	$^{(A)}$۳۸/٤	$^{(A)}$۳۳/۱	
درصد ماده خشک میوه	۰	^{ab}۹/۱۵	^{a}۹/۵۲	^{ab}۹/٤٤	^{A} ۹/۳۷ B
	۰/۳٦۷	^{ab}۹/۲۷	^{b}٦/۷۸	^{ab}۹/۳۳	^{B}۸/٤٦
	۰/٦۳۳	^{ab}۸/٦۱	^{a}۱۱/۱	^{a}۱۰/۰	^{A}۹/۹۲
	میانگین	$^{(A)}$۹/۰۱	$^{(A)}$۹/۱۵	$^{(A)}$۹/۵۹	
لیکوپن ($mg.gfw^{-1}$)	۰	^{c}۲۲/۲	^{c}۲۱/٦	^{ac}۲٦/۵	^{B}۲۳/٤
	۰/۳٦۷	^{c}۲۰/٤	^{ac}۲۷/٤	^{ac}۳۵/۲	^{B}۲۷/۷
	۰/٦۳۳	^{a}٤۸/٦	^{ab}٤٦/۳	^{bc}۲٤/۵	^{A}۳۹/۸
	میانگین	$^{(A)}$۳۰/٤	$^{(A)}$۳۱/۸	$^{(A)}$۲۸/۷	
وزن کل میوه ($g.plant^{-1}$)	۰	^{ab}۳۰۳	^{ab}٤۳۳	^{b}۲۲۷	$^{A\,B}$۳۲۱
	۰/۳٦۷	^{b}۲۲٤	^{b}۲۷۲	^{b}۲٤٦	^{B}۲٤۸
	۰/٦۳۳	^{a}۵۰۸	^{ab}۳۳۲	^{b}۲٤۷	^{A}۳٦۲
	میانگین	$^{(A)}$۳٤۵	$^{(A)}$۳٤٦	$^{(B)}$۲۷۰	
WUE (g/liter) زیست توده کل	۰	^{b}۱۵/٤	^{a}۳٦/٦	^{ab}۲۰/٦	۲٤/۲^{A}
	۰/۳٦۷	^{b}۱۲/۰	^{ab}۲۳/٦	^{ab}۲۱/۸	^{A}۱۹/۲
	۰/٦۳۳	^{ab}۲۲/٦	^{ab}۲۸/٦	^{ab}۲۲/۰	۲٤/٤^{A}
	میانگین	$^{(B)}$۱٦/۷	$^{(A)}$۲۹/٦	$^{(B)}$۲۱/۵	

* در هر صفت میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک براساس آزمون LSDدر سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

کاهش عملکرد گیاه در هنگام مواجهه با تنش خشکی ممکن است به دلیل عدم وجود رطوبت کافی در منطقه‌ی ریشه گیاه باشد. کاهش رطوبت، کاهش فرایندهای فیزیولوژیکی از قبیل جذب مواد غذایی، رشد گیاه، فتوسنتز و تجمع ماده خشک گیاهی را به دنبال دارد که این مهم منجر به کاهش عملکرد گیاه در مواجهه با تنش آبی می‌شود (اصلانی و همکاران، ۱۳۹۸). تنش آبی باعث کاهش واکنش‌های بیولوژیک و آب ذخیره شده در میوه می‌شود که در این حالت کاهش عملکرد ناشی از کاهش فتوسنتز و انتقال مواد به سمت

میوه می‌باشد (Keshavars et al., 2012). اما آبیاری با آب مغناطیس شده منجر به افزایش در دسترس بودن، جذب و همراه کردن مواد غذایی در سیستم گیاه شده و منجر به افزایش وزن تک میوه و عملکرد بهتر گیاه شود (El-Kholy, 2015).

بررسی نتایج آزمایش نشان داد که درصد ماده خشک میوه تحت تأثیر معنی‌دار برهم‌کنش روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار گرفت که متأثر از شدت‌های مختلف آب مغناطیسی بود (جدول ۵). درصد ماده خشک میوه در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و متغیر و آب مغناطیس شده با شدت ۰/۶۳۳تسلا نسبت به شاهد ۱۷ و ۵ ٪ افزایش یافت (جدول ۶). در روش آبیاری متداول به نظر می‌رسد چون تحت شرایط تنش آبی نبوده میزان افزایش درصد ماده خشک میوه ناچیز بود گیاه در شرایط نسبتاً یکنواخت به رشد خود ادامه داده است اما در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و متغیر چون گیاه با تنش آبی مواجه بوده سعی کرده برای بقاء خود تلاش بیشتری انجام دهد که منجر به افزایش درصد ماده خشک میوه شده است. بررسی نتایج آزمایش نشان داد که لیکوپن تحت تأثیر معنی‌دار برهم‌کنش روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار گرفت که متأثر از شدت‌های مختلف آب مغناطیسی بود (جدول ۵). بررسی نتایج حاصله نشان داد که در بین روش‌های مختلف آبیاری بیشترین میزان لیکوپن به ترتیب در روش آبیاری متداول و روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر بود (جدول ۶). مقدار لیکوپن در تمام روش‌های آبیاری با استفاده از آب مغناطیس شده افزایش یافت که میزان لیکوپن در روش آبیاری متداول و روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت با استفاده از آب مغناطیس شده با شدت ۰/۶۳۳ تسلا ۲/۱ برابر شاهد بود اما میزان لیکوپن در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و با استفاده از آب مغناطیس شده با شدت ۰/۳۶۷ تسلا ۱/۳ برابر شاهد بود (جدول ۶). در شرایط تنش آبی رشد رویشی کاهش یافته و عوامل کیفی میوه از جمله لیکوپن بهبود می‌یابد و گیاه سعی می‌کند با کنترل تنش و متمرکز شدن بر عملکرد و عوامل کیفی دوره رویشی را کامل کند. همچنین استفاده از آب مغناطیس شده را می‌توان به افزایش پروتئین، مواد معدنی تجمعی، جذب آب و فعالیت‌های آنزیمی نسبت داد که منجر به افزایش رشد و بهبود صفات کیفی گیاه شود (Al-Jubouri and Hamza, 2012). وزن کل میوه در بوته تحت تأثیر معنی‌دار برهم‌کنش روش‌های مختلف آبیاری و شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده قرار گرفت (جدول ۵). در بین روش‌های مختلف آبیاری بیشترین وزن میوه به ترتیب در روش آبیاری متداول، روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و متغیر بود و در بین شدت‌های مختلف آب مغناطیس شده بیشترین وزن کل میوه در بوته در شدت ۰/۶۳۳ تسلا و کمترین وزن کل میوه در بوته در آب شاهد مشاهده شد (جدول ۶). کارایی مصرف آب زیست‌توده کل فقط تحت تأثیر معنی‌دار روش‌های مختلف آبیاری قرار گرفت (جدول ۵). در بین روش‌های مختلف آبیاری بیشترین کارایی مصرف آب زیست‌توده کل در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت و آب شاهد و کمترین کارایی مصرف آب زیست‌توده کل در روش آبیاری متداول و آب مغناطیس با شدت ۰/۳۶۷ تسلا مشاهده شد (جدول ۶). با توجه به نتایج حاصله میزان تغییرات کارایی مصرف آب زیست‌توده کل در روش آبیاری متداول ۸۸٪ می‌باشد که استفاده از آب مغناطیس شده منجر به افزایش کارایی مصرف آب زیست‌توده کل شده است در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت میزان تغییرات ۵۵٪ بود که استفاده از آب مغناطیس شده روند کاهشی نشان داد اما در روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور متغیر میزان تغییرات کارایی مصرف آب زیست‌توده کل ۶/۷٪ افزایش یافت و استفاده از آب مغناطیس شده منجر به روند افزایشی در سطوح مختلف شد. در هر نوبت آبیاری، در تیمار آبیاری یک در میان ثابت نسبت به تیمار آبیاری یک در میان متغیر، رطوبت بیشتری در اطراف و در منطقه توسعه ریشه موجود بوده است. این امر باعث کاهش مقاومت مکانیکی خاک در مقابل توسعه ریشه شده و در نتیجه باعث افزایش طول و تراکم ریشه در تیمار آبیاری یک در میان ثابت به سمت قسمتی از گلدان که همیشه آب دریافت می‌کرده شد بنابراین با توجه به دلایل مذکور در تیمار آبیاری یک در میان ثابت آب بهتر در محیط ریشه حفظ شده و گیاه از طریق متراکم کردن ریشه‌های خود به سمت قسمتی از گلدان که آبیاری می‌شود، از آب بهتر استفاده نموده و در نتیجه عملکرد محصول و استفاده مؤثر از آب در این تیمار نسبت به تیمار آبیاری یک در میان متغیر افزایش یافته است که با نتایج (مولوی و همکاران،۱۳۹۰) مطابقت داشت. به‌طور کلی روش آبیاری ناحیه‌ای ریشه به‌طور ثابت نسبت به متغیر بهتر بود و هر دو شدت آب مغناطیس شده منجر به بهبود بعضی صفات شدند. آبیاری با آب مغناطیسی به عنوان یکی از با ارزش‌ترین فناوری‌های مدرن است که می‌تواند در صرفه‌جویی در مصرف آب و بهبود عملکرد و کیفیت گیاهان موثر باشد. Hozayn et al., 2013).

منابع

اصلانی، ش.، برزگر، ط.، و نیک بخت، ج. ۱۳۹۸. اثر اسید هیومیک بر شاخص های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکرد گوجه فرنگی تحت شرایط کم‌آبیاری. ۲۲۱-۲۳۲.

خوش روش، م.، امامی قرا، ف.، و میرناصری، م. ۱۳۹۴. اثر آب شور مغناطیسی شده بر یون کلر خاک در آبیاری قطره‌ای. اولین کنفرانس بین‌المللی توسعه با محوریت کشاورزی، محیط زیست و گردشگری، ۲۵ تا ۲۶ شهریور، تبریز.

خرمیان، م. ۱۳۸۱. بررسی اثر کم‌آبیاری به روش جویچه‌ای یک در میان بر عملکرد ذرت دانه‌ای در شمال خوزستان. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۳ (۱۱): ۱۰۱-۹۱.

رستگار، س.، صادقی لاری، ع.، و سالاری، م. ۱۳۹۳. اثر آب مغناطیسی بر جوانه‌زنی و خصوصیات رشد اولیه بذر گوجه‌فرنگی *Lycopercicum esculentum*. اولین همایش الکترونیکی یافته‌های نوین در محیط زیست و اکوسیستم‌های کشاورزی. ۱ آذر. تهران.

سرافراز اردکانی، م.ر.، خاوری نژاد، ر.، مرادی، ف.، و نجفی، ف. ۱۳۹۷. کارایی فتوسنتز و عملکرد دانه دو رقم گندم (*Triticum aestivum* L.) طی بروز تنش خشکی تحت کاربرد خارجی تیمارهای سیتوکینین و آبسیزیک اسید. تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۱۱ (۳): ۵۰۳-۵۱۴.

شینی دشتگل، ع.، کشکولی، آ.، برومند، س. و نسب، س. ۱۳۸۸. تأثیرات آبیاری خزر بر بهره وری از آب و کیفیت و کمیت در جنوب مزارع نیشکر اهواز، مجله علوم خاک و آب، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۴۹ (۱):۴۵-۵۷.

علیزاده، ا. ۱۳۸۴. رابطه آب، خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا.

گلدانی، م.، جوادی، م.، و نظامی، ا. ۱۳۹۵. تاثیر آب مغناطیسی و تنش شوری بر خصوصیات جوانه‌زنی و رشد گیاهچه لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.). نشریه پژوهش‌های حبوبات ایران. ۷ (۱): ۸۱-۹۲.

گلکار، ف.، فرهمند، ع. ر. و فرداد، ح. ۱۳۸۷. بررسی تأثیر میزآن آب آبیاری بر عملکرد و بازده مصرف آب گوجه‌فرنگی. مجله مهندسی آب. ۱:۱۳-۲۰.

فتحی-امیرخیز، ک.، م. امینی، م.، ا. مدرس-سنوی، ع. رضا زاده و س. حشمتی.۱۳۹۰. تأثیر کاربرد آهن بر فعالیت آنزیمی، عملکرد دانه و محتوای روغن گلرنگ در شرایط کم‌آبیاری مجله علوم زراعی، ۱۳(۳): ۴۶۵-۴۵۲.

متانت، م.، بانژاد، ح.، قلی‌زاده، م.، و گلدانی، م. ۱۳۹۷. بررسی تأثیر شدت های مختلف آب مغناطیسی بر عملکرد کمی و کیفی گیاه تربچه. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲ (۲): ۴۷۲-۴۸۰.

محمودی، ق.، قنبری، ع.، راستگو، م.، قلی زاده، م.، و طهماسبی، ا. ۱۳۹۵. بررسی اثر میدان مغناطیسی بر رشد و عملکرد نخود (*Cicer arietinum* L.) در شرایط آب و هوایی مشهد. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۴(۲): ۳۸۰-۳۹۱ .

مولوی، ح.، محمدی، م. و لیاقت، ع. ۱۳۹۰. اثر آبیاری کامل و یک‌درمیان جویچه‌ای بر عملکرد، اجزاء عملکرد و کارآیی مصرف آب گوجه فرنگی (Super Strain B) نشریه دانش آب و خاک. ۲۱(۳): ۱۱۵-۱۲۶.

نایب لویی، ف.، کوچک زاده، م.، و موسوی خوشدل، م. ۱۳۹۰. آبیاری با آب مغناطیسی به عنوان روش جدیدی در افزایش بهره‌وری کشاورزی. اولین همایش ملی مباحث نوین در کشاورزی، آبان ماه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه.

نیکبخت، ج.، خنده‌رویان، م.، توکلی، ا.، و طاهری، م. ۱۳۹۳. اثر آبیاری مغناطیسی بر خصوصیات جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه ذرت *Zea mays* . نشریه زراعت پژوهش و سازندگی. ۱۰۵: ۱۴۱-۱۴۷.

Alzubaidy, N.A. 2014. Research article effect of magnetic treatment of seeds and irrigation water at different intensities in the growth and production of maize. International Journal of Recent Scientific Research 5(10): 1923-1925.

Ali Al-Jubouri, A.E.A.M., and Hamza. J. H. 2012. Magnetically water treatment technology and its impact in the agricultural field. he 2nd Scientific Conference of Agricultural Sciences

Bilalis, D., Katsenios, N., Efthimiadou, A., Efthimiadis, P., and Karkanis, A. 2012. Pulsed electromagnetic fields effect in oregano rooting and vegetative propagation: a potential new organic method. Acta Agriculturae Scandinavica Section B Soil and Plant Science. 62: 94-99.

Blanco, F., and Folegatti, M.V. 2003. Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. Revista Brasileria de Engenharria Agricola Ambiental. 7(2): 285-291

Barba, A.O., Hurtado M.C., Mata M.S., Ruiz V.F. and De Tejada M.L.S. 2006. Application of a UV–vis detection-HPLC method for a rapid determination of lycopene and β-carotene in vegetables. Food Chemistry. 95(2): 328–336

Chibowski, E., and Szcze, A. 2018. Magnetic water treatmentea review of the latest approaches. Chemosphere. 203: 54-67.

Dere, S., Gines, T., and Sivaci, R. 1998. Spectrophotometric determination of chlorophyll a, b and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. Turkish Journal of Botany. 22: 13-17.

Dodd, I. C. 2009. Rhizosphere manipulations to maximize 'crop per drop' during deficit irrigation. Journal of Experimental Botany. 60: 2454–2459.

El-Kholy, M.F., Hosny, S.S., and Farag, A.A. 2015. Effect of magnetic water and different levels of npk on growth, yield and fruit quality of Williams's

content and grain yield of wheat cultivars. Journal of Biological Sciences 7(6): 841- 847

Payero, J.O., Tarkalson, D.D., Irmak, S., Davison, D. and Petersen, J.L. 2009. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. Agricultural Water Management 96(10): 1387-1397

Rochalska, M., Grobowska, K., And Ziarnik, A. 2008. Impact of low frequency magnetic fields on yield and quality of sugar beet. International Agrophysics. 23(2): 163-174.

Sadras, V.O. 2009. Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. Irrigation Science 27: 183–190.

Sepaskhah, A.R., and Ahmadi, S.H. 2012. A review on partial root-zone drying irrigation. International Journal of Plant Production 4(4): 241-258.

Slatni, A., Zayani K., Zairi A., Yacoubi S., Salvador R., and Playan E. 2011. Assessing alternate furrow strategies for potato at the Cherfech irrigation district of Tunisia. Biosystem Engineering. 108(2):154-163.

Selim, A. F. H., and El-Nady, M. F. 2011. Physio-anatomical responses of drought stressed tomato plants to magnetic field. Acta Astronautica. 69: 387–396.

Thind, H. S., Buttar, G. S., & Aujla, M. S. 2010. Yield and water use efficiency of wheat and cotton under alternate furrow and check-basin irrigation with canal and tube well water in Punjab, India. Irrigation Science. 28(6): 489-496

Ul Haq, Z., Iqbal, M., Jamil, Y., Anwar, H., Younis, A., Arif, M. and Hussain, F. 2016. Magnetically treated water irrigation effect on turnip seed germination, seedling growth and enzymatic activities. Information Processing in Agriculture 3(2): 99-106.

Wang, H., Liu, F., Andersen, M.N., and Jensen, C.R. 2010. Comparative effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on nitrogen uptake in potatoes (*Solanum tuberosum* L.). Irrigation Science. 27(6): 443-448.

Zegbe, J.A., Behboudian, M.H., and Clothier, B.E. 2006. Responses of 'Petopride'processing tomato to partial rootzone drying at different phenological stages. Irrigation Science 24(3): 203-210.

banana plant. Nature and Science of Sleep. 13(7): 94-101

Hozayn, M., Abd El Monem, A.A., Abdelraouf, R.E., and Abdalla, M.M. 2013. Do Magnetic Water Affect Water Use Efficiency, Quality and Yield of Sugar Beet (*Beta vulgarris* L.) Plant under Arid Regions Conditions. Journal of Agronomy 12(1): 1-10.

Hassanselim, A.F., and Fathiel-Nady, M. 2011. Physio-Anatomical Responses of Drought Stressed Tomato Plants to Magnetic Field. Acta Astronautica 69: 387–396.

Khalil, M.H., Shebl, M.K., Kosba, M.A., El-Sabrout, K., and Zaki, N. 2016. Estimate the contribution of incubation parameters influence egg hatchability using multiple linear regression analysis. Veterinary World 9(8):806-810 .

Khalid, K.A. 2006. Influence of water stress on growth, essential oil, and chemical composition of herbs (*Ocimum* sp.). Int. Agrophys. 20(4): 289-296

Keshavars, L., Farahbakhsh, H., and Golkar, P. 2012. The effects of drought stress and super absorbent polymer on morphphysiological traits of pear millet (*Pennisetum glaucum*), International Research Journal of Applied and Basic Sciences 3(1): 148-154

Maheshwari, B.L., and Grewal, H.S. 2009. Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity. Agricultural Water Management 96(8): 1229-1236

Marei, A., Rdaydeh, D., Karajeh, D. and Abu-Khalaf, N. 2014. Effect of using magnetic brackish water on irrigated bell pepper crop (*Capsicum annuum* L.) characteristics in Lower Jordan Valley/West Bank. 4: 830- 838

Mancosu, N., Snyder, R. L., Kyriakakis, G., and Spano, D. 2015. Water scarcity and future challenges for food production. Water. 7: 975–992.

Mosin, O., and Ignatov, I. 2014. Basic concepts of magnetic water treatment. European Journal of Molecular Biotechnology. 2 (4): 72-85.

Porra, R.J. 2002. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. Photosynthesis Res. 73:149-156.

Paknejad, F., Nasri, M., Moghadam, H.T., Zahedi, H., and Alahmadi, M.J. 2007. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters, chlorophyll

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2025-2036

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۳۶-۲۰۲۵

Effect of Partial Root-zone Drying and Magnetic Water on the Growth Characteristics of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in Greenhouse Conditions

S. Salehi Tizabi[1], M. Goldani[2]*, J. Nabati[3]
Recived: Sep.09, 2020 Accepted: Oct.17, 2020

Abstract

One of the ways to increase the quality of irrigation water is to magnetize it. This study was done in the research greenhouse of Ferdowsi University of Mashhad in 2018. The experiment was completely randomized design as a factorial design with three treatments included irrigation method (usual irrigation, fixed partial root-zone drying and alternative partial root-zone drying and three levels of magnetic water). This included: ordinary water, one-time magnetic water with a Tesla intensity of 0.367 and Tesla 0.633). Examination of the experimental results showed that in the usual irrigation method and magnetic water with a Tesla intensity of 0.367, the highest plant height (110 cm) , Dry weight of aerial limbs (41.9 g.plant-1, dry weight of roots (17/1 (g.plant-1 and root volume (137 cm^3.plant-1) and in the usual irrigation method and water Tesla's magnitude of 0.633 was the highest leaf area (25.24 cm^2), total fruit weight (508.18 g), lycopene (48.6 (mg.gfw-1). fixed partial root-zone drying magnetic water with .0.367 intensity Tesla The highest amount of chlorophyll b (0.489 mg.gfw-1) and single fruit weight (48.03 g) and in the intensity of Tesla 0.633, the highest percentage of dried fruit (%11.1) was observed. The highest water use efficiency Total biomass (36.6 g / liter) was observed in fixed partial root-zone drying and control water. alternative partial root-zone drying and magnetic water with Tesla 0.367 intensity, maximum leaf-stem ratio (1.37 g.plant-1), air-to-underground ratio (3.14 g.plant-1) and root length (53.2 cm) was observed, but the highest content of relative moisture content of leaf water in alternative partial root-zone drying and magnetic water showed Tesla with a intensity of 0.633. Among the irrigation methods, the highest total fruit weight in each pot was observed in usual irrigation, fixed partial root-zone drying and alternative partial root-zone drying was observed as variable and both Tesla 0.367 and 0.633 intensity of magnetic water were able to improve traits. It is recommended to reduce the effects of drought stress, it is recommended to use this method that is safe, easy and safe for the environment.

Keywords: Irrigation methods, Lycopene, Relative water content, Tesla, Water use efficiency

1- M.Sc. Student, Department of Agrotechnology, Ferdowsi University of Mashhad
2- Associate Professor, Department of Agrotechnology, Ferdowsi University of Mashhad
3- Assistant Professor of Ferdowsi University of Mashhad, Research Center for Plant Sciences
(*- Corresponding Author Email: goldani@um.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۴۶-۲۰۳۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2037-2046

مقاله پژوهشی

برآورد برخی ویژگی‌های رشدی و مرتبط با شوری و تعیین حد آستانه تحمل به تنش شوری در گیاه خارمریم (*Silybum marianum* L.)

رستم یزدانی بیوکی[1*]، محمدحسین بناکار[2]، حسین بیرامی[3]، مهدی کریمی[4]، ولی سلطانی گردفرامرزی[5]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱

چکیده

به منظور ارزیابی تحمل به شوری گیاه دارویی خارمریم آزمایشی به صورت طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار به صورت گلدانی در گلخانه مرکز ملی تحقیقات شوری انجام شد. تیمار آزمایش شامل ۵ سطح ۴۴/. (شاهد)، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. نتایج نشان داد که اعمال سطوح شوری به طوری معنی‌داری سبب کاهش تمامی صفات مورد مطالعه شد. به‌طوری‌که در خصوص برخی صفات رشدی و مرتبط با عملکرد، افزایش شوری از تیمار شاهد تا شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۸۹ درصد ارتفاع بوته، ۷۹ درصد عملکرد دانه، ۴۶ درصد عملکرد بیولوژیک و ۵۹ درصد در میزان شاخص برداشت گیاه شد. همچنین با افزایش سطح شوری محتوای آب نسبی با کاهش ۹/۸۶ درصد و نشت یونی گیاه با افزایش ۳۸/۵۳ درصد مواجه شدند. عناصر پتاسیم و سدیم اندام هوایی گیاه نیز به طور معنی‌داری تحت تأثیر شوری قرار گرفتند، به‌طوری‌که افزایش شوری از شاهد تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر تأثیر معنی‌داری بر کاهش نسبت پتاسیم به سدیم داشت و سبب کاهش ۶۹ درصدی نسبت پتاسیم به سدیم شد. نتایج نشان داد که حد آستانه تحمل به تنش (عملکرد بذر) برابر با ۰/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر و کاهش ۵۰ درصد عملکرد در شوری ۷/۲۱ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد. به طورکلی با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد گیاه خارمریم مقاومت بالایی به شوری ندارد.

واژه‌های کلیدی: پتاسیم، سدیم، عملکرد بذر، محتوای آب نسبی، نشت یونی

مقدمه

با توجه به کاهش منابع آبی و همچنین کاهش کیفیت آب موجود و شور شدن بسیاری از اراضی کشور نیاز است تا نسبت به توسعه کاشت گیاهان مقاوم به شوری اقدام شود (رحیمیان، ۱۳۹۶)، لازمه توسعه کاشت گیاهان مقاوم به شوری، تعیین آستانه و عملکرد گیاهان امیدبخش به شوری می‌باشد.

خارمریم (*Silybum marianum*) گیاهی یک یا دو ساله، علفی و از خانواده کاسنی (کمپوزیته) است. به طور عمده بذر این گیاه حاوی مواد مؤثره دارویی بنام سیلی‌مارین می‌باشد (سقلی و همکاران، ۱۳۹۶). این مواد مؤثره در درمان مشکلات کبدی و برخی بیماری‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد (زنگانی و همکاران، ۱۳۹۶). خارمریم از جمله گیاهان دارویی هست که نیاز آبی پایینی دارد و از گیاهان مقاوم به تنش آبی می‌باشد (نورالهی و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین بسیاری از مطالعات حاکی از مقاومت این گیاه نسبت به شوری است اما مطالعات در خصوص تعیین آستانه تحمل به شوری این گیاه و بررسی پاسخ آن با آب آبیاری شور محدود می‌باشد. از جمله یزدانی بیوکی و همکاران (۱۳۸۹) با مطالعه تأثیر تنش شوری بر گیاه دارویی خارمریم نشان دادند که بذور این گیاه قادر بودند تا ۳۰۰ میلی‌مولار نمک طعام پتانسیل شوری جوانه بزنند. قوامی و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی گلدانی تأثیر سطوح مختلف تنش شوری آب آبیاری (۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر) بر اجزای عملکرد دو رقم خارمریم (خودروی اهواز و رقم اصلاحی آلمانی) نشان دادند که افزایش شوری از ۱ به ۶ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش میزان عملکرد دانه شاخه اصلی حدود ۱۲ درصد و افزایش شوری از ۱ به ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش عملکرد دانه شاخه اصلی حدود ۵۰ درصد و شاخه فرعی حدود ۳۰ درصد شد. فرهادی و همکاران (۱۳۹۵) با مطالعه سطوح شوری ۰، ۴-، ۶- و ۸- بار (نمک طعام) بر جوانه‌زنی بذر خارمریم نشان دادند که بذور گیاه تا

۱،۳،۴- استادیار پژوهشی، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
۲- مربی پژوهشی، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
۵- محقق، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: r.yazdani@areeo.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.10.1

۶- بار را تحمل می‌کند، اما سطوح بالای شوری (۸- بار) یکنواختی جوانه‌زنی و خصوصیات رشدی گیاهچه‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاهش ویژگی‌های جوانه‌زنی با افزایش شوری از تیمار شاهد تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر (نمک طعام) بر اکوتیپ‌های خارمریم گزارش شده است (Hammami et al., 2020). همچنین مطالعات تأثیر شوری ۰، ۱۵ و ۲۵۰ میلی‌مولار کلرید کلسیم بر ویژگی‌های جوانه‌زنی خارمریم حاکی از کاهش شاخص‌های جوانه‌زنی گیاه بود (Masoumi Zavariyan, 2015). همچنین مطالعه تأثیر سطوح شوری ۰، ۴، ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر بر ویژگی‌های رشد خارمریم حاکی از کاهش ارتفاع گیاه و بیومس گیاه بود (Safikhan et al., 2018).

در مطالعات موجود علاوه بر اینکه تعیین حدآستانه تحمل به شوری این گیاه مطرح نشده است، بررسی پاسخ گیاه به شوری آب آبیاری نیز در مرحله رشدی مورد مطالعه قرار نگرفته است، و عمدتاً به مرحله جوانه‌زنی اکتفا شده است، لذا هدف از انجام پژوهش حاضر ضمن بررسی سطوح شوری حاصل از آب آبیاری بر برخی ویژگی‌های عملکرد و مرتبط با شوری گیاه دارویی خارمریم، تعیین آستانه تحمل به شوری این گیاه نیز بود.

مواد و روش

به منظور ارزیابی تحمل به شوری گیاه دارویی خارمریم پژوهش حاضر به صورت گلدانی در مرکز ملی تحقیقات شوری انجام شد. آزمایش به صورت طرح کاملاً تصادفی و با ۳ تکرار انجام گرفت. تیمار آزمایشی شامل اعمال تیمار شوری در ۵ سطح ۴۴/. (آب شهر)، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. کشت گیاهان در گلدان‌های ۷ کیلوئی (ارتفاع ۲۰/۵ و قطر ۲۰ سانتی‌متر) پس از تهیه بذر آن‌ها در آبان ماه ۱۳۹۸ انجام شد. برای پر نمودن گلدان‌ها از آمیخته خاک (دوسوم) (جدول ۱) و به مقدار مساوی ترکیب ماسه و کود (یک‌سوم) استفاده شد.

جدول ۱- شوری و بافت خاک مورد استفاده در آزمایش

هدایت الکتریکی (dS.m)	شن	سیلت	رس
	(%)		
۴/۵۰	۵۰/۵۰	۲۶/۰۰	۲۳/۵۰

تیمارهای شوری از طریق رقیق‌سازی آب بسیار شور تهیه شده از منطقه اطراف اردکان با آب شرب تهیه شد (جدول ۲). تیمارهای شوری بعد از سبز شدن گیاه تا زمان اتمام فصل رشد گیاه (۸ ماه) اعمال شد. جهت کنترل میزان شوری خاک، در هر نوبت آبیاری با اندازه‌گیری حجم آب ورودی و خروجی میزان زهکش هر گلدان را تقریباً به اندازه ۳۰ درصد رسانده شد و توسط قیف‌ها به شیشه هدایت و جمع‌آوری و بعد با دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد. گیاهان در تاریخ ۱۳ اردیبهشت ۱۳۹۹ هم‌زمان با رسیدگی بذرها، برداشت شدند.

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب آبیاری مورد استفاده در آزمایش

تیمار	هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	اسیدیته pH	Ca^{2+} ($meq\ l^{-1}$)	Mg^{2+} ($meq\ l^{-1}$)	CO_3^{2-} ($meq\ l^{-1}$)	HCO_3^- ($meq\ l^{-1}$)	Na^+ ($meq\ l^{-1}$)	K^+ ($meq\ l^{-1}$)	Cl^- ($meq\ l^{-1}$)	SO_4^{2-} ($meq\ l^{-1}$)	نسبت جذب سدیم
منبع آب شور رقیق $\frac{1}{50}$ شده	۱۰	۸/۰۰	۳/۲۶	۱۲/۸۸	۰	۲/۷۷	۸۰/۷۳	۰/۲۱	۸۶/۴۸	۷/۸۲	۲۸/۸۳

ویژگی‌های کمی مانند ارتفاع (برحسب سانتی‌متر و با استفاده از خط کش)، سطح برگ (با استفاده از دستگاه Windias 3)، وزن خشک اندام هوایی (نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد درون آون قرار داده شد و بعد از آن وزن خشک توسط ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد) مورد مطالعه قرار گرفت. صفات مرتبط با عملکرد از جمله قطر گل‌آذین (با استفاده از کولیس)، وزن گل‌آذین (توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱) وزن دانه (با استفاده از ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۱) تعیین شد.

اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC) به روش ریچی و نگوین انجام شد (Ritchi and Nguyen, 1990). جهت تعیین نشت پذیری غشاء ابتدا نیم گرم بافت گیاه را پس از شستشو با آب مقطر در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر در قوطی‌های فیلم استریل شده در دمای اتاق به مدت دو ساعت شناور کرده و در پایان دو ساعت، هدایت الکتریکی آب توسط EC متر در دمای اتاق سنجیده شد. سپس نمونه‌ها به آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد منتقل خواهد شد و به مدت ۲۰ دقیقه در این شرایط قرار گرفت. پس از خنک شدن نمونه‌ها، مجدداً هدایت الکتریکی نمونه‌ها را اندازه گرفته و از رابطه ۱ نشت‌پذیری غشا بر حسب درصد اندازه‌گیری شد:

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تنش شوری بر برخی صفات مورد مطالعه در گیاه خار مریم (*Silybum marianum* L.)

منابع تغییرات	تیمارهای شوری	خطا	ضریب تغییرات
درجه آزادی	(٤)	(۱۰)	
ارتفاع بوته	۴۹۴/۷۰**	۵/۹۸	۱۲/۸۵
سطح برگ	۱۴۹۵۸/۰۷**	۲۳۴/۱۹	۱۷/۹۷
وزن خشک اندام هوایی	۰/۲۹**	۰/۰۰	۶/۳۱
قطر گل‌آذین	۲/۴۴**	۰/۳۶	۱۸/۵۱
وزن گل‌آذین	۰/۲۵**	۰/۰۲	۱۵/۷۹
تعداد گل‌آذین	۰/۱۴*	۰/۰۳	۱۵/۲۱
تعداد بذر در گل‌آذین	۷۳/۴۹*	۱۲/۷۰	۲۰/۴۲
وزن دانه در گل‌آذین	۰/۰۴**	۰/۰۰	۱۹/۶۳
وزن هزار دانه	۲۲/۸۱**	۲/۱۴	۸/۶۱
عملکرد دانه	۰/۱۰**	۰/۰۰	۱۵/۱۰
عملکرد بیولوژیک	۱/۱۰**	۰/۰۳	۷/۶۷
شاخص برداشت	۵۶/۵۰**	۵/۰۳	۱۶/۱۱
محتوای نسبی آب	۳۰۵۱/۹۷**	۹/۰۱	۵/۲۵
نشت یونی	۴۹۵۸/۶۷**	۸۰/۲۳	۱۳/۲۰
پتاسیم	۰/۶۲**	۰/۱۴	۱۳/۵۵
سدیم	۳۶/۸۶**	۰/۷۸	۸/۶۶
نسبت پتاسیم به سدیم	۰/۰۷**	۰/۰۰	۱۲/۶۸

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و عدم معنی‌داری

رابطه ۱ نشت پذیری غشا سلولی = (E1/E2) ×۱۰۰

E1: هدایت الکتریکی آب قبل از آون

E2: هدایت الکتریکی آب بعد از آون

همچنین برای اندازه‌گیری عناصر سدیم و پتاسیم عصاره نمونه‌ها توسط هضم به روش سوزاندن خشک و ترکیب با اسید کلریدریک اقدام شد (Chapman and Pratt, 1961; Waling et al., 1989).

جهت تعیین آستانه تحمل به تنش شوری و کاهش ۵۰ درصد عملکرد از مدل موس–هافمن استفاده شد. همچنین جهت تعیین شاخص تحمل به تنش شوری (STI) از رابطه ۲ استفاده شد (آناقلی، ۱۳۸۷):

رابطه ۲: $STI^{1} = eC50+(S\times eC50)$

eC50= میزان شوری که در آن ۵۰ درصد عملکرد کاهش می‌یابد.

S= میزان شیب معادله

تجزیه واریانس داده‌ها و تعیین اعداد مربوط به حد آستانه و ضریب تحمل به شوری با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS Ver. 9.2 محاسبه شد، همچنین مقایسه میانگین با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد که اعمال سطوح مختلف شوری سبب تأثیر معنی‌دار بر تمامی صفات مورد مطالعه شد (جدول ۳).

ارتفاع، سطح برگ و وزن خشک اندام هوایی

نتایج مقایسه میانگین حاکی از آن بود که بالاترین ارتفاع در گیاهان تحت تیمار آب شهر مشاهده شد و افزایش شوری از تیمار شاهد به شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۸۹ درصد در ارتفاع گیاه شد (جدول ۴). صفی‌خان و همکاران با مطالعه تأثیر سطوح شوری ۰، ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بر ویژگی‌های رشد خارمریم نشان داد که ارتفاع گیاه با افزایش شوری از ۰ به ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر حدود ۳۸ درصد کاهش یافت (Safikhan et al., 2018). در پژوهش حاضر کاهش ارتفاع گیاه با افزایش تنش شوری می‌تواند به سبب کاهش جذب آب (Bybordi and Tabatabaei, 2009) و همچنین به سبب نقش جذب عناصر مرتبط با شوری مانند سدیم در کاهش جذب آب نسبت داد (جدول ۴).

1- Salinity Tolerance index

جدول ٤- مقایسه میانگین صفات رشدی، عملکرد و فیزیولوژیکی مورد مطالعه در گیاه خارمریم (*Silybum marianum* L.)

صفات مورد آزمایش	تیمارهای شوری (دسی زیمنس بر متر)				
	./٤٤	۳	٦	۹	۱۲
ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	*۳۷/۲۵^{a}	۲۴/۳۰^{b}	۱۸/۹۱^{c}	۱۰/۸۸^{d}	۳/۷۵^{e}
سطح برگ (سانتی‌مترمربع در بوته)	۱۸۶/۱۴^{a}	۱۱۶/۳۴^{b}	۷۲/۴۸^{c}	۴۸/۲۵^{c}	**
وزن خشک اندام هوایی (گرم در بوته)	۱/۸۸^{a}	۱/۸۴^{a}	۱/۵۲^{b}	۱/۳۸^{b}	۱/۱۴^{c}
قطر گل‌آذین (سانتی‌متر)	۴/۲۸^{a}	۳/۶۸^{ab}	۳/۵۸^{ab}	۲/۹۱^{bc}	۱/۹۱^{c}
وزن گل‌آذین (گرم در بوته)	۱/۳۵^{a}	۱/۱۸^{ab}	۰/۹۵^{bc}	۰/۸۳^{cd}	۰/۵۹^{d}
تعداد گل‌آذین در بوته	۱/۵۰^{a}	۱/۳۳^{ab}	۱/۰۰^{c}	۱/۱۶^{bc}	۱/۰۰^{c}
تعداد بذر در گل‌آذین	۲۱/۲۲^{a}	۲۰/۷۲^{a}	۲۱/۱۶^{a}	۱۲/۸۸^{b}	۱۱/۲۵^{b}
وزن دانه در گل‌آذین (گرم)	۰/۴۰^{a}	۰/۳۷^{a}	۰/۳۸^{a}	۰/۲۲^{b}	۰/۱۳^{b}
وزن هزار دانه (گرم)	۱۹/۲۳^{a}	۱۷/۸۱^{a}	۱۸/۴۲^{a}	۱۷/۲۱^{a}	۱۲/۲۳^{b}
عملکرد دانه (گرم در بوته)	۰/۶۱^{a}	۰/۴۷^{b}	۰/۳۸^{b}	۰/۲۶^{c}	۰/۱۳^{d}
عملکرد بیولوژیک (گرم در بوته)	۳/۲۲^{a}	۳/۰۲^{a}	۲/۴۸^{b}	۲/۲۲^{b}	۱/۷۳^{c}
شاخص برداشت (درصد)	۱۸/۹۰^{a}	۱۵/۶۹^{a}	۱۵/۷۲^{a}	۱۱/۵۹^{b}	۷/۶۹^{b}
محتوای نسبی آب (درصد)	۷۴/۷۱^{a}	۷۳/۲۱^{a}	۷۰/۵۱^{a}	۶۴/۸۵^{b}	**
نشت یونی (درصد)	۵۷/۹۳^{b}	۹۰/۰۰^{a}	۹۲/۳۷^{a}	۹۶/۴۶^{a}	**
پتاسیم (درصد)	۲/۸۰^{b}	۳/۵۲^{a}	۲/۸۳^{ab}	۲/۴۱^{b}	۲/۴۱^{b}
سدیم (درصد)	۵/۰۱^{c}	۹/۴۰^{b}	۹/۹۴^{b}	۱۲/۸۹^{a}	۱۳/۹۸^{a}
نسبت پتاسیم به سدیم	۰/۵۵^{a}	۰/۳۷^{b}	۰/۲۸^{c}	۰/۱۸^{d}	۰/۱۷^{d}

* حروف مختلف در هر ستون نشان دهنده وجود اختلاف آماری در سطح ۵٪ است. ** با توجه به اینکه در زمان برداشت در شوری ۱۲ دسی زیمنس بر متر گیاه فاقد سطح سبز بود لذا مقادیر این صفات در این شوری فاقد داده بود.

افزایش شوری سبب کاهش معنی‌داری در سطح برگ گیاه شد، به طوری که افزایش شوری از تیمار شاهد تا شوری ۹ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۷۴ درصدی در سطح برگ گیاه شد (جدول ۴). گیاهان تحت تیمار ۶ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر با اختلاف ۲۴/۲۳ سانتی‌متر مربع سطح برگ در بوته از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۴). کم شدن سطح برگ یکی از نخستین پاسخ‌های مورفولوژیک گیاه در مقابل تنش شوری می‌باشد و به نظر می‌رسد گیاه با این روش آب را در بافت‌های خود نگه می‌دارد (مردانی و همکاران، ۱۳۸۹). سایر مطالعات بر خار مریم نیز حاکی از کاهش معنی‌دار سطح برگ با افزایش تنش شوری بود (Said-Alahl and Omer, 2011).

همچنین تنش شوری سبب کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی گیاه (برگ و ساقه) شد، و بالاترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به گیاهان تیمار شده با آب شهر و شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر بود (جدول ۴). افزایش شوری از تیمار ۰/۴۴ دسی‌زیمنس بر متر تا شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۳۹ درصد در وزن خشک اندام هوایی گیاه شد (جدول ۴). مطالعات صفی خان و همکاران بر خارمریم نشان داد که افزایش شوری از شاهد تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش بیومس گیاه به میزان ۶۸ درصد شد (Safikhan et al., 2018). کاهش بیومس گیاه تحت تأثیر شوری در بسیاری از مطالعات گزارش شده است، از جمله حسینی و همکاران (۱۳۹۵) با مطالعه تغییرات صفات مرفوفیزیولوژیکی گیاه دارویی آویشن باغی تحت تنش شوری گزارش کردند که افزایش شوری سبب کاهش مؤلفه‌های رشدی گیاه شد. به نظر می‌رسد در مطالعه حاضر شوری سبب کاهش پتانسیل اسمزی در محلول خاک شده و دسترسی گیاه به آب را کاهش می‌دهد و به علت پیامدهای ناشی از تنش آب مانند کاهش سطح برگ و کاهش محتوای آب نسبی (جدول ۴) و در نتیجه سبب کاهش فتوسنتز و کاهش جذب دی‌اکسید کربن شده و مقدار مواد فتوسنتزی نیز به طور معنی‌داری کاهش یافته (Saadatmand et al., 2007) و در نتیجه شاخص‌های رشدی نیز مانند ارتفاع، سطح برگ و وزن خشک گیاه کاهش یافت.

عملکرد و اجزای عملکرد

افزایش شوری سبب کاهش قطر گل‌آذین شد، به‌طوری‌که افزایش شوری از شاهد تا شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۲/۳۷ سانتی‌متر در قطر گل‌آذین گیاه شد (جدول ۴). با این وجود گیاهان تحت تیمار ۰، ۳ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر و همچنین گیاهان

تیمار شده با شوری ۹ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف معنی‌داری بر قطر گل‌آذین گیاه نداشتند (جدول ۴).

با افزایش شوری وزن گل‌آذین به طور معنی‌داری کاهش یافت، به طوری که بالاترین وزن گل‌آذین مربوط به گیاهان تحت تیمار شاهد بودند و کمترین آن در گیاهان تیمار شده با شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد (جدول ۴). افزایش شوری از تیمار شاهد تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۵۶ درصد (۰/۷۶ گرم در بوته) وزن گل‌آذین شد (جدول ۴).

افزایش شوری از تیمار شاهد تا شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۳۳ درصدی در تعداد گل‌آذین در بوته شد (جدول ۴). همچنین افزایش شوری از شاهد تا شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۹/۹۷ عدد بذر در گل‌آذین گیاه شد، به طوری‌که بالاترین تعداد بذر در گل‌آذین در تیمار شاهد و پایین‌ترین آن در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد (جدول ۴). کاهش تعداد بذر در گل‌آذین تا شوری ۶ دسی زیمنس بر متر تأثیر معنی‌داری بر این صفت نداشت همچنین گیاهان تیمار شده با شوری ۹ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۴).

نتایج مقایسه میانگین حاکی از آن بود که افزایش شوری سبب کاهش وزن دانه در گل‌آذین گیاه شد، به طوری‌که گیاهان تحت تیمار شاهد نسبت به گیاهان تیمار شده با شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر ۰/۲۷ گرم دانه در گل‌آذین بیشتری داشتند (جدول ۴). وزن دانه در گل‌آذین گیاهان تحت تیمار ۰/۴۴، ۳ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند، همچنین شوری ۹ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر تأثیری معنی‌داری بر وزن دانه در گل‌آذین نداشتند (جدول ۴).

افزایش شوری از ۰/۴۴ دسی‌زیمنس بر متر تا ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر سبب کاهش ۳۶ درصد در وزن هزار دانه شد (جدول ۴). مقادیر وزن هزار دانه در سطوح شاهد، ۳، ۶ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر معنی‌دار نبود (جدول ۴). عملکرد دانه گیاه نیز مانند سایر صفات مورد مطالعه با افزایش شوری کاهش یافت، به طوری‌که بالاترین عملکرد دانه در تیمار شاهد و کمترین آن با کاهش ۷۹ درصد نسبت به تیمار شاهد در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد (جدول ۴). گیاهان تحت تیمار شوری ۶ و ۹ دسی‌زیمنس بر متر اختلاف معنی‌داری از لحاظ عملکرد دانه با یکدیگر نداشتند (جدول ۴).

عملکرد بیولوژیک که شامل تمامی اجزای هوایی گیاه اعم از وزن خشک برگ، ساقه و گل‌آذین گیاه بود به طور معنی‌داری تحت تأثیر شوری قرار گرفت و با افزایش شوری کاهش یافت (جدول ۴). به طوری که بیشترین و کمترین عملکرد بیولوژیک با اختلاف ۴۶ درصد به ترتیب در تیمار شاهد و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد (جدول ۴). شاخص برداشت گیاه نیز با افزایش شوری کاهش یافت و گیاهان تحت تیمار شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر با کاهش ۱۱/۲۱ درصد نسبت به تیمار شاهد پایین‌ترین شاخص برداشت را داشت (جدول ۴).

مطابق با پژوهش حاضر قوامی و همکاران (۱۳۹۰) با مطالعه تأثیر سطوح تنش شوری شاهد، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر بر اجزای عملکرد خارمریم گزارش کردند که با افزایش شوری تا سطوح ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر صفات رشدی نظیر تعداد گل‌آذین در بوته، قطر گل‌آذین و عملکرد بذر و اجزای عملکرد کاهش یافت و علت آن را ضمن افزایش نسبت تعرق به جذب آب در مرحله تشکیل دانه، کاهش میزان مواد فتوسنتزی قابل انتقال به دانه، کاهش کارایی فتوسنتزی و اندازه دانه به عنوان مخزن فیزیولوژیکی و کاهش وزن هزار دانه بیان کردند.

به نظر می‌رسد در مطالعه حاضر کاهش عملکرد و اجزای عملکرد به سبب تجمع و افزایش نمک در برگ‌ها نسبت داد که سبب پیری زودرس، کم شدن ذخیره فتوسنتزی و ریزش برگ‌ها شده و بالطبع برگ‌ها جهت حفظ بقای خود، آب مورد نیاز خود را از ساقه و دمبرگ می‌گیرند و در نتیجه شوری باعث کاهش شکل‌گیری و رشد گل‌آذین شده و میزان دانه‌بندی و تعداد دانه گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Arshi et al., 2002).

ویژگی‌های فیزیولوژیکی (محتوای نسبی آب و نشت یونی)

شوری سبب کاهش محتوای نسبی آب گیاه شد، به طوری‌که بالاترین محتوای نسبی مربوط به تیمار شاهد و پایین‌ترین آن با کاهش ۹/۸۶ درصد در تیمار ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شد (جدول ۴). همچنین میزان نشت یونی با افزایش شوری افزایش یافت و گیاهان تحت تیمار شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر ۳۸/۵۳ درصد نشت یونی بیشتری نسبت به شاهد برخوردار بودند (جدول ۴).

مشابه با نتایج پژوهش حاضر، حسینی و همکاران (۱۳۹۵) با مطالعه تغییرات فیتوشیمیایی و صفات مرفوفیزیولوژکی گیاه دارویی آویشن باغی تحت سطوح تنش شوری ۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار گزارش کردند که شوری تأثیر معنی‌داری بر نشت الکترولیتی غشا و محتوای آب نسبی برگ داشت و افزایش سطوح تنش سبب افزایش نشت یونی و کاهش محتوای آب نسبی برگ شد.

نشت یونی از جمله ویژگی‌های فیزیولوژیکی است که تحت تأثیر تنش‌های محیطی قرار می‌گیرد و اندازه‌گیری مقدار نشت یونی شاخص خوبی جهت برآورد میزان آسیب اکسیداتیو وارد شده به غشا می‌باشد (Dkhil and Denden, 2012). به نظر می‌رسد در مطالعه حاضر افزایش نشت یونی عاملی از آسیب غشاها و کاهش پایداری غشاها می‌باشد که به سبب تنش اکسیداتیو ناشی از شوری باشد.

عناصر پتاسیم و سدیم

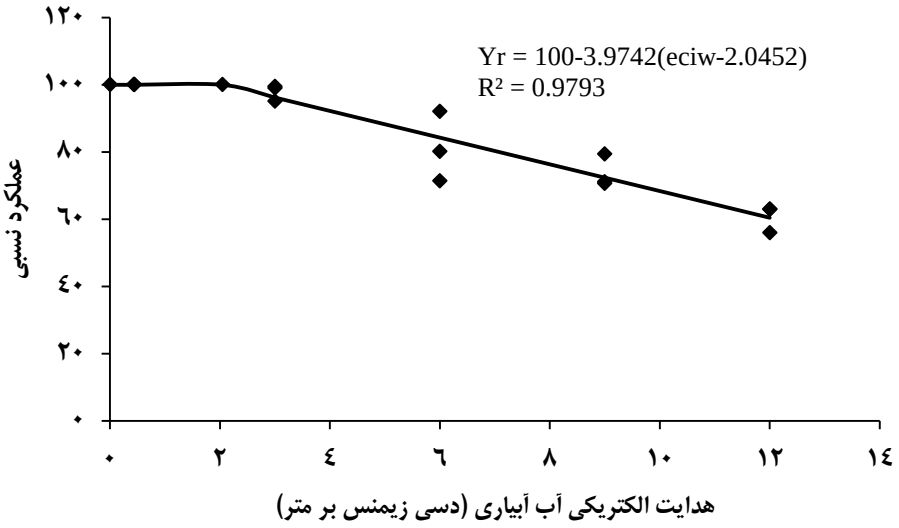
نتایج مقایسه میانگین حاکی از آن بود که افزایش شوری از تیمار شاهد تا شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر سبب افزایش معنی‌داری پتاسیم موجود در اندام هوایی گیاه (ساقه و برگ) شد، همچنین تفاوت

معنی‌داری در مقدار پتاسیم گیاهان تحت تیمار ۶، ۹ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده نشد (جدول ۴). مقدار سدیم موجود در اندام هوایی با افزایش شوری به طوری معنی‌داری افزایش یافت، به طوری که گیاهان تیمار شده با شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر با افزایش ۸/۹۷ درصد نسبت به گیاهان شاهد از بالاترین مقدار عنصر سدیم برخوردار بودند (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین حاکی از آن بود که افزایش شوری تأثیر معنی‌داری بر کاهش نسبت پتاسیم به سدیم داشت، به طوری که گیاهان تحت تیمار شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر با کاهش ۶۹ درصدی نسبت به تیمار ۰/۴۴ دسی‌زیمنس بر متر پایین‌ترین نسبت پتاسیم به سدیم را داشت (جدول ۴).

مطابق با پژوهش حاضر کاهش درصد پتاسیم و افزایش میزان سدیم با افزایش تنش شوری در سایر مطالعات مانند تأثیر شوری بر گیاه دارویی آویشن نیز گزارش شده است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵). کاهش رشد و عملکرد وابسته به غلظت نمک می‌باشد، هر اندازه غلظت نمک بیشتر باشد، کاهش رشد بیشتر است و سرعت توسعه برگ تحت تأثیر مقدار سدیم قرار می‌گیرد و می‌تواند شاخص خوبی برای برآورد مقاومت به شوری باشد (هراتی و همکاران، ۱۳۹۵). در مطالعه حاضر کاهش رشد گیاه با افزایش شوری می‌تواند به سبب تجمع یون‌های سدیم و کاهش جذب پتاسیم و در نتیجه افزایش پتانسیل اسمزی محیط کشت و لذا عدم توانایی گیاه در جذب آب در این شرایط باشد (Jamil et al., 2006).

آستانه تحمل به شوری بر اساس عملکرد ماده خشک اندام هوایی

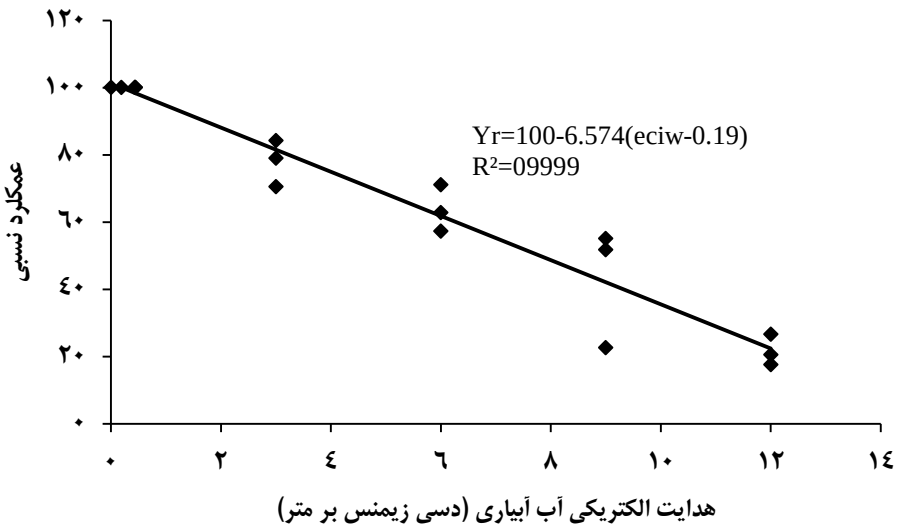
حد آستانه شوری گیاه بر اساس شوری آب آبیاری و برای ماده خشک اندام هوایی معادل ۲/۰۴ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد (شکل ۱). همچنین شیب کاهش عملکرد به ازای هر واحد افزایش شوری بر حسب دسی زیمنس بر متر برابر با ۳/۹۷ درصد بود (شکل ۱). بر اساس نتایج به دست آمده میزان شوری آب آبیاری که سبب کاهش عملکرد ۵۰ درصدی و عملکرد صفر شد به ترتیب برابر با ۱۵/۳۰ و ۲۷/۲۰ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد (شکل ۱). مقدار شاخص تحمل به شوری (ST-index) که از رابطه ۲ برآورد شد معادل ۱۵/۸۸ دسی‌زیمنس بر متر بود.



شکل ۱- واکنش عملکرد نسبی اندام هوایی خارمریم به تنش شوری بر اساس مدل ماس-هافمن

حد آستانه تحمل به شوری بر اساس عملکرد بذر

حد آستانه تحمل به شوری (بر اساس شوری آب آبیاری) و شیب خط خارمریم بر اساس عملکرد بذر گیاه به ترتیب برابر با ۰/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر و ۶/۵۷ درصد برآورد شد (شکل ۲). مقدار شوری که سبب کاهش عملکرد به میزان ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد شد به ترتیب برابر ۷/۲۱ و ۱۵/۴۰ دسی‌زیمنس بر متر به دست آمد (شکل ۲). میزان شاخص تحمل به شوری (ST-index) برابر با ۷/۸۴ دسی‌زیمنس بر متر حاصل شد (رابطه ۲).



شکل ۲- واکنش عملکرد نسبی بذر خارمریم به تنش شوری بر اساس مدل ماس-هافمن

محاسبه آستانه تحمل به تنش شوری طبق مدل ماس و هافمن در خصوص گیاهان دارویی به طور مشخص گزارش نشده است و بسیاری از مطالعات مربوط به گیاهان زراعی از جمله گندم، جو، کلزا و پنبه (آناقلی و طباطبایی، ۱۳۹۸) و باغی از جمله انار (مومن پور و همکاران، ۱۳۹۹) انجام شده است. در خصوص گیاهان دارویی عمده مطالعات بر تعیین میزان مقاومت گیاه به شوری در مرحله جوانه‌زنی می‌باشد، از جمله قادری فر و همکاران (۱۳۹۰) با مطالعه سطوح شوری صفر، ۵/۵۶، ۱۱/۱۱، ۱۶/۶۷ و ۲۲/۲۲ دسی‌زیمنس بر متر در مرحله جوانه‌زنی جهت تعیین آستانه تحمل به شوری در شش گیاه دارویی سیاه‌دانه، خارمریم، رازیانه، کتان، آرتیشو و گلرنگ گزارش کردند که آستانه تحمل به شوری برای درصد جوانه‌زنی در گیاهان آرتیشو، خارمریم، رازیانه و سیاه‌دانه به ترتیب ۴/۰، ۳/۳، ۱۰/۶ و ۱۶/۵ دسی‌زیمنس بر متر بود و در نهایت آن‌ها گیاهان گلرنگ و کتان را جزو گیاه مقاوم به شوری، رازیانه و سیاه‌دانه را جزو گیاهان نیمه مقاوم به شوری و گیاهان آرتیشو و خارمریم را حساس به شوری طبقه‌بندی نمودند، هر چند که این تفکیک بر اساس میزان جوانه‌زنی گیاهان بود و نمی‌تواند به عنوان شاخصی برای سایر مراحل گیاه در نظر گرفت. همچنین در مطالعات جوادی و همکاران (۱۳۹۳) با تأثیر شوری بر جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه چهار گونه گیاه دارویی سیاه‌دانه، شاهدانه، شنبلیله و کنگرفرنگی نشان دادند که در بین چهار گونه مورد بررسی، شنبلیله و شاهدانه تحمل نسبتاً مطلوبی به سطوح بالای شوری در مرحله جوانه‌زنی دارند و سیاه‌دانه را جزو گیاهان حساس به شوری در مرحله جوانه‌زنی گزارش کردند. بر اساس مطالعات موجود به نظر می‌رسد تعیین حد آستانه تحمل به تنش گیاهان دارویی در مرحله جوانه‌زنی بوده است و نیاز است که حدآستانه تحمل به تنش در مراحل نموی و عملکرد مورد بررسی قرار گیرد، باتوجه به اینکه عملکرد اقتصادی گیاه خارمریم عملکرد بذر می‌باشد، در پژوهش حاضر با توجه حد آستانه بسیار پایین گیاه (۰/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر) و همچنین کاهش ۵۰ درصد عملکرد بذر در شوری ۷/۲۱ دسی‌زیمنس بر متر آب آبیاری، به نظر می‌رسد گیاه خارمریم نمی‌تواند جزو گیاهان مقاوم به شوری طبقه‌بندی گردد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که صفات رشدی و مرتبط با عملکرد گیاه خارمریم با افزایش شوری به طوری معنی‌داری کاهش یافتند، به طوری که این کاهش در صفاتی همچون ارتفاع، سطح برگ، عملکرد دانه حتی تا شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر به طور معنی‌داری قابل مشاهده بود، علاوه بر این شوری به طور معنی‌داری سبب کاهش محتوای نسبی آب و کاهش میزان پتاسیم و افزایش نشت یونی و درصد سدیم گیاه شد. همچنین با توجه به اینکه حدآستانه تحمل به شوری گیاه خارمریم برابر با ۰/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر (آب آبیاری) حاصل شد، به نظر می‌رسد گیاه دارویی خارمریم نمی‌تواند از جمله گیاهان مقاوم به شوری باشد، هر چند که کاهش ۵۰ درصدی عملکرد بذر در شوری ۷/۲۱ دسی‌زیمنس بر متر آب آبیاری می‌تواند گیاه خارمریم را جهت کاشت با آب آبیاری ۷ دسی‌زیمنس بر متر که برای سایر محصولات مناسب نباشد، جهت فعالیت تحقیقاتی و بررسی واکنش گیاه در جهت کاشت جایگزین پیشنهاد نمود.

منابع

آناقلی، ا. ۱۳۸۷. شاخص‌های تحمل به شوری در سه رقم زراعی پنبه (*Gossypium hirsutum* L.). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۵ (۳): ۹۰-۹۷.

آناقلی، ا. و طباطبائی. س.ع. ۱۳۹۸. شاخص‌های تحمل به شوری ارقام جو، پنبه، کلزا و سورگم علوفه‌ای در یزد. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). ۳۳ (۱): ۴۵-۶۰.

جوادی، ح.، ثقه‌الاسلامی، م.ج. و موسوی، س.غ.ر. ۱۳۹۳. بررسی اثر شوری بر جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهچه چهار گونه گیاه دارویی. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۲ (۱): ۵۳-۶۴.

حسینی، ح.، موسوی‌فرد، ص.، فاتحی، ف. و قادری، ا. ۱۳۹۵. تغییرات فیتوشیمیایی و صفات مرفوفیزیولوژیکی گیاه دارویی آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L. cv Varico3) تحت تنش شوری. فصلنامه گیاهان دارویی. ۱۶ (۱): ۲۲-۳۳.

رحیمیان، م.ح. ۱۳۹۶. تدوین سند بهره‌وری آب کشاورزی در استان یزد، گزارش علمی فنی، مرکز ملی تحقیقات شوری، ۱۲۹ص.

زنگانی، ا.، زهتاب سلماسی، س.، عندلیبی، ب. و زمانی، ع. ۱۳۹۶. اثرات کاربرد خارجی سدیم نیتروپروساید در افزایش تحمل به خشکی در دو ژنوتیپ خارمریم (*Silybum marianum* (L). Gaertn). دوماهنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۳۳ (۴): ۶۳۶-۶۴۸.

سقلی، ع.، فرخاری، م.، صلواتی، ا.، عالمی سعید، خ. و ابدالی مشهدی، ع. ۱۳۹۶. ارزیابی تنوع ژنتیکی اکوتیپ‌های گیاه دارویی خارمریم (*Silybum marianum* L.) با استفاده از اجزا عملکرد، صفات مرفولوژیک و فنولوژیک. دوماهنامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۳۳ (۶): ۹۹۰-۱۰۰۲.

فرهادی، ن.، استاجی، ا. و علیزاده سالطه، س. ۱۳۹۵. اثر پیش تیمار سالیسلیک اسید بر جوانه‌زنی بذر گیاه دارویی خارمریم (*Silybum marianum* cv. Budakalazi) در شرایط تنش شوری و خشکی. مجله پژوهش‌های بذر ایران. ۳ (۱): ۷۵-۸۴.

قادری فر، ف.، اکبرپور، و.، خاوری، ف. و احتشام نیا. ع. ۱۳۹۰. تعیین آستانه تحمل به شوری در مرحله جوانه‌زنی در شش گیاه دارویی. مجله پژوهش‌های تولید گیاهی. ۱۸ (۴): ۱۵-۲۴.

قوامی، ن.، نقدی، ح.ع.، رامین، ع.ا. و مهرآفرین، ع. ۱۳۹۰. تأثیر تنش شوری بر اجزای عملکرد و روغن بذر خارمریم (*Silybum marianum* (L). Gaertn). فصل‌نامه‌ی داروهای گیاهی.۲ (۲): ۸۹-۹۳.

مردانی، ح.، بیات، ح. و عزیزی، م. ۱۳۸۹. تأثیر محلولپاشی اسید سالیسیلیک بر خصوصیات مورفولوژیک و فیزیولوژیک دانهال‌های خیار (*Cucumis Sativus* cv. Super Dominus). تحت شرایط خشکی. نشریه علوم‌باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵ (۳): ۳۲۰-۳۲۶.

مومن‌پور، ع.، دهستانی اردکانی، م.، سلطانی گردفرامرزی، و.، راد، م.ه.، وظیفه‌شناس، م.ر.، آناقلی، ا.، احمدی، ف. و جماعتی، ز. ۱۳۹۹. تعیین آستانه تحمل شوری ژنوتیپ‌های مختلف انار. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۴ (۱): ۱-۱۴.

نورالهی، م.، حسن‌لی، ع.م، قنبریان، غ.ع. و تقوایی، م. ۱۳۹۵. برآورد ضریب گیاهی (Kc) گیاهان دارویی رزماری، اسطوخودوس و خارمریم با استفاده از بیلان آبی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۰ (۱): ۱۱۷-۱۲۷.

هراتی، ا.، کاشفی، ب. و متینی‌زاده، م. ۱۳۹۵. بررسی کاهش اثرات سو تنش شوری بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی آویشن دنایی (*Thymus daenensis* Celak.) از طریق کاربرد اسید سالیسیلیک. فناوری تولیدات گیاهی. ۱۶ (۲): ۱۱۱-۱۲۵.

یزدانی‌بیوکی، ر.، رضوانی‌مقدم، پ.، خزاعی، ح.ر.، قربانی، ر. و آستارایی، ع. ۱۳۸۹. اثرات تنش‌های شوری و خشکی بر خصوصیات جوانه‌زنی بذر خارمریم. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. ۸ (۱): ۱۲-۱۹.

Arshi, A., Abdin, M.Z., and Iqbal, M. 2002. Growth and metabolism of senna as affected by salt stress. Biologia Plantarum 45(2): 295-298.

Bybordi, A., and Tabatabaei, J. 2009. Effect of salinity stress on germination and seedling properties in canola (*Brassica napus* L.). Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 37(2): 71-76.

Chapman, H.D., and Pratt, P.F. 1961. Methods of analysis for soils, plants and waters. University of California, Division of Agricultural Science.

Dkhil, B.B., and Denden, M. 2012. Effect of salt stress on growth, anthocyanins, membrane permeability and chlorophyll fluorescence of Okra (*Abelmoschus esculentus* L.) seedlings. American Journal of Plant Physiology 7: 174- 83.

Hammami, H., Saadatian, B., and Hosseini, S.A.H. 2020. Geographical variation in seed germination and biochemical response of milk thistle (*Silybum marianum*) ecotypes exposed to osmotic and salinity stresses. Industrial Crops and Products 152: 1-12.

Jamil, M., Deog Bal, L., Kwang Yong, J., ASHRAF, M., Sheong Chun, L., and Eui Shik, R. 2006. Effect of salt (NaCl) stress on germination and early seedling growth of four vegetables species. Journal

Nutrition 30: 2037-2050.

Safikhan, S., Chaichi, M.R., Khoshbakht, K., Amini, A., and Motesharezadeh, B. 2018. Application of nanomaterial graphene oxide on biochemical traits of Milk thistle (*Silybum marianum* L.) under salinity stress. Australian Journal of Crop Science 12(6): 931-936.

Said-Alahl, H.A.H., and Omer, E.A. 2011. Medicinal and aromatic plants production under salt stress. A review, Herba Polonica 57(1): 72-86.

Waling, I., Van Vark, W., Houba, V.J.G., and Vander Lee, J.J. 1989. Soil and plant analysis, a series of syllabi, Part 7, Plant Analysis Procedures, Wageningen Agriculture University.

of Central European Agriculture 7: 273-282.

Masoumi Zavariyan, A., Yousefi Rad, M., and Asghari, M. 2015. Effect of seed priming by potassium nitrate on germination and biochemical indices in *Silybum marianum* L. under salinity stress. International Journal of Life Sciences 9(1): 23-29.

Ritchie, S.W., and Nguyen, H.T. 1990. Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. Crop Science 30: 105-111.

Saadatmand, A., Banihashemi, Z., Maftoun, M., and Sepaskhah, A. 2007. Interactive effect of soil salinity and water stress on growth and chemical compositions of pistachio nut tree. Journal of Plant

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2037-2046

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۴۶-۲۰۳۷

Estimation of some Salinity-related Growth Characteristics and Evaluation of Salinity Tolerance Threshold of Milk Thistle (*Silybum marianum* L.)

R. Yazdani-Biouki[1*], M.H. Banakar[2], H. Beyrami[3], M. Karimi[4], V. Soltani-Gerdfaramarzi [5]

Recived: Sep.06, 2020 Accepted: Dec.01, 2020

Abstract

To evaluate the salinity tolerance of Milk thistle, an investigation was conducted in a completely randomized design with 3 replications in a pot in the greenhouse of the National Salinity Research Center. Experimental treatment includes 5 levels 0.44 (control), 3, 6, 9 and 12 dS/m. The results showed that the application of salinity levels significantly reduced all the studied traits. Regarding some growth and yield-related traits, increasing salinity from control to salinity of 12 dS/m reduced plant height by 89%, grain yield by 79%, biological yield by 46%, and harvest index by 59%. Also, with increasing salinity level, relative water content decreased by 9.86% and ion leakage increased by 38.53%. Potassium and sodium elements of plant shoots were also significantly affected by salinity so that increasing salinity from control to 12 dS/m had a significant effect on reducing the ratio of potassium to sodium and caused a 69% decrease in this ratio. The results showed that the salinity tolerance threshold (seed yield) was 0.19 dS/m and a 50% reduction in yield was obtained at a salinity of 7.21 dS/m. In general, according to the results, it seems that Milk thistle does not have a high tolerance to salinity.

Keywords: Ion leakage, Potassium, Relative water content, Seed yield, Sodium

1,3,4- Assistant Professor, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran
2- Researcher, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization
5- Researcher, National Salinity Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization
(*- Corresponding Author Email: r.yazdani@areeo.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۵۹-۲۰۴۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2047-2059

مقاله پژوهشی

تغییرات زمانی و مکانی ردپای اکولوژیکی و ارزش اقتصادی آب در محصول گوجه فرنگی در ایران

مهرناز یحیی‌زاده برنطین[۱]، ام‌البنین بذرافشان[۲*]، یحیی اسماعیل‌پور[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۱

چکیده

در این مطالعه، تغییرات مکانی و زمانی اجزاء ردپای اکولوژیکی آب در محصول گوجه فرنگی فاریاب و میزان ارزش اقتصادی آب مجازی طی دوره آماری ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۶ در استان‌های تولید کننده در ایران برآورد شده است. نتایج نشان داد متوسط ردپای اکولوژیکی آب در محصول مذکور ۳۲۷/۲ متر مکعب در هر تن است که به ترتیب سهم آب سبز، آبی و خاکستری ۴/۶، ۸۳/۵ و ۱۱/۹ درصد است که به‌ترتیب استان بوشهر (۸۶/۸ متر مکعب بر تن) و استان قم (۷۷۱/۶ متر مکعب بر تن) دارای کمترین و بیشترین ردپای آب در ایران هستند. بالاترین سهم آب سبز مربوطه به استان‌های بوشهر، جنوب کرمان، مازندران و هرمزگان و بیشترین سهم آب آبی مربوط به استان‌های لرستان، کهگیلویه و بویر احمد و خراسان رضوی است. متوسط ارزش اقتصادی آب مجازی گوجه فرنگی در ایران ۰/۷۸ دلار در هر متر مکعب است که به ترتیب بالاترین (۱/۶۸دلار بر متر مکعب) و پائین ترین (۰/۲۹ دلار بر متر مکعب) مربوط به بوشهر و کهکیلویه و بویراحمد است. متوسط سالانه حجم آب مجازی تولید گوجه فرنگی ۳۹۲۵/۹ میلیون متر مکعب است که سهم استان‌های قم، گیلان و خراسان جنوبی در صادرات آب مجازی بالاترین است. نهایتا نتایج این تحقیق مشخص کرد که با توجه به محدودیت آب و خاک در ایران، شاخص ردپای اکولوژیکی، میزان حجم آب مجازی و آگاهی از تجارت آب مجازی اطلاعات مفیدی را برای اولویت‌بندی کشت گوجه در مناطق مستعد ارائه می‌نماید و در نهایت پیشنهاد می‌شود که دیدگاه حاضر جهت تخصیص منابع آب کشاورزی و سیاستگذاری توقف و یا توسعه کشت در مقیاس استانی و ملی وارد گردد.

واژه‌های کلیدی: آب مجازی، ارزش اقتصادی آب، ردپای آب، گوجه فرنگی فاریاب

مقدمه

ایران در قلب منطقه خشک خاورمیانه قرار دارد که حدود ۱/۱ درصد مساحت کره زمین را شامل می‌شود، این در حالیست که تنها از یک‌چهارم بارش‌های جوی کره زمین برخوردار است و بحرانی‌ترین منطقه جهان از لحاظ منابع آبی به شمار می‌رود. اکنون ۱۶ کشور از بین کشورهایی که بالاترین تنش آبی را دارند در خاورمیانه قرار گرفته‌اند و ایران در رتبه چهاردهم تنش آبی در جهان قرار دارد و پیش بینی‌ها نشان می‌دهند که تا سال ۲۰۳۰، به رتبه سیزدهم جهانی می‌رسد (وحید و رنجبر، ۱۳۹۷). بخش کشاورزی ۷۰ تا ۹۰ درصد از آب شیرین را در کره زمین مصرف میکند و در ایران، سهم این بخش بیش از ۹۰ درصد است که عامل تشدید کننده بحران آب در ایران محسوب می‌شود (محسن زاده و فکوهی، ۱۳۹۸). کشاورزی نقش بسیار مهمی در اقتصاد هر کشور دارد و برای تولید محصولات کشاورزی با شرایط متفاوت، باید مقدار آب مصرف شده محاسبه گردد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵).

ردپای آب،[3] شاخصی برای نشان دادن حجمی از آبی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم برای تولید کالا و یا ارائه هرگونه خدمات به مصرف می‌رسد. این عددبرای محصولات کشاورزی، شامل مجموع آب شیرین مصرف‌شده در طی فرآیندهای زنجیره تولید یک محصول خواهد بود (Hoekstra and Chapagain, 2008). در چرخه هیدرولوژی، منابع آب به دودسته آب آبی و آب سبز تقسیم‌بندی می‌شوند. آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی آب آبی را تشکیل می‌دهند، درحالی‌که به رطوبت خاک در مناطق غیراشباع آب سبز می‌گویند. منشاء آب آبی و آب سبز، بارندگی است. آب باران بعد از نفوذ در خاک و قبل از این‌که به منطقه اشباع برسد آب سبز را تشکیل

۱- کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
۳و۲- عضو هیات علمی گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
(*-نویسنده مسئول: Email: o.bazrafshan@hormozgan.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.6.7

3 -Water footprint

می‌دهد، درحالی‌که آب‌های زیرزمینی (منطقه اشباع) و همچنین رواناب حاصل از این بارندگی که به رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، پشت سدها و تالاب‌ها می‌پیوندد، آب آبی را شامل می‌شوند (Hoekstra and Hung, 2002). آب خاکستری، به حجم آبی اطلاق می‌شود که طی فرایند تولید محصولات آلوده‌شده و کیفیت اولیه خود را ازدست‌داده است. این آب‌ها وارد سیستم‌های طبیعی آبی می‌شود. میزان آبی که لازم است تا بتوان کیفیت آب‌های آلوده را به سطح استاندارد و مطلوب رساند، معادل حجم آب مجازی خاکستری در نظر گرفته می‌شود (Obuobie et al., 2005).

با مطرح شدن ایده آب مجازی در سال‌های اخیر، روشن شده است که حجم زیادی از آب به صورت مجازی بین کشورهای مختلف جهان جابجا می‌شود. اصطلاح آب مجازی اولین بار در دهه ۹۰ میلادی توسط آلن، برای نشان دادن کل مقدار آب مصرف شده برای تولید یک محصول (اعم از کالای صنعتی و یا محصول کشاورزی) مطرح شد. مطالعات زیادی به منظور نهادینه کردن این مفهوم در مدیریت یکپارچه منابع آب انجام شده است (Zhang et al., 2014).

برای اینکه بتوان اثر الگوی مصرف را بر منابع طبیعی نشان داد می‌توان از مفهوم آبرانه یا ردپای اکولوژیکی آب استفاده نمود. این مفهوم اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط هوکسترا و هانگ معرفی گردید (Ababaei and Ramezani Etedali, 2017). ردپای اکولوژیکی آب یک محصول به‌عنوان کل حجم آب شیرینی که برای تولید یک محصول استفاده می‌شود، تعریف‌شده است (بذرافشان و گرکانی نژادمشیزی، ۱۳۹۶). مفهوم ردپای اکولوژیکی آب مجازی در سطوح منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی برای تحلیل بهره‌وری مصرف آب مورداستفاده قرارگرفته است (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۳۹۵)

انتقال آب مجازی یکی از مکانیزم‌های ذخیره‌سازی منابع آب داخلی کشور و دستیابی به امنیت آبی در مقیاس ملی می‌باشد. تجارت بین‌المللی محصولات کشاورزی (واردات محصولات آب‌بر و صادرات محصولات کم‌آب بر) منجر به ذخیره منابع‌آب سطحی و زیرزمینی در سطح ملی می‌گردد (Bazrafshan et al., 2020). آب مجازی، تنها مفهومی است که بیان‌کننده محتوای آب (عمدتاً محصولات کشاورزی) بوده و ابعادی از قبیل زمان و مکان و نحوه مصرف آب را شامل می‌شود.ردپای اکولوژیکی آب مفهومی مشابه و گسترده‌تر از آب مجازی است، چراکه، این مفهوم علاوه بر اینکه ابعاد مکانی و زمانی را در بر می‌گیرد، ارتباطی میان فرموله کردن سیاست‌گذاری‌ها و ارزیابی اثرات آن به‌حساب می‌آید. در واقع مفهوم ردپای اکولوژیکی آب در مقیاس یک محصول، همان مفهوم آب مجازی را تداعی می‌کند، اما در مقیاس‌های بزرگ‌تر، از آب مجازی به‌عنوان ابزاری برای محاسبه استفاده می‌کند (Ababaei and Ramezani Etedali, 2017).

طی سال‌های اخیر مطالعات مفیدی با هدف بازبینی و بررسی ردپای اکولوژیکی و بهره‌وری اقتصادی آب کشاورزی در ایران و نقاط مختلف جهان به انجام رسیده است که در سال‌های اخیر به دلیل بحرانی‌تر شدن کمبود منابع آب این موضوع با اهمیت بیشتری دنبال شده است. بذرافشان و گرکانی نژاد مشیزی (۱۳۹۸) به بررسی ردپای آب و کارایی مصرف آب محصول زعفران در ۱۹ استان پرداختند. بذرافشان و همکاران (Bazrafshan et al., 2018) به بررسی میانگین و سهم اجزای ردپای آب از جمله ردپای آب سبز، آب آبی، آب خاکستری و سفید در محصول زعفران طی دوره زمانی (۲۰۰۸-۲۰۱۴) در سطح استانی و ملی پرداختند. نتایج نشان داد، میزان ردپای آب سبز، آبی، سفید و خاکستری به ترتیب ۱۲٪، ۴۲٪، ۴۰٪ و ۶ ٪ است. استان لرستان، آذربایجان شرقی و اصفهان کمترین ردپا و بالاترین ارزش اقتصادی آب را داشته در حالی‌که چهار محال و بختیاری، سمنان و فارس بیشترین مقدار ردپا و کمترین ارزش اقتصادی را دارا می‌باشند. بذرافشان و همکاران (Bazrafshan et al., 2020) شاخص ردپای آب و ارزش اقتصادی آب محصول خرما در سه رقم نرم، نیمه خشک و خشک در دوره زمانی ۲۰۱۶-۲۰۰۸ مورد ارزیابی قرار دادند. بیشترین و کمترین میزان ردپای آب و ارزش اقتصادی آب به‌ترتیب متعلق به خرمای خشک و خرمای نیمه خشک است. مقایسه محصول خرما با ۴۳ محصول دیگرکشاورزی در ایران نشان داد که خرمای خشک رتبه ۳۳ شاخص ردپای آب و رتبه ۱۸ در ارزش اقتصادی آب را دارد.

گوجه فرنگی یکی از صیفی‌جات مهم در ایران است؛ در سال‌های اخیر سطح زیر کشت این محصول به شدت افزایش یافته است، به گونه‌ای که به عنوان یک گیاه زراعی در سطوح وسیع مورد کشت و کار قرار می‌گیرد (Golkar et al., 2008). کشور ایران با تولید سالیانه ۱۸۳۹۱۶/۵ تن گوجه فرنگی در رتبه هفتم جهان قرار گرفته است؛ همچنین گوجه فرنگی دومین محصول کشاورزی صادراتی کشور است. لذا در یک جمع‌بندی می‌توان گفت، مرور تحقیقات نشان می‌دهد، تخمین‌هایی از ردپای اکولوژیکی آب در مقیاس جهانی و داخلی برای اغلب محصولات استراتژیک زراعی و باغی صورت گرفته است، اما مطالعات بسیار کمی در خصوص محصولات صیفی وجود دارد. این تحقیق به تحلیل زمانی و مکانی ردپای گوجه فرنگی فاریاب در مقیاس ملی و استانی طی دره آماری ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۶ پرداخته است. لذا هدف از ارائه این مقاله ۱) برآورد ردپای اکولوژیکی آب (آب سبز، آبی و خاکستری) و ارزش اقتصادی در محصول گوجه‌فرنگی آبی در دوره زمانی مذکور در مقیاس استانی و ملی، ۲) تحلیل زمانی و مکانی تغییرات ردپای آب در محصول گوجه‌فرنگی در ایران ۳) برآورد میزان تجارت آب مجازی این محصول در کشور است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، عملکرد در واحد سطح، مقدار تولید محصول گوجه‌فرنگی با استناد از سال‌نامه جهاد کشاورزی و منابعی مانند گزارش‌های دولتی تهیه شده است. همچنین داده‌های اقلیمی از سازمان هواشناسی هر استان (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۷) فراهم شد که شامل شامل: تبخیر و تعرق، حداقل و حداکثر دما، بارش، رطوبت و ساعات آفتابی طی دوره آماری مورد مطالعه است. ۲۹ استان در ایران تولید کننده گوجه فرنگی فاریاب هستند (جدول ۱) که بطور متوسط طی این دوره سالانه ، به‌ترتیب بیشترین و کمترین تولید مربوط به استان فارس (۹۵۸ هزار تن) و گیلان (۱۲۵/۶ تن) است.

در این مطالعه، ردپای اکولوژیکی آب سبز، آبی و خاکستری در تولید گوجه فرنگی در سطح ایران با به‌کارگیری چارچوب اصلی هوکسترا و چاپاگین(Hoekstra and Chapagain, 2008) طی دوره آماری ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۶ برآورد گردید.

$$WF_{Green}=\frac{(P_e)*10}{Y} \quad (۱)$$

$$WF_{Blue}=\frac{(ET_C-P_e)*10}{Y} \quad (۲)$$

$$WF_{Gray}=\frac{a*NAR}{C_{Max}-C_{Nat}}*\frac{1}{Y} \quad (۳)$$

WF_{Green} ردپای آب سبز، WF_{Blue} ردپای آب آبی، WF_{Gray} ردپای آب خاکستری بر حسب متر مکعب در هر تن است. P_e مجموع بارندگی مؤثر در طول دوره رشد هر گیاه بر حسب میلی‌متر، ET_c تبخیر و تعرق هر گیاه بر حسب میلی‌متر، Y عملکرد در محصول بر حسب تن بر هکتار، a (٪) درصد تلفات کودهای نیتروژن، NAR بر حسب کیلوگرم بر هکتار نرخ مصرف کود برای هر گیاه، C_{Max} غلظت بحرانی نیتروژن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. مقادیر P_e با استفاده از روش $USDA$ و ET_c با استفاده از روش فائو- پنمن مونتیث و با بکارگیری مدل کراپ واپ[1] محاسبه می‌گردد. همچنین مقادیر a در شرایط فاریاب٪۱۰ در نظر گرفته می‌شود (Hoekstra and Chapagain, 2008). لازم به ذکر است که میزان بارش موثر، تبخیر و تعرق گیاهی و نیاز آبی در هر دشت در هر استان بصورت جداگانه براورد و سپس متوسط وزنی هر یک از موارد ذکرشده در هر استان محاسبه گردید.

برای دست‌یابی به ارزش ردپای آب مجازی محصولات صادراتی، از مفاهیم ردپای اقتصادی استفاده گردید که با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید:

$$WF_{E_{(Green)}}=\frac{WF_{Green}}{NB} \quad (۴)$$

$$WF_{E_{(Blue)}}=\frac{WF_{Blue}}{NB} \quad (۵)$$

$$WF_{E_{(Gray)}}=\frac{WF_{Gray}}{NB} \quad (۶)$$

در این روابط $WF_{E_{(Green)}}$ ردپای اقتصادی آب سبز، $WF_{E_{(Blue)}}$ ردپای اقتصادی آب آبی، $WF_{E_{(Gray)}}$ ردپای اقتصادی آب خاکستری بر حسب متر مکعب بر میلیون ریال و NB سود خالص بر حسب میلیون ریال بر تن می‌باشد (بذرافشان و گرکانی نژاد مشیزی، ۱۳۹۶).

میزان آب مجازی صادرشده (VWC_E, virtual water content exported) عبارتست، اختلاف کل حجم اجزای ردپای اکولوژیکی که صرف تولید محصول شده با آب مجازی مصرف شده در داخل کشور؛ که آب مجازی مصرفی برای محصول مورد نظر از حاصل‌ضرب سرانه مصرف هر نفر در یک سال برای محصول مورد نظر در جمعیت آن کشور بدست می‌آید(Bazrafshan et al., 2019). براساس الگوی پیشنهادی بهینه در طرح امنیت غذایی کشور (مرکز ملی آمار ایران، ۱۳۹۶) میزان مصرف سرانه گوجه‌فرنگی تازه برای هر ایرانی ۵۰ کیلوگرم در سال است.

نتایج و بحث

ردپای اکولوژیکی آب در استان‌های تولید کننده گوجه فرنگی فاریاب ایران

اجزاء ردپای اکولوژیکی آب در محصول گوجه فرنگی در جدول ۲ خلاصه شده است. در ایران، ردپای آب سبز در محدوده‌ی ۱/۵ تا ۳۸/۸ مترمکعب برتن، آب آبی ۴۶/۲- ۶۳۸ متر مکعب بر تن و آب خاکستری ۱۲/۲ تا ۱۰۱/۹ متر مکعب بر تن متغیر است. متوسط کل ردپای آب در تولید گوجه‌فرنگی در سطح ملی ۳۲۷/۲ متر مکعب بر تن می‌باشد که از این مقدار سهم آب سبز ۴/۶ ٪، آب آبی ۸۳/۵ ٪، و آب خاکستری ۱۱/۹ ٪ است. متوسط ردپای آب سبز ۱۵ متر مکعب بر تن است که استان‌های بوشهر، جنوب کرمان، مازندران و هرمزگان دارای بالاترین سهم به ترتیب ۳۲/۶ ٪، ۲۱/۲ ٪، ۲۱/۱۰ ٪ و ۲۱٪ و استان‌های کرمان، سمنان و تهران به ترتیب ۴ ٪، ۵ ٪ و ۶ ٪ کمترین سهم ردپای آب سبز را دارند (شکل ۱).

متوسط میزان ردپای آب آبی در تولید گوجه فرنگی فاریاب ۲۷۳/۳ متر مکعب بر تن است. استان‌های لرستان، کهگیلویه و بویر احمد و خراسان رضوی به ترتیب با ۹۴/۴ ٪، ۹۴/۲ ٪، ۹۲/۶ ٪ بیشترین سهم آب آبی را نسبت به مجموع ردپای آب در کشور دارا

1- CROPWAT

هستند و در مقابل استان‌های خوزستان و بوشهر با حدود ۳۱/۵ ٪ و ۵۳/۳ ٪ کمترین سهم ردپای آب آبی را دارند.

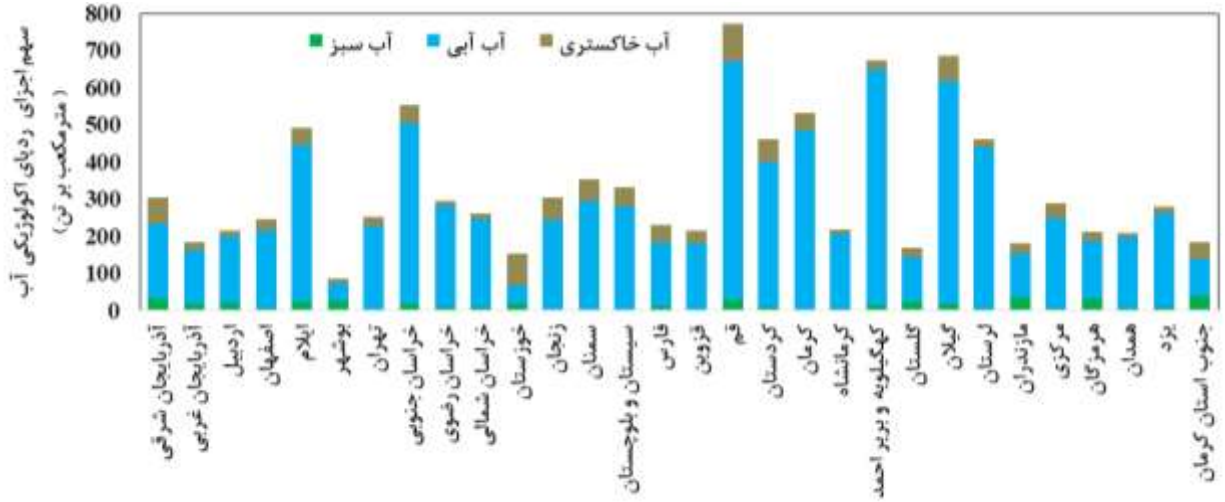
بررسی سهم ردپای آب سبز و آبی نشان می‌دهد (شکل ۱) در استان‌های گیلان، گلستان و مازندران علیرغم قابل توجه بودن مقدار باران، سهم زیادی از ردپای آب مربوط به آب آبی است. با توجه به قابل توجه بودن سهم بارش در استان‌های فوق، می‌توان با اعمال گزینه‌های مدیریتی مانند تغییر ژنوتیپ با هدف سازگاری بیشتر در دوره مرطوب، کوتاه نمودن دوره گلدهی با هدف جلوگیری از ورود به دوره خشکی و جابجایی تاریخ گلدهی و رشد گوجه‌فرنگی امکان توسعه کشت دیم را فراهم آورد (محمودنیامیمند و همکاران، ۱۳۹۱).

جدول ۱- اطلاعات محصول تولیدی در استان‌های تولید کننده گوجه فرنگی فاریاب در ایران

استان	کد	متوسط وزنی تولید(تن)	سهم ملی(٪)	مصرف کود(کیلوگرم)	عملکرد(تن)	سطح زیرکشت (هکتار)	ارزش اقتصادی آب(دلار بر مترمکعب)
آذربایجان شرقی	۱	۲۳۵۱۷۲/۳	۴/۲۶	۳۵۰	۳۸/۴	۶۱۱۸/۲	۰/۹۷
آذربایجان غربی	۲	۱۹۳۲۸۹/۴	۳/۵۰	۱۵۰	۳۵/۸	۵۴۵۴/۶	۱
اردبیل	۳	۵۸۸۳۰/۷	۱/۰۷	۱۰۰	۳۰/۹	۱۸۴۸/۸	۰/۸۷
اصفهان	۴	۵۰۳۳۴/۹	۰/۹۱	۲۲۵	۳۹/۷	۱۳۵۵/۹	۰/۸۰
ایلام	۵	۹۴۵۰/۲	۰/۱۷	۱۷۵	۲۱/۹	۴۴۳/۱	۰/۴۴
بوشهر	۶	۶۲۸۶۶۰/۸	۱۱/۳۹	۱۰۰	۴۲/۵	۱۵۰۹۰/۱	۲/۲۵
تهران	۷	۱۴۷۲۹۲/۸	۲/۶۷	۲۰۰	۴۰/۸	۳۹۲۰/۳	۰/۷۶
جنوب استان کرمان	۸	۴۵۷۴۳۱/۱	۸/۲۹	۲۵۰	۲۸/۳	۳۹۵/۸	۱/۰۲
خراسان جنوبی	۹	۵۱۶۳/۶	۰/۰۹	۱۲۵	۱۳/۴	۱۴۶۳۴/۷	۰/۳۵
خراسان رضوی	۱۰	۵۲۴۰۴۴/۶	۹/۵۰	۱۰۰	۳۶/۵	۴۱۹۹/۳	۰/۶۳
خراسان شمالی	۱۱	۱۲۶۹۸۳/۴	۲/۳۰	۹۰	۳۰/۹	۸۹۱۷/۱	۰/۷۲
خوزستان	۱۲	۳۱۲۵۲۹/۳	۵/۶۶	۶۰۰	۳۵/۲	۴۷۲۰/۷	۱/۲۹
زنجان	۱۳	۱۵۱۴۵۵/۵	۲/۷۵	۳۵۰	۳۱/۵	۲۱۹۹	۰/۶۴
سمنان	۱۴	۶۲۴۹۷/۵	۱/۱۳	۳۲۵	۲۸/۷	۱۸۴۴	۰/۵۳
سیستان و بلوچستان	۱۵	۳۷۱۷۷/۹	۰/۶۷	۲۰۰	۲۰/۱	۱۹۱۱۴/۷	۰/۵۷
فارس	۱۶	۹۵۷۹۴۱/۳	۱۷/۳۶	۴۵۰	۵۰/۳	۹۰۲۸/۳	۰/۷۹
قزوین	۱۷	۴۰۱۲۱۵/۶	۷/۲۷	۳۰۰	۴۴/۷	۳۶/۵	۰/۹۳
قم	۱۸	۸۲۷/۱	۰/۰۱	۲۲۵	۲۲/۲	۱۱۳۵/۷	۰/۵۵
کردستان	۱۹	۲۴۸۰۱/۰	۰/۴۵	۲۵۰	۲۲/۳	۲۱۱/۴	۰/۴۶
کرمان	۲۰	۴۷۴۷/۸	۰/۰۹	۲۰۰	۲۳/۵	۴۱۹۷/۳	۰/۳۹
کرمانشاه	۲۱	۱۸۶۷۸۸/۵	۳/۳۹	۱۰۰	۴۴/۸	۲۹۶/۵	۰/۹۹
کهگیلویه و بویر احمد	۲۲	۶۱۹۶/۵	۰/۱۱	۱۰۰	۲۳/۹	۸۴۱۱/۹	۰/۲۹
گلستان	۲۳	۲۶۷۹۰۱/۱	۴/۸۶	۱۵۰	۳۳/۳	۱۱/۸	۱/۱۲
گیلان	۲۴	۱۲۵/۶	۰	۱۲۵	۱۳/۵	۲۳۹۵/۸	۰/۴۴
لرستان	۲۵	۶۲۷۸۴/۲	۱/۱۴	۱۰۰	۲۵/۲	۱۴۳۱/۷	۰/۴۴
مازندران	۲۶	۵۰۵۲۲/۵	۰/۹۲	۱۵۰	۳۰/۵	۸۰۳/۹	۱/۱۱
مرکزی	۲۷	۲۳۲۶۵/۳	۰/۴۲	۲۵۰	۳۲/۷	۱۳۸۵۸/۲	۰/۶۷
هرمزگان	۲۸	۳۸۴۳۴۹/۱	۶/۹۷	۱۳۷/۵	۲۷/۷	۳۰۸۶/۸	۰/۹۱
همدان	۲۹	۱۳۲۲۹۰/۶	۲/۴۰	۱۰۰	۴۲/۸	۴۷۷/۱	۰/۹۴
یزد	۳۰	۱۳۴۲۵/۹	۰/۲۴	۱۰۰	۲۸/۶	۱۶۲۵۸/۱	۰/۶۶
کل	–	۵۵۱۷۴۹۶/۲	۱۰۰	۶۰۷۷/۵	۹۴۰	۱۵۱۸۹۷/۱	–
میانگین	–	۱۸۳۹۱۶/۵	۳/۳	۲۰۲/۶	۳۱/۴	۵۰۶۳/۲	۰/۷۸
ماکزیمم	–	۹۵۷۹۴۱/۳	۱۷/۳۶	۶۰۰	۵۰/۳	۱۹۱۱۴/۷	۲/۲۵
مینیمم	–	۱۲۵/۶	۰	۹۰	۱۳/۴	۱۱/۸	۰/۲۹

جدول ۲- اجزای ردپای اکولوژیکی آب در گوجه فرنگی فاریاب (متر مکعب بر تن)

استان	سبز	آبی	خاکستری	کل
آذربایجان شرقی	۳۳/۰	۱۹۹/۵	۷۳/۲	۳۰۵/۷
آذربایجان غربی	۱۶/۷	۱۴۷/۷	۲۱/۳	۱۸۵/۶
اردبیل	۲۰/۱	۱۷۸/۸	۱۶/۵	۲۱۵/۴
اصفهان	۵/۳	۲۰۹/۹	۲۹/۹	۲۴۵/۱
ایلام	۲۴/۱	۴۲۳/۰	۴۳/۹	۴۹۱/۰
بوشهر	۲۸/۳	۴۶/۲	۱۲/۳	۸۶/۸
تهران	۱/۵	۲۲۵/۴	۲۵/۶	۲۵۲/۵
جنوب استان کرمان	۳۸/۸	۹۹/۵	۴۴/۹	۱۸۳/۱
خراسان جنوبی	۱۸/۲	۴۸۷/۴	۴۹/۵	۵۵۵/۱
خراسان رضوی	۸/۱	۲۷۴/۵	۱۳/۹	۲۹۶/۵
خراسان شمالی	۷/۷	۲۳۸/۶	۱۵/۱	۲۶۱/۴
خوزستان	۱۷/۴	۴۸/۷	۸۸/۵	۱۵۴/۵
زنجان	۲/۸	۲۴۰/۴	۶۰/۵	۳۰۳/۷
سمنان	۱/۸	۲۹۵/۰	۵۸/۰	۳۵۴/۸
سیستان و بلوچستان	۳/۰	۲۷۷/۵	۵۰/۵	۳۳۱/۱
فارس	۱۲/۴	۱۷۳/۴	۴۵/۱	۲۳۰/۹
قزوین	۲/۹	۱۷۷/۸	۳۵/۷	۲۱۶/۴
قم	۳۱/۷	۶۳۸/۰	۱۰۱/۹	۷۷۱/۶
کردستان	۱۰/۰	۳۸۸/۶	۶۲/۴	۴۶۱/۰
کرمان	۲/۳	۴۸۴/۴	۴۶/۸	۵۳۳/۵
کرمانشاه	۶/۴	۱۹۹/۹	۱۲/۴	۲۱۸/۶
کهگیلویه و بویر احمد	۱۶/۴	۶۳۴/۴	۲۲/۷	۶۷۳/۵
گلستان	۲۴/۷	۱۲۰/۹	۲۳/۴	۱۶۹/۰
گیلان	۱۷/۱	۶۰۰/۹	۶۶/۹	۶۸۵/۰
لرستان	۴/۳	۴۳۴/۶	۲۱/۳	۴۶۰/۳
مازندران	۳۸/۱	۱۱۴/۳	۲۷/۸	۱۸۰/۲
مرکزی	۶/۷	۲۳۴/۶	۴۰/۱	۲۹۰/۴
هرمزگان	۳۴/۴	۱۵۱/۸	۲۶/۰	۲۱۲/۱
همدان	۵/۴	۱۹۱/۷	۱۲/۲	۲۰۹/۳
یزد	۹/۳	۲۵۳/۳	۱۷/۹	۲۸۰/۵
میانگین	۱۵	۲۷۳/۳	۳۸/۹	۳۲۷/۲
ماکزیمم	۳۸/۸	۶۳۸/	۱۰۱/۹	۷۷۱/۶
مینیمم	۱/۵	۴۶/۲	۱۲/۲	۸۶/۸



شکل ۱- سهم اجزای ردپای اکولوژیکی آب در استان‌های تولیدکننده گوجه فرنگی فاریاب در ایران

ردپای آب خاکستری در تولید گوجه‌فرنگی فاریاب در ایران ۳۸/۹ متر مکعب بر تن می‌باشد که استان‌های خوزستان، جنوب کرمان و آذربایجان شرقی به ترتیب ۵۷/۳ ٪، ۲۴/۵ ٪ و ۲۳/۹ ٪ بیشترین سهم ردپای آب خاکستری را دارند و استان‌های کهگیلویه و بویر احمد، لرستان و خراسان رضوی کمترین سهم ردپای آب خاکستری ۳/۴ ٪ ، ۴/۶ ٪ و ۴/۷ ٪ را دارا می‌باشند. کاهش ردپای آب خاکستری به‌دلیل مصرف پائین کودهای شیمیایی سبب اثرات زیست‌محیطی کمتر به منابع آب و خاک و کاهش ردپای کل می‌گردد.

تغییرات زمانی و مکانی ردپای اکولوژیکی آب و ارزش اقتصادی در محصول گوجه فرنگی فاریاب در ایران

جهت بررسی تغییرات زمانی ردپای اکولوژیکی و ارزش اقتصادی آب در گوجه فرنگی ، میزان ردپا و میزان ارزش اقتصادی در کل کشور به‌صورت میانگین وزنی در تمام استان‌ها برآورد گردید. . شکل ۲، روند تغییرات زمانی ارزش اقتصادی آب و ردپای اکولوژیکی آب را نشان می‌دهد. بطور کل، روند ارزش اقتصادی آب افزایشی و روند ردپای اکولوژیکی آب، کاهشی است. طبق رابطه (۴ -۶) هر قدر ردپای آب بیشتر باشد، ارزش اقتصادی آب کاهش می‌یابد. لذا طی سال‌های ۱۳۸۶-۸۷؛ ۱۳۹۱-۹۲ و ۹۳، با بالاترین ردپای آب و کمترین ارزش اقتصادی مواجه هستیم. افزایش ردپای آب به‌طور مستقیم به عملکرد، مدیریت زمین و غیرمستقیم عوامل اقلیمی بستگی دارد (Bazrafshan et al., 2020).

شکل۳، تغییرات مکانی ردپای اکولوژیکی آب در محصول گوجه فرنگی فاریاب در ۲۹ استان نمایش می‌دهد. براساس شکل ۲، دامنه تغییرات ردپای اکولوژیکی بین ۷۷۱/۶-۸۶/۸ متر مکعب بر تن در سال است که عموم مناطق کشور در محدوده تغییرات ۸۶/۸ تا ۳۳۳/۹ متر مکعب بر تن قرار دارند. بیشترین ردپا مربوط به مناطق مرکزی و جنوب شرقی ایران و کمترین مربوط به محدوده نقاط شمال، جنوب و غرب کشور است.

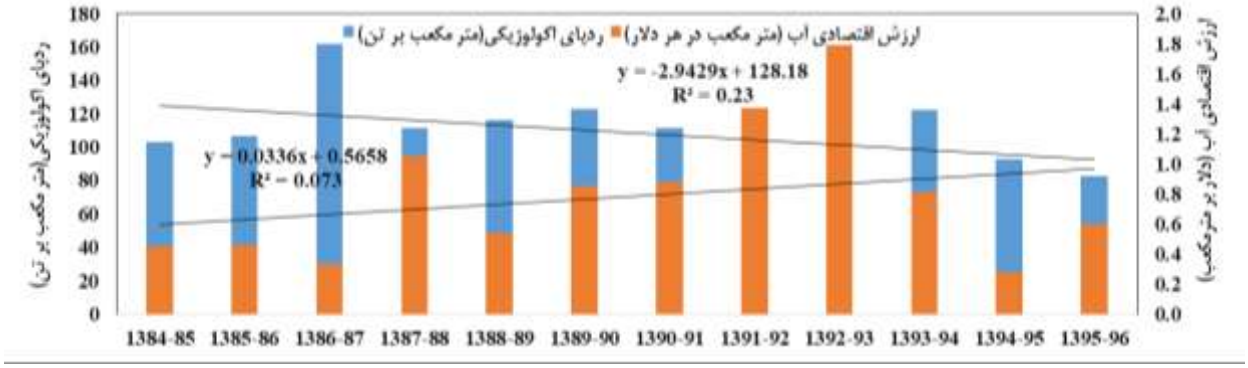
شکل ۴ تغییرات مکانی ارزش اقتصادی آب در محصول گوجه فرنگی فاریاب در ۲۹ استان ایران نمایش می‌دهد ، بر اساس شکل فوق، تغییرات ارزش اقتصادی آب بین ۰/۲۹ تا ۲/۲۵ متر مکعب در دلار است که عموم مناطق کشور در محدوده تغییرات ۰/۲۹ تا ۰/۷۷ متر مکعب در دلار قرار دارند. تنها بخش‌هایی از استان‌های جنوب کرمان، بوشهر، خوزستان، گلستان، مازندران و آذربایجان غربی در محدوده زیادی از ارزش اقتصادی آب هستند.

حجم آب مجازی و تجارت آب مجازی در محصول گوجه فرنگی فاریاب در مقیاس ملی و استانی

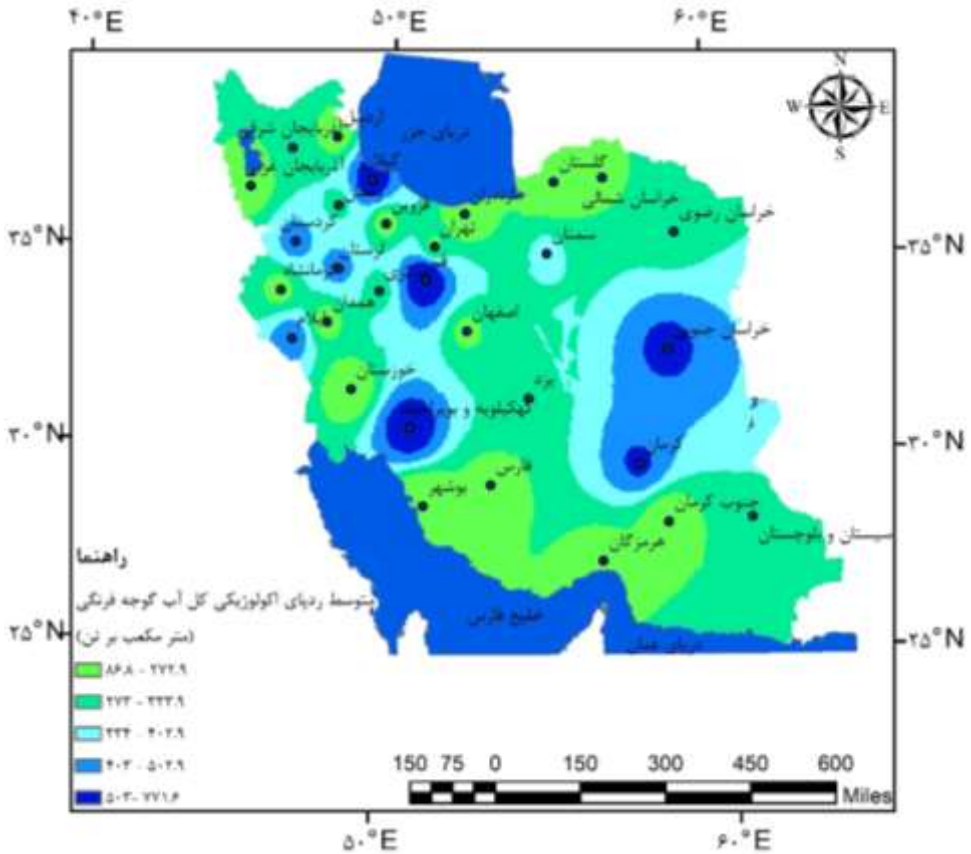
بررسی حجم آب مجازی نشان می‌دهد (جدول ۳) کل حجم آب مجازی گوجه فرنگی در ایران ۱۱۷۷۷۶/۲ میلیون متر مکعب است که از این مقدار به ترتیب حجم آب سبز، آبی و خاکستری ۵۳۸۶/۹، ۹۸۳۹۵/۵، ۱۳۹۹/۷ میلیون متر مکعب است. که استان‌هایی نظیر قم، گیلان، کهگیلویه و بویر احمد، خراسان جنوبی و کرمان به ترتیب با مجموع ۹۲۵۹/۸، ۸۲۱۹/۷، ۸۰۸۱/۵، ۶۶۶۱/۶ و ۶۴۰۲ میلیون متر مکعب، حجم بسیار بالای ردپای اکولوژیکی آب در تولید گوجه فرنگی در ایران دارند. در این پنج استان سهم بالای حدود ۷/۹، ۷، ۶/۹، ۵/۷ و ۵/۴ درصد از مجموع ردپای اکولوژیکی آب سبز و آبی است که حدود ۲۵ درصد از کل ردپای گوجه فرنگی در اراضی فاریاب در ایران در مقیاس ملی را به خود اختصاص داده است. البته در این پنج استان میزان ردپای آب آبی از دلایل دیگر بالا بودن مجموع ردپای آب در

تولید گوجه فرنگی فاریاب است.

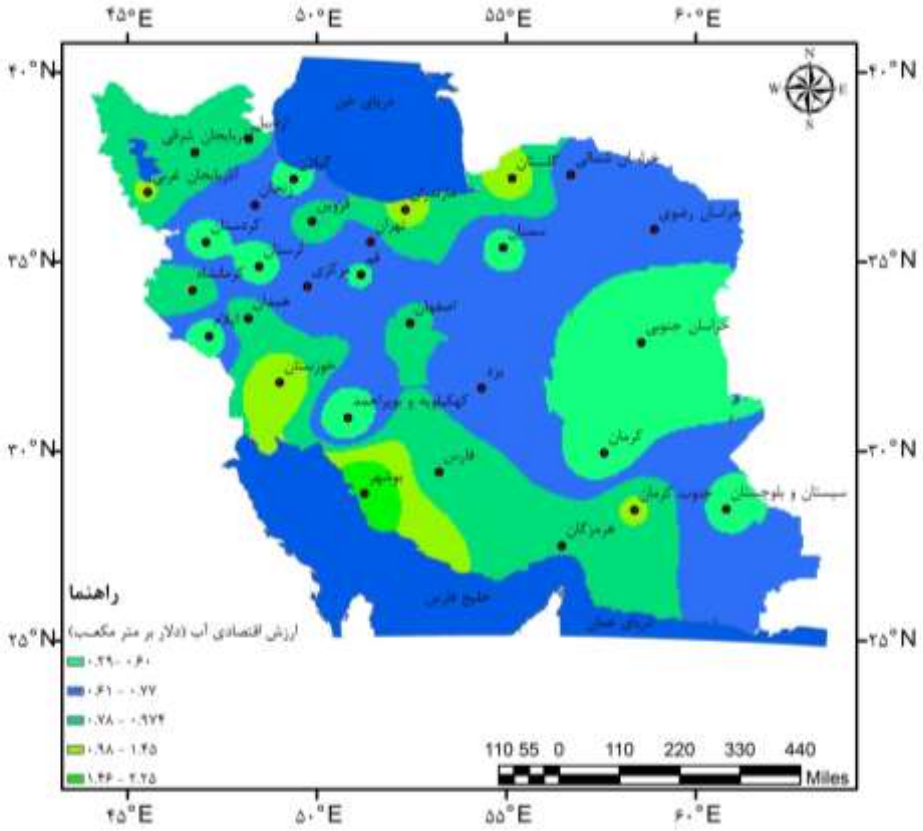
حجم ردپای آب خاکستری در گوجه فرنگی در مجموع سالانه به‌طور متوسط ۳۸/۹ متر مکعب بر تن است که با مصرف بهینه کودهای شیمیایی، امکان کاهش سهم آب خاکستری وجود دارد. چرا که کود کمتری به سمت آب‌های زیر زمینی آبشویی شده و یا توسط رواناب سطحی هدر می‌رود (Jenkinson, 2001).



شکل ۲- تغییرات زمانی ارزش اقتصادی آب و ردپای اکولوژیکی آب در محصول گوجه فرنگی فاریاب در ایران



شکل ۳- تغییرات مکانی اجزاء ردپای اکولوژیکی آب درمحصول گوجه فرنگی فاریاب در ایران



شکل ٤- تغییرات مکانی ارزش اقتصادی آب در محصول گوجه فرنگی فاریاب در ایران

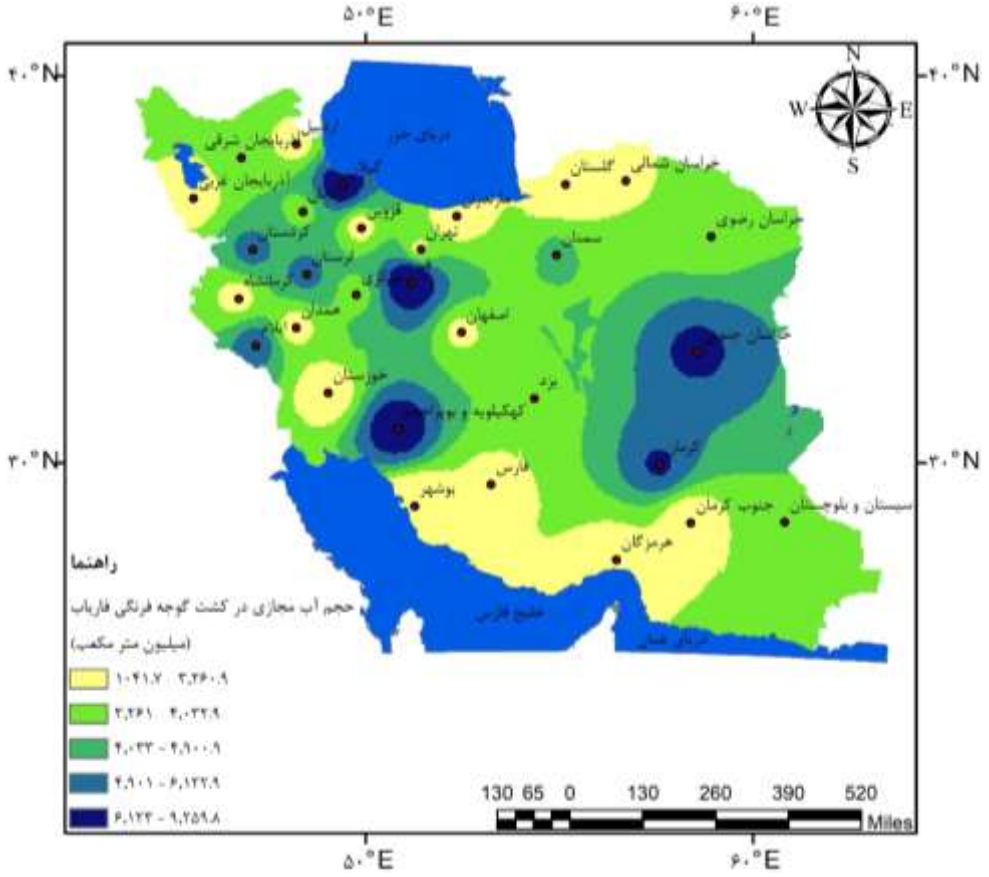
سهم ردپای آب آبی در گوجه‌فرنگی فاریاب در ایران، ۸۳/۵ درصد است که حجم آن بالغ بر ۳۲۷۹/۹ متر مکعب بر تن است. ۶۷ درصد سطح زیر کشت گوجه‌فرنگی در استان‌های خشک و نیمه خشک است که با میزان بارش مؤثر کم، تبخیر و تعرق نیاز آبی بالای گیاه مواجه هستند. از طرفی در این استان‌ها تلفات آبیاری به دلیل شیوه نامناسب آبیاری نیز سبب افزایش سهم ردپای آب آبی شده است، به‌طوریکه عدم مدیریت نامناسب در نحوه‌ی آبیاری، استفاده از روش‌های آبیاری سنتی (غرقابی) سبب افزایش ردپای آب گردیده است که لزوم کنترل تلفات آبیاری، افزایش راندمان به کمک روش‌های نوین و تاریخ مناسب آبیاری در این استان‌ها جهت افزایش بهره‌وری آب ضروری به نظر می‌رسد. بیشترین سطح زیر کشت گوجه فرنگی فاریاب مربوط به استان‌های فارس، جنوب کرمان، بوشهر، خراسان رضوی و هرمزگان و بالاترین حجم آب مصرفی مربوط به استان‌های قم، گیلان، کهگیلویه و بویر احمد، خراسان جنوبی و کرمان می‌باشد که با توجه به محدود بودن آب‌های سطحی و تنش آبی موجود در آن‌ها تقریبا کل آب آبی از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود و از طرفی بیشترین عملکرد و بهره‌وری محصول در استان‌های فارس، کرمانشاه، قزوین، همدان و بوشهر را دارند. افزایش بهره‌وری در اراضی فاریاب می‌تواند راه حل مناسبی برای حفظ منابع آبی تجدید پذیر و استفاه مؤثر از بارش در منطقه باشد.

تغییرات مکانی حجم آب مجازی و زمانی حجم آب مجازی و تجارت آب مجازی در ایران

متوسط تغییرات مکانی حجم آب مجازی بر حسب میلیون متر مکعب در سال در سطح کشور در شکل ۵ نمایش داده شده است. پهنه زیادی از کشور در محدوده تغییرات ۴۹۰۰/۹- ۱۰۴۱/۷ میلیون متر مکعب بوده و از پراکنش تقریبا منظمی برخوردار می‌باشد. استان‌های خراسان جنوبی، کرمان و کهگیلویه و بویر احمد، قم، ایلام، لرستان، کردستان و گیلان دارای حجم بالایی از آب مجازی هستند. بیشترین سهم تولید در گوجه فرنگی آبی در کشور در استان‌های فارس، بوشهر، خراسان رضوی، جنوب کرمان و قزوین به خود اختصاص می‌دهد اما بیشترین حجم آب مجازی با توجه به ردپای اکولوژیکی بالا مربوط به غرب و شمال غرب کشور است.

جدول ۳- متوسط حجم آب مجازی در استان‌های تولیدکننده گوجه فرنگی فاریاب در ایران

مجموع حجم آب مجازی در گوجه فرنگی فاریاب(میلیون متر مکعب)					
استان	سبز	آبی	خاکستری	کل	سهم ملی(٪)
آذربایجان شرقی	۳۹۶/۴	۲۳۹۳/۶	۸۷۸/۲	۳۶۶۸/۲	۳/۱
آذربایجان غربی	۲۰۰/۶	۱۷۷۱/۸	۲۵۵/۱	۲۲۲۷/۵	۱/۹
اردبیل	۲۴۱/۱	۲۱۴۵/۸	۱۹۷/۶	۲۵۸۴/۵	۲/۲
اصفهان	۶۳/۷	۲۵۱۹/۱	۳۵۸/۳	۲۹۴۱/۰	۲/۵
ایلام	۲۸۹/۱	۵۰۷۶/۶	۵۲۶/۹	۵۸۹۲/۶	۵/۰
بوشهر	۳۳۹/۴	۵۵۴/۸	۱۴۷/۵	۱۰۴۱/۷	۰/۹
تهران	۱۸/۴	۲۷۰۴/۵	۳۰۶/۶	۳۰۲۹/۵	۲/۶
جنوب استان کرمان	۴۶۵/۴	۱۱۹۳/۶	۵۳۸/۶	۲۱۹۷/۶	۱/۹
خراسان جنوبی	۲۱۸/۷	۵۸۴۸/۵	۵۹۴/۴	۶۶۶۱/۶	۵/۷
خراسان رضوی	۹۶/۸	۳۲۹۴/۵	۱۶۶/۹	۳۵۵۸/۱	۳/۰
خراسان شمالی	۹۲/۷	۲۸۶۳/۱	۱۸۱/۵	۳۱۳۷/۳	۲/۷
خوزستان	۲۰۸/۸	۵۸۳/۹	۱۰۶۱/۷	۱۸۵۴/۴	۱/۶
زنجان	۳۳/۲	۲۸۸۴/۶	۷۲۶/۴	۳۶۴۴/۲	۳/۱
سمنان	۲۱/۴	۳۵۳۹/۵	۶۹۶/۳	۴۲۵۷/۳	۳/۶
سیستان و بلوچستان	۳۶/۴	۳۳۳۰/۱	۶۰۶/۶	۳۹۷۳/۱	۳/۴
فارس	۱۴۹/۰	۲۰۸۰/۹	۵۴۰/۶	۲۷۷۰/۵	۲/۴
قزوین	۳۴/۳	۲۱۳۳/۱	۴۲۸/۹	۲۵۹۶/۳	۲/۲
قم	۳۸۰/۶	۷۶۵۵/۷	۱۲۲۳/۴	۹۲۵۹/۸	۷/۹
کردستان	۱۱۹/۹	۴۶۶۳/۴	۷۴۹/۳	۵۵۳۲/۵	۴/۷
کرمان	۲۸/۱	۵۸۱۲/۹	۵۶۱/۱	۶۴۰۲/۰	۵/۴
کرمانشاه	۷۷/۲	۲۳۹۸/۲	۱۴۸/۴	۲۶۲۳/۸	۲/۲
کهگیلویه و بویر احمد	۱۹۶/۴	۷۶۱۲/۲	۲۷۲/۸	۸۰۸۱/۵	۶/۹
گلستان	۲۹۶/۱	۱۴۵۰/۵	۲۸۱/۱	۲۰۲۷/۷	۱/۷
گیلان	۲۰۵/۷	۷۲۱۰/۷	۸۰۳/۳	۸۲۱۹/۷	۷/۰
لرستان	۵۱/۲	۵۲۱۵/۷	۲۵۶/۲	۵۵۲۳/۱	۴/۷
مازندران	۴۵۷/۴	۱۳۷۲/۱	۳۳۳/۰	۲۱۲۶/۶	۱/۸
مرکزی	۸۰/۸	۲۹۲۳/۵	۴۸۰/۸	۳۴۸۵/۱	۳/۰
هرمزگان	۴۱۲/۴	۱۸۲۱/۶	۳۱۱/۵	۲۵۴۵/۵	۲/۲
همدان	۶۴/۲	۲۳۰۰/۹	۱۴۶/۰	۲۵۱۱/۲	۲/۱
یزد	۱۱۱/۶	۳۰۴۰/۱	۲۱۴/۷	۳۳۶۶/۴	۲/۹
کل	۵۳۸۶/۹	۹۸۳۹۵/۵	۱۳۹۹۳/۷	۱۱۷۷۷۶/۲	۱۰۰
میانگین	۱۷۹/۶	۳۲۷۹/۹	۴۶۶/۵	۳۹۲۵/۹	۳/۳
ماکزیمم	۴۶۵/۴	۷۶۵۵/۷	۱۲۲۳/۴	۹۲۵۹/۸	۷/۹
مینیمم	۱۸/۴	۵۵۴/۸	۱۴۶/۰	۱۰۴۱/۷	۰/۹



شکل ۵- تغییرات مکانی متوسط حجم کل آب مجازی سالانه در محصول گوجه فرنگی فاریاب در ایران طی دوره مورد بررسی

جهت بررسی بیلان آب مجازی، میزان کل آب مجازی صرف شده در تولید گوجه فرنگی در ایران به ازای هر سال برآورد گردید و برای محاسبه تجارت آب مجازی در هر سال و همچنین میزان سرانه مصرف جمعیت در هر سال بصورت جداگانه محاسبه و برای تمامی استان‌ها در مقیاس ملی برآورد گردید. شکل ۶، روند تغییرات زمانی بیلان آب مجازی که صرف تولید گوجه‌فرنگی شده، مصرف آب مجازی توسط جمعیت در هر سال و میزان تجارت آب مجازی مازاد در مقیاس ملی نمایش می‌دهد. طی سال‌های مورد بررسی، با توجه به روند آب مجازی حاصل از تولید گوجه فرنگی، میزان تجارت آب مجازی مازاد کاهش یافته است. کاهش تجارت آب مجازی به تغییرات جمعیت و آب مجازی که سالانه صرف تولید شده بستگی دارد. طبق نتایج بدست آمده در بررسی تغییرات زمانی ردپای آب محصول گوجه فرنگی طی دوره مورد مطالعه (شکل ۲) مهم ترین دلیل کاهش حجم آب مجازی که صرف تولید گوجه فرنگی شده، کاهش ردپای آب است.

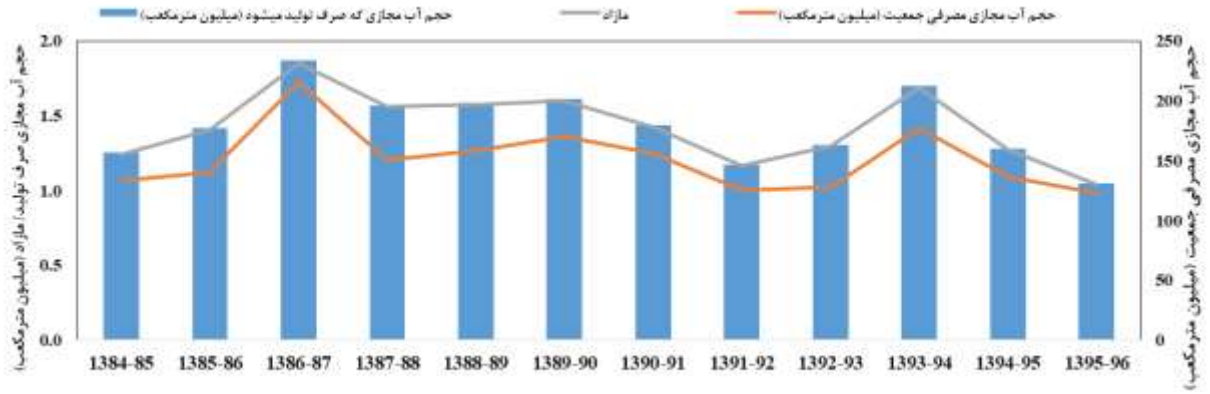
نتایج بررسی صادرات آب مجازی محصول مذکور در ایران نشان می‌دهد که روند صادرات بر حسب شرایط زمانی در نوسان است. بالاترین میزان صادرات گوجه در ایران مربوط به سال ۱۳۸۶-۸۷ با حدود ۲۴۸ هزار تن بوده و عمده صادرات محصول در سال مزبور به کشورهای افغانستان، امارات، روسیه، آذربایجان و عراق صورت گرفته است (قلی پور و محمد زاده، ۱۳۹۲).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه مشخص گردید که استان‌های قم، گیلان، کهگیلویه و بویر احمد، خراسان جنوبی و کرمان استان‌های پرمصرف آب هستند و استان‌های بوشهر، خوزستان، گلستان، مازندران و جنوب کرمان کم مصرف‌ترین استان‌ها و همچنین دارای بالاترین ارزش اقتصادی می‌باشند. استان‌های کهگیلویه و بویر احمد، خراسان جنوبی، کرمان، لرستان، ایلام، گیلان و کردستان دارای کمترین ارزش اقتصادی کشت گوجه‌فرنگی کشور را دارند. بالابودن ردپای آب سبب کاهش ارزش اقتصادی آب می‌گردد.

طی دوره مورد مطالعه میزان ردپای آب و سطح زیر کشت، کاهش یافته و عملکرد محصول افزایش یافته است. با توجه به دو دهه خشکسالی فراگیر در ایران بیشتر تولید گوجه فرنگی کشور ناشی از مصرف آب آبی و خاکستری از طریق استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی است ارزیابی این شاخص در مقیاس ملی و استانی و آگاهی

از سهم هر استان به لحاظ ردپای اکولوژیکی آب و بهره‌وری اقتصادی آب در تولید این محصول می‌تواند گام مهمی در جهت کشت پایدار گوجه فرنگی در ایران باشد.



شکل ٦- تغییرات بیلان آب مجازی در محصول گوجه فرنگی در ایران

منابع آب بویژه در مناطق مرکزی ایران بسیار محدود است، که نتیجه سیاست نادرست دولت در توسعه اراضی کشاورزی طی دو دهه گذشته بوده است. طی بیست سال گذشته، سیاست دولت ایران، خودکفایی تولید محصولات استراتژیک بوده و هیچگاه تولید، توسعه و یا توقف کشت و صادرات و واردات محصولات کشاورزی با دیدگاه آب مجازی، ردپای اقتصادی و ردپای اکولوژیکی آب نبوده است. اما اخیرا در برنامه ششم توسعه در دستور کار قرار گرفته است. لذا با توجه به این مقوله می‌توانیم با برنامه‌ریزی صحیح کشت محصولات کشاورزی، میزان دسترسی خود را به منابع آب جهانی افزایش دهیم.

نتیجه نهایی این پژوهش مشخص کرد با توجه به محدودیت آب و خاک در ایران، شاخص ردپای اکولوژیکی، میزان حجم آب مجازی و آگاهی از تجارت آب مجازی اطلاعات مفیدی را برای اولویت‌بندی کشت محصول در مناطق مستعد ارائه می‌نماید و در نهایت پیشنهاد می‌شود که دیدگاه حاضر جهت تخصیص منابع آب کشاورزی و سیاستگذاری توقف و یا توسعه کشت در مقیاس استانی و ملی واردگردد.

منابع

بذرافشان، ا.، و گرگانی نژاد مشیزی، ز. ۱۳۹۶. تحلیل تغییرات زمانی و مکانی آب مجازی در محصول گوجه فرنگی در استان هرمزگان تحت تغییر اقلیم. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع غذایی)، ۳۲(۱): ۴۳-۲۹.

بذرافشان، ا.، و گرگانی نژاد مشیزی، ز. ۱۳۹۸. ارزیابی کارایی مصرف آب و ردپای آب در محصول زعفران در ایران. نشریه زراعت و فناوری زعفران، ۷(۴): ۵۰۵-۵۱۹.

حسینی، ا.، مهرگان، ن. و ابراهیمی، م. ۱۳۹۵. تعیین الگوی کشت بهینه محصولات زراعی با تاکید بر پیشینه کردن منافع اجتماعی و واردات خالص آب مجازی (مطالعه موردی دشت بهار همدان). تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۸(۳): ۱۴۴-۱۲۳.

حاتمی، ع.، و نوربخش، س. ۱۳۹۷. بازسازی معنایی بحران آب در شرق اصفهان براساس نظریه‌ی زمینه‌ای. جامعه شناسی کاربردی، ۷۳ (۱) ۱۲۳-۱۴۲.

رمضانی اعتدالی، ه.، شکوهی، ع. و مجتبوی، ا. ۱۳۹۵. بهره‌گیری از مفهوم ردپای آب مجازی در تولید محصولات اصلی برای عبور از بحران آب منطقه قزوین. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۱(۲):۴۳۳-۴۲۲.

قلی‌پور، س. و محمدزاده، ر. ۱۳۹۲. بررسی بازار گوجه فرنگی در جهان و ایران و ارائه رهنمودهایی جهت کاهش تهدیدهای پیش روی آن در ایران. دو ماهنامه بررسی‌های بازرگانی، ۶۳ (۱۱): ۷۳-۶۰.

محسن زاده، ر.، و فکوهی، ن. ۱۳۹۸. بحران آب در سایه کشاورزی افزایی و کشاورزی زدایی کشور: تشریح ارتباط بحران آب در بخش کشاورزی و وابستگی به نفت در کشور، ۱۱(۱): ۲۶۷-۲۹۲.

محمودنیا میمند، م.، فارسی، م.، مرعشی، س.ح.، و عبادی، پ. ۱۳۹۱. بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیکی چهار گونه گوجه فرنگی به تنش خشکی . علوم باغبانی، ۲۶(۴): ۴۰۹-۴۱۶.

وحید، م.، و رنجبر، م. ۱۳۹۷. آسیب شناسی بعد سیاسی حکمرانی آب

در ایران(۱۳۹۲-۱۳۶۸). فصلنامه علمی _ پژوهشی سیاستگذاری عمومی، ۴: ۲۲۳-۲۰۳.

Ababaei, B., and Etedali, H.R. 2017. Water footprint assessment of main cereals in Iran. Agricultural Water Management 179: 401-411.

Bazrafshan, O., Etedali, H.R., Moshizi, Z.G.N., and Shamili, M. 2018. Virtual water trade and water footprint accounting of Saffron production in Iran. Agricultural Water Management 213: 368-374.

Bazrafshan, O., Zamani, H., Ramezanietedli, H., Moshizi, Z.G., Shamili, M., Ismaelpour, Y., and Gholami, H. 2020. Improving water management in date palms using economic value of water footprint and virtual water trade concepts in Iran. Agricultural Water Management 229: 105941.

Bazrafshan, O., Zamani, H., Etedali, H.R., and Dehghanpir, S. 2019. Assessment of citrus water footprint components and impact of climatic and non-climatic factors on them. Scientia Horticulturae 250: 344-351.

Golkar, F., Farahmand A., and Fardad H. 2008. Effect of irrigation water on yield and water use efficiency in tomato. Journal of Water Engineering 1: 13- 19.

Hoekstra, A.Y., and Chapagain. A.K. 2008. Globalization of water: Sharing the planets freshwater resources. Blakwell Publishing, Oxford, UK.

Hoekstra, A.Y., and Hung, P.Q. 2002. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value if the Water Research Report Series. No. 11, UNESCO-IHE, Delft.

Islamic, Republic Iran Meteorological Organization, 2016. WWW.IRIMO.ir

Jenkinson, D.S. 2001. The impact of humans on the nitrogen cycle, with focus on temperate arable agriculture. Plant and Soil 228. 1: 3-15.

Satatistical Center of Iran, 2016. WWW.amar.org

Obuobie, E., Gachanja, P.M., and Dorr, A.C. 2005. The Role of Green water in Food Trade. Term paper for the Interdixciplinary Course, International Doctoral Studies. Center of Development Research University of Bonn.

Zhang, C., McBean E.A., and Huang J. 2014.A Virtual Water Assessment Methodology for Cropping Pattern Investigation. Water Resource Management 28: 2331–2349.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2047-2059

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۵۹-۲۰۴۷

Assessing Spatio-temporal Changes of Ecological Water Footprint and Economic Value of Water in Tomato Production at Iran

M. Yahyazadeh Berentin[1], O. Bazarfshan[2]*, Y. Esmaelpour[3]
Recived: Sep.01, 2020 Accepted: Nov.01, 2020

Abstract

In this study, spatial and temporal changes of ecological footprint components and the economic value of virtual water of tomato crop have been estimated during the 2005 - 2017 in the producing provinces. The results showed that the average ecological footprint of water in the mentioned product is 327.2 m^3/ton, which is the share of green, blue and gray water footprint is 4.6%, 83.5% and 11.95, respectively. Bushehr province (86.8 m^3/ton) and Qom province (771.6 m^3/ton) have the lowest and highest water footprints in Iran, respectively. The highest share of green water footprint is related to Bushehr, Southern Kerman, Mazandaran and Hormozgan provinces while the highest share of blue water footprint is related to Lorestan, Kohgiluyeh, Boyer-Ahmad and Khorasan Razavi provinces. The average economic value of virtual water in Iran is 0.78 USD/m3, which is the highest (1.68 USD/m^3) and the lowest (0.29 USD/m^3) in Bushehr, Kohkiluyeh and Boyer-Ahmad, respectively. The average volume of virtual water for tomato production is 3925.99 MCM per annual, of which The share of Qom, Guilan and South Khorasan provinces in the export of virtual water is the highest. Finally, the results of this study showed that due to water and soil limitations in Iran, ecological footprint index, virtual water volume and awareness of virtual water trade provide useful information for prioritizing tomato cultivation in susceptible areas. Therefore, it is suggested that this concept be used for the allocation of agricultural water resources and policy to stop or develop cultivation at the provincial and national scale.

Keywords: Economic value of water footprint, Irrigated tomato, Virtual water, Water footprint

1- M.Sc. of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
2,3- Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Natural Resources and Agriculture, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
(*- Corresponding Author Email: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۷۴-۲۰۶۰

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2060-2074

مقاله پژوهشی

کاربرد مدل تراز انرژی برای پیش‌بینی تعرق و شرایط خرد اقلیم داخل گلخانه با استفاده از داده‌های هواشناسی

سید معین‌الدین رضوانی[۱]، حمید زارع ابیانه[۲*]، محسن گودرزی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۳۰

چکیده

در سال‌های اخیر افزایش جمعیت و محدودیت آب و زمین‌های قابل کشت در ایران به سرمایه‌گذاری قابل توجهی در تولیدهای گلخانه‌ای منجر شده است. با توجه به اثر شرایط خرد اقلیم گلخانه بر عملکرد کمی و کیفی محصول، استفاده از مدل‌های ریاضی برای مطالعه و شبیه‌سازی خرد اقلیم گلخانه ضروری است. هدف از این تحقیق کاربرد و تحلیل یک مدل تراز انرژی برای شبیه‌سازی تعرق و شرایط خرد اقلیم داخل گلخانه با استفاده از داده‌های هواشناسی خارج گلخانه است. مطالعه در گلخانه‌ای تجاری با پوشش پلاستیکی و مساحت ۴۳۳۳ مترمربع واقع در تویسرکان انجام شد. دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه با ۲۱ دیتالاگر ثبت شدند. برای داده‌های هواشناسی خارج گلخانه از ایستگاه هواشناسی نصب شده روی سقف گلخانه و داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک تویسرکان استفاده شد. برای تخمین دما، رطوبت نسبی و تعرق محصول داخل گلخانه از تلفیق معادلات تراز انرژی و تعرق استفاده شد. الگوی تغییرات زمانی مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده دما و رطوبت نسبی داخل گلخانه مشابه بود. خطای جذر میانگین مربعات دمای شبیه‌سازی شده برای تهویه مکانیکی و تهویه طبیعی به ترتیب در کل شبانه روز ۰/۷۲ و ۰/۶۷، روزانه ۰/۸۳ و۰/۷۷ و شبانه ۰/۴۹ و ۰/۴۹ درجه سلسیوس بود. خطای جذر میانگین مربعات رطوبت نسبی برای تهویه مکانیکی و طبیعی در کل شبانه روز ۴/۴، روزانه ۳/۰ و شبانه ۶/۰ درصد بود. پس از اصلاح مدل، شبیه‌سازی چهار روز خرد اقلیم داخل گلخانه نشان داد دمای داخل گلخانه در روز تا $35^{o}C$ و در شب به کمتر از $16^{o}C$ می‌رسد که در محدوده بهینه دمایی برای خیار گلخانه‌ای قرار ندارند. با توجه به دمای بالا ($35^{o}C$) و رطوبت پایین (۱۵٪ تا ۳۰٪) نیاز به سرمایش تبخیری در بعضی از ساعات روز وجود خواهد داشت. مجموع تعرق شبیه‌سازی شده نیز ۳۰/۲ میلی‌متر به دست آمد. پس از صحت‌یابی و اصلاح مدل، شرایط خرد اقلیم گلخانه در چهار روز شبیه‌سازی و تحلیل شد. نتایج نشان داد با استفاده از مدل تراز انرژی، قبل از احداث گلخانه می‌توان به برآوردی از شرایط خرد اقلیمی گلخانه و نیاز آبی محصول دست یافت.

واژه‌های کلیدی: تعرق، دما، رطوبت نسبی، شبیه‌سازی، کمبود فشار بخار

مقدمه

در استان همدان آب‌های زیرزمینی بیش از ۸۵ درصد منابع آب را تشکیل می‌دهند که عمدتاً در بخش کشاورزی مصرف می‌شوند (شرکت آب منطقه‌ای همدان، ۱۳۹۷). میزان تخلیه آب‌های زیرزمینی از ۲۴۹۰ میلیون متر مکعب در سال ۸۷-۱۳۸۶ به ۲۰۴۷ میلیون متر مکعب در سال ۹۵-۱۳۹۴ رسیده است که منجر به کاهش ۲۳/۴ درصد میزان مصرف آب زیرزمینی طی این مدت شده است. سطح اراضی قابل کشت آبی نیز طی سال‌های ۸۴-۱۳۸۳ تا ۹۶- ۱۳۹۵ با ۳۳ درصد کاهش از ۲۶۵۰۲۱ به ۱۷۷۹۰۳ هکتار رسیده است و نشان می‌دهد سالانه حدود ۷۰۰۰ هکتار از سطح اراضی قابل کشت آبی کاسته شده است. در سال‌های اخیر با توجه به افزایش جمعیت و محدودیت آب و زمین‌های قابل کشت در ایران، سرمایه‌گذاری قابل توجهی در تولیدهای گلخانه‌ای صورت گرفته است (خشخوی و همکاران، ۱۳۹۶؛ زارعی، ۱۳۹۶). در سال ۱۳۹۰، سطح گلخانه‌های سبزی و صیفی، توت فرنگی و گیاهان دارویی ایران ۵۹۴۶ هکتار بود که با رشد ۵۴/۱ درصدی در سال ۱۳۹۶ به ۹۱۶۴ هکتار رسید. در همین مدت سطح گلخانه‌ها در استان همدان از ۶۳/۶۵ هکتار با رشد ۲۷/۵۲ درصدی به ۸۱/۳ هکتار رسید. حدود ۵۵ درصد سطح زیرکشت گلخانه‌های استان همدان به خیار و پس از آن، ۱۵ درصد به گوجه‌فرنگی اختصاص دارد (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۷).

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
۳- دانشیار گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
(*- نویسنده مسئول: Email: zare@basu.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.19.0

گلخانه اکوسیستم پیچیده‌ای است که پدیده‌های فیزیکی مختلفی شامل: تعرق، میعان، تهویه، نشت و غیره در آن اتفاق می‌افتد. با توجه به اهمیت تاثیر شرایط خرد اقلیم گلخانه بر عملکرد کمی و کیفی محصول، مطالعات زیادی روی شرایط خرد اقلیم گلخانه و شبیه‌سازی آن صورت گرفته است. شرایط خرد اقلیم درون گلخانه برای هر فصل، با در نظر گرفتن تغییرات پیوسته شرایط خارجی گلخانه، محاسبه می‌شود. برای انجام بررسی دقیق خرد اقلیم داخل گلخانه، استفاده از مدل‌هایی بر پایه انتقال جرم و حرارت ضروری است. مدل‌های ریاضی بر پایه توازن جرم و انرژی، محیط گلخانه را همگن فرض می‌کنند و نتایج، میانگین متغیرهای خرد اقلیم را نشان می‌دهند (Roy et al., 2002). تنوع زیاد شرایط مرزی و عناصر طراحی، تحلیل خرد اقلیم گلخانه را کاری پیچیده می‌کند. برای مطالعه خرد اقلیم گلخانه، استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی برای لحاظ حداکثر شرایط، ضروری است. مهم‌ترین تکنیک‌های شبیه‌سازی در اغلب مطالعات، دینامیک سیالات محاسباتی[1] و تراز انرژی[2] می‌باشند. (Fatnassi et al., 2004؛ Wang et al., 2004؛ Boulard and Wang, 2000؛ Roy and Boulard, 2005؛ Sengar and Kothari, 2008؛ Kim et al., 2008؛ Kumar et al., 2010؛ Kichah et al., 2012؛ Ali et al., 2014؛ Chen et al., 2015؛ Ali et al., 2018). بررسی منابع نشان می‌دهد اغلب تحقیقات انجام شده در گلخانه‌های تحقیقاتی بوده است (Roy and Boulard, 2005؛ Kim et al., 2008؛ Ali et al., 2014؛ Kichah et al., 2012؛ Chen et al., 2015؛ Ali et al., 2018).

در تحقیقی با استفاده از داده‌های هواشناسی مادرید در یک گلخانه کوچک تحقیقاتی برای شبیه‌سازی شرایط محیط داخلی گلخانه از روش تراز انرژی، شرایط اقلیمی خارجی شامل سرعت باد، رطوبت‌نسبی ثابت، تشعشع خورشیدی و دما در نظر گرفته شد و تغییرات درجه حرارت، رطوبت و جریان حرارت در داخل گلخانه با شرایط تهویه، گرمایش در شب و درصد پوشش گیاهی، شبیه‌سازی شد (Kindelan, 1980). بولارد و ونگ در آوینیون فرانسه یک مدل تعرق گیاهی ساده گلخانه‌ای را با استفاده از تراز انرژی تشریح کردند که با متغیرهای اقلیمی پیرامونی گلخانه پیش‌بینی می‌شد. اعتبارسنجی این مدل تعرق، با استفاده از داده‌های آزمایشی اندازه‌گیری شده در کشت هیدروپونیک گوجه‌فرنگی وقتی دریچه‌های گلخانه باز بودند و شرایط اقلیمی اوائل بهار زمانی که گلخانه بسته و هوای داخلی کاملاً محدود شده بود، انجام شد. تخمین مدل از بهار به تابستان بهبود یافت و مقایسه آن با مدل‌های پیشین تعرق نشان داد، فرض اقلیم بیرونی به جای خرد اقلیم داخلی به عنوان شرط مرزی و در حالتی که گلخانه کاملاً بسته است، سبب محدود شدن کاربرد مدل تعرق می‌شود. این محدودیت ناشی از ساده‌سازی در طی استنتاج مدل بود و کاربرد آن زمانی رضایت بخش بود که هوای گلخانه کاملاً با شرایط خارجی هماهنگ باشد. این مدل علاوه بر تخمین تعرق، دما و رطوبت داخل گلخانه را نیز محاسبه کرد (Boulard and Wang, 2000). در مطالعه‌ای با استفاده از تراز انرژی، مدل تجربی جدیدی برای پیش‌بینی دمای کلی پوشش گیاهی بر اساس رگرسیون چندگانه خطی پیشنهاد شد. در این تحقیق حساسیت دمای پوشش گیاهی نشان داد، دمای هوا و تشعشع خورشیدی کلی داخل گلخانه که به راحتی و دقت قابل اندازه‌گیری هستند، بیشترین اثر را داشتند. مدل به‌دست آمده در یک هفته اندازه‌گیری، برآورد مناسبی از دمای برگ را نشان داد (Wang et al., 2004). فتناس‌سی و همکاران یک مدل خطی را بر اساس توازن حرارت و جرم محصول گلخانه‌ای، که اجازه محاسبه دما و رطوبت داخل گلخانه را هم زمان با دمای محصول می‌داد، توسعه دادند. این مدل برای محصول بدون تنش و کاملاً رشد یافته وقتی اختلاف دمای بین داخل و خارج گلخانه کم است، معتبر بود. مدل تابستان در یک گلخانه تونلی کلاسیک با تهویه طبیعی و با سطح بازشدگی کم (۶٪) و زیاد (۱۸٪) دریچه‌ها آزمایش شد. برای اعتبارسنجی مدل از اندازه‌گیری‌های هوای داخل گلخانه استفاده شد. نتایج نشان داد که این مدل، برای تخمین دقیقی از نرخ تهویه و تعرق تنها با استفاده ابزارهای ساده اندازه‌گیری مانند حسگرهای دما و رطوبت هوا قابل استفاده است (Fatnassi et al., 2004). سنگار و کوتاری در مطالعه‌ای در حالت ماندگار با تحلیل تراز انرژی و در نظر گرفتن ضرایب انتقال حرارت و جرم و داده‌های دمای پیرامونی، تشعشع خورشیدی و رطوبت برای یک روز زمستانی در ماه دسامبر و یک روز تابستانی در ماه می درجه حرارت خاک، گیاه، هوا و پوشش گلخانه را پیش‌بینی کردند. مقادیر برداشت شده و پیش‌بینی شده دمای گلخانه تقریباً با نوسانی بین $2^{\circ}C$ تا $3^{\circ}C$ مشابه بودند (Senegar and Kothari, 2008). باپتیستا و همکاران از معادلات تراز رطوبت و حرارت برای تحلیل گلخانه استفاده کردند. این مدل، درجه حرارت محصول را بسیار بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به ویژه طی روز شبیه‌سازی کرد که ناشی از تخمین غلط تبادل حرارت به‌وسیله تعرق بود. شبیه‌سازی ضعیف در شب نیز ناشی از خصوصیات فیزیکی غلط خاک بود. نتایج شبیه‌سازی رطوبت نسبی عموماً خوب نبود و مقدار خطا بزرگ‌تر از ۲۰٪ بود. این مدل، دمای هوای داخل و پوشش گلخانه را به طور مطلوبی پیش‌بینی کرد. پس از اصلاح مدل، شبیه‌سازی دمای هوا، محصول و پوشش گلخانه با مقادیر اندازه‌گیری شده، توافق خوبی پیدا کرد (Baptista et al., 2010). کومار و همکاران یک مدل دینامیکی ساده را برای پیش‌بینی دمای هوا، فشار

1- Computational Fluid Dynamics (CFD)

2- Energy Balance

بخار و دمای پوشش گیاهی توسعه دادند. مدل برای کشت گل ژربرا[1] در زمستان و تابستان اعتبارسنجی شد. توافق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده دما در زمستان و تابستان به ترتیب با RMES برابر ۰/۷۳°C و ۰/۸۷°C به‌دست آمد (Kumar et al., 2010). چن و همکاران مدلی ساده برای توصیف دمای داخل گلخانه بر پایه توازن انرژی و فرض ماندگاری شرایط حرارتی را با استفاده از داده‌های آزمایشی جمع‌آوری شده از شرایط مختلف اعتبارسنجی کردند. دقت نتایج پیش‌بینی مدل برای درجه حرارت حدود ۱/۵°C بود (Chen et al., 2011). سالارز مورنو و همکاران در تحقیقی در منطقه مرکزی مکزیک یک مدل تراز انرژی پویا را با هدف پیش‌بینی دمای هوا درون گلخانه‌ای ۱۲۰ مترمربعی با پوشش پلی‌اتیلن، تهویه طبیعی و کشت گوجه فرنگی استفاده نمودند. این مدل تعرق گیاه، تهویه و چگالش درون گلخانه، شرایط آب و هوایی خارج، ویژگی‌های محصول (شاخص سطح برگ، مقاومت روزنه‌ای و آیرودینامیکی)، خصوصیات پوشش و ویژگی‌های گلخانه را در نظر می‌گرفت. نتایج نشان داد مقدار متوسط خطای مطلق (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و کارایی مدل (EF) به ترتیب ۱/۸۶درجه سلسیوس، ۲/۲۵۶ و ۰/۶۵۷ به‌دست آمد. پس از کالیبره کردن مقدار کارایی مدل با افزایش ۳۳/۸۴ درصدی به ۰/۸۹ رسید. هر چند تعرق پیش‌بینی شده به مقادیر موجود در منابع نزدیک نبود ولی مدل به عنوان ابزاری برای تجزیه و تحلیل رفتار دما درون گلخانه کارایی داشت (Salazar-Moreno et al., 2019). علی و همکاران در مطالعه‌ای در تونس یک مدل تراز انرژی پویا را برای توصیف رفتار گرمایی داخل گلخانه به منظور پیش‌بینی تغییرات دمای هوای داخلی گلخانه طی ۹ روز در ماه مارس در دو گلخانه شفاف (سقف و بدنه پلیکسی گلاس[2] ۰/۰۰۳ متر) و عایق‌بندی شده (سقف پلیکسی‌گلاس ۰/۰۰۳ متر، بدنه پلیکسی‌گلاس ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶، مجهز به پرده‌های با نوارهای کوچک آلومینیومی که از غروب آفتاب در قسمت جنوبی مستقر می‌شدند) هرکدام به مساحت ۱۴/۸ مترمربع و کشت گوجه فرنگی اعتبارسنجی کردند. در هر دو گلخانه مقادیر مشابه خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و کارایی مدل (EF) به ترتیب ۰/۰۱ درجه سلسیوس و ۰/۹۹ به‌دست آمد. ضریب تعیین (R^2) در گلخانه عایق بندی شده (۰/۹۰) و در گلخانه شفاف (۰/۸۵) بود (Ali et al., 2020). رشید و همکاران پژوهشی را در یک گلخانه ۷۶۵۰ متر مربعی تیپ ونلو با سقف شیشه‌ای و دیواره‌های پلی‌کربنات مجهز به سایبان و پرده محافظ انرژی در کره جنوبی مدل ساده شده‌ای از تراز انرژی را بدون در نظر گرفتن تعرق با هدف شبیه‌سازی محیط حرارتی گذرا گلخانه ارائه دادند. آزمایشات در زمستان برای اعتبارسنجی مدل انجام و کارایی مدل ۰/۷۱ به‌دست آمد. در تابستان کارایی مدل ۰/۸۷ به‌دست آمد که همبستگی خوب بین مقادیر محاسبه شده و تجربی را نشان داد (Rasheed et al., 2020).

در مطالعات انجام شده برای تحلیل رژیم حرارتی و رطوبتی گلخانه با توجه به نیاز، صورتی از روش تراز انرژی با توجه به شرایط آب و هوایی پیرامونی، نوع سازه و پوشش گلخانه، نوع محصول، استفاده از تهویه طبیعی یا مصنوعی و احتساب تجهیزات سرمایشی و گرمایشی برای پیش‌بینی دما و رطوبت داخل گلخانه، تعرق و میزان تهویه، برآورد انرژی مورد نیاز برای گرمایش یا سرمایش یا اثر نوع پوشش گلخانه بر رژیم حرارتی آن استفاده شده است. تقریباً در تمامی مطالعات بررسی شده در این تحقیق، جزء مطالعه (Rasheed et al., 2020)، پژوهش‌های انجام شده در گلخانه‌های کوچک تحقیقاتی انجام شده است.

در این تحقیق هدف کاربرد مدل تراز انرژی برای شبیه‌سازی و تحلیل تعرق و شرایط خرد اقلیم گلخانه‌ای تجاری و بزرگ با استفاده از داده‌های هواشناسی خارج گلخانه است، به‌طوری که با استفاده از مدل تهیه شده قبل از احداث گلخانه بتوان به برآوردی از شرایط خرد اقلیم و میزان تعرق در گلخانه دست یافت.

مواد و روش‌ها

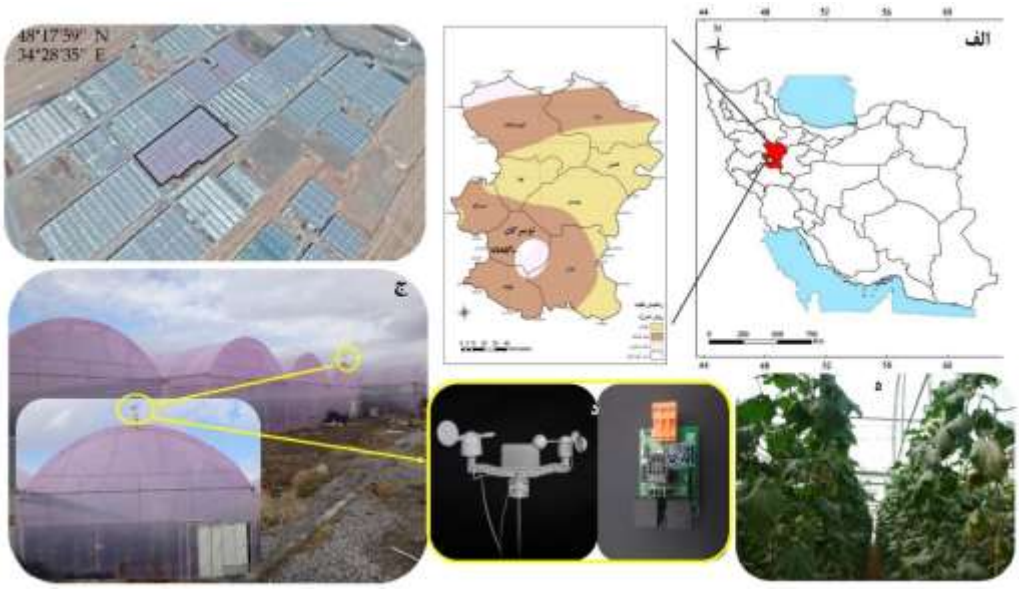
مشخصات گلخانه

گلخانه مورد مطالعه در شهرک گلخانه‌ای دهستان فرسفج واقع در شهرستان تویسرکان، استان همدان در طول ″۵۹ ′۱۷ °۴۸ شرقی و عرض ″۳۵ ′۲۸ °۳۴ شمال جغرافیای و ارتفاع m ۱۶۱۷ بود (شکل ۱ الف). گلخانه انتخاب شده، گلخانه‌ای تجاری، کوانست با دیوارهای جانبی و پوشش پلاستیکی ۲۰۰ میکرون که سقف آن یک لایه داخلی ۶۰ میکرونی اضافی نیز داشت، بود (شکل‌های ۱ ب و ۱ج و ۲). مساحت گلخانه ۴۳۳۳ متر مربع، دارای ۱۰ دهانه ۹ متری، ارتفاع تا ناودانی ۴ و تا سقف ۶/۵ متر بود. نیمی از گلخانه، مدتی بعد به گلخانه اولیه اضافه شده بود و عرض کلی دهانه‌ها با احتساب ۱/۵ متر فاصله بین دو قسمت قدیم و جدید ۹۱/۵ متر بود (شکل ۲). دو دریچه تهویه روی دیوارهای جانبی در سمت شرق و غرب و یک دریچه نیز در دیواره انتهایی (شمال) گلخانه قرار داشت. با هدف جلوگیری از تلفات انرژی ناشی از نشت یا تبادل با هوای خارج در فصل زمستان، تنها یک دریچه سقفی در محل اتصال قسمت قدیم و جدید وجود داشت. در بهار و تابستان روزها از تهویه مکانیکی با دمنده خروجی و شب‌ها از تهویه طبیعی استفاده می‌شد. در اندازه‌گیری، ۱۳۹۷/۰۳/۲۰ تعداد فن‌های خروجی نصب شده، ۹ عدد بود که از ساعت ۰۸:۳۰ تا ۲۰:۳۰ تهویه هوا را انجام می‌دادند. محصول کشت شده در گلخانه، خیار، رقم ناهید، بود که در مرحله رسیدگی میوه قرار داشت. دو ردیف

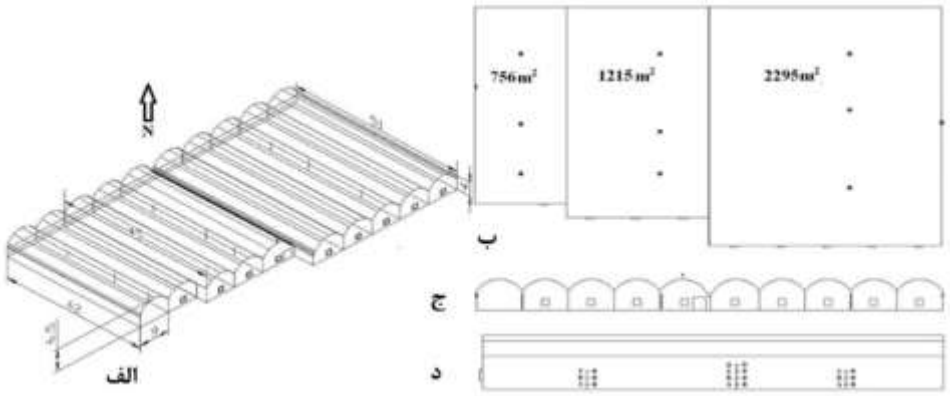
1 - *Gerbera jassemini*
2- Plexiglass

بوته روی پشته‌هایی با فاصله ۱۵۰ cm بـا آرایـش cm × ۳۶/۰ cm ۳۷/۰ کشت شده و متوسط ارتفاع پوشش گیاهی خیـار ۱۹۰cm بـود.

دوره کشت خیار نیز از نیمه دوم بهمن ماه تا اوایل مرداد ماه بود.



شکل ۱- گلخانه مورد مطالعه الف: موقعیت گلخانه در استان همدان؛ ب: موقعیت جغراقیایی گلخانه؛ ج: نمای بیرونی گلخانه و محل قرارگیری ایستگاه هواشناسی؛ د: ایستگاه هواشناسی و حسگرها؛ ه: ردیف‌های کشت خیار



شکل ۲- شماتیک گلخانه و ابعاد آن و محل قرار گیری دیتالاگرها، الف: شکل سه بعدی و ابعاد گلخانه؛ ب: نمای بالا دایره‌های سیاه محل قرار گیری حسگرها است؛ ج: نمای جلو؛ د: نمای جانبی

طراحی و ساخت دیتالاگر

برای ثبت و جمع‌آوری داده‌های دما و رطوبـت از محـیط گلخانـه ۲۱ دیتالاگر طراحـی و سـاخته شـد. در ایـن مطالعـه از میکروکنترلـر Atmega32a (Atmel, Taiwan) از خانواده AVR و ماژول حسگر دما و رطوبت نسبی SHT20 (SENSIRION, Switzerland) برای ساخت دیتالاگر استفاده شد. دقت حسگر دماسـنج ۰/۰۱°C و میـزان خطای اندازه‌گیری دمای آن ±۰/۳°C است. دقت رطوبت سـنج ایـن حسگر نیز ۰/۰۴ درصد و میزان خطای اندازه‌گیری رطوبت نسـبی ۳± درصد است. آی سی ساعت، DS1307 [1] بود و از آن بـرای شـمارش ساعت، دقیقه، ثانیه، روز، مـاه و سـال اسـتفاده شـد. بـرای دیتـالاگر برنامه‌ای با استفاده از کامپایلر Code VisionAVR به زبان C نوشته و پس از کامپایل کردن، فایل اجرایی در حافظه فلـش[2] میکروکنترلـر بارگذاری شد.

1- Dallas Semiconductor Integrated Maxim
2- Flash

نصب ایستگاه هواشناسی

یک ایستگاه هواشناسی روی سقف گلخانه در ارتفاع ۷/۵ متری از سطح زمین نصب شد. تجهیزات ایستگاه هواشناسی APRS شامل حسگر دما و رطوبت نسبی (SENSIRION, SHT10 Switzerland) به‌ترتیب با دقت دما و رطوبت نسبی ۰/۵ °C و ٪ ۴/۵ ، فشار هوا BMP180 (BOSCH, Germany) با دقت ۰/۱۲ hPa، سرعت باد با دقت ۰/۱ m/s، میزان بارش با دقت ۰/۱ mm و جهت باد بود. اندازه‌گیری هر دو ثانیه یک بار انجام و داده‌های ایستگاه هواشناسی روی یک میکرو SD ثبت می‌شد (شکل‌های ۱ج و ۱د).

اندازه‌گیری تشعشع

برای اندازه‌گیری تشعشع در مرکز گلخانه یک لوکس‌متر مدل YK-2005LX با دامنه کاری صفر تا ۱۰۰۰۰۰ Lux در بالای پوشش گیاهی نصب شد که توانایی ثبت شدت نور ورودی به داخل گلخانه را در دقیقه داشت. برای تبدیل لوکس به شدت تشعشع بر حسب وات بر مترمربع از ضریب تبدیل ۶۸۳/۲ استفاده شد (Ryer, 1998). تشعشع خارج گلخانه از ایستگاه سینوپتیک تویسرکان واقع در ۱۴ کیلومتری شمال گلخانه تهیه شد که با توجه صاف و بی ابر بودن آسمان در روز اندازه‌گیری، میزان تشعشع رسیده به سطح گلخانه را می‌توان برابر با تشعشع در ایستگاه سینوپتیک فرض کرد.

محل نصب دیتالاگرها

گلخانه در محور طولی به سه بخش تقسیم شد و دیتالاگرها در وسط یک سوم اول، دوم و سوم به صورت عرضی در سه نقطه (دو نقطه جانبی و محور وسط گلخانه) در دو ارتفاع ۱۴۰ و ۲۲۰ سانتی‌متری از سطح زمین نصب شدند (شکل ۲). در کنار دو دریچه جانبی و دریچه انتهایی، دیتالاگر نصب شد. دریچه‌های جانبی و انتهایی به طور دائم باز بودند و دریچه سقفی وسط گلخانه پس از خاموش شدن فن‌ها، باز می‌شد. در هر ثانیه دما و رطوبت نسبی اندازه‌گیری و روی میکرو SD ذخیره می‌شدند. پس از اتمام اندازه‌گیری، میانگین دقیقه‌ای و ساعتی دما و رطوبت نسبی به‌دست آمد.

استنتاج معادلات تراز انرژی

برای استنتاج معادلاتی که با استفاده از معادله تراز انرژی و شرایط مرزی پیرامونی گلخانه بتوان دما، رطوبت هوا ، دمای گیاه و تعرق داخل گلخانه را تخمین زد، از تلفیق معادله تراز انرژی و تعرق (Boulard and Wang, 2000 ؛ Boulard A. and Baille, 1993؛ Fatnassi et al.,2004؛ Kumar et al., 2010؛ Bauri and Ganguly, 2013) استفاده شد. معادله تراز انرژی به شکل زیر است:

$$\mu G_o - (K_s - K_c)\Delta T - K_L \Delta e - Q_m = 0 \qquad (۱)$$

که در آن G_o تشعشع خورشیدی خارج گلخانه بر حسب $W\ m^{-2}$، μ کارایی حرارتی خورشیدی گلخانه، K_s و K_L به ترتیب ضرایب انتقال گرمای محسوس و نهان به $W^{-2}\ K^{-1}$ و $W\ m^{-2}\ Pa^{-1}$، ΔT تفاوت دمای بین هوای داخل و خارج گلخانه به °K، Δe تفاوت فشار بخار بین هوای داخل و خارج گلخانه به Pa، Q_m جمله ذخیره حرارت، K_C ضریب انتقال حرارت کلی بین داخل و خارج گلخانه به $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ است.

تعرق گیاهی از رابطه زیر محاسبه شد (Fatnassi et al.,2004):

$$\lambda E = \frac{\rho C_p LAI}{\gamma}\left(\frac{e_f^* - e_i}{r_s + r_a}\right) \qquad (۲)$$

که در آن λ گرمای نهان بخار آب $۲/۴۵\times۱۰^{۶}\ J\ kg^{-1}$، E تعرق از پوشش گیاهی، e_f^* فشار بخار آب اشباع در دمای برگ $kg\ m^{-3}$، ρ دانسیته هوا $kg\ m^{-2}s^{-1}$، c_p حرارت ویژه هوا در فشار ثابت $J\ kg^{-1}K^{-1}$، e_i فشار بخار آب داخل گلخانه Pa، LAI شاخص سطح برگ و γ ثابت سایکرومتری $Pa\ K^{-1}$، r_a مقاومت آئرودینامیکی به $s\ m^{-1}$، r_s مقاومت روزنه‌ای به $s\ m^{-1}$.

اختلاف بین فشار بخار آب اشباع در دمای برگ و فشار بخار آب هوای داخل گلخانه را می‌توان با استفاده از رابطه ۳ تخمین زد.

$$e_f^* - e_i = \delta(T_i)\Delta T_f + D_i \qquad (۳)$$

که در آن $\delta(Ti)$ شیب منحنی فشار بخار اشباع در دمای T_i به $Pa\ K^{-1}$، ΔT_f اختلاف دمای بین هوای داخل گلخانه و پوشش گیاهی و D_i کمبود فشار بخار هوای داخل گلخانه به Pa است. با بسط معادله (۳) (Boulard A. and Baille, 1993؛ Boulard and Wang, 2000؛ Fatnassi et al.,2004) و تلفیق آن با معادلات (۱) و (۲) یک سیستم معادله خطی به شکل زیر به‌دست می‌آید (Boulard and Baille, 1993 ؛ Boulard and Wang, 2000؛ Fatnassi et al.,2004؛ Bauri and Ganguly, 2013):

(۴)

$$\begin{cases} (K_s + K_c)\Delta T + K_L \Delta e = \mu G_o - Q_m \\ [\delta(T_i) - \delta(T_o)]\Delta T + \left[\frac{\gamma(r_s - r_a)}{\rho c_p LAI} K_L + 1\right]\Delta e - \delta(T_i)\Delta T_{fo} = D_o \\ \frac{\rho C_p LAI}{r_a}\Delta T - K_L \Delta e - \frac{\rho C_p LAI}{r_a}\Delta T_{fo} = -R_n \end{cases}$$

با معلوم بودن متغیرهای مربوط به خصوصیات گلخانه (μ, K_C)، محصول (LAI, r_a, r_s) و شرایط مرزی اقلیم خارج گلخانه (G_o, T_o, D_o) و حل آن می‌توان ΔT، Δe و ΔT_{fo} به‌دست آورد.

در روابط (۱)، (۲)، (۳) و (۴) متغیرهای مورد نیاز به شرح زیر تخمین زده شدند (Boulard A. and Baille, 1993 ؛ Boulard and Wang, 2000؛ Fatnassi et al.,2004؛ Kumar et al., 2010 ؛ Bauri and Ganguly, 2013):

$$r_a = 305\left(\frac{d_v}{U_i}\right)^{0.5} \quad (۵)$$

$$d_v = \sqrt{LA} \quad (۶)$$

LA متوسط سطح هر برگ m^{-2}، d_v مشخصه طول برگ m، U_i متوسط سرعت هوای داخل گلخانه $m\ s^{-1}$.

$$U_i = \frac{\phi_v}{V_g^{2/3}} \quad (۷)$$

ϕ_v نرخ تهویه $m^3\ s^{-1}$ (Fatnassi et al., 2004)، V_g حجم گلخانه m^3.

$$K_s = \frac{\rho C_p \phi_v}{A_g} \quad (۸)$$

A_g سطح زمین گلخانه به m^2.

$$K_L = \frac{\lambda \xi \rho \phi_v}{A_g} \quad (۹)$$

ξ فاکتور تبدیل بین محتوی بخار آب هوا در دمای استاندارد و فشار بخار آب هوا $kg_w\ kg_a^{-1}\ Pa^{-1}$ ۱۰$^{-۶}$×۶/۲۵.

$$K_c = A + BU_o \quad (۱۰)$$

A و B بستگی به نسبت شکل گلخانه و خصوصیات پوشش گلخانه دارند و برای پوشش تک لایه گلخانه به‌ترتیب مقادیر ۶ و ۰/۵ و برای گلخانه با پوشش دو لایه به‌ترتیب مقادیر ۴ و ۰/۲ دارند (Boulard and Baille, 1993؛ Fatnassi et al., 2004).

$$r_s = 200\left(1 + \frac{1}{exp(0.05(\mu G_0 - 50))}\right) \quad (۱۱)$$

r_s مقاومت روزنه‌ای به $s\ m^{-1}$.

این شکل از روش تراز انرژی وقتی تهویه انجام می‌شود و تفاوت بین دمای داخل و خارج گلخانه کم است، استفاده می‌شود (Boulard and Wang, 2000؛ Fatnassi et al., 2004؛ Bauri and Ganguly, 2013).

تخمین تعرق با معادله استانگلینی[1]

استانگلینی معادله پنمن مانتیث را برای کاربرد در شرایط گلخانه که سرعت باد کمتر از یک متر بر ثانیه است و ساختار فضایی پوشش گیاهی حالت ایستاده دارد به شکل زیر اصلاح نمود (Prenger et al., 2002; Donatelli et al., 2006; Fazlil-Ilahil, 2009؛ زارعی و همکاران، ۱۳۹۷؛ رضوانی و همکاران، ۱۳۹۸):

$$ET_\circ = 2\ LAI\ \frac{1}{\lambda}\ \frac{s\,(R_n - G) + K_t \frac{VPD\,\rho\,C_p}{r_R}}{s + \gamma\ (1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (۱۲)$$

که در آن؛ ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر در ساعت، λ = گرمای نهان تبخیر به $MJ\ kg^{-1}$، R_n = تشعشع خالص روزانه یا ساعتی به $MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$ یا $MJ\ m^{-2}\ h^{-1}$، C_p = حرارت ویژه هوا به $MJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$، K_t = 3600 ضریب تبدیل به $s\ h^{-1}$ برای R_n تشعشع خالص روزانه یا ساعتی به $MJ\ m^{-2}\ h^{-1}$ = ρ چگالی هوای متوسط $kg\ m^{-3}$، γ = ثابت سایکرومتریک به $kPa\ ^\circ C^{-1}$، r_a مقاومت آئرودینامیکی به $s\ m^{-1}$، r_c مقاومت پوشش گیاهی به $s\ m^{-1}$، r_R مقاومت تابشی به $s\ m^{-1}$، LAI= شاخص سطح برگ به $m^2\ m^{-2}$.

برنامه حل معادلات تراز انرژی و محاسبه تعرق به روش استانگلینی در صفحه گسترده اکسل با استفاده از ویژوال بیسیک کد نویسی شد.

روش تحلیل آماری

برای تحلیل آماری دقت مدل از مقدار متوسط خطای مطلق (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) رابطه خطی بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده استفاده شد. همچنین کارایی مدل($EF^۲$) به شکل زیر به دست آمد (Salazar-Moreno et al., 2019; Ali et al., 2020; Rasheed et al., 2020):

$$EF = 1 - \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (۱۳)$$

اگر مدل کامل باشد، مقادیر پیش‌بینی شده برابر با مشاهدات یا مقادیر اندازه‌گیری شده ($y_i = \hat{y}_i$) و کارایی مدل یک خواهد بود. بر عکس، وقتی قسمت دوم سمت راست معادله ۱۳ برابر با یک شود، به معنی برابری مقدار پیش‌بینی شده با میانگین است و در نتیجه EF = 0 خواهد شد که نشان دهنده خوب نبودن مدل است. اگر EF <0 باشد، به معنی آن است که مقادیر پیش‌بینی شده تخمین خوبی نسبت به امید ریاضی نیست.

شاخص سطح و مشخصه طولی برگ

برای تخمین مساحت برگ خیار، تعداد ۵۱ برگ با اندازه‌های مختلف انتخاب و با اندازه‌گیری طول و عرض برگ و مساحت آنها رابطه زیر، برای محاسبه سطح یک برگ به‌دست آمد:

$$A = 0.7775(W \times L) + 0.0003 \quad r^2 = 0.9916 \quad F = 578.87^{***} \quad (۱۴)$$

W و L به ترتیب طول و عرض برگ به متر است. سپس برای تخمین شاخص سطح و مشخصه طولی برگ از ۶ نقطه در سطح گلخانه (یک سوم اول، دوم و سوم) در هر نقطه دو بوته و در مجموع ۱۲ بوته انتخاب و طول و عرض برگ آنها اندازه‌گیری و شاخص سطح و مشخصه طولی برگ خیار به ترتیب برابر با ۳/۳۵ مترمربع بر متر مربع و ۰/۱۶ متر به دست آمدند.

حدود شرایط دما و رطوبت کشت خیار

حدود شرایط خرد اقلیم خیار گلخانه‌ای شامل دامنه دمایی مطلوب روز ۲۵–۲۰°C؛ دمای شب ۱۸–۱۶°C؛ دمای حداکثر ۳۸–۴۰°C؛ دمای حداقل ۱۳–۱۵°C (Ponce et al., 2015; Gruda et al.,

1- Stanghellini

2- Model Efficiency

2017) و رطوبت نسبی مناسب ٪۷۰ تا ٪۹۰ است (Ponce et al., 2015). شرایط رطوبتی گلخانه با رطوبت نسبی یا کمبود فشار بخار[1] بیان می‌شود (Baptita, 2007; Castilla, 2013) ولی کمبود فشار بخار نه تنها وضعیت رطوبتی گلخانه را بهتر نشان می‌دهد (Konopaki et al., 2018; Shamshiri et al., 2018) بلکه به طور موثری نشان‌گر خرد اقلیم گلخانه نیز است (Prenger and Ling, 2001) دامنه کمبود فشار بخار برای محصول: ۰/۲> نامطلوب، صدمه به گیاه و کاهش محصول؛ ۰/۴۳-۰/۲۰ رشد بیماری‌های قارچی؛ ۱/۰-۰/۴۳ دامنه مطلوب برای رشد گیاه ؛ ۱/۰> تنش آبی و کاهش رشد گیاه، تقسیم‌بندی می‌شود (Prenger and Ling, 2001; Konopaki et al., 2018; Shamshiri et al., 2018). هم‌چنین حد بالایی کمبود فشار بخار در زمستان ۱/۱ kPa و در تابستان ۲/۷ kPa گزارش شده است (Castilla, 2013).

نتایج و بحث

برای شبیه‌سازی، اندازه‌گیری‌های روز ۱۳۹۷/۰۳/۲۰ در نظر گرفته شد که هم تهویه در گلخانه انجام می‌شد و هم اختلاف بین دمای خارج و داخل گلخانه کم و به طور متوسط ۱/۱±۹/۰۱C بود.

تخمین دمای داخل گلخانه

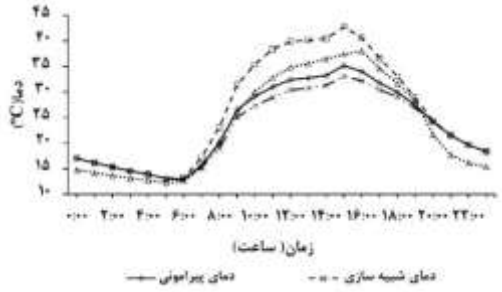
دمای داخل گلخانه، در صورت کارکرد فن‌ها و نیز بدون آنها شبیه‌سازی شد (شکل‌های ۳ و ۴ الف). برای تخمین دمای هوا با استفاده از تهویه مکانیکی، میزان خروج انرژی گرمایی از گلخانه با استفاده از تفاوت دمای داخل و خارج گلخانه و در نظر گرفتن بده حجمی خروجی از گلخانه تخمین زده و از انرژی کل ورودی به گلخانه کم شد. ولی تفاوت چندانی بین مقادیر تخمین زده شده با استفاده از تهویه طبیعی و مکانیکی مشاهده نشد. علت اصلی را می‌توان به معادلات تراز انرژی استفاده شده، نسبت داد که در واقع بر مبنای تهویه طبیعی عمل می‌کنند و کارکرد فن‌های مکنده را نیز به صورت تهویه طبیعی بیشتر، در نظر می‌گیرد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت تهویه مکانیکی به تنهایی قادر به کنترل دمای گلخانه نیست. با توجه به این که نتایج، در تهویه مکانیکی و طبیعی مشابه است فقط رابطه رگرسیونی داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده تهویه مکانیکی برای تحلیل آورده شده است.

رابطه رگرسیونی خطی با شیب ۱/۱ توافق خوب بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را نشان داد (شکل ۴ ب). این رابطه مشخص کرد با وجود الگوی مشابه داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، مقادیر شبیه‌سازی شده برآوردی بالاتر از مقدار اندازه‌گیری شده داشتند. مقدار متوسط خطای مطلق (MAE) برای تهویه مکانیکی در کل شبانه روز ۳/۱، روزانه ۳/۶ و شبانه ۲/۲ درجه سلسیوس و برای تهویه طبیعی درکل شبانه روز، ۲/۹، روزانه ۳/۳ و شبانه ۲/۲ درجه سلسیوس بود. نمودارهای ۳ و ۴ نشان می‌دهند، تقریباً در تمام ساعات شبانه روز، دما بالاتر از مقدار واقعی، تخمین زده شده است. البته در شب که از تهویه طبیعی استفاده می‌شد، تخمین‌های مقدار دما، خطای کمتری داشت. خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای تهویه مکانیکی در کل شبانه روز ۰/۷۲، روزانه ۰/۸۳ و شبانه ۰/۴۹ درجه سلسیوس و برای تهویه طبیعی در کل شبانه روز ۰/۶۷، روزانه ۰/۷۷ و شبانه ۰/۴۹ درجه سلسیوس است که از خطای جذر میانگین مربعات به دست آمده در تحقیق (Kumar et al., 2010) با همین مدل و مدل استفاده شده توسط (Salazar-Moreno et al., 2019) کمتر اما از مقدار به‌دست آمده توسط (Ali et al., 2020) بزرگتر است. کارایی مدل در تخمین دما برای تهویه مکانیکی و طبیعی به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۸۸ به‌دست آمد که با مطالعه (Rasheed et al., 2020) در گلخانه با وسعت ۷۶۵۰ متر مربعی برابر است. کارایی مدل در مطالعه حاضر با وجود وسعت بیشتر گلخانه، تقریباً برابر مقدار به‌دست آمده در تحقیق (Salazar-Moreno et al., 2019) ولی از مقدار به‌دست آمده در تحقیق (Ben Ali et al., 2020) کوچک‌تر است. در شب به علت عدم استفاده از فن‌هاب مکنده، مقدار خطا در هر دو حالت یکسان است. به‌دلیل وجود آسمان صاف و آرام در طول شب، تلفات تشعشی از گلخانه به آسمان بیشتر از مقدار ورودی به آن است و پدیده وارونگی حرارتی اتفاق می‌افتد که سبب می‌شود مقدار دمای داخل گلخانه کمتر از محیط پیرامونی شده (شکل ۳ و ۴ب) و تهویه مختل شود (Castilla, 2013). در ساعت ۱۶:۰۰ دمای محیط پیرامونی ۳۴°C و دمای اندازه‌گیری و تخمین زده شده داخل گلخانه به‌ترتیب ۳۷/۴°C و ۴۰/۶°C است. پیش‌بینی دمای گلخانه بر پایه دمای پیرامونی در این شبیه‌سازی قابل قبول و با نتایج (Boulard and Baille, 1993) قابل مقایسه و از نتایج (Kumar et al., 2010) دقیق‌تر است.

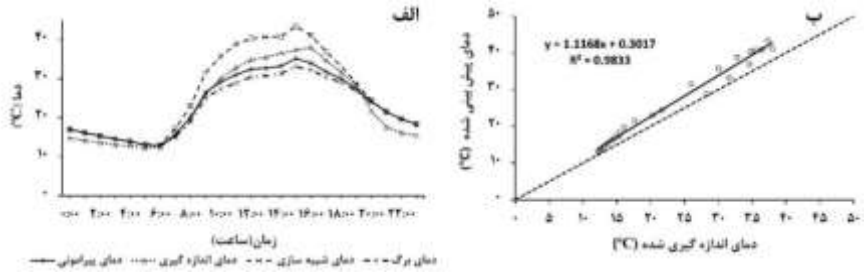
تخمین رطوبت نسبی داخل گلخانه

مقادیر شبیه‌سازی شده رطوبت نسبی، کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود (شکل ۵). در روز مقدار تفاوت مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده کمتر از شب است. مقدار متوسط خطای مطلق (MAE) رطوبت نسبی شبانه روز ۱۹/۹، روزانه ۱۴/۳ و شبانه ۲۹/۰ درصد بود. در مدل تراز انرژی ارائه شده توسط (Baptista et al., 2010)، خطای تخمین رطوبت نسبی در شب بیشتر از روز و به‌طور کلی بالای ۲۰٪ بود که از خطای مطالعه حاضر بالاتر است. خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای تهویه مکانیکی و طبیعی در کل شبانه روز ۴/۴، روزانه ۳/۰ و شبانه ۶/۰ است.

1- Vapour Pressure Deficit (VPD)



شکل ۳- دمای پیرامونی گلخانه، دمای اندازه گیری شده، شبیه‌سازی شده داخل گلخانه و دمای برگ در تاریخ با تهویه طبیعی



شکل ٤- الف: دمای پیرامونی گلخانه، دمای اندازه گیری و شبیه‌سازی شده داخل گلخانه و دمای برگ با تهویه مکانیکی ب: رابطه خطی بین دمای هوای اندازه گیری و شبیه‌سازی شده

کارایی مدل برای شبیه‌سازی رطوبت نسبی در شبانه روز ۰/۳۷ به‌دست آمد که نیاز به اصلاح را نشان می‌داد. بر اساس مقادیر شبیه‌سازی شده در روز مقدار کارایی مدل ۰/۶۷ و در شب تقریباً صفر بود. تفاوت بیشتر مقادیر رطوبت نسبی اندازه‌گیری و تخمین زده شده در شب، به علت وارونگی حرارتی است که سبب کاهش اثر تهویه طبیعی و افزایش رطوبت در گلخانه می‌شود (Castilla, 2013). از طرفی برآورد کم مقدار تعرق بر تخمین مقدار رطوبت داخل گلخانه تاثیرگذار بوده است. رابطه خطی بین مقادیر شبیه‌سازی و تخمین زده شده (شکل ۵ب)، نشان داد مقادیر تخمین زده شده برآوردی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، دارند. هر چند ضریب همبستگی بالا، تشابه روند تغییرات مقادیر شبیه‌سازی و تخمین زده شده در طی شبانه روز را نشان می‌دهد (شکل ۵ب). نتایج نشان داد، مقدار رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده در شب، تخمین مناسبی از رطوبت نسبی نیست که با نتایج (Boulard and Baille, 1993) توافق ندارد و علت آن هم مختل شدن تهویه به دلیل وارونگی حرارتی است. فنتاس‌سی و همکاران و ونگ و بولارد در تحقیقات خود به وجود خطا در شبیه‌سازی هنگامی که تهویه انجام نمی‌شد، اشاره نموده‌اند (Boulard and Wang, 2000; Fatnassi et al.,2004). ولی در روز دامنه اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده کمتر است. در صورت عدم وجود پدیده وارونگی حرارتی در شب نتایج شبیه‌سازی رطوبت نسبی قابل بود. ولی می‌توان گفت نتایج شبیه‌سازی رطوبت نسبی در طول روز، تخمین مناسبی از این متغیر است. برای بررسی اثر وارنگی حرارتی با استفاده از رابطه رگرسیونی زیر بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده مقدار رطوبت نسبی اصلاح شد.

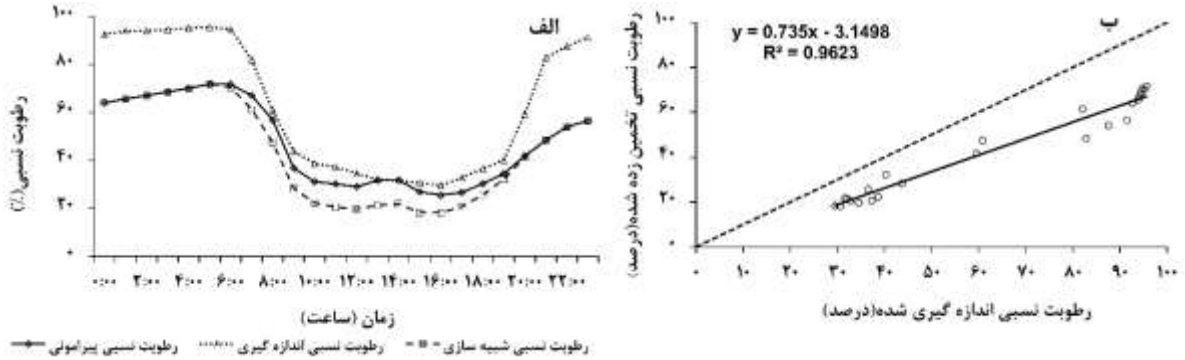
$$RHsim_{adj} = 1.309 \times RHsim + 6.5 \qquad (۱۵)$$

$$r^2=0.962 \quad F=561.406^{***}$$

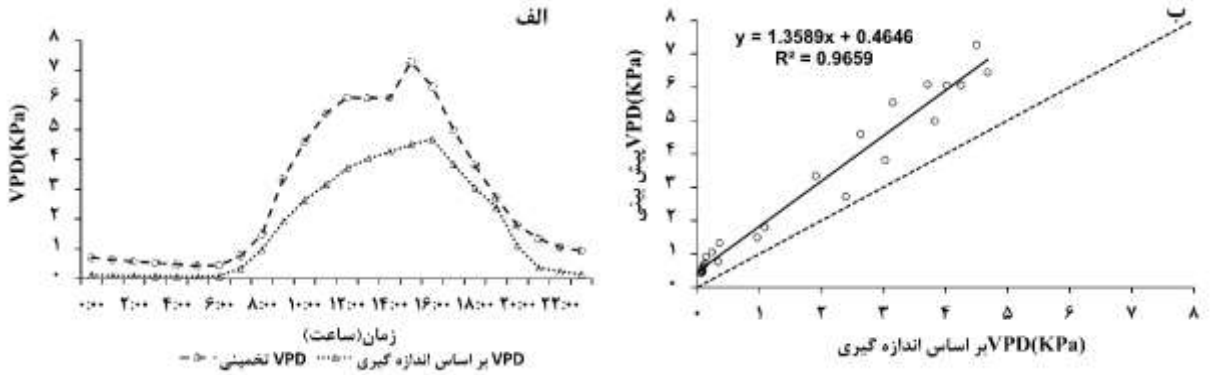
پس از اصلاح مقدار متوسط خطای مطلق (MAE) رطوبت نسبی شبانه روز ۴/۰، روزانه ۳/۲ و شبانه ۵/۳ درصد و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای تهویه مکانیکی و طبیعی در کل شبانه روز ۱/۱، روزانه ۰/۸ و شبانه ۱/۴ به دست آمد. کارایی مدل در شبانه روز، روزانه و شبانه به ترتیب ۰/۹۶، ۰/۹۸ و ۰/۹۴ به دست آمد.

تخمین VPD

کمبود فشار بخار با داده‌های شبیه‌سازی شده، مقادیر بالاتری از داده‌های اندازه‌گیری شده داخل گلخانه داشتند، هر چند الگوی تغییرات آنها روند یکسانی را نشان داد (شکل ۶ الف و ب). دلیل مقدار بالاتر VPD تخمینی، برآورد بالاتر دما و پایین‌تر رطوبت نسبی تخمین زده شده با روش تراز انرژی است. ضریب همبستگی بالا رابطه خطی بین مقادیر کمبود فشار بخار حاصل از داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، الگوی مشابه تغییرات این مقادیر را نشان می‌دهد (شکل ۶ ب). با وجود ضریب همبستگی بالا، پراکنش داده‌ها حول خط برازش یافته، نشان از تفاوت مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده دارد.



شکل ۵- الف: رطوبت نسبی پیرامونی گلخانه، اندازه‌گیری و تخمین زده شده داخل گلخانه با تهویه مکانیکی، ب: رابطه خطی بین رطوبت نسبی اندازه‌گیری و تخمین زده شده



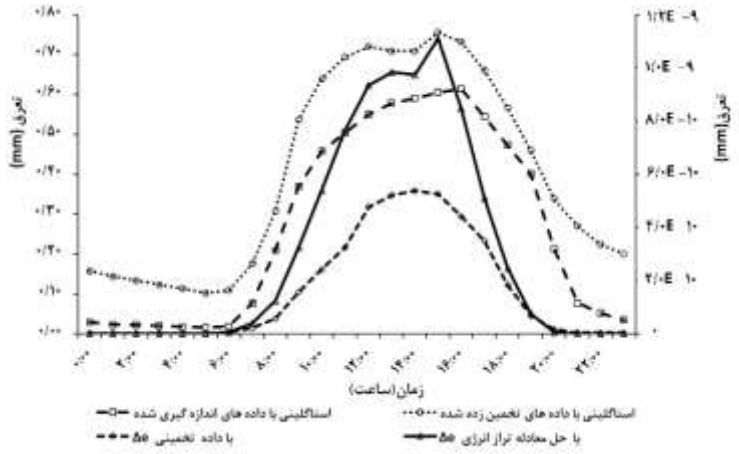
شکل ٦- الف: تغییرات VPD تخمینی و محاسبه شده با داده‌های اندازه‌گیری شده، ب: رابطه خطی بین VPD محاسبه شده با داده‌های اندازه‌گیری و تخمین زده شده داخل گلخانه

تخمین دما برگ

نتایج نشان داد، در طول روز، برگ دمایی کمتر از دمای هوای گلخانه داشت (شکل‌های ۳ و ۴ الف) که با نتایج فنتاس‌سی و همکاران (۲۰۰۴) همخوانی دارد. در شب دمای برگ، برابر دمای هوای تخمین زده شده بود اما از دمای هوای اندازه‌گیری شده بیشتر بود. این شرایط نشان می‌داد در روز امکان میعان رطوبت روی برگ‌ها وجود داشته است.

تخمین تعرق داخل گلخانه

تعرق را می‌توان به سه روش محاسبه کرد، روش اول با رابطه $K_L\Delta e$ که از تفاوت بین فشار بخار آب، هوای داخل و خارج گلخانه (Δe) استفاده می‌شود و از حل معادلات تراز انرژی به‌دست می‌آید. روش دوم، به جای تفاوت بین فشار بخار آب، هوای داخل و خارج گلخانه، از مقادیر تخمین زده شده فشار بخار آب در دمای شبیه‌سازی شده به روش تراز انرژی در داخل گلخانه و فشار بخار اشباع گلخانه استفاده شد. در حالت سوم، می‌توان با قرار دادن دما و رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده در رابطه تعرق پنمن مانتیث اصلاح شده برای گلخانه توسط استانگلینی، تعرق را محاسبه کرد. در روش اول، مقدار تعرق بسیار کم تخمین زده می‌شود (شکل۷) که علت برآورد کم رطوبت داخل گلخانه را می‌توان به آن نسبت داد. در روش دوم، مقدار مجموع تعرق ۲۴ ساعته ۲/۶ میلی‌متر به دست آمد. مقدار تعرق با استفاده از کاربرد دما و رطوبت نسبی شبیه‌سازی شده در معادله استانگلینی ۱۰/۲ میلی‌متر محاسبه شد. در صورت استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده داخل گلخانه، مقدار تجمعی تعرق ۲۴ ساعته ۶/۵ میلی‌متر به دست می‌آید. استفاده مستقیم از حل معادله انرژی با داده‌های اقلیمی خارج گلخانه، تخمین درستی از تعرق داخل گلخانه نمی‌دهد که با نتایج بولارد و ونگ (Boulard and Wang, 2000) همخوانی ندارد اما با تحقیق سالارز مورنو و همکاران (Salazar-Moreno et al., 2019) همخوانی دارد. در مطالعه فنتاس‌سی و همکاران (Fatnassi et al.,2004) با وجود تعرق در عنوان مقاله، داده‌ای برای مقایسه یا برآوردی از تعرق در مطالعه ایشان موجود نیست که بتوان با تحقیق حاضر مقایسه شود.

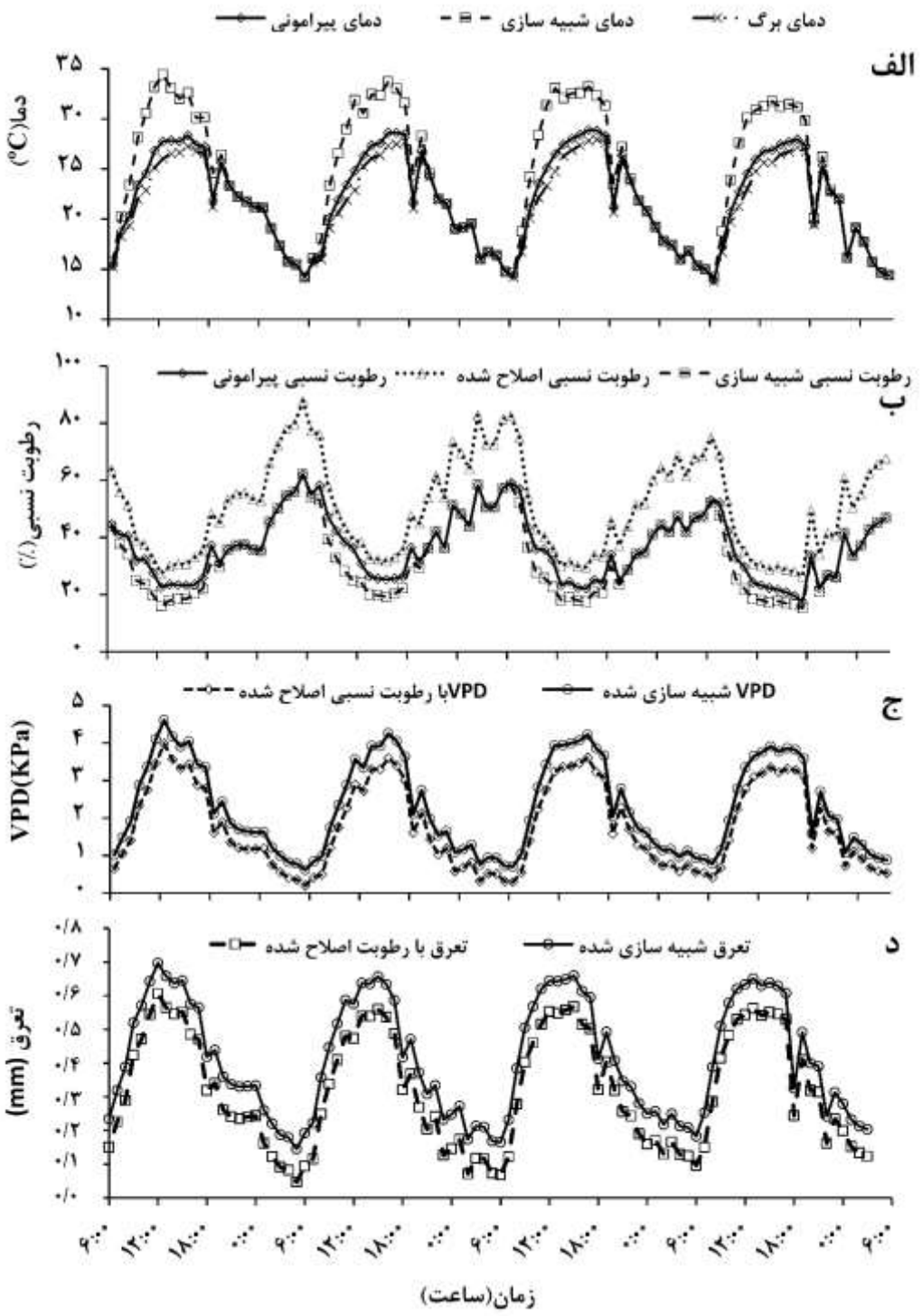


شکل ۷- تخمین تعرق در گلخانه با روش‌های مختلف در گلخانه

در این مطالعه مساحت گلخانه ۴۳۳۳ مترمربع و در تحقیق (Boulard and Wang, 2000)، (Fatnassi et al.,2004)، (Salazar-Moreno et al., 2019) و (Ali et al., 2020) به‌ترتیب ۲۰۸، ۳۸۶ ، ۱۲۰ و ۱۴/۸ متر مربع بود. مطمئناً اندازه گلخانه بر غیر یکنواختی و در نتیجه دقت مدل تاثیر گذار است. هر چه گلخانه کوچک‌تر باشد، بیشتر متاثر از شرایط محیط پیرامونی است و از طرفی محیط همگن‌تری داشته که به فرضیات استفاده از مدل تراز انرژی نزدیک‌تر است.

شبیه‌سازی ۱۳۹۷/۰۶/۱۹ تا ۱۳۹۷/۰۶/۲۲

از مدل تهیه شده برای شبیه‌سازی خرد اقلیم و تعرق داخل گلخانه به مدت چهار شبانه روز از تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۱۹ تا ۱۳۹۷/۰۶/۲۲ با استفاده از آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک تویسرکان استفاده شد (شکل۸). آمارهای استفاده شده شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تشعشع به فاصله‌های زمانی ۵ دقیقه ثبت شده بودند که برای شبیه‌سازی متوسط ساعتی آنها به دست آمد. تغییرات دما (شکل ۸ الف) نشان داد، دمای داخل گلخانه تا $35^{\circ}C$ افزایش یافت که خارج از دامنه مطلوب دمایی ($25^{\circ}C$ –$20^{\circ}C$) برای رشد خیار گلخانه‌ای در روز است. در شب نیز دما به کمتر از $16^{\circ}C$ رسید که در محدوده بهینه دمایی ($18^{\circ}C$ –$16^{\circ}C$) برای خیار گلخانه‌ای قرار ندارد (Gruda et al., 2017). نتایج مدل نشان داد در صورتی که پدیده وارونگی حرارتی در شب وجود نداشت، رطوبت نسبی گلخانه به کمتر از ۶۰ درصد می‌رسید (شکل ۸ ب). مقادیر اصلاح شده رطوبت نسبی نشان دادند در صورت وقوع پدیده وارونگی حرارتی، مقدار رطوبت نسبی گلخانه، شب‌ها به حدود ۹۰ درصد هم می‌رسد. دامنه مقدار رطوبت نسبی مناسب برای خیار گلخانه‌ای ٪۷۰ تا ٪۹۰ است (Ponce et al., 2015) که شبیه‌سازی نشان داد مقداری که در گلخانه اتفاق خواهد افتاد بدون در نظر گرفتن وارنگی حرارتی در شب و روز کمتر از این مقدار است. با لحاظ کردن وارونگی حرارتی مقدار رطوبت در شب به حدود مطلوب کشت خیار گلخانه‌ای رسید (شکل ۸ ج). هر چند با بررسی کمبود فشار بخار (شکل ۸ ج) مشاهد شد، در حالی‌که در روز محصول دچار تنش خشکی خواهد شد (VPD>۱/۰) در شب در صورت عدم وجود وارونگی حرارتی مقدار VPD در حدود مناسب محصول و در دامنه ۰/۶ kPa تا ۰/۸ kPa قرار می‌گیرد. ولی با لحاظ کردن وارونگی حرارتی شرایط برای توسعه بیماری‌های قارچی (۰/۴۱< VPD <۰/۲) مهیا می‌شود. تعرق با استفاده از داده‌های تخمین زده شده دما و رطوبت نسبی و رابطه استانگلینی تخمین زده شد. همانگونه که از رابطه (۱۲) و شکل‌های ۸ ج و ۸ د مشاهده می‌شود مقدار و الگوی تغییرات تعرق متاثر از تغییرات و مقدار کمبود فشار بخار است. برای بررسی اثر وارونگی حرارتی و افزایش رطوبت گلخانه در طول شب بر مقدار تعرق شبیه-سازی شده، با مقدار رطوبت نسبی اصلاح شده نیز مقدار تعرق تخمین زده شد. مجموع تعرق شبیه‌سازی شده در مدت مورد بررسی، ۳۹/۱ میلی‌متر و با در نظر گرفتن افزایش رطوبت نسبی، ۳۰/۲ میلی‌متر به دست آمد که کاهش ۲۳ درصدی در مقدار تعرق را نشان می‌دهد. کاهش تعرق نیز به دلیل کاهش مقدار کمبود فشار بخار ناشی از افزایش رطوبت محیط است. کمبود فشار بخار در بیشتر ساعات روز بالاتر از ۲kPa بود و درساعاتی به بالاتر از ۴ نیز رسید ولی کاهشی در مقدار تعرق به دلیل خشکی زیاد و بسته شده روزنه‌ها مشاهد نشد (شکل‌های ۸ ج و ۸ د) که با نتیجه (Montero et al., 2001) مبنی بر کاهش نیافتن مقاومت پوشش گیاهی (در واقع مقاومت روزنه‌ای) از کمبود فشار بخار ۱/۴ kPa تا ۳/۴ kPa همخوانی دارد.



شکل ۸- شبیه‌سازی الف: تغییرات دما، ب: تغییرات رطوبت نسبی، ج: تغییرات کمبود فشار بخار، د: تغییرات تعرق در گلخانه از تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۱۹ تا ۱۳۹۷/۰۶/۲۲

شکل ۸ نشان داد الگوی تغییرات متغیرهای خرد اقلیمی ۲۴ ساعته در روزهای مختلف تقریباً ثابت است و در نتیجه حتی با شبیه‌سازی روزهای معدودی که توزیع خوبی در طول فصل کشت داشته باشند، می‌توان نیاز آبی محصول و شرایط خرد اقلیم داخل گلخانه را تخمین زد. با توجه به دمای بالا ($35^{\circ}C$) و رطوبت پایین (۱۵٪ تا ۳۰٪) در طی روز نیاز به سرمایش تبخیری در بعضی از ساعات روز وجود دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل تراز انرژی برای تخمین میزان تعرق و سایر متغیرهای خرد اقلیم داخل گلخانه با استفاده از داده‌های هواشناسی خارج گلخانه استفاده شد. الگوی تغییرات ۲۴ ساعته مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده دما، رطوبت نسبی و کمبود فشار بخار داخل گلخانه مشابه بود. نتایج نشان داد تفاوت دمای شبیه‌سازی شده با متغیرهای اقلیمی خارج گلخانه با مقادیر اندازه‌گیری شده داخل کم و در نتیجه نتایج شبیه‌سازی قابل قبول بود به طوری که کارایی مدل در تخمین دما به طور متوسط ۰/۸۷ به‌دست آمد . تفاوت رطوبت نسبی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده به علت وارونگی حرارتی و مختل شدن تهویه طبیعی و افزایش شدید رطوبت گلخانه در شب بود. نتایج نشان داد مقادیر شبیه‌سازی شده دما و رطوبت نسبی به‌ترتیب برآوردی بالاتر و پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده داشتند. که سبب بالاتر بودن کمبود فشار بخار نسبی شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر حاصل از اندازه‌گیری بود. کارایی مدل برای شبیه‌سازی رطوبت نسبی ۰/۳۷ بود که با اصلاح مدل، کارایی مدل برای شبیه‌سازی رطوبت نسبی به ۰/۹۶ رسید. شبیه‌سازی ۲۴ ساعته تعرق نشان داد، مدل به تنهایی برآورد خوبی از تعرق نمی‌دهد ولی با استفاده هم‌زمان مدل تراز انرژی و رابطه تعرق استانگلینی می‌توان به مقادیر قابل قبولی رسید. شبیه‌سازی یک دوره چهار روزه نشان داد، مدل تراز انرژی در تلفیق با مدل تعرق استانگلینی با استفاده از داده‌های هواشناسی، می‌تواند به پیش‌بینی و تحلیل شرایط خرد اقلیم و تعرق داخل گلخانه‌ای با تهویه طبیعی قبل از احداث آن کمک کند. اصلاح مدل تراز انرژی برای هنگامی که تهویه ضعیف است یا پدیده وارونگی حرارتی رخ می‌دهد، می‌تواند دامنه کاربرد آن را افزایش دهد. همچنین هماهنگ شدن این مدل با مدل رشد محصول توانایی پیش‌بینی مقدار عملکرد را قبل از احداث گلخانه به دست می‌دهد.

منابع

رضوانی، س.م.، زارع ابیانه، ح.، و گودرزی، م. ۱۳۹۸. توزیع تعرق و کمبود فشار بخار در گلخانه‌ی تجاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. (۵) ۱۳. ۱۲۰۳-۱۱۹۱.

زارعی، ق. ۱۳۹۶. چالش‌های سازه‌های گلخانه‌ها در ایران. مجله پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۲ (۲): ۱۶۲-۱۴۹.

زارعی، ق.، سالمی، ح.ر.، رضوانی، س.، و اسفندیاری، ص. ۱۳۹۷. تعیین نیاز آبی خیار گلخانه‌ای در سطح کشور. گزارش نهایی پژوهشی. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره ثبت ۵۴۲۴۷.

شرکت آب منطقه‌ای همدان. ۱۳۹۷. سیمای آب در استان همدان.

خوشخوی،م.، مبلی، م.، عزیزی، م.، وحدتی، ک.، گریگوریان، و.، و تفضلی، ع. ۱۳۹۶. بررسی مسائل و مشکلات گلخانه‌ها و فرآورده‌های گلخانه‌ای در ایران. گزارش نهایی پژوهشی. فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران.

وزارت جهاد کشاورزی. عملکرد گلخانه‌های کشور طی سال‌های ۹۳-۱۳۹۰. ۱۳۹۴. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، تهران.

وزارت جهاد کشاورزی. گزارش اطلاعات سطح، تولید و عملکرد در هکتار محصولات باغبانی کل کشور در سال ۱۳۹۶. ۱۳۹۷. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات، تهران.

Ali, B.H., Bournet, P.E., Danjou, V., Morille, B., and Migeon, C. 2014. CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties. Biosystems Engineering 127: 159–175.

Ali, B.H., Bournet, P.E., Cannavo, P., and Chantoiseau, E. 2018. Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction. Computers and Electronics in Agriculture 149: 26–40.

Ali, B.R., Bouadila, S., and Mami, A. 2020. Experimental validation of the dynamic thermal behavior of two types of agricultural greenhouses in the Mediterranean context. Renewable Energy 147: 118-129.

Baptista, F.J., Bailey, B.J., Meneses, J.F., and Gracia, L. M.N. 2010. Greenhouses climate modelling: tests, adaptation and validation of a dynamic climate model. Spanish Journal of Agricultural Research 2: 285-298.

Bauri, B., and Ganguly, A. 2013. Effect of crop transpiration on the microclimate of a naturally

of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. Biosystems Engineering 100(2): 245–255.

Kindelan, M. 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. Transactions of the ASAE, 23(5): 1232-1239.

Kumar, K.S., Jha, M.K., Tiwari, K.N., and Singh, A. 2010. Modeling and evaluation of greenhouse for floriculture in subtropics. Energy and Buildings 42:1075-1083.

Grange, R.L., and Hand, D.W. 1987. A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. Journal of Horticultural Science 62: 125–134.

Kindelan, M. 1980. A dynamic modeling of greenhouse environment. Transactions of the ASAE. 23(5): 1232-1239.

Konopacki, P.J., Treder, W., and Klamkowski, K. 2018. Comparison of vapour pressure deficit patterns during cucumber cultivation in a traditional high PE tunnel greenhouse and a tunnel greenhouse equipped with a heat accumulator. Spanish Journal of Agricultural Research 16 (1): 201.

Montero J.I., Antóna, A., Muñoza, P., and Lorenzo, P. 2001. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses. Agricultural and Forest Meteorology107:323-332.

Prenger, J.J., and Ling, P.P. 2001. Greenhouse Condensation Control Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD). Fact Sheet AEX-804. The Ohio state University. Wooster OH. 4.

Prenger, J.J., Fynn, R.P., and Hansen, R.C. 2002. A comparison of four evapotranspiration models in greenhouse environment. Transactions of the ASAE 45: 1779–1788.

Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., and Maccleery, B. 2015. Greenhouse design and control. 1st ed. The Netherlands: CRC Press.

Rasheed, A., Kwak, C.S., Na, W.H., Lee, J.W., Kim, H.T., and Lee, H.W. 2020. Development of a Building Energy Simulation Model for Control of Multi-Span Greenhouse Microclimate. Agronomy 10(9): 1236.

Roy, J.C., Boulard, T., Kittas, C., and Wang, S. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. Biosystems Engineering 83: 1-20.

Roy, J.C., and Boulard, T. 2005. CFD predictions of the natural ventilation in a tunnel type greenhouse: influence of wind direction and sensitivity to turbulence models. Acta Horticulturae 691: 457–

ventilated greenhouse. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 3(3): 337-343.

Boulard, A., and Baille, T. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. Agricultural and Forest Meteorology 65: 145-157.

Boulard, T., and Wang, S. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. Agricultural and Forest Meteorology. 100(1): 25–34.

Castilla, N. 2013. Greenhouse technology and management. 2nd ed. CABI.

Chen, C., Shen, T., and Weng, Y. 2011. Simple model to study the effect of temperature on the greenhouse with shading nets. African Journal of Biotechnology, 10(25): pp.5001-5014.

Chen, J., Xu F., Tan, D., Shen, Z., Zhang, L.B., and Ai, Q.L. 2015. A control method for agricultural greenhouses heating based on computational fluid dynamics and energy prediction model. Appl Energy 141:61–8.

Donatelli, M., Bellocchi, G., and Carlini, L. 2006. Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration. European Journal of Agronomy 24: 186–192.

Fazlil-Ilahil, W.F. 2009. Evapotranspiration models in greenhouse. MSc, Wageningen agricultural University. Wageningen. Netherlands.

Fatnassi, H., Boulard, T., and Lagier, J. 2004. Simple indirect estimation of ventilation and crop transpiration rates in a greenhouse. Biosystems Engineering 88(4): 467–478.

Gruda, N., Sallaku, G. and Balliu, A. 2017. PART III: CROP TECHNOLOGIES: 2. Cucumber. In: Baudoin, W., Nersisyan, A., Shamilov, A., Hodder, A., Gutierrez, D., De Pascale, S., Nicola, S., Urban, L., Tany, J., and Duffy, R. (editors). Good agricultural practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries : Principles for sustainable intensification of smallholder farms .FAO plant production and protection paper 230. Rome. Italy. Food and agricultural organization of the United Nations. 287-299.

Kichah, A., Bournet, P.E., Migeon, C., and Boulard, T. 2012. Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. Biosystems Engineering 112(1): 22–34.

Kim, K., Yoon, J.Y., Kwon, H.J., Han, J.-H., Eek Son, J., Nam, S.W., and Lee, I.B. 2008. 3-D CFD analysis

464.

Ryer, A. 1998. Light Measurement handbook. Newburyport, MA: International Light. 64.

Salazar-Moreno, R., López-Cruz, I.L., and Sánchez Cruz, A.C. 2019. Dynamic energy balance model in a greenhouse with tomato cultivation: simulation, calibration and evaluation. Revista Chapingo. Serie horticultura 25(1): 45-60.

Sengar, S.H., and Kothari, S. 2008. Thermal modeling and performance evaluation of arch shape greenhouse for nursery raising. African Journal of Mathematics and Computer Science Research 1(1): 001-009.

Shamshiri, R., Jones, J., Thorp, K.R., Ahmad, D., Man, H.C., and Taheri S. 2018. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. International Agrophysics 32: 287-302.

Wang, S., Deltour, J., and Smith, L.J. 2004. Leaf Temperature Modeling of Greenhouse Grown Tomato. International Agricultural Engineering Journal 13(1and 2): 64-70.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2060-2074

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۷۴-۲۰۶۰

Application of the Energy Balance Model to Predict Transpiration and Microclimate Conditions inside the Greenhouse Using Meteorological Data

S.M. Rezvani[1], H. Zare Abyane[2*], M. Goodarzi[3]
Recived: Aug.29, 2020 Accepted: Oct.21, 2020

Abstract

In recent years, increasing population and limited water and arable land in Iran have led to significant investment in greenhouse production. Due to the effect of greenhouse microclimate conditions on the quantitative and qualitative yield of the product, the use of mathematical models to study and microclimate simulation of the greenhouse is necessary. The objective of this research is to apply and analyze an energy balance model using meteorological data outside the greenhouse to simulate microclimate conditions and the transpiration in a greenhouse. The study was conducted in a commercial greenhouse with plastic cover and an area of 4333 square meters. Temperature and relative humidity data were collected inside the greenhouse with 21 data loggers. For collected meteorological data outside the greenhouse, the meteorological station installed on the roof of the greenhouse and the data of the Tuyserkan synoptic meteorological station were used. A combination of energy balance and transpiration equation was used to estimate temperature, relative humidity and crop transpiration inside the greenhouse. Estimated transpiration was modified by combining the energy balance model and the Stanghellini transpiration equation. The pattern of temporal variation of the simulated and measured values of temperature and relative humidity inside the greenhouse was similar. The root mean square error of the simulated temperature for mechanical ventilation and natural ventilation was 0.72 and 0.67, 0.83 and 0.77 daily, and 0.49 and 0.49 degrees Celsius, respectively, for the daytime and night time. The root mean square error of relative humidity for mechanical and natural ventilation was 4.4% day and night, 3.0% for daytime, and 6.0% for night time. After modifying the simulation model, four days of microclimate inside the greenhouse showed that the temperature inside the greenhouse reaches 35 °C during the day and less than 16 °C at night, which are not in the optimal temperature range for greenhouse cucumbers. Due to high temperature (35ºC) and low humidity (15% to 30%), evaporative cooling will be required at some hours of the day. The total simulated transpiration was 30.2 mm. The estimated temperature was acceptable, but the estimated relative humidity at night differed from the measured values due to thermal inversion. Estimated transpiration was modified by combining the energy balance model and the Stanghellini transpiration equation. After verifying and modifying the model, the microclimate conditions of the greenhouse were simulated and analyzed for four days. The results showed that by using the energy level model before the construction of the greenhouse, it is possible to estimate the microclimate conditions of the greenhouse and the water requirement of the crop.

Keywords: Relative humidity, Simulation, Temperature, Transpiration, Vapor pressure deficit

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2- Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
3- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
(*- Corresponding Author Email: zare@basu.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۸۸-۲۰۷۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2075-2088

مقاله پژوهشی

تعیین عملکرد، کارایی مصرف آب و شبیه‌سازی تاج‌پوشش گیاه کاهو در دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی با مدل AquaCrop

محمود سبزیان[۱*]، علی رحیمی خوب[۲]، محمود مشعل[۳]، ساسان علی نیایی فرد[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۳۰

چکیده

سال‌های اخیر توجه زیادی به کشت بدون خاک یا هیدروپونیک در آب و محلول غذایی در گلخانه‌ها شده است. هدف از انجام این تحقیق مقایسه پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده کاهو بین دو کشت خاکی و هیدروپونیک و همچنین ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه کاهو در دو محیط کشت هیدروپونیک و کشت خاکی است. پارامتر بهره‌وری برای شبیه‌سازی رشد گیاه در مدل آکواکراپ استفاده می‌شود. آزمایش‌های دو کشت فوق به‌طور هم‌زمان طی دو دوره کشت در گلخانه تحقیقاتی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران انجام شد. داده‌های کشت اول برای واسنجی پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده و داده‌های کشت دوم برای صحت سنجی استفاده شدند. نتایج نشان داد که پارامتر فوق در دو کشت خاکی و هیدروپونیک متفاوت است و به ترتیب برابر ۱۴/۳ و ۱۵/۸ گرم بر مترمربع برای این دو نوع کشت می‌باشد. مدل آکواکراپ با استفاده از این مقادیر برای دوره دوم کشت اجرا شد و مقدار زیست‌توده در طی دوره رشد شبیه‌سازی شد و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. نتایج آماری نشان داد که مدل آکواکراپ با استفاده از مقادیر واسنجی شده بهره‌وری آب نرمال شده با دقت مناسبی عملکرد گیاه کاهو را طی دوره رشد شبیه‌سازی می‌کند. کارایی مصرف آب نیز در هر دو دوره کشت برای دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد کارایی مصرف آب در کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی بیشتر می‌باشد و مدل نیز قابلیت خوبی در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب در هر دو محیط کشت دارد. همچنین مقدار تاج پوشش برای هر دو محیط کشت، در هر دو دوره کشت اندازه‌گیری و توسط مدل شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که مدل برای هر دو محیط کشت، مقدار تاج‌پوشش را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نتیجه گرفته شد، نوع محیط کشت بر عملکرد کاهو تأثیر دارد و عملکرد و کارایی مصرف آب در کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی بیشتر است و مدل آکواکراپ نیز دارای دقت نسبتاً بالایی در شبیه‌سازی عملکرد ، کارایی مصرف آب و همچنین شبیه‌سازی تاج پوشش برای گیاه کاهو است.

واژه‌های کلیدی: کارایی مصرف آب، کاهو، کشت هیدروپونیک، کشت خاکی، عملکرد، مدل آکواکراپ، گلخانه

مقدمه

آب به‌عنوان محدودکننده‌ترین عامل در تولید محصولات کشاورزی نقش مهمی در تأمین غذای جمعیت کشور به عهده دارد. حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی در مقایسه با حجم آب تجدیدپذیر برابر ۵۰ درصد است، که رقم قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد (ناصری و همکاران، ۱۳۹۶). تلاش‌های پژوهشگران تاکنون عمدتاً برافزایش تولید در واحد سطح معطوف بوده، درصورتی‌که در شرایط محدودیت منابع آب (شرایط حاکم بر اکثر مناطق ایران) هدف اصلی بایستی بیشتر متمرکز بر بالا بردن تولید به ازای واحد آب مصرفی و استفاده بهینه از این منابع باشد (English et al., 1990). نیاز روزافزون به محصولات کشاورزی هم‌زمان با چالش‌هایی درزمینهٔ کمبود آب، انرژی و خاک حاصلخیز کشاورزی، لزوم توجه به اصلاح الگوی کشت را بیش‌ازپیش نمایان ساخته است. در این راستا، توجه به فن‌آوری نوین در کشاورزی که امکان تولید حداکثر محصول با حداقل مصرف آب، انرژی و سایر نهاده‌ها و با حداقل وابستگی به شرایط آب و هوایی فصلی و اقلیمی را فراهم آورد، بسیار حائز اهمیت است. توجه به روش‌های کشت متراکم مثل کشت گلخانه‌ای که سرآمد آن‌ها کشت به روش هیدروپونیک است، برای

۱- دانشجوی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی،پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
۴- استادیار گروه علوم باغبانی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: sabzian73@ut.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.23.4

نیل به این اهداف ضروری به نظر می‌رسد (ساعدی و همکاران، ۱۳۹۶). روش هیدروپونیک که اخیراً در کشت تجاری و صنعتی مورد استقبال قرارگرفته، به معنای کشت در محیط بدون خاک یا کشت در محیط دارای محلول‌های غذایی می‌باشد. از فواید سیستم‌های هیدروپونیک امکان تولید محصول بدون استفاده از آفت‌کش است. این محصولات عاری از باقیمانده سموم هستند و ازلحاظ کیفیت و سلامت در سطح بالایی قرار دارند (Verdonck and Demeyer, 2004). در سیستم هیدروپونیک امکان بررسی و کنترل دقیق بیماری‌ها و آفات وجود داشته و مشکل بیماری‌های خاکزاد به کمترین مقدار کاهش خواهد یافت. بنابراین با استفاده از سیستم کشت هیدروپونیک می‌توان از صرف هزینه و وقت زیاد برای ضدعفونی کردن خاک و فراهم کردن شرایط مناسب رشد، اجتناب نمود (Cantliffe et al., 2007). بررسی‌ها حاکی از آن است که در کشت‌های گلخانه‌ای با مصرف ۱۰ تا ۱۵ هزار مترمکعب آب در هکتار، عملکرد به چند صد تن می‌رسد درحالی‌که در شرایط مزرعه برای عملکرد برابر یک‌دهم آن حدود ۱۸ هزار مترمکعب آب نیاز است (شاکر و حسین نیا، ۱۳۹۵). این مسئله بیانگر کارایی بیشتر مصرف آب در شرایط کشت کنترل‌شده می‌باشد. هدف از افزایش کارایی مصرف آب در کشاورزی، افزایش عملکرد به ازای واحد حجم آب مصرفی است. بنابراین برای افزایش عملکرد علاوه بر تغییر الگوی کشت از محیط روباز به کشت‌های گلخانه‌ای به‌ویژه کشت هیدروپونیک، راهکار دیگر پیش‌بینی برآورد عملکرد طی سناریوهای مختلف آبیاری تحت شرایط محدودیت منابع آب با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عملکرد می‌باشد تا بتوان شرایطی را فراهم کرد که در کشت خاکی نیز حداکثر عملکرد را داشته باشیم. تعیین عملکرد گیاه به کمک آزمایش‌های مزرعه‌ای و تحت سناریوهای مختلف آبیاری کاری پرزحمت، زمان‌بر و پرهزینه است. از طرفی مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی از ابزارهای بسیار مهم در مطالعه و طراحی روش‌های مدیریتی و نیز پیش‌بینی عملکرد گیاه هستند که می‌توانند اهداف ذکرشده را تحقق بخشند (وطن‌خواه و همکاران، ۱۳۹۴). مدل‌های شبیه‌ساز عملکرد محصول متعددی مانند SOYMOD، CERES، SOYGRO، APSIM و CROPSYST وجود دارند که در سطح جهان تحقیقاتی روی آن‌ها انجام‌شده‌اند (Jones et al., 2003; Keating et al., 2003, Stöckle et al., 2003). این مدل‌ها اغلب مستلزم مهارت زیاد کاربر در واسنجی آن‌ها است و نیاز به پارامترهای ورودی و تغییرپذیر زیادی دارند که بعضاً اندازه‌گیری آن‌ها سخت بوده و یا برای دامنه وسیعی از گونه‌های زراعی و مکان‌های مختلف دنیا، غیرقابل دسترسی هستند (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹).

سازمان خواروبار جهانی (فائو)، طی بازنگری نشریه شماره ۳۳، مدلی به نام آکواکراپ[1] را برای شبیه‌سازی عملکرد محصول نسبت به آب مصرفی ارائه کرد (Steduto et al., 2009). مدل آکواکراپ در مقایسه با دیگر مدل‌های شبیه‌سازی گیاه ذکرشده در بالا، از پارامترهای کمتری استفاده می‌کند و در آن سعی شده که تعادلی بین دقت، سادگی و سهولت برای کاربران برقرار شود (Hsiao et al., 2009). این مدل یک ابزار قدرتمند و باارزش برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب است (Steduto et al., 2009). پژوهش‌های زیادی در داخل و خارج از کشور برای بررسی دقت مدل آکواکراپ انجام‌شده‌اند. مثلاً مطالعه‌ای جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل آکواکراپ برای محصول جو در منطقه پاکدشت انجام شد. در این پژوهش مدل آکواکراپ برای دو متغیر درجه-روز رشد از شروع کاشت تا رسیدن محصول و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای محصول، واسنجی شد. برای تولید داده‌های لازم برای واسنجی و صحت‌سنجی، سه تیمار تقویم زراعی در مزرعه پردیس ابوریحان در یک فصل رشد اجرا شدند. اجرای مدل با داده‌های صحت‌سنجی نشان داد که مدل با دقت مناسبی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند (اورگانی و همکاران، ۱۳۹۴). برای ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای در طول جویچه، آزمایشی در منطقه کرج انجام شد. در این تحقیق، مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی تغییرات مکانی ذرت علوفه‌ای بر اساس عمق آب نفوذ یافته در طول جویچه ارزیابی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان از مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد بیوماس ذرت علوفه‌ای در طول جویچه استفاده نمود (وطن‌خواه و همکاران، ۱۳۹۴). طی مطالعه‌ای مدل آکواکراپ در منطقه جنوب فلات چین برای گندم زمستانه ارزیابی شد. داده‌های تجربی حاصل از تحقیقات میدانی سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱ برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده، سطح پوشش تاج (CC)، حجم آب خاک و عملکرد دانه در شرایط دیم استفاده شد. نتایج نشان داد که آکواکراپ قادر به شبیه‌سازی عملکرد گندم زمستانه در شرایط دیم است (Zhang et al., 2013). برای ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی رشد ذرت و مقدار بهره‌وری، تحت شرایط کم آبیاری در جنوب تایوان انجام شد. سه آزمایش برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی پوشش تاج (CC)، زیست‌توده (B)، عملکرد (Y)، تبخیر و تعرق محصول (ET) و راندمان مصرف آب (WUE)، در مزرعه انجام شد. نتایج نشان داد که پیش‌بینی مدل در محیط بدون تنش خوب و مدل آکواکراپ می‌تواند مدلی قابل‌اعتماد برای ارزیابی اثربخشی آبیاری پیشنهادی و استفاده استراتژی‌های مدیریت برای ذرت باشد (Greaves et al., 2016).

در مدل آکواکراپ از پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده[2] (WP*)

1- AquaCrop
2- Normalized Water Productivity

برای تعیین زیست‌توده گیاهی استفاده‌شده است (Steduto et al., 2007). این پارامتر در نرم‌افزار آکواکراپ برای هر گیاه ثابت در نظر گرفته‌شده است (Steduto et al., 2009). تحقیقات نشان داده این پارامتر مقدار مشخص و ثابتی نیست و برای هر منطقه و نوع رقم گیاه متفاوت است. کارشناسان فائو مقدار این پارامتر را برای اکثر نباتات زراعی محاسبه و در پیوست راهنمای مدل آکواکراپ (Reference Manual, Annexes – AquaCrop, January 2010) ارائه داده‌اند. مقدار این پارامتر برای گیاهان کربن ۳ (C3) مثل جو بین ۱۳ تا ۱۵ و برای گیاهان کربن ۴ (C4) مثل سورگوم، بین ۲۶ تا ۳۵ گرم بر مترمربع در روز تغییر می‌کند (Steduto et al., 2009). بررسی‌ها نشان می‌دهد مقدار این پارامتر برای گیاه کاهو که جزء گیاهان C3 است، در ایران تعیین نشده است. هدف از انجام این پژوهش مقایسه بهره‌وری آب نرمال شده کاهو در دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی گلخانه‌ای است.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل آزمایش

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت روی گیاه کاهو رقم پرطاووسی در سال زراعی ۱۳۹۶– ۱۳۹۷ انجام شد. مکان آزمایش در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی (E′۴۸ °۵۱، N′۲۸ °۳۵) و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۱ متر واقع است. داده‌های موردنیاز برای اندازه‌گیری مقدار تبخیر– تعرق در طی دو دوره کشت، مانند ساعات آفتابی از ایستگاه هواشناسی واقع در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان گرفته شد و همچنین داده‌های موردنیاز دیگر در گلخانه مانند دمای روزانه توسط دماسنج، رطوبت روزانه توسط رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شد، و سرعت باد نیز به توصیه سازمان فائو برابر ۰/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در این پژوهش تبخیر– تعرق با استفاده از روش پنمن مانتیث فائو (Allen et al., 1998) تعیین گردید.

در مورد خاک تهیه‌شده برای انجام آزمایش کشت خاکی، مقدار خاک موردنیاز پس از مخلوط با کمپوست گیاهی در گلخانه تحقیقاتی انباشته شد، سپس گلدان‌ها از خاک پرشده و سه گلدان نیز به‌عنوان نمونه جهت انجام آزمایش و تعیین ویژگی‌های آن به آزمایشگاه منتقل شدند. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تهیه‌شده در جدول (۱) ارائه‌شده است. همچنین برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب محل آزمایش نیز در جدول (۲) ارائه‌شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های **خاک** مورد استفاده

بافت خاک	رطوبت مزرعه (درصد حجمی)	رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)	جرم ویژهٔ ظاهری (gr/cm^3)	رطوبت اشباع (درصد حجمی)	EC (dS/m)
Silt loam	۲۰/۱۵	۱۰/۰۱	۱/۳۷	۴۴/۶۴	۳/۵۵

جدول ۲- ویژگی‌های **شیمیایی آب**

پارامتر	Ca + Mg (meq/lit)	Na (meq/lit)	PH	EC (dS/m)
مقدار	۱۶	۲/۹	۷/۲	۱/۴

آزمایش گلخانه‌ای

کشت در دو محیط کشت هیدروپونیک (شکل ۱) و خاکی (شکل ۲) انجام شد. در کشت هیدروپونیک تعداد ۴۸ عدد بوته جهت انجام آزمایش در نظر گرفته شدند. روش دوم کشت در محیط خاک بود که در ۴۸ گلدان مشابه با تراکم کشت هیدروپونیک انجام شد. در کشت هیدروپونیک با استفاده از چهار لوله به طول ۳ متر و با ایجاد حفره‌هایی به فاصله ۲۵ سانتی‌متر روی آن جهت قرار دادن گیاه درون آن‌ها اجرا شد. در این روش، آب و مواد غذایی لازم جهت رشد گیاه از طریق لوله از مخزن به کمک پمپ وارد سیستم می‌شد و محلول غذایی در اختیار گیاه قرار می‌گرفت. دلیل استفاده از پمپ و مخزن، هوادهی به محلول غذایی بود که هر ۱۵ دقیقه پمپ توسط تایمر روشن و خاموش می‌شد تا محلول وارد سیستم و در اختیار گیاه قرار گیرد. محلول غذایی در نظر گرفته‌شده کود هیدروپونیک با فرمول هوگلند و اشنایدر بود که در مرحله جوانه‌زنی مقدار ۸ میلی‌لیتر، در مرحله اول رشد مقدار ۱۰ میلی‌لیتر و در مرحله رشد تا انتهای برداشت به مقدار ۱۶ میلی‌لیتر در ۴ لیتر آب استفاده شد. pH مناسب برای کاهو بین ۵/۵–۶/۵ است. برای کنترل pH از رزین کنترل pH استفاده شد. هر ۵۰ گرم رزین می‌تواند بدون نیاز به تنظیم اولیه، pH محلول را به‌صورت خودکار به مدت دو هفته بین ۵/۵–۶/۵ نگه دارد. در این روش بخشی از ریشه‌ها در هوا و بخشی دیگر درون یک‌لایه نازک از محلول غذایی در جریان قرار داشت، و ریشه‌ها آزادانه با محلول غذایی در تماس بودند. در این سیستم به دلیل کاهش پایداری

عناصر در محلول غذایی هر دو هفته یک‌بار محلول تعویض می‌شد. برای اندازه‌گیری زیست‌توده در هر دو کشت، هر هفته ۳ گلدان از کشت خاکی و ۳ بوته از کشت هیدروپونیک به‌صورت جداگانه آزمایش شد. نمونه‌های گیاهی برای اندازه‌گیری عملکرد ماده خشک (زیست‌توده) بعد از کاشت بذر و انتقال نشاء تا انتهای فصل کشت هر هفته یک‌بار جهت تعیین زیست‌توده گیاهی (Biomass) اندازه‌گیری می‌شدند. برای این کار، نمونه‌ها در هر مرحله از نمونه‌برداری بعد از انتقال سریع به آزمایشگاه به مدت ۳ روز در دستگاه آون با درجه حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شدند. مقدار پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده این دو روش کشت مطابق با روش ارائه‌شده Steduto et al. (2009) برای این پژوهش تعیین و مقایسه شدند. پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده به دست آمده علاوه بر ترسیم نمودارها با استفاده از شاخص‌های آماری مقایسه و تحلیل شدند.

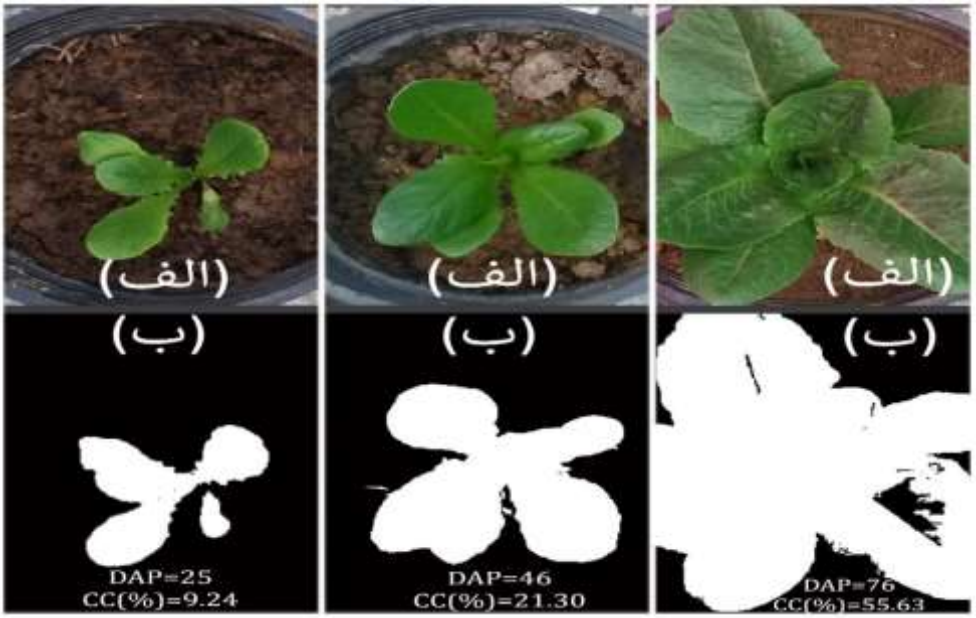
درکشت هیدروپونیک با توجه به این‌که آب و محلول غذایی همواره در اختیار گیاه قرار داشت تا گیاه دچار تنش آبی نشود، برای اندازه‌گیری مقدار آب مصرف‌شده طی تبخیر و تعرق در این کشت، به‌صورت روزانه مقدار کاهش سطح آب داخل مخزن اندازه‌گیری می‌شد.



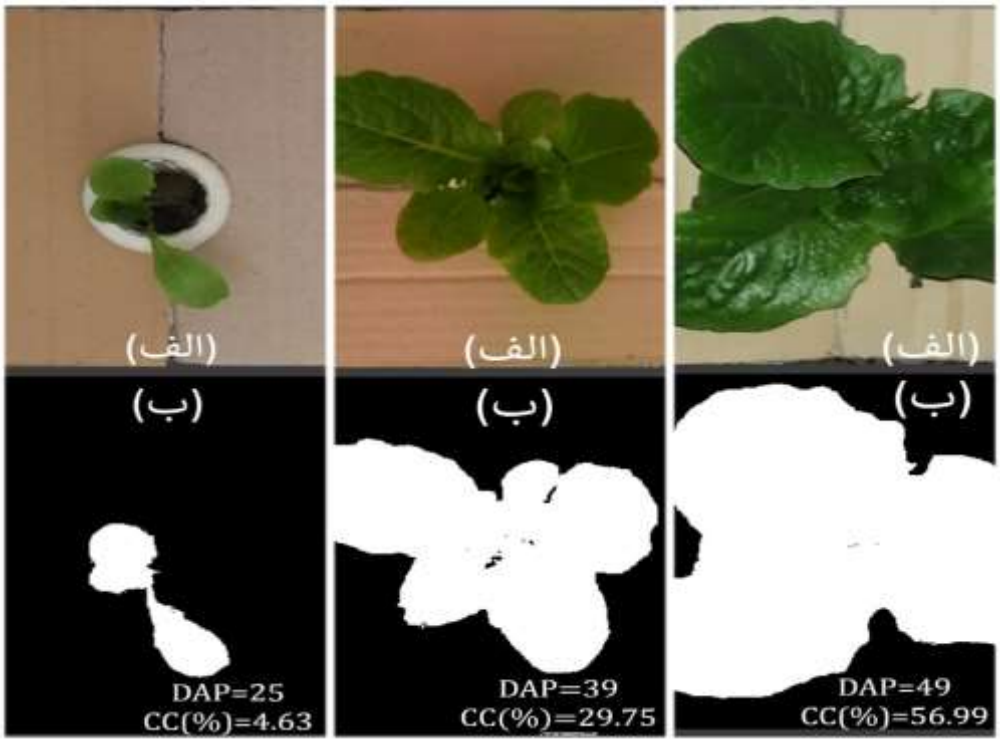
شکل ۱- تصویر کشت در محیط هیدروپونیک



شکل ۲- تصویر کشت در محیط خاکی



شکل ۳- تصاویر تاج پوشش محصول کاهو (کشت خاکی) در سه تاریخ مختلف دوره رشد، الف- تصویر برداشت‌شده توسط دوربین و ب- تصویر پردازش‌شده توسط نرم‌افزار کانوپی



شکل ٤- تصاویر تاج پوشش محصول کاهو (کشت هیدروپونیک) در سه تاریخ مختلف دوره رشد، الف- تصویر برداشت‌شده توسط دوربین و ب- تصویر پردازش‌شده توسط نرم‌افزار کانوپی

درکشت خاکی نیز با توجه به این موضوع کـه پـارامتر بهـره‌وری نرمال شده برای آبیـاری کامـل و بـدون تـنش آبـی و تـنش کـودی تعریف‌شده، آبیاری در گلدان‌ها به‌صورتی انجام شد که تنش آبـی بـه گیاه وارد نشود. برای تعیین زمـان مناسـب و مقـدار آبیـاری در طـول فصل کشت، از روش لایسیمتری استفاده شد. بدین‌صـورت کـه وزن خاک خشک‌شده گلدان، وزن گلدان در وضعیت رطوبت زراعـی (FC)

و وزن گلدان در وضعیت (Wilting point) اندازه‌گیری شدند. حال با توجه به وزن‌های محاسبه‌شده، زمانی که ۳۰ درصد آب، از گلدان خارج می‌شد (آب سهل‌الوصول) با وزن کردن گلدان‌ها، این میزان را کنترل و زمانی که آبیاری لازم بود، آبیاری به میزانی که رطوبت خاک به ظرفیت زراعی می‌رسید، آبیاری صورت می‌گرفت، تا گیاه دچار تنش آبی نشود. همچنین برای ایجاد شرایط مطلوب ازلحاظ تأمین مواد غذایی موردنیاز درکشت خاکی نیز مقدار کود ازت و پتاسیم به ترتیب ۱۵۰ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار مصرف شد. کل کود پتاسیم و نصف کود ازت در زمان کاشت و باقیمانده کود ازت قبل از مرحله گلدهی به گلدان‌ها داده شد. چهار پارامتر مربوط به پوشش گیاهی شامل درصد پوشش گیاه در شروع مرحله جوانه‌زنی (CCO) ، نرخ رشد پوشش گیاه در مرحله توسعه (CGC)، حداکثر پوشش گیاه (CCX)و نرخ کاهش پوشش گیاه در مرحله پیری (CDC) برای اجرای مدل آکواکراپ الزامی هستند. برای تعیین این پارامترها، درصد پوشش گیاه در طول دوره رشد اندازه‌گیری شد و بر پایه این اندازه‌گیری‌ها درصد پوشش گیاه در شروع جوانه‌زنی و حداکثر پوشش گیاه و تغییرات پوشش گیاه بین دو اندازه‌گیری بر اساس شدت تغییرات بر روز محاسبه گردید. برای تعیین پوشش گیاهی از روش Patrignani and Ochsner (2015) استفاده شد. با استفاده از این روش، از سطح هر گلدان درکشت خاکی و سطح مختص به هر گیاه روی خطوط لوله درکشت هیدروپونیک، عکس گرفته می‌شد و با انتقال عکس به نرم‌افزار کانوپی[1]، درصد پوشش گیاه محاسبه می‌گردید. برای گرفتن عکس‌ها، دوربین در ارتفاع ۶۰ سانتیمتر بالاتر از تاج‌پوشش گیاه و به‌طور موازی با سطح گلدان و لوله قرار داده می‌شد. سه نمونه از عکس‌های قبل و بعد از پردازش در نرم‌افزار کانوپی در شکل (۳) برای کشت خاکی و در شکل (۴) برای کشت هیدروپونیک ارائه‌شده‌اند.

تشریح و کاربرد نرم‌افزار آکواکراپ

در این پژوهش از نسخه ۵ مدل آکواکراپ استفاده شد. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی عملکرد درکشت هیدروپونیک توسط مدل آکواکراپ به این دلیل که در این کشت هیچ‌گونه تنش آبی و تنش کودی وجود ندارد و امکان تعریف این شرایط برای مدل وجود دارد، انجام شد. در این مدل، مقدار عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت، از رابطه (۱) حساب می‌شود (Steduto et al., 2009):

$$B = BWP \times \left(\sum \frac{T_{r,i}}{ET_{o,i}}\right) \quad (۱)$$

در رابطه فوق، B عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت (گرم بر مترمربع)، BWP ضریب بهره‌وری نرمال شده (گرم بر مترمربع)، Tr,i تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و ETo تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز) هستند. در مدل آکواکراپ، پارامتر تعرق گیاه (Tr) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$T_r = K_s \times K_c \times CC \times ET_o \quad (۲)$$

در رابطه فوق، Ks ضریب تنش آبی، Kc ضریب گیاهی، CC ضریب پوشش گیاهی و ETo تبخیر و تعرق مرجع هستند. با توجه به این‌که برنامه آبیاری در این پژوهش به‌صورتی بوده که گیاه تحت تنش کم‌آبی قرار نگیرد، لذا ضریب Ks برابر یک در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی Kc نسبت بین تبخیر و تعرق گیاه بدون تنش آبی به تبخیر و تعرق مرجع است. این ضریب در مدل آکواکراپ با استفاده از روش ارائه‌شده در نشریه شماره ۵۶ فائو (Allen et al., 1998) در طول دوره رشد برآورد می‌شود. ضریب پوشش گیاهی در مدل آکواکراپ از زمان کاشت بذر تا پایان مرحله توسعه با استفاده از دو معادله زیر برآورد می‌شود (Steduto et al., 2009):

$$CC = CC_O \times e^{(CGC \times t)} \quad (۳)$$

$$CC = CC_X - [CC_O \times e^{(-CGC \times t)}] \quad (۴)$$

رابطه ۳ برای دوره زمانی کاشت بذر تا نیمه مرحله توسعه استفاده می‌شود. رابطه ۴ نیز برای دوره زمانی از نیمه‌ی مرحله توسعه تا آخر مرحله توسعه است. در معادلات فوق, CC پوشش گیاهی در t روز پس از کاشت، CCx حداکثر پوشش گیاهی، CCo پوشش اولیه گیاه در زمان t=0 و CGC نرخ رشد پوشش گیاه در روز هستند. پوشش گیاه در طول دوره مرحله آخر که در آن شیب پوشش گیاهی به‌صورت نزولی است، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$CC = CC_X \times \{1 - 0.05 \times [e^{\left(\frac{CDC}{CC_X} \times t\right)} - 1] \quad (۵)$$

در روابط فوق، CDC نرخ کاهش پوشش گیاهی و t زمان برحسب روز است که از مرحله چهارم رویش (پیری) شروع می‌شود. طول دوره‌های مختلف رشد گیاه کاهو همراه با عملیات کشاورزی و آبیاری، یادداشت‌برداری و ثبت گردیدند. مجموعه پارامترهای اندازه‌گیری شده و مشاهده‌شده از مراحل مختلف رشد که به‌عنوان ورودی به مدل آکواکراپ وارد شدند، در جدول (۳) ارائه‌شده‌اند.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

در این پژوهش برای ارزیابی کارایی مدل آکواکراپ از شاخص‌های آماری ضریب تبیین[2] (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا[3] (RMSE)، ضریب کارایی[4] (E) و ضریب باقی‌مانده[5] (CRM) که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند، ارزیابی شد.

1- Canopeo

2- Determination Coefficient
3- Root Mean Square Error
4- Coefficient of efficiency
5- Coefficient of Residual Mass

جدول ۳- مقادیر پارامترهای ورودی به مدل آکواکراپ

پارامتر	کشت اول		کشت دوم	
	هیدروپونیک	خاک	هیدروپونیک	خاک
پوشش سبز اولیه (درصد)	۰/۴۷	۰/۷۷	۰/۵۷	۰/۶۷
زمان شروع جوانه‌زنی (روز پس از کاشت)	۸	۸	۷	۷
طول دوره جوانه‌زنی (روز)	۷	۷	۷	۷
زمان شروع گلدهی (روز پس از کاشت)	۳۲	۳۷	۲۸	۳۵
طول دوره گلدهی (روز)	۷	۹	۶	۸
زمان رسیدن به حداکثر پوشش سایه‌انداز (روز پس از کاشت)	۵۶	۷۷	۴۴	۴۴
زمان شروع دوره کاهش (روز پس از کاشت)	۵۶	۷۷	۴۴	۴۴
زمان برداشت (روز پس از کاشت)	۵۶	۷۷	۴۴	۴۴

$$R^2 = \frac{[\sum(S_i - \bar{S})(M_i - \bar{M})]^2}{\sum(S_i - \bar{S})^2 \sum_{N}(M_i - \bar{M})^2} \quad (۶)$$

$$RMSE = [N^{-1}\sum_{i=1}(M_i - S_i)^2]^{0.5} \quad (۷)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)}{\sum_{i=1}^{n}(M_i - \bar{M})^2} \quad (۸)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i - \sum_{i=1}^{N} S_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i} \quad (۹)$$

که در آن‌ها Si و Mi به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده، n تعداد مشاهدات و $\bar{M}$ میانگین مقادیر M_i هستند. RMSE مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل است. هرچه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. ضریب E بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین است. مقدار E بین ∞- تا ۱+ متغیر است هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کاراتر است. شاخص CRM نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش‌ازحد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده باهم برابر شوند، مقدار عددی شاخص‌های RMSE، CRM برابر با صفر و مقدار E برابر با ۱ خواهد بود.

نتایج و بحث

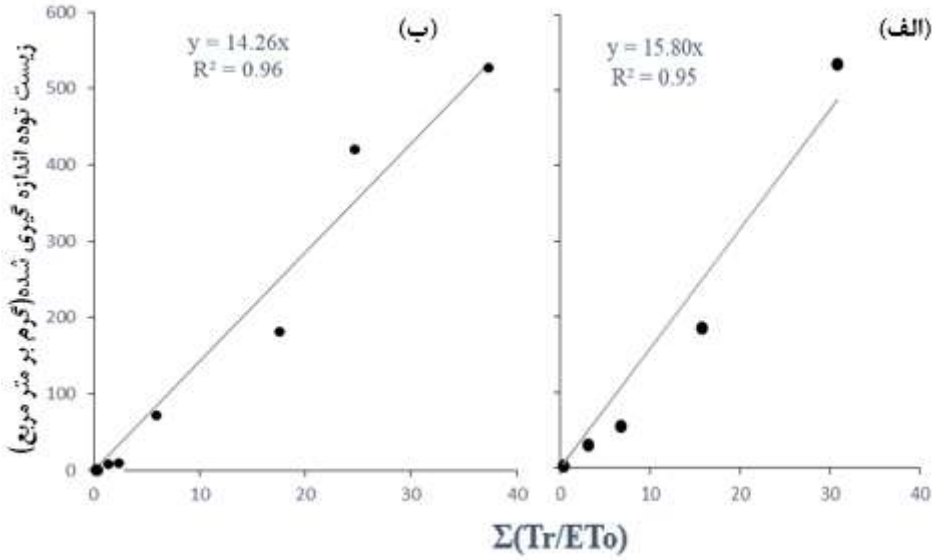
عملکرد:

همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، مدل آکواکراپ از پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) برای تعیین عملکرد (زیست‌توده) استفاده‌شده است (Steduto et al., 2007). بررسی‌ها نشان می‌دهند مقدار این پارامتر برای گیاه کاهو که جزء گیاهان C3 است، در ایران تعیین نشده است. بنابراین یکی از اهداف این پژوهش مقایسه بهره‌وری آب نرمال شده کاهو در دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی است. این پارامتر در مدل آکواکراپ ابتدا به کمک داده‌های کشت اول واسنجی و سپس با داده‌های کشت دوم، صحت‌سنجی شد. در این پژوهش برای محاسبه پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده، از روش Steduto et al. (2009) استفاده‌شده است. در این روش، پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع ($\sum \frac{T_r}{ET_O}$) در مقابل زیست‌توده تجمعی رسم شده و بهره‌وری آب نرمال شده، برابر با ضریب بهترین خطی است که از مبدأ مختصات به نقاط برازش گذشته است. پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع در مقابل زیست‌توده تجمعی برای هر دو روش هیدروپونیک و کشت خاکی و نیز معادله خط برازش داده‌شده، در شکل (۵) ارائه‌شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهند عملکرد زیست‌توده کشت هیدروپونیک بیشتر از کشت در محیط خاکی می‌باشد و مقادیر آن برای کشت هیدروپونیک برابر ۱۵/۸۰ گرم بر متر مربع و برای کشت خاکی برابر ۱۴/۲۶ گرم بر متر مربع است. پس از تعیین ضریب بهره‌وری، مدل آکواکراپ با داده‌های کشت اول واسنجی و با داده‌های کشت دوم، صحت‌سنجی شد. مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی طی دو دوره کشت، در جدول (۴) ارائه‌شده‌اند. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی توسط مدل در هر دو کشت نشان از بیشتر بودن مقدار عملکرد کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی می‌باشد. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو دوره کشت، مدل قادر است مقدار عملکرد کاهو را با دقت نسبتاً بالایی شبیه‌سازی کند. برای اطمینان از صحت چنین ادعایی، نتایج با استفاده از شاخص‌های آماری یادشده مقایسه شدند (جدول ۵).

در مجموع همه شاخص‌های آماری نشان می‌دهند که مدل برای

هر دو محیط کشت عملکرد را با درصد خطای پایینی پیش‌بینی می‌کند. ضریب تبیین R^2 بین نتایج مدل و نتایج گلخانه‌ای در هر دو محیط کشت نزدیک به یک است و نشان می‌دهد مدل می‌تواند تغییرات عملکرد محصول را شبیه‌سازی کند. مقدار CRM در بیشتر موارد نزدیک به صفر است که نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی واکنش عملکرد کاهو و نزدیکی مقادیر مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. در همه موارد مقدار CRM منفی است که نشان می‌دهد مدل مقدار عملکرد را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. همچنین، مقدار E در همه موارد نزدیک به یک است که نشان از کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد می‌باشد.



شکل ۵- رابطه بین عملکرد زیست‌توده و تعرق نرمال شده برای داده‌های واسنجی : الف- کشت هیدروپونیک ب-کشت خاکی

جدول ٤- نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده زیست‌توده برای داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی

دوره‌ی کشت		اندازه‌گیری شده		شبیه‌سازی‌شده	
		کشت هیدروپونیک	کشت خاکی	کشت هیدروپونیک	کشت خاکی
	روز پس از کاشت	زیست‌توده (تن بر هکتار)		زیست‌توده (تن بر هکتار)	
اولین دور کشت	۱۶	۰/۰۶۷	۰/۰۱۲	۰/۰۳	۰/۰۶
	۲۸	۰/۵۶۷	۰/۰۷۴	۰/۳۰	۰/۲۴
	۳۳	۱/۱۹۲	۰/۰۸۵	۰/۵۴	۰/۴۰
	۴۲	۲/۷۴۴	۰/۷۱۴	۱/۸۴	۰/۹۰
	۵۶	۵/۳۷۱	۱/۸۰۷	۵/۳۴	۲/۷۰
	۶۳	---	۴/۱۹۹	---	۳/۹۳
	۷۵	---	۵/۲۶۵	---	۵/۴۲
دومین دور کشت	۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۳
	۱۴	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۰۷
	۲۱	۰/۸۱	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۳۴
	۲۸	۲/۱۰	۰/۸۲	۱/۹۴	۱/۱۴
	۳۶	۳/۱۴	۱/۹۸	۳/۶۶	۲/۵۴
	۴۴	۴/۹۳	۳/۹۷	۵/۳۸	۴/۰۵

جدول ۵- مقدار شاخص‌های آماری برای ارزیابی صحت نتایج شبیه‌سازی‌شده توسط مدل

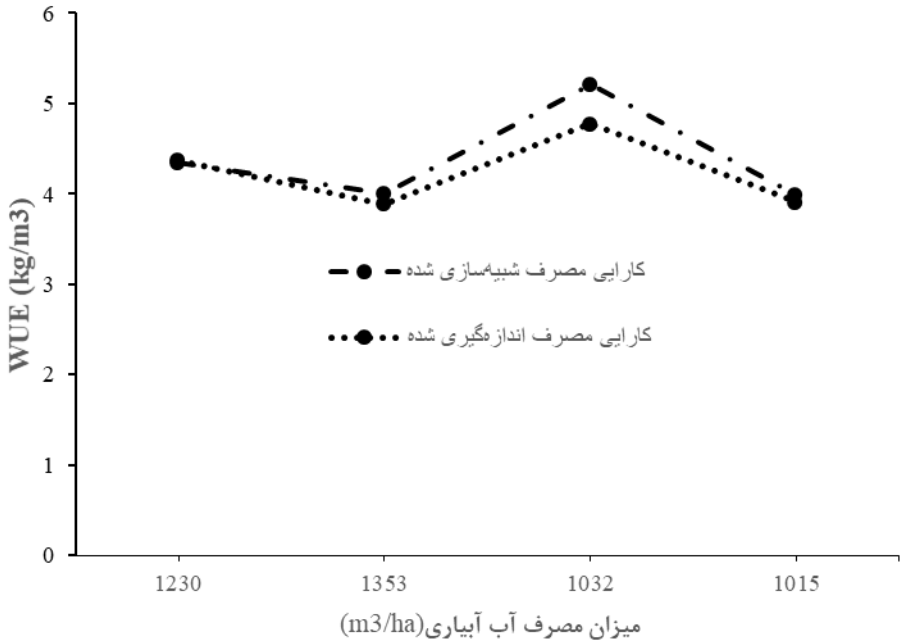
دوره‌ی کشت	محیط کشت	R^2	RMSE%	E	CRM
دور اول کشت	هیدروپونیک	۰/۹۴۹	۰/۳۰	۰/۹۷	-۰/۰۵
	خاکی	۰/۹۶۶	۰/۲۹	۰/۹۵	-۰/۰۸
دور دوم کشت	هیدروپونیک	۰/۹۸۸	۰/۵۱	۰/۹۰	-۰/۲۴
	خاکی	۰/۹۷	۰/۳۹	۰/۹۵	-۰/۱۲

کارایی مصرف آب

کارایی مصرف آب یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تعیین مقدار محصول به ازای حجم آب مصرفی می‌باشد. کارایی مصرف آب (مقدار آبیاری/ عملکرد) برای دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی طی دو دوره کشت در جدول (۴) ارائه‌شده است. همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده کارایی مصرف آب نسبت به میزان مصرف آب آبیاری در شکل (۶) ارائه‌شده است. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی کارایی مصرف آب توسط مدل آکواکراپ در هر دو دوره کشت نشان می‌دهند که کارایی مصرف آب در کشت هیدروپونیک بیشتر از کشت خاکی است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که مدل مقدار کارایی مصرف آب را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده کمی بیشتر از مقدار واقعی، نشان می‌دهد. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، نتایج نشان می‌دهند که برای هر دو دوره کشت، مدل قادر است مقدار کارایی مصرف آب را با دقت نسبتاً بالایی شبیه‌سازی کند.

جدول ٦- کارایی مصرف آب گیاه کاهو در دو روش کشت هیدروپونیک و کشت خاکی

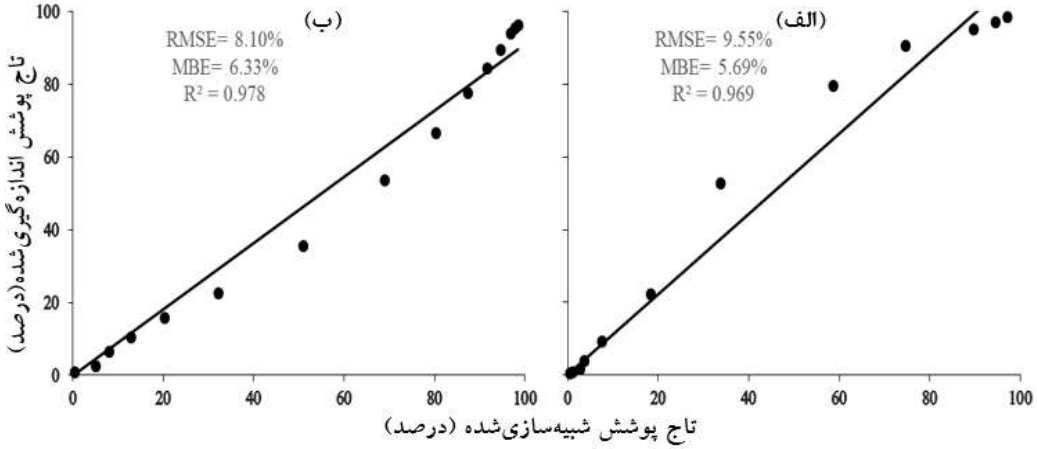
دوره‌ی کشت	محیط کشت	اندازه‌گیری شده		شبیه‌سازی‌شده	
		عملکرد (kg/ha)	کارایی مصرف آب آبیاری (kg/m^3)	عملکرد (kg/ha)	کارایی مصرف آب آبیاری (kg/m^3)
دور اول کشت	کشت هیدروپونیک	۵۳۷۱	۴/۳۶	۵۳۴۰	۴/۳۴
	کشت خاکی	۵۲۶۵	۳/۸۹	۵۴۲۰	۴/۰۱
دور دوم کشت	کشت هیدروپونیک	۴۹۳۰	۴/۷۷	۵۳۸۰	۵/۲۱
	کشت خاکی	۳۹۷۰	۳/۹۱	۴۰۵۰	۳/۹۹



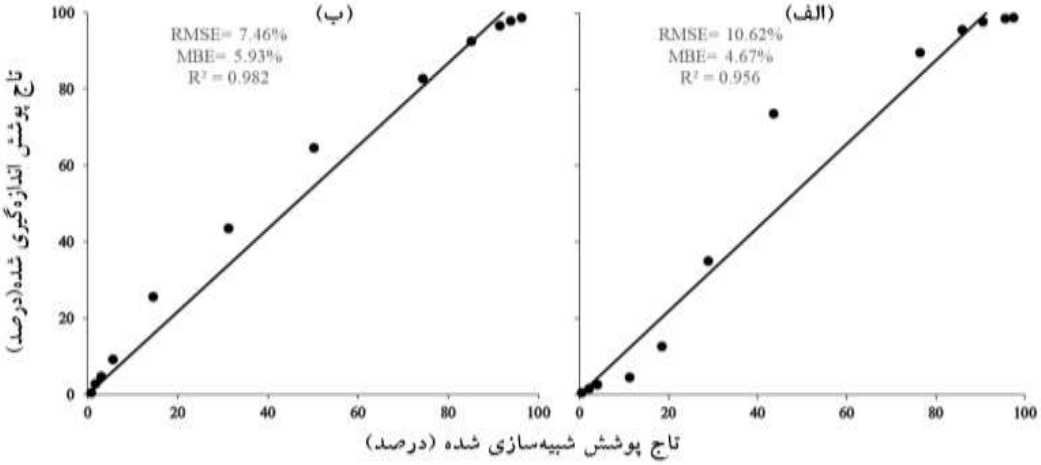
شکل ٦- رابطه بین کارایی مصرف آب و میزان مصرف آب آبیاری طی دو دوره کشت در کشت هیدروپونیک و کشت خاکی

شبیه‌سازی تاج‌پوشش

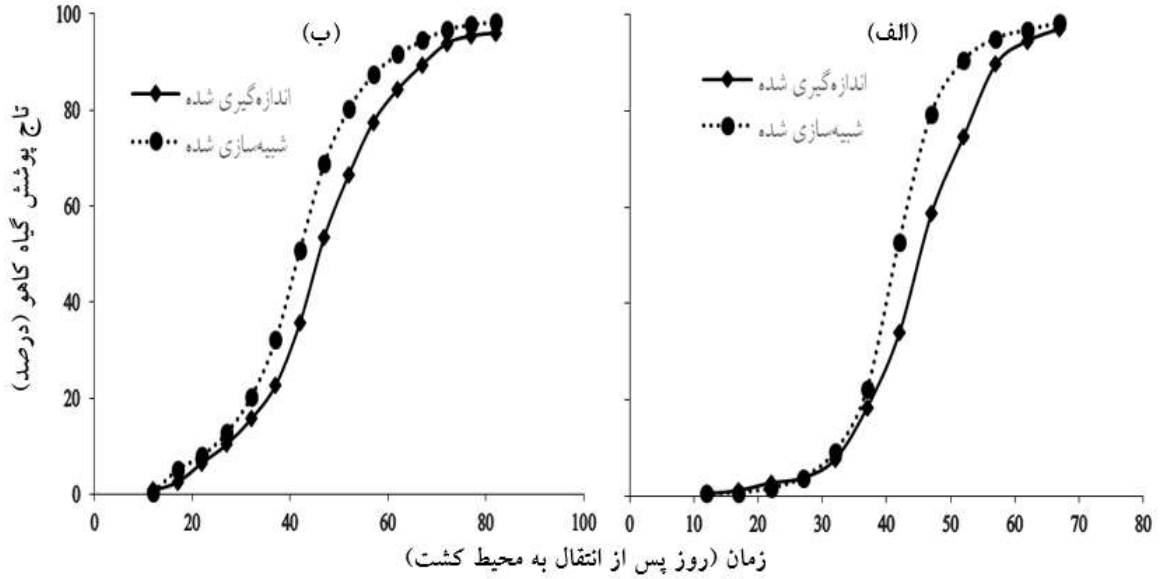
درصد تاج‌پوشش یکی از پارامترهایی است که توسط مدل قابل شبیه‌سازی و برآورد است. این پارامتر در هر دو دوره کشت برای کشت هیدروپونیک و کشت خاکی اندازه‌گیری و ثبت شد. چگونگی پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده درصد تاج‌پوشش گیاه کاهو برای هر دو محیط کشت هیدروپونیک و خاکی در هر دو دوره کشت، به ترتیب در شکل ۱ وشکل ۲(۸) ارائه‌شده‌اند. همچنین در شکل‌های (۹) و شکل ۴ نیز مقادیر اندازه‌گیری در مقابل مقادیر برآورد شده درصد تاج پوشش محصول کاهو نسبت به گذشت زمان به ترتیب برای اولین و دومین دور کشت ترسیم گردیده‌اند. همان‌طور که در این اشکال مشخص است، مدل در هر دو دوره‌ی رشد گیاه، درصد تاج‌پوشش را به‌غیراز مرحله‌ی ابتدای رشد در دور دوم کشت هیدروپونیک که کم برآورد نشان می‌دهد، در مابقی موارد بیش برآورد کرده است. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، نتایج نشان می‌دهند که مدل برای هر دو محیط کشت، مقدار تاج‌پوشش را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند.



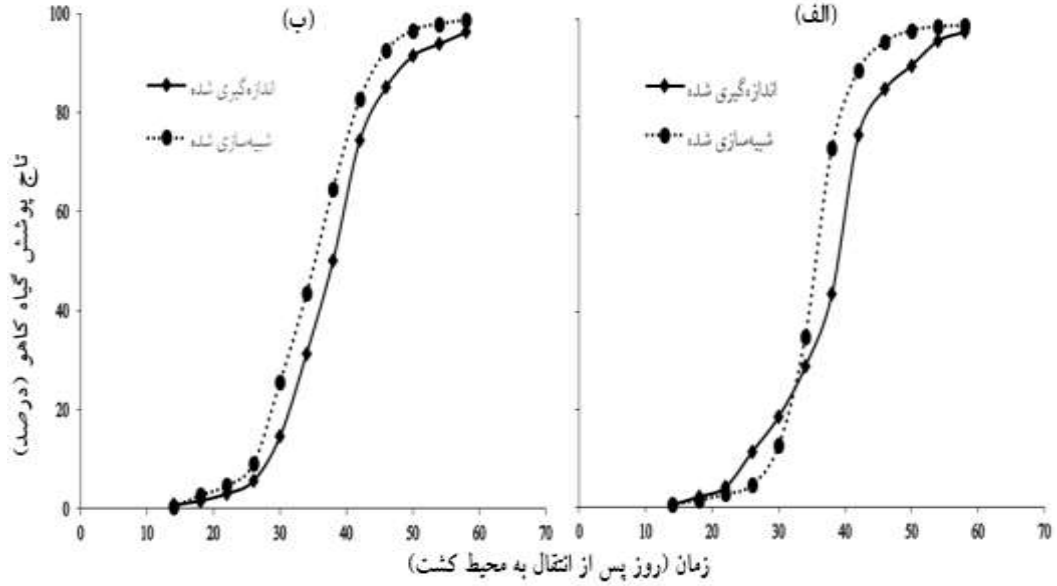
شکل ۱- پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده تاج‌پوشش محصول کاهو در اولین دور کشت: الف- کشت هیدروپونیک و ب-کشت خاکی



شکل ۲- پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده تاج‌پوشش محصول کاهو در دومین دور کشت: الف- کشت هیدروپونیک و ب-کشت خاکی



شکل ۳- تغییرات زمانی درصد تاج‌پوشش اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده اولین دور کشت: الف- کشت هیدروپونیک و ب-کشت خاکی



شکل ٤- تغییرات زمانی درصد تاج‌پوشش اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده دومین دور کشت: الف- کشت هیدروپونیک و ب-کشت خاکی

کمترین میزان اختلاف در برآورد یا به‌عبارت‌دیگر بهترین شبیه‌سازی تاج‌پوشش را مدل در دور دوم کشت خاکی از خود نشان می‌دهد. به‌طورکلی محدوده تغییرات پارامترهای آماری RMSE، MBE و R^2 برای درصد تاج‌پوشش اندازه‌گیری‌شده و برآورد شده به ترتیب برابر (۱۰/۶۲-۷/۴۶) ؛ (۴/۶۷-۶/۳۳) درصد و (۰/۹۸۲-۰/۹۵۶) به دست آمدند. نیاتی و همکاران (۲۰۱۸) مقادیر RMSE و R^2 را برای سبزیجات برگی برای درصد سبز تاج‌پوشش به ترتیب بین (۵/۴۴- ۰/۹۴) درصد و (۰/۹۹-۰/۶۰) درصد گزارش داده‌اند. همچنین مالیک و همکاران (۲۰۱۷) مدل آکواکراپ را تحت شرایط مختلف آبیاری برای چغندرقند مورد ارزیابی قراردادند و مقادیر RMSE و R^2 را برای درصد سبز تاج‌پوشش به ترتیب بین (۱۶/۸۹-۳) درصد و (۰/۹۹-۰/۷۶) درصد گزارش کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار عملکرد کشت هیدروپونیک و پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده کاهو در دو کشت هیدروپونیک و خاکی متفاوت است به‌طوری‌که مقدار این پارامتر در کشت هیدروپونیک اندکی بیش از کشت خاکی است. بیشتر بودن این پارامتر مؤید آن است که عملکرد نهایی محصول در کشت هیدروپونیک بیش

از کشت خاکی است. جهت مقایسه عملکرد و ارزیابی مدل آکواکراپ نتایج توسط مدل شبیه‌سازی شد، نتایج نشان‌دهندهٔ دقت بالای مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد و همچنین بیشتر بودن عملکرد کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی بود. همچنین کارایی مصرف آب در دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی اندازه‌گیری و توسط مدل شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان از بالا بودن دقت مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب و همچنین بیشتر بودن کارایی مصرف آب در کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی داشت. میزان تاج‌پوشش نیز در دو محیط و در دو دوره کشت، اندازه‌گیری و توسط مدل شبیه‌سازی شد، نتایج نشان داد مدل مقدار تاج‌پوشش را در هر دو محیط کشت با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌کند. برای تحقیقات آتی نیز پیشنهاد می‌شود برای سایر محصولات گلخانه‌ای، تحقیقات مشابه صورت گیرد.

منابع

رحیمی‌خوب، ح.، ستوده‌نیا، ع.، و مساح بوانی، ع. ۱۳۹۳. واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای منطقه قزوین. آبیاری و زهکشی ایران. ۱. ۱۰۸.

ساعدی، س.، علیمردانی، ر.، موسی‌زاده، ح.، و صالحی، ر. ۱۳۹۶. طراحی و پیاده‌سازی دستگاه کشت هیدروپونیک دوار خورشیدی مجهز به سامانه هوشمند آبیاری. ماشین‌های کشاورزی. ۸(۲), ۲۷۹-۲۹۴.

شاکر، د.، و حسین‌نیا، ه. ۱۳۹۵. بررسی عملکرد و کارایی مصرف آب در سیستم کشت هیدروپونیک محصولات گلخانه‌ای، دومین کنگره بین‌المللی زمین، فضا و انرژی‌های پاک با محوریت مدیریت منابع طبیعی، کشاورزی و توسعه پایدار، تهران، شرکت کیان طرح دانش.

علیزاده، ح.، نظری، ب.، پارسی‌نژاد، م.، اعتدالی، ه. و جانباز، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل آکواکراپ در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲، ۱۱.

کریمی‌اورگانی، ح.، رحیمی‌خوب، ع.، و نظری‌فرد، م. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت سنجی مدل آکواکراپ برای جو در منطقه پاکدشت. تحقیقات آب‌وخاک ایران. ۷۴ (۳):۵۷۹-۵۳۹.

وطن‌خواه، ا.، و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در طول جویچه. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۷(۳): ۴۹۵-۵۰۴.

ناصری، ا.، عباسی، ف. و اکبری، م. ۱۳۹۶. برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، جلد ۱۸ شماره ۶۸، صفحه‌های ۳۲-۱۷.

Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. FAO Irrigation and Drainage 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.

Cantliffe, DJ., Funes, J., Jovicich, E., Parajpe, A., Rodriguez, J., and Shaw, N. 2007. Media and containers for greenhouse soil less grown cucumbers, melons peppers and strawberries. Acta Hort 614:199-203.

English, M.J.I.J., Musick, V.V., and Murty. 1990. Deficit irrigation. Journal of farm irrigation systems. 12(3):222-230.

Greaves, GE., and Wang, YM. 2016. Assessment of FAO AquaCrop Model for Simulating Maize Growth and Productivity under Deficit Irrigation in a Tropical Environment. Water 8(12):557.

Hsiao, TC., Steduto, P., Raes, D., and Fereres, E. 2009. AquaCrop: the FAO crop water model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. Agricultural Journal 101:448-459.

Jones, JW., Hoogenboom, G., Porter, CH., Boote, KJ., Batchelor, WD., Hunt, LA., and Ritchie, JT. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy 18(3):235-265.

Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., and McLean, G. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. European Journal of Agronomy 18(3): 267-288.

Malik, A., Shakir, AS., Ajmal, M., Khan, MJ., and Khan, TA. 2017. Assessment of AquaCrop model in simulating sugar beet canopy cover, biomass and root yield under different irrigation and field management practices in semi-arid regions of Pakistan. Water Resources Management. 31(13):4275-4292.

Nyathi., M.K., van Halsema, G.E., Annandale, J.G., and Struik, P.C. 2018. Calibration and validation of the AquaCrop model for repeatedly harvested leafy vegetables grown under different irrigation regimes. Agricultural Water Management 208: 107-119.

Patrignani, A., and Ochsner, T.E. 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. Agronomy Journal 107(6):2312-2320.

Steduto, P., Hsiao, T.C., and Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. Irrig. Sci. 25:189–207.

Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D., and Fereres, E. 2009. AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying

principles. Agronomy Journal 101(3):426-437.

Stöckle, C.O., Donatelli, M., and Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European journal of agronomy 18(3):289-307.

Verdonck, O., and Demeyer, P. 2004. The influence of the particle size on the physical properties of growing media. 644:99-101.

Zhang, W., Liu, W., Xue, Q., Chen, J., and Han, X. 2013. Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China. Water Science and Technology 68(4):821-828.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2075-2088

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۸۸-۲۰۷۵

In Determination of Performance, Water Use Efficiency and Simulation of Lettuce's Canopy Cover in Hydroponic Cultivation and Soil Cultivation by AquaCrop Model

M. Sabzian[1]*, A. Rahimikhoob[2], M. Mashal[3], S. Aliniaeifard[4]
Recived: Aug.31, 2020 Accepted: Oct.21, 2020

Abstract

In recent years, there has been high attention towards soilless cultivation or hydroponic for growing plants in greenhouses. In the current study we addressed normalized water productivity of lettuce (Lactuca sativa) between soil and hydroponic cultivations and also the assessment of AquaCrop model in simulation of yield and water use efficiency of lettuce cultivation methods. The Normalized Water Productivity is used for simulating plant growth in AquaCrop model. The experiments on two mentioned cultivations were conducted during two cultivation periods. The first cultivation's data were used for calibrating the productivity parameter of normalized water and the second's cultivation data were used for validation. The obtained results suggested that the productivity parameter of normalized water was different for soil and hydroponic cultivations.It was 14.3 and 15.8 g m-2 for the two cultivation types, respectively. AquaCrop model was performed using these amounts for second cultivation period and the value of biomass was simulated during growth period and then was compared to the measured values. The results indicated that AquaCrop model simulated the performance of lettuce with a suitable accuracy during growth period using the calibrated values of normalized water productivity. Water use efficiency (WUE) was also measured and simulated in both cultivation periods for hydroponic and soil cultivations. The results indicated that the water use efficiency (WUE) in hydroponic is higher than WUE in soil cultivation. Also, the amount of canopy cover was measured for both culture mediums in both cultivation periods and was simulated by the model. The results showed that the model simulates the amount of canopy cover well for both culture mediums. Also AquaCrop model has higher accuracy in the simulation of performance and WUE for lettuce. According to the obtained results, it was concluded that the culture medium influenced the performance of lettuce plant; and performance and WUE in hydroponic cultivation is higher than soil cultivation. Furthermore, AquaCrop model has relatively high accuracy in the simulation of performance, WUE, and also simulation of canopy cover for lettuce plant.

Keywords: AquaCrop model, Hydroponic cultivation, Greenhouse, Lettuce's, Soil cultivation, Yield, Water use efficiency

1- Master Science Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran
2- Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran
3- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran
4- Assistance Professor, Department of Horticulture, Aburaihan Campus, University of Tehran
(*- Corresponding Author Email: sabzian73@ut.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۹۹-۲۰۸۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2089-2099

مقاله پژوهشی

بررسی و تحلیل حساسیت روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع

سالومه سپهری صادقیان[1*]، فریبرز عباسی[2]، قاسم زارعی[3]، محمد مهدی نخجوانی مقدم[4]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۷

چکیده

تبخیر و تعرق از اثرگذارترین پارامترها در چرخه آب در طبیعت و نیز طراحی صحیح سامانه‌های آبیاری بوده و برآورد دقیق آن منجر به کاهش تلفات آب و برنامه‌ریزی بهتر آبیاری می‌گردد. با توجه به توانمندی شبکه‌های عصبی مصنوعی در تحلیل محاسباتی فرآیندهای پیچیده، این پژوهش با هدف کاربرد این تکنیک برای تحلیل داده‌های مؤثر در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo) و مقایسه آن با نتایج حاصل از نرم‌افزار ETo-calculator صورت گرفت. ETo با استفاده از داده‌های هواشناسی (آمار ۱۰ ساله روزانه ۱۲ ایستگاه هواشناسی استان تهران) و با کاربرد نرم‌افزار ETo-calculator محاسبه شد. برای مدل‌سازی ETo، مجموعه ورودی‌ها به شبکه‌های عصبی مصنوعی شامل مقادیر دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، سرعت باد و تعداد ساعات آفتابی در شبانه روز در نظر گرفته شدند. پس از نگاشت داده‌ها و با بهینه‌سازی تعداد لایه‌های پنهان و الگوریتم‌های شبکه، مقادیر خروجی برآورد شدند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی تکنیک بسیار مناسبی برای تحلیل ETo است ($R^2 \cong 98\%$). شیوه آموزش پرسپترون چند لایه‌ای با دو لایه میانی، توابع انتقال تانژانت خطی و تانژانت برای لایه‌های پنهان و خروجی، قانون آموزش لونبرگ مارکوات برای هر دو لایه پنهان و خروجی و ساختار ۱-۱۴-۱۱-۶ به عنوان بهترین شبکه برای برآورد ETo پیشنهاد می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که شبکه منتخب و نرم‌افزار ETo-calculator روند مشابهی داشته و پارامترهای دمای حداکثر و تعداد ساعات آفتابی در شبانه روز، به‌ترتیب مؤثرترین و کم‌اثرترین پارامترها در برآورد ETo هستند. همچنین بر مبنای نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، سناریوی استفاده از چهار پارامتر دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداکثر و سرعت باد به عنوان تنها ورودی‌ها به شبکه عصبی مصنوعی منتخب، می‌تواند با دقت قابل قبولی تبخیر و تعرق گیاه مرجع را برآورد کند ($R^2 \cong 94\%$).

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، پارامترهای هواشناسی، فائو پنمن مانتیث، هوش مصنوعی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی

مقدمه

استفاده بهینه از منابع آب و افزایش بهره‌وری در بخش کشاورزی به عنوان بزرگترین بخش مصرف‌کنندهٔ منابع محدود آب کشور، از مسائل ضروری برای سازگاری با معضل کم آبی است. برآورد مناسب میزان تبخیر و تعرق گیاهان نقش بسزایی در طراحی دقیق‌تر سامانه‌های آبیاری داشته و مدیریت آب در بخش کشاورزی را بهبود می‌بخشد. برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo) می‌توان از روش‌هایی همچون پنمن فائو، فائو پنمن مانتیث، بلانی کریدل و غیره استفاده نمود. لیکن، اکثر این روش‌ها به خصوص روش فائو پنمن مانتیث، نیازمند پارامترهای زیادی بوده و در اکثر موارد نیاز به فرضیات اولیه‌ای دارند و به سهولت در دسترس نیستند. به‌رغم این مشکل، به‌کارگیری مدل‌هایی که بر اساس استفاده از داده‌های هواشناسی موجود استوار هستند، می‌توانند به عنوان جایگزینی برای اندازه‌گیری‌های مستقیم در نظر گرفته شوند. در دو دهه گذشته در پردازش اطلاعات مسائل پیچیده، سیستم‌های هوشمند به طور فزاینده‌ای مورد توجه واقع شده‌اند، که شبکه‌های عصبی مصنوعی

۱-استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲- استاد مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۴- استادیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: s.sepehri@aeri.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.16.7

(ANNs) [1] از این مجموعه هستند. این شبکه‌ها ابزارهایی قوی در یادگیری رابطه ناشناخته و پیچیده بین یک فضای ورودی با فضای خروجی هستند که در زمینه‌های مختلف علمی به کار برده می‌شوند (Laaboudi et al., 2012). وزن‌های شبکه‌های عصبی بر مبنای مقایسه بین خروجی شبکه و داده‌های واقعی به روزرسانی می‌شوند و این کار تا زمانی که خروجی شبکه با داده‌های واقعی که به عنوان هدف در نظر گرفته شده تطبیق پیدا کند، ادامه می‌یابد. برای آموزش شبکه‌های عصبی از بخشی از داده‌های واقعی استفاده می‌شود و پس از آموزش شبکه می‌توان آن را به‌صورت تابعی جعبه سیاه برای برآوردهای غیرخطی با عنوان نگاشت‌های غیرخطی قابل تنظیم معرفی کرد. از روش‌های آموزش می‌توان به روش ویدروهاف و پرسپترون چند لایه‌ای[2]، و .... اشاره کرد (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۰). طی سالیان اخیر، تحقیقات متعددی در خصوص برآورد و تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo) نسبت به داده‌های هواشناسی در نقاط مختلف دنیا انجام شده است (Zhang et al., 2010; Liu et al., 2010). چائوهان و شریواستاوا (۲۰۰۸) با کاهش تعداد نرون‌های ورودی شبکه عصبی به دو نرون حداقل و حداکثر دمای هوا در کشور هند، دریافتند که شبکه عصبی مصنوعی کمترین اختلاف را با نتایج فائو پنمن مانتیث در مقایسه با روش‌های تشعشعی فائو، پنمن اصلاحی و تشت تبخیر کلاس A دارد (Chauhan and Shrivastava, 2008). نورانی و سیاح فرد (۱۳۹۲) طی مطالعه‌ای کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون خطی چند متغیره و سه روش تجربی تعادل انرژی، آیرودینامیکی و ترکیبی پنمن را برای برآورد مقادیر تبخیر روزانه تشتک برای دو شهر تبریز و ارومیه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده بیانگر برتری شبکه‌های عصبی در برآورد تبخیر روزانه نسبت به سایر مدل‌ها بود. نتایج تحقیقات لابودی و همکاران (۲۰۱۲) در یک منطقه خشک از آفریقا و همچنین هو و همکاران (۲۰۱۲) در شمال غربی چین نشان دادند که در نواحی خشک و نیمه‌خشک، شبکه عصبی دقت بالاتری در برآورد تبخیر و تعرق نسبت به مدل‌های تجربی دارد (Laaboudi et al., 2012; Huo et al., 2012). آنتونوپولوس و همکاران (۲۰۱۷) تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مدل کرده و عنوان کردند که مدلی با ساختار نهایی ۱-۶-۴ با دقت بالایی قادر به تخمین ETo است (Antonopoulos and Antonopoulos, 2017). دئو و شاهین (۲۰۱۵) طی تحقیقی به بررسی کارآیی شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از پارامترهای هواشناسی و اقلیمی مربوط به هشت ایستگاه در منطقه شرق استرالیا پرداختند. آنها گزارش کردند مدل شبکه عصبی با یک لایه پنهان و استفاده از قانون آموزش لونبرگ- مارکوارت و تابع تانژانت سیگموئید، بهترین مدل در برآورد تبخیر و تعرق است (Deo and Sahin, 2015). نتایج مطالعات حسینی و همکاران (۱۳۹۵) در منطقه شهرکرد نشان داد شبکه عصبی مصنوعی با دو تابع تانژانت سیگموئید و لوگ سیگموئید در لایه پنهان، تابع خطی در لایه خروجی و قاعده آموزش لونبرگ مارکوات با دقت قابل قبولی، تبخیر و تعرق مرجع را برآورد کرده و این پارامتر نسبت به دو شاخص دمای ماکزیمم و سرعت باد، بیشترین حساسیت را دارد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که میزان ETo در حوضه رودخانه شیانگ در چین در تابستان به انرژی قابل دسترس حساسیت زیادی دارد. در حالی که در زمستان، به سرعت باد، بیشترین حساسیت را نشان می‌دهد (Zhang et al., 2010). دین‌پژوه و شریفی (۱۳۹۲) گزارش نمودند که در دو ایستگاه سنندج و سبزوار چه در مقیاس سالانه و چه در مقیاس ماهانه، بیشترین حساسیت ETo نسبت به درجه حرارت میانگین هوا بود. نتایج تحقیقات محمدرضاپور (۱۳۹۶) در استان سیستان و بلوچستان نشان داد که تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه در این منطقه نسبت به شاخص‌های متوسط دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد، بیشترین حساسیت را دارد. نتایج مطالعات زین‌العابدینی رضاآباد و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که پارامترهای دمای متوسط، سرعت باد در ارتفاع دو متری و کمبود فشار بخار، بیشترین تأثیر را در برآورد مناسب تبخیر و تعرق مرجع روزانه در منطقه کرمان دارند (Zeinolabedini-Rezaabad et al., 2020). همچنین بر اساس مطالعات وانگ و همکاران در چین، تبخیر و تعرق مرجع بیشتر تحت تأثیر پارامترهای تعداد ساعات آفتابی، دمای متوسط، رطوبت نسبی متوسط و سرعت باد در ارتفاع دو متری است (Wang et al., 2019).

اغلب مطالعات انجام شده در خصوص مدلسازی و تحلیل حساسیت مدل‌ها برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی، معمولاً در یک ایستگاه خاص و یا با تعداد محدود سال‌های آماری انجام شده‌اند. از طرفی، امروزه پرکاربردترین ابزار برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع، نرم‌افزار استاندارد معرفی‌شده توسط فائو تحت عنوان ETo-calculator می‌باشد. لکن تا کنون مطالعه‌ای در خصوص مقایسه کارآیی این نرم‌افزار در شرایط کمبود داده‌های هواشناسی با شبکه‌های عصبی مصنوعی در ایران انجام نشده است. هدف از پژوهش حاضر تعیین یک مدل شبکه عصبی مصنوعی بهینه برای مدل‌سازی ETo و تحلیل حساسیت آن و مقایسه کارآیی مدل منتخب با نرم‌افزار ETo-calculator (V.5) در شرایط کمبود داده‌های هواشناسی می‌باشد. به‌عنوان یک مطالعه موردی، استان تهران با ۱۲ ایستگاه هواشناسی ورامین، شهریار، فرودگاه امام خمینی (ره)، تهران، شمیران، فیروزکوه، امین‌آباد فیروزکوه (GAW)، مهرآباد، دماوند، چیتگر، آبعلی و دوشان‌تپه

1- Artificial Neural Networks (ANNs)
2- Multi-Layer Perceptron (MLP)

انتخاب شد. ایستگاه‌های مورد مطالعه از سه نوع ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک اصلی، تکمیلی و فرودگاهی می باشند. پس از انتخاب شبکه عصبی مناسب، اقدام به تحلیل حساسیت شبکه و همچنین نرم‌افزار ETo-calculator (V.5) نسبت به پارامترهای هواشناسی شده و سپس عوامل مؤثر در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع رتبه‌بندی شدند. در نهایت نیز با بررسی همه سناریوهای ممکن در چینش پارامترهای هواشناسی مورد استفاده با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA[1])، بهترین سناریو انتخاب و معرفی شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

استان تهران از لحاظ موقعیت جغرافیایی بین ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول‌شرقی قرار گرفته است. ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد بین ۱۸۰۰ متر در شمال تا ۱۲۰۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰ متر در جنوب متغیر است. در شکل ۱ موقعیت شهرستان‌های استان تهران و ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه نشان داده شده است.

تعیین ETo با استفاده از ETo-calculator و مدل‌سازی با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی

در مطالعه حاضر ابتدا با استفاده از نرم‌افزار (Raes, (V.5 ETo-calculator (2012، متوسط روزانه مقادیر تبخیر–تعرق گیاه مرجع (ETo) با استفاده از معادله استاندارد فائو پنمن مانتیث در ۱۲ ایستگاه هواشناسی استان تهران شامل؛ ایستگاه‌های ورامین، شهریار، فرودگاه امام خمینی(ره)، تهران، شمیران، فیروزکوه، امین‌آباد فیروزکوه (GAW)، مهرآباد، دماوند، چیتگر، آبعلی و دوشان‌تپه در یک دوره آماری ۱۰ ساله برآورد گردید. نرم‌افزار ETo-calculator توسط بخش آب و خاک سازمان جهانی فائو برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع ارائه شده است. داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این نرم‌افزار شامل؛ مقادیر درجه حرارت حداکثر و حداقل هوا، درصد رطوبت نسبی حداکثر و حداقل هوا، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه) و تعداد ساعات آفتابی است.

مدل‌سازی ETo از طریق شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از داده‌های هواشناسی (آمار ۱۰ ساله روزانه) ۱۲ ایستگاه هواشناسی استان تهران انجام گرفت. ورودی‌های مورد استفاده در تعیین شبکه عصبی مصنوعی مناسب عبارتند از: متوسط روزانه مقادیر درجه حرارت حداکثر و حداقل هوا ((Tmax, Tmin (°C)، درصد رطوبت نسبی حداکثر و حداقل هوا (RHmax, RHmin)، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (U_2(m/s)) و تعداد ساعات آفتابی در شبانه‌روز (n) و خروجی نیز ETo محاسبه شده بر اساس داده‌های تشت تبخیر ایستگاه‌های هواشناسی ذکرشده، در نظر گرفته شدند (رابطه ۱).

$$ET_o = K_{pan} \times E_p \quad (۱)$$

که در آن K_{pan} ضریب تشتک و E_p مقادیر تبخیر از تشتک (mm/d) است.

برای محاسبه ضریب تشتک در ایستگاه‌های هواشناسی ذکر شده از روابط مربوطه بر پایه تشت تبخیر استفاده شد. به این منظور، اقلیم ایستگاه‌های هواشناسی بر اساس روش دومارتن تعیین شده (رابطه ۲) و از رابطه تجربی مربوط به هر اقلیم برای تعیین ضریب تشتک استفاده شد. بر اساس روش دومارتن، ۱۲ ایستگاه مورد مطالعه، مطابق جدول ۱، در چهار دسته اقلیمی طبقه‌بندی شدند.

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (۲)$$

که در آن: P متوسط بارش سالانه (میلی‌متر)، T متوسط دمای سالانه (سانتی‌گراد) و I ضریب خشکی دومارتن هستند.

برای تعیین ضریب تشتک در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، نیمه مرطوب و مرطوب به‌ترتیب از روش‌های Snyder (1992) (رابطه ۳)، Raghuwanshi & Wallender (1998) (رابطه ۴)، Mohamed et al. (2008) (رابطه ۵) و Pereira (1995) (رابطه ۶) استفاده شدند (قمرنیا و سلطانی، ۱۳۹۷).

$$K_{pan} = 0.482 + [0.024 \times Ln(F)] - (0.000376 \times U_2) + (0.0045 \times RH) \quad (۳)$$

$$K_{pan} = 0.5944 + (0.0242 \times X_1) - (0.0583 \times X_2) - (0.1333 \times X_3) - (0.2083 \times X_4) + (0.0812 \times X_5) + (0.1344 \times X_6) \quad X_1 = Ln(F);\ X_2, X_3, X_4 = 0\ if\ U_2 < 175;\ X_2 = 1\ if\ 175 \le U_2 < 425;\ X_3 = 1\ if\ 425 \le U_2 < 700;\ X_4 = 1\ if\ U_2 \ge 700;\ X_5, X_6 = 0\ if\ RH < 40\%;\ X_5 = 1\ if\ 40\% \le RH < 70\%;\ X_6 = 1\ if\ RH \ge 70\% \quad (۴)$$

$$K_{pan} = 0.62407 - (0.0266 \times \big(Ln(F)\big) - (00028 \times U_2) + (0.0026 \times (RH)) \quad (۵)$$

$$K_{pan} = 0.85 \times (\Delta + \gamma)/[(\Delta + \gamma) \times (1 + 0.33 \times U_2)] \quad (۶)$$

در این معادلات U_2 = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (Km/day)، RH = رطوبت نسبی متوسط روزانه (٪)، F= فاصله از پوشش گیاهی (m)، Δ= شیب منحنی فشار بخار در مقابل دما $(kPa/°C)$ و γ= ضریب رطوبت $(kPa/°C)$ است.

به منظور افزایش سرعت و دقت شبکه و ممانعت از وزن‌دهی نامتعارف به ورودی‌های شبکه به علت پراکندگی داده‌ها، از رابطه زیر برای نرمال‌سازی مقادیر ورودی استفاده شد (Tayfur and Singh, 2005). در نهایت می‌توان خروجی‌های شبکه را با معکوس نمودن الگوریتم استانداردسازی، به حالت اولیه برگرداند.

$$x_n = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (۷)$$

1- Principal Component Analysis

در این رابطه، x_n مقدار نرمال شده، x_i متغیر مورد نظر، x_{min} و x_{max} نیز به‌ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر هستند.

در پایان برای بررسی و آزمون اعتبار شبکه‌ها، از دو پارامتر R^2 و MSE استفاده شد. میانگین مربعات خطا (MSE) با استفاده از رابطه ۸ تعیین شد.

$$MSE = \frac{\sum_1^n (exp-cal)^2}{N} \quad (۸)$$



شکل ۱- موقعیت شهرستان‌های استان تهران و ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

جدول ۱- مقادیر ضریب خشکی دو مارتن و اقلیم ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه هواشناسی	(I)ضریب خشکی دومارتن	اقلیم	ایستگاه هواشناسی	(I) ضریب خشکی دومارتن	اقلیم
ورامین	۵/۴	خشک	تهران	۱۱	نیمه‌خشک
فرودگاه امام خمینی	۵/۶	خشک	فیروزکوه	۱۳/۷	نیمه‌خشک
شهریار	۷	خشک	دماوند	۱۶/۱	نیمه‌خشک
مهرآباد	۸/۴	خشک	شمیران	۱۶/۵	نیمه‌خشک
چیتگر	۹	خشک	امین‌آباد فیروزکوه	۲۶/۳	نیمه‌مرطوب
دوشان تپه	۹/۴	خشک	آبعلی	۲۸/۳	مرطوب

در این رابطه، N= تعداد داده‌ها، exp: داده‌های مشاهداتی و cal: داده‌های محاسباتی متناظر با exp هستند.

در این تحقیق، مجموع ۴۳۸۰ داده مربوط به تبخیر و تعرق گیاه مرجع، به سه دسته برای آموزش (۶۰٪)، برازش متقابل (۱۵٪) و صحت‌سنجی شبکه عصبی مصنوعی (۲۵٪)، تقسیم شدند. بهینه‌سازی شبکه با استفاده از روش سعی و خطا و با کاربرد نرم‌افزار NeuroSolutions (V.5) انجام شد. برای بهینه‌سازی گام به گام شبکه عصبی مصنوعی مطابق چارت ارائه شده در شکل ۲، گام‌ها به صورت متوالی دنبال شدند.

تحلیل حساسیت و تعیین سناریوی مناسب

برای ارزیابی حساسیت مدل شبکه عصبی انتخاب‌شده و ETo-calculator به پارامترهای ورودی، تکنیک حذف داده ورودی با استفاده از نرم‌افزار NeuroSolutions Infinity (V 1.1.1.0) به‌کار گرفته شد (Yesilnacar et al. 2008). این پروسه به جهت حذف ورودی‌های کم‌اثر و نیز برای بهبود عملکرد شبکه کاربرد دارد. همچنین به منظور تعیین سناریوی مناسب در برآورد ETo، از تکنیک تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) جهت پیش‌پردازش داده‌های ورودی به مدل استفاده شد. به منظور پیش پردازش ورودی‌ها، می توان دو رویکرد انتخاب ویژگی یا استخراج ویژگی را در نظر گرفت. در رویکرد انتخاب ویژگی، زیرمجموعه‌های مختلف از ورودی‌ها یک به یک مورد ارزیابی قرار گرفته و بهترین زیرمجموعه به عنوان ویژگی‌های منتخب معرفی می‌شود. در رویکرد استخراج ویژگی، با روش‌های جبر خطی، ویژگی‌ها به یک فضای دیگر تبدیل شده و تعدادی ویژگی جدید ایجاد می‌شود. یکی از روش‌های مرسوم رویکرد استخراج ویژگی روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) می‌باشد. این روش که مبتنی بر نتایج کاربرد جبر خطی است، به شکل خیلی ساده، بصورت ناپارامتریک و غیرنظارتی بر روی مجموعه داده‌های ورودی اعمال می‌گردد. در روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، متغیرهای موجود در یک فضای چند حالته همبسته به یک مجموعه از مؤلفه‌های غیرهمبسته تبدیل می‌شوند که هر کدام از آنها ترکیب خطی از متغیرهای اولیه ورودی می‌باشند. مؤلفه‌های غیرهمبسته حاصل، مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شوند. این مؤلفه‌ها را می‌توان با استفاده از مجموعه‌ی داده‌های اصلی، ماتریس کوواریانس یا ماتریس همبستگی محاسبه

کرد. به عبارت دیگر مؤلفه‌های اصلی PCA، مجموعه متغیرهای اولیه را به مجموعه ای از ترکیب خطی متعامد با حداکثر مقدار واریانس تبدیل می‌کند. کاربردهای روش PCA شامل کاهش تعداد متغیر ورودی و یافتن ساختار ارتباطی بین متغیرها به منظور افزایش دقت می‌باشد (Adnan et al., 2017).

نتایج و بحث

محاسبات مربوط به انتخاب شبکه عصبی مصنوعی بهینه

نتایج حاصل از مراحل۱۰گانه مدل‌سازی تبخیر و تعرق گیاه مرجع در جدول ۲ نمایش داده شده‌اند. ابتدا برای تعیین الگوریتم آموزش بهینه سه الگوریتم MLP، GFF[1] و RBF[2] مورد بررسی قرار گرفته و سایر پارامترهای مؤثر در این مرحله ثابت در نظر گرفته شدند. با توجه به نتایج جدول مشاهده می‌شود که الگوریتم MLP با داشتن مقادیر بیشتر R^2 و مقادیر کمتر MSE، به‌عنوان الگوریتم بهینه جهت انجام ادامه مطالعات در نظر گرفته شد. در گام دوم با به‌کارگیری الگوریتم بهینه انتخاب شده در مرحله قبل (MLP) و ثابت گرفتن سایر پارامترهای شبکه، تعداد نرون در لایه میانی بهینه‌سازی شد. به این منظور، محاسبات از تعداد ۳ نرون در لایه پنهان آغاز شد و تا زمانی که مقدار MSE تغییر قابل توجهی نکند، ادامه یافت. نتایج محاسبات نشان داد که با افزایش تعداد نرون‌ها تا ۲۵، مقدار MSE کاهش قابل ملاحظه‌ای یافت، لیکن بعد از این تعداد با افزایش بیشتر تعداد نرون‌ها کاهش بسیار کمی در MSE مشاهده شد. از این‌رو به جهت جلوگیری از پدیده بیش برازش شبکه، تعداد ۲۵ نرون در لایه میانی به عنوان تعداد نرون بهینه، در نظر گرفته شد. برای بهینه‌سازی تابع انتقال بهینه لایه پنهان از توابع انتقال رایج (تانژانت، سیگموئید، خطی، تانژانت خطی و سیگموئید خطی) استفاده شد. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، بهترین تابع انتقال شبکه عصبی مربوط به تابع تانژانت خطی است. در راستای تعیین بهترین قانون آموزش لایه پنهان از قوانین (لونبرگ- مارکوارت، مومنتوم و دلتا بار دلتا) استفاده شد. در شبکه مورد بررسی، قانون لونبرگ- مارکوارت با بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار MSE، برای ادامه مطالعات انتخاب شد (جدول ۲). مشابه بند سوم انتخاب تابع انتقال لایه خروجی با توجه به شرایط بهینه شده در بندهای پیشین انجام شده و در این مرحله با مقایسه توابع انتقال یاد شده، مشاهده شد که کمترین مقدار MSE مربوط به تابع تانژانت بود. در مرحله بعد مشابه بند چهارم، قوانین لونبرگ- مارکوارت، مومنتوم و دلتا بار دلتا برای تعیین قانون آموزش بهینه برای لایه خروجی مقایسه شده و نتایج نشان داد که کمترین مقدار MSE مربوط به قانون لونبرگ- مارکوارت است (جدول ۲). در گام انتخاب تعداد لایه پنهان بهینه، از سایر پارامترهای شبکه که در مراحل قبل بهینه‌سازی شده بودند، استفاده شد. به این منظور با افزایش تعداد لایه‌ها، مقادیر R^2 و MSE مربوط به هر شبکه بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌ها به ۲، مقدار MSE کاهش یافت. با افزایش تعداد لایه‌ها به ۳ لایه، مقادیر MSE کمی کمتر شد. لیکن جهت ساده‌سازی شبکه، تعداد ۲ لایه به‌عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته شد. با توجه به انتخاب دو لایه پنهان، نرون‌های بهینه‌سازی شده در گام ۲، در لایه‌ها توزیع شده و در هر شبکه، مقادیر MSE و R^2 مقایسه شد. در نهایت با توجه به شرایط بهینه‌سازی شده در مراحل قبلی، اقدام به تعیین ساختار نهایی شبکه شد. بر این اساس ساختار نهایی شبکه عصبی مصنوعی بهینه جهت تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع عبارتست از: شبکه عصبی MLP، تابع انتقال تانژانت خطی برای لایه پنهان و تانژانت برای لایه خروجی، قانون آموزش لونبرگ- مارکوارت برای لایه پنهان و لایه خروجی و ساختار نهایی ۱-۱۴-۱۱-۶.

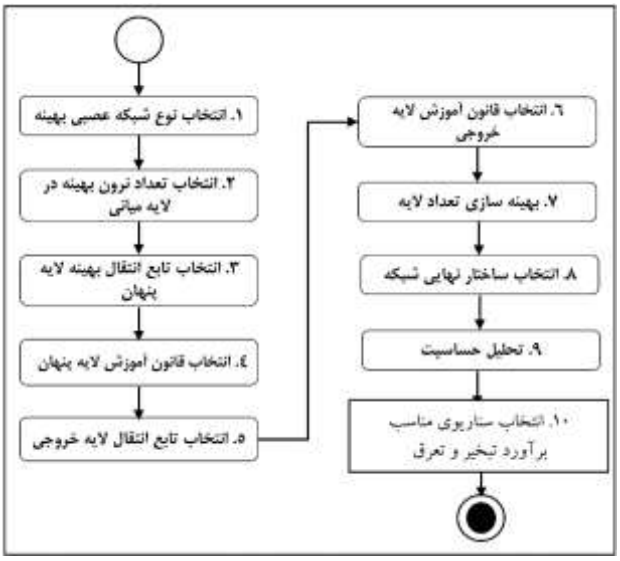
آنتونوپولوس و آنتونوپولوس (۲۰۱۷) شبکه‌ای با یک لایه پنهان و ساختار نهایی ۱-۶-۴ را به عنوان شبکه مناسب برای برآورد ETo در یونان معرفی کردند (Antonopoulos and Antonopoulos, 2017)، در حالیکه نتایج تحقیقات دئو و شاهین (۲۰۱۵) نشان داد شبکه‌ای با یک لایه پنهان و ساختار نهایی ۱-۴۳-۱۸ بهترین مدل برای برآورد ETo در استرالیا می‌باشد (Deo and Sahin, 2015). در شکل ۳ مقایسه بین نتایج خروجی مدل بهینه با داده‌های تبخیر و تعرق محاسباتی که جهت آزمون در شبکه عصبی انتخاب شده‌اند، نمایش داده شده است. رابطه رگرسیون بین داده‌های آزمون و خروجی مدل نیز در شکل ۴ نمایش داده شده است. با توجه به مقدار R^2= ٪۹۸، مدل شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شده انطباق مناسبی با داده‌های محاسباتی دارد.

تحلیل حساسیت مدل شبکه عصبی انتخاب‌شده و ETo-calculator

برای تحلیل حساسیت مدل شبکه عصبی مصنوعی انتخاب‌شده، با توجه به این‌که در مرحله قبل بهترین شبکه ممکن برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع آموزش داده و دقت آن سنجیده شد، حساسیت خروجی مدل نسبت به هر یک از پارامترهای ورودی بررسی شد. با توجه به شکل ۵، مشاهده می‌شود که پارامترهای مؤثر بر مدل‌سازی ETo به ترتیب عبارتند از: درجه حرارت حداکثر، درجه حرارت حداقل، درصد رطوبت نسبی حداکثر، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، تعداد ساعات آفتابی در شبانه‌روز و نهایتاً درصد رطوبت نسبی حداقل هوا. برای تحلیل حساسیت ETo-calculator نیز از تکنیک حذف پارامترهای ورودی استفاده شد. با این تفاوت که ETo-calculator به منظور برآورد ETo به حداقل دو پارامتر ورودی درجه حرارت حداکثر و حداقل وابسته است. بنابراین نرم‌افزار نسبت به این

1- Generalized Feed Forward
2- Radial Basis Functions

دو پارامتر بسیار حساس بوده و تحلیل حساسیت آن نسبت به سایر پارامترهای ورودی بررسی شد (شکل ۶). نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل شبکه عصبی نیز مؤید این مطلب است که دو پارامتر درجه حرارت حداکثر و حداقل بیشترین تأثیر را در برآورد ETo دارند.



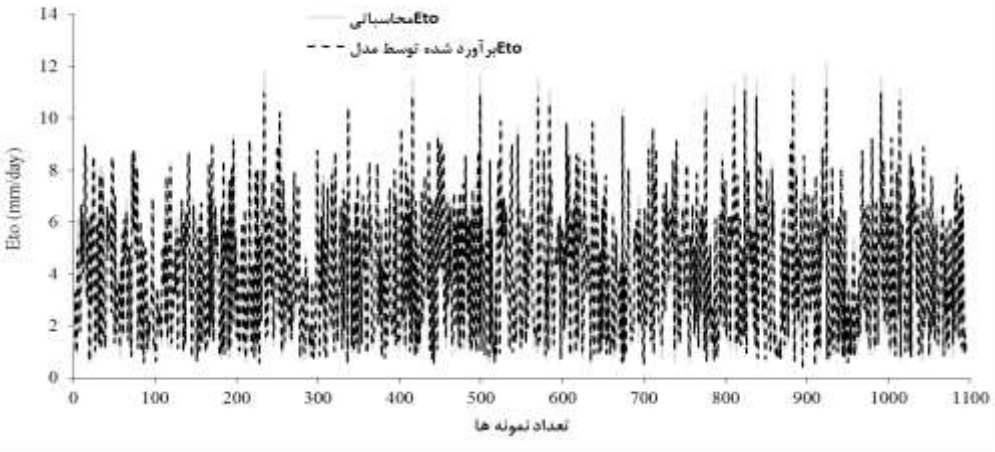
شکل ۲- مراحل بهینه‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

جدول ۲- نتایج مراحل مختلف انتخاب شبکه بهینه در مدل‌سازی تبخیر و تعرق گیاه مرجع

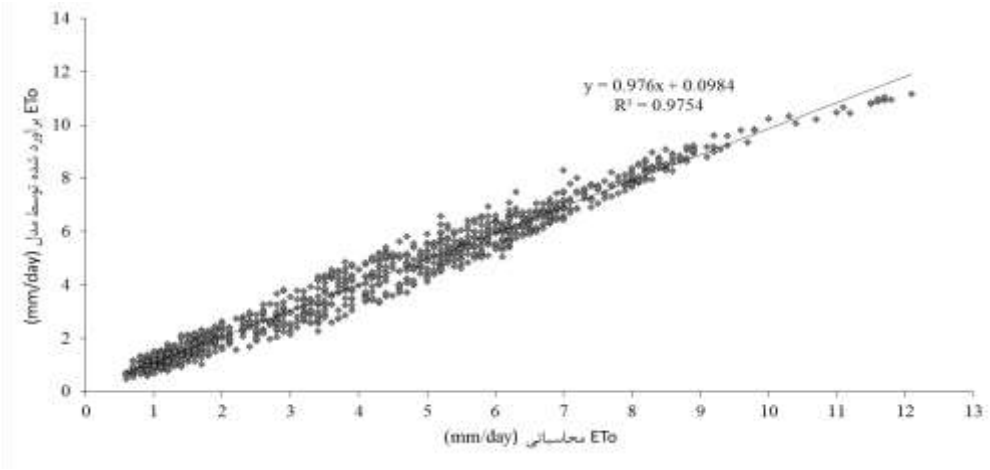
گام‌های انتخاب مدل بهینه / پارامترهای شبکه	الگوریتم	R^2	MSE
۱- مدل شبکه عصبی	MLP	۰/۹۸۸۵ *	۰/۰۲۹
	GFF	۰/۷۰۵۸	۰/۴۲۱
	RBF	۰/۷۸۸۴	۰/۲۴۰
۲- تعداد نرون در لایه میانی	۲۵		
۳- تابع انتقال لایه پنهان	تانژانت	۰/۷۲۱۹	۰/۳۳۴
	سیگموئید	۰/۶۲۱۲	۰/۶۳۲
	خطی	۰/۵۷۷۰	۰/۷۹۹
	تانژانت خطی	۰/۹۰۹۵ *	۰/۰۹۷
	سیگموئید خطی	۰/۸۰۰۷	۰/۲۰۲
۴- قانون آموزش لایه پنهان	لونبرگ- مارکوارت[1]	۰/۹۴۶۵ *	۰/۰۵۷
	مومنتوم	۰/۸۵۴۲	۰/۱۳۰
	دلتا بار دلتا	۰/۶۹۹۷	۰/۴۴۴
۵- تابع انتقال لایه خروجی	تانژانت	۰/۹۳۱۲ *	۰/۰۸۷
	سیگموئید	۰/۶۵۶۰	۰/۵۶۸
	خطی	۰/۶۰۹۸	۰/۶۹۱
	تانژانت خطی	۰/۸۸۸۱	۰/۱۱۳
	سیگموئید خطی	۰/۶۸۵۰	۰/۵۰۱
۶- قانون آموزش لایه خروجی	لونبرگ- مارکوارت	۰/۹۲۸۰ *	۰/۱۰۱
	مومنتوم	۰/۷۳۷۱	۰/۲۶۸
	دلتا بار دلتا	۰/۵۹۵۴	۰/۷۴۵
۷- بهینه‌سازی تعداد لایه	۲		
۸- ساختار نهایی شبکه	۱-۱۴-۱۱-۶		

*: نشان‌دهنده بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار MSE می‌باشد.

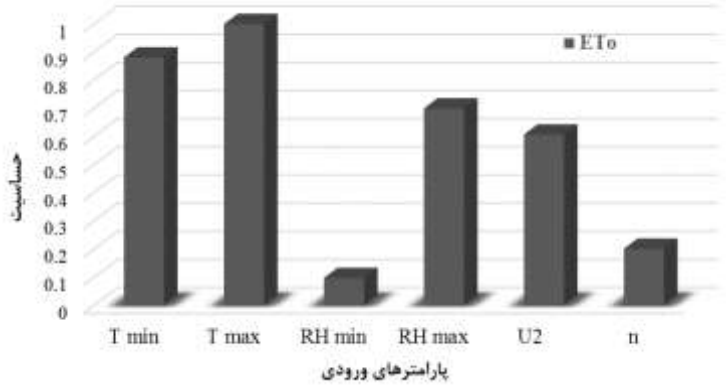
1- Levenberg-Marquardt



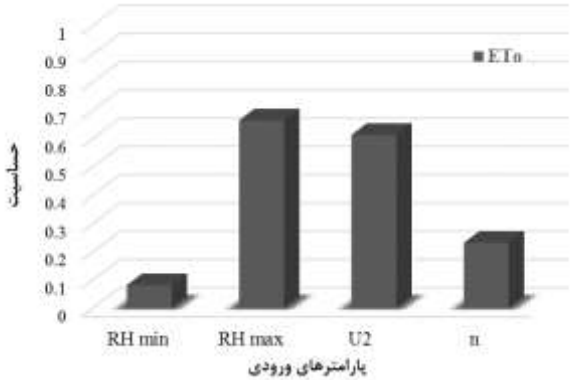
شکل ۳- مقایسه نتایج خروجی مدل بهینه با داده‌های آزمون



شکل ٤- رابطه رگرسیونی بین داده‌های آزمون و خروجی مدل بهینه



شکل ٥- تحلیل حساسیت مدل بهینه نسبت به پارامترهای ورودی برای برآورد تبخیر و تعرق (Tmax: درجه حرارت حداکثر، Tmin: درجه حرارت حداقل، RHmax: درصد رطوبت نسبی حداکثر، RHmin: درصد رطوبت نسبی حداقل، U_2: سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، n: تعداد ساعات آفتابی در شبانه‌روز)



شکل ٦- تحلیل حساسیت نرم‌افزار ETo-calculator نسبت به پارامترهای ورودی برای برآورد تبخیر و تعرق (RHmax: درصد رطوبت نسبی حداکثر، RHmin: درصد رطوبت نسبی حداقل، U_2: سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، n: تعداد ساعات آفتابی در شبانه‌روز)

با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که پارامترهای مؤثر بر مدل‌سازی ETo توسط ETo-calculator به‌ترتیب عبارتند از: درصد رطوبت نسبی حداکثر، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، تعداد ساعات آفتابی در شبانه روز و درصد رطوبت نسبی حداقل هوا. بنابراین با توجه به آن‌که تحلیل حساسیت مدل شبکه عصبی مصنوعی انتخاب‌شده و ETo-calculator روند مشابهی را نشان می‌دهند، به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تمامی پارامترهای ورودی تا حدودی بر مدل‌سازی تأثیرگذار هستند، درجه حرارت حداکثر و حداقل تأثیرگذارترین و تعداد ساعات آفتابی در شبانه‌روز و حداقل رطوبت نسبی هوا، کم‌اثرترین پارامترها در برآورد ETo هستند. این نتایج تا حدودی منطبق بر نتایج حسینی و همکاران (۱۳۹۵)، دین‌پژوه و همکاران (۱۳۹۲) و محمدرضاپور (۱۳۹۶) می‌باشد. بر اساس مطالعات حسینی و همکاران (۱۳۹۵) در منطقه شهرکرد دو پارامتر دمای حداکثر و سرعت باد بیشترین تأثیر را در برآورد ETo دارند. نتایج تحقیقات محمدرضاپور (۱۳۹۶) نشان داد که متوسط دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد به ترتیب اثرگذارترین پارامترها در برآورد ETo در منطقه سیستان و بلوچستان هستند. همچنین نتایج مطالعات دین‌پژوه و شریفی (۱۳۹۲) نیز نشان داد که متوسط دمای هوا اثرگذارترین پارامتر در برآورد ETo در مناطق سنندج و سبزوار می‌باشد. در مقابل مساعدی و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند که در منطقه بندر انزلی، دو پارامتر رطوبت نسبی حداکثر و سرعت باد تأثیر بسزایی در تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع دارند (Mosaedi et al., 2016).

انتخاب سناریوی مناسب در برآورد تبخیر و تعرق به روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی

بعد از انجام تحلیل حساسیت برای آن‌که بیشتر به تأثیر هر کدام از پارامترهای ورودی پی برده شود، از روش (PCA) به منظور انتخاب سناریوی مناسب در چینش داده‌های ورودی استفاده شد. نتایج حاصل از پیش‌پردازش پارامترهای ورودی به روش PCA در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که جدول ۳، نشان می‌دهد مقدار ویژه[1] اولین مؤلفه بزرگتر از یک بوده و حدود ۹۰ درصد پراکندگی مجموعه داده‌ها[2] توسط این مؤلفه بازگو می‌شود. با توجه به ضرایب محاسباتی در بردار اول که در جدول شماره ۴ قابل مشاهده است، متغیرهای Tmax، Tmin، RHmax، U_2 و n به ترتیب بیشترین تا کمترین همبستگی را با مؤلفه اول دارا می‌باشند.

ارتباط بین مؤلفه اول که در خروجی‌های روش PCA، F_1 نامیده می‌شود و متغیرهای اصلی با توجه به جدول ۴ به‌صورت رابطه (۹) می‌باشد. با توجه به وزن کم پارامتر n در مقایسه با سایر پارامترهای ورودی، می‌توان از این پارامتر چشم‌پوشی کرد.

$$F_1 = 0.66\,Tmax + 0.52RHmax + 0.45Tmin + 0.37U_2 + 0.002n \quad (۹)$$

در نهایت نتایج حاصل از ترکیب PCA با شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شده نشان داد که، سناریوی استفاده از چهار پارمتر Tmax، Tmin، RHmax و U_2 با شاخص‌های آماری R^2=۰/۹۴ و MSE=۰/۰۹۷، بهترین سناریو در کاهش تعداد پارامترهای ورودی به مدل، کاهش حجم مدل و ساده سازی آن است. به همین دلیل و در نهایت چنانچه دسترسی به تمامی پارامترهای هواشناسی ممکن نباشد، تنها با بهره‌گیری از سناریوهای عنوان شده و مدل شبکه عصبی انتخاب‌شده، می‌توان با دقت قابل قبولی ETo را برآورد نمود.

1- Eigenvalue
2- Proportion

جدول ۳- مؤلفه‌های اساسی روش PCA

مؤلفه‌های اصلی[1] / شماره مؤلفه	مقدار ویژه	درصد پراکندگی مجموعه داده‌ها
۱	۴/۲۵	۰/۹۰
۲	۰/۲۷	۰/۰۶
۳	۰/۱۲	۰/۰۲
۴	۰/۰۱۷	۰/۰۰۱

جدول ٤- اوزان متغیرهای ورودی به ازای هر مؤلفه اصلی PCA

متغیرهای ورودی / شماره مؤلفه	Tmin	Tmax	RHmin	RHmax	U_2	n
۱	۰/۴۵	۰/۶۶	۰/۰۰	۰/۵۲	۰/۳۷	۰/۰۰۲
۲	۰/۴۳	−۰/۴۳	۰/۰۸۷	۰/۱۲	۰/۲۳	−۰/۳۲
۳	−۰/۰۹۸	۰/۱۷	−۰/۲۳۴	−۰/۲۶	۰/۰۴	−۰/۱۶
۴	−۰/۱۲	−۰/۵۷	۰/۳۹	−۰/۱۴	−۰/۸۷	۰/۱۴

نتیجه‌گیری

شناخت فرآیند تبخیر و تعرق، به‌عنوان یکی از اثرگذارترین پارامترها بر بیلان آبی چه در مقیاس‌های کوچک مانند مزرعه و چه در مقیاس بزرگی مانند حوضه آبریز، دارای اهمیت بسیاری است. محدودیت‌های منابع آبی و بحران آب در کشور از یک سو و سهم بخش کشاورزی به‌عنوان عمده‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب از سویی دیگر، لزوم استفاده از روش‌های نوین و قابل قبول به منظور مدیریت صحیح آب در این بخش را نمایان‌تر کرده است. برآورد صحیح و دقیق نیاز آبی گیاه مرجع منجر به طراحی دقیق‌تر سامانه‌های آبیاری، برنامه‌ریزی مناسب آبیاری و در نهایت کاهش تلفات آب می‌گردد. روش‌هایی همانند روش فائو پنمن مانتیث که مقبولیت زیادی در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع دارند، نیازمند پارامترهای فراوانی بوده و لذا زمان و هزینه بالایی را برای اندازه‌گیری می‌طلبند. به همین دلیل استفاده از یک مدل کارآ، که توانایی برآورد تبخیر و تعرق بر اساس داده‌های هواشناسی موجود و نیز تحلیل حساسیت این پارامتر نسبت به داده‌های هواشناسی را داشته باشد، می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش زمان و هزینه اندازه‌گیری‌ها و همچنین کاهش ریسک‌پذیری پروژه‌ها داشته باشد. در این پژوهش یک مدل شبکه عصبی مصنوعی بهینه برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق گیاه مرجع انتخاب شد. برای این منظور شبکه عصبی مصنوعی، طی ۱۰ گام متوالی، بهینه‌سازی شده و مدل نهایی با دقت بالایی ETo را مدل‌سازی کرد ($R^2 \cong$ ٪۹۸). مشخصات شبکه انتخاب‌شده برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق گیاه مرجع عبارتست از: شیوه آموزش پرسپترون چند لایه‌ای با دو لایه میانی، توابع انتقال تانژانت خطی و تانژانت برای لایه‌های پنهان و خروجی، قانون آموزش لونبرگ مارکوات برای لایه پنهان و لایه خروجی و ساختار ۱-۱۴-۱۱-۶. نتایج تحلیل حساسیت مدل شبکه عصبی مصنوعی انتخاب‌شده نسبت به پارامترهای هواشناسی نشان داد که مدل انتخاب‌شده و ETo-calculator روند مشابهی داشته و پارامترهای دمای حداکثر و تعداد ساعات آفتابی در شبانه روز به‌ترتیب اثرگذارترین و کم‌اثرترین پارامترها در برآورد ETo هستند. همچنین ارزیابی سناریوهای مختلف در چینش و پیش‌پردازش پارامترهای هواشناسی مورد استفاده با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، نشان داد که استفاده از سناریوی کاربرد چهار پارامتر دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداکثر و سرعت باد می‌تواند با دقت قابل قبولی تبخیر و تعرق گیاه مرجع را برآورد کند.

1- Principal Components

منابع

حسینی، س.م.ر.، گنجی خرم‌دل، ن. و خبت‌آبادی فراهانی، ا.ح. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل‌های تجربی و هوشمند در تخمین تبخیر و تعرق مرجع در شرایط حداقل داده‌های اقلیمی؛ مطالعه موردی شهرکرد. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۷ (۲۵): ۱۴۱-۱۲۸.

دین‌پژوه، ی. و شریفی، ع.ر. ۱۳۹۲. حساسیت تبخیر و تعرق گیاه مرجع به تغییر در پارامترهای هواشناسی (مطالعه موردی: سنندج و سبزوار). نشریه دانش آب و خاک. ۲۳ (۳): ۲۵-۴۲.

قمرنیا، ه .و سلطانی، ن. ۱۳۹۷. بررسی کارآیی روش‌های تجربی برآورد تبخیر-تعرق مرجع (بر پایه تشت تبخیر) در اقلیم‌های مختلف (مطالعه موردی ایران). تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۴): ۱۹۳-۱۷۴.

محمدرضاپور، ا. ۱۳۹۶. پیش‌بینی تبخیر -تعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی ژنتیک و سیستم استنتاج عصبی-فازی. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. ۷ (۲۷): ۱۵۰-۱۳۵.

نورانی، و. و سیاح‌فرد، م. ۱۳۹۲. آنالیز حساسیت داده‌های ورودی به شبکه عصبی مصنوعی به منظور برآورد مقدار تبخیر روزانه. مجله آب و فاضلاب. ۳: ۱۰۰-۸۸.

یزدانی، م.، دستجردی، ج.، مهدوی، م. و سلطانی، س. ۱۳۹۰. بررسی کارآیی شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه و زمان تأخیری در برآورد جریان‌های سطحی حوزه آبخیز زاینده‌رود. مجله علمی-پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۶: ۶۲-۵۳.

Adnan, M., Ahsan, M., Rehman, A., and Nazir, M. 2017. Estimating evapotranspiration using machine

128(3): 857-873.

Pereira, A.R., Villanova, N., Pereira, A.S., and Baebieri, V.A. 1995. A model for the class-A pan coefficient. Agricultural Water Management 76: 75–82.

Raes, D. 2012. The ETo calculator, evapotranspiration from a reference surface. Reference Manual. Version 3.2. FAO. Rome, Italy.

Raghuwanshi, N.S., and Wallender, W.W. 1998. Converting from pan evaporation to evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 124(5): 275-277.

Snyder, R.L. 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 118(6): 977–980.

Tayfur, G., and Singh, V.P. 2005. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by artificial neural network. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE 131(11): 991–1000.

Wang S., Lian, J., Peng, Y., Hu, B., and Chen, H. 2019. Generalized reference evapotranspiration models with limited climatic data based on random forest and gene expression programming in Guangxi, China. Agricultural Water Management 221: 220-230.

Yesilnacar, M.I., Sahinkaya, E., Naz, M., and Ozkaya, B. 2008. Neural network prediction of nitrate in groundwater of Harran plain, Turkey. Environmental Geology 56: 19-25.

Zeinolabedini-Rezaabad, M., Ghazanfari, S., and Salajegheh, M. 2020. ANFIS modeling with ICA, BBO, TLBO, and IWO optimization algorithms and sensitivity analysis for predicting daily reference evapotranspiration. Journal of Hydrologic Engineering 25(8): 20-33.

Zhang, X., Kang, S., Zhang, L., and Lu, J. 2010. Spatial variation of climatology monthly crop reference evapotranspiration and sensitivity coefficients in Shiyang river basin of northwest China. Agricultural Water Management 97: 1506-1516.

learning techniques. International Journal of Advanced Computer Science and Applications 8(9): 108-113.

Antonopoulos, V., and Antonopoulos, A. 2017. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables. Computers and Electronics in Agriculture 132: 86-96.

Chauhan, S., and Shrivastava, R.K. 2008. Performance evaluation of reference evapotranspiration estimation using climate based methods and artificial neural networks. Water Resources Management 23(5): 825-1023.

Deo, R., and Sahin, M. 2015. Application of the artificial neural network model for prediction of monthly standardized precipitation and evapotranspiration index using hydro-meteorological parameters and climate indices in eastern Australia. Atmospheric Research 162: 65-81.

Huo, Z., Feng, S., Kang, S., and Dai, X. 2012. Artificial neural network models for reference evapotranspiration in an arid area of northwest China. Journal of Arid Environments 82: 81-90.

Laaboudi, A., Mouhouche, B., and Draoui, B. 2012. Neural network approach to reference evapotranspiration modeling from limited climatic data in arid regions. International Journal of Biometeorology 56: 831–841.

Liu, Q., Yang, Z., Cui, B., and Sun, T. 2010. The temporal trends of reference evapotranspiration and its sensitivity to key meteorological variables in the Yellow River basin, China. Hydrological Processes 24: 2171-2181.

Mohamed, H., Wahed, A., and Snyder, R.L. 2008. Simple equation reference evapotranspiration from evaporation pans surrounded by fallow soil. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. 134(4): 425-429.

Mosaedi, A., Ghabaei-Sough, M., Sadeghi, H., Mooshakian, Y., and Bannayan, M. 2016. Sensitivity analysis of monthly reference crop evapotranspiration trends in Iran: a qualitative approach. Theoretical and Applied Climatology

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2089-2099

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۹۹-۲۰۸۹

Investigation of Artificial Neural Network Based Models and Sensitivity Analysis for Reference Evapotranspiration Estimating

S. Sepehri Sadeghian[1]*, F. Abbasi[2], G. Zarei[3], M.M. Nakhjavanimoghaddam[4]
Recived: Aug.25, 2020 Accepted: Nov.07, 2020

Abstract

Reference evapotranspiration (ETo) is one of the most critical parameters in proper design of irrigation systems. Accurate estimation of ETo leads to reduction of water losses. Due to the ability of Artificial Neural Networks (ANNs) in computational analysis of complex processes, the main objective of this study was to investigate the sensitivity of the ETo trends to key climatic factors in Tehran province using the artificial neural networks, and compare it with the ETo-calculator software results. The ETo was calculated using meteorological data (10-year data of 12 meteorological stations in Tehran province) using the ETo-calculator software. In order to model ETo, a set of inputs to artificial neural networks including the minimum and maximum air temperature (Tmax and Tmin), the minimum and maximum relative humidity (RHmin and RHmax), sunshine hours (n), and wind speed (U2) were considered. After data tagging, by optimizing the number of hidden layers and network algorithms, output values were estimated. The results indicated that artificial neural network is a suitable technique for ETo analysis ($R^2 \cong 98\%$). The best model for estimation of ETo is feed-forward Multi-Layer Perceptron (MLP) with two hidden layers in its structure (6-11-14-1), Levenberg–Marquardt training algorithm for both hidden and output layers and Linear Tanh and Tanh transfer functions for hidden and output layers, respectively. The sensitivity analysis of the model for input parameters showed that the optimal artificial neural network model and ETo calculator software have the same trend and the Tmax and n are the most effective and least effective parameters in ETo estimation, respectively. Also, based on PCA analysis results the scenario of using of four parameters (Tmax, Tmin, RHmax and U_2) as the only inputs to the selected artificial neural network, can estimate ETo with an acceptable accuracy($R^2 \cong 94\%$).

Keywords: Artificial intelligence, FAO-Penman-Monteith, Meteorological parameters, Optimization, Principal component analysis

1- Assistant Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
2- Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
3- Associate Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
4- Assistant Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: s.sepehri@aeri.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۱۱-۲۱۰۰

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2100-2111

مقاله پژوهشی

تعیین ضریب‌گیاهی ارغوان (*Cercis siliquastrum* L.) در خاک و سطوح مختلف آبیاری

حسین رحیمی[۱]، خالد احمدالی[۲*]، وحید اعتماد[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۹

چکیده

گسترش شهرنشینی و به تبع آن نیاز به افزایش سطح فضای سبز از یک طرف، کمبود منابع آب و لزوم تخصیص بهینه آب به بخش‌های مختلف مصرف‌کننده و همچنین معلوم نبودن نیازآبی اکثر گونه‌های فضای سبز، سبب شده که تعیین ضریب گیاهی و نیاز آبی این گونه‌ها به امری اجتناب‌ناپذیر تبدیل شود. در این مطالعه نیاز آبی (ET_c) و ضریب گیاهی (K_c) ارغوان معمولی (*Cercis siliquastrum L.*) با استفاده از میکرولایسیمتر به صورت فاکتوریل با دو عامل بافت خاک (در دو سطح لوم‌شنی و لوم‌رسی) و تنش خشکی (در سه سطح MAD برابر ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷) با طرح پایه کاملاً تصادفی در ۱۰ تکرار در شرایط اقلیمی کرج در سال ۹۹-۱۳۹۸ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میانگین ET_c ۱۰ روزه در MADهای ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در بافت لوم‌شنی به ترتیب برابر ۱۵/۵۶، ۱۴/۸۶ و ۱۴/۲۴ میلی‌متر و در بافت لوم‌رسی به ترتیب برابر است با ۲۱/۵۷، ۱۹/۰۲ و ۱۸/۰۶ میلی‌متر می‌باشد. در هر دو خاک مقدار ET_c در MAD ۰/۳ بیشتر از ۰/۵ و آن هم بیشتر از ۰/۷ است. مجموع نیازآبی خالص ارغوان در بافت لوم‌رسی برای MADهای ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ به ترتیب برابر ۴۹۶/۱۴، ۴۳۷/۴۷ و ۴۱۵/۳۸ میلی‌متر و در خاک لوم‌شنی برابر ۳۵۷/۹۲، ۳۴۱/۸۵ و ۳۲۷/۵۹ میلی‌متر به‌دست آمد. هم‌چنین مقدار متوسط K_c ارغوان طی دوره رشد در بافت‌های لوم‌رسی به ازای MADهای ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ به ترتیب برابر است با ۰/۳۶، ۰/۳۲ و ۰/۳۱ و برای خاک لوم‌شنی برابر با ۰/۲۷، ۰/۲۶ و ۰/۲۴ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق، تخلیه مجاز رطوبتی، روش بیلان آب، فضای سبز شهری

مقدمه

ضرورت توسعه فضای سبز شهری و اثرات مثبت آن نظیر کاهش آلودگی هوا، تعدیل دما، تلطیف هوا، آرامش روانی و ... با توجه به رشد فزاینده جمعیت شهری بر کسی پوشیده نیست. بخش فضای سبز و جنگل‌های دست‌کاشت به عنوان زیر مجموعه‌ای از بخش کشاورزی محسوب می‌شود که بیشترین مصرف آب را دارد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر کشور ما ایران، تخصیص آب علاوه بر ایجاد، حتی برای حفظ پوشش گیاهی فضای سبز شهری موجود با مشکلات فراوانی روبرو است زیرا منابع آب محدود بوده و تخصیص آب به فضای سبز شهری در رقابت شدیدی با سایر موارد مصرف نظیر کشاورزی، صنعت و حتی شرب می‌باشد (راد و همکاران، ۱۳۹۶). در این شرایط حرکت در راستای استفاده بهینه از این منابع امری اجتناب ناپذیر است. تعیین نیاز آبی و ضریب گیاهی گونه‌های فضای سبز علاوه بر کمک به طراحی صحیح شبکه‌های آبیاری فضای سبز و صرفه‌جویی در هزینه و مصرف آب، صدمات وارد شده به این گونه‌ها در اثر کم‌آبیاری یا پرآبیاری، به حداقل می‌رساند (احمدالی و همکارن، ۱۳۹۷؛ Costello et al., 2000). صدمات وارده در اثر عدم اطلاع از نیاز آبی گیاهان چه در اراضی کشاورزی، فضای سبز، جنگل‌های دست‌کاشت و طرح‌های مختلف عرصه‌های طبیعی نظیر احیای بیولوژیک و بیابانزدایی به این صورت است که آبیاری بیش از حد، علاوه بر اینکه سبب هدررفت آب می‌شود باعث شستشوی مواد غذائی خاک، سوء تهویه خاک و زه‌دار شدن اراضی می‌شود و آبیاری کمتر از حد نیاز، رشد گیاه و در نتیجه عملکرد مورد نظر را کم و حتی متوقف می‌نماید. ارغوان معمولی (*Cercis siliquastrum* L.)، بومی سرزمین‌های گرم و مدیترانه‌ای اروپا جنوبی و جنوب‌شرقی و آسیای مرکزی و غربی است(Davis et al., 2002). این گونه، در ایران به صورت خودرو بوده و قابلیت تحمل و رشد در اقالیم خشک (Prasad, 1996) و همچنین بیشتر خاک‌ها را دارد و بهترین رشد آن در خاک‌های با pH برابر ۷/۵ می‌باشد (Sternberg, 2012). علاوه بر

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم زیستی، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- استادیارگروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- دانشیار گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: khahmadauli@ut.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.4.5

سازگاری با شرایط خشک، این گونه تحمل آلودگی هوا و خاک‌های ضعیف را نیز دارند که به لحاظ ویژگی‌های اکولوژیکی مناسب کاشت در فضای سبز و جنگل‌کاری در مناطق خشک و نیمه خشک است (Zahreddine et al., 2007). این خصوصیات سبب شده که این گونه، در پروژه‌های فضاهای سبز شهری، جنگل کاری‌ها، همچنین برای حصارکشی، کنترل فرسایش، بادشکن و مامن حیات وحش بسیار زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد (فرهمند و خوشخوی، ۱۳۸۰). بررسی منابع داخلی و خارجی نشان می‌دهد که تاکنون در مورد تعیین نیازآبی گیاهان زراعی و باغی مطالعات زیادی انجام گرفته و نتایج کار به صورت سند و یا نرم‌افزار ارائه گردیده است (علایی و همکاران ۱۳۹۸). ولی مطالعات در مورد گیاهان قابل کشت در ایجاد فضای سبز و برآورد نیاز آبی گیاهان فضای سبز بسیار اندک بوده و اطلاعات کافی در اختیار نمی‌باشد. از مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. مصطفی‌زاده فرد و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای روش‌های مختلف برآورد تبخیر–تعرق مرجع را مورد مقایسه قرار دادند و ضریب گیاهی زبان‌گنجشک (*Fraxinus rotundifolia*) و سرو (*Cupressus arizonica*) را با استفاده از لایسیمتر زهکشدار تعیین نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که روش‌های تشعشع فائو، تورک و فائو بلانی‌کریدل نتایج بسیار نزدیکتری به داده‌های لایسیمتری داشتند. آنها همچنین مقادیر ضریب گیاهی در چهار مرحله ابتدایی، رشد و توسعه، میانی و ابتدایی را برای زبان‌گنجشک به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۵۶، ۰/۷۳ و ۰/۳۷ و برای سرو به ترتیب ۰/۳۲، ۰/۴۴، ۰/۵۸ و ۰/۳۴ گزارش کردند. در پژوهشی که به بررسی راهکارهای مدیریت آب در باغ گیاه‌شناسی ملبورن که شامل گونه‌های گیاهی مختلفی فضای سبز شهری است، پرداخته شد. با تخمین نیاز آبی گونه‌های موجود به کمک اندازه‌گیری عمق ریشه گیاهان، ویژگی‌های خاک و نفوذپذیری آب در خاک و پایش رطوبت خاک و با روش طبقه‌بندی آب توانستند برنامه‌ریزی مناسبی برای آبیاری فضای سبز مختلط ارائه کنند و روش آبیاری زیر سطحی همراه با به کار بردن مالچ را برای مدیریت آب فضای سبز پیشنهاد دادند (Symes et al., 2008). شکرا...زاده و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای به بررسی نیاز آبی گونه‌های خرزهره و نارون با استفاده از روش WUCOLS III و محاسبه تبخیر–تعرق مرجع با استفاده از روش فائو–پنمن مانتیث پرداختند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار نیاز آبی خرزهره و نارون در مرداد ماه بوده و به ترتیب برابر ۶/۳۱ و ۶/۵۶ میلیمتر در روز بود. راد و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی، مقدار تبخیر–تعرق، ضریب گیاهی، عملکرد و کارایی مصرف آب در دو گونه اکالیپتوس (Eucalyptus *flocktoniae* (Maiden) Maiden, E. F.Muell. *leucoxylon*) از طریق آزمایش‌های لایسیمتری و در شرایط سطوح مختلف تیمارهای رطوبتی (۱۰۰، ۷۰ و ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) بررسی شد. نیاز آبی E *flocktoniae* و *E leucoxylon* در شرایط رطوبتی ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی به ترتیب ۱۱۸۵ و ۱۶۱۷ میلی متر و ضریب گیاهی نیز به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۸۸ اندازه گیری شد. علایی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به منظور تعیین نیاز درخت سنجد در منطقه وردیج استان تهران، برای محاسبه تبخیر–تعرق مرجع از معادله تلفیقی فائو پنمن مانتیث و برای محاسبه ضریب گیاهی از روش WUCOLS III استفاده نمودند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار تبخیر–تعرق سنجد در تیر ماه، معادل۴۱/۵۷ و کمترین مقدار در دی ماه و برابر ۶/۶۵ میلیمتر بود. مقدار کل تبخیر–تعرق سنجد معادل ۲۶۶/۳۱ میلی‌متر برآورد گردید. بیشترین مقدار نیاز خالص آبیاری از ۱۶ تا ۳۱ تیر، معادل ۲۰/۲۳ و کمترین مقدار آن از ۱۵ تا ۳۰ مهر و معادل ۱۰/۲۳میلی‌متر بود. سجودی و میرزایی (۱۳۹۹) با استفاده از تلفیق دو روش WUCOLS III و بیلان آبی به برآورد ضریب گیاهی و نیاز آبی فضای سبز باغ گیاه‌شناسی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران شامل شمشاد، سنجد زینتی، زرشک، مَرغ، سرو و زبان گنجشک پرداختند. نتایج نشان داد که متوسط ضریب گیاهی از روش بیلان آبی و WUCOLS III به ترتیب برابر ۰/۳۶ و ۰/۳۰ به دست آمد و میانگین تبخیر–تعرق از روش‌های ذکر شده به ترتیب برابر ۷۵۷ و ۶۴۱ میلی‌متر در دوره آزمایش برآورد گردید. آنها دقت روش طبقه‌بندی آب مورد استفاده در گونه‌های فضای سبز را مناسب ارزیابی کردند. با توجه به مرور منابع ملاحظه می‌گردد که در زمینه اندازه‌گیری نیاز آبی و ضریب گیاهی گونه‌های فضای سبز مطالعات چندانی صورت نگرفته و اکثر مطالعات انجام شده، محدود به استفاده از روش WUCOLS III است. در تحقیقی به بررسی نیاز بهینه آب و دفعات آبیاری نهال‌های robusta Grevillea، Moringa olifera و Cordia africana در قلمستان و برای دو سال متوالی در نهالستانی پرداخته شد. نتایج به دست آمده حاکی از این بود که نیاز آبی نهال‌های Moringa olifera و Grevillea robusta دو بار در روز به مقدار ۱/۵ لیتر و نهال‌های Cordia africana یک روز در میان و دو بار در روز به مقدار دو لیتر آبیاری شوند (Mekonnen and Adisu, 2017). در تحقیقی که در دانشگاه کالیفرنیا، مرکز تحقیقات و ترویج کشاورزی کرنی (KARE) برای اندازه‌گیری نیاز آبی انار با استفاده از لایسیمتر وزنی در یک باغ انار در حال توسعه انجام شد، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های انجام شده از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ نشان داد که مقدار آب آبیاری اعمال شده سالانه با افزایش اندازه و سن گیاه افزایش یافت. مقدار کل نیاز آبی تقریباً برابر ۹۵۲ میلی‌متر در دوره رشد و حداکثر مصرف روزانه آب ۱۰/۵ میلی‌متر است (Ayars et al., 2017). در مطالعه‌ای که به منظور بررسی تبخیر و تعرق استاندارد و ضریب گیاهی درختان نارنج (*Citrus sinensis* L. cv.) در اقلیم نیمه خشک جنوب ایران پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین تبخیر و تعرق استاندارد اندازه‌گیری شده برابر ۵/۱۱ میلی‌متر در روز با مقدار فصلی ۱۸۱۴

میلی‌متر بود و ضریب گیاهی از ۰/۶۷ در ژانویه تا ۰/۹۶ در ژوئن متغیر بود (Jamshidi et al., 2020). لذا مطالعه حاضر با هدف تعیین نیازآبی و ضریب گیاهی گونه ارغوان معمولی (*Cercis siliquastrum* L.) که گونه‌ای خشکی‌گرا، مقاوم و به لحاظ ویژگی‌های اکولوژیکی مناسب کاشت در فضای سبز و جنگل کاری در مناطق خشک و نیمه خشک است، در دو بافت خاک و در سه سطح تنش خشکی با استفاده از روش بیلان آبی انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به منظور تعیین نیازآبی و ضریب گیاهی ارغوان(*Cercis siliquastrum* L.) در دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در استان البرز، شهرستان کرج با طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶ درجه شمالی ارتفاع متوسط از سطح دریا برابر ۱۲۹۷ متر انجام شد. اقلیم منطقه مورد مطالعه بر اساس اقلیم‌نمای دومارتن گسترش‌یافته نیمه‌خشکِ سرد با میانگین بارش ۲۵۲ میلی‌متر و میانگین دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. این تحقیق (*Cercis siliquastrum* L.) با هدف بررسی تعیین نیاز آبی و ضریب گیاهی نهال یکساله ارغوان، از ۱ بهمن ۱۳۹۷ آغاز گردید و با توجه به طول دوره رشد گیاه در ۲۰ آبان ۱۳۹۸ به اتمام رسید. نهال‌ها در آخر فصل خزان به مکان تعیین شده انتقال داده و در اول فروردین سال ۱۳۹۸ از گلدان اصلی خارج و پس از شستشوی ریشه با توجه به حداکثر عمق ریشه نهال‌های یک ساله ارغوان که برابر ۲۵ سانتی‌متر است، در میکرولایسیمترهایی به قطر ۲۰ و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر کاشته شدند. این آزمایش به صورت فاکتوریل با دو عامل بافت خاک و تنش خشکی با طرح پایه کاملاً تصادفی در ۱۰ تکرار انجام شد. فاکتورهای درنظر گرفته شده شامل بافت خاک در دو سطح (بافت لوم رسی و لوم شنی) و تنش خشکی در سه سطح تنش ملایم (MAD=0.30)، تنش متوسط (MAD=0.50) و تنش زیاد (MAD=0.70) بود که جمعاً شش فاکتور حاصل شد. با احتساب تعداد تکرارها، ۳۰ عدد میکرولایسیمتر برای خاک لوم‌شنی و ۳۰ عدد برای خاک لوم‌رسی استفاده شد. برای سهولت زهکشی و افزایش هدایت‌هیدرولیکی، کف میکرولایسیمترها به ضخامت یک سانتی‌متر شن ریخته شد (شکل ۱).



شکل ۱- نحوه آماده‌سازی جهت کاشت، اندازه‌گیری رطوبت و آبیاری ارغوان

خاک‌های با بافت لوم‌رسی و لوم‌شنی از خاک زراعی معمولی که برای کاشت درختان فضای شهری استفاده می‌شد با آزمایش قبلی تهیه شد. جدول (۱) مقادیر برخی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

در ابتدای کاشت نهال‌ها به منظور نشست کامل خاک داخل میکرولایسیمترها و رفع شدن تنش وارده به نهال‌ها، دو نوبت آبیاری سنگین انجام شد. از اول فرودین ۱۳۹۸، پس از آبیاری نهال‌های کاشت شده در هر دو بافت خاک لوم‌شنی و لوم‌رسی، ۲۴ و ۷۲ ساعت بعد رطوبت به حد ظرفیت زراعی رسیده و پایش رطوبت با گذشت زمان از نقطه ظرفیت زراعی ابتدا به صورت روزانه سپس با کم شدن رطوبت به صورت روزی دو بار انجام شد. پایش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه هم با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج TDR مدل HH2 (برای تعیین زمان رسیدن به رطوبتی که باید آبیاری صورت گیرد)، و هم از روش وزنی (برای تعیین دقیق مقدار کمبود رطوبتی) انجام شد. پس از اندازه‌گیری نقاط رطوبتی ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی (PWP) و لحاظ نمودن سطوح تنش خشکی مورد نظر یعنی درصدهای ذکر شده تخلیه مجاز رطوبتی (MAD)، برنامه‌ریزی آبیاری برای هر یک از تیمارها تهیه شد و آبیاری و جبران کمبود رطوبتی (SMD) بر اساس آن انجام گرفت.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده

ویژگی	واحد	خاک لوم شنی	خاک لوم رسی
شن	%	۶۱	۲۶
سیلت	%	۲۳	۳۶
رس	%	۱۶	۳۸
هدایت الکتریکی	$dS.m^{-1}$	۰/۲۳	۰/۱۵
pH	-	۷/۶	۶/۹
جرم مخصوص ظاهری	$gr.cm^{-3}$	۱/۳۵	۱/۲۵
ظرفیت زراعی	حجمی%	۱۹	۳۷
نقطه پژمردگی	حجمی%	۸	۱۶

تعیین ضریب گیاهی (K_c)

آب مورد نیاز گیاه به مجموع آب تعرق یافته در دوره رشد، آب نگهداری شده در بافت گیاهی و رطوبت تبخیر شده از سطح خاک و گیاه اطلاق شده و برحسب میلیمتر برای دوره معینی بیان می‌گردد (احمدالی و همکاران، ۱۳۹۷). در صورت داشتن ضریب گیاهی و تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0)، تبخیر-تعرق واقعی گیاه (ET_c) از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (Allen et al., 1998):

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (۱)$$

از آنجایی که برای اکثر گونه‌های گیاهی فضای سبز و عرصه‌های جنگل‌کاری ضریب گیاهی مشخص نیست لذا در این این تحقیق ضریب گیاهی ارغوان جزو مجهولات است و باید تعیین شود. برای این منظور با اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی در طول دوره رشد گیاه، مقدار K_c از رابطه (۲) تعیین شد:

$$K_c = ET_c/ET_0 \quad (۲)$$

تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) نشان‌دهنده‌ی مقدار تبخیر-تعرق نوع معینی از پوشش سبز با ارتفاع ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر است که در سطح گسترده کشت شده و دارای رشد فعال با پوشش کامل زمین و سایه‌انداز و نیز بدون تنش آبی است (Allen et al., 1998). معمولاً در شرایط آزمایشی از گیاه چمن استفاده می‌گردد. از میان مدل‌های مختلف محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل، روش فائو پنمن-مانتیث (PMF-56) که هم بیلان انرژی و هم تئوری آئرودینامیکی را در مدل در نظر گرفته به عنوان مناسب‌ترین مدل در برآورد تبخیر-تعرق مرجع شناخته شده و توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO) برای محاسبه‌ی تبخیر-تعرق مرجع در همه‌ی اقالیم توصیه شده است (Xu et al., 2006). در این مطالعه محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از روش PMF-56 (رابطه ۳) و با استفاده نرم افزار ET_0 calculator انجام شد.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)} \quad (۳)$$

که در آن ET_0: تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)، R_n: تشعشع خالص در سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع در روز)، G: فلاکس حرارتی خاک (مگاژول بر مترمربع در روز)، T: میانگین دمای روزانه در ارتفاع دو متری (درجه سلسیوس)، U_2: سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s: فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a: فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، Δ: شیب منحنی فشار بخار اشباع و دما (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) و γ: ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) می‌باشد.

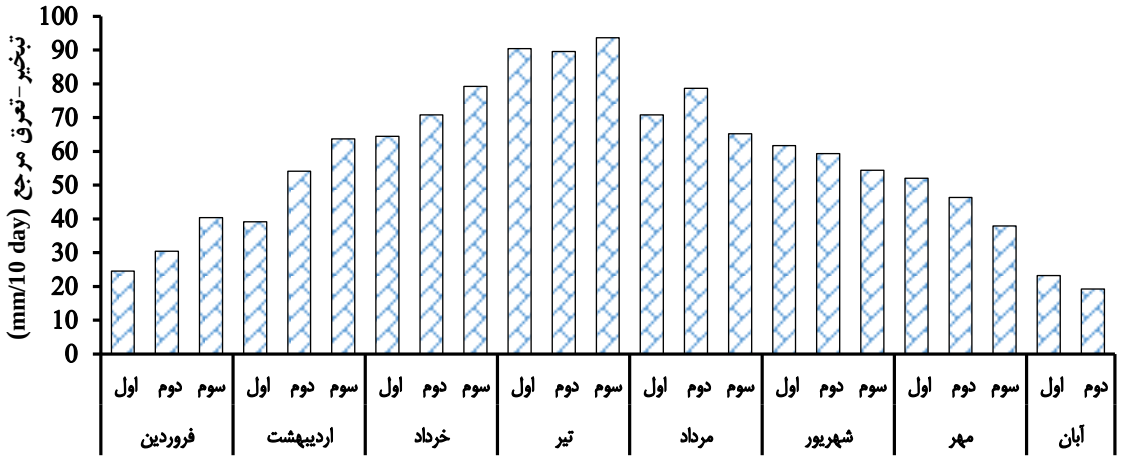
مقدار تبخیر-تعرق گیاه (ET_c) در دور آبیاری با استفاده از داده-های به دست آمده از روش وزنی و ابعاد میکرولایسیمتر، از رابطه (۴) محاسبه شد.

$$ET_c = \frac{W_2-W_1}{A} \quad (۴)$$

که در آن ET_c تبخیر-تعرق واقعی گیاه، A مساحت میکرولایسیمتر، W_1 و W_2 به ترتیب مقدار وزن مجموعه میکرولایسیمتر قبل و بعد از آبیاری است.

نتایج و بحث:

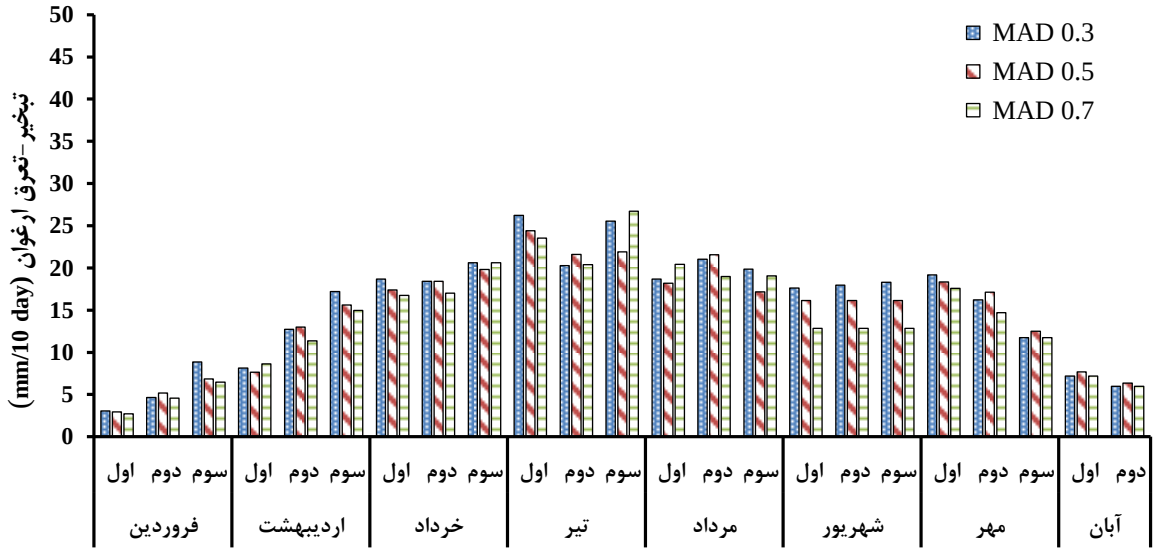
برآورد نیازآبی گیاهان فضای سبز از مهمترین راهکارهای مدیریت منابع آب است که ضمن صرفه‌جویی در مقدار آب مصرفی و متعاقباً افزایش کارایی مصرف آب، سبب کاهش هزینه‌های اولیه و سالیانه سیستم‌های آبیاری شده و هم مانع از وارد شدن خسارات ناشی از کم‌آبیاری و پرآبیاری و درنتیجه افزایش کیفیت فضای سبز می‌شود (Costello et al., 2000). نتایج بدست آمده از محاسبه تبخیر-تعرق مرجع ۱۰ روزه به روش PMF-56 با استفاده از نرم‌افزار ET_0 calculator برای منطقه کرج، طی دوره مورد مطالعه یعنی در بازه زمانی اول فروردین تا آخر آبان سال ۱۳۹۸ در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲- تغییرات زمانی تبخیر-تعرق مرجع ۱۰ روزه در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه

با توجه به شکل (۲) ملاحظه می‌گردد که مقادیر ۱۰ روزه تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده از اول فروردین تا انتهای فصل تابستان روندی صعودی داشته و در دهه سوم تیر ماه به ماگزیمم مقدار خود (۹۳/۶ میلیمتر) طی دوره مورد مطالعه می‌رسد. از ۳۱ تیر ماه تا انتهای دوره رشد گیاه (۲۰ آبان) روند تغییرات تبخیر-تعرق مرجع نزولی بوده و در دهه دوم آبان ماه به مینیمم مقدار خود (۱۹/۲ میلی‌متر) می‌رسد.

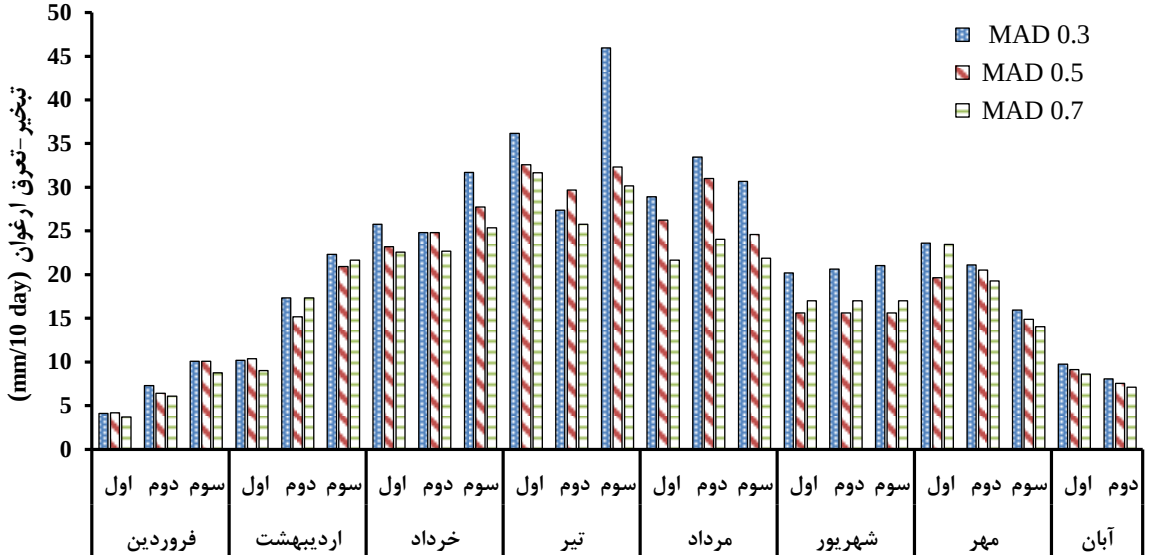
مقدار تجمعی تبخیر-تعرق مرجع برای دوره هشت ماهه فروردین تا ۲۰ آبان برابر ۱۳۰۸ میلی‌متر به دست آمد. در شکل‌های (۳) و (۴) نتایج میانگین ۱۰ روزه تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده گیاه ارغوان حاصل از ۱۰ میکرولایسیمتربرای دو بافت لوم‌شنی و لوم‌رسی و در سه سطح تنش خشکی (مقادیر MAD برابر ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷) نشان داده شده است.



شکل ۳- تغییرات زمانی تبخیر-تعرق ۱۰ روزه ارغوان به ازای مقادیر مختلف MAD و در بافت لوم‌شنی

با توجه به شکل (۳) ملاحظه می‌گردد که روند تغییرات تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده ارغوان (ET_c) در سه سطح MAD در خاک لومی شنی از ابتدای فصل تا ابتدای تابستان افزایشی بوده و در تیر ماه به حداکثر مقدار خود رسیده و از ابتدای تیر تا دهه دوم مرداد حول یک مقدار ثابت نوسان داشته و از اواسط مرداد تا انتهای دوره رشد، تغییرات تبخیر-تعرق ارغوان روند نزولی را نشان می‌دهد. با توجه به تقسیم‌بندی دوره‌های رشد ارغوان می‌توان اینطور بیان کرد که در مرحله ابتدایی رشد (اول تا ۱۰ام فروردین) ET_c کمترین مقدار را دارد و در مرحله رشد و توسعه گیاه (۱۰ فروردین تا ۳۱ خرداد) مقدار ET_c نسبت به زمان به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و در مرحله میانی

(۱ خرداد تا ۳۱ شهریور) مقدار ET_c، نسبت به کل دوره حداکثر است هر چند که مقدار آن در این مرحله دارای نوسان نیز هست. این نوسانات می‌تواند به دلیل نوسانات شدید دمایی باشد. مقدار ET_c در مرحله نهایی (۱ مهر تا آخر آبان) روندی نزولی خطی دارد. با مقایسه مقدار نیاز آبی ارغوان برای مقادیر مختلف MAD ملاحظه می‌گردد که مقدار ET_c در سراسر طول دوره مورد مطالعه، در MAD برابر ۰/۳، بیشترین مقدار و به ازای MAD برابر ۰/۷، کمترین مقدار را دارد. بیشترین مقدار ET_c ۱۰ روزه به ازای مقادیر مختلف MAD ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ به ترتیب برابر ۲۶/۲۱، ۲۴/۴۰ و ۲۶/۷۱ میلی‌متر است که این مقادیر در تیر ماه اتفاق می‌افتد و کمترین مقدار ET_c به ترتیب برابر ۳/۰۶، ۲/۹۴ و ۲/۶۹ میلی‌متر و مربوط به فروردین ماه می‌باشد.

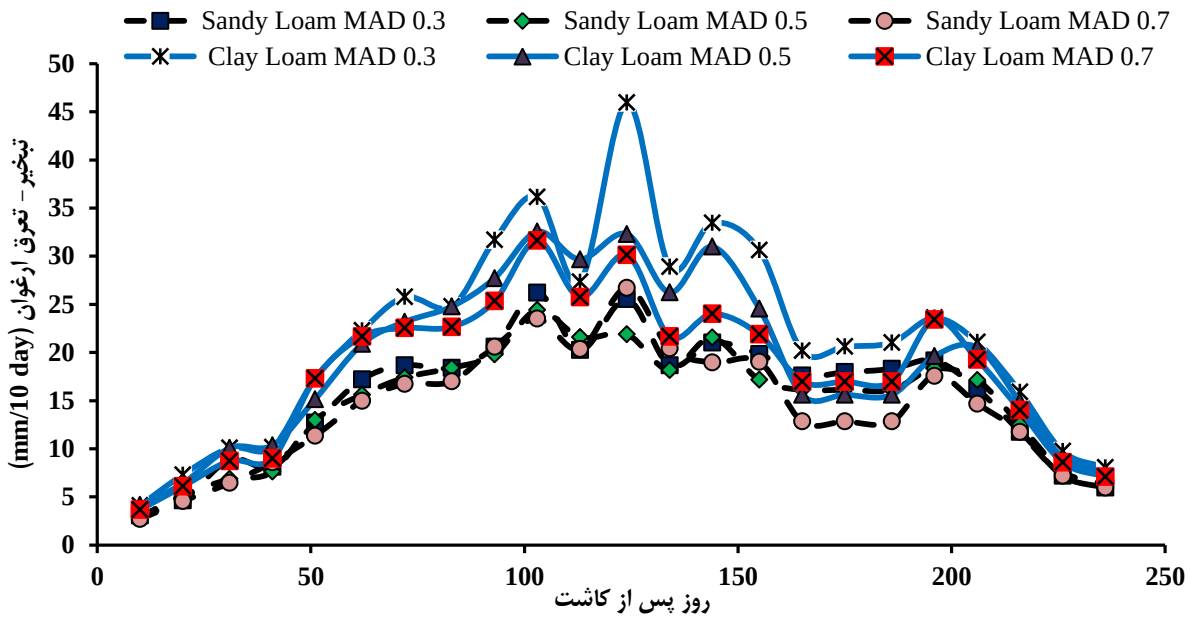


شکل ٤- تغییرات تبخیر-تعرق ۱۰ روزه ارغوان به ازای مقادیر مختلف MAD در بافت لوم‌رسی

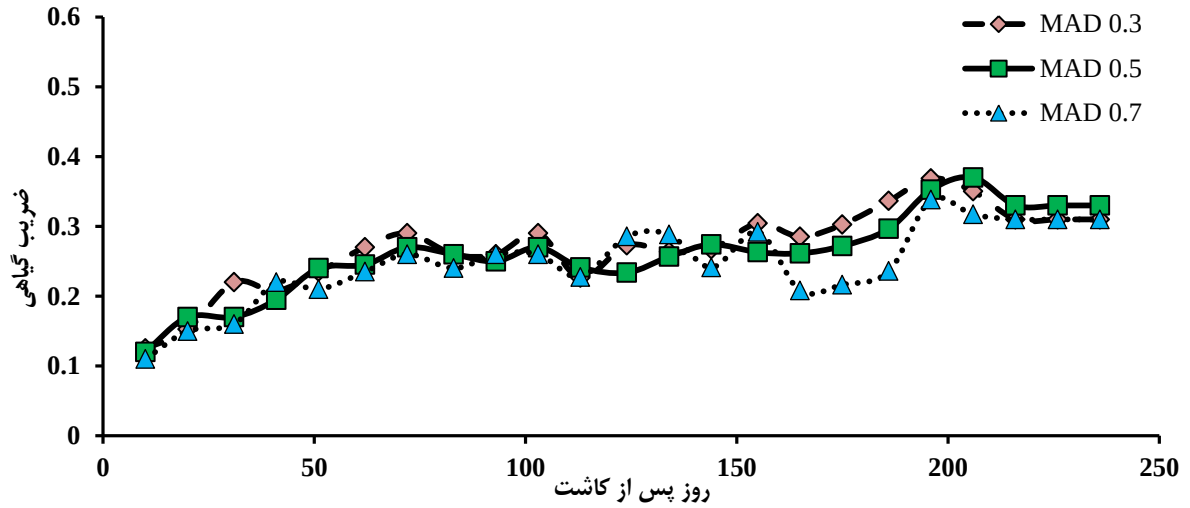
تغییرات مقدار ET_c ارغوان در بافت لوم‌رسی با وجود تفاوت در مقادیر، در کل روندی مشابه با روند تغییرات نیاز آبی در بافت لوم‌شنی (شکل ۳) دارد به این صورت که مقدار ET_c در همه سطوح MAD در مرحله ابتدایی رشد، کمترین مقدار است و در مرحله رشد و توسعه یعنی از ۱۱ فروردین تا ۳۱ خرداد، مقدار آن نسبت به زمان به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و در مرحله میانی مقدار ET_c تقریباً ثابت است و مقدار میانگین آن نسبت به همه مراحل رشد حداکثر است و در مرحله نهایی مقدار ET_c روندی نزولی دارد. از بین سطوح مختلف MAD، مقدار ET_c در مقدار MAD برابر ۰/۳ نسبت به دو سطح دیگر بیشترین مقدار و در MAD برابر ۰/۷ کمترین مقدار را دارد. بیشترین مقدار ET_c ۱۰ روزه به ازای سطوح MAD ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ به ترتیب برابر ۴۵/۹۵، ۳۲/۵۴ و ۳۱/۶۴ میلی‌متر و در تیر ماه اتفاق می‌افتد و کمترین مقدار آن به ترتیب برابر ۴/۱۰، ۴/۱۶ و ۳/۶۷ میلی‌متر مربوط به دهه اول فروردین است. شکل (۵) روند تغییرات ET_c ارغوان در سطوح مختلف MAD در دو بافت لوم‌شنی و لوم‌رسی را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که مقادیر نیاز آبی ارغوان در هر سه سطح تنش خشکی ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷، در خاک لوم‌رسی بیشتر از خاک لوم‌شنی است (شکل ۵). میانگین ET_c ۱۰ روزه در مقادیر MAD۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در خاک لوم‌شنی به ترتیب برابر ۱۵/۵۶، ۱۴/۸۶ و ۱۴/۲۴ میلی‌متر و در خاک لوم‌رسی برابر با ۲۱/۵۷، ۱۹/۰۲ و ۱۸/۰۶ میلی‌متر می‌باشد. دلیل این امر می‌تواند این باشد که در خاک لوم‌شنی ضریب هدایت مویینگی لایه سطحی یک شبانه‌روز بعد از آبیاری به شدت کاهش پیدا می‌کند در حالی که هدایت مویینگی در لایه سطحی خاک لوم‌رسی طی این مدت همچنان بالا است. این مسئله باعث می‌شود که سرعت کاهش رطوبت خاک منطقه توسعه ریشه در اثر تبخیر، در خاک لوم‌شنی به شدت کم شود اما در خاک لوم‌رسی سرعت کاهش رطوبت علی‌الخصوص در چند روز اول پس از آبیاری بالاتر از خاک لوم‌شنی است (علیزاده، ۱۳۹۷). مقدار ET_c در هر دو خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی در MAD ۰/۳ بیشتر از ۰/۵ و آن هم بیشتر از ۰/۷ است. دلیل این امر در دسترس بودن رطوبت بیشتر در تیمار تنش خشکی ۰/۳ نسبت به تیمار تنش خشکی ۰/۵ و آن هم بیشتر از تنش ۰/۷ است. در صورت تامین انرژی یکسان در سطح تبخیر و نیز یکسان بودن شرایط انتقال بخار آب از سطح تبخیر، هرچه رطوبت در محیط بیشتر باشد، مقدار تبخیر-تعرق بیشتر خواهد بود (Allen et al., 1998). این نتیجه با مطالعه راد و همکاران

(۱۳۹۶) مطابقت دارد. در شکل‌های (۶) و (۷) رونـد تغییـرات ضـریب گیاهی (K_c) ارغوان برای MADهـای ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در دو بافـت لوم‌شنی و لوم‌رسی نشان داده شده است.

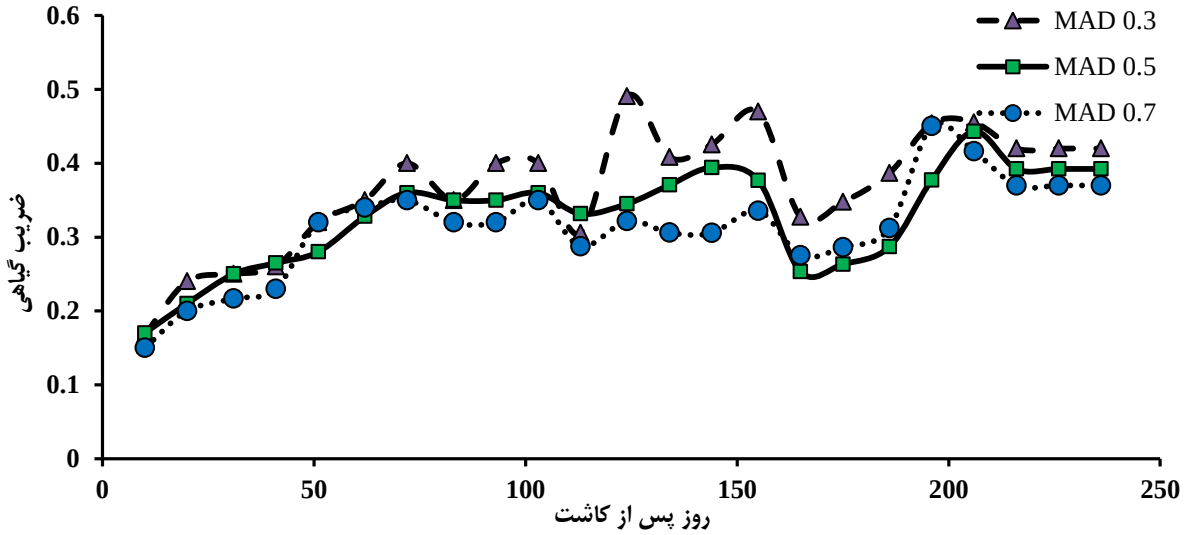


شکل ۵- روند تغییرات نیاز آبی ارغوان در سطوح MAD و بافت خاک



شکل ٦- تغییرات ضریب گیاهی ارغوان در MADهای مختلف در بافت لوم‌شنی

براساس شکل (۶) ملاحظه می‌شود که تغییـرات ضـریب گیـاهی ارغوان در هر سه سطح MAD ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ تقریباً روند مشـابهی دارد و در مرحله اول رشد گیاه به دلیل رشد کم گیاه حداقل و در ایـن مرحله سهم تبخیر بیشتر از سهم تعرق است. با بزرگ شدن برگ‌ها و توسعه اندام هوایی در مراحل بعد، افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار K_c در انتهای مرحله میانی (اواسط مهر مـاه) اتفـاق مـی‌افتـد. در مرحلـه نهایی با کاهش فعالیت برگ‌ها و پیـر شـدن آنهـا مقـدار K_c کـاهش می‌یابد (صابری و همکاران ۱۳۹۶؛ قمرنیا و موسی‌بیگی، ۱۳۹۳). کـه ایـن بـا نتـایج Mostafazadeh-Fard et al., 2009 مطابقـت دارد. مقایسه مقدار K_c در MADهای مختلف نشان می‌دهد کـه بیشـترین مقدار K_c در MAD ۰/۳ و کمترین آن مربوط به MAD ۰/۷ است.



شکل ۷- روند تغییرات ضریب گیاهی ارغوان در تنش‌های خشکی مختلف در بافت لوم‌رسی

روند تغییرات K_c در بافت لوم‌رسی مشابه بافت لوم‌شنی دارد همچنین مقادیر K_c در MADهای مختلف در خاک لوم‌رسی همانند خاک لوم‌شنی است. با مقایسه مقادیر در دو بافت لوم‌رسی و لوم‌شنی (شکل‌های ۶ و ۷) ملاحظه می‌گردد که مقدار K_c در بافت لوم‌رسی در تمام مراحل و برای تمامی مقادیر MAD بیشتر از بافت لوم‌شنی است که این با مطالعه (مسکینی و همکاران، ۱۳۹۶) مطابقت دارد.

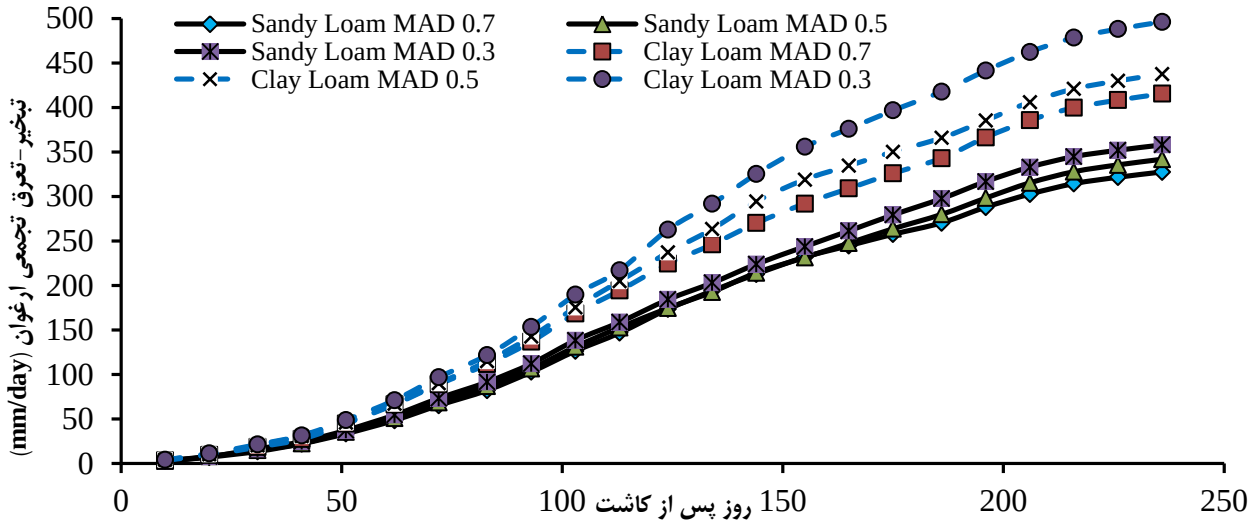
مقدار متوسط K_c ارغوان در دوره رشد در بافت لوم‌رسی به ازای MADهای ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ به ترتیب برابر است با ۰/۴۶، ۰/۴۱ و ۰/۳۴ و برای خاک لوم‌شنی برابر با ۰/۳۶، ۰/۳۴ و ۰/۲۵ می‌باشد. مقدار میانگین ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد ارغوان در سطوح مختلف تنش خشکی و در دو بافت لوم‌رسی و لوم‌شنی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- مقدار ضرایب گیاهی در مراحل مختلف رشد در MADها و بافت‌های مختلف خاک

مرحله رشد	خاک لوم‌رسی			خاک لوم شنی		
	MAD 0.7	MAD 0.5	MAD 0.3	MAD 0.7	MAD 0.5	MAD 0.3
ابتدایی	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۲
رشد و توسعه	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۲۸	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۲۱
میانی	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۹	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۷
نهایی	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۴۳	۰/۳۱	۰/۳۴	۰/۳۷

نتایج نشان داده شده در جدول (۳) حاکی از آن است که بیشترین مقدار K_c مربوط به خاک لوم‌رسی و MAD ۰/۳ و کمترین مقدار در خاک لوم‌شنی و MAD ۰/۷ اتفاق افتاده است. شکل (۸) نیازآبی خالص تجمعی ارغوان را در دو بافت خاک لوم‌شنی و لوم‌رسی در سه MAD ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ نشان می‌دهد.

شکل تغییرات نیاز آبی تجمعی گیاه در طول دوره رشد S شکل یا سیگموئیدی است و در کل صعودی است. روند افزایش نیاز آبی در بازه‌های مختلف زمانی رشد متفاوت است به این صورت که شیب منحنی در ابتدا دوره کم و در میانه‌های دوره بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده و در انتهای دوره رشد از شیب آن کاسته می‌شود. مقایسه نیاز آبی تجمعی در دو بافت لوم‌رسی و لوم‌شنی نشان می‌دهد که مقدار آن برای تمامی مقادیر MAD در خاک لوم‌رسی بیشتر از خاک لوم‌شنی است. نکته دیگری که باید ذکر کرد این است که مقدار آب مصرفی در خاک لوم‌رسی بین MADهای ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ اختلاف بیشتری نسبت به خاک لوم‌شنی دارند و در خاک لوم‌شنی منحنی مربوط به هر سه MAD نزدیک به‌هم است. ترتیب نیازآبی تجمعی از بیشترین به کمترین عبارتست از خاک لوم‌رسی و MAD ۰/۳، خاک لوم‌رسی MAD ۰/۵، خاک لوم‌رسی MAD ۰/۷، خاک لوم‌شنی MAD ۰/۳، خاک لوم‌شنی MAD ۰/۵ و خاک لوم‌شنی MAD ۰/۷. علت کمتر بودن نیازآبی تجمعی ارغوان در بافت خاک لوم‌شنی نسبت به بافت لوم‌رسی را می‌توان به حفظ رطوبت بیشتر در آن می‌تواند به دلیل کاهش سریع ضریب هدایت مویینگی سطحی خاک باشد که در نتیجه کاهش ضریب هدایت‌مویینگی سطحی خاک، خروج آب از منطقه توسعه ریشه در اثر تبخیر نیز کاهش می‌یابد (علیزاده، ۱۳۹۷). این نتیجه با مطالعه (راد و همکاران، ۱۳۹۶) مطابقت دارد.



شکل ۸- مقدار نیاز آبی تجمعی ارغوان در بافت‌های مختلف خاک و سطوح مختلف تنش خشکی

نتیجه‌گیری

فضای سبز شهری دارای کارکردهای بسیار مهمی نظیر تصفیه هوا، کاهش آلودگی‌های صوتی، ترسیب کربن، تعدیل دما، افزایش رطوبت نسبی، کاهش اثرات سیل و طوفان، جذب گرد و غبار، ایجاد فرصت تفریحی برای پرورش کودکان، آرامش روانی و درمان بیماری‌های روانی است (دلفان‌آذری، ۱۳۹۷). امروزه و در کشورهایی نظیر کشور ما که با کمبود آب مواجه هستند، تامین آب فضای سبز در رقابت تنگاتنگی با بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و شرب قرار دارد و معلوم نبودن نیاز آبی گونه‌های فضای سبز پیچیدگی مسئله را بیشتر می‌کند. در این شرایط تعیین ضریب گیاهی و نیاز آبی این گیاهان امری ضروری است. در این مطالعه ضریب گیاهی گونه ارغوان در دو بافت خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی در سه سطح MAD ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ در منطقه کرج و از فروردین تا آبان سال ۹۹-۱۳۹۸ تعیین شد. نتایج نشان داد که مقدار متوسط ضریب گیاهی ارغوان برای بافت لوم رسی در سه مقدار MAD ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ به ترتیب برابر ۰/۴۶، ۰/۴۱ و ۰/۳۴ و برای خاک لوم‌شنی به ترتیب برابر ۰/۳۶، ۰/۳۴ و ۰/۲۵ می‌باشد. نتایج این تحقیق و تحقیقات مشابه کمک زیادی به افزایش بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب، مدیریت صحیح آبیاری فضای سبز، طراحی درست و بهینه سیستم‌های آبیاری، مخازن و ایستگاه‌های پمپاژ خواهد نمود.

منابع

احمدالی، خ.، رمضانی‌اعتدالی، ه. و پورمحسنی، ع.ع. ۱۳۹۷. برآورد تبخیر-تعرق و نیاز آبی محصولات زراعی در مناطق با تنوع اقلیمی و ارتفاعی (مطالعه مورد: استان قم). نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۶(۱۲):۱۴۴۸-۱۴۶۲.

اسماعیل‌پور، ع. م.، علوی‌زاده، ا. م. و حسین‌زاده‌کرمانی، م.۱۳۹۲. تعیین نیاز آبی گونه‌های گیاهی غالب شهری (مطالعه موردی : شهرستان تربت حیدریه). اولین کنفرانس ملی خدمات شهری و محیط زیست، مشهد، شهرداری مشهد.

پناهی، م.، دستورانی، م،ت. و مختاری، ح. ۱۳۹۲. مقایسه روش فائو پنمن مانتیث با برخی روش های دیگر در برآورد تبخیر-تعرق مرجع (مطالعه موردی: حوزه اسکندری در استان اصفهان)، دوازدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر. کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

حیدری، ن. ۱۳۸۸. برنامه راهبردی بهبود بهره‌وریمصرف آب کشاورزی. گزارش پژوهشی طرح تحقیقاتی تدوین برنامه راهبردی بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورز، شماره ثبت ۸۸/۶۵.

دلفان‌آذری، ن. ج.، رستمی‌شاهراجی، ت.، غلامی. و هاشمی‌گرمدره، س.ا. ۱۳۹۷. برآورد نیازآبی و ارزیابی سطوح مختلف آبیاری بر پارامترهای رشدی نهال‌های کاج تهران (مطالعه موردی: تهران). مجله جنگل ایران. ۱۰(۲): ۲۳۷-۲۵۰.

راد، م.ه.، عصاره، م.ح. و سلطانی، م. ۱۳۹۶. نیاز آبی و کارایی مصرف آب در دو گونه اکالیپتوس (*Eucalyptus flocktoniae* Maiden and *E. leucoxylon* F. Muell). فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران. ۲۵(۳): ۴۴۱-۴۵۱.

سجودی، ز. و میرزایی، ف. ۱۳۹۹. تعیین نیاز آبی گیاهان فضای سبز شهری. مجله مدیریت آب و آبیاری. ۱۰(۱):۱۳۱-۱۴۱.

شکرا...زاده، م. ر.، میری، ح. ر. و عباسی‌زاده، م. ۱۳۹۵. تعیین نیاز آبی گونه نارون (*Ulmus carpinifolia*) و خرزهره (*Nerium oleander*) با استفاده از روش WUCOLS III در فضای سبز شهر شیراز. همایش علمی‌پژوهشی کشاورزی، مهندسی ژنتیک و گیاه‌پزشکی ایران.

صابری، ا.، رضایی، ف. و خاشعی‌سیوکی، ع. ۱۳۹۶. برآورد ضریب گیاهی اجغون (*Trachyspermum ammi*) در مراحل مختلف رشد به روش لایسیمتری در منطقه بیرجند. پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب). ۳۱(۳):۳۸۹-۳۹۸.

علایی، ج.، کوچک‌زاده، م. و شریفی، ف. ۱۳۹۸. برآورد نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری درخت سنجد به عنوان فضای سبز شهری، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۶): ۱۸۶۹-۱۸۷۸.

علیزاده، ا، ۱۳۹۷. رابطه آب، خاک و گیاه. انشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۷۲۸.

عماد، م.، غیبی، ف.، رسولی، م.، خانجانزاده، ر. و محمدی، س. ۱۳۹۱. گیاهان دارویی- صنعتی ارغوان. انتشارات گنج دانش، ص ۴۲.

فرهمند، ه. و خوشخوی، م. ۱۳۸۰. بررسی پیشبرد افزایش جنسی و رویشی ارغوان معمولی (*Cercis siliquastrum* L.). مجله علوم و فنون باغبانی ایران. ۲(۱-۲) ۲۵-۳۸.

قائمی بایگی، م.، رائینی سرجاز، م. و موسوی بایگی، م. ۱۳۹۲. برآورد ضریب گیاهی و تبخیر-تعرق گندم رقم گاسکوژن در مشهد با استفاده از روش تراز انرژی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۳(۳):۵۸-۶۸.

قمرنیا، ه. و موسی‌بیگی، ف. ۱۳۹۳. برآورد نیاز آبی، ضرایب گیاهی یک جزیی و دوجزیی نعناع فلفلی (*Mentha pipertia* L.). آب و خاک. ۲۸(۴): ۶۷۰-۶۷۸.

مسکینی، ف.، محمدی، م. ح.، نیشابوری، م. ر. و شکاری، ف. ۱۳۹۶. برآورد ضریب تخلیه مجاز رطوبتی خاک برای گیاه کلزا و گندم با استفاده از برخی ویژگیهای گیاهی و خاک. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۸(۴): ۷۴۹-۷۵۸.

مسکینی، ف.، محمدی، م. ح.، نیشابوری، م. ر. و شکاری، ف. ۱۳۹۵. برآورد ضریب تخلیه مجاز رطوبتی خاک برای گیاه کلزا و گندم با استفاده از برخی ویژگی‌های گیاهی و خاک. تحقیقات آب و خاک ایران، ۸۴(۸): ۷۴۹-۷۵۸.

مصلح‌آرانی، ا.، احقاقی، ر.، عظیم زاده، ح. ر. و زرگران. م، ر. ۱۳۹۲. مقایسه برخی از شاخص‌های مقاومت به خشکی دو گونه اسکنبیل (*Caligonum persicum*) و (*C. stenopterum*) در شرایط طبیعی. تحقیقات ژنتیک و اصلاح گیاهان مرتعی و جنگلی ایران. ۲۱(۱): ۳۳-۴۴.

ناصری، ا.، عباسی، ف. و اکبری، م. ۱۳۹۶. برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۶۸(۱۸)۶۸: ۱۷-۲۳.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.

Bossie, M., Tilahun, K., and Hordofa, T. 2009. Crop coefficient and evaptranspiration of onion at Awash Melkassa, Central Rift Valley of Ethiopia. Irrigation and Drainage Systems 23(1): 1-10.

Costello, L., Matheny, N., and Clark, J. 2000. A guide to estimating irrigation water needs of landscape plantings in California the landscape coefficient method and WUCOLS III** WUCOLS is the acronym for water use classifications of landscape species. University of California Cooperative Extension California Department of Water Resources August WUCOLS 2000.

Davis, C.C., Fritsch, P.W., Li, J., and Donoghue, M.J. 2002. Phylogeny and biogeography of Cercis (Fabaceae): evidence from nuclear ribosomal ITS and chloroplast ndhF sequence data. Systematic Botany 27(2): 289-302.

Kafi, M., Borzoee, A., Salehi, M., Kamandi, A., Masoumi, A., and Nabati, J. 2009. Physiology of Environmental Stress in Plants. Mashhad, Jehad Danshgahi Press. 502p.

Lozano, C.S., Rezende, R., de Freitas, P.S., Hachmann, T.L., Santos, F.A., and Andrean, A.F. 2017. Estimatation of evapotranspiration and crop coefficient of melon cultivated in protected environment. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 21(11): 758-762.

Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., and Hashemi, S.E. 2009. Species factor and evapotranspiration for an Ash (*Fraxinus rotundifolia*) and Cypress (*Cupressus arizonica*) in an arid region. Australian Journal of Crop Science 3(2): 71-82.

Prasad, M.N.V. 1996. Plant ecophysiology. John Wiley and Sons, Inc, New York 542 pp.

Sternberg, P. 2012. Physiological and morphological basis for differences in growth, water use and drought resistance among *Cercis* L. Taxa (Doctoral dissertation, The Ohio State University).

Symes, P., Connellan, G., Buss, P., and Dalton, M.

2008. Developing Water Management Strategy for Complex Landscapes. In Irrigation Australia 2008 Conference, Best Practice Open Space Irrigation Workshop. Melbourne Exhibition Centre, May (pp. 20-22).

Zahreddine, H.G., Struve, D.K., and Talhouk, S.N. 2007. Growth and nutrient partitioning of containerized *Cercis siliquastrum* L. under two fertilizer regimes. Scientia Horticulturae 112(1): 80-88.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2100-2111

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۱۱-۲۱۰۰

Determination of Crop Coefficient of *Cercis siliquastrum* L. in Different Soil Textures and Irrigation Levels

H. Rahimi[1], Kh. Ahmadaali [*2], V. Etemad[3]

Recived: Aug.25, 2020 Accepted: Sep.30, 2020

Abstract

Not only urban development and consequently the need to increase the green space, but also the shortage in water resources, the need to optimal allocation of water to different demands, and limited information of urban green space make a necessary to determine the crop coefficient and water requirements of green space species. The factorial experiment aimed to investigate the evapotranspiration (ETc) and crop coefficient (Kc) of *Cercis siliquastrum* L. with two factors of soil texture (clay loam and sandy loam) and drought stress (0.3, 0.5, and 0.7 of MAD) based on a completely randomized blocks design (CRBD) with 10 replications in the climatic conditions of Karaj during 2019-2020. Our findings indicated that 10-day ETc under 0.3, 0.5, and 0.7 MAD were 15.56, 14.86 and 14.24 mm in clay loam and 21.57, 19.02 and 18.06 mm in sandy loam soil, respectively. The ETc increased with progressing in drought stress (from 0.7 to 0.3 MAD) in both clay loam and sandy loam soils. The total net water requirements of *Cercis siliquastrum* L. in clay loam soil under 0.3, 0.5 and 0.7 MAD were 45.15, 388.58 and 381.41 mm, respectively, and it was recorded as 353.02, 317.59 and 290.54 mm, respectively, in sandy loam soil. The mean Kc of Cercis *siliquastrum* L. during the growing period in clay loam soil under 0.3, 0.5, and 0.7 MAD were obtained to be 0.36, 0.32, and 0.31, respectively. In sandy loam soils, this value was determined as 0.27, 0.26, and 0.24 under 0.3, 0.5, and 0.7 MAD, respectively.

Keywords: Evapotranspiration, Management allowable depletion, Soil water balance, Urban greenspace

1- M.Sc. Student, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Assistant Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3- Associate Professor, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: khahmadauli@ut.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۲۴-۲۱۱۲

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2112-2124

مقاله پژوهشی

ارزیابی کیفیت منابع آب آثار طبیعی ملی دهلران با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI)

عیسی سلگی[۱*]، محمد ملک محمدی[۲]، فوزیه بیگ محمدی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۲۶

چکیده

در بحران کنونی آب، استفاده از چشمه‌ها در بسیاری از مناطق به بشر کمک کرده است. کاربرد شاخص‌ها و روش‌های آماری اطلاعات مفیدی در راستای درک کیفیت آب و برنامه‌ریزی برای مدیریت درست آن، ارائه می‌دهد. زمانی که منابع آب علاوه بر استفاده متعارف ویژگی‌های منحصر به فردی دارند؛ از جمله رودخانه، چشمه‌های آبگرم و چشمه قیر دهلران، این موضوع اهمیت بیشتری می‌یابد. در این مطالعه، ۲۸ نمونه از آب چشمه‌های آبگرم، ۴ نمونه از آب رودخانه و ۴ نمونه از آب چشمه قیر برداشت شدند. پارامترهای مورد اندازه‌گیری دما، pH، EC، سدیم، پتاسیم و نیترات بودند. آزمون‌های آماری آنالیز واریانس یک‌طرفه و تی تک نمونه‌ای به ترتیب برای مقایسه سه منطقه با هم و مقایسه با استاندارد WHO و استاندارد ملی ایران بکار گرفته شدند. همچنین برای طبقه‌بندی کیفیت آب از شاخص‌های ویلکاکس، WQI و INWQS استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده، آب چشمه قیر از نظر تمام پارامترها با دو منطقه دیگر دارای تفاوت معنی‌دار آماری بود و همه پارامترها در سه منطقه دارای اختلاف معنی‌داری آماری با استاندارد WHO و استاندارد ملی ایران و کمتر از آن بودند. بر اساس شاخص ویلکاکس همه نمونه‌ها نامناسب برای آبیاری؛ بر اساس شاخص WQI دارای کیفیت عالی و بر اساس INWQS از نظر pH برای آبزی پروری گونه‌های حساس تصفیه نیاز ندارند و از نظر نیترات تنها برای آبیاری مناسب هستند. با توجه به مدیریت و حفاظت منطقه به عنوان آثار طبیعی ملی، به نظر می‌رسد که نقش عوامل طبیعی از جمله زمین شناسی و وقوع سیلاب در ترکیب شیمیایی منابع آب بسیار مهم‌تر باشد و در مجموع بر اساس نتایج روش‌های به کار رفته بجز ویلکاکس، کیفیت آب مناسب ارزیابی شد. با این وجود با توجه به استفاده بهداشتی درمانی از چشمه‌های آبگرم و احتمال احداث امکانات رفاهی برای گردشگران نباید از نقش عوامل انسانی بر کیفیت منابع آب منطقه غافل شد.

واژه‌های کلیدی: آثار طبیعی ملی دهلران، چشمه قیر، شاخص‌های کیفیت آب، نیترات

مقدمه

افزایش مصرف آب، کاهش ذخایر آب‌های طبیعی، آلودگی‌های محیط زیستی و افزایش نیاز آبی فعالیت‌های انسانی باعث شده تا ارزیابی کیفیت منابع آب از موضوعات مهم در سال‌های اخیر محسوب گردد (خلجی و همکاران، ۱۳۹۵). تعیین وضعیت کیفی منابع آب برای اتخاذ راهکارهای مناسب جهت جلوگیری از کاهش کیفیت و یا بهبود آن ضروری است (Ramirez and Solano, 2004). کمبود آب در بسیاری از نقاط جهان به یک واقعیت ناخوشایند تبدیل شده است. استفاده از آب‌های زیرزمینی مثل چشمه‌ها می‌تواند در این زمینه کمک‌کننده باشد (Taloor et al., 2020). به طور کلی چشمه‌ها محل‌هایی هستند که در آنها جریان آب از سفره‌های زیرزمینی به سطح زمین در جایی که سطح زمین و صخره‌های غیرقابل نفوذ با آبخوان‌های زیرزمینی تلاقی می‌کنند؛ راه پیدا می‌کند (Haque et al., 2020؛ Ansari et al., 2015). چشمه‌های آبگرم مناطقی هستند که آبگرم به‌طور مرتب در سطح زمین می‌جوشد و دمای محیط آن با دمای زمین تفاوت معنی‌داری دارد (Dash et al., 2013).

تمدن‌های باستان به چشمه‌های آبگرم احترام می‌گذاشتند زیرا اعتقاد بر این بود که آنها دارای قدرت‌های فوق طبیعی و شفا بخش

۱- دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر
۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر
۳ دانشجوی دکتری آلودگی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر
(*- نویسنده مسئول: Email:e.solgi@malayeru.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.12.3

هستند (Tanner and LaMoreaux, 2001). همچنین در کشورهایی مثل هند در دوران باستان از آنها به عنوان امکاناتی برای استحمام استفاده می‌کردند (Olivier et al., 2008). اخیرا آب چشمه‌های حرارتی به‌طور فزاینده‌ای در فرآیندهای صنعتی، کشاورزی، آبزی پروری و استخراج عناصر کمیاب مورد استفاده قرار می‌گیرند (Petraccia et al., 2005). اما همچنان استفاده از آن‌ها در استفاده‌های بهداشتی و درمانی در حال افزایش است (Harvey, 2007). ترکیب معدنی چشمه‌های آبگرم به سازندهای زمین شناسی و عمقی که از آن منشا گرفته‌اند بستگی دارد (Olivier et al., 2008). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب می‌تواند در طبقه بندی و ارزیابی کیفیت آب برای استفاده از آن جهت آبیاری برای کشاورزی، آشامیدنی و مقاصد صنعتی موثر باشند (Lakshmi et al., 2016). فعالیت هیدروترمال باعث ایجاد اثرات متقابل شیمیایی بین آبگرم و سنگ‌های اطراف می‌شود، به‌طوری که ترکیب عناصر محلول در آن را تغییر می‌دهد (German and VonDamm, 2003). و بسته به جنس بستر این املاح معدنی متفاوت خواهد بود. به‌طور کلی چشمه‌های آبگرم از نظر دما، ترکیب شیمیایی و pH بسیار متفاوت می‌باشند (Hussein et al., 2017). بر اساس استانداردهای بهداشتی، آب مصرفی در حوضچه‌های شنای چشمه‌های آبگرم همانند آب آشامیدنی باید دارای ویژگی‌های فیزیکی،شیمیایی و میکروبی مناسب باشد و چون به‌طور همزمان توسط افراد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند با مسائل و خطرات بهداشتی همراه می‌باشند (موثق و همکاران، ۱۳۹۷).

شناخت و بررسی کیفیت منابع آب در مدیریت و استفاده بهینه از آن از اهمیت بالایی برخوردار است (رهنما و سیاری، ۱۳۹۸) و یکی از موضوعات مهم در هیدرولوژی، کیفیت آب است که به دلیل کاربردهای متعدد آن و با بررسی کیفیت می‌توان از آلودگی آن جلوگیری کرد (Alley, 1993). اهمیت آنالیز ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی برای چشمه‌های آبگرم تا جایی است که برای طبقه‌بندی آن‌ها از این ویژگی‌ها استفاده می‌شود از جمله سابتاوونگ و همکاران بر اساس pH چشمه‌های آبگرم، را به شش طبقه تقسیم کردند که شامل چشمه‌های بسیار اسیدی ($pH<۲$)، چشمه‌های اسیدی ($۲ \leq pH<۴$)، چشمه‌های با اسدیته ضعیف ($۴ \leq pH<۶$)، چشمه‌های خنثی ($۶ \leq pH<۷/۵$)، چشمه‌های با قلیائیت ضعیف ($۷/۵ \leq pH<۹$) و چشمه‌های قلیایی ($pH>۹$) هستند (Subtavewung et al., 2005). همچنین ریس و همکاران چشمه‌های آبگرم را بر اساس آنیون‌ها و کاتیون‌های آن‌ها به پنج طبقه شامل آب‌های آهن‌دار (حاوی Fe^{+2} و Fe^{+3})، آب‌های کلره (حاوی Cl^{-})، آب‌های سولفوره (حاوی S^{-2})، آب‌های سولفاته (حاوی S_4^{-2}) و آب‌های بی‌کربناته (حاوی HCO_3^{-}) طبقه‌بندی نموده‌اند (Reyes et al., 2015). به‌علاوه در برخی مطالعات به‌منظور تعیین منشاء چشمه‌های آبگرم آنالیزهای شیمیایی کاتیون‌ها و آنیون‌ها در آب آنها انجام می‌شود (رقیمی و یحکشی، ۱۳۸۱) چون منشا چشمه‌های آبگرم روی نوع ترکیبات شیمیایی آنها اثر دارد (Yazdi et al., 2016).

در کنار روش‌های آماری، شاخص‌های مختلف به‌عنوان ابزارهایی که نشان دهنده‌ی کیفیت آب هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. شاخص‌های کیفی، روش‌هایی هستند که مقادیر ویژگی‌های کیفی آب (پارامترهای اندازه گیری شده) را به یک عدد تبدیل می‌نمایند تا برای مدیریت و تحلیل کیفیت آب و همچنین پایش تغییرات کیفی آب در طول زمان و مکان مورد استفاده قرار گیرند (Carbajal-Hernández et al., 2013). شاخص WQI ابزاری است که از سال۱۹۷۰جهت ارزیابی و پایش میزان تغییرات پارامترهای کیفیت آب استفاده شده و می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی در ارتباط با کیفیت منبع آب در اختیار ما قرار دهد (Ocampo-Duque et al., 2007). شاخص ویلکاکس یکی از رایج‌ترین شاخص‌ها به‌منظور بررسی کیفیت آب برای استفاده کشاورزی است (Wilcox, 1984). استاندارد INWQS مربوط به سازمان محیط زیست کشور مالزی است که بر اساس پارامترهای فیزیکی و شیمیایی کیفیت آب را در شش سطح طبقه‌بندی می‌کند (Rahaman et al., 2016).

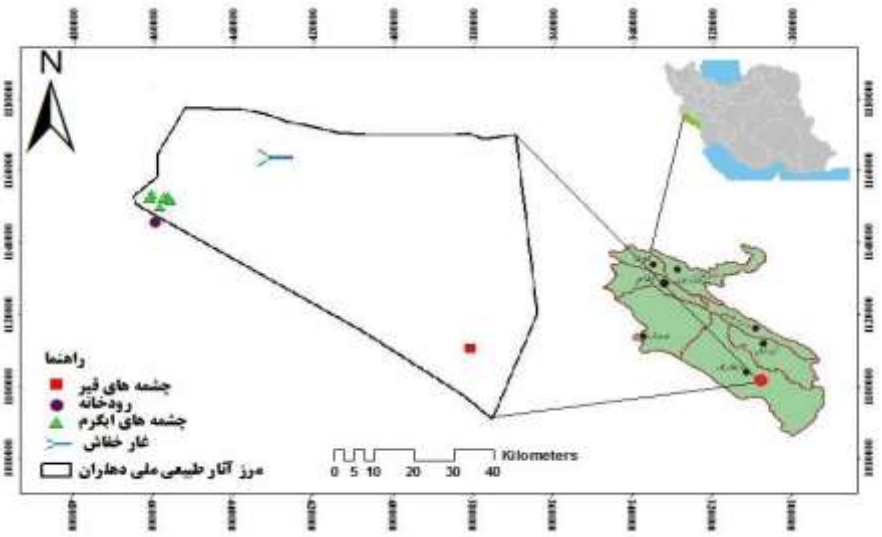
در مورد چشمه‌های آبگرم به دلیل اهمیت و کاربردهای مختلفی که دارند، تجزیه و تحلیل فیزیکوشیمیایی آب آنها در مناطق مختلف جهان گزارش شده است (Ghilamicael et al., 2017؛ Dash et al., 2013؛ Vardhan et al., 2015؛ et al., 2014 Rajapaksha؛ Yazdi et al., 2016؛ موثق و همکاران، ۱۳۹۷ و نعمتی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱). کیفیت آب سطحی داده‌های مهمی در مورد منابع موجود برای حمایت از زندگی در این اکوسیستم فراهم می‌کند (Manikannan et al., 2011). علاوه بر چشمه‌ها، رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع آب سطحی زیستگاه‌های طبیعی برای زندگی آبزیان و منابع بسیار مهمی برای انسان هستند (Basudha and Nongmaithem, 2017). رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آبی هستند که نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز فعالیت‌های مختلف نظیر کشاورزی، صنعت و شرب دارند، لذا حفاظت و استفاده بهینه از منابع آبی یکی از اصول توسعه پایدار هر کشور محسوب می‌گردد (رهنما و سیاری، ۱۳۹۸). اکوسیستم‌های رودخانه‌ی نه تنها برای توسعه اقتصادی و اجتماعی جوامع بشری مهم هستند، بلکه نقش مهمی در حفاظت محیط‌زیست، گسترش تنوع زیستی و بهبود کیفیت محیط فراهم می‌آورند (Sun et al., 2019). رودخانه‌ها گاهی از به هم پیوستن آب چندین چشمه شکل می‌گیرند مانند رودخانه‌ی آبگرم که از به هم پیوستن چشمه‌های آبگرم دهلران شکل گرفته است و در پایین دست منطقه برای آبیاری زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین رودخانه و رواناب‌های حاصل از چشمه قیر در منطقه مورد بررسی زیستگاه مناسبی برای گیاهان و پرندگان فراهم

آورد است (توکلی، ۱۳۹۷). بنابراین بررسی کیفیت آب این رودخانه علاوه بر موجودات زنده‌ای (پرندگان، آبزیان و گیاهان) که از آن تغذیه می‌کند در بحث امنیت غذایی محصولات کشاورزی منطقه بسیار مهم خواهد بود. چشمه قیر دهلران از دیگر مناطق نمونه‌برداری در این مطالعه است. از این چشمه‌ها، قیر به‌همراه آب از زمین می‌جوشد و پس از جمع شدن در حوضچه طبیعی، روی سطح زمین روان شده و قیرها در مسیر پراکنده شده‌اند. آب این چشمه‌ها سبب رویش گیاهان آبزی مانند نی و لوئی شده که زیستگاه مساعدی را برای پرندگان شکل داده است (توکلی، ۱۳۹۷). به‌طور کلی بررسی کیفیت آب چشمه قیر، چشمه‌های آبگرم و رودخانه حاصل از آن، در کنار جنبه حفاظتی و اهمیت منطقه به‌عنوان آثار طبیعی ملی، همچنین از نظر سلامت موجودات زنده‌ی تغذیه کننده، کاربردهای کشاورزی و استفاده‌های درمانی و بهداشتی همواره باید مورد پایش قرار گیرد. در مطالعه حاضر برای نخستین بار با به کارگیری روش‌های آماری و شاخص‌های کیفیت آب به بررسی کیفیت آب چشمه‌های آبگرم، رودخانه و چشمه قیر پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش مناطق مورد مطالعه شامل چشمه‌های آبگرم و چشمه قیر شهرستان دهلران در استان ایلام با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی می‌باشند. تمامی چشمه‌ها در یک مسیر مشخص تشکیل رودخانه داده و در پایین دست از آب آن برای مصارف کشاورزی استفاده می‌شود. چشمه‌های آبگرم و چشمه قیر جزء آثار طبیعی ملی دهلران هستند که با وسعت ۱۴۰۰ هکتار در سه کیلومتری شمال دهلران واقع شده‌اند که به دلیل برخورداری از پدیده‌های یونیک و ویژگی‌های منحصر به فرد (چشمه‌های قیر، چشمه‌های آبگرم و غار خفاش) در تاریخ ۱۳۵۵/۵/۶ تحت عنوان آثار طبیعی ملی به ثبت رسیده است. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است. چشمه‌های آبگرم در ابتدای منطقهٔ آثار طبیعی ملّی به‌صورت مجموعه‌ای از چشمه‌های بزرگ و کوچک از زمین می‌جوشند. آب این چشمه‌ها از نوع فسیلی هستند که به‌علّت وجود گوگرد بوی آن‌ها محدودهٔ وسیعی را در بر می‌گیرد و به‌منظور استحمام برای دفع بیماری‌های پوستی و آبیاری زمین‌های کشاورزی استفاده می‌شود. چشمه قیر نیز در بخش جنوبی محدودهٔ آثار طبیعی ملّی دهلران در منطقه‌ای دشتی واقع شده است (توکلی، ۱۳۹۷).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های آب از ۷ چشمه آبگرم و رودخانه حاصل از آن‌ها و چشمه قیر جمع‌آوری شد. خصوصیات مرفولوژی این چشمه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. از هر یک از این چشمه‌ها و رودخانه، ۴ نمونه آب سطحی برداشت شد و نمونه‌ها پس از برچسب‌گذاری در شرایط استاندارد به آزمایشگاه منتقل شدند.

جدول ۱- خصوصیات مرفولوژی مناطق مورد بررسی

محل نمونه‌برداری	چشمه‌های آبگرم							چشمه قیر	رودخانه
	چشمه ۱	چشمه ۲	چشمه ۳	چشمه ٤	چشمه ٥	چشمه ٦	چشمه ۷		
عمق (متر)	۱/۵	۲/۲	۱/۲	۳/۱	۳	۱/۸	۲/۴	۵	۰/۱-۰/۲
قطر (متر)	۰/۵	۰/۲۸	۰/۱۷	۰/۷	۰/۲۸	۰/۳۵	۰/۴۵	۰/۸	۳-۴

سنجش پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب

برای هر یک از نمونه‌های جمع‌آوری شده پارامترهای دما، pH، EC، NO_3، Na و K اندازه‌گیری شد. روش‌های آنالیز در این پژوهش بر اساس کتاب استاندارد متد انجام شد. pH (S.M-4500 pH-B) با استفاده از pH متر (AZ 86552) و EC (S.M-2510 EC-B) با استفاده از EC متر(AZ 86505) سنجش شد. اندازه‌گیری نیترات به روش رنگ سنجی انجام شد که پس از صاف کردن نمونه‌ها به ۵۰ میلی‌لیتر از هر نمونه، یک میلی‌لیتر اسید کلریدریک یک نرمال اضافه و در طول موج ۲۲۰ با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر (DR 6000) اندازه‌گیری نیترات (S.M-4500 NO_3-B) انجام گرفت. برای اندازه‌گیری سدیم و پتاسیم تا زمان قرائت، نمونه‌ها در دمای ۴- درجه سانتی‌گراد و pH کمتر از ۲ (با استفاده از اسید نیتریک) نگهداری شدند و با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر (405G) سنجش سدیم (S.M-3500 Na- B) و پتاسیم (S.M-3500 K-B) انجام شد.

آنالیزهای آماری

داده‌های به دست آمده از آنالیزهای آزمایشگاهی وارد نرم‌افزار SPSS شده و پس از بررسی آماره‌های توصیفی داده‌ها، توزیع نرمال داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیروویلک انجام شد. به‌منظور مقایسه کیفیت آب مناطق مورد بررسی با یکدیگر از نظر پارامترهای اندازه‌گیری شده با توجه به نرمال بودن توزیع داده‌ها آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) انجام شد. به‌منظور مقایسه‌ی پارامترهای اندازه‌گیری شده با استانداردهای مختلف از آزمون تی تک‌نمونه استفاده شد.

استانداردها و شاخص‌های کیفیت آب

استانداردهای مورد استفاده در این مطالعه شامل WHO، استاندارد ملی ایران و INWQS[1] بودند. از شاخص‌های ویلکاکس و WQI نیز جهت بررسی کیفیت آب استفاده شد. به‌منظور طبقه‌بندی کیفیت آب مناطق مورد بررسی از استاندارد ملی کیفیت آب (INWQS) که مربوط به کشور مالزی است استفاده شد. شاخص ویلکاکس از شاخص‌های سنجش کیفیت آب کشاورزی است که یکی از معیارهای طبقه‌بندی آن، هدایت الکتریکی است و در مطالعه حاضر از آن استفاده شده است. افزون بر این به‌منظور ارزیابی کیفیت آب در مناطق مورد بررسی از شاخص WQI استفاده شد که روابط (۱) تا (۴) برای محاسبه آن به کار گرفته می‌شوند. برای محاسبه این شاخص ابتدا با توجه به اهمیت نسبی هر پارامتر وزنی به آن اختصاص داده می‌شود (جدول ۲) و پس از آن وزن نسبی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود، در مرحله بعدی مقیاس نرخ کیفیت با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید و در نهایت شاخص WQI با استفاده از رابطه (۳) و (۴) محاسبه می‌شود.

$$WI=\frac{Wi}{\sum_{i=1}^{n} Wi} \quad (۱)$$

$$Qi=\frac{Ci}{Si} \quad (۲)$$

$$SIi=Wi\times Qi \quad (۳)$$

$$WQi=\sum_{i=1}^{n} SIi \quad (۴)$$

در این روابط WI: وزن نسبی، Wi: وزن هر پارامتر، n: تعداد پارامتر، Qi: مقیاس نرخ کیفیت، Ci: غلظت هر پارامتر، Si: استاندارد هر پارامتر شیمیایی، SIi: زیر شاخص کیفیت آب و WQi: شاخص کیفیت آب است. زمانی که مقدار شاخص WQI کمتر از ۵۰، ۱۰۰-۵۰، ۲۰۰-۱۰۰، ۳۰۰-۲۰۰ و بیشتر از ۳۰۰ به دست آید کیفیت آب به ترتیب عالی، خوب، ضعیف، بسیار ضعیف و نامناسب برای اهداف آشامیدن ارزیابی می‌شود.

جدول ۲- وزن و استاندارد مورد استفاده برای پارامترهای مورد بررسی (Taloor et al., 2020)

پارامتر	واحد	وزن
pH	-	٤
EC	µS/cm	٤
سدیم		۲
پتاسیم	mg/L	۲
NO_3		٤

نتایج

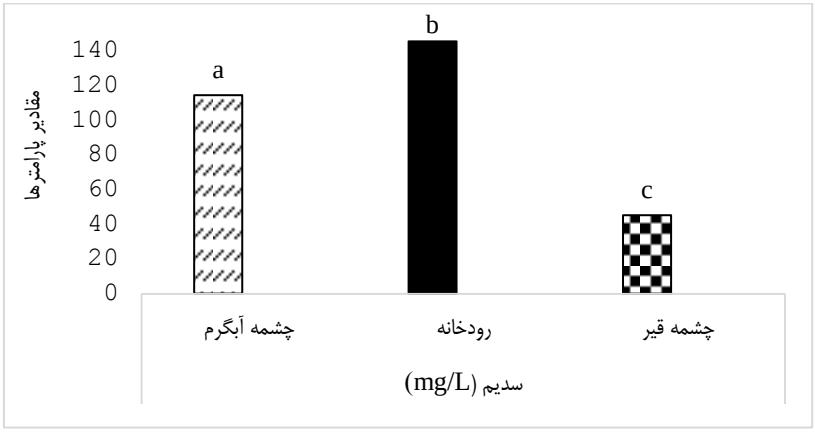
نتایج توصیفی برای پارامترهای مورد بررسی به تفکیک مناطق نمونه‌برداری در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مقادیر پارامترهای مورد بررسی برای چشمه‌های آبگرم و رودخانه به هم نزدیک‌تر است.

1- Interim National Water Quality Standards

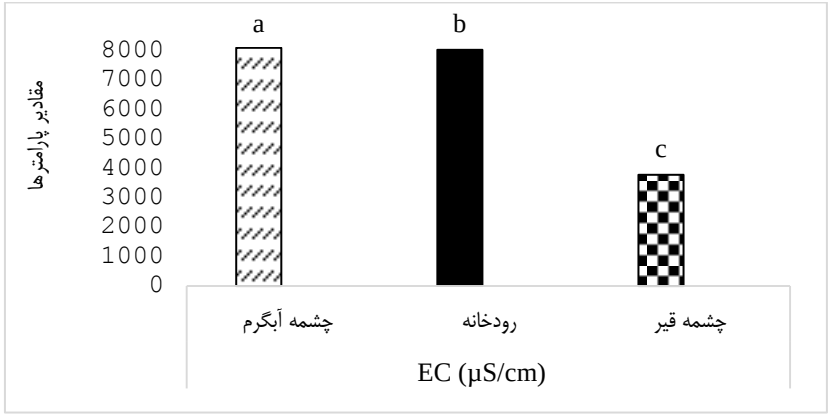
جدول ۳- میانگین و انحراف معیار پارامترهای مورد بررسی به تفکیک مناطق نمونه برداری

	دما	pH	EC	سدیم	پتاسیم	نیترات
واحد	C°	-	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L
چشمه‌های آبگرم	۴۵/۰۳±۱/۴۵	۶/۷±۰/۲۹	۸۰۹۵±۸۷/۸۳	۱۴۴/۵±۳۴/۸	۲/۹۸±۱/۱۳	۵/۲۲±۲/۰۶
رودخانه	۳۳/۲۵±۲/۷۵	۷/۰۵±۰/۰۸	۸۰۲۲/۵±۳۷/۷۴	۱۴۵/۷±۲۵/۸	۳/۲۲±۰/۶۱	۴/۰۲±۰/۹
چشمه قیر	۲۸±۲/۹۴	۶/۸۳±۰/۰۲	۳۷۸۰±۸/۱۶	۴۵/۲۵±۲۵/۵۶	۰/۹۲±۰/۳۶	۴/۱۲±۰/۸۸

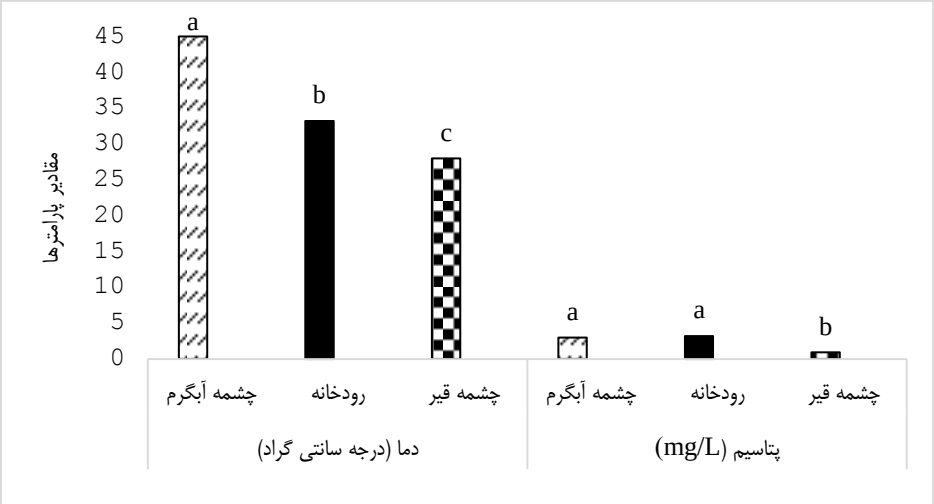
نتایج مقایسه میانگین سه منطقه از نظر پارامترهای اندازه‌گیری شده نشان داد، که مناطق مورد بررسی از نظر نیترات و pH اختلاف آماری معنی‌داری نداشتند ($p>0.05$)، اما از نظر دما، مقدار سدیم، پتاسیم و هدایت الکتریکی در آب دارای اختلاف آماری معنی‌دای هستند ($p<0.05$). بر این اساس برای این پارامترها (دما، EC، سدیم و پتاسیم) آزمون دانکن انجام شد که نتایج آن در شکل ۲، ۳ و ۴ آورده شده است. بر اساس این نتایج بین سه منطقه مورد بررسی از نظر دما اختلاف آماری معنی‌داری وجود دارد و برای هر سه پارامتر دیگر، آب چشمه قیر دارای اختلاف آماری معنی‌دار با دو منطقه دیگر است و مقادیر این پارامترها در چشمه قیر کمتر از دو منطقه دیگر است. در این نمودارها حروف مشترک نشان دهنده عدم معنی‌داری است.



شکل ۲- نتایج آزمون دانکن برای مقایسه میانگین مناطق مورد بررسی از نظر سدیم



شکل ۳- نتایج آزمون دانکن برای مقایسه میانگین مناطق مورد بررسی از نظر EC



شکل ٤- نتایج آزمون دانکن برای مقایسه میانگین مناطق مورد بررسی از نظر دما و پتاسیم

در جدول ۴ طبقه‌بندی ویلکاکس برای هدایت الکتریکی (EC) و وضعیت مناطق مورد بررسی نسبت به این طبقه‌بندی آورده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده تمام نمونه‌های سه منطقه مورد بررسی در طبقه چهار قرار دارند که شوری بالا است و برای آبیاری نا مناسب هستند.

جدول ٤- وضعیت نمونه‌های مورد بررسی بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس برای هدایت الکتریکی

دامنه	نوع آب	کیفیت	وضعیت برای آبیاری	تعداد نمونه‌ها			درصد نمونه‌ها		
				چشمه آبگرم	رودخانه	چشمه قیر	چشمه آبگرم	رودخانه	چشمه قیر
۲۵۰<	شوری کم	عالی	مناسب برای آبیاری انواع محصولات زراعی و انواع خاک	-	-	-	-	-	-
۷۵۰- ۲۵۰	شوری متوسط	خوب	در صورت وجود مقدار متوسط آبشویی، می‌توان از آن استفاده کرد. گیاهان قابل تحمل به نمک معمولاً بدون کنترل شوری قابل رشد هستند	-	-	-	-	-	-
۲۲۵۰- ۷۵۰	شوری بالا	مشکوک	نامناسب برای خاک‌هایی با زهکشی محدود	-	-	-	-	-	-
۲۲۵۰<	شوری بسیار	نامناسب	برای آبیاری نامناسب است	۲۸	۴	۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

نتایج مقایسه میانگین پارامترهای مورد بررسی با استانداردهای WHO و استاندارد ملی ایران در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده برای سه منطقه مورد بررسی پارامترهای سدیم، پتاسیم، نیترات و pH دارای اختلاف آماری معنی داری با استانداردهای WHO و استاندارد ملی ایران هستند. در مورد EC در استاندارد ملی عددی گزارش نشده است و مقایسه میانگین هدایت الکتریکی نمونه‌های آب در مناطق مختلف مورد بررسی با استاندارد WHO دارای اختلاف آماری معنی‌داری بود.

نتایج طبقه‌بندی آب مناطق مورد بررسی بر اساس استاندارد INWQS در جدول ۶ ارائه شده است. در جدول ۷ ویژگی‌های هر یک از طبقات INWQS ارائه شده است. بر اساس این نتایج همه نمونه‌های مورد بررسی از نظر pH در طبقه یک قرار دارند که تصفیه برای آبزی‌پروری گونه‌های حساس مورد نیاز نیست و از نظر نیترات تنها برای آبیاری مناسب هستند.

جدول ۵- مقایسه میانگین پارامترهای مورد بررسی با استاندارد آب آشامیدنی

	واحد	استاندارد WHO	سطح معنی‌داری برای مقایسه با استاندارد WHO			استاندارد ایران	سطح معنی‌داری برای مقایسه با استاندارد ایران		
			چشمه آبگرم	رودخانه	چشمه قیر		چشمه آبگرم	رودخانه	چشمه قیر
pH	–	۶/۵–۸/۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰	۶/۵–۸/۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰
EC	(µS/cm)	۵۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	–	–	–	–
سدیم		۲۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۱	۲۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۱
پتاسیم	(mg/L)	۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
نیترات		۵۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۵۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

جدول ٦- وضعیت آب مناطق مورد بررسی بر اساس طبقه‌بندی INWQS

	I	IIA	IIB	III	IV	V	چشمه‌های آبگرم	رودخانه	چشمه قیر
اکسیژن محلول (mg/L)	۷	۵–۷	۵–۷	۳–۵	<۳	<۱	–	–	–
pH	۶/۵–۸/۵	۶–۹	۶–۹	۵–۹	۵–۹	–	I	I	I
کل مواد جامد معلق (mg/L)	۲۵	۵۰	۵۰	۱۵۰	۳۰۰	>۳۰۰	–	–	–
کدورت (NTU)	۵	۵۰	۵۰	۱۵۰	۳۰۰	>۳۰۰	–	–	–
نیتریت (mg/L)	–	۰/۴	–	۰/۴	۱	–	–	–	–
نیترات (mg/L)	–	۷	۷	–	۵	۲	IV	IV	IV
آمونیوم (mg/L)	۰/۱	۰/۳	۰/۳	۰/۹	۲/۷	>۲/۷	–	–	–

جدول ۷- ویژگی گروه‌های مختلف در طبقه‌بندی INWQS

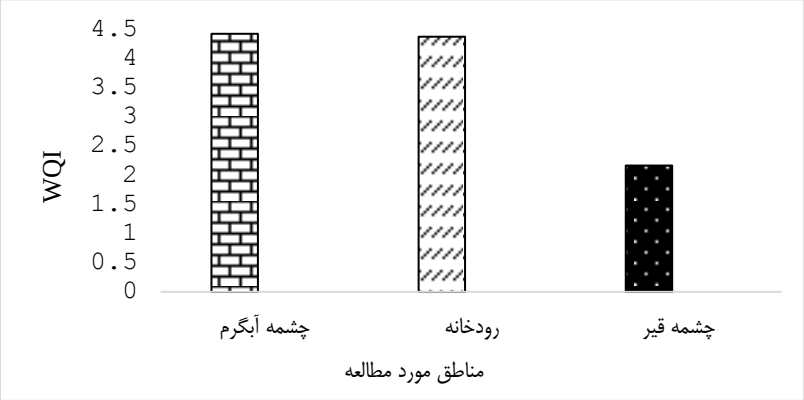
طبقه	کاربری
I	تصفیه برای آبزی‌پروری گونه‌های حساس مورد نیاز نیست
IIA	تصفیه برای آبزی‌پروری و گونه‌های حساس مورد نیاز است
IIB	مناسب برای فعالیت‌های تفریحی از جمله شنا
III	مناسب دامپروری و آبزی‌پروری
IV	فقط برای آبیاری مناسب است
V	بسیار آلوده است

در شکل ۵ نتایج شاخص WQI برای هر سه منطقه مورد بررسی آورده شده است. مقدار این شاخص برای چشمه‌های آبگرم، رودخانه و چشمه قیر دهلران به ترتیب ۴/۴۳، ۴/۳۸ و ۲/۱۷ به دست آمد که کمتر از ۵۰ بوده و در طبقه عالی قرار دارند.

بحث و نتیجه‌گیری

دسترسی به آب‌های سطحی و زیرزمینی و کیفیت آن با توجه به عوامل مهمی همچون افزایش جمعیت، توسعه کشاورزی، صنعتی شدن و شهرنشینی در جهان رو به کاهش است (Tyagi et al., 2012). آگاهی از کیفیت آب و روند تغییرات آن، اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی‌های آینده و مدیریت مناسب منابع آب دارد (سهرابی زاده و همکاران، ۱۳۹۷). این مسئله در مورد مناطقی که اهمیت حفاظتی دارند از جمله آثار طبیعی ملی دهلران اهمیت بیشتری دارد. استفاده‌های درمانی، کاربرد آب در کشاورزی و حفاظت از زیستگاه گیاهان و پرندگان منطقه از دیگر دلایل اهمیت بررسی کیفیت آب در مناطق مورد بررسی در این پژوهش است. بر اساس نتایج آزمون دانکن کیفیت آب چشمه قیر با دو منطقه دیگر از نظر هدایت الکتریکی، سدیم و پتاسیم دارای اختلاف آماری معنی‌داری است و دو منطقه چشمه‌های آبگرم و رودخانه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند که با توجه به اینکه رودخانه حاصل اتصال این چشمه‌های آبگرم است نتیجه به‌دست آمده مورد انتظار است و کیفیت چشمه‌های آبگرم و رودخانه اختلاف آماری معنی‌داری ندارند. همچنین دمای آب از عوامل موثر بر انحلال رسوبات در آب است و با انحلال‌پذیری اکثر

مواد جامد محلول در آب رابطه مستقیم دارد (نعمتی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱). بطوری‌که در این پژوهش مشاهده شد که مقادیر EC، سدیم و پتاسیم در چشمه‌های آبگرم و رودخانه بیشتر از چشمه قیر بود که با توجه به دمای بالاتر چشمه‌های آبگرم (۴۵/۰۲) مقادیر بالاتر سدیم و پتاسیم در این چشمه‌ها می‌تواند ناشی از اثر دما بر انحلال کاتیون‌ها از خاک و سنگ در آب باشد.



شکل ۵- مقایسه مناطق مورد بررسی از نظر شاخص کیفیت WQI

ماتز و همکاران چشمه‌های آبگرم را بر اساس دما به چهار طبقه تقسیم کرد که شامل: سرد (<۲۰ درجه سانتی‌گراد) ، نسبتا گرم (۳۰-۲۰C°) ، گرم (۴۰-۳۰C°) و بسیار گرم (< ۴۰ درجه سانتی‌گراد) می‌باشند (Matz et al., 2003). بر این اساس چشمه‌های آبگرم دهلران در طبقه بسیار گرم قرار می‌گیرند. بر اساس نتایج آزمون دانکن سه منطقه از نظر دما دارای اختلاف آماری معنی‌داری هستند که با توجه به منشا و سرچشمه آن‌ها این نتیجه مورد انتظار است. در منابع مختلف اعداد متفاوتی برای دمای مناسب جهت استحمام و استفاده درمانی از چشمه‌های آبگرم گزارش شده است از جمله انجمن UKHCA[1] دمای کمتر از ۴۴ درجه سانتی‌گراد را پیشنهاد دادند (UKHCA, 2016) در حالی که جاود و همکاران دمای ۳۷-۳۲ درجه سانتی‌گراد و روسکا و همکاران دمای ۳۷-۳۶ درجه سانتی‌گراد را مناسب می‌دانند (Rosca , 2003؛ Javed et al., 2009)؛ که بر اساس اثرات دما روی فشار خون، اسپاسم عضلات و اثر بر سیستم عصبی این دماها پیشنهاد داده شده است (Simon et al., 2019).

نتایج مقایسه میانگین پارامترهای مورد بررسی با استاندارد ملی ایران و استاندارد WHO نشان داد که در هر سه منطقه، این مقادیر با استانداردهای مورد بررسی دارای اختلاف آماری معنی‌داری هستند. میانگین pH در سه منطقه چشمه‌های آبگرم، رودخانه و چشمه قیر به ترتیب ۶/۷، ۷/۰۵ و ۶/۸۳ به دست آمد که در محدوده استاندارد (۸/۵-۶/۵) قرار دارند. بر اساس طبقه‌بندی سابتاوونگ و همکاران، pH نمونه‌های آب مورد بررسی در سه منطقه در طبقه خنثی قرار دارند (Subtavewung et al., 2005) و بر اساس استانداردهای موجود در دامنه استاندارد قرار داشتند. مقادیر پایین pH باعث خوردگی لوله‌ها و اتصالات انتقال آب، ایجاد لک، تحریک و سوزش چشم و پوست شناگران و مقادیر بالای pH باعث رسوبگذاری، کاهش کارایی کلر و کدر شدن آب می‌شود و بطور کلی pH از فاکتورهای موثر بر رشد جوامع میکروبی در آب است (منصوریان و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین pH روی محلول و نامحلول بودن بسیاری از آلاینده‌ها اثر دارد (WHO, 2011). میانگین EC در سه منطقه چشمه‌های آبگرم، رودخانه و چشمه قیر به ترتیب ۸۰۹۵، ۸۰۲۲/۵ و ۳۷۸۰ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر به دست آمد. هدایت الکتریکی به توانایی آب در هدایت جریان الکتریکی گفته می‌شود و به مقدار غلظت جامدات یونی و محلول بستگی دارد. در مطالعه حاضر مقادیر آن بسیار بالاتر از استانداردهای تعیین شده (۵۰۰ میکرو زیمنس بر سانتی‌متر) است.

برای چشمه‌های آبگرم، رودخانه و چشمه قیر میانگین سدیم به ترتیب ۱۴۴/۵، ۱۴۵/۷ و ۴۵/۲۵ برآورد شد و مقادیر پتاسیم برای این سه منطقه به ترتیب ۲/۹۸، ۳/۲۲ و ۰/۹ به دست آمد. سدیم یکی از عناصر رایج موجود در آب است که برای ارزیابی مناسب بودن آب برای آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا افزایش سدیم باعث کاهش نفوذپذیری خاک می‌شود (Taloor et al., 2020) در چشمه‌های آبگرم ترکیبات سدیم، کربنات سدیم و کربنات هیدروژن سدیم در درمان بیماری‌های از قبیل روماتیسم، ورم مفاصل، آرتروز، آلرژی و بیماری‌های سیستم عصبی موثر است و بیماری مزمن پوستی و سرخک و همچنین فشار خون را کاهش می‌دهد و پتاسیم بیماری‌های قلبی را تسکین می‌دهد، موجب بهبود سلامت استخوان، دندان و پوست می‌شود و ریتم قلب را عادی می‌کند. همچنین موجب کاهش فشار خون و دفع سموم از بدن می‌شود (et al., 2019

1- United Kingdom Home Care Association

Simon). در این مطالعه سدیم و پتاسیم کمتر از استانداردهای موجود (به ترتیب ۲۰۰ و ۱۲ میلی‌گرم بر لیتر) بودند.

میانگین نیترات برای سه منطقه چشمه آبگرم، رودخانه و چشمه قیر به ترتیب ۵/۲۲، ۴/۰۲ و ۴/۱۲ برآورد شد که بسیار کمتر از استاندارد تعیین شده یعنی۵۰ میلی‌گرم بر لیتر (WHO, 2011) بود. نیترات از جمله آنیون‌های محلول در آب و تأثیرگذار روی سلامت است که حضور آن در آب‌های زیرزمینی بیشتر ناشی از پساب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های انسانی می‌باشد (Pang et al., 2013). در این پژوهش با توجه موقعیت چشمه‌های مورد بررسی و رودخانه که در دامنه کوه واقع شده‌اند زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی در بالا دست وجود ندارند و همچنین در اطراف منطقه به دلیلی ارزش حفاظتی آثار طبیعی ملی دهلران منابع آلاینده انسانی و کشاورزی به منطقه وارد نمی‌شود بنابراین مقدار نیترات بسیار پایین‌تر از استاندارد است. و به نظر می‌رسد پایین بود این مقادیر نشان دهنده منشا طبیعی آن‌ها است.

نتایج مربوط به شاخص ویلکاکس بر اساس هدایت الکتریکی نشان داد که همه نمونه‌های سه منطقه در طبقه چهار (EC>۲۲۵۰) و نامناسب برای آبیاری هستند. همچنین بر اساس شاخص WQI نمونه‌های مورد بررسی در سه منطقه در طبقه یک و کیفیت عالی قرار گرفتند و بر اساس شاخص INWQS نتایج نشان داد که همه نمونه‌های مورد بررسی از نظر pH در طبقه یک که تصفیه برای آبزی‌پروری گونه‌های حساس مورد نیاز نیست و از نظر نیترات تنها برای آبیاری مناسب هستند. بنابراین از نظر کشاورزی و استفاده از آب منطقه برای کشاورزی بر اساس INWQS هیچ محدودیتی از نظر کیفیت آب وجود ندارد و حتی می‌توان برای آبزی‌پروری گونه‌های حساس هم از آب استفاده کرد با این وجود بر اساس شاخص ویلکوکس کیفیت آب نامناسب برای آبیاری ارزیابی شد. از طرفی بوی گوگرد منتشر شده از آب منطقه باید سایر آنیون‌ها و کاتیون‌ها از جمله سولفات نیز سنجش شود تا با اطمینان و نظارت دقیق‌تر بتوان استفاده از آب مناطق مورد بررسی را برای کشاورزی پیشنهاد کرد. به علاوه در مورد چشمه قیر علاوه بر کاتیون‌ها و آنیون‌های مختلف، با توجه به منشا چشمه قیر وجود مشتقات نفتی در آب این چشمه باید مورد اندازه‌گیری قرار گیرد. بر این اساس اگر چه کیفیت آب مناطق مورد بررسی بر اساس شاخص WQI عالی ارزیابی شد اما امکان استفاده از آب این مناطق به دلایل ذکر شده از جمله وجود سایر ترکیبات و بوی آب، قابل شرب نمی‌باشد و باید با جزئیات بیشتری مورد مطالعه قرار گیرد. اعتقاد بر این است که آب چشمه آبگرم بیماری‌های مختلفی را بهبود می‌بخشد، اما مناسب بودن آب برای نوشیدن ناشناخته است (Ghilamicael et al., 2017).

بطور کلی کیفیت منابع آب مورد بررسی بجز بر اساس شاخص ویلکوکس که برای آبیاری نامناسب است، بر اساس سایر شاخص‌ها در وضعیت مناسبی ارزیابی می‌شود. در کنار منشاء زمین شناسی که تعیین کننده ترکیب شیمیایی منابع آبی است؛ عوامل مختلفی در تغییر کیفیت آب نقش دارند از جمله وقوع سیلاب‌ها، ورد فاضلاب شهری؛ صنعتی و کشاورزی که موجب ورد انواع آلاینده‌ها نظیر مواد مغذی، مواد رادیواکتیو، آلودگی‌های نفتی و فلزات سنگین به منابع آب می‌شوند که سلامت گیاهان و جانوران آبزی دارند تحت تاثیر قرار می‌دهند (He et al., 2016).

جدول ۹- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با سایر مطالعات انجام شده بر روی چشمه‌های آبگرم

	دما	pH	EC	سدیم	پتاسیم	نیترات	رفرنس
	C°	-	µS/cm		mg/L		
۱	۴۵/۰۳	۶/۷	۸۰۹۵	۱۴۴/۵	۲/۹۸	۵/۲۲	چشمه‌های آبگرم (مطالعه حاضر)
۴	۳۰	-	۱۷۴۵	۲۴۴	۲۹	-	(رقیمی و یحکشی، ۱۳۸۱)
۵	۸۳/۸۷	۶/۲۳	۵۵۷۹	۱۰۰۹	۱۰۱	-	(موثق و همکاران، ۱۳۹۷)
۶	۷۳/۶	۶/۳۹	-	۱۴/۴۵	۱/۷۲	۳/۰۸	(Haki and Gezmu, 2012)
۷	۴۹/۲	۷/۲۲	۹۰۶۰۰	۱۸۸۸	۱۰۴	۱/۶۰	(Ghilamicael et al., 2017)
۸	۵۱/۷	۷/۶	۴۹۳	۳۹/۵	۱/۵۵	-	(Hamzah et al., 2013)
۹	۵۶	۷/۶۱	۳۳۲۰	-	-	۱/۸۳	(Hussein et al., 2017)
۱۰	۸۷/۱	۹	-	۳۰۳/۱	۲۳/۴	-	(Shi et al., 2017)
۱۱	۶۰/۴۶	۸/۴۴	۲۳۵	۲۲۸/۱۸	۳۸/۳	-	(Simon et al., 2019)
۱۲	۲۴/۳۰	۶/۹۲	۱۸۷۰۰	۶۵۱۰	۲۸۴	-	(Avşar et al., 2017)
۱۳	۸۹	۷/۲۳	۱۵۵۰	-	-	۰/۰۱	(Boyer et al., 2020)

در مورد مناطق مورد بررسی در این پژوهش با توجه به مدیریت و حفاظت منطقه به‌عنوان آثار طبیعی ملی، به نظر می‌رسد که نقش عوامل طبیعی از جمله زمین شناسی و وقوع سیلاب در ترکیب شیمیایی منابع آب مورد بررسی بسیار مهم‌تر باشد. بر این اساس

بررسی میزان فلزات سنگین و ترکیبات نفتی بخصوص در مورد چشمه قیر می‌تواند نقش موثری در پایش کیفیت آب در این مناطق داشته باشد با این وجود با توجه به بازدید گردشگران و استفاده بهداشتی درمانی از چشمه‌های آبگرم و احتمال احداث امکانات رفاهی برای گردشگران نباید از نقش عوامل انسانی بر کیفیت منابع آب منطقه غافل شد. در جدول ۹ نتایج مطالعه حاضر با نتایج برخی پژوهشگران مقایسه شده است.

مطالعه حاضر نخستین پژوهش انجام شده در ارتباط با کیفیت منابع آب در آثار طبیعی ملی دهلران می‌باشد. بطور کلی بیشتر مطالعات گزارش شده در این جدول مربوط به چشمه‌های آبگرم می‌باشد و در مورد رودخانه‌های شکل گرفته از چشمه‌های آبگرم و چشمه‌ی قیر مطالعه‌ای یافت نشد. مقادیر نیترات در مطالعه حاضر بیشتر از سایر مطالعات و مقدار EC نسبت همه مطالعات ذکر شده بجز آوسر و همکاران و قیلامیکال و همکاران بیشتر است (Avşar et al., 2017؛ Ghilamicael et al., 2017). و در مورد سدیم، پتاسیم و pH نتایج مطالعه حاضر بیشتر از برخی مطالعات و در برخی موارد هم کمتر از مطالعات ذکر شده است. این اختلاف‌ها بطور کلی به زمین شناسی منطقه و سایر منابع انسانی آلوده کنند در مناطق مورد بررسی بستگی دارد.

منابع

توکلی، م. ۱۳۹۷. مقایسه دو روش تصمیم‌گیری فرایند تحلیل شبکه‌ای و تحلیل سلسله مراتبی فازی به منظور ارزیابی توان اکولوژیک کاربری اکوتوریسم (مطالعه موردی: آثار طبیعی ملّی دهلران). جغرافیا و پایداری محیط. (۸): ۶۳-۵۱.

خلجی، م.، ابراهیمی، ع.، هاشمی نژاد، ه.، متقی، ا. و اسداله، س. ۱۳۹۵. ارزیابی کیفیت آب دریاچه سد زاینده رود با استفاده از شاخص WQI. مجله علمی شیلات ایران. ۲۵(۵): ۶۴-۵۱.

رقیمی، م. و یخکشی، م. ا. ۱۳۸۱. بررسی منشا چشمه آبگرم زیارت گرگان از طریق مطالعات هیدروشیمی و ایزوتوپی. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۹(۳): ۴۰-۲۹.

رهنما، س. و سیاری، ن. ۱۳۹۸. بررسی روند تغییرات پارامترهای شیمیایی کیفیت آب رودخانه تجن با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی و نرم‌افزار Aqua Chem. انسان و محیط زیست. ۱۷(۱): ۱۳-۲۵.

سهرابی زاده، ز.، شریفی مقدم، ا. و حکیم زاده، م.ع. ۱۳۹۷. تحلیل روند تغییرات کیفیت آب حوزه آبخیز رودخانه تالار با استفاده از روش ناپارامتری من- کندال. فصلنامه اکوسیستم‌های طبیعی ایران. ۸(۳): ۲۰-۱.

منصوریان، ح.، رجبی زاده، ا.، جعفری مدرک، م.، دولتشاهی، ش. و حاتمی، ب. ۱۳۹۲. ارزیابی شاخص‌های بهداشتی کیفیت آب استخرهای شنای شهر کرمان در سال ۱۳۹۰. مجله بهداشت و توسعه. ۲(۲): ۱۳۷-۱۲۸.

موثق، ل.، زرینی، غ. ر. و قیامی راد، م. ۱۳۹۷. بررسی کیفیت فیزیکی، شیمیایی و میکروبی حوضچه‌های شنای چشمه‌های آبگرم مشکین شهر. هیدروژئولوژی. ۳(۱): ۶۸-۶۰.

نعمتی مقدم، ع.، غفوریان، ح. و امینی رنجبر، غ.ر. ۱۳۹۱. مطالعه بعضی خواص فیزیکی و شیمیایی و اندازه‌گیری فلزات سنگین سرب و کادمیوم در سه چشمه آبگرم لاویج چمستان. مجله پژوهش‌های علوم و فنون دریایی. ۷(۲): ۱۰-۱.

Alley, W.M. 1993. Regional ground-water quality. New York. Van Nostrand Reinhold. P.634.

Ansari, M.A., Deodhar, A., Kumar, U.S., and Khatti, V.S. 2015. Water quality of few springs in outer Himalayas–A study on the groundwater–bedrock interactions and hydrochemical evolution. Groundwater Sus. Develop. 1: 59-67.

Avsar, O., Avşar, U., Arslan, Ş., Kurtuluş, B., Niedermann, S., and Güleç, N. 2017. Subaqueous hot springs in Köyceğiz Lake, Dalyan Channel and Fethiye-Göcek Bay (SW Turkey): Locations, Chemistry and origins. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 345: 81-97.

Boyer, G.M., Schubotz, F., Summons, R.E., Woods, J., and Shock, E.L. 2020. Carbon oxidation state in microbial polar lipids suggests adaptation to hot spring temperature and redox gradients. Frontiers in microbiology. 11, p229.

Carbajal-Hernández, J.J., Sánchez-Fernández, L.P., Villa-Vargas, L.A., Carrasco-Ochoa, J.A., and Martínez-Trinidad, J.F. 2013. Water quality assessment in shrimp culture using an analytical hierarchical process. Ecological indicators. 29:148-58.

Dash, A., Palita, S.K., and Patra, H.K. 2013. Physico-chemical analysis of thermal spring of Atri in the district of Khurda, Odisha, India. International Journal of Chemical Sciences and Applications 4: 97–104.

German, C.R., and VonDamm, K.L. 2003. Hydrothermal processes. In: Holland, H.D., Turekian, K. K. (Eds.). Treatise on Geochemistry. Elsevier. 181–221.

Ghilamicael, A.M., Boga, H.I., Anami, S.E., Mehari, T., and Budambula, N. 2017. Physical and chemical characteristics of five hot springs in Eritrea. Journal of Natural Sciences Research 7: 88-94.

Haki, G.D., and Gezmu, T.B. 2012. Physico-chemical

chemical properties of different water bodies of manipur. Journal of Scientific Research & Reports. 16:1-6.

Ocampo-Duque, W., Schuhmacher, M., and Domingo, J.L. 2007. A neural-fuzzy approach to classify the ecological status in surface waters. Environmental Pollution. 148: 634- 41.

Olivier, J., Van Niekerk, H.J., and Van der Walt, I.J. 2008. Physical and chemical characteristics of thermal springs in the Waterberg area in Limpopo Province. South Africa. Water SA. 34:163-174.

Pang, Z., Yuan, L., Huang, T., Kong, Y., Liu, J., and Li, Y. 2013. Impacts of human activities on the occurrence of groundwater nitrate in an alluvial plain: a multiple isotopic tracers approach. International Journal of Earth Sciences 24: 111-124.

Petraccia, L., Liberati, G., and Masciullo, S.G. 2005. Water, mineral waters and health. Clinical Nutrition. 25: 377-385.

Rahaman, Z.A., Cherus, S.F., Omar, M.A. and Ismail, W.R. 2016. Rivers and Lakes as Natural Heritage: Water Quality Status in the Northern States of Peninsular Malaysia. The Asian Journal of Humanities 23: 109-128.

Rajapaksha, B.M.M., Maithreepala, R.A., and Asanthi, H.B. 2014. Water quality and biology of hot springs waters of Mahapelessa, Sri Lanka. Scientific Research Journal. 2: 1–6.

Ramirez, N.F. and Solano, F. 2004. Physicochemical water quality indices-A comparative Review. Revista Bifua. 27, 437-441.

Reyes, J.N., Jaramillo, M.E., Soriano, A.O., and Romero, I.V. 2015. Physical-chemical and therapeutic properties of hot springs and hydrothermal waters. International Journal of Research and Innovations in Earth Science 2: 1375-2394.

Rosca, M. 2003. Geothermal energy and therapy uses in Romanian spas. IGC2003 - short course, Geothermal Training Programme. 99-117.

Shi, Z., Liao, F., Wang, G., Xu, Q., Mu, W., and Sun, X. 2017. Hydrogeochemical characteristics and evolution of hot springs in eastern Tibetan Plateau geothermal belt, western China: Insight from multivariate statistical analysis. Geofluids 1-11.

Simon, N., Unjah, T., Yusry, M., and Dzulkafli, M.A. 2019. Physico-chemical Characterisation and Potential Health Benefit of the Hulu Langat Hot Spring in Selangor, Malaysia. Sains Malaysiana 48: 2451-2462.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 2017. Ed 23 by Rodger B. Baird , Andrew D. Eaton , Eugene W. Rice .American Public Health Association (APHA). PP 1545.

properties of waters from some Ethiopian hot springs and the risk to the health of the community. Greener Journal of Physical Sciences. 2:138-40.

Hamzah, Z., Rani, N.A., Saat, A., and Wood, A.K. 2013. Determination of hot springs physico-chemical water quality potentially use for balneotherapy. Malaysian Journal of Analytical Sciences 17:436-444.

Haque, S., Kannaujiya, S., Taloor, A.K., Keshri, D., Bhunia, R.K., Ray, P.K.C., and Chauhan, P. 2020 . Identification of groundwater resource zone in the active tectonic region of Himalaya through earth observatory techniques. Groundwater Sustain. Develop.10p.100337.doi.org/10.1016/j.gsd.2020. 100337.

Harvey, K. 2007. Healing Touch. Sawubona. January 2007. 75-76.

He, W., Bai, Z.L., Liu, W.X., Kong, X.Z., Yang, B., Yang, C., Jrgensen, S.E. and Xu, F.L. 2016. Occurrence, spatial distribution, sources, and risks of polychlorinated biphenyls and heavy metals in surface sediments from a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu). Environmental Science and Pollution Research 23: 10335-10348.

Hussein, E.I., Jacob, J.H., Shakhatreh, M.A.K., Abd Al-razaq, M.A., Juhmani, A.S.F., and Cornelison, C.T. 2017. Exploring the microbial diversity in Jordanian hot springs by comparative metagenomic analysis. MicrobiologyOpen. 6: 1-8.

Javed, A., Iqbal, J., Asghar, U., Khan, F.A., Munshi, A.B., and Sddiqui, I. 2009. A study to evaluate therapeutic properties of minerals of Manghopir Hot Sping, Karachi. Chemical Society of Pakistan. 31: 396-401.

Lakshmi, P., Reddy, M., Reddy, C., and Rao, A. 2016. Studies of physico-chemical parameters to evaluate quality of water at different zones of Nalagonda District of Telangana, India. Journal of Earth Science and Climatic change. 7, 374. doi:10.4172/2157-7617.1000347.

Lamoreaux, P.E., and Tanner, J.T (eds). 2001. Springs and Bottled Waters of the World. Ancient History, Source, Occurrence. Quality and Use. Springer Verlag. Berlin.

Manikannan, R., Asokan, S., and Samsoor-Ali, A.M. 2011. Seasonal variations of physic-chemical properties of the great Vedaranyam swamp, point Calimere wildlife sanctuary, South-east coast of India. African Journal of Environmental Science and Technology 5:673-681.

Matz, H., Orion, E. and Wolf, R. 2003. Balneotherapy in dermatology. Dermatologic Therapy 16: 132-140.

Nongmaithem, N. and Basudha, C. 2017. Physico-

analysis. International Journal of Pharmaceutical Innovations. 4:48-60.

UKHCA. 2016. Controlling Scalding Risks from Bathing and Showering. Sutton: United Kingdom Homecare Association Ltd.

Vardhan, H., Verma, A.K., Allayie, S.A., and Mushtaq, R. 2015. Assessing variations in physico-chemical parameters of Tatapani spring of district Rajouri - Jammu. Indian Journal of Science and Research 11:133–138.

WHO. 2011. Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization. Geneva 2011. 303-304.

Wilcox, L.V. 1984. The quality of water for irrigation use. US Department of Agricultural Technical Bulletin 1962. Washington.

Yazdi, M., Hassanvand, M., Tamasian, O., and Navi, P. 2016. Hydrogeochemical characteristics of Mahallat hot springs, central Iran. Journal of Tethys 4:169-179.

Subtavewung, P.H., Raksaskulwong, M., and Tulyatid, J. 2005. The characteristic and classifcation of hot springs in Thailand. Proceedings World Geothermal Congress. Antalya. Turkey. 24-29.

Sun, X., Zhang, H., Zhong, M., Wang, Z., Liang, X., Huang, T., and Huang, H. 2019. Analyses on the temporal and spatial characteristics of water quality in a seagoing river using multivariate statistical techniques: A case study in the duliujian river, China. International Journal of Environmental Research and Public Health 6: 10-20.

Taloor, A.K., Pir, R.A., Adimalla, N., Ali, S., Manhas, D.S., Roy, S., and Singh, A.K. 2020. Spring water quality and discharge assessment in the Basantar watershed of Jammu Himalaya using geographic information system (GIS) and water quality Index (WQI). Groundwater for Sustainable Development. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100364.

Tyagi, P.K., Shruti, S.V., and Ahuja, A. 2012. Synthesis of metal nanoparticals: A biological prospective for

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2112-2124

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۲۴-۲۱۱۲

Assessing the Quality of Water Resources of Dehloran National Natural Monuments Using Water Quality Index (WQI)

E. Solgi[1*], M. Malk Mohammadi[2], F. Beigmohammadi[3]

Recived: Aug.11, 2020 Accepted: Sep.16, 2020

Abstract

In the current water crisis, the use of springs has helped to mankind in many areas. The application of indexes and statistical methods provide useful information for understanding water quality and planning for its proper management. When water resources have unique characteristics in addition to conventional use; this issue becomes more important, including the river, hot springs and Dehloran bitumen springs. In this study, 28 samples of hot spring water, 4 samples of river water and 4 samples of bitumen spring water were collected. The temperature, pH, EC, sodium, potassium and nitrate parameters were measured. One-way analysis of variance and one-sample T-test were used to compare the three regions and compare with WHO standard and Iranian national standard, respectively. Wilcox, WQI and INWQS indices were also used to classify water quality. Based on the results, bitumen spring water had a statistically significant difference with the other two regions in terms of all parameters and all parameters in the three regions had a statistically significant difference with WHO standards and Iran's national standard and lower than these standards. According to the Wilcox index, all specimens were unsuitable for irrigation; based on the data of the WQI index calculation, water quality can be classified as excellent quality and according to INWQS in terms of pH for aquaculture of sensitive species do not need treatment and in terms of nitrate are only suitable for irrigation. Considering the management and protection of the region as a national natural monument, it seems that the role of natural factors such as geology and the occurrence of floods in the chemical composition of water resources is much more important and based on the results of used methods with the exception of Wilcox index, the water quality was assessed as suitable. However, considering the health use of hot springs and the possibility of constructing welfare facilities for tourists, the role of human factors on the water quality of resources in the region should not be overlooked.

Keywords: Bitumen spring, Dehloran National natural monuments, Nitrate, Water Quality Indexes

1- Associate Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University
2- M.Sc. of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University
3- Ph.D. Student of Environmental Pollution, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University
(*- Corresponding Author Email: e.solgi@malayeru.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۳۵-۲۱۲۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2125-2135

مقاله پژوهشی

اثر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت ورامین با استفاده از شاخص‌های بارش استاندارد، نیستور و منبع آب زیرزمینی

حمیدرضا عزیزی[۱]، حسین ابراهیمی[۲*]، حسین محمد ولی سامانی[۳]، ویدا خاکی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲۲

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی اثر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت ورامین است. بدین منظور اثر خشکسالی هواشناسی از طریق شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص نیستور (NISTOR) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) بررسی گردید. لذا جهت ارزیابی میزان تأثیر پارامترهای اقلیمی همانند دما و بارش بر روی وضعیت آب زیرزمینی دشت ورامین از آمار زمانی (۱۳۶۷-۱۳۹۷) پارامترهای معرف دشت استفاده گردید. نتایج نشان داد که بر مبنای شاخص SPI، این دشت در طی ۱۰ سال انتهای دوره زمانی مورد بررسی، به شرایط خشکسالی ضعیف در حال نزدیک شدن است. بنابراین با توجه به کمبود منابع تغذیه طبیعی آبخوان در طی سالیان اخیر (از سال ۸۸ تا کنون)، اُفت‌های تصادعدی در این آبخوان رخ داده که منجر به قرارگیری شاخص GRI از شرایط خشکسالی نرمال به شرایط خشکی نسبتا شدید شده است. در نهایت نتایج شاخص SPI و GRI با شاخص NISTOR که از ماتریس استنتاجی ترکیب شاخص اقلیمی دی-مارتن و بارش موثر بدست آمد، مقایسه شد. این شاخص نیز اثر شاخص خشکسالی و تغذیه توسط بارش موثر بر منابع آب زیرزمینی را در بازه مورد نظر، بسیار شدید ارزیابی کرد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، دشت ورامین، SPI، GRI، NISTOR

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهمترین منابع آب مورد نیاز بخش‌های کشاورزی، شُرب و صنعت به خصوص در مناطق با اقلیم خشک و نیمه خشک به حساب می‌آیند. در سال‌های اخیر تغییرات آب و هوایی و خشکسالی، تمامی مناطق جهان را درگیر مسائل و بحران‌های خود کرده است، به طوری‌که براساس پنجمین گزارش ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییراقلیم (IPCC) دمای کره زمین ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد از سال ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ افزایش یافته است و اگر انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش نیابد، متوسط دمای کره زمین تا سال ۲۱۰۰ می‌تواند به میزان ۱/۱تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (IPCC, 2013). به نظر می‌رسد خشکسالی و تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی، سبب افزایش شرایط نامطلوب آب وهوایی به صورت تغییرات در اُلگوی بارش و نوسانات دما در آینده‌ای نزدیک شود، بنابراین بارش به عنوان یک عامل کلیدی در تغییر دامنه چرخه هیدرولوژیکی، عواقب جدی را به دنبال خواهد داشت (Najafi and Moazami, 2015). خشکسالی هواشناسی، همزمان با افزایش دما و کمبود میزان بارندگی سالانه در بازه‌ای معین، نسبت به میانگین بلند مدت منطقه رخ می‌دهد. این امر منجر به کاهش تغذیه منابع آب سطحی و زیرزمینی و درنتیجه منجر به ایجاد تغییرات در اکوسیستم طبیعی و محیط‌زیست حاکم بر این مناطق و منابع آب زیرزمینی می‌شود. یکی از پیامدهای منفی خشکسالی هواشناسی، افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی و ایجاد چالش‌های جدی در کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک می‌شود. پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی اثرات خشکسالی بر منابع آب‌های زیرزمینی، بیانگر اهمیت شناسایی ارتباط خشکسالی و منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

رادفر و همکاران اثر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت شهرکرد را بررسی نمودند و نشان دادندکه خشکسالی و برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی بر نوسانات سطح آب موثر بوده

۱-دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲-دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳-استاد گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۴-استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شهر قدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Ebrahimi165@yahoo.com)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.7.8

است(Radfar et al., 2013). چمن‌پیرا و همکاران به مطالعه اثر خشکسالی بر منابع آب‌های زیرزمینی دشت الشتر شهرستان خرم‌آباد با استفاده از شاخص خشکسالی GRI[1] و شاخص بارش استاندارد شده SPI[2] پرداختند. نتایج نشان داد که SPI در بازه ۲۴ ماهه بیشترین همبستگی را با سطح آب زیرزمینی داشته است(Chamanpira et al., 2014). احمدی آخورمه و همکاران (۱۳۹۴) اثر خشکسالی بر سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعاتی مرودشت خرامه استان فارس را با استفاده از شاخص منابع آب زیرزمینی GRI، شاخص سطح آب استاندارد شده SWI و سیستم اطلاعات جغرافیایی بررسی و وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی را با هر دو شاخص تایید نمودند.

نیستور و میندراس به روش جدید NISTOR-CEG method با در نظر گرفتن بارش موثر و ضریب خشکی دی-مارتن، در کارپاتیانز به شیوه جدید شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی را بررسی کردند. نتایج ماتریس استنتاجی این روش حاکی از شدت اثر کم تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی این منطقه بود (Nistor and Mindrescu, 2017). لی و رودل در بررسی خشکسالی آب‌های زیرزمینی در آمریکا نشان دادند که شاخص خشکسالی SPI با تاخیر ۱۲ و ۲۴ ماهه دارای بیشترین همبستگی با شاخص SWI می‌باشد (Li and Rodell, 2014).

میشرا و همکاران نشان دادند که ادامه‌ی روند خشکسالی هواشناسی به مدت طولانی سبب بروز خشکسالی هیدرولوژیکی میگردد که باعث اُفت سطح آب رودخانه‌ها و مخازن سطحی و زیرسطحی می‌شود (Mishra et al., 2010).

اسدزاده و همکاران (۱۳۹۵) به مطالعه تاثیر خشکسالی بر کیفیت و سطح آب زیرزمینی دشت چهاردلی قروه پرداختند. نتایج آنها نشان داد که خشکسالی در بازه بلندمدت ۲۴ و ۴۸ ماهه دارای همبستگی معنی‌داری با سطح و کیفیت آب‌های زیرزمینی است. یعقوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی سه روش ریزمقیاس‌نمایی در پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی تحت تاثیرتغییراقلیم پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر شاخص SPI در مقیاس زمانی‌های طولانی مدت شدت خشکسالی بیشتر را نشان می‌دهد. شهوری و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه دشت ورامین با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان رواناب در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت هر سه سناریو در فصول بهار و تابستان افزایش خواهد یافت و در فصول پاییز و زمستان کاهش خواهد یافت. این جابجایی فصلی در رواناب ناشی از اثرات تغییر اقلیم به شکل افزایش دما، تغییر الگوی بارش و ... می‌باشد. دووا و همکاران اثر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی منطقه کارست تحت مدل HadCM3 در دوره آتی را بررسی کردند، نتایج نشان دهنده کاهش مقدار تغذیه و ذخیره منابع آب زیرزمینی بود(Dua et al., 2019) .

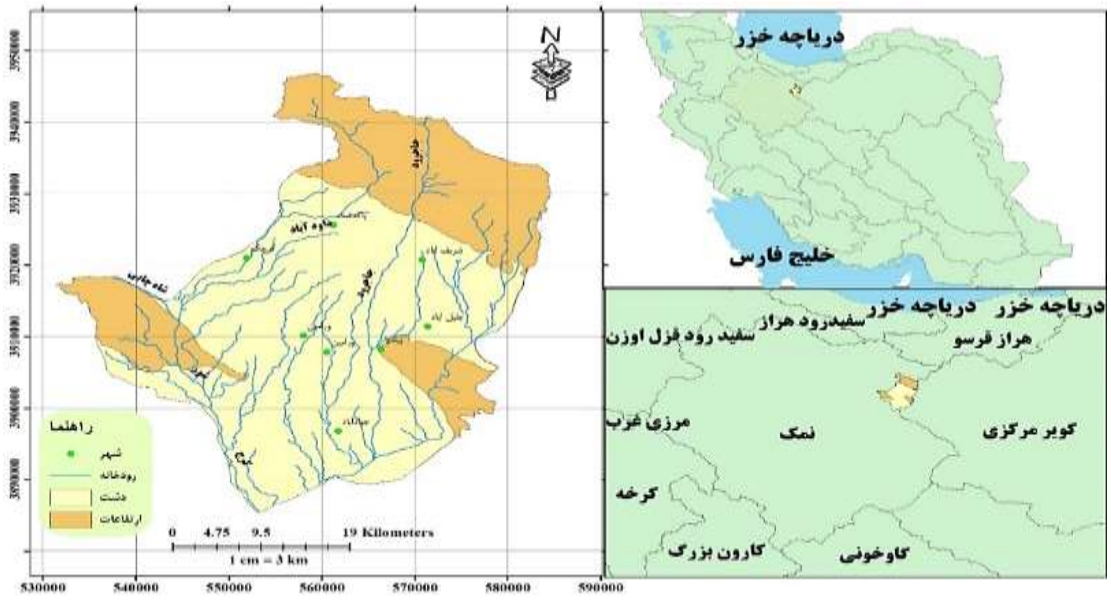
بررسی منابع نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مطالعه اثر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی با توجه به شدت، مدت و گستره جغرافیایی آن در هر منطقه متفاوت بوده و قابل تعمیم به مناطق دیگر نمی‌باشد. از طرفی در مطالعات صورت گرفته مربوط به خشکسالی، استفاده همزمان شاخص SPI برای خشکسالی هواشناسی و GRI برای خشکسالی هیدرولوژیکی و مقایسه آن‌ها با شاخص NISTOR مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین هدف از این تحقیق پایش زمانی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت ورامین در استان تهران و تعیین تغییرات آن با توجه به شاخص SPI و GRI و مقایسه نتیجه آن‌ها با ماتریس استنتاجی شاخص NISTOR می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت ورامین منطقه‌ای استراتژیک از نظر کشاورزی در فاصله ۴۵-۴۰ کیلومتری جنوب تا جنوب‌شرقی استان تهران واقع شده است. وضعیت اقلیمی این دشت از بسیاری جهات مشابه آب و هوای فلات مرکزی ایران بوده و در اقلیم خشک تا نیمه خشک قرار دارد. حوضه آبریز دشت ورامین با وسعتی معادل ۱۷۲۰ کیلومتر مربع از زیرحوضه‌های دریاچه نمک است که در محدوده جغرافیایی ۳۵ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). میانگین سالانه دما در این حوضه ۱۶/۹ درجه سانتیگراد بوده و گرم‌ترین ماه سال جولای با میانگین دمای ۲۹/۵ درجه سانتیگراد و سردترین ماه سال ژانویه با میانگین دمای ۳/۳ درجه سانتیگراد است همچنین میانگین بارش ۱۵۶ میلی‌متر در سال است. رودخانه‌های جاجرود، کندرود-گلندوک و دماوند در حوضه آبریز مطالعاتی قرار گرفته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها رودخانه جاجرود است که سد لتیان در بالادست آن احداث شده است. رودخانه جاجرود از ارتفاعات رشته جبال البرز در شمال تهران سرچشمه گرفته و در جهت جنوب غربی حرکت می‌کند و به سد لتیان وارد می‌شود. سپس با دریافت رودخانه‌ی دماوند، به دریاچه نمک منتهی می‌شود. سد لتیان یکی از عواملی است که در چرخه هیدرولوژیکی حوضه و همچنین توسعه کشاورزی پایین‌دست خود تاثیر زیادی دارد. به دلیل محدودیت پراکندگی ایستگاه‌های هواشناسی، اطلاعات ماهانه ایستگاه سینوپتیک دشت ورامین واقع در محدوده آبخوان به عنوان معرف دشت مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در این پژوهش از داده‌های ماهانه ۴۸ حلقه چاه پیزومتری با دوره آماری ۳۰ ساله استفاده گردید. این اطلاعات از بخش مطالعات شرکت‌های آب منطقه‌ای کل کشور و آب منطقه‌ای استان تهران تهیه گردید.

1- Groundwater Resources Index
2- Standard Precipitation Index



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (دشت ورامین)

شاخص بارش استاندارد (SPI)

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در سال ۱۹۹۳ توسط مکی و همکاران به منظور پایش خشکسالی اقلیمی ابداع گردید (Mckee et al., 1993). این شاخص بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص عنصر بارندگی می‌باشد. مهم‌ترین مزیت این شاخص قابلیت محاسبه در مقیاس‌های زمانی مختلف است که باعث می‌شود این شاخص بتواند اثرات دوره‌های کوتاه مدت ذخایر آب (از جمله رطوبت خاک که در تولیدات کشاورزی نقش مهمی دارد) و اثرات دوره‌های طولانی مدت منابع آب (از جمله ذخایر آب زیرزمینی و سطح مخازن آب) را پایش نماید (Mishra and Sigh, 2010). جدول ۱ طبقه‌بندی این شاخص را نشان می‌دهد.

جدول ۱- جدول استاندارد وضعیت بارش بر اساس SPI

تر سالی بسیار شدید	تر سالی شدید	تر سالی متوسط	تر سالی ضعیف	نزدیک به نرمال	نرمال	نزدیک به نرمال	خشکسالی ضعیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید	وضعیت خشکسالی هواشناسی
۳	۲/۵	۲	۱/۵	۱	~۰/۵ -۰/۵	-۱	-۱/۵	-۲	-۲/۵	-۳	SPIشاخص

شاخص آب زیرزمینی (GRI)

وقوع خشکسالی‌های متناوب و طولانی و نوسانات بالای آب و هوا از عوامل اصلی کمبود آب به‌ویژه منابع آب سطحی است که فشار مضاعفی را بر منابع آب‌های زیرزمینی وارد می‌کند. ارتباط بین خشکسالی هواشناسی با تاخیر زمانی در یک مکان به خشکسالی هیدرولوژی منجر می‌شود که در هیدرولوژی آب‌های زیرمینی، این تاخیر زمانی بیشتر می‌باشد.

مندیسینو و همکاران شاخص (GRI) را به عنوان شاخصی مفید و قابل اعتماد برای پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد دادند. مقدار این شاخص از رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (۱)$$

که در این رابطه، $D_{y,m}$ مقادیر آب زیرزمینی در سال y و ماه m، $\mu_{D,m}$ میانگین مقادیر آب زیرزمینی در ماه m و $\sigma_{D,m}$ انحراف معیار مقادیر آب زیرزمینی در ماه m می‌باشد (Mendicino et al., 2008).

طبقات مختلف رطوبتی در شاخص GRI و شاخص SPI در جدول ۲ نشان داده شده اند، هر چه مقادیر آن از ۲+ بیشتر باشد، ترسالی بسیار شدیدتر و هر چه این مقادیر از ۲- کمتر باشد، خشکسالی بسیار

شدیدتر خواهد بود.

جدول ۲- وضعیت خشکی متناسب با شاخص GRI

GRIمقادیر	SPIمقادیر	وضعیت	طبقات
۲ و بیشتر	۲ و بیشتر	ترسالی بسیار شدید	۱
۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید	۲
۱ تا ۱/۴۹	۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط	۳
۰/۹۹ تا ۰/۹۹-	۰/۹۹ تا ۰/۹۹-	نزدیک به نرمال	۴
۱/۴۹- تا ۱-	۱/۴۹- تا ۱-	خشکسالی متوسط	۵
۱/۹۹- تا ۱/۵-	۱/۹۹- تا ۱/۵-	خشکسالی شدید	۶
۲- و کمتر	۲- و کمتر	خشکسالی بسیار شدید	۷

شاخص تلفیقی دی مارتن-بارش مؤثر (NISTOR)

این شاخص توسط نیستور و میندراس ارائه شده است (Nistor and Mîndrescu, 2017). با ترکیب مقدار بارش موثر و شاخص اقلیمی دی-مارتن اقدام به بررسی شدت اثرات تغییرات اقلیم بر روی منابع آب زیرزمینی در مقیاس مکانی و زمانی می‌نماید (شکل ۲). برای این منظور لازم است مقدار بارش موثر که از اختلاف بین مقدار بارش اندازه‌گیری شده و تبخیر-تعرق واقعی است، محاسبه گردد. برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی لازم است ابتدا تبخیر-تعرق پتانسیل اصلاح شده به روش تورنت-وایت محاسبه شود (Thornthwaite,1948). تبخیر-تعرق پتانسیل اصلاح شده را می‌توان از معادله ۲ بدست آورد:

$$PET = 16N_m\left(\frac{10\bar{T}_m}{I_y}\right)^a \quad (۲)$$

$$i_m = \left(\frac{\bar{T}_m}{5}\right)^{1.51} \quad (۳)$$

$$I_y = \sum_{m=1}^{12} i_m \quad (۴)$$

$$a = (675\times10^{-9})I^3 - (771\times10^{-7})I^2 + (179\times10^{-4})I + 0.492 \quad (۵)$$

که ضریب اصلاحی (Nm)، متوسط درجه حرارت ماهانه (Tm)، شاخص حرارتی ماهانه (i_m)، شاخص حرارتی سالانه (Iy) و ضریب (a) است که به شاخص حرارتی سالانه بستگی دارد. با تعیین مقدار تبخیر-تعرق ماهانه، می‌توان بر اساس رابطه ۵ مقدار تبخیر-تعرق سالانه را تعیین نمود:

$$\text{Annual PET} = \sum_{m=1}^{12} PET_m \quad (۶)$$

حال می‌توان با در اختیار داشتن تبخیر-تعرق سالانه و رابطه Budyco (معادله ۷) مقدار تبخیر-تعرق واقعی APET را تعیین کرد (Budyko(1974))،Gerrits et al. (2009)) Nistor and Porumb Ghiurco(2015)):

$$\frac{APET}{PP} = \left[(\varphi * \tan\frac{1}{\varphi})(1-\exp^{-\varphi})\right]^{0.5} \quad (۷)$$

$$\varphi = \frac{PET}{PP} \quad (۸)$$

در معادله ۷، تبخیر-تعرق واقعی منطقه (APET)، عدد نپر (exp) برابر با ۲,۷۱۸۲، ضریب خشکی منطقه (φ)، تبخیر-تعرق پتانسیل سالیانه بر حسب میلی‌متر (PET) و مجموع بارش سالیانه بر حسب میلی‌متر (PP) می‌باشد. در گام آخر مقدار بارش موثر از تفاضل بین بارش سالانه و تبخیر-تعرق واقعی محاسبه می‌شود:

$$\text{Annual effective precipitation [mm]} = \text{Annual precipitation [mm]} - \text{Annual AET [mm]} \quad (۹)$$

شاخص اقلیمی دی-مارتن

شاخص دی مارتن به طور گسترده در مطالعات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص که توسط دی مارتن (De Martonne (1926, Deniz et all (2011) پیشنهاد گردیده است، برای تعیین رطوبت خاک در سطح مناطق محلی و کوچک کاربرد دارد. برای مطالعات محیطی، استفاده از شاخص خشکی دی مارتن (DAI) جهت تحلیل‌های مکانی و زمانی از فراوانی کاربرد بیشتری برخوردار است. این شاخص بر اساس رابطه ۱۰محاسبه شده و نوع اقلیم منطقه با توجه به جدول ۳ تعیین می‌گردد:

$$DAI = \frac{P}{T+10} \quad (۱۰)$$

در رابطه ۱۰، مقدار متوسط بارش سالانه بر حسب میلی‌متر (P) و متوسط درجه حرارت سالانه بر حسب سانتی‌گراد (T) می‌باشد.

جدول ۳- طبقه‌بندی اقلیمی شاخص خشکی دی- مارتن

نوع اقلیم	شاخص خشکی دی مارتن	بارش (میلی‌متر)
رطوبت شدید	> 55	> 800
بسیار مرطوب	$35 \le DAI \le 55$	$700 \le P \le 800$
مرطوب	$28 \le DAI < 35$	$600 \le P < 700$
نیمه‌مرطوب	$24 \le DAI < 28$	$500 \le P < 600$
مدیترانه‌ای	$20 \le DAI < 24$	$400 \le P < 500$
نیمه‌خشک	$10 \le DAI < 20$	$200 \le P < 400$
خشک	< 10	< 200

بارش مؤثر (میلیمتر)				
0 - 100	101 - 200	201 - 400	401 - 600	> 600
Very high	High	Medium	Low	Very low

شاخص دی مارتن برای تعیین نوع اقلیم		
Extremely humid	> 55	Very low
Very humid	35 ≤ IDM ≤ 55	Low
Humid	28 ≤ IDM < 35	Medium
Semi-humid	24 ≤ IDM < 28	High
Mediterranean	20 ≤ IDM < 24	Very high

Medium	Low	Low	Very low	Very low
High	Medium	Low	Low	Very low
High	High	Medium	Low	Low
Very high	High	High	Medium	Low
Very high	Very high	High	High	Medium

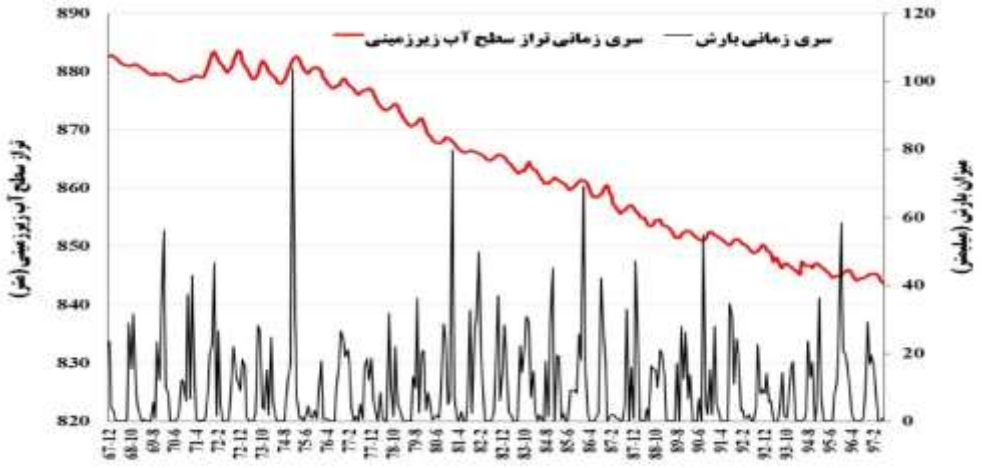
اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب زیرزمینی				
Very high	High	Medium	Low	Very low

شکل۲- ماتریس ارزیابی شدت اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب زیرزمینی در مقیاس مکانی و زمانی توسط شاخص NISTOR (Nistor and Mindrescu, 2017)

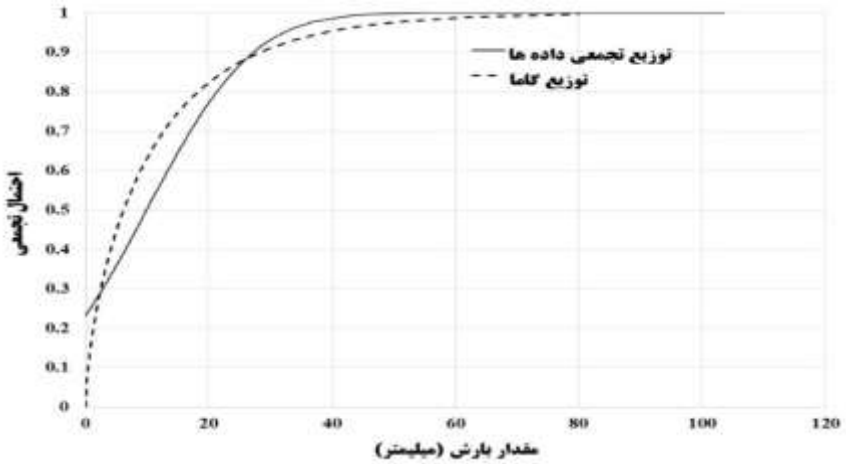
نتایج و بحث

با توجه به اینکه در محاسبه شاخص‌های SPI و GRI به ترتیب دو پارامتر بارش و تراز سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرند، لذا قبل از تعیین مقادیر عددی این شاخص‌ها، سری زمانی این دو پارامتر به صورت همزمان مورد ارزیابی قرار گرفت. بازه تغییرات بارش از ۲ تا ۱۱۰میلی‌متر و تغییرات عمق آب نیز از ۴۰ تا ۸۸۳ متر است. نوسانات بارندگی نیز به صورتی است که در سال‌های آبی ۶۹، ۷۴، ۸۰، ۸۶، ۹۰ و ۹۶ دارای بیشترین مقادیر هستند. عمق آب‌های زیرزمینی نیز در طول دوره آماری همواره در حال کاهش است(شکل ۳). ترسیم همزمان این دو پارامتر نشان می‌دهد که تا حد زیادی تراز سطح آب زیرزمینی علاوه بر برداشت‌هایی که از سطح دشت صورت می‌گیرد به تغذیه ناشی از نزولات جوی وابسته است و افزایش میزان بارش، منجر به افزایش تراز سطح آب زیرزمینی پس از چند ماه می‌گردد. این روند هماهنگ تراز با بارش در طی دوره ۳۰ ساله (۱۳۶۷-۹۷)، کاملا مشخص بوده و حاکی از اثرگذاری تغییرات اقلیم منطقه بر روی سفره آب زیرزمینی است.

با استفاده از آمار ماهانه ایستگاه سینوپتیک دشت ورامین که اطلاعات آن مورد بازسازی قرار گرفته است، اقدام به محاسبه شاخص SPI گردید. سری زمانی مورد استفاده در این ایستگاه برابر با ۳۰ سال (۱۳۶۷-۹۷) می باشد که در شکل ۳ نمایش داده شده است. جهت محاسبه شاخص SPI، قدم نخست برازش توزیع گاما بر اطلاعات سری زمانی مورد نظر می باشد. تابع توزیع گامای تجمعی برازش داده شده بر سری زمانی بارش در ایستگاه مورد بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است برای تعیین این توزیع از محیط نرم افزار MATLAB2018b استفاده شده است. گام بعدی انتقال احتمال تجمعی از توزیع گامای بدست آمده به توزیع نرمال استاندارد تجمعی با میانگین صفر و انحراف معیار یک می‌باشد.

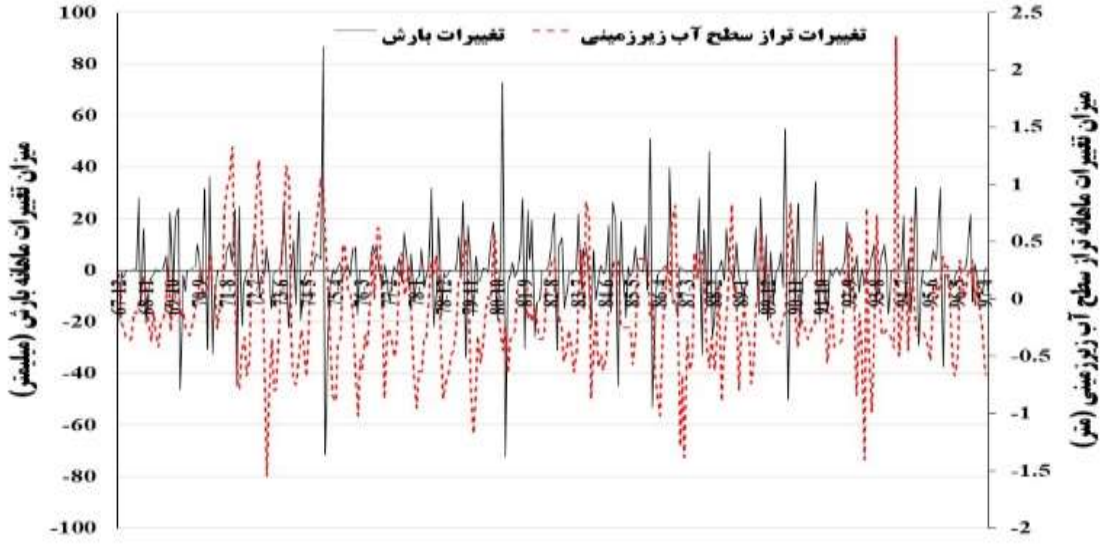


شکل ۳- سری زمانی بارش و تراز سطح آب زیرزمینی دشت ورامین در طی دوره ۳۰ ساله



شکل ٤- توزیع احتمال تجمعی بارش در ایستگاه ورامین نسبت به توزیع گاما

جهت مشاهده میزان اثرگذاری بارش بر روی آب زیرزمینی دشت ورامین، تغییرات ماهانه تراز سطح آب زیرزمینی و بارش در طی دوره ۳۰ ساله مورد مطالعه، ترسیم گردید. با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که در غالب ماه‌هایی که میزان تغییرات بارش مثبت بوده است، تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی نیز مثبت شده و عدم هماهنگی میزان تغییرات بارش با تراز در برخی از ماه‌ها به دلیل برداشت‌های قابل توجهی است که در سطح دشت صورت گرفته است و منجر به هم خوردن توازن تغذیه طبیعی با مقادیر تخلیه می‌گردد. بر این اساس، اثرات قابل توجه تغییرات نزولات جوی بر منابع آب زیرزمینی دشت ورامین کاملا مشهود می‌باشد.



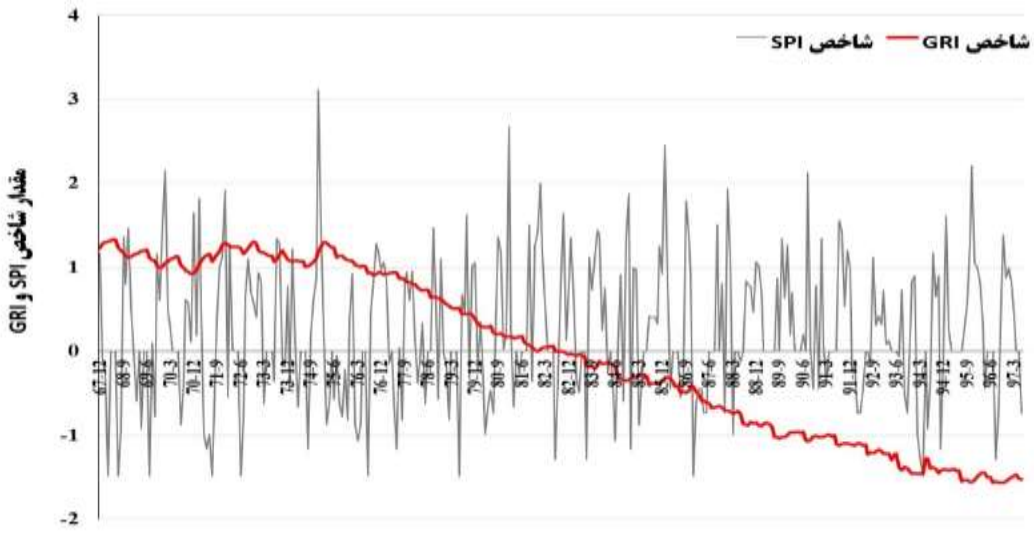
شکل ۵- سری زمانی تغییرات ماهانه بارش و تراز سطح آب زیرزمینی دشت ورامین در طی دوره ۳۰ ساله

شاخص خشکسالی GRI برای کل محدوده دشت ورامین و بر اساس تراز سطح آب زیرزمینی بدست آمده از ۴۸ پیزومتر در تمام سطح دشت محاسبه (جدول ۴) و به صورت مقایسه‌ای با شاخص SPI در شکل ۶ ارائه شده است.

بررسی همزمان این دو شاخص نشان می‌دهد که بر مبنای شاخص SPI، دشت ورامین در طی ۳۰ سال گذشته از نظر خشکسالی هواشناسی، در وضعیت نزدیک به نرمال و نرمال قرار داشته که در طی ۱۰ سال انتهای دوره زمانی مورد بررسی، این شرایط به خشکسالی ضعیف در حال نزدیک شدن است. با توجه به برداشت‌های بیش از ظرفیت سفره آب زیرزمینی دشت ورامین و کمبود منابع تغذیه طبیعی آبخوان در طی سالیان اخیر (از سال ۸۸ تا کنون)، اُفت‌های تصادعدی در این آبخوان رخ داده است که منجر به قرارگیری شاخص GRI در وضعیت خشکسالی ضعیف و نزدیک شدن به خشکسالی متوسط شده است. این وضعیت با شاخص SPI در طی دوره زمانی مورد اشاره شده نزدیک می‌باشد.

جدول ٤- نتایج شاخص خشکسالی GRI به شکل زمانی

سال	شاخص GRI	سال	شاخص GRI	سال	شاخص GRI
۱۳٦۷	۱/۲۲۵۱۳۳	۱۳۷۷	۰/۸۸۴۴۳۷	۱۳۸۷	-۰/۶۲۰۷۹
۱۳٦۸	۱/۲۳۷۵۷۳	۱۳۷۸	۰/۶۸۴۸۶۵	۱۳۸۸	-۰/۷۹۶۱۸
۱۳٦۹	۱/۱۱۳۹۴۴	۱۳۷۹	۰/۴۷۸۵۵۵	۱۳۸۹	-۰/۹۵۰۲۹
۱۳۷۰	۱/۰۲۸۵۷۴	۱۳۸۰	۰/۲۴۸۸۷۶	۱۳۹۰	-۱/۰۰۲۳۹
۱۳۷۱	۱/۱۳۰۲۷۵	۱۳۸۱	۰/۱۱۰۲۷۳	۱۳۹۱	-۱/۰۵۸۵۶
۱۳۷۲	۱/۲۴۱۰۷۷	۱۳۸۲	۰/۰۱۷۶	۱۳۹۲	-۱/۱۵۷۴۲
۱۳۷۳	۱/۱۴۳۱۶۹	۱۳۸۳	-۰/۱۱۰۷۳	۱۳۹۳	-۱/۳۲۴۰۲
۱۳۷٤	۱/۰۶۹۵۵	۱۳۸۴	-۰/۲۴۳۵۴	۱۳۹۴	-۱/۴۰۶۲
۱۳۷۵	۱/۱۸۴۶۱	۱۳۸۵	-۰/۳۳۵۹۸	۱۳۹۵	-۱/۴۸۰۸
۱۳۷٦	۰/۹۷۷۵۳۳	۱۳۸۶	-۰/۴۱۱۹	۱۳۹۶	-۱/۵۱۸۶۷



شکل ٦- مقایسه مقادیر ماهانه شاخص‌های SPI و GRI در سطح دشت ورامین برای یک دوره ۳۰ ساله

جهت ارائه دید بهتر از اثرات کاهش نزولات جوی و به طور کلی کم‌بارشی بر روی آبخوان دشت ورامین از شاخص ترکیبی GRSPI ماهانه در قالب رابطه ۱۱ استفاده شده است:

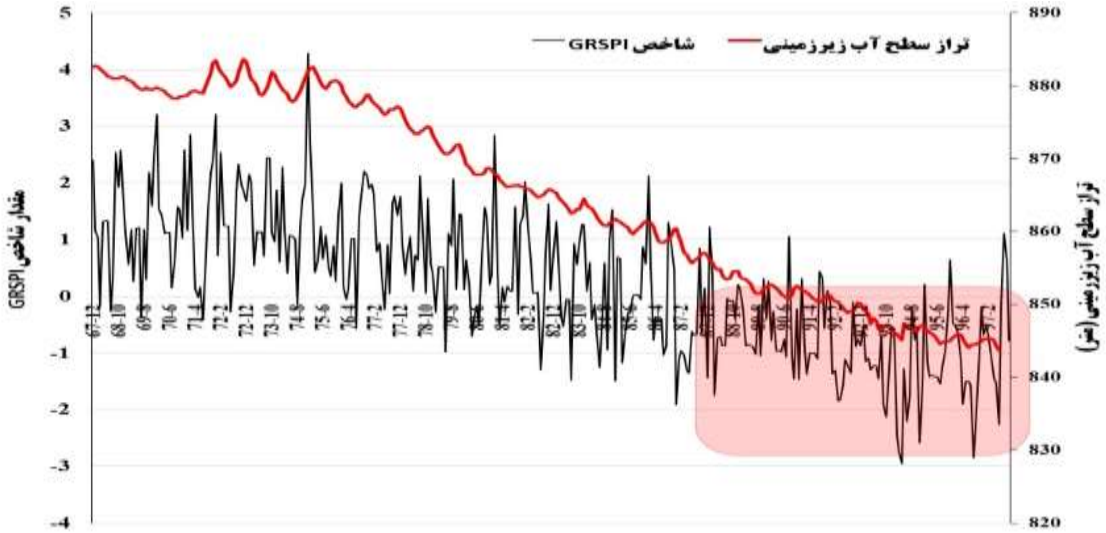
$$GRSPI_m = GRI_m + SPI_m \qquad (۱۱)$$

در رابطه ۱۱، GRI_m و SPI_m به ترتیب مقادیر شاخص منبع آب زیرزمینی و شاخص بارش استاندارد شده در ماه mام می‌باشند. با توجه به ترسیم مقادیر این شاخص (شکل ۷)، می‌توان دریافت که از سال ۱۳۹۲ به بعد وضعیت آبخوان از شرایط خشکسالی نرمال خارج شده و وارد شرایط خشکی نسبتا شدید شده است. همچنین اثرات کاهش نزولات جوی و تغییر اقلیم در نتیجه افزایش درجه حرارت در این منطقه که موجب کاهش رواناب‌های سطحی و در نتیجه تغذیه سطحی و زیرزمینی آبخوان می‌شود، به خوبی در این نمودار مشهود است. این هماهنگی اُفت تصاعدی تراز سطح آب زیرزمینی با شاخص GRSPI بیانگر اثرات قابل توجه شرایط اقلیم حاکم بر منطقه بر ذخایر آبی زیرزمینی دشت ورامین بوده است.

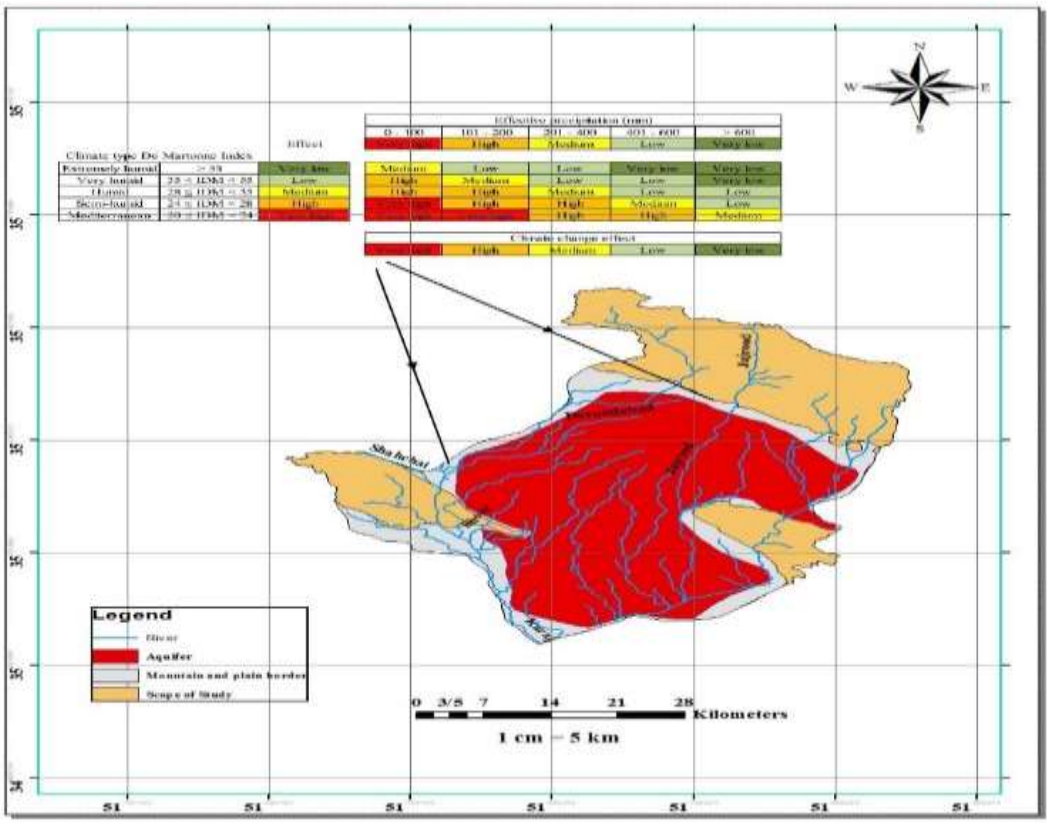
ماتریس استنتاجی NISTOR

با توجه به روش پیشنهادی NISTOR با تلفیق بارش مؤثر و شاخص اقلیمی دی مارتن می‌توان میزان شدت اثر خشکسالی بر روی منابع آب زیرزمینی در دشت ورامین را بررسی نمود. در این مطالعه مقدار بارش مؤثر و شاخص اقلیمی دی-مارتن به صورت ماهانه در بازه زمانی ۳۰ ساله مورد نظر محاسبه گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اثرات خشکسالی بر روی منابع آب زیررمینی دشت ورامین قابل توجه می‌باشد (شکل ۸) که این نتیجه گیری با نتایج قبل

(مقایسه شاخص SPI و GRI) تطابق دارد. لازم به ذکر است با توجه به عدم وجود آمار و اطلاعات مکانی هواشناسی از سطح دشت ورامین، ممکن است این تاثیر در تمامی سطح دشت یکسان نباشد و لازم است پهنه‌های تاثیر تغییر اقلیم با داده‌های مکانی تکمیل شده مورد بررسی قرار گیرد. نتیجه بدست آمده مرتبط با سیمای عمومی دشت تحت شرایط موجود می‌باشد. جزئیات سالانه مقادیر بارش مؤثر و شاخص خشکی دی مارتن برای سه دهه ارائه شده است (جدول ۵).



شکل ۷- تغییرات شاخص GRSPI در مقایسه با سری زمانی تراز سطح آب زیرزمینی در طی دوره زمانی ۳۰ساله



شکل ۸- نقشه شدت اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی توسط شاخص Nistor در بازه ۱۳۶۸-۱۳۹۸

جدول ۵- ارزیابی شدت اثرات تغییر اقلیم و خشکسالی بر روی منابع آب زیرزمینی دشت ورامین توسط روش NISTOR

بازه زمانی	متوسط بارش مؤثر (میلی‌متر)	متوسط شاخص DAI	میزان تأثیر
۷۸-۱۳۶۸	۹۰/۸۴	۴/۳۰	بسیار زیاد
۸۸-۱۳۷۸	۱۰۵/۴۲	۴/۷۵	بسیار زیاد
۹۸-۱۳۸۸	۸۳/۰۶	۳/۸۲	بسیار زیاد

نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت ورامین از طریق شاخص بارش استاندارد (SPI)، شاخص نیستور (NISTOR) و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا جهت ارزیابی میزان تأثیر پارامترهای اقلیمی همانند دما و بارش بر روی وضعیت آب زیرزمینی دشت ورامین از آمار زمانی (۱۳۶۷-۱۳۹۷) پارامترهای معرف دشت استفاده گردید. نتایج شاخص‌های خشکسالی نشان داد که در دوره مطالعاتی در محدوده آبخوان دشت ورامین خشکسالی هواشناسی رخ داده است. همچنین با توجه به قرار گرفتن منطقه مورد مطالعه در اقلیم نیمه‌خشک، نتایج این مطالعه با ارزیابی شدت اثر خشکسالی تصویر روشنی از روند تراز آب زیرزمینی را نشان داد که می‌تواند با ادامه روند خشکسالی و برداشت‌های بی‌رویه، در آینده نزدیک این منطقه را دچار کم آبی، کاهش کیفیت آب و فرونشست کند. بنابراین این بررسی‌ها می‌تواند مورد استفاده متخصصان و برنامه‌ریزان مرتبط با مسائل آب در منطقه قرار گیرد. لازم به ذکر است با توجه به عدم وجود آمار و اطلاعات مکانی هواشناسی از سطح دشت ورامین، ممکن است این تأثیر در تمامی سطح دشت یکسان نباشد و لازم است پهنه‌های تاثیر خشکسالی با داده‌های مکانی تکمیل شده مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع

احمدی آخورمه، م.، نوحه‌گر، ا.، سلیمانی مطلق، م.، و طایی سمیرمی، م. ۱۳۹۴. بررسی خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های SWI و GRI در آبخوان محدوده مطالعاتی مرودشت خرامه استان فارس. نشریه مهندسی آبیاری و آب. ۲۱(۶): ۱۰۵-۱۱۸.

اسدزاده، ف.، کاکی، م.، شکیبا، س. و راعی، ب. ۱۳۹۵. تأثیر خشکسالی بر کیفیت و سطح آب زیرزمینی دشت قروه و چهاردولی. نشریه تحقیقات منابع آب ایران. ۱۲(۳): ۱۶۵-۱۵۳.

شهوری، ن.، خلیلیان، ص.، موسوی، س.ح.، و مرتضوی، س.ا. ۱۳۹۸. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه دشت ورامین با استفاده از مدل SWAT. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۲): ۳۵۴-۳۶۶.

یعقوب‌زاده، م.، امیرآبادی‌زاده، م.، خزیمه نژاد، ح.، و زراعتکار، ز. ۱۳۹۷. ارزیابی سه روش ریزمقیاس‌نمایی در پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی تحت تاثیرتغییراقلیم. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲(۲): ۳۵۴-۳۶۶.

Budyko, M.I. 1974. Climate and Life. Academic Press, New York, USA, p. 508.

Chamanpira, G., Zehtabian, G., Ahmadi, H., and Malekian, A. 2014. Effect of drought on groundwater resources; a study to optimize utilization management (Case study: Alashtar plain). Bull. Env. Pharmacol. Life Science 3:48-56

De Martonne, E. 1926. A new ciimatological function: the aridity index. La Meteorol. 2, 449e458 (In French).

Deniz, A., Toros, H., and Incecik, S. 2011. Spatial variations of climate indices in Turkey. Int. J. Climatol. 31, 394e403.

Dua, K.S.Y., Klaas, Monzur, A., Imteaz, Ika Sudiayem, Elkan M.E., Klaas, Eldav, C.M. Klaas. 2019. Assessing climate changes impacts on tropical karst catchment: Implications on groundwater resource sustainability and management strategies. Journal of Hydrology. 582: 124426. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124426.

Gerrits, A.M.J., Savenije, H.H.G., Veling, E.J.M., and Pfister, L. 2009. Analytical derivation of the Budyko curve based on rainfall characteristics and a simple evaporation model. Water Resource. Res. 45 (W04403), 1–15. http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007308

IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change. 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Li, B., and Rodell, M. 2014. Evaluation of a model-based groundwater drought indicator in the conterminous US. Journal of Hydrology 526:78-88.

Mckee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8 confij, Applied Climatology.

Mishra, A.K., and Singh, V.P. 2010. A Review of drought concepts. Journal of Hydrology 391(1):202-216.

Mendicino, G., Senatore, A., and Versace, P. 2008. A

regional scale? A spatial approach of Emilia-Romagna region GEOREVIEW Scientific Annals of Ștefan cel Mare University of Suceava Geography Series 25. doi:10.4316/GEOREVIEW.2015.25.1.268.

Radfar, M., Van Camp, M., and Walraevens, K. 2013. Drought impacts on long-term hydrodynamic behavior of groundwater in the tertiary–quaternary aquifer system of Shahrekord plain, Iran. Environmental Earth Sciences 70(2):927-942

Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38, 55–94. Xie, X., Li, Y.X., Li, R.

Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. Journal of Hydrology 357(3): 282-302.

Najafi, M.R., and Moazami, S. 2015. Trends in total precipitation and magnitude–frequency of extreme precipitation in Iran, 1969-2009. Int. J. Climatol. 36(4): 1863-1872.

Nistor, M.M., and Mîndrescu, M. 2017. Climate change effect on groundwater resources in Emilia-Romagna region: an improved assessment through NISTOR-CEGW method. Quat. Int. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.11.018.

Nistor, M., and Porumb-Ghiurco, C. 2015. How to compute the land cover evapotranspiration at

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2125-2135

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۳۵-۲۱۲۵

Effect of Meteorological Drought on Groundwater Resources of Varamin Plain Using SPI, NISTOR and GRI Index

H. Azizi[1], H. Ebrahimi[2]*, H. Samani[3], V. Khaki[4]
Recived: Aug.04, 2020 Accepted: Oct.13, 2020

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of meteorological drought on groundwater resources in Varamin plain. For this purpose, the effect of meteorological drought was investigated through standard precipitation index (SPI), NISTOR index and groundwater source index (GRI). Therefore, in order to evaluate the effect of climatic parameters such as temperature and precipitation on the groundwater status of Varamin plain, time statistics (1367-1397) of the parameters of the plain were used. The results showed that according to the SPI index, this plain is approaching weak drought conditions during the last 10 years of the study period. Therefore, due to the lack of natural recharge sources of the aquifer in recent years (since 2010), accidental falls have occurred in this aquifer, which has led to the GRI index from normal drought conditions to relatively severe drought conditions. Finally, the results of SPI and GRI index were compared with NISTOR index, which is obtained from the inferential matrix of the combination of Di-Marton climate index and effective precipitation. This index also assessed the effect of drought and rainfall nutrition index on groundwater resources in the desired period as very severe.

Keywords: Groundwater, GRI, NISTOR, SPI, Varamin plain

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University,Tehran, Iran
2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University,Tehran, Iran
3- Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University,Tehran, Iran
4- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahr-e-Qods Branch, Islamic Azad University,Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: Ebrahimi165@yahoo.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۴۷-۲۱۳۶

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2136-2147

مقاله پژوهشی

تأثیر سطوح مختلف کود پتاسیم و آب آبیاری بر خصوصیات فیزیولوژیکی و عملکرد گیاه دارویی چای ترش

پریا راشکی[۱]، حلیمه پیری[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۳۰

چکیده

امروزه تغییر الگوی کاشت به‌سمت گیاهان مقاوم به کم‌آبی برای مقابله با خشکی مطرح است. یکی از گیاهان مقاوم به خشکی چای ترش می‌باشد. در این تحقیق اثر سطوح مختلف آب آبیاری و کود پتاسیم بر چای ترش مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به‌صورت کرت یک‌بار خرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار با چهار سطح آب آبیاری (I1 ، I2 ، I3 و I4 به ترتیب معادل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیازآبی‌گیاه) سه سطح کود پتاسیم (K1، K2 و K3 به‌ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیازکودی پتاسیم) به‌عنوان کرت فرعی انجام شد. نتایج آزمایش نشان داد، اثرات ساده آب آبیاری و کود پتاسیم در سطح احتمال یک و پنج درصد بر تمامی پارامترهای اندازه‌گیری شده معنی‌دار گردید. بیشترین عملکرد از تیمارهای ۱۰۰ درصد مصرف کود پتاسیم و ۸۰ درصد نیاز آبی به‌دست آمد. بیشترین بهره‌وری آب آبیاری در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی و۱۰۰ درصد مصرف کود پتاسیم حاصل شد به‌طوری که بین تیمارهای ۶۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار حاصل نشد. از نظر کیفی با کاهش عمق آب آبیاری تا ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه و کاهش مصرف کود پتاسیم مقدار آنتوسیانین، کربوهیدرات و پرولین افزایش یافت و مقادیر کلروفیل a و b و کارتنوئیدها کاهش یافتند. ولی بین تیمار ۵۰ و ۷۵ درصد مصرف کود پتاسیم تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. بنابراین با توجه به وضعیت آب منطقه و کاهش منابع آبی به‌کار بردن ۸۰ درصد نیاز آبی باعث صرفه‌جویی در مصرف آب می‌گردد بدون آن‌که تأثیر معنی‌دار در کاهش عملکرد داشته باشد. همچنین با توجه به شرایط آب و هوایی خشک منطقه سیستان استفاده از کود پتاسیم می‌تواند باعث تعدیل خسارات ناشی از تنش خشکی در چای ترش شود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب آبیاری، پرولین، کارتنوئید، کلروفیل

مقدمه

محدودیت شدید آب و هزینه بالای تأمین و انتقال آن سبب می‌شود که در برخی مواقع یا مناطق از دیدگاه اقتصادی سطح بهینه آبیاری کمتر از اندازه مورد نیاز برای تولید حداکثر عملکرد باشد. اعمال مدیریت صحیح آبیاری و کاشت گیاهان مقاوم به خشکی، به‌منظور حفظ ذخیره رطوبتی خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک ازجمله اقدامات مؤثر برای افزایش بازدهی مصرف آبیاری و در نتیجه بهبود بهره‌برداری از منابع محدود آب کشور می‌باشد. امروزه کشت گیاهان مقاوم به خشکی به‌عنوان راهکاری برای مقابله با خشکی مطرح شده است. چای ترش یکی از گیاهان کم‌نیاز و مقاوم به خشکی است (Akbari nia et al., 2003). چای ترش با نام علمی *Hibiscus sabdariffa* متعلق به خانواده Malvaceae و بومی افریقا بوده، در تمام مناطق استوایی و گرم کشت می‌شود و به‌عنوان گیاهی دارویی مورد توجه است (Aziz et al., 2007). این گیاه دو منظوره است که به‌منظور استفاده خوراکی (کاسبرگ) و با استفاده از الیاف یا چوب، یا هر دو نوع مورد کشت و کار قرار می‌گیرد (Abid-Askari and Solang, 1995). از برگ آن به‌عنوان سبزی خوراکی، از دانه‌های آن به‌عنوان یک منبع غنی از پروتئین و از کاسبرگ‌های آن برای تهیه نوشیدنی‌های مختلف، بستنی، شکلات و کیک استفاده می‌شود (Delgado-vargas et al., 2000). تنش خشکی و شوری دو عامل اصلی جهت کاهش عملکرد ۵۰ درصد از محصولات زراعی می‌باشند (Valliy and Nguyen, 2006). باباتند و موفرکی در آزمایشی بر روی چای ترش با ۵ دور آبیاری به فاصله ، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ روز یک بار گزارش کردند با افزایش عمق آب آبیاری عملکرد افزایش پیدا کرد و بالاترین عملکرد از آبیاری هر هفته یک بار به‌دست آمد (Babatunde and Mofoke, 2006). ال بورای و همکاران در

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
(*- نویسنده مسئول: Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.2.3

تحقیقی به این نتیجه رسیدند که بالاترین عملکرد چای ترش در شرایط آبیاری با عمق‌های مختلف، در آبیاری با ۱۰۰ درصد تبخیر و تعرق گیاه می‌باشد (EL-Boraie et al., 2009). از آنجایی که در کشور ما نزولات جوی کم و منابع آبی محدود می‌باشد، استفاده بهینه از آب موجود کاملا ضروری است و باید از حداقل آب حداکثر بهره‌برداری صورت پذیرد. تحقیقات نشان داده است که ضمن اعمال کم آبیاری، با مصرف صحیح کودهای شیمیایی، می‌توان مقاومت گیاهان به خشکی و نیز راندمان تولید محصولات کشاورزی را افزایش داد (Faraji et al., 2000). گنجعلی و همکاران عملکرد چای ترش را در سطوح مختلف کود پتاسیم به‌عنوان فاکتور اصلی و کود فسفر و نیتروژن به‌عنوان فاکتور فرعی در منطقه سراوان مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که کود فسفر و پتاسیم می‌تواند نقش موثری در کاهش عملکرد چای ترش در شرایط آب و هوایی سراوان داشته باشد (Ganjali et al., 2016). اکنبی و همکاران نشان دادند که مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و فسفر و پتاس ۱۰-۱۰-۲۰ به همراه ۵ تن در هکتار کمپوست باعث افزایش عملکرد کمی و کیفی چای ترش می‌گردد (Akanbi et al, 2009). کود پتاسیم بر خلاف کودهای ازت و فسفر، نقش ساختمانی در گیاه ندارد ولی با توجه به نقش‌های آنزیمی و کوانزیمی در گیاه، عنصر اساسی برای گیاه است. پتاسیم باعث افزایش تولید و بهبود کیفیت محصول می‌شود. پتاسیم کارآیی مصرف آب را افزایش می‌دهد (Mousavi-Fazl et al., 2016). مهمترین بخش تأمین‌کننده پتاسیم مورد نیاز گیاه پتاسیم محلول در خاک است. نمک‌های پتاسیم به ایجاد پتانسیل اسمزی مناسب در درون سلول‌ها کمک می‌کند (Ibrahim and Hossein, 2006). با توجه به رشد جمعیت جهان، محدودیت اراضی کشاورزی و آب، هزینه بالای ناشی از استفاده از این منابع و افزایش آلودگی محیط زیست در اثر استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی، لازم است تا مدیریت استفاده از آب وکود به گونه‌ای باشد تا با توجه به حداقل خسارت وارده، حداکثر محصول و درآمد به‌دست آید (Emam, 2008). در حال حاضر بیشترین سطح زیر کشت چای ترش مربوط به استان سیستان و بلوچستان، با سطح زیر کشت ۳۰۰ هکتار و تولید سالانه ۲۹۰ تن می‌باشد (Sb-agrijahad, 2014). هدف از این تحقیق تعیین اثر سطوح مختلف پتاسیم در شرایط تنش آبی به‌منظور افزایش عملکرد کمی و کیفی گیاه چای ترش در منطقه سیستان می‌باشد.

مواد و روش ها

برای انجام تحقیق، کاشت چای ترش در ۱۸ اردیبهشت ماه سال زراعی ۱۳۹۸ در مجتمع تحقیقاتی چاه‌نیمه واقع در شهر زهک در منطقه سیستان در استان سیستان و بلوچستان در ۶۱ درجه و ۶۷ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸۹ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع ۴۸۰ متر از سطح دریا انجام گرفت. منطقه مطالعاتی دارای اقلیم گرم و خشک بوده، میزان بارندگی آن در سال کمتر از ۶۰ میلی‌متر می‌باشد. به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از مراحل آماده‌سازی زمین، نمونه‌های مرکب خاک از اعماق ۳۰-۰ سانتی‌متر و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری خاک برداشت و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها تعیین شد (جدول ۱). همچنین، کیفیت آب مورد استفاده نیز قبل از انجام کاشت مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه تحقیقاتی

عمق نمونه برداری	درصد سیلت	درصد شن	درصد رس	بافت خاک	pH	EC (dSm^{-})	پتاسیم قابل جذب (ppm)	کربن آلی (ppm)	فسفر قابل جذب (ppm)
۳۰-۰	۴۲	۴۹	۹	شن لوم	۷/۶	۲/۱	۲۸۰	۰/۷۲	۴/۶
۶۰-۳۰	۴۰	۴۸	۱۲	شن لوم	۷/۸	۲/۵	۲۳۱	۰/۶۸	۵/۷

جدول ۲- مقادیر خصوصیات شیمیایی آب آبیاری

نمونه آب	pH	EC (dSm^{-1})	SAR	کاتیون‌ها ($meqlit^{-1}$)				آنیون‌ها ($meqlit^{-1}$)		
				Ca	Mg	Na	K	$HCo3^{-}$	Cl	$So4^{-}$
S1	۷/۶	۰/۷	۲/۱	۱/۸	۱/۲	۲/۶	۰/۰۶	۴/۱	۰/۶	۱/۶

تحقیق حاضر به‌صورت طرح کرت‌های یک‌بارخرد شده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل چهار سطح عمق آب آبیاری (I1 ، I2، I3 و I4) به‌ترتیب معادل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌عنوان کرت اصلی و سه سطح کود پتاسیم (K1، K2 و K3 به‌ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیازکودی پتاسیم) به‌عنوان کرت فرعی انجام شد. ابعاد کرت‌ها ۴ ×۳

(متر مربع) و فاصله کرت‌ها از یکدیگر یک متر در نظر گرفته شد. در هر کرت تعداد پنج جوی و پشته احداث و بذرها در عمق سه سانتی‌متری از خاک و به فاصله ۲۵ سانتی‌متر از یکدیگر روی ردیف‌ها کشت شدند. فاصله بین ردیف‌های گیاهی ۷۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کود نیتروژن از منبع اوره به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت سرک در سه مرحله یک‌سوم همزمان با کاشت، یک‌سوم مرحله رویشی (شاخه دهی) و یک‌سوم زمان گلدهی (۵۰ درصد گلدهی گیاه)، کود پتاسیم از نوع سولفات پتاسیم همزمان با کاشت در سه سطح ۷۵، ۱۱۲/۵ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیازکودی پتاسیم و کود فسفر از نوع سوپرفسفات تریپل به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار همزمان با کاشت به خاک اضافه شد.

محاسبات آبیاری

حجم آب آبیاری قبل از هر نوبت آبیاری با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد (Liue et al., 2007).

$$d = \sum_{i=1}^{n}(\theta_{Fci} - \theta_i)\,\Delta z \qquad (۱)$$

در این معادله: d عمق آبیاری (متر)، θ_{Fci} و θ_i به‌ترتیب رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در لایه i=1، Δz ضخامت لایه (متر) و n شماره لایه خاک می‌باشد.

با به‌دست آوردن عمق آب آبیاری در هر نوبت با استفاده از رابطه (۱)، حجم آب مورد نیاز برای هر کرت از ضرب کردن عمق به‌دست آمده در مساحت کرت محاسبه شد و با استفاده از کنتورهای نصب شده بر روی هر یک از لوله‌های آبرسان اندازه‌گیری و در اختیار گیاه قرار گرفت. حجم آب سایر تیمارها بر اساس این حجم تعیین و اعمال گردید.

بهره‌وری مصرف آب آبیاری (IWUE[1])

بهره‌وری مصرف آب آبیاری عبارت است از: نسبت محصول تولید شده به آب آبیاری و از رابطه (۲) به‌دست آمد (Peyro et al., 2000).

$$IWUE = \frac{Y}{IR} \qquad (۲)$$

که در آن IWUE: بهره‌وری مصرف‌آب‌آبیاری (کیلوگرم بر متر مکعب بر هکتار)، Y : وزن خشک برداشت شده (کیلوگرم در هکتار)، IR: مقدار آب‌آبیاری (مترمکعب در هکتار)

نمونه‌برداری گیاهی

پس از پایان دوره رشد گیاه (۷ آذر ۱۳۹۸)، سه ردیف گیاه از وسط هر کرت با حذف اثر حاشیه برداشت و اندازه‌گیری پارامترها بر روی این نمونه‌ها انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده عبارت بودند از: عملکرد خشک، بهره‌وری مصرف آب آبیاری، مقدار آنتوسیانین، پرولین، کارتنوئید، کلروفیل a، کلروفیل b و کربوهیدرات. جهت اندازه‌گیری عملکرد کپسول‌های گیاهی از بوته‌ها جدا و در هوای آزاد خشک شد. مقدار آنتوسیانین کاسبرگ از روش واگنر (۱۹۷۹)، مقدار کربوهیدرات از روش فنل – اسیدسولفوریک، مقدار پرولین از روش بیتس و همکاران (۱۹۷۳)، کلروفیل و کارتنوئید از روش ارنون (۱۹۶۷) محاسبه شد (Wagner, 1979: Bates et al., 1973: Arnon, 1976) در پایان داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 مورد تجزیه و تحلیل و میانگین‌ها با آزمون دانکن مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که اثر مقدار آب آبیاری و کود پتاسیم بر پارامترهای اندازه‌گیری شده در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). اثر متقابل آب آبیاری و کود پتاسیم نیز در سطح احتمال یک و پنج درصد بر پارامترهای اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود. اثر تکرار بر صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبود که نشان‌دهنده شرایط یکنواخت آزمایش برای همه تکرارها بوده است (جدول ۳).

آنتوسیانین: آنتوسیانین یک ترکیب فلاونوئید است که به مقدار زیاد در کاسبرگ‌های چای ترش وجود دارد (Tesai et al., 2000). مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده نشان داد مقدار آب آبیاری و کود پتاسیم تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر مقدار آنتوسیانین داشت (جدول ۴). با کاهش مقدار آب آبیاری تا ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه مقدار آنتوسیانین افزایش یافت. سپس با کاهش بیشتر آب آبیاری به‌دلیل کاهش رشد و عملکرد مقدار آنتوسیانین کاهش یافت. بیشترین مقدار آن در تنش ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه ۰/۸۵ میکرومول بر گرم بود که از این نظر بین تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه و تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. پارسامطلق و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که بیشترین مقدار آنتوسیانین در تیمار ۶۰ درصد آب آبیاری به‌دست آمد. کاهش مقدار کود پتاسیم نیز باعث افزایش مقدار آنتوسیانین گردید. بیشترین مقدار آن در تیمار ۵۰ درصد مصرف کود پتاسیم (۰/۵۹ میکرو مول بر گرم) به‌دست آمد. آنتوسیانی‌ها دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی هستند و آنتی‌اکسیدان‌ها اثر محافظتی طی تنش دارند. ساخته‌شدن آنتوسیانین و تجمع آن در بافت‌های گیاهی تحت تأثیر عامل‌های مختلفی از جمله میزان هیدرات‌های کربن موجود در بافت‌ها قرار می‌گیرد (Taiz and Zeiger, 2006). به‌عبارت دیگر

1- Irrigation Water Use Efficiency

توسعهٔ رنگدانه‌های یاخته و ساخت آنتوسیانین با بالا رفتن میزان کربوهیدرات‌ها نسبت مستقیم داشته و هر عاملی که بتواند روی افزایش، جذب یا ساخته شدن قندها مؤثر باشد، باعث افزایش میزان آنتوسیانین کل در گیاه می‌شود (Vitrac, 2000). اثر متقابل آب آبیاری و کود پتاسیم نیز نشان داد با کاهش مقدار آب آبیاری و کود پتاسیم مقدار آنتوسیانین افزایش یافت (جدول ۵). بیشترین مقدار در تیمار ۵۰ درصد مصرف کود پتاسیم و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه مشاهده شد. اما از این نظر بین تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۵۰ درصد مصرف پتاسیم تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. سایر محققین راجع به اثر محلول‌پاشی روی و نیتروژن بر روی گیاه چای ترش به نتایج مشابه رسیدند (Raisi Sarbizhan et al., 2015).

کربوهیدرات: کربوهیدرات‌ها به‌خاطر داشتن رابطه‌ی مستقیم با فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، انتقال مواد و تنفس، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. مطابق جدول (۴) با کاهش عمق آب آبیاری تا ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، مقدار کربوهیدرات ۲۰/۸۳ درصد افزایش داشته است.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) صفات اندازه‌گیری شده

منابع تغییرات	درجه آزادی	آنتوسیانین	کربوهیدرات	پرولین	کلروفیل a	کلروفیل b	کارتنوئید	عملکرد خشک	بهره‌وری آب آبیاری
تکرار	۲	۱/۷ ns	۰/۰۵۵ ns	۱/۵۸ ns	۰/۶۵ns	۰/۸۳	۱/۷۶ ns	۷۵/۷۴ ns	۱/۰۷ ns
مقدار آب آبیاری	۳	۰/۴۵**	۶۱/۶**	۲/۴۶**	۸۹/۴۶**	۷۳/۱۸**	/۳۶**	**۲۳۲۳۴۹	۴/۴۹*
خطای a	۶	۱/۲	۱/۵	۱/۸۹	۱/۶	۳/۵۲	۱/۳۵	۷۳/۹۵	۱/۰۵
مقدار کود پتاسیم	۲	۰/۲۸**	۹/۷۸**	۱/۰۴**	۱۵/۰۴**	۱۳/۴۱**	۰/۵۸**	**۷۵۴۷۸	۰/۳۴ ns
مقدار آب آبیاری× مقدار کود پتاسیم	۶	۰/۱۹*	۱/۹*	۱/۱۲*	۸/۹۴**	۱۰/۳۳**	۱/۰۱**	۲۴۰۱/۱**	۱/۳*
خطای b	۴	۰/۰۴۵	۰/۰۴	۰/۵۷	۰/۵۸	۱/۰۲	۱/۲۱	۹۶/۴	۱/۰۲
ضریب تغییرات(٪)		۳/۶۵	۴/۵	۵/۴۸	۷/۲۶	۵/۶۷	۴/۱۵	۲/۹۷	۱۰/۸۵

*و **معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد، ns عدم معنی‌داری.

جدول ٤- مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده

تیمارهای آزمایشی		آنتوسیانین (میکرومول بر گرم)	کربوهیدرات	پرولین	کلروفیل a	کلروفیل b	کارتنوئید	عملکرد خشک (کیلوگرم در هکتار)	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم‌بر مترمکعب‌درهکتار)
		(میلی‌گرم بر گرم وزن تر)							
مقدار آب آبیاری	٪۱۰۰ نیازآبی	۰/۶۷ c	۹/۳۶ c	۱/۵۴d	۲۸/۱۶a	۲۰/۲۶a	۰/۳۲a	۵۶۸/۱۱a	۰/۰۳۷b
	٪۸۰ نیازآبی	۰/۷۸ ab	۱۰/۷۸ ab	۱/۷۴c	۲۶/۲۳ab	۱۸/۶۵ab	۰/۲۸b	۵۸۴/۱۸a	۰/۰۴۱a
	٪۶۰ نیازآبی	۰/۸۵a	۱۱/۳۱ a	۲/۸۶a	۱۶/۱۲c	۱۵/۵۴c	۰/۲۲c	۴۵۶/۴۴b	۰/۰۴۶a
	٪۴۰ نیازآبی	۰/۵۲ d	۷/۴۲d	۲/۲۱b	۱۲/۹۶d	۱۳/۳۷d	۰/۱۶d	۳۷۸/۷۷c	۰/۰۳۴b
مقدار کود پتاسیم	٪۱۰۰	۰/۳۳b	۸/۷۶ b	۱/۷۲c	۲۹/۱۳a	۲۱/۶۲a	۰/۳۴a	۵۱۹/۳۳a	۰/۰۴۳a
	٪۷۵	۰/۴۶ a	۹/۵۱ a	۲/۴۱b	۲۸/۳۴a	۱۹/۸۷b	۰/۳۱ab	۴۸۰/۵ab	۰/۰۴۲a
	٪۵۰	۰/۵۱a	۹/۸۵ a	۳/۲۱a	۲۳/۴۱b	۱۵/۲۴c	۰/۲۴c	۴۳۶/۱c	۰/۰۳۹b

میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال٪۵ اختلاف معنی‌دار ندارند.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدارآب آبیاری و کود پتاسیم (A×B)

مقدار آب آبیاری	مقدار کود پتاسیم	آنتوسیانین (میکرومول بر گرم)	کربوهیدرات	پرولین	کلروفیل a	کلروفیل b	کارتنوئید	عملکرد خشک (کیلوگرم در هکتار)	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم‌برمترمکعب‌درهکتار)
		(میلی‌گرم بر گرم وزن تر)							
٪۱۰۰ نیازآبی	٪۱۰۰	۰/۴۱f	۷/۷۹f	۱/۵۴f	۲۹/۳۱a	۲۳/۳۶a	۰/۳۷a	۵۲۳/۶۶d	۰/۰۳۷b
	٪۷۵	۰/۵۸d	۸/۹۸d	۲/۰۳d	۲۴/۴۵b	۲۰/۱۱b	۰/۳۳b	۵۱۱/۱e	۰/۰۳۵b
	٪۵۰	۰/۶۳c	۹/۵۹c	۲/۵۱c	۱۸/۵۲d	۱۶/۷۴d	۰/۲۶d	۴۶۷/۶۶g	۰/۰۳۴ab
٪۸۰ نیازآبی	٪۱۰۰	۰/۴۸ed	۹/۱۲d	۲/۱۱d	۲۸/۴۲a	۲۲/۵۱a	۰/۳۶a	۶۰۱/۳۳a	۰/۰۴۵ab
	٪۷۵	۰/۶۸b	۱۰/۱b	۳/۱۴b	۲۲/۱۲c	۱۹/۴۱c	۰/۳c	۵۷۹/۶۶ab	۰/۰۴۲ab
	٪۵۰	۰/۷۵a	۱۰/۵۱a	۳/۴۵a	۱۶/۲۱e	۱۴/۲۳e	۰/۲۱e	۵۵۴/۳۳c	۰/۰۳۷b
٪۶۰ نیازآبی	٪۱۰۰	۰/۵۶d	۹/۸۱c	۲/۷۴c	۲۱/۶۴c	۱۸/۸۹c	۰/۲۹c	۴۹۵/۱f	۰/۰۵۸a
	٪۷۵	۰/۷۳b	۱۰/۲۱b	۳/۰۲b	۱۵/۷۸e	۱۳/۶۳e	۰/۲e	۴۷۳/۶۶fh	۰/۰۵۵a
	٪۵۰	۰/۷۹a	۱۱/۳۲a	۳/۵۶a	۱۳/۶۳f	۱۲/۴۶f	۰/۱۷f	۴۱۰/۶۶j	۰/۰۴۶ab
٪۴۰ نیازآبی	٪۱۰۰	۰/۳۲g	۷/۱۲g	۱/۴g	۱۴/۵۷f	۱۳/۴۱f	۰/۱۸f	۴۲۶/۳۳i	۰/۰۳۳b
	٪۷۵	۰/۴۵e	۷/۸۷f	۱/۶۱f	۱۲/۷۸fg	۱۱/۱۵g	۰/۱۵g	۳۶۷/۶۶k	۰/۰۳۲b
	٪۵۰	۰/۵۸c	۸/۱۸e	۱/۸۱e	۱۰/۳۱g	۹/۹۵g	۰/۱۴g	۳۴۲/۳۳l	۰/۰۳۱b

میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

کاهش بیشتر آب آبیاری باعث کاهش مقدار کربوهیدرات شد. رابطه‌ی مثبتی بین تجمع کربوهیدرات و تحمل خشکی در برنج، ذرت و سورگوم گزارش شده است (Mohammad khani and Heidari, 2008). افزایش کربوهیدرات‌ها ممکن است ناشی از کاهش نیاز به مواد فتوسنتزی به‌دلیل کاهش رشد و سنتز این ترکیبات از مسیرهای غیرفتوسنتزی باشد (Ehdaie et al., 2006). کربوهیدرات‌ها به‌عنوان مولکول‌های سیگنال عمل می‌کنند و در سازوکارهای سازگاری گیاه نقش دارند و باعث تغییر بیان بسیاری از ژن‌های متابولیکی می‌گردند. تنش خشکی با تجزیه و کاهش نشاسته در اثر افزایش فعالیت آنزیم آمیلاز باعث افزایش غلظت قند های محلول می‌شود که افزایش غلظت کربوهیدرات‌ها را در پی دارد (Anderson and Kohorn, 2001). افزایش کربوهیدرات‌ها باعث حفظ تورژسانس سلول‌های برگ، حفاظت غشای سلولی و بازداری از تخریب پروتئین‌ها می‌شود، همچنین از طریق تأمین انرژی مورد نیاز گیاه از مرگ حتمی آن جلوگیری می‌کند (Xue et al., 2008). اثرات کود پتاسیم نشان داد با کاهش مصرف کود پتاسیم مقدار کربوهیدرات افزایش می‌یابد. اما از این نظر بین تیمار ۵۰ درصد و ۷۵ درصد مصرف کود پتاسیم تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. اثرات متقابل آب آبیاری و کود پتاسیم نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری تا ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه و کاهش مصرف کود پتاسیم تا ۵۰ درصد مقدار کربوهیدرات افزایش می‌یابد.

پرولین: پرولین به‌عنوان یک اسمولیت مهم در تعدیل فشار اسمزی سلول تحت تنش‌هایی مانند خشکی نقش اساسی دارد. نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده (جدول ۳) نشان داد تفاوت معنی‌داری بین همه تیمارها از نظر مقدار پرولین وجود دارد. مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده (جدول ۴) نشان داد بین تیمارهای مختلف آب آبیاری و کود پتاسیم از نظر پرولین در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد. با کاهش عمق آب آبیاری مقدار پرولین افزایش یافت. بیشترین مقدار پرولین از تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه (۲/۸۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به‌دست آمد. کاهش مقدار کود پتاسیم مصرفی نیز باعث افزایش مقدار پرولین شد به‌طوری که بیشترین مقدار آن از تیمار ۵۰ درصد مصرف کود پتاسیم (۳/۲۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به‌دست آمد. اثرات متقابل آب آبیاری و کود پتاسیم (جدول ۵) نشان داد با کاهش آب آبیاری و کاهش مقدار کود پتاسیم غلظت پرولین افزایش یافت. بیشترین مقدار آن از تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۵۰ درصد مصرف کود پتاسیم (۳/۵۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به‌دست آمد. در پاسخ به تنش، کاهش پتانسیل اسمزی به‌وسیله تجمع اسمولیت‌ها، ظرفیت حفظ فشار تورژسانس سلول را افزایش می‌دهد. این عمل برای فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، فعالیت آنزیم‌ها و تکثیر سلولی، اساسی است. می‌توان بیان نمود که افزایش پرولین در بسیاری از گونه‌های گیاهی تحت شرایط تنش‌هایی مانند خشکی، شوری، درجه حرارت و نور با مقادیر مختلف تجمع می‌یابد. رابطه مثبت بین انباشت پرولین و تحمل به خشکی در برنج، ذرت و سیب‌زمینی گزارش شده است (Mohammad Khani and Heidari, 2008). با توجه به افزایش غلظت پرولین در اندام هوایی گیاه چای ترش در تنش خشکی

می‌توان چنین نتیجه گرفت که پرولین در چای ترش می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مقاومت به خشکی به‌شمار آید. پرولین به‌دلیل نقش کلیدی در تنظیم اسمزی در شرایط تنش خشکی موجب افزایش مقاومت به خشکی شده و اثرات تخریبی تنش اسمزی ناشی از خشکی را تا حدودی کاهش می‌دهد. چنین به‌نظر می‌رسد با افزایش تدریجی تنش خشکی، سلول گیاه در ابتدا شروع به ذخیره قند و سپس با شدیدتر شدن تنش اقدام به ذخیره پرولین در غشای سلولی کرده است و به بیان دیگر، تجمع پرولین در غشای سلولی یک سازوکار اضطراری برای تحمل به خشکی به‌شمار می‌رود (قمری‌زارع و همکاران، ۱۳۸۷). صادقی و خانی (۱۳۹۱)، پیری (۱۳۹۸) و محمدی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیق خود بر روی گیاه یونجه، سورگوم علوفه‌ای و به‌لیمو به نتایج مشابهی دست یافتند. همان‌طور که گفته شد با کاهش کود پتاسیم مصرفی غلظت پرولین افزایش یافت. این افزایش غلظت پرولین ممکن است ناشی از تخریب پروتئین‌ها و آزاد شدن اسید آمینه‌ها در اثر کاهش جذب پتاسیم باشد که موجب تولید اسیدآمینه پرولین می‌شود. بر اساس نتایج محققین پتاسیم نقش موثری در سنتز پروتئین و افزایش پرولین دارد (Desuloux et al., 2000).

کلروفیل a و b: مقدار کلروفیل و رنگدانه‌های فتوسنتزی از مهم‌ترین عوامل موثر در ظرفیت فتوسنتزی گیاهان هستند زیرا به‌طور مستقیم بر سرعت و میزان فتوسنتز و تولید زیست توده موثر هستند (کافی و همکاران، ۱۳۸۹). نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد اثر تنش خشکی و کود پتاسیم و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر مقادیر کلروفیل a و b تأثیرگذار بود. مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده (جدول ۴) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری مقادیر کلروفیل a و b کاهش یافت. بیشترین مقدار کلروفیل a (۲۸/۱۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل b (۲۰/۲۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌دست آمد اما از این نظر با تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌دار نداشت. با کاهش مقدار کود پتاسیم نیز مقادیر کلروفیل کاهش یافت و از این نظر در سطوح مختلف در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار وجود داشت. بیشترین مقدار کلروفیل a (۲۹/۱۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل b (۲۱/۶۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) از تیمار ۱۰۰ درصد مصرف کود پتاسیم به‌دست آمد. اثرات متقابل آب آبیاری و کود پتاسیم (جدول ۵) نشان داد با کاهش آب آبیاری و کاهش مصرف کود پتاسیم مقادیر کلروفیل a و b کاهش یافت. بیشترین مقادیر کلروفیل از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۱۰۰ درصد مصرف کود پتاسیم به‌دست آمد اما از این نظر با تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۱۰۰ درصد مصرف کود پتاسیم اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. همچنین جدول (۴) نشان داد در سطوحی که کم‌آبیاری انجام شده بود افزایش مصرف کود پتاسیم باعث افزایش مقادیر کلروفیل شد. مطابق گزارش‌ها یکی از مهم‌ترین نقش‌های پتاسیم، نقش کلیدی آن در فتوسنتز می‌باشد که به‌دلیل افزایش جذب CO_2 و افزایش مستقیم رشد و شاخص سطح برگ نقش حیاتی در فتوسنتز دارد (Heakal et al., 1990). همچنین بیان کردند که کودهای پتاسیم در ساخت مواد هیدروکربنی در گیاه و درنتیجه بهبود فتوسنتز و رنگیزه‌های فتوسنتزی نقش دارند (طباطبایی، ۱۳۸۸). دوام فتوسنتز و حفظ کلروفیل برگ تحت تنش از جمله شاخص‌ها فیزیولوژیکی مقاومت به تنش است. غلظت کلروفیل به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی قدرت منبع شناخته می‌شود زیرا غلظت کلروفیل برگ یکی از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک گیاه است (Ghosh et al., 2004). بنابراین کاهش آن در شرایط خشکی می‌تواند به‌عنوان یک عامل محدودکننده‌ی غیرروزنه‌ای در فتوسنتز به‌حساب آید (Hoekstra et al., 2001). با افزایش تنش خشکی میزان کلروفیل برگ کاهش می‌یابد. در شرایط تنش آبی فاکتورهای لازم برای سنتز کلروفیل کاهش و تخریب آن افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر در شرایط تنش کم‌آبی، گیاه با بسته نگه داشتن روزنه‌ها در طی روز، سعی در حفظ محتوای آب نسبی خود دارد، در این زمان انتقال الکترون در فتوسیستم II مختل شده و الکترون اضافی ناشی از فتولیز آب، باعث تولید اکسیژن فعال و خسارت به غشای سلولی از طریق پراکسیداسیون چربی‌ها، پروتئین‌ها و کاهش محتوای کلروفیل گیاه می‌گردد. یکی از مهمترین دلایل کاهش کلروفیل تخریب آن به‌وسیله گونه‌های اکسیژن فعال (پراکسیدهیدروژن) می‌باشد، بنابراین بیوسنتز کلروفیل با محدودیت مواجه می‌شود (قهرمانی و همکاران، ۱۳۹۴). در گیاهان گزارش‌های متفاوتی از تأثیر تنش بر کلروفیل گزارش شده است. در آزمایشی تأثیر خشکی بر رشد گیاه آفتابگردان بررسی شد. نتیجه نشان داد غلظت کلروفیل a و b و کلروفیل کل کاهش یافت (Manivaannan et al., 2007). تنش آبی در گیاه ذرت و گندم مقدار کلروفیل را به‌شدت کاهش داد (Nayyar and Gupta, 2006). گرگینی‌شبانکاره و خراسانی‌نژاد (۱۳۹۶) اثر سدیم نیتروپروساید را بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه مرزه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند تنش خشکی با تخریب سامانه فتوسنتزی، تخریب غشاء سلولی و کلروپلاست باعث کاهش مقدار رنگدانه‌های کلروفیل a و b و متعاقب آن کاهش توانایی فتوسنتز می‌گردد.

کارتنوئیـــــد: کاروتنوئیدها یکی از رنگریزه‌های کلیدی و مهم سیستم آنتی‌اکسیدانی در گیاهان بوده که گروه بزرگی از مولکول‌های ایزوپرنوئید را تشکیل می‌دهند و به تخریب اکسیداتیو نیز حساس می‌باشند. کاروتنوئیدها افزون داشتن بر نقش به‌عنوان رنگدانه فرعی، به‌عنوان یک آنتی عامل اکسیدان مؤثر عمل نموده و نقش منحصر به فردی در حفاظت از فرآیندهای فتوشیمیایی و حفظ و ادامه آن ایفـــا

می‌کنند (Farooq et al., 2008). نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) نشان داد اثر تنش آبی و کود پتاسیم در سطح احتمال یک درصد بر مقدار کارتنوئیدها تأثیرگذار بود. مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده (جدول ۴) نشان داد با افزایش تنش خشکی مقدار کارتنوئید کاهش یافت. بیشترین مقدار آن از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (۰/۳۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کمترین آن از تیمار ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه (۰/۱۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به‌دست آمد. امینی و حداد (۱۳۹۲) در تحقیق خود راجع به جو به نتایج مشابهی دست یافتند و بیان داشتند کاهش مصرف آب باعث کاهش مقدار کارتنوئید در گیاه جو شد. نقش اصلی کارتنوئید جلوگیری از آسیب اکسیداتیو می‌باشد. درواقع کارتنوئیدها از طریق فروکش کردن سریع وضعیت کلروفیل، حفاظت نوری را انجام می‌دهند. در شرایط تنش مقدار کارتنوئید کاهش می‌یابد و نمی‌تواند نقش حفاظتی خود را انجام دهد. کاهش محتوای کارتنوئید ظاهرا به‌دلیل اکسید شدن توسط اکسیژن فعال و تخریب ساختار آن‌ها است (Wang et al., 2010). با کاهش مصرف کود پتاسیم نیز مقدار کارتنوئید کاهش یافت. بیشترین مقدار آن از تیمار ۱۰۰ درصد مصرف کود پتاسیم به‌دست آمد اما از این نظر با تیمار ۷۵ درصد مصرف کود پتاسیم تفاوت معنی‌دار نداشت. اثرات متقابل آب آبیاری و کود پتاسیم (جدول ۵) نشان داد با کاهش مقدار آب مصرفی و کاهش مقدار کود پتاسیم، کارتنوئید کاهش یافت. بیشترین مقدار آن (۰/۳۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۱۰۰ درصدمصرف کود پتاسیم به‌دست آمد. اما از این نظر با تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه و مصرف ۱۰۰ درصد کود پتاسیم تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد.

عملکرد خشک: مقایسه میانگین عملکرد خشک نشان داد در تیمارهای مختلف در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد (جدول۴). با کاهش عمق آب آبیاری تا ۸۰ درصد نیاز آبی عملکرد خشک افزایش یافت اما از این نظر بین تیمار ۱۰۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. با افزایش شدت تنش، وزن خشک کاسبرگ نسبت به شاهد کاهش نشان داد. برای به‌وجود آمدن کپسول به تبع آن افزایش وزن کاسبرگ، گیاه نیاز به رشد رویشی مناسب و تولید اندام‌های تشکیل‌دهنده آن در مراحل مختلف رشد رویشی و زایشی دارد. تأثیر خشکی بر هر یک از اجزای عملکرد می‌تواند در نهایت منجر به تغییر در عملکرد کاسبرگ تولیدی در چای ترش شود. کاهش میزان عملکرد بر اثر افزایش خشکی مربوط به کاهش ارتفاع گیاه، کاهش سطح برگ و افزایش اختصاص مواد فتوسنتزی به ریشه نسبت به بخش هوایی گیاه است (Sreevalli et al., 2001). با کاهش مقادیرکود مصرفی پتاسیم نیز مقدار عملکرد خشک کاهش یافت و مشخص گردید بیشترین مقدار عملکرد خشک در تیمارهای ۱۰۰ درصد نیاز کودی به‌دست می‌آید. اثرات متقابل آب آبیاری و کود پتاسیم نیز نشان داد با کاهش آب آبیاری و کود پتاسیم مقدار عملکرد خشک کاسبرگ کاهش یافت و مصرف بیشترکود پتاسیم در سطوح تنش آبی تا حدودی می‌تواند اثرات تنش آبی را کاهش دهد(جدول۵). در شرایط آبیاری مطلوب با افزایش میزان پتاسیم عملکرد خشک کاسبرگ افزایش یافت. اما در شرایط تنش ملایم و شدید رطوبتی افزایش کاربرد کود پتاسیم تا حدودی باعث افزایش تحمل گیاه در برابر تأثیر منفی کمبود آب بر عملکرد گیاه می‌شود، به‌عبارتی کاربرد مقادیر مناسب کود پتاسیم می‌تواند مقابله با تنش آبی را در گیاه افزایش دهد. این نتایج با نتایج و همکاران (Megyes et al., 2004) مطابقت دارد. فنایی و همکاران (۱۳۸۸) در تحقیق خود راجع به اثرات کود پتاسیم و تنش آبی بر گیاه کلزا در منطقه سیستان نتیجه گرفتند که مصرف کود پتاسیم در شرایط تنش می‌تواند، اثرات مثبت بیشتری بر عملکرد دانه و کارایی مصرف آب نسبت به شرایط رطوبتی بالا داشته باشد. پتاسیم از عناصر پر مصرف است که نقش‌های متعدد ساختاری در سلول و عملکرد کاتالیتیک آنزیم‌های دخیل در متابولیسم دارد (Akhtar and Siddiqui, 2009). پتاسیم تحمل گیاه را نسبت به تنش‌های محیطی بیشتر و تولید نشاسته و کربوهیدرات را افزایش و همچنین استحکام گیاه را افزایش داده و برای رشد بهینه مقدار مطلوب آن مورد نیاز است (Pahlavan et al., 2006). بنابراین کاربرد کود مصرفی پتاسیم توانست تا اندازه‌ای اثرات زیان‌بار تنش آبی را کاهش دهد. در صورتی‌که تنش آبی شدید باشد، نقش کود پتاسیم کاهش می‌یابد. با افزایش سطح تنش‌های آبی، جبران عملکرد خشک توسط کود پتاسیم کاهش یافت. این نتایج با یافته‌های محمد و آشوک که معتقدند کاربرد کودها خصوصا پتاسیم می‌تواند بخشی از تنش آبی را جبران نماید، همخوانی دارد (Mohamed and Ashok, 2014).

بهره‌وری آب آبیاری: مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده نشان داد بین بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد وجود داشت. با کاهش عمق آب آبیاری مقدار بهره‌وری آب آبیاری افزایش یافت. بیشترین مقدار بهره‌وری آب آبیاری در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی (۰/۰۴۶ کیلوگرم بر متر مکعب در هکتار) و کمترین آن در تیمار ۴۰ درصد نیازآبی (۰/۰۳۴ کیلوگرم بر متر مکعب درهکتار) به‌دست آمد. از این نظر بین تیمار ۶۰ و ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد کاهش آب آبیاری از تیمار ۶۰ درصد به تیمار ۴۰ درصد نیازآبی باعث افزایش بهره‌وری نگردید که علت آن را می‌توان کاهش بیشتر عملکرد خشک در این تیمار نسبت به تیمار ۶۰ درصد نیازآبی دانست. کاهش بازدهی مصرف آب بر اثر آبیاری زیاد (تیمار آبیاری کامل)، هم به‌دلیل مصرف آب زیاد و هم به‌دلیل کاهش عملکرد خشک در این تیمار می‌باشد. کاهش مقادیر مصرفی کود پتاسیم نیز باعث کاهش بهره‌وری آب آبیاری گردید اما از این نظر بین تیمار ۷۵ درصد و ۵۰ درصد نیاز پتاسیم تفاوت معنی‌دار مشاهده

نگردید (جدول۴). اثرات متقابل آب آبیاری و کود پتاسیم نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش مقدار پتاسیم بهره‌وری آب آبیاری افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار بهره‌وری آب آبیاری در سطح آبیاری ۶۰ درصد و سطح کودی ۱۰۰ درصد پتاسیم (۰/۰۵۸ کیلوگرم بر متر مکعب در هکتار) و کمترین آن در ۱۰۰ درصد نیاز آبی و مصرف ۵۰ درصد کود پتاسیم (۰/۰۳۱ کیلوگرم بر متر مکعب در هکتار) حاصل شد (جدول۵).

همبستگی بین صفات: همبستگی بین صفات مورد مطالعه در جدول ۶ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همبستگی معنی‌دار بین تمام صفات اندازه‌گیری شده در سطح احتمال پنج و یک درصد وجود دارد. همبستگی مثبت و بالایی (۹۵ درصد) بین کلروفیل a و b وجود دارد. با افزایش و کاهش کلروفیل a مقادیر کلروفیل b نیز افزایش و کاهش داشت. همبستگی منفی بین مقادیر کلروفیل a و b با پرولین و کربوهیدرات مشاهده شد. با افزایش تنش‌های آبی و کودی وارده، مقادیر کلروفیل a و b کاهش یافت اما مقادیر پرولین و کربوهیدرات به‌دلیل نقش کلیدی آن‌ها در تنظیم اسمزی در شرایط تنش افزایش یافت. از طرف دیگر یکی از ساز و کارهای گیاه به تحمل تنش‌های وارده افزایش پرولین می‌باشد که از آن به شاخص تحمل گیاه به کم‌آبی نیز یاد می‌کنند. همبستگی بین مقادیر کلروفیل a و b با کارتنوئید و عملکرد خشک مثبت و معنی‌دار بود. یعنی با افزایش کلروفیل مقادیر عملکرد و کارتنوئید افزایش داشت که با توجه به این‌که غذاسازی و رشد گیاه بستگی به مقدار کلروفیل و فتوسنتز گیاه دارد، این نتیجه دور از انتظار نیست. بین مقدار پرولین و کارتنوئیدها همبستگی معنی‌دار منفی وجود داشت. همان‌طور که گفته شد پرولین به‌عنوان یک شاخص تحمل به خشکی و شوری در گیاه می‌باشد بنابراین با افزایش شدت تنش مقدار آن افزایش می یابد. همبستگی منفی و معنی‌داری بین پرولین و عملکرد خشک مشاهده گردید. با کاهش آب آبیاری و کود پتاسیم مقدار پرولین افزایش و مقدار عملکرد کاهش یافت. افزایش پرولین نشان‌دهنده شدت تنش‌های وارده می‌باشد. بنابراین وقتی مقدار آن بالا باشد، نشان می‌دهد که گیاه دچار تنش شده است و این تنش‌ها باعث کاهش عملکرد در گیاه می باشد. بین آنتوسیانین و کربوهیدرات رابطه مثبت و معنی‌دار (۶۵ درصد) وجود داشت. همان‌گونه که در قبل گفته شد هر عاملی که بتواند روی افزایش، جذب یا ساخته شدن قندها مؤثر باشد، باعث افزایش میزان آنتوسیانین کل در گیاه می‌شود. با توجه به این‌که افزایش تنش باعث بالا رفتن قند و کربوهیدرات در گیاه می‌شود، لذا مقدار آنتوسیانین را نیز افزایش می‌دهد. رابطه منفی بین عملکرد خشک با پارامترهای آنتوسیانین، کربوهیدرات و پرولین مشاهده شد. در شرایط تنش مقدار عملکرد خشک کاهش می‌یابد اما مقادیر آنتوسیانین، کربوهیدرات و پرولین به‌دلیل بالابردن تحمل گیاه به تنش افزایش می‌یابد.

جدول ٦- همبستگی صفات مورد مطالعه

	آنتوسیانین	کربوهیدرات	پرولین	کلروفیل a	کلروفیل b	کارتنوئید	عملکرد خشک
آنتوسیانین	۱						
کربوهیدرات	۰/۶۵**	۱					
پرولین	۰/۷۴**	۰/۶۹*	۱				
کلروفیل a	-۰/۸۴**	-۰/۸۷*	-۰/۸**	۱			
کلروفیل b	-۰/۸۱*	-۰/۸۲*	-۰/۷۸*	۰/۹۵**	۱		
کارتنوئید	-۰/۷۶*	-۰/۷۳**	-۰/۸**	۰/۸۶**	۰/۸۱*	۱	
عملکرد خشک	-۰/۸*	-۰/۷۵*	-۰/۸۴**	۰/۸۲**	۰/۷۸*	۰/۷۶*	۱

** و * معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد

نتیجه‌گیری

در شرایط کم آبیاری، گیاه در طی فصل رشد با شدت‌ها و مدت‌های متفاوتی دچار تنش آبی می‌شود. وجود این تنش تغییراتی را در پاسخ گیاه به مصرف کود پتاسیم به‌وجود می‌آورد که همواره یکسان نیست و در مواردی غیرقابل پیش‌بینی است. نتایج این تحقیق نشان داد، هرچه میزان سطح کودی پتاسیم بیشتر شد، رشد و عملکرد چای ترش نیز بیشتر می‌شود. بیشترین عملکرد در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و تیمار کودی ۱۰۰ درصد مصرف کود پتاسیم به‌دست آمد. تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی مناسب‌ترین تیمار از لحاظ بهره‌وری آب آبیاری بود اما از این نظر با تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار نداشت. لذا با توجه به افزایش بهره‌وری آب در تنش‌های آبی، می‌توان با اعمال تنش آبی به گیاه به‌خصوص در مراحل غیرحساس و یا در طول فصل رشد مقدار بهره‌وری آب آبیاری را افزایش داد و با توجه به وضعیت آب موجود در منطقه و کاهش منابع آبی به‌کار بردن ۸۰ درصد نیاز آبی توصیه می‌گردد. همچنین در بین تیمارهای کودی، تیمار کودی ۱۰۰ درصد کود پتاسیم در سطوح مختلف آبی دارای بهره‌وری بیشتری

نسبت به سایر تیمارها بود که نسبت به تیمار ۷۵ درصد مصرف کود پتاسیم تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. تنش کم‌آبی عمده تأثیر خود را از طریق تنش غذایی بر صفات فیزیولوژیک گیاه برجای می‌گذارد. افزایش تنش آبی و کاهش مصرف کود پتاسیم باعث افزایش مقدار آنتوسیانین، کربوهیدرات و پرولین شد و مقادیر کلروفیل a و b و کارتنوئیدها را کاهش داد. که نوعی سازگاری گیاه با تنش می‌باشد. با توجه به این‌که آنتوسیانین به‌علت خاصیت آنتی‌اکسیدانی بالا پارامتر کیفی هم برای گیاه دارویی چای ترش می‌باشد و مقدار آن در تیمار ۵۰ و ۷۵ درصد مصرف کود پتاسیم تفاوت معنی‌دار نداشت، لذا با توجه به این‌که استفاده ۷۵ درصدی از کود پتاسیم باعث کاهش معنی‌دار عملکرد نمی‌شود و افزایش کیفیت را نیز به‌دنبال دارد، می‌توان این مقدار مصرف کود پتاسیم جهت کاشت چای ترش در منطقه سیستان را پیشنهاد نمود. همچنین از آنجایی که سیستان منطقه‌ای مناسب جهت رشد چای ترش می‌باشد و با توجه به اهمیت دارویی این گیاه، پیشنهاد می‌گردد تحقیقات بیشتری در زمینه کاشت این گیاه در منطقه انجام گیرد

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. کد پژوهانه UOZ-GR-9719-30

منابع

امینی، ز.، و حداد، ر. ۱۳۹۲. نقش رنگیزه‌های فتوسنتزی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان در مقابل تنش اکسیداتیو. پژوهش‌های سلولی و ملکولی. ۲۶(۳): ۲۶۵-۲۵۱.

پارسامطلق، ب.، رضوانی‌مقدم، پ.، قربانی، ر. و اعظمی‌ساردویی، ذ. ۱۳۹۶. بررسی برخی صفات فتوشیمیایی گیاه دارویی چای ترش تحت تأثیر سیستم‌های مختلف تغذیه‌ای و آب آبیاری. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران. ۳۳(۶): ۹۴۰-۹۲۸.

پیری، ح. ۱۳۹۸. تأثیر توأم شوری و آب آبیاری بر صفات فیزیولوژیکی و عملکرد سورگوم علوفه‌ای در چین‌های مختلف. اکوفیزیولوژی گیاهی. ۱۱(۳۸):۱۴۷-۱۳۳.

صادقی، ح.، و خانی، ک. ۱۳۹۱. تأثیر سطوح مختلف تنش خشکی و شوری بر ویژگی‌های مورفولوژیک و میزان پرولین یونجه یکساله. علوم کشاورزی دیم ایران. ۱(۲): ۱۳-۱.

طباطبایی، س.ج. ۱۳۸۸. اصول تغذیه معدنی گیاهان. ویرایش اول، انتشارات مؤلف. تبریز. ۵۶۲ صفحه.

فنایی، ح.ر.، گلوی، م.، کافی، م.، قنبری، ا.، و شیرانی‌راد، ا.ح. ۱۳۸۸. اثر مصرف کود پتاسیم و میزان آب آبیاری بر عملکرد دانه و کارایی مصرف آب در دو گونه کلزا و خردل هندی. علوم زراعی. ۱۱(۳): ۲۸۹-۲۷۱.

قمری‌زارع، ع.، رضوانی، س.، و فروتن، م. ۱۳۸۷. اثر تنش خشکی ناشی از PEG در چند گونه یونجه یکساله در شرایط آب کشت. پژوهش‌های ژنتیک و اصلاح گیاهان مرتعی و جنگلی ایران. ۱۶: ۱۹۷-۱۸۲.

قهرمانی، م.، عبادی، م.، پرمون، ق.، و جهانبخش، س. ۱۳۹۴. بررسی اثر تنش کم‌آبی بر شاخص‌های فتوسنتزی و عملکرد علوفه ژنوتیپ‌های سورگوم علوفه‌ای. فیزیولوژی گیاهان زراعی. ۲۵ (۷): ۷۴-۵۹.

کافی، م.، باقری، ع.، نباتی، ج.، زارع مهرجردی، م.، و معصومی، ع. ۱۳۸۹. بررسی تأثیر تنش شوری بر برخی متغیرهای فیزیولوژیک ژنوتیپ نخود در محیط هیدروپونیک. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای. ۴: ۶۹-۵۵.

گرگینی شبانکاره، ح.، و خراسانی‌نژاد، س. ۱۳۹۶. اثر سدیم نیتروپروساید بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه دارویی مرزه تحت رژیم‌های کم‌آبیاری. پژوهش‌های تولید گیاهی. ۲۴(۳): ۷۰-۵۵.

محمدی، ع.، ابراهیم‌زاده، ح.، هادیان، ج.، و میرمعصومی، م. ۱۳۹۴. واکاوی اثر تنش خشکی بر برخی پارامترهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه به‌لیمو. پژوهش‌های گیاهی. ۲۸(۳):۶۲۸-۶۱۷.

Abid-Askari, and Solangi, Ms. 1995. Autecological studies of exotic plant *Hibiscus sabdariffa* L. (Roselle), a multipurpose plant, for is introduction and culture. Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research 38:1, 17-21; 13ref.

Agriculture Organization of Sistan and Baluchestan Province of Iran. 2014. *Sb-agrijahad.ir*.

Akanbi W.B., Oaniyn A.B., Togum A.O., Ilupeju A.E.O., and Olairan, O.A. 2009. The effect of organic fertilizer on growth, calyx yield and quality of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). Amrican Eurasian Journal of Sustainable Agricalture 3(4): 652-657.

Akbari nia, A., Ghalavand, A., Sefidkan, F., Rezaee, M. B., and Sharifi Ashoorabadi, A. 2003. Investigating the Effects of Chemical Fertilizers, Animals and Combination on the Performance and Composition of Essential Oil Seeds. Research and Development 16(4):32-41.

Akhtar, M.S., and Siddiqui, Z.A. 2009. Effect of phosphate solubilizing microorganisms and Rhizobium sp. On the growth, nodulation, yield and root- rot disease complex of chickpea under field condition. African Journal of Biotechnology 8(15): 3489-3496.

Anderson, C.M., and Kohorn, B.D. 2001. Inactivation of Arabidopsis SIP1 leads to reduced levels of sugars and drought tolerance. Plant Physiology 158: 1215-1219.

Arnon, A.N. 1967. Method of extraction of chlorophyll

growth and water-use efficiency of wheat and barley. Plant and Soil 125(2): 177-184.

Hoekstra, F., Golovia, A., and Buitink, J. 2001. Mechanisms of plant desiccation tolerance. Tr. P. Sc. 6: 431-438.

Ibrahim, MM., and Hossein, RM. 2006. Variability, habitability and genetic advance in some genotypes of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.). World Journal of Agricultural Sciences 2(3): 340-345.

Imam, Y. 2011. Cereal Crop. Fourth Edition.Shiraz University Press. 190 pages J. Bi, 32: 23-30.

Liue, F., Savic, S., Jensen, C.R., Shahnazari, A., Jacobsen, S., and Andersen, M.N. 2007.Water relations and yield of lysimeter-grown strawberries under limited irrigation. Scientia Horticulture 111:128-132.

Manivaannan, P., Abdul Jaleel C., Sanka, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., and Panneerselvam, R. 2007. Growth biochemical modification and proline metabolism in Helianthus annus L. as induced by drought stress, Colloids and Surfaced B. Biointerfaces 59:141-149.

Megyes, A., Ratonyi, T., and Huzsvai L. 2004. The effect of fertilization and irrigation on maize (*Zea mays* L.) production, www.date.hu/acta-agraria.

Mohamed, M., and Ashok, K. 2014. Growth, yield and water Use effeciency of forage sorghum as affected by NPK fertilizer and deficit irrigation. American Journal of Plant Sciences 5: 2134-2140

Mohammadkhani, N., and Heidari, R. 2008. Effects of drought stress on soluble proteins in two maize varieties. Turk j Boil. 32: 23-30

Mousavi-Fazl, S.H., Alizadeh, A., Ansari, H., and Rezvani Moghadam, P. 2016. The effect of low irrigation and potassium fertilizer on root dynamics, yield and its components in different cultivars of forage sorghum.Water Research in Agriculture 30(1):26-38.

Nayyar, H., and Gupta, D. 2006. Differential sensitivity of C3 and C4 plants to water deficit stress: Association with oxidative stress and antioxidants. Environmental and Experimental Botany 58: 106113.

Pahlavan, M., Forghani, A., and Kiekha, A .2006. Preparation of Sistan plain Partiality numerical map Annual. (In Persian, with English Abstract). Final project report, Agricultural and Natural Resources Research Center of Sistan: Zabol, Iran.

Payero, J.O., Melvin, S.R., Irmak, S., and Tarkalson, D. 2009. Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. Agric. Water Manage. 84:101–112.

Raisi Sarbizhan, AS., Boroumand, N., and Zaher Aara, T. 2015. The Effect of Nitrogen and Zinc Spraying on Quantitative Traits of roselle in Jiroft Region. Horticulture 30(1):93-101.

Sreevalli, Y., Baskaran, K., Chandra Shekara, R., Kuikkarni, R., Sushil Hasan., Samresh, D., Kukre, J., Ashok, A., Sharmr Singh, K., Srikant, S., and in the plants. Agron. J. 23:112-121.

Aziz, E., Gad, N., and Badran, N.M. 2007. Effect of cobalt and nickel on plant growth, yield and flavonoids content of *Hibiscus sabdariffa* L. Australian Journal of Basic Applied Sciences 1(2): 73-78.

Babatunde, F.E., and Mofoke, A.L.E. 2006. Performance of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) as Influenced by irrigation schedules, Pakistan Journal of Nutrition S(4): 363-367.

Bates, L.S., Waldern, R.P., and Teare, E.D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant Soil 39:205-207.

Delgado-vargas, F., Jimenez, A.R., and Paredes-Lopez, O. 2000. Natural pigments: carotenoids, anthocyanins, and betalins- characteristics, biosyntheses, processing, and stability: critical Reviews in Food Science and Nutrition 40(3): 173-289.

Desuloux, D., Huynh, T.T., and Roumet, P. 2000. Idaetification of soybean plant characteristics that indicate the timing of olrought stress. Crop Sci. 40: 716-722.

Ehdaie, B., Alloush, G.A. Madore, M.A., and Waines, J.G. 2006. Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat: I. postanthesis changes in internode dry matter. Crop Science 46: 735-748.

EL-Boraie, FOM., Gaber, A.M., and Abdel-Rahman, G. 2009. Optimizing irrigation schedule to maximize water use efficincy of Hibiscus sabdariff under shalation cond:tion, Word Journal of Agricultural Science, S(4): 505-514.

Faraji, H., Siadat, A., Fathi, Gh., and Gilani, A. 2000. Effect of split application of nitrogen fertilizer on yield and yield components of two rice varieties improved environmental conditions in Ahvaz. Proceedings of the Sixth Congress of Agronomy and Plant Breeding.University of Mazandaran, Babolsar6-13 Shahryvar.pp 344.

Farooq, M., Basra, S.M., Wahid, A., and Cheema, Z.A. 2008. Physiological role of exogenously applied glycinebetaine in improving drought tolerance of fine grain aromatic rice. J. Agron and C. Sc, 194: 325-333.

Ganjali, H., Kamali Deljo, A., and Aziziyan Sherme, A. 2016. Growth Characteristics and Performance of roselle at Different Levels Nitrogen, Phosphor and potassium in Saravan weather conditions. Ecology of Plants 13(1):29-37.

Ghosh, PK., Ajay, KK., Bandyopadhyay, MC., Manna, KG., Mandal, AK., and Hati, KM. 2004. Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer- NPK on three cropping system in vertisols of semi-arid tropics. Dry matter yield, nodulation, chlorophyll content and enzyme activity. Bi.Tech. 95: 85-93.

Heakal, M.S., Modaihsh, A.S., Mashhady, A.S., and Metwally, A.I. 1990. Combined effects of leaching fraction, salinity, and potassium content of waters on

Phytochemistry, 53, 659-665.

Wang, L., Fan, L., Loescher, W., Duan, W., Liu, G., Cheng, J., Luo, H., and Li, S. 2010. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. BMC Plant Biol. 10: 34-48.

Wagner, G.J. 1979. Content and vacuole/extra vacuole distribution of neutralsugars, free amino acids and anthocyanins in protoplasts. Plant Physiology 64: 88-9.

Xue, G., Lynne McIntyre, C., Glassop, D., and Shorter, R. 2008. Use of expression analysis to dissect alterations in carbohydrate metabolism in wheat leaves during drought stress. Plant Mol Biol 67: 197–214.

Rakesh, T. 2001. Preliminary obserration on the effect of irrigation frequency and genotypes on yield and alkaloid concentration in petriwinkle. Journal of medicinal and Aromatic plant Sci. 22: 356-358.

Taiz, L., and Zeiger, E. 2006. Plant Physiology, (4^{th} Edition). Sinauer Associates, Sunderland, Mass, 623p.

Valliy, B., and Nguyen, H.T. 2006. Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drough tolerance in plant, corrent optintion in play Biology, 9: 1-7.

Vitrac, X., Larronde, F., Krisa, S., Decendit, A., Deffieux, G., and Mérillon, J.M. 2000. Sugar sensing and Ca_2+ calmodulin requirement in *Vitis vinifera* cells producing anthocyanins.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2136-2147

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۴۷-۲۱۳۶

Effect of Different Levels of Potassium Fertilizer and Irrigation Water on Physiological Characteristics and Yield Plant of Roselle

P. Rashki[1], H. Piri*[2]

Recived: Aug.02, 2020 Accepted: Sep.20, 2020

Abstract

Today, changing the pattern of planting towards water deficit resistant plants is proposed as a solution to drought. One of the plants resistant to drought is roselle. In this study, the effect of different levels of irrigation water and potassium fertilizer on roselle was investigated. Experiment with split plot design with four levels of irrigation water (I1, I2, I3 and I4 equivalent to 40, 60, 80 and 100% water requirement) three levels of potassium (K1, K2 and K3 equivalent 50, 75 and 100% potassium requirement) as sub-plot. The results showed that the simple effects of irrigation water and potassium fertilizer were significant (P <0.01) on all measured parameters. The highest yield was obtained from 100% potassium fertilizer treatments and 80% water requirement. The highest irrigation water productivity was obtained in 60% water requirement and 100% potassium fertilizer application but no significant difference was found between 60 and 80% water requirement. In terms of quality, the amount of anthocyanins, carbohydrates and proline increased with decreasing the depth of irrigation water to 60% of the plant's water requirement and reducing the consumption of potassium fertilizer, and the amounts of chlorophyll a and b and carotenoids decreased. However, there was no significant difference between 50 and 75% K fertilizer application. Therefore, due to the water status of the region and the reduction of water resources, 80% water requirement reduces water consumption and 75% potassium fertilizer increases quality and mitigates drought stress in roselle. Also, due to the dry climatic conditions of Sistan region, the use of potassium fertilizer can reduce the damage caused by drought stress in roselle.

Keywords: Carotenoids, Chlorophyll, Irrigation water efficiency, Proline

1- Graduate Student, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol
2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol
(*- Corresponding Author Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۶۳-۲۱۴۸

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2148-2163

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی عملکرد زهکش زیرزمینی ترانشه‌دار در مقیاس مدل فیزیکی اراضی شالی‌زاری با مدل HYDRUS-2D

فاطمه محمدپور[۱]، مریم نوابیان[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۴

چکیده

زهکشی ضعیف در اراضی شالی‌زاری که دارای خاک با بافت سنگین می‌باشند نه‌تنها امکان برداشت مکانیزه برنج را در زمان وقوع بارش با مشکل مواجه می‌کند، بلکه عامل تجمع املاح در خاک و سدیمی شدن آن در هنگام استفاده از آب‌های نامتعارف در طولانی مدت می‌شود. هم‌چنین این اراضی قادر به رفع شرایط ماندابی در فصل مرطوب نبوده و کشت دوم گیاهان را دچار محدودیت می‌کند. بنابراین استفاده از سامانه زهکشی مناسب در اراضی شالی‌زاری با هدف کنترل شوری و رفع غرقاب خاک ضرورت دارد. نصب زهکش زیرزمینی در ترانشه شن و ماسه منجر به ایجاد شرایط متخلخل بهتر اطراف لوله زهکش و در نتیجه بهبود عملکرد زهکشی می‌شود. انتخاب هندسه بهینه ترانشه به لحاظ فنی و اقتصادی نیازمند توانمندی در خصوص شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و ترانشه به سمت زهکش است. در این مطالعه به‌منظور بررسی عملکرد زهکش زیرزمینی ترانشه‌دار با پوشش شن و ماسه در اراضی شالی‌زاری از مدل شبیه‌سازی HYDRUS-2D استفاده شد. به‌منظور واسنجی مدل HYDRUS-2D، مدل فیزیکی زهکش زیرزمینی ترانشه‌دار قابل کنترل در اراضی شالی‌زاری ساخته و گیاه برنج رقم هاشمی در آن کشت شد. در طول دوره رشد از محلول خاک و هم‌چنین در زمان انجام زهکشی میان و پایان‌فصل از زه‌آب نمونه‌برداری انجام شد. سپس در آزمایشگاه هدایت‌الکتریکی (EC) نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل دقت مناسبی در شبیه‌سازی حرکت آب و غلظت کل املاح زه‌آب و پروفیل خاک دارد. مقادیر شاخص‌های آماری R^2، RMSE و nRMSE در بخش اعتبارسنجی برای بار آبی به‌ترتیب برابر ۰/۹۸۲، ۲/۸ سانتی‌متر و ۴/۵۵ درصد و در بخش غلظت به‌ترتیب برابر ۰/۴۱۹، ۰/۰۳۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۱۰/۵۶ درصد به‌دست آمد. هم‌چنین نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و ضریب انتشارپذیری طولی با ضریب حساسیت به‌ترتیب ۲/۶ سانتی‌متر بر روز و ۰/۴۷ سانتی‌متر اثرگذاری بیش‌تری بر حرکت آب و املاح دارند.

واژه‌های کلیدی: حجم زه‌کشی، زهکش کنترل شده، سطح ایستابی، شوری، مدل دو بعدی

مقدمه

هدف سامانه‌های زهکشی خاک، کنترل شرایط اشباع خاک و ایجاد وضعیت مناسب برای رشد گیاه می‌باشد. در خاک‌های سنگین، علاوه‌بر سامانه زهکشی سطحی برای بهبود شرایط خاک نیاز به یک سامانه مکمل دیگر، به‌ویژه از نوع زهکشی زیرزمینی می‌باشد. احداث زهکشی زیرزمینی در اراضی شالی‌زاری دارای بافت خاک سنگین علاوه‌بر این‌که زمین کشاورزی کم‌تری را اشغال می‌کند منجر به افزایش پتانسیل شستشوی املاح خاک و بهبود شرایط کشت در نیمه دوم سال نیز می‌شود. عملکرد زهکشی زیرزمینی بستگی زیادی به هدایت هیدرولیکی خاک اطراف لوله‌ی زهکش دارد از این‌رو برای بهبود توانایی زهکشی زیرزمینی در تخلیه آب از پروفیل خاک، استفاده از مواد پوششی با خاصیت نفوذپذیری بالا مانند شن و ماسه، مواد آلی و مواد مصنوعی در اطراف لوله زهکش توصیه می‌شود (Tao et al., 2016). از سوی دیگر عملکرد مواد پوششی ترانشه و اطراف لوله زهکش بستگی به مشخصات و ویژگی‌های خاک اطراف آن دارد (Ritzema et al., 2006). پوشش شن و ماسه به دلیل حجیم بودن و امکان تطابق بیشتر با دانه‌بندی خاک، در مقایسه با سایر پوشش‌های ترانشه و دور زهکش کارآمدتر می‌باشند اما اغلب به دلیل فاصله زیاد منبع قرضه تا محل پروژه و هزینه بالا، دارای محدودیت در استفاده هستند. در اراضی شالی‌زاری به دلیل سنگینی بافت خاک، فواصل زهکش زیرزمینی کم می‌باشد که این مسئله در کنار هزینه حفر و نصب زهکش زیرزمینی به دلیل نبود ماشین‌الات مخصوص

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان
۲- دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و عضو وابسته گروه آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان
(*- نویسنده مسئول: Email: Navabian@guilan.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.22.3

اراضی شالی‌زاری و محدودیت زمانی برای نصب زهکش، استفاده از ترانشه با هدف افزایش فواصل زهکش را مورد توجه قرار می‌دهد. آنچه مسلم است ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی در کنار ارزیابی فنی می‌بایست انجام شود تا بتوان تصمیم‌گیری نهایی نمود.

ترانشه‌های زهکش زیرزمینی، در خاک‌های با بافت سنگین و با نفوذپذیری پایین، مسیرهای مهمی برای حرکت آب از سطح زمین به سمت لوله زهکش می‌باشند (Salo et al., 2017). در واقع ترانشه‌ها با ایجاد مسیرهای ترجیحی جریان، باعث افزایش حرکت سریع آب در خاک شده و بخش مهمی از تخلیه زهکش در خاک‌های سنگین را موجب می‌شود (Frey et al., 2016; Warsta et al., 2013). از آن‌جا که شکل و ابعاد ترانشه و هم‌چنین حجم و نوع مواد پوششی داخل ترانشه در بالا و اطراف لوله‌ی زهکش بر عملکرد فنی و کیفی زهکش اثر گذار است، مطالعه و تعیین نقش و سهم ترانشه برعملکرد زهکش به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین طراحی سامانه زهکشی در اراضی شالی‌زاری از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. انجام آزمایش‌های میدانی به‌منظور بررسی اثر ترانشه زیرزمینی بر عملکرد سامانه زهکشی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است، بنابراین روش‌های شبیه‌ساز عددی، می‌تواند انتخاب مناسبی برای مطالعات دقیق‌تر و جزئی‌تر باشد. مدل‌های DRAINMOD، SWAP و HYDRUS به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی عملکرد زهکشی زیرزمینی و توانایی کنترل سطح ایستابی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Goel and Tiwari, 2013). مدل شبیه‌ساز HYDRUS یک مدل پیشرفته در ارتباط با حرکت آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد که توسط سیمونک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است (Simunek et al., 1999). مدل HYDRUS می‌تواند وضعیت جریان آب در خاک را در حالت‌های یک، دو و سه بعدی مورد بررسی قرار دهد. مطالعات انجام شده نشان‌دهنده‌ی توانایی قابل قبول مدل HYDRUS در شبیه‌سازی حرکت آب می‌باشد.

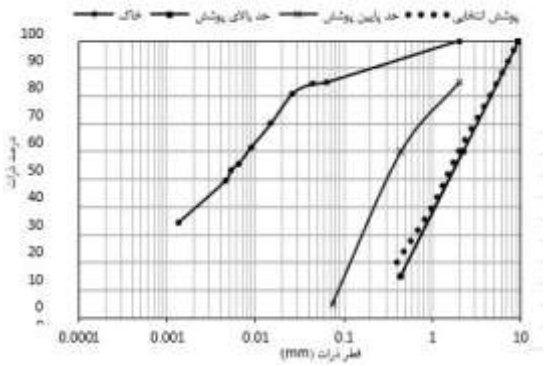
فوگات و همکاران در پژوهش خود که شبیه‌سازی حرکت آب در خاک در لایسیمترهای کاشته شده با درخت پرتقال بود، نشان دادند که توزیع رطوبت پیش‌بینی‌شده توسط مدل HYDRUS-2D/3D با مقدار خطای MAE و RMSE[1] بسیار پایین برای روزهای مورد شبیه‌سازی به‌ترتیب ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۱۴ و ۰/۰۰۷ تا ۰/۰۲۸ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، با داده‌های اندازه‌گیری شده در لایسیمتر به خوبی مطابقت دارد (Phogat et al., 2013). تان و همکاران جریان آب خاک تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری را با استفاده از مدل HYDRUS و به روش حل معکوس مورد بررسی قرار دادند (Tan et al., 2014). آن‌ها اظهار داشتند که مدل به شکل مطلوبی (NSE[2]=0.93-0.98) جریان آب را در یک خاک شالی‌زاری چند لایه شبیه‌سازی می‌کند. در پژوهشی دیگر از مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عمق زهکش زیرزمینی دارای پوشش ژئوتکستایل برای کشت دوم گیاه تریتیکاله در اراضی شالی‌زاری و در دو عمق ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات غلظت نمک خروجی توسط زه‌آب از عمق ۶۰ سانتی‌متری با مقادیر R^2= 0.886، RMSE= 0.015 میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب و nRMSE= 2.512% و در عمق ۴۰ سانتی‌متری با مقادیر R^2= 0.818، RMSE= 0.061 میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب و nRMSE= 14.36% عملکرد خوبی داشته است (موذنی، ۱۳۹۴).

برای بهینه‌سازی عمق زهکش دارای پوشش ژئوتکستایل در جهت کاهش تلفات نیترات از زهکش زیرزمینی در اراضی شالی‌زاری مدل HYDRUS-2D به‌کار گرفته شد (Amin Salehi *et a.*, *2017*). با توجه به ضریب تبیین به‌دست آمده در مرحله‌ی واسنجی (R^2= 0.95) و اعتبارسنجی (R^2= 0.89) مدل به‌عنوان ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی، برنامه‌ریزی و مدیریت سطح ایستابی و کوددهی در اراضی شالی‌زاری و هم‌چنین به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در جهت جلوگیری از آلودگی محیط زیست و کنترل املاح معرفی شد. در مطالعه‌ای دیگر از مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی عملکرد زهکش زیرزمینی برای کشت دوم گیاه لوبیا محلی در اراضی شالی‌زار استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی روند تغییرات غلظت نمک محلول خاک با مقادیر R^2، RMSE و nRMSE به‌ترتیب برابر ۰/۸۱، ۰/۰۳۸ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۳/۷۸ درصد (مرحله واسنجی) و ۰/۴۳، ۰/۰۳۹ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۸/۵۷ درصد (مرحله اعتبارسنجی) عملکرد خوبی داشته‌است (معماری، ۱۳۹۷).

از آن‌جا که طراحی مناسب سامانه زهکشی علاوه‌بر کنترل سطح ایستابی و تخلیه مناسب پروفیل خاک باعث به حداقل رساندن آثار منفی تخلیه زه‌آب بر محیط زیست می‌شود و با توجه به تجربه کم در خصوص ارزیابی رفتار زهکش زیرزمینی در اراضی شالی‌زاری به خصوص در حضور ماده با تخلخل بالا در اطراف لوله زهکش، هدف از این پژوهش، بررسی قابلیت شبیه‌سازی در شناخت رفتار سیستم زهکشی زیرزمینی در نظر گرفته شد. همچنین دقت مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح به سمت لوله زهکش زیرزمینی نصب شده در ترانشه شن و ماسه در اراضی شالی‌زار ارزیابی شد.

1- Root Mean Square Error

2- Nash-Sutcliffe Modeling Efficiency



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک و پوشش شن و ماسه مورد استفاده در آزمایش

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک -	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۰-۱۷	رس سیلتی	۴۰/۱۹	۴۹/۹۷	۹/۸۴	۱/۲۵
۱۷-۲۰	رس سیلتی	۴۰/۱۹	۴۹/۹۷	۹/۸۴	۱/۳
۲۰-۸۵	لوم سیلتی	۱۷/۴۵	۶۳/۱۰	۱۹/۴۵	۱/۳۵

مواد و روش‌ها

مدل فیزیکی زهکش زیرزمینی ترانشه‌دار در اراضی شالی‌زاری

برای دست‌یابی به اهداف این پژوهش و جمع‌آوری اطلاعات برای واسنجی مدل HYDRUS، مدل فیزیکی زهکش زیرزمینی نصب شده در ترانشه‌ی دارای مواد معدنی (شن و ماسه) تحت شرایط اراضی شالی‌زاری در سال ۱۳۹۶ در دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان ساخته شد. برای ساخت مدل فیزیکی، مخزنی از جنس آهن به طول سه و عرض ۰/۶ متر با ارتفاع یک متر تهیه شد. مخزن با خاک اراضی شالی‌زاری که ابتدا هوا خشک و سپس از الک با مش‌بندی پنج میلی‌متر عبور داده شده بود، تا ارتفاع ۸۵ سانتی‌متری پر شد. در فاصله‌ی ۱۸۰ سانتی‌متری از دیواره مخزن ترانشه‌ای با عرض ۲۰ و تا عمق ۷۵ سانتی‌متر حفر شد. زهکش لوله‌ای از جنس پلی‌اتیلن با قطر ۱۰ سانتی‌متر در عمق ۶۵ سانتی‌متری در مرکز ترانشه با شیب طولی حدود یک درصد در مقطع عرضی مخزن کارگذاری شد. سطح زیرین و کناره‌های لوله زهکش به ضخامت پنج و سطح بالای زهکش به ارتفاع ۳۵ سانتی‌متری (نزدیک به لایه سخت[1]) با شن و ماسه پوشانده شد. هم‌چنین به‌منظور ایجاد شرایطی مشابه با شرایط اراضی شالی‌زاری لایه‌سخت به‌طور مصنوعی با خاک عبور داده شده از الک با مش‌بندی دو میلی‌متری و در فاصله ۱۷ سانتی‌متری از سطح خاک با تراکم معادل جرم مخصوص ظاهری ۱/۳ گرم بر سانتی‌مترمکعب و به ضخامت سه سانتی‌متری ایجاد شد. در ادامه با خاک عبوری از الک پنج میلی‌متری، مخزن پر و هم‌سطح با سایر نقاط شد. با توجه به منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در آزمایش و هم‌چنین معیارهای روش ایلری[2] (Vlotman et al., 2001)، دانه‌بندی شن و ماسه به‌منظور پر کردن ترانشه و پوشش دور زهکش مشخص شد. بر اساس منحنی دانه‌بندی پوشش، قطر و درصد فراوانی ذرات تعیین و از منابع قرضه محلی تهیه شد. شکل (۱) و جدول (۱) به‌ترتیب منحنی دانه‌بندی خاک- پوشش و برخی از خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهند.

کنترل تغییرات سطح ایستابی با کارگذاری تعدادی پیزومتر از جنس لوله PVC با قطر دو سانتی‌متر در جهت عمود بر زهکش و در فواصل معین در تراز زهکش انجام شد. برای جلوگیری از ورود ذرات خاک به درون پیزومترها، انتهای لوله‌ها با توری فلزی با مش یک میلیمتری پوشانده شد. جهت اندازه‌گیری و بررسی غلظت کل املاح محلول خاک[3] هفت عدد عصاره‌گیر برای جمع‌آوری محلول خاک به‌صورت افقی در اعماق مختلف (بالای لایه سخت، زیر لایه سخت و در تراز زهکش) و فواصل مشخص از زهکش کارگذاری شد. شکل (۲) شمایی از مخزن و موقعیت زهکش، لایه‌سخت و هم‌چنین موقعیت پیزومترها و عصاره‌گیرها را نشان می‌دهد.

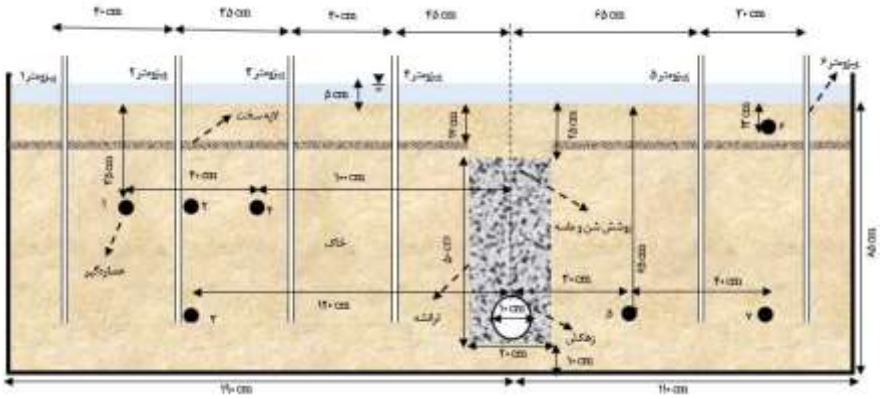
به‌منظور آماده‌سازی شرایط کشت برنج و ایجاد شرایط اشباع،

1- Hardpan

2- ILRI

3- Total Dissolved Solids

خاک به مدت پنج روز در حالت غرقاب نگهداری شد. بر اساس عملیات زراعی عرف منطقه، نشاء گیاه برنج از خزانه به مخزن خاک منتقل و با فواصل ۲۵ در ۲۲ سانتی‌متر در مخزن کشت شد. پس از استقرار گیاه برنج عملیات آبیاری به صورت غرقاب دائم با ارتفاع متوسط آب پنج سانتی‌متر بر روی خاک انجام شد. تثبیت ارتفاع آب سطحی با استفاده از مخزن آب و شناور انجام شد. کوددهی مطابق دستورالعمل منطقه (۹۰ کیلوگرم در هکتار برای کود اوره و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار برای کود سوپر فسفات تریپل) در مراحل مختلف انجام شد. جهت تعیین خصوصیات شیمیایی خاک، عصاره اشباع خاک (Rice et al., 2017) تهیه و پارامترهای هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، غلظت نیترات، آمونیوم، سدیم، کلسیم و منیزیم اندازه‌گیری شد. جدول (۲) برخی از خصوصیات شیمیایی محلول خاک و آب مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمای مخزن و موقعیت زهکش، لایه سخت، پیزومترها و عصاره‌گیرها

جدول ۲- میانگین خصوصیات شیمیایی عصاره خاک و آب آبیاری مورد استفاده در آزمایش

	SAR $(meq/l)^{0.5}$	NH_4^+ (mg/l)	K^+ (mg/l)	Cl^- (mg/l)	SO_4^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	pH	EC (µS/cm)
خاک	۱۲/۳۸	۲/۹۹	۱/۲۵	۴۸/۰۵	۹۱/۱۳	۰/۱۲	۰/۲۴۵	۷/۱۸	۳۹۰ (عصاره اشباع)
آب آبیاری	۱۲/۰۲	۱/۰۴	۱/۳۶	۳۷/۶۱	۷۸/۷۲	۰/۱۸	۰/۶	۷/۰۵	۴۳۰/۰۶

آزمایش به مدت ۸۰ روز به طول انجامید. در این مدت به‌منظور بررسی حرکت آب و انتقال املاح در خاک تحت تأثیر زهکش زیرزمینی و ارزیابی مدل HYDRUS-2D، نمونه‌برداری از عصاره‌گیرها و هم‌چنین زه‌آب در زمان انجام عملیات زهکشی میان‌فصل (۴۳ روز پس از انتقال گیاه به مخزن شیر خروج زه‌آب باز و پس از پنج روز با مشاهده درز و ترک در خاک با بستن شیر خروجی لوله زهکش پایان داده شد) و پایان‌فصل (۶۵ روز پس از انتقال گیاه به مخزن) انجام شد. هدایت الکتریکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه EC سنج اندازه‌گیری شد (Rice et al., 2017). هم‌چنین حجم زه‌آب خروجی از زهکش نیز در زمان زهکشی به روش حجمی اندازه‌گیری شد. علاوه‌براین به‌منظور تعیین بار آبی در نقاط مختلف خاک، قرائت پیزومترها در طول فصل رشد گیاه در فواصل زمانی دو روزه و در زمان زهکشی انجام شد.

برای ارزیابی عکس‌العمل زهکش در تخلیه آب پروفیل خاک، ضریب عکس‌العمل در طول مدت زمان زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل از رابطه (۱) محاسبه شد (Smedema and Rycroft, 1983).

$$\alpha = \frac{\ln h_{(t-1)} - \ln h_{(t)}}{\Delta t} \qquad (۱)$$

که h_{t-1} و h_t به‌ترتیب مقدار بار آبی در گام زمانی قبل و زمان قرائت (سانتی‌متر) و Δt فاصله زمانی میان قرائت بار آبی (روز) می‌باشند.

مدل شبیه‌سازی HYDRUS-2D/3D

نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D یکی از مدل‌هایی است که به‌منظور ارزیابی روند انتقال املاح، شوری، حرارت و آلاینده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل برای شبیه‌سازی دو و سه بعدی جریان آب، انتقال املاح و حرکت گرما در محیط متخلخل اشباع و غیراشباع به‌کار می‌رود. در مدل HYDRUS-2D/3D حرکت دو بعدی آب در خاک با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز شبیه‌سازی شده است که با فرض خاک هم‌روند و یکنواخت به‌صورت رابطه (۲) مطرح می‌شود (Simunek et al., 1999):

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z}+K(h)\right] \quad (۲)$$

که در آن θ رطوبت حجمی (L^3L^{-3})، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (L)، t زمان (T)، x مختصات افقی (L)، z مختصات عمودی (L) و K هدایت آبی (LT^{-1}) می‌باشند. مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل‌های ون‌گنوختن-معلم (Van Genuchten, 1980)، ون‌گنوختن اصلاح‌شده (Vogel and Cislerova, 1988)، معادله بروکس و کوری (Brooks and Corey, 1964)، توزیع لوگ نرمال کوسوگی (Kosugi, 1996) و تخلخل دوگانه (Durner, 1994) تعریف شده‌است که در این مطالعه پس از سعی و خطا از مدل ون‌گنوختن- معلم استفاده شد (روابط ۳ تا ۵).

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\dfrac{\theta_s-\theta_r}{\left(1+(\alpha h)^n\right)^m} & h<0\\ \theta_s & h\geq 0\end{cases} \quad (۳)$$

$$K(h)=K_sS_e^l\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (۴)$$

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r},\qquad m=1-\frac{1}{n} \quad (۵)$$

که در آن S_e اشباع نسبی، θ_s و θ_r به‌ترتیب رطوبت اشباع و باقی‌مانده در پروفیل خاک بر حسب اعشار (L^3L^{-3})، K_s هدایت آبی اشباع (LT^{-1})، α معکوس مقدار ورودی هوا (L^{-1})، n شاخص توزیع اندازه نفوذ و l پارامتر هدایت‌پذیری منفذی می‌باشند. مقدار l به‌طور متوسط برای بسیاری از خاک‌ها حدود ۰/۵ برآورد شده است.

معادله عمومی انتقال املاح که در مدل از آن استفاده شده است در رابطه (۶) ارائه شده‌است (Šimůnek et al., 2008). که در آن M جرم املاح در واحد حجم (ML^{-3}) و J_{si} چگالی جریان املاح ($ML^{-2}T^{-1}$) و ϕ ضریب نشان‌دهنده‌ی میزان تخلیه یا تغذیه متغیر ($ML^{-3}T^{-1}$) می‌باشند.

$$\frac{\partial M}{\partial t}=-\frac{\partial J_{si}}{\partial xi}-\phi \quad (۶)$$

در اولین مرحله کار با مدل شبیه‌سازی، شکل هندسی محیط مورد مطالعه برای مدل تعریف و ترسیم شد که این عملیات در بخش Domain Geometry انجام می‌شود. پس از مشخص کردن ابعاد و ترسیم مدل هندسی، مش‌بندی انجام و پارامترهای ورودی مدل تعریف شد. در این مطالعه تعداد چهار ماده (Material) برای مدل تعریف شد (۱-لایه خاک بالای لایه‌سخت، ۲-لایه خاک سخت، ۳-لایه خاک زیر لایه‌سخت و ۴- مواد پر شده در ترانشه دور زهکش). تصویر دو بعدی مدل هندسی رسم شده در HYDRUS-2D در شکل (۳) نشان داده شده‌است. هم‌چنین در مدل HYDRUS-2D/3D جذب آب توسط گیاه براساس مدل فدس و همکاران تعیین شد (Feddes *et al*., 1978). مقادیر پارامترهای Feddes برای جذب ریشه گیاه برنج از پژوهش فوگات و همکاران (Phogat *et al*., 2010) برداشت شد. هم‌چنین در این مطالعه مقادیر تبخیر-تعرق با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT محاسبه شد. سپس تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه برنج با استفاده از ضرایب گیاهی اعلام شده در نشریه فائو ۵۶ (Allen *et al*., 1998) برای مراحل مختلف رشد برنج محاسبه شد. تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از شاخص سطح‌برگ اندازه‌گیری شده به تبخیر و هم‌چنین تعرق قابل تفکیک می‌باشد (Belmans *et al*., 1983). روابط (۷) و (۸) نحوه محاسبه تبخیر و تعرق را به‌صورت جداگانه نشان می‌دهند.

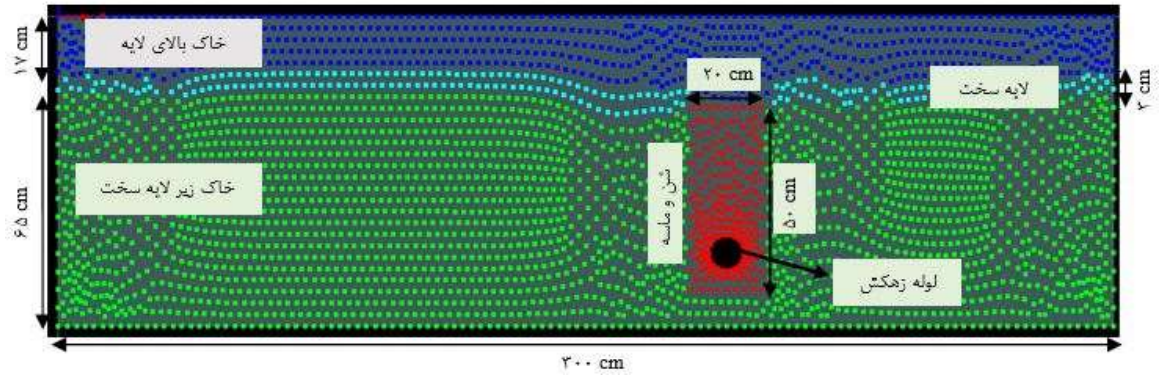
$$E_p=ET_c\times e^{-Kgr\times LAI} \quad (۷)$$

$$T_p=ET_c-E_p \quad (۸)$$

که در این روابط ET_c، E_p و T_p به‌ترتیب تبخیر-تعرق پتانسیل، تبخیر پتانسیل و تعرق پتانسیل (سانتی‌متر بر روز)، LAI شاخص سطح‌برگ و Kgr ضریب توسعه تابش خورشیدی کل می‌باشند. محدوده شاخص سطح‌برگ حاصل از اندازه‌گیری طرح برگ در طول دوره رشد گیاه برنج ۳/۴ – ۰/۷۴ محاسبه و بکارگرفته شد. مقدار Kgr برای گیاه برنج توسط فوگات و همکاران(Phogat et al., 2010) به‌میزان ۰/۳ اعلام شد.

بار آبی با توجه به اعداد قرائت شده توسط پیزومتر (۰ تا ۹۰ سانتی‌متر) به‌عنوان شرایط اولیه برای مدل تعریف شد. شرط مرزی بالادست با توجه به غرقاب بودن برنج، ارتفاع آب متغیر و مرزهای پایین‌دست و جانبی به‌دلیل عدم ورود و خروج آب بدون شدت جریان در نظر گرفته شدند. برای اعمال زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل بر روی زهکش شرط مرزی جریان متغیر تدریجی انتخاب شد که در هنگام باز بودن زهکش، اعداد فلاکس جریان خروجی از زهکش و در هنگام بسته بودن زهکش جریان صفر برای مدل تعریف شد. شرط مرزی برای حرکت املاح در سطح خاک و منافذ زهکش از نوع اول (First-Type) که به صورت بیان غلظت املاح است، نتخاب شد.

شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D/3D در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی انجام شد. در این پژوهش به‌دلیل تعدد پارامترهای مجهول که می‌بایست به روش حل‌معکوس در مدل تعیین می‌شدند (پارامترهای جداول ۳ و ۴)، واسنجی در دو بخش ۱- تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک براساس شبیه‌سازی حرکت آب در خاک به سمت زهکش و ۲- تعیین پارامترهای انتقال املاح بر اساس شبیه‌سازی انتقال املاح در خاک به سمت زهکش صورت گرفت. در مرحله اعتبارسنجی نیز دقت مدل در فرآیند شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح به سمت زهکش بررسی شد.



شکل ۳- نمای دو بعدی فیزیکی مخزن و زهکش و موقعیت لایه‌های تعریف‌شده در مدل HYDRUS-2D

به‌منظور تعیین حساسیت مدل به پارامترهای ورودی و انتخاب پارامترهای مهم در حل معکوس در هر دو بخش حرکت آب و انتقال املاح، تحلیل حساسیت براساس رابطه (۹) انجام شد (Simunek and Van Genuchten, 1996).

$$SC=\frac{\frac{y(b+\Delta b)-y(b)}{y(b)}}{\frac{\Delta b}{b}} \qquad (۹)$$

که در آن تابع y خروجی مدل (در این مطالعه بار آبی و غلظت کل جامدات محلول)، b پارامتر ورودی و Δb برابر با $0.1b$ (تغییرات ۱۰ درصدی در پارامترهای ورودی) می‌باشند.

واسنجی مدل HYDRUS در بخش حرکت آب

از آنجا که در مدل هایدروس محدودیت تعداد پارامترهای قابل برآورد به روش حل معکوس وجود دارد، مدل در دو مرحله شبیه‌سازی حرکت آب و شبیه‌سازی انتقال املاح برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک واسنجی شد. مدل برای برخی پارامترهای هیدرولیکی رابطه ون‌گنوختن (با دو سانتی‌متر هوای ورودی) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده تراز بار آبی برای مدت زمان ۶۹ روز (تا پایان زهکشی پایان‌فصل) واسنجی شد. پارامترهای مدل هیدرولیکی ون‌گنوختن–معلم از ترکیب نرم‌افزار Rosetta موجود در مدل HYDRUS و حل‌معکوس به‌دست آمد. بنابراین پارامترهای θ_s و K_s در هر چهار لایه و هم‌چنین پارامتر θ_r در لایه سه و چهار و پارامتر n در لایه چهارم به‌دلیل حساسیت بیش‌تر (با توجه به نتایج جدول ۷) به‌روش حل معکوس تعیین شدند. جدول (۳) مقادیر اولیه و محدوده تغییرات پارامترهایی که در حل‌معکوس استفاده شدند را نشان می‌دهد. در انتخاب مقادیر اولیه و محدوده تغییرات پارامترها از نتایج Rosetta و مقادیر اندازه‌گیری شده درصد ذرات خاک و جرم مخصوص ظاهری (جدول ۱) استفاده شد. در روش حل‌معکوس پارامترهای دیریافت از حداقل‌سازی اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی مدل به‌دست می‌آید. در این بخش مقادیر بار آبی اندازه‌گیری شده از سه پیزومتر (پیزومترهای ۱، ۴ و ۶) انتخاب و به‌عنوان مقادیر مشاهداتی، تغییرات آن نسبت به زمان در مدل اعمال شد.

واسنجی مدل HYDRUS-2D در بخش انتقال املاح

به‌منظور واسنجی مدل در بخش انتقال املاح به دلیل شبیه‌سازی کل جامدات محلول (*TDS*)، پارامترهای ضریب پخشیدگی مولکولی (*DIFW*) و ضرایب انتشارپذیری طولی و عرضی (*DISPL* و *DISPT*) به‌عنوان ضرایب واسنجی به روش حل‌معکوس تعیین شدند. مقادیر اولیه و دامنه تغییرات پارامترهایی که به روش حل‌معکوس برای چهار لایه تعیین شدند، در جدول (۴) آمده‌است. از آن‌جا که آستانه تحمل شوری گیاه برنج برای عملکرد ۱۰۰درصد سه دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد (Allen *et al.*, 1998)، مقدار توانایی ریشه در جذب املاح (*cRoot*)، ۰/۰۱۹۲ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. مقادیر کل جامدات محلول اندازه‌گیری شده در زه‌آب و عصاره‌گیر ۵ انتخاب و به‌عنوان مقادیر مشاهداتی در بخش واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت.

اعتبارسنجی مدل HYDRUS-2D

بعد از انجام واسنجی و معرفی فرآیند حاکم در مدل فیزیکی برای مدل HYDRUS، اعتبار دقت شبیه‌سازی مدل با انجام مرحله اعتبارسنجی تعیین می‌شود. اعتبارسنجی مدل در بخش حرکت آب و املاح به‌ترتیب با استفاده از مقادیر بار آبی اندازه‌گیری شده توسط سه پیزومتر متفاوت با پیزومترهای به‌کار گرفته شده در بخش واسنجی (پیزومترهای ۲، ۳ و ۵) و مقادیر کل جامدات محلول اندازه‌گیری شده از عصاره‌گیر ۶ و ۷ انجام شد.

جدول ۳- مقادیر اولیه و محدوده ضرایب واسنجی انتخاب‌شده در حل‌معکوس لایه‌های اول تا چهارم

شماره لایه	پارامتر	هدایت‌آبی اشباع (K_s) (cm/day)	رطوبت اشباع (θ_s) (cm^3/cm^3)	رطوبت باقی‌مانده (θr) (cm^3/cm^3)	پارامتر منحنی شکل معادله ون‌گنوختن (n) (-)
لایه اول	مقدار اولیه	۱۰	۰/۵۱	–	–
	مقدار حداقل	۴	۰/۴۸	–	–
	مقدار حداکثر	۱۵	۰/۶	–	–
لایه دوم	مقدار اولیه	۱۲	۰/۴۹	–	–
	مقدار حداقل	۹	۰/۴۵	–	–
	مقدار حداکثر	۱۵	۰/۵۵	–	–
لایه سوم	مقدار اولیه	۱۸	۰/۴	۰/۰۶۵۸	–
	مقدار حداقل	۷	۰/۳۵	۰/۰۵	–
	مقدار حداکثر	۲۰	۰/۴۵	۰/۰۶۸	–
لایه چهارم	مقدار اولیه	۳۷۷/۱	۰/۲۱	۰/۰۴۰۳	۲/۷۵
	مقدار حداقل	۳۰۰	۰/۱۵	۰/۰۴	۱
	مقدار حداکثر	۸۰۰	۰/۳	۰/۰۵۵	۵

جدول ٤- مقادیر اولیه و محدوده پارامترهای انتقال املاح در حل‌معکوس برای لایه‌های اول تا چهارم

شماره لایه	پارامتر	انتشارپذیری طولی ($DISPL$) (cm)	انتشارپذیری عرضی($DISPT$) (cm)	پخشیدگی مولکولی در آب ($DIFW$) (cm^2/day)	جرم مخصوص ظاهری(ρ_b) (mg/cm^3)
لایه اول	مقدار اولیه	۹/۲۲	۸/۵۴	۰/۹۹	–
	مقدار حداقل	۰	۰	۰/۱	–
	مقدار حداکثر	۵۰	۵۰	۵	–
لایه دوم	مقدار اولیه	۲۶/۴۲	۵/۴۳	۱/۰۴	–
	مقدار حداقل	۰	۰	۰/۱	–
	مقدار حداکثر	۵۰	۵۰	۵	–
لایه سوم	مقدار اولیه	۲۵/۲۰	۷۲/۳۶	۱	–
	مقدار حداقل	۰	۰	۰/۱	
	مقدار حداکثر	۱۰۰	۱۰۰	۵	
لایه چهارم	مقدار اولیه	۱/۴۶	۴/۰۵	–	۲۳۰۰
	مقدار حداقل	۰	۰		۲۰۰۰
	مقدار حداکثر	۵۰	۵۰		۳۰۰۰

آماره‌های ارزیابی مدل HYDRUS-2D

برای ارزیابی دقت مدل HYDRUS-2D، از تطبیق مقادیر مشاهده‌ای بار آبی و مقدار غلظت کل املاح با مقادیر تخمینی مدل، پارامترهای ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، ریشه میانگین مجذور خطای نرمال‌شده (nRMSE)، شاخص توافق ویلموت (D-index) و میانگین خطای مطلق (MAE)[1] به‌دست آمدند. روابط (۱۰) تا (۱۴) نحوه محاسبه هر کدام از آماره‌ها را نشان می‌دهند.

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2} \quad (۱۰)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \quad (۱۱)$$

$$nRMSE=\frac{RMSE}{\bar{O}}\times 100 \quad (۱۲)$$

$$D-index=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\left|P_i-\bar{O}\right|+\left|O_i-\bar{O}\right|)^2} \quad (۱۳)$$

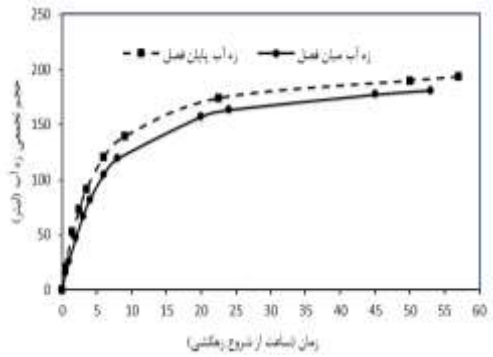
$$MAE=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|P_i-O_i\right|}{n} \quad (۱۴)$$

که در این روابط P_i مقادیر تخمین زده‌شده، O_i مقادیر مشاهده‌ای، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده‌ای و n تعداد کل مشاهدات می‌باشد. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر تخمین زده‌شده و مشاهداتی نشان می‌دهد. به‌منظور بیان میزان تفاوت بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی از RMSE استفاده می‌شود که هرچه این شاخص کم‌تر باشد بیان‌گر شبیه‌سازی بهتر مدل است (Savage, 1993). جامینسون و همکاران روشی را برای برآورد خطا پیشنهاد دادند که در آن میانگین مربعات خطا به‌عنوان درصدی از میانگین مشاهدات است که با nRMSE نمایش داده می‌شود. زمانی‌که این پارامتر در محدوده کم‌تر از ۱۰ درصد باشد نشان‌دهنده کارآیی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیان‌گر کارآیی بسیار خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بیان‌کننده کارآیی متوسط و در بیش‌تر از ۳۰ درصد نیز نشان‌دهنده ضعیف بودن توانایی مدل در شبیه‌سازی است (Jaemison et al., 1991). شاخص آماری توافق ویلموت (D-index) براساس اندازه پراکندگی بین داده‌ها می‌باشد. محدوده این شاخص بین صفر و یک است که مقدار یک بیان‌گر بهترین برازش و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی می‌باشد (Willmott, 1982). MAE میانگین مطلق خطا را نشان می‌دهد و هر چه مقدار این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است.

نتایج و بحث

نتایج مدل فیزیکی

تغییرات حجم تجمعی زه‌آب برای زهکشی میان و پایان‌فصل در شکل (۴) نشان داده شده‌است. نتایج، افزایش هفت درصدی حجم تخلیه زه‌آب در پایان فصل را نسبت به میان‌فصل نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد اثر زهکشی میان‌فصل بر ساختمان خاک و ایجاد درز و ترک در خاک، عامل بهبود وضعیت زهکشی پایان‌فصل باشد. در چنین شرایطی می‌توان انتظار داشت در پایان فصل در زمان وقوع بارش‌های فصلی که عامل آسیب به گیاه برنج و محدودیت برداشت مکانیزه است، زهکشی موثرتر و سریع‌تر بتواند آب را تخلیه نماید.

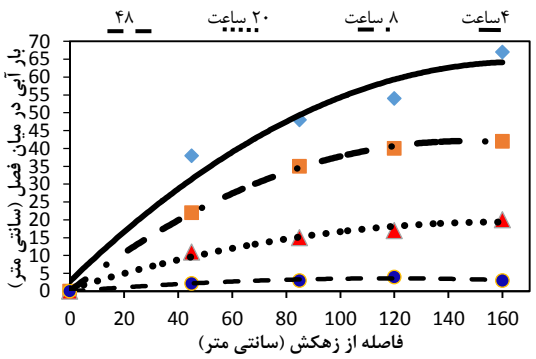


شکل ٤- حجم تجمعی زه‌آب در میان و پایان‌فصل

نوسان بار آبی در فاصله ۴۵، ۸۵، ۱۲۰ و ۱۶۰ سانتی‌متری از زهکش در زمان انجام زهکشی میان و پایان‌فصل در ساعات مختلف در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. در زهکشی میان‌فصل ۴۸ ساعت پس از شروع زهکشی برای دورترین و نزدیک‌ترین پیزومتر به زهکش به‌ترتیب کاهش ۹۴ و ۹۶ درصدی در تراز بار آبی از زمان شروع زهکشی مشاهده شد. این میزان کاهش تراز بار آبی (۹۳ و ۹۵ درصد به‌ترتیب برای پیزومتر دور و نزدیک) در زهکشی پایان‌فصل در مدت زمان کم‌تری و حدود ۳۰ ساعت پس از شروع زهکشی مشاهده شد. نتایج حاکی از توانایی زهکشی زیرزمینی با ترانشه شن و ماسه در تخلیه کامل و مناسب آب خاک می‌باشد. مومن‌نژاد (۱۳۹۶) تغییرات سطح ایستابی در اراضی شالی‌زاری با بافت خاک لوم سیلتی دارای زهکش زیرزمینی به قطر ۱۰ سانتی‌متر در

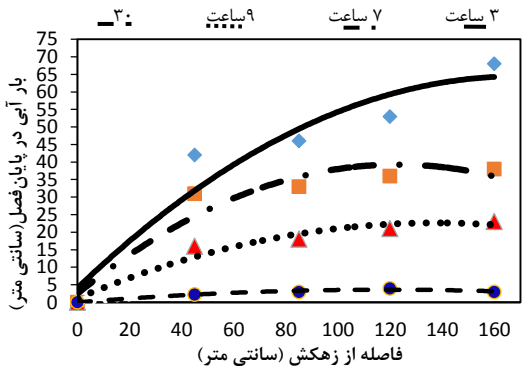
1- Mean Absolute Error

عمق ۷۰ سانتی‌متر با پوشش ژئوتکستایل (450 PP) را طی دوره زهکشی پایان‌فصل مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که سطح ایستابی در دورترین (۵۶ سانتی‌متر) و نزدیک‌ترین (هفت سانتی‌متر)



شکل ۵- روند تغییرات بار آبی در زهکشی میان‌فصل در فاصله ۴۵، ۸۵، ۱۲۰ و ۱۶۰ سانتی‌متری از زهکش

پیزومتر طی ۲۶ ساعت به‌ترتیب ۵۸ و ۵۷ درصد کاهش یافت. مقایسه نتایج با پژوهش حاضر تأثیر نوع پوشش بر سرعت تخلیه زه‌آب و کنترل سطح ایستابی را نشان می‌دهد.



شکل ٦- روند تغییرات بار آبی در زهکشی پایان‌فصل در فاصله ۴۵، ۸۵، ۱۲۰ و ۱۶۰ سانتی‌متری از زهکش

ضریب عکس‌العمل

عکس‌العمل زهکش در تخلیه حجم آب پروفیل خاک را با ضریب عکس‌العمل نشان می‌دهند. مقادیر ضریب عکس‌العمل به‌طور میانگین برای زهکشی میان و پایان‌فصل در طول دوره زهکشی به‌ترتیب ۱/۰۳ و ۱/۹۴ بر روز به‌دست آمد. بیش‌تر بودن عکس‌العمل زهکش در تخلیه آب در زهکشی پایان‌فصل نسبت به میان‌فصل می‌تواند ناشی از اثرگذاری زهکشی میان‌فصل بر تغییر ساختمان خاک و ایجاد مسیرهای بزرگ‌تر در جریان آب به سمت زهکش و تخلیه آن باشد. موذنی و همکاران (۱۳۹۵)، پژوهشی را به‌منظور بررسی عملکرد زهکش زیرزمینی آزاد با پوشش ژئوتکستایل (450 PP) در کشت دوم مدل فیزیکی اراضی شالی‌زاری (گیاه تریتیکاله) در بافت خاک لوم‌سیلتی و عمق و فاصله زهکش ۰/۶ و ۰/۵ متر انجام دادند. آن‌ها ضریب عکس‌العمل را برای باران‌های دو، سه و شش روزه به‌ترتیب ۰/۰۹۴، ۰/۰۵۴ و ۰/۰۳۹ گزارش نمودند. هم‌چنین مومن‌نژاد (۱۳۹۶) عملکرد زهکش زیرزمینی با پوشش ژئوتکستایل (450 PP) را برای اراضی شالی‌زاری در زمان کشت برنج (حالت غرقاب) مورد بررسی قرار داد. مقدار ضریب عکس‌العمل برای زهکش با عمق و فاصله ۰/۷ و پنج متر نزدیک به یک به‌دست آمد. مقایسه نتایج مطالعات با پژوهش حاضر تأثیر رطوبت موجود در خاک را بر روی ضریب عکس‌العمل نشان می‌دهدبه‌طوری‌که در زمان وجود آب بیشتر در خاک به دلیل ذخیره‌سازی کمتر آب در خاک، آب مازاد سریعتر به سمت زهکش حرکت می‌کند.

نتایج مدل شبیه‌ساز HYDRUS2D/3D

تحلیل حساسیت

نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک و املاح در جدول (۵) نشان داده شده‌است. نسبت ۱۵۱ و ۲۶ برابری ضرایب حساسیت پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و ضریب انتشار طولی در مقایسه با میانگین ضرایب حساسیت سایر پارامترهای ورودی مدل (جدول ۵) نشان داد که این دو پارامتر بیش‌ترین تأثیر را بر حرکت آب و املاح داشتند. بنابراین انتخاب این دو پارامتر به‌عنوان ضریب واسنجی در حل‌معکوس اهمیت دارد.

جدول ۵- ضریب حساسیت (SC) شاخص‌های هیدرولیکی و املاح خاک در مدل HYDRUS-2D

هدایت‌آبی اشباع (K_s) (cm/day)	رطوبت اشباع (θ_s) (cm^3/cm^3)	رطوبت باقی‌مانده (θ_r) (cm^3/cm^3)	پارامتر منحنی شکل معادله ون‌گنوختن (n) (-)	ضریب انتشارپذیری طولی ($DISPL$) (cm)	ضریب انتشارپذیری عرضی ($DISPT$) (cm)
۲/۶۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰۵۴	۰/۰۶	۰/۴۷	۰/۰۰۲

واسنجی حرکت آب در مدل HYDRUS

واسنجی مدل برای پارامترهای هیدرولیکی با اعداد قرائت‌شده بار آبی پیزومترهای شماره یک، چهار و شش در طول فصل کشت انجام شد. بعد از معرفی اطلاعات موردنیاز مدل و آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی و واسنجی، مقادیر بهینه پارامترهای مشخص‌شده در حل‌معکوس به‌دست آمد. جدول (۶) مقادیر بهینه این پارامترها را برای چهار لایه مورد بررسی نشان می‌دهد.

جدول ٦- نتایج بهینه‌یابی پارامترهای هیدرولیکی خاک- لایه اول تا چهارم

شماره لایه	هدایت‌آبی اشباع (K_s) (cm/day)	رطوبت اشباع (θ_s) (cm^3/cm^3)	رطوبت باقی‌مانده (θr) (cm^3/cm^3)	پارامتر منحنی شکل معادله ون‌گنوختن (n) (-)
لایه اول	۱۱/۷۶۱	۰/۴۸	–	–
لایه دوم	۹	۰/۴۵	–	–
لایه سوم	۲۰	۰/۳۵	۰/۰۶۸	–
لایه چهارم	۳۷۰/۲۲	۰/۳	۰/۰۴	۲/۷۲۸

معماری (۱۳۹۷) در پژوهش خود برای خاک اراضی شالی‌زاری مقادیر K_s را برای لایه خاک با بافت رسی‌سیلتی و لایه‌سخت به‌ترتیب ۹/۶۸ و ۸/۲۷ سانتی‌متر بر روز و θ_s را به‌ترتیب ۰/۴۸۰۵ و ۰/۴۰۷ به‌دست آورد. هم‌چنین درزی و همکاران برای اراضی شالی‌زاری (رسی سیلتی) K_s و θ_s را به‌ترتیب ۸/۱ سانتی‌متر بر روز و ۰/۴ گزارش کرد (Darzi-Naftchali et al., 2018). نتایج این مطالعات با نتایج لایه‌های اول و دوم این مطالعه مطابقت دارد. یائو و همکاران برای خاک اراضی شالی‌زاری (لوم سیلتی) مقادیر K_s، θ_s و θ_r را به ترتیب ۲۳/۴۲ سانتی‌متر بر روز، ۰/۳۹۳ و ۰/۰۵۷ گزارش کرد که هم‌راستا با نتایج حاضر می‌باشد (Yao et al., 2014). مقادیر تخمینی نرم‌افزار Rosseta نیز در لایه چهارم برای پارامترهای K_s، θ_s، θ_r و n به‌ترتیب ۳۱۰ سانتی‌متر بر روز، ۰/۲۱۹۱، ۰/۰۵۲ و ۴/۵۷ بود.

مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در بخش حرکت آب در جدول (۷) آورده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که واسنجی مدل در این مرحله با دقت بالایی انجام شده است. با توجه به ضریب تبیین بالا، شاخص توافق (D-index) نزدیک به یک، میانگین خطای نرمال شده کم‌تر از ده درصد، روند شبیه‌سازی پدیده مورد بررسی توسط مدل قابل قبول می‌باشد.

جدول ۷- نتایج شاخص‌های برآورد خطا و ارزیابی مدل واسنجی در بخش حرکت آب

R^2(-)	RMSE (cm)	nRMSE (%)	MAE (cm)	D-indx (–)
۰/۹۸۷	۲/۵	۴/۰۱	۱/۸۱	۰/۹۹۶

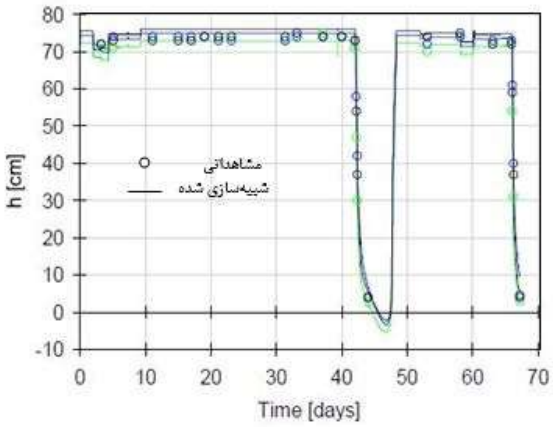
روند شبیه‌سازی تغییرات بار آبی در مرحله واسنجی توسط پیزومترهای انتخابی در شکل (۷) نشان داده شده‌است. همان‌طور که از شکل مشهود است تا قبل از انجام زهکشی میان و پایان‌فصل، سطح آب تغییرات چندانی نداشته است. اما از زمان شروع زهکشی میان و پایان‌فصل (روز ۴۳ و ۶۷) افت بار آبی شروع شد. در میان‌فصل پس از پایان زمان زهکشی و بستن زهکش با ایجاد شرایط غرقاب مجدد، بار آبی روند افزایشی داشت. شکل بیان‌گر درک تخلیه زهکشی و کاهش بار آبی توسط مدل می‌باشد.

واسنجی انتقال املاح در مدل HYDRUS

واسنجی مدل در مرحله دوم با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری‌شده پارامتر شوری عصاره‌گیر ۵ و زه‌آب انجام شد. مقادیر بهینه پارامترهای مجهول از طریق حل‌معکوس تعیین شد. جدول (۸) مقادیر بهینه این پارامترها برای لایه‌های مختلف را نشان می‌دهند. در لایه اول که جریان افقی به سمت ترانشه و عمودی به سمت لایه پایین وجود دارد، ضریب انتشارپذیری عرضی نزدیک به ضریب انتشارپذیری طولی به‌دست آمد. اما در لایه سوم و ترانشه اطراف زهکش به دلیل غلبه جریان افقی بر عمودی، ضریب انتشارپذیری عرضی بیش‌تر بود. در لایه‌سخت به‌نظر می‌رسد تفاوت اندازه خلل و فرج در مرز آن با لایه اول و سوم عامل بیش‌تر شدن ضریب انتشارپذیری طولی باشد. نتایج نشان داد انتشارپذیری عامل مهم‌تری نسبت به پخشیدگی در انتقال املاح در زهکش ترانشه‌دار شن و ماسه در آزمایش مورد

بررسی می‌باشد.

دقت نتایج واسنجی مدل براساس پارامترهای آماری در جدول (۹) نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که به فرآیند شبیه‌سازی مدل HYDRUS-2D در مرحله واسنجی انتقال املاح، به دلیل ضریب تبیین بالا و MAE و RMSE مناسب و nRMSE کم‌تر از ده درصد می‌توان اعتماد نمود.



شکل ۷- روند شبیه‌سازی تغییرات بار آبی در طول دوره آزمایش در مرحله واسنجی (پیزومترهای ۱، ٤ و ٦)

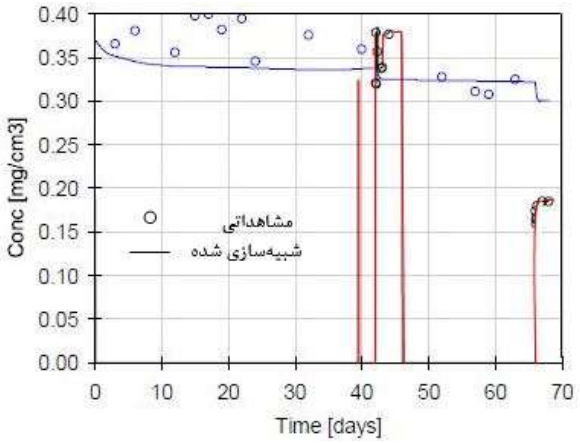
جدول ۸- نتایج بهینه‌یابی پارامترهای انتقال املاح- لایه اول تا چهارم

شماره لایه	ضریب انتشارپذیری طولی (DISPL) (cm)	ضریب انتشارپذیری عرضی (DISPT) (cm)	ضریب پخشیدگی مولکولی در آب (DIFW) (cm^2/day)	جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) (g/cm^3)
لایه اول	۹/۲۴۰۹	۸/۵۴۳۸	۰/۸۲۵۴۲	–
لایه دوم	۳۸/۲۱۲	۷/۷۹۴	۱/۰۴	–
لایه سوم	۲۲/۵۶۳	۷۷/۶۹۸	۱	–
لایه چهارم	۱/۴۶۳	۴/۰۵۲۳	–	۲/۳

جدول ۹- نتایج شاخص‌های برآورد خطا و ارزیابی مدل واسنجی در بخش انتقال املاح

R^2 (-)	RMSE (mg/cm^3)	nRMSE (%)	MAE (mg/cm^3)	D-indx (-)
۰/۹۲۵	۰/۰۲۵	۸/۱۹	۰/۰۱۵	۰/۹۷۳

شکل (۸) روند شبیه‌سازی غلظت نمک خروجی از زهکش در زمان انجام زهکشی و هم‌چنین نمک محلول خاک (عصاره‌گیر ۵) در طول فصل رشد را نشان می‌دهد. غلظت نمک محلول خاک در عمق ۶۵ سانتی‌متری تا قبل از انجام زهکشی به‌دلیل اعمال کود در دو مرحله و شستشوی املاح از روند ثابتی برخوردار نبود. با انجام زهکشی میان‌فصل، غلظت نمک محلول خاک کاهش یافته و تا پایان آزمایش با تغییرات چندانی همراه نبود. غلظت نمک خروجی زه‌آب در مدت زمان انجام زهکشی میان و پایان‌فصل نیز توسط مدل شبیه‌سازی شد (خط قرمز). همان‌طور که در شکل نشان داده شده‌است با انجام زهکشی در روز ۴۳ و ۶۷، غلظت نمک خروجی افزایش یافته و سپس روند کاهشی در پیش گرفت و با بستن زهکش در میان‌فصل به صفر رسید. لازم به‌ذکر است که در روز ۳۹ به‌دلیل شکسته شدن شیر تخلیه زهکش، مقداری از زه‌آب تخلیه شد. در شکل تغییرات مربوط به غلظت نمک خروجی در اثر شکسته شدن شیر نشان داده شده‌است.



شکل ۸- روند شبیه‌سازی غلظت املاح در طول دوره آزمایش و زمان انجام زهکشی در مرحله واسنجی (زه‌آب و عصاره گیر ۵)

اعتبارسنجی حرکت آب در مدل HYDRUS

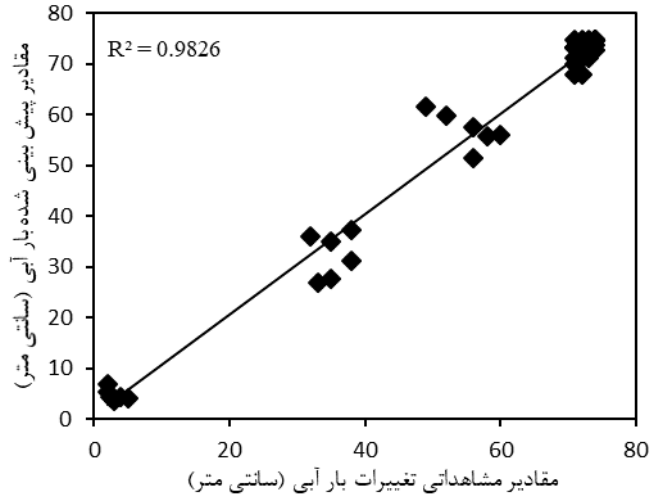
اعتبارسنجی مدل در بخش حرکت آب با مقادیر بار آبی قرائت‌شده توسط پیزومترهای دو، سه و پنج انجام شد. دقت مدل در این مرحله نیز با پارامترهای آماری سنجیده شد. در جدول (۱۰) نتایج آماری ارزیابی مدل نشان داده شده‌است. نتایج شاخص‌های ارزیابی در این بخش نشان داد که عملکرد مدل با توجه به ضریب تبیین بالا، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطای نسبتاً کم و هم‌چنین میانگین مربعات خطای نرمال‌شده عالی، براساس طبقه‌بندی جیمیسون و همکاران (Jaemison et al., 1991) مورد قبول می‌باشد. شکل (۹) مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای بار آبی در طول دوره آزمایش را برای پیزومترهای دو، سه و پنج نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است زمانی‌که زهکش بسته و یا نزدیک به زمان پایان زهکشی می‌باشد به‌دلیل دقت بیش‌تر در قرائت بار آبی بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده تطابق خوبی وجود دارد. اما در طول دوره زهکشی به‌دلیل شدت تخلیه و تفاوت در میزان افت بار آبی پیزومترهای مختلف، پراکندگی بین داده‌های شبیه سازی‌شده و مشاهده‌ای بیش‌تر است. هم‌چنین به‌منظور مقایسه مدل شبیه‌ساز و مدل فیزیکی، ضریب عکس‌العمل زهکش در مدل اعتبارسنجی شده محاسبه شد. مقادیر ضریب عکس‌العمل در زهکشی میان و پایان‌فصل به‌ترتیب ۱/۲۸ و ۱/۴۷ بر روز به‌دست آمد. مقایسه نتایج ضریب‌عکس العمل زهکشی مدل شبیه‌سازی با مدل فیزیکی نشان می‌دهد که در مدل شبیه‌ساز همانند مدل فیزیکی، ضریب عکس‌العمل زهکشی پایان‌فصل بیش‌تر از میان‌فصل به‌دست آمد. این مسئله نشان‌گر درک مناسب مدل از تأثیر زهکشی میان‌فصل بر بهبود خلل و فرج خاک و افزایش سرعت تخلیه زهکش در پایان‌فصل می‌باشد.

اعتبارسنجی انتقال املاح در مدل HYDRUS

به‌منظور ارزیابی مدل در بخش انتقال املاح از مقادیر اندازه‌گیری‌شده غلظت کل جامدات محلول عصاره‌گیرهای شش و هفت در طول مدت آزمایش استفاده شد. شاخص‌های آماری بررسی دقت مدل در جدول (۱۱) آورده شده‌است. شاخص‌های ارزیابی نشان داد که اعتبارسنجی مدل در بخش املاح با ضریب تبیین و شاخص توافق نسبتاً خوب، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطای کم و هم‌چنین میانگین مربعات نرمال شده بسیار خوب، قابل قبول می‌باشد. باتوجه به نتایج پارامترهای ارزیابی، اعتبارسنجی مدل از درجه مقبولیت مناسبی برخوردار و نتایج آن قابل قبول است. روند شبیه‌سازی غلظت نمک محلول خاک برای عصاره‌گیر شش و هفت در طول دوره آزمایش در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است. همان‌طور که در شکل مشخص است بعد از اعمال زهکشی میان‌فصل، غلظت نمک محلول خاک برای عصاره‌گیر شش و هفت نسبت به زمان قبل از انجام زهکشی میان‌فصل با کاهش همراه بود. مدل دامنه تغییرات نمک محلول عصاره‌گیر هفت را به‌دلیل نزدیک‌تر بودن به زهکش و فاصله گرفتن از شرایط مرزی بالادست و عدم تأثیرپذیری از خصوصیات لایه‌سخت بهتر پیش‌بینی کرد. افزایش ناگهانی غلظت نمک محلول عصاره‌گیر شش که در بالای لایه سخت قرار دارد مربوط به زمان اعمال کود می‌باشد.

جدول ۱۰- نتایج شاخص‌های برآورد خطا و ارزیابی مدل اعتبارسنجی در بخش حرکت آب

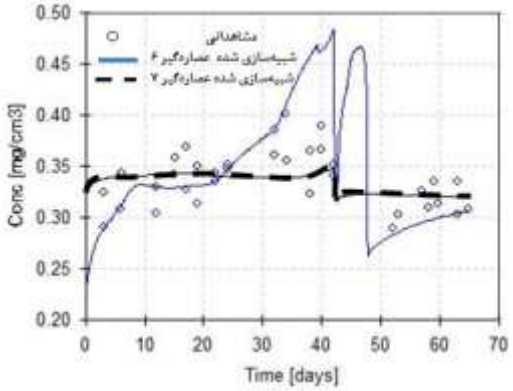
R^2 (-)	RMSE (cm)	nRMSE (%)	MAE (cm)	D-indx (-)
۰/۹۸۲۶	۲/۸	۴/۵۵	۱/۷۶	۰/۹۹۵۶



شکل ۹- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی بار آبی پیزومترهای دو، سه و پنج در طول مدت آزمایش

جدول ۱۱- نتایج شاخص‌های برآورد خطا و ارزیابی مدل اعتبارسنجی در بخش انتقال املاح

R^2 (-)	RMSE (mg/cm^3)	nRMSE (%)	MAE (mg/cm^3)	D-indx (-)
۰/۴۱۹	۰/۰۳۵	۱۰/۵۶	۰/۰۲	۰/۷۹



شکل ۱۰- روند شبیه‌سازی غلظت املاح عصاره‌گیرهای شش و هفت در طول دوره آزمایش در مرحله اعتبارسنجی

نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌منظور بررسی عملکرد زهکش زیرزمینی نصب شده درترانشه شن و ماسه در بخش‌های دبی خروجی، کنترل سطح ایستابی و ضریب عکس‌العمل انجام شد. همچنین رفتار زهکش با استفاده از مدل HYDRUS-2D بررسی شده و توانایی مدل با مقایسه نتایج آن با مدل فیزیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج دبی خروجی، تغییرات بار آبی و ضریب عکس‌العمل مدل فیزیکی نشان می‌دهد که زهکش در پایان‌فصل سرعت تخلیه بیش‌تری نسبت به میان‌فصل داشت و مقایسه ضریب عکس‌العمل محاسبه شده توسط مدل شبیه‌سازی با مدل فیزیکی، توانایی درک تفاوت میان زهکشی میان‌فصل و پایان‌فصل توسط مدل شبیه‌ساز را نشان داد. مقادیر شاخص‌های ارزیابی R^2، RMSE و nRMSE در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای حرکت آب به‌ترتیب ۰/۹۸- ۰/۹۸۲، ۲/۸- ۲/۵ سانتی‌متر و ۴/۵۵- ۴/۰۱ درصد و در بخش انتقال املاح به‌ترتیب ۰/۴۱- ۰/۹۲، ۰/۰۳۵- ۰/۰۲۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۱۰/۵۶- ۸/۱۹ درصد به‌دست آمد. این نتایج بر توانایی قابل قبول مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی حرکت آب و املاح برای زهکش زیرزمینی ترانشه‌دار با پوشش شن و ماسه دلالت دارد. گسترش این مطالعه در سطح مزرعه و استفاده از مدل HYDRUS در شبیه‌سازی رفتار زهکش در ترانشه شن و ماسه می‌تواند علاوه بر

ارزیابی کارایی مدل، زمینه‌ساز ایجاد شرایط طراحی و مدیریت بهینه زهکشی زیرزمینی در اراضی، به‌خصوص اراضی شالی‌زاری و یا اراضی دارای خاک با بافت سنگین باشد.

منابع

معماری، ن. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل هایدروی دو بعدی در شبیه‌سازی عملکرد زهکش زیرزمینی در کشت باقلا به عنوان کشت دوم اراضی شالی‌زاری. پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش آبیاری و زهکشی دانشگاه گیلان.

مودنی، س.م.ر.، نوابیان، م.، و اسمعیلی ورکی، م. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد زهکش زیرزمینی در کشت دوم اراضی شالی‌زاری (مطالعه موردی تریتیکاله) در مقیاس مدل فیزیکی. مجله تحقیقات خاک و آب. ۴۷ (۲): ۳۹۷-۴۰۵.

مودنی، س.م.ر. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عمق زهکش زیرزمینی برای کشت دوم اراضی شالی‌زاری در مقیاس مدل فیزیکی. پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش آبیاری و زهکشی دانشگاه گیلان.

مومن‌نژاد، ز. ۱۳۹۶. مقایسه عملکرد مدل‌های DRAINMOD و SWAP برای شبیه‌سازی زهکشی کنترل شده زیرزمینی در مقیاس مدل فیزیکی اراضی شالی‌زاری. پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش آبیاری و زهکشی دانشگاه گیلان.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300. D05109.

AminSalehi, A., Navabian, M., Esmaeili Varaki, M., and Pirmoradian, N. 2017. Evaluation of HYDRUS-2D model to simulate the loss of nitrate in subsurface controlled drainage in a physical model scale of paddy fields. Paddy and Water Environment Engineering 15(2): 433-442.

Belmans, C., Wesseling, J.G., and Feddes, R.A. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. Journal of hydrology 63: 271-286.

Brooks, R.H., and Corey, A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. Transactions of the ASAE 7(1): 26-38.

Darzi-Naftchali, A., Karandish, F., and Simunek, J. 2018. Numerical modeling of soil water dynamics in subsurface drained paddies with midseason drainage or alternate wetting and drying management. Agricultural Water Management 197: 67-78.

Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. Water Resources Research 30(2): 211-223.

Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen 9-30.

Frey, S.K., Hwang, H.T., Park, Y.J., Hussain, S.I., Gottschall, N., Edwards, M., and Lapen, D.R. 2016. Dual permeability modeling of tile drain management influences on hydrologic and nutrient transport characteristics in macro porous soil. Journal of Hydrology 535: 392-406.

Goel, A., and Tiwari, P. 2013. Review of computer based software tools for salinity management in agricultural lands. Journal of Indian Water Resources Society 33(4): 24-32.,

Jamieson, P.D., Poeter, J.R., and Wilson D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research 27: 337-350.

Kosugi, K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. Water Resource Research. 32 (9): 2697-2703.

Phogat, V., Skewes, M., Cox, J., Alam, J., Grigson, G., and Simunek, J. 2013. Evaluation of water movement and nitrate dynamics in a lysimeter planted with an orange tree. Agricultural Water Management 127: 74-84.

Phogat, V., Yadav, A.K., Malik, R.S., Kumar, S., and Cox, J. 2010. Simulation of salt and water movement and estimation of water productivity of rice crop irrigated with saline water. Paddy Water Environ. 8(4): 333-346.

Rice, E.W., Baird, R.B., and Eaton و A.D. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association, American Water Works Association. Water Environment Federation. 277 pages.

Ritzema, H.P., Nijland, H.J., and Croon, F.W. 2006. Subsurface drainage practices: From manual installation to large-scale implementation. Agricultural Water Management 86(1-2): 60-71.

Salo, H., Warsta, L., Turunen, M., Nurminen, J., Myllys, M., Paasonen-Kivekas, M., Alakukku, L., and Koivusalo, H. 2017. Simulating 3-D water flow in subsurface drain trenches and surrounding soils in a clayey field. Soil and Tillage Research 168: 20-32.

Savage, M.J. 1993. Statistical aspects of model validation, Presented at a workshop on the field water balance in the modeling of cropping systems, University of Pretoria, South Africa.

Smedema, L.K., and Rycroft, D.W. 1983. Land Drainage: Planning and Design of Agricultural Drainage Systems. Batsford, London, 376 pp.

Simunek, J., and Van Genuchten, M.Th. 1996.

Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. Soil Science Society of America Journal 44(5): 892-898.

Vlotman, W., Willardson, L.S., and Dierickx, W. 2001. Envelope Design for Subsurface Drain. Wageningen, ILRI, s.a. ILRI Publ. 56, 358 pages .

Vogel, T., and Cislerova, M. 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. Transport in Porous Media. 3(1): 1-15.

Warsta, L., Karvonen, T., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M., and Taskinen, A. 2013. Simulation of water balance in a clayey, subsurface drained agricultural field with three-dimensional FLUSH model. Journal of Hydrology 476: 395-409.

Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society 63: 1309-1313.

Yao, R.J., Yang, J.S., Zhang, T.J., Hong, L.Z., Wang, M.W., Yu, S.P., and Wang, X.P. 2014. Studies on soil water and salt balances and scenarios simulation using SaltMod in a coastal reclaimed farming area of eastern China. Agricultural Water Management 133: 115-123.

Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. Water Resources Research 32(9): 2683-2696.

Simunek, J., Senja, M., and van Genuchten, M.Th. 1999. The HYDRUS-2D V. 2 software package for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. US Salinity Laboratory. *Agricultural Research Service*, US Departement of Agriculture, Riverside, Calif.

Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., and Šejna, M. 2008. Modeling subsurface water flow and solute transport with HYDRUS and related numerical software packages. Numerical Modeling of Hydrodynamics for Water Resources – Garcia-Navarro & Playán (eds), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44056-1 95.

Tan, X., Shao, D., and Liu, H. 2014. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. Agricultural Water Management. 132: 69-78.

Tao, Y., Wang, S., Xu, D., and Qu, X. 2016. Experiment and analysis on flow rate of improved subsurface drainage with ponded water. Agricultural Water Management 77: 1-9.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2148-2163

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۶۳-۲۱۴۸

Simulation of Trenched Subsurface Drainage Performance in a Physical Model Scale Paddy Fields with HYDRUS-2D Model

F. Mohamadpour[1], M. Navabian[2*]

Recived: Aug.04, 2020 Accepted: Nov.14, 2020

Abstract

Poor drainage in paddy fields with heavy texture soils not only makes it difficult to harvest rice mechanically after rainfall, but also the use of non-conventional waters (drainage water) or saline irrigation water in long-term cause solute accumulation or sodification in soil. Also, such lands are not able to eliminate waterlogging in wet season and limited the second crop cultivation. Therefore, to avoid salinization and remove the waterlogging problem in paddy fields, drainage system is necessary. Installation of subsurface drainage in gravel trench results better porous conditions around the drainage pipe and thus improves drainage efficiency. Selecting the optimum trench geometry from a technical and economic point view requires simulation ability. In this study, HYDRUS-2D model was used to evaluate the performance of trenched subsurface drainage with gravel envelope in paddy fields. In order to calibrate the HYDRUS-2D model, a physical model of controlled subsurface drainage that laied in gravel trenche was constructed under paddy fields conditions and the rice plant was cultivated in it. In the growth period, was sampled of soil solution in various depths and distances from drain pipe and the drain water in mid and end season drainage. The electro conductivity (EC) of samples were measured in laboratory. Simulation results showed that the model has a good accuracy in simulating water movement, total dissolved solid of drain water and solute of soil solution. R^2, RMSE and nRMSE in water movement validation were obtained 0.982, 2.8 cm and 4.55 percent, respectively and in the solute transfer validation stage part were obtained 0.419, 0.035 mg/cm3 and 10.56 percent, respectively. The results of sensitivity analysis also showed that soil saturated hydraulic conductivity parameters and longitudinal diffusivity coefficient with sensitivity coefficient of 2.6 cm/day and 0.47 cm had more effect on water and solute movement respectively.

Keywords: 2-D modeling, Controlled drainage, Drainage rate, Salinity, Water table

1- M.Sc. Student of Water Engineering Department, Agricultural Sciences Faculty, University of Guilan
2- Associated Professor of Water Engineering Department, Agricultural Sciences Faculty, University of Guilan and and Department of Water Engineering and Environment, University of Guilan, Rasht, Iran
(*- Corresponding Author Email: Navabian@guilan.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۷۴-۲۱۶۴

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2164-2174

مقاله پژوهشی

پهنه‌بندی نیاز آبی کشت‌های غالب حاصل از مدل CROPWAT 8.0 در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه

امید رجا[۱*]، مسعود پارسی‌نژاد[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۱۱

چکیده

در این مطالعه پهنه‌بندی میزان تبخیرتعرق (ET_C) محصولات گندم، جو، سیب زمینی، چغندرقند، پیاز و یونجه حاصل از مدل CROPWAT 8.0 با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 و داده‌های ۲۱ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دو سال زراعی ۹۳-۱۳۹۲ و ۹۴-۱۳۹۳ انجام شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های اقلیمی، طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع ایستگاه هواشناسی، خاک و محصول مقادیر تبخیرتعرق محصولات (ET_C) در دو سال مذکور برآورد شد و سپس مقادیر ET_C در دو سال زراعی در سطح کل حوضه پهنه‌بندی و کلاسه‌بندی شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد میزان تبخیرتعرق در سطح حوضه متفاوت بوده که بیانگر تاثیر شرایط آب و هوایی در پهنه‌های مختلف حوضه بر میزان تبخیرتعرق است. همچنین بررسی‌ها نشان داد که تفاوت در نیاز آبی بدست آمده حاصل از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی در بین سال‌های مورد بررسی نیز قابل ملاحظه بوده و تعدد ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه می‌تواند تنوع نیاز آبی کشت‌های غالب منطقه را بهتر نشان دهد. بررسی پارامترهای اقلیمی در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد در مناطقی که بیش‌ترین میزان تبخیرتعرق حاصل شده اغلب دارای رطوبت نسبی پایین و دمای بالاتر بوده است. با توجه مساله کم‌آبی، برآورد نیاز آبی محصولات در پهنه‌های مختلف می‌تواند در خصوص مصرف آب در بخش کشاورزی تعیین کننده باشد. لذا در نظر گرفتن تفاوت‌های آب و هوایی در برآورد تبخیرتعرق و نیاز آبیاری محصولات کشاورزی در راستای مدیریت پایدار ضروری است.

واژه‌های کلیدی: تبخیرتعرق، حوضه آبریز دریاچه ارومیه، شرایط اقلیمی، CROPWAT

مقدمه

تقاضا برای آب شیرین به‌عنوان مهم‌ترین منبع طبیعی روز به روز در حال افزایش است. به‌طوری که تحقیقات نشان می‌دهد $\frac{2}{3}$ از جمعیت جهان با بحران شدید آب شیرین در ربع قرن بعدی مواجه خواهد شد. مدل‌ها نشان می‌دهند اگر درجه حرارت به‌طور میانگین دو درجه سانتی‌گراد افزایش یابد، ۲۰ درصد جمعیت جهان از کم‌آبی رنج خواهد برد (Schiermeier, 2014). استفاده مناسب و مدیریت منابع آب نیازمند آگاهی از نیاز آبی (ET_c[۳]) و نیاز آب آبیاری (IWR[۴]) محصولات است (Droogers et al., 2010). تبخیرتعرق، یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در ارتقاء سطح بهره‌برداری از منابع آب در کشاورزی و نیز یکی از اساسی‌ترین نیازهای طراحی سامانه آبیاری و ساختمان‌های ذخیره و انتقال آب است (Deo et al., 2017). خطا در ارزیابی پارامتر مذکور می‌تواند در عملکرد محصولات یا راندمان آبیاری تاثیر منفی داشته باشد. در کشور ما که از لحاظ منابع آب دچار کمبود آب است، ارزیابی نیاز آبی، یک ضرورت اجتناب ناپذیر است. میزان تبخیرتعرق، تحت تأثیر عامل‌های آب و هوایی، خصوصیات گیاه، شرایط محیطی، مراحل فنولوژی گونه‌های گیاهی و دیگر عوامل محیطی و مدیریتی قرار دارد. میزان تبخیرتعرق از یک سطح مرجع که با کمبود آب مواجه نیست، تبخیرتعرق مرجع نامیده شده و اختصاراً، به‌صورت ET_O[۵] نوشته می‌شود. سطح مرجع، عبارت از یک گیاه مرجع

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: omid.raja@ut.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.9.0
3- Crop Evapotranspiration
4- Irrigation Water Requirement
5- Reference Evapotranspiration

چمن با خصوصیات ویژه (ارتفاع معادل ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتاب معادل ۰/۲۳) است. تحقیقات صورت گرفته در ایران و نتیجه اجلاس کارشناسی ماه مه در شهر رم در کشور ایتالیا در خصوص برآورد نیاز آبی گیاهان در سال ۱۹۹۰ حاکی از آن است در شرایطی که داده‌های لایسیمتری در دسترس نباشد، روش پنمن–مانتیث فائو در مقایسه با سایر روش‌ها به عنوان روش استاندارد برای محاسبه میزان تبخیر تعرق مرجع توصیه شده است (ضیاء تبار احمدی، ۱۳۷۴؛ سپاسخواه، ۱۳۷۷؛ نیکبخت و همکاران، ۱۳۸۰؛ لشکری و همکاران، ۱۳۸۷؛ سرائی تبریزی و همکاران، ۱۳۹۳؛ Allen et al.,1998; Rahimi et al., 2014 ; Hargreaves, 1994).

مدل CROPWAT8.0 که توسط بخش توسعه آب و خاک FAO نوشته شده است، یک مدل ساده بیلان آب است که امکان شبیه‌سازی تنش رطوبتی روی گیاه و محاسبه میزان تبخیرتعرق و عکس‌العمل گیاه به تنش آبی را میسر می‌سازد (رمضانی‌اعتدالی و همکاران، ۱۳۸۸؛ طایفه‌رضایی و همکاران، ۱۳۹۸؛ حکمت‌نیا و همکاران، ۱۳۹۹). در مطالعه‌ای میزان تبخیرتعرق درختان زردآلو و زیتون (ET_c) و میزان نیاز آبیاری با مدل CROPWAT 8.0 در منطقه Tinibaouine، واقع در شمال شرقی الجزایر برآورد شد (Mansouri and Menani, 2017). همچنین نتایج به‌دست آمده از مطلعات کیو و همکاران در تایوان و آکینبایل و همکاران در نیجریه روی کشت برنج نشان داد، مدل CROPWAT 8.0 به‌طور موثر و کارآمد قادر به برآورد نیاز آبی بود (Kuo et al., 2001; Akinbile et al., 2020). البته وجود داده‌های کامل و صحیح برای اجرای مدل‌های مدیریتی آبیاری مانند CROPWAT 8.0 ضروری است (نجفی و ستار، ۱۳۸۴؛ بیدآبادی و همکاران، ۱۳۹۸).

تبخیرتعرق مرجع به‌عنوان یک پارامتر مهم در چرخه هیدرولوژیکی است که تحت تاثیر پارامترهای اقلیمی از قبیل ساعات آفتابی، سرعت باد، رطوبت و غیره است. تفاوت آب و هوا و متغیرهای هواشناسی به‌طور مستقیم بر نیاز آبی محصولات و آب مورد نیاز کشاورزی یک منطقه تأثیر می‌گذارد (شیداییان و همکاران، ۱۳۹۳؛ برزگری و ملکی‌نژاد، ۱۳۹۵). طالبی و همکاران (۱۳۸۹) عوامل موثر در تبخیرتعرق مرجع را با استفاده از آنالیز حساسیت معاوله پنمن–مانتیث فائو در ایستگاه‌های یزد، طبس و مروست بررسی کردند. نتایج نشان داد اولویت‌بندی عوامل مؤثر در تبخیرتعرق در فصول مختلف متفاوت است. بررسی تبخیرتعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف چین، ارتباط معنی‌دار بین تغییرات پارامترهای اقلیمی و تبخیرتعرق گیاه مرجع را نشان داد (Zhang et al., 2011). همچنین کوثری و همکاران در مطالعه‌ای مشابه از معادله پنمن مانتیث فائو برای تعیین تبخیرتعرق از داده‌های اقلیمی ۴۵ ساله ۳۲ ایستگاه هواشناسی استفاده کردند. نتایج نشان داد در دهه‌های اخیر، روند تغییرات تبخیرتعرق مرجع در کشور ایران افزایشی بوده است (Kousari et al., 2013). طبری و همکاران مقدار تبخیرتعرق مرجع را در اقلیم‌های مختلف ایران در یک دوره ۴۱ ساله را مطالعه کردند. بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی بر تبخیرتعرق مرجع نشان داد تبخیرتعرق مرجع در مناطق خشک زیادتر از مناطق مرطوب است (Tabari at al., 2014). در مطالعه دیگر میزان تبخیرتعرق (ET_c) و نیاز آب آبیاری[1] (CWR) محصولات گندم و ذرت در دوره زمانی (۲۰۵۹–۲۰۴۰) تحت سناریوهای اقلیمی متفاوت و با در نظر گرفتن داده‌های دما و بارش متفاوت در دوره مذکور با استفاده از مدل CROPWAT 8.0 محاسبه شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد با افزایش میانگین درجه حرارت، میزان تبخیرتعرق (ET_c) و نیاز آب آبیاری (CWR) محصولات گندم و ذرت افزایش خواهند یافت (Khattak, 2017). میزان تبخیرتعرق و آب مورد نیاز آبیاری مزارع سیب‌زمینی در منطقه Gangetic در کشور هند با استفاده از مدل CROPWAT 8.0 و داده‌های ۹ ایستگاه هواشناسی برای دوره زمانی ۱۹۹۷–۱۹۹۶ تا ۲۰۰۸–۲۰۰۹ برای شرایط فعلی و تحت شرایط اقلیمی آینده محاسبه شد. نتایج نشان داده است مقادیر تبخیرتعرق و نیاز آب آبیاری در نه مکان در طی دوره زمانی روند افزایشی داشته، هرچند از نظر آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (Banerjee et al., 2016).

به‌طور کلی مطالعات کارایی قابل قبول مدل CROPWAT 8.0 را در برآورد تبخیرتعرق مرجع (ET_o)، تبخیرتعرق گیاهی (ET_c) و آب مورد نیاز آبیاری و حتی عملکرد محصولات زراعی و باغی نشان داده است (نی‌نیوا و همکاران، ۱۳۹۹؛ امینی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Nithya Chaali et al., 2020; Pushpalatha et and Shivapur, 2016; al., 2020; Mansouri and Menani, 2017; Surendran et al., 2017). هر چند منابع متعددی به بررسی تبخیرتعرق مرجع تحت شرایط تغییر اقلیم پرداخته‌اند ولی همانطور که از منابع مختلف برمی‌آید، تاثیر تغییرات پارامترهای اقلیمی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی متعدد بر تبخیرتعرق پتانسیل گیاهی کشت‌های متنوع در یک منطقه کمتر بررسی شده و بیشتر به بررسی تبخیرتعرق گیاه مرجع پرداخته شده است. بررسی‌ها نشان داده با توجه به مشکلات کم‌آبی در نظر گرفتن تفاوت‌های آب و هوایی و اقلیمی در یک منطقه در برآورد تبخیرتعرق و نیاز آبیاری محصولات کشاورزی در راستای مدیریت پایدار ضروری است (امینی و همکاران، ۱۳۹۳). بنابراین، هدف از این مطالعه برآورد و پهنه‌بندی نیاز آبی کشت‌های غالب تحت شرایط آب و هوایی متفاوت در مناطق مختلف حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل CROPWAT 8.0 از طریق بررسی ایستگاه‌های هواشناسی متعدد در منطقه جهت

1- Crop Water Requirement

ارائه تصویری از الگوی تنوع نیاز آبی کشت‌های غالب منطقه است.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران بین ۳۷ درجه و ۳ دقیقه شمالی و ۳۸ درجه و ۱۸ دقیقه شمالی و بین ۴۴ درجه و ۵۹ دقیقه و ۴۵ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی با طول حدود ۱۴۶ کیلومتر و عرض حداکثر برابر با ۵۸ کیلومتر یکی از حوضه‌های بسته ایران است که در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز ایران، جزء حوضه اصلی به‌شمار می‌رود (شکل ۱). مساحت این حوضه، ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع است. عمده آورد حوضه در نیمه‌جنوبی آن قرار دارد و مهم‌ترین رودخانه‌های آن آجی‌چای، زرینه‌رود، سیمینه‌رود، مهابادچای، باراندوزچای، زولاچای و نازلوچای هستند. این حوضه در استان‌های آذربایجان شرقی و غربی و کردستان قرار دارد. بلندترین ارتفاعات این حوضه شامل سبلان به ارتفاع ۴۸۱۱ متر و سهند به ارتفاع ۳۷۰۷ متر هستند و پایین‌ترین نقطه حوضه، دریاچه ارومیه به ارتفاع متوسط ۱۲۶۷ متر است. این منطقه از نظر اقلیمی، دارای آب و هوای عمومی زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً معتدل است (Khazaei et al., 2019).

در این مطالعه از مدل CROPWAT 8.0 برای برآورد تبخیرتعرق (ET_C) و پهنه‌بندی آن در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شده است که به داده‌های آب و هوایی، طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع ایستگاه هواشناسی، خاک و محصول به عنوان ورودی نیاز دارد (Clarke et al., 2001). در بخش‌های بعدی پارامترهای توصیف شده شامل داده‌های آب و هوا، خاک و محصولات مورد مطالعه برای برآورد تبخیرتعرق با استفاده از مدل تشریح شده‌اند.

ایستگاه‌های هواشناسی

از ایستگاه‌های سینوپتیک سراب، بستان آباد، تبریز، سهند، مراغه، بناب، سلماس، ارومیه، اشنویه، نقده، مهاباد، میاندوآب، بوکان، سقز، شاهین‌دژ، تکاب، شبستر، کهریز، ملکان، عجب شیر و هریس برای بررسی و برآورد تبخیرتعرق (ET_C) استفاده شده است. اطلاعات هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور شامل دمای حداکثر و حداقل، رطوبت حداکثر و حداقل، سرعت باد، تعداد ساعات روشنایی در روز، تبخیر، باران، تشعشع خورشیدی جمع‌آوری شد. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در این مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

داده‌های ضرایب گیاهی و خاک

داده‌های ضرایب گیاهی طول دوره رشد در جدول ۱ ارائه شده است (مبانی مدل تخصیص آب کشاورزی در شرایط خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه، ۱۳۹۱). ضرایب گیاهی با استفاده از پارامترهای هواشناسی و معادلات ۱ و ۲ برای هر ایستگاه هواشناسی بر اساس دستورالعمل و معادلات ارائه شده در فائو ۵۶ تصحیح و تدقیق شدند (Allen et al., 1998).

$$K_C = K_{C\ end\ (tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45](\frac{h}{3})^{0.3} \quad (۱)$$

$$K_{C\ i} = K_{C\ prev} + \left[\frac{i - \sum L_{Prev}}{L_{stage}}\right](K_{C\ next} - K_{C\ prev} \quad (۲)$$

که در آن:

$K_{c\ end\ (tab)}$: مقدار $K_{c\ end}$ از جداول فائو، u_2: میانگین سرعت باد روزانه دو متری از سطح چمن در مرحله پایانی رشد (متر بر ثانیه)، RH_{min}: میانگین حداقل رطوبت نسبی روزانه در مرحله پایانی رشد (درصد)، بین ۲۰ تا ۸۰ درصد و h: میانگین ارتفاع گیاه در مرحله پایانی رشد (متر)، بین ۰/۱ تا ۱۰ متر است. ضرایب گیاهی مرحله میانی نیز همانند معادله بالا قابل اطلاح است. i: شماره روز از فصل رشد (از ۱ تا عددی که برابر کل فصل رشد است)، $K_{c\ i}$:ضریب گیاهی در روز i، L_{stage} : طول دوره مرحله رشد مورد نظر (روز) و $\sum(L_{prev})$: مجموع طول دوره‌های مراحل قبل (روز) است. معادله برای تمامی طول دوره‌های رشد گیاه قابل استفاده است.

از آنجا که ضرایب تنش آبی یکی از پارامترهای مهم ورودی به مدل است، لذا ضرایب تنش آبی در دوره‌های مختلف رشد (K_{yi}) با استفاده از مطالعات هیل و همکاران و مبانی مدل تخصیص آب کشاورزی در شرایط خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه (۱۳۹۱) تعیین شد که در جدول ۲ ارائه شده است (Hill et al., 1983).

جدول ۱- طول دوره رشد و ضرایب گیاهی محصولات زراعی غالب حوضه دریاچه ارومیه (مبانی مدل تخصیص آب کشاورزی در شرایط خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه، ۱۳۹۱)، (Allen et al., 1998)

نام محصول	طول دوره رشد					ضرایب گیاهی		
	مرحله اولیه	مرحله توسعه	مرحله میانی	مرحله پایانی	کل	اولیه	میانی	انتهایی
گندم زمستانه	۴۰	۱۳۰	۵۰	۳۰	۲۵۰	۰/۶۸	۱/۱۷	۰/۵۹
جو زمستانه	۴۰	۱۳۰	۵۰	۱۰	۲۳۰	۰/۳	۱/۲۳	۰/۳۳
پیاز	۳۰	۱۸۰	۴۵	۴۵	۳۰۰	۰/۷	۱	۱
چغندرقند	۴۰	۱۰۰	۶۰	۲۰	۲۲۰	۰/۳۵	۱/۲۸	۰/۷۸
سیب زمینی	۴۵	۳۰	۷۰	۲۰	۱۶۵	۰/۳	۱/۲۵	۰/۵۵
یونجه	۳۰	۳۰	۳۰	۲۰	۱۱۰	۰/۴	۰/۹۵	۰/۹

جدول ۲- ضرایب کاهش عملکرد گیاه به آب در مراحل رشد (K_y)

نام محصول	مرحله رشد						
	استقرار	اوایل رشد رویشی	اواخر رشد رویشی	گلدهی	شکل‌گیری عملکرد محصول	رسیدن محصول	کل دوره رشد
گندم زمستانه	۰	۰/۱۲	۰/۱۵	۲/۱	۰/۳۳	۰/۲	–
جو زمستانه	۰	۰/۱۲	۰/۱۵	۱/۵	۰/۴	۰/۱۴	–
پیاز	۰/۰۱	۰/۱	۰/۴۵	–	۰/۸	۰/۳	–
چغندرقند	۰/۱۲	۲	۲	–	۰/۳۶	۰/۱۲	–
سیب زمینی	۰/۱	۱/۴۲	۱/۴۲	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۳	–
یونجه	–	۰/۲	۰/۲	–	۰/۷	–	–

برای تکمیل اطلاعات ورودی به مدل عمق ریشه، حداکثر ارتفاع گیاه و داده‌های مربوط به خاک نیز به مدل تعریف شد که از اطلاعات موجود در نشریه FAO56 و نیز مطالعات انجام شده (مبانی مدل تخصیص آب کشاورزی در شرایط خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه، ۱۳۹۱) استفاده شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- داده‌های خاک

پارامتر	نوع محصول						منبع
	گندم زمستانه	جو زمستانه	پیاز	چغندرقند	سیب‌زمینی	یونجه	
کل رطوبت قابل دسترس گیاه (mm/m)	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵	CROPWAT
حداکثر نرخ نفوذ (mm/day)	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	۱۶۰	FAO
حداکثر عمق ریشه (cm)	۱۳۰	۱۳۰	۲۵	۱۲۰	۶۰	۷۰	FAO
تخلیه رطوبت اولیه (as %TAM)	۶	۶	۶	۸	۸	۸	CROPWAT
رطوبت قابل دسترس اولیه	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	۶۵	CROPWAT

برای برآود تبخیرتعرق محصولات غالب منطقه (ET_C) بایستی تاریخ‌های کاشت و برداشت مناسب برای هر یک از محصولات ذکر شده به مدل تعریف شود. لذا بر اساس گزارشات موجود و نیز اطلاعات FAO56 تاریخ کاشت مناسبی به مدل تعریف شد که اطلاعات آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ٤- بازه کاشت و برداشت محصولات غالب حوضه دریاچه ارومیه
(مبانی مدل تخصیص آب کشاورزی در شرایط خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه، ۱۳۹۱)

نام محصول	ماه											
	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
گندم		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
جو			*	*	*	*	*	*	*	*		
پیاز			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
سیب زمینی	*	*	*					*	*	*	*	*
چغندرقند	*	*	*	*				*	*	*	*	*
یونجه	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

برآورد تبخیرتعرق (ET_C)

مدل CROPWAT 8.0 تبخیرتعرق را به‌صورت دهه یا ماهانه هوا تخمین می‌زند. در مرحله اول، میزان تبخیرتعرق مرجع (ET_o) محاسبه می‌شود (معادله ۳). سپس مقادیر تبخیرتعرق گیاهی (ET_C) برای محصولات گندم زمستانه، جو زمستانه، پیاز، سیب زمینی، چغندرقند و یونجه با استفاده از معادله ۴ برای سال‌های زراعی ۹۳-۱۳۹۲ و ۹۴-۱۳۹۳برآورد شد.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (۳)$$

که در این معادله ET_O: تبخیرتعرق مرجع ($mm.\ day^{-1}$)، R_n: تابش خالص ورودی به سطح گیاه ($Mj.m^{-2}.\ day^{-1}$)، G: شار گرمای خاک ($Mj.\ m^{-2}.\ day^{-1}$)، T: میانگین دمای هوا در ارتفاع دو متری (°C)، u_2: میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری ($m.\ s^{-1}$)، e_s: فشار بخار اشباع (kpa)، e_a: فشار بخار واقعی (kpa)، e_s-e_a: کمبود فشار بخار اشباع (kpa)، Δ: شیب منحنی فشار بخار ($kpa.^oC^{-1}$) و γ: ضریب سایکرومتری ($kpa.^oC^{-1}$) است.

$$ET_C = ET_0 \times K_C \quad (۴)$$

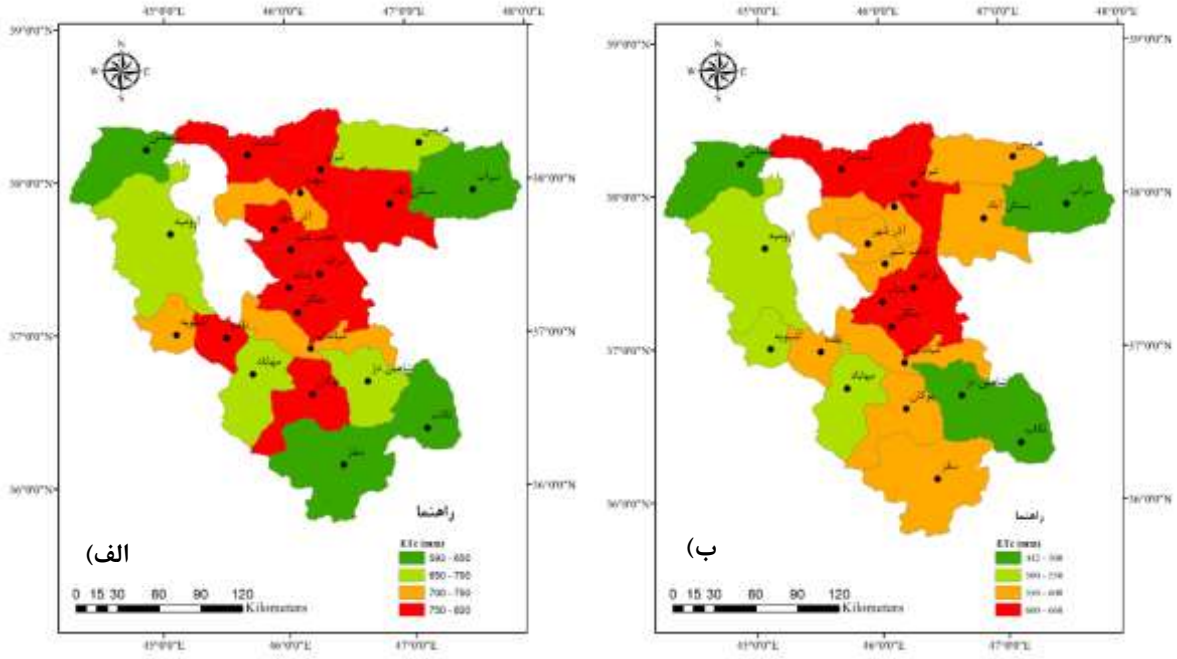
که در این معادله، ET_C: تبخیرتعرق گیاه ($mm.\ day^{-1}$)، ET_O: تبخیرتعرق مرجع ($mm.\ day^{-1}$)، K_c: ضریب گیاهی (بدون بعد) است.

در نهایت پس از محاسبه تبخیرتعرق محصولات، با استفاده از نرم افزار Arc GIS 3.0 تبخیرتعرق هر محصول به طور میانگین هر دو سال زراعی ۹۳-۱۳۹۲ و ۹۴-۱۳۹۳ در سطح حوضه پهنه‌بندی و کلاسه‌بندی شد.

نتایج و بحث

نتایج نشان داد بیش‌ترین مقدار تبخیرتعرق محصول گندم در سال‌های ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۳-۱۳۹۲ در ایستگاه مراغه به ترتیب با ۸۴۶/۱ و ۸۳۰ میلی‌متر برآورد شد. کم‌ترین مقدار نیاز آبی گندم در سال ۹۴-۱۳۹۳، ایستگاه سقز با ۵۸۱/۸ میلی‌متر و در سال ۹۳-۱۳۹۲ در ایستگاه سراب با ۵۸۱/۹ میلی‌متر برآورد شد (شکل ۲). همچنین

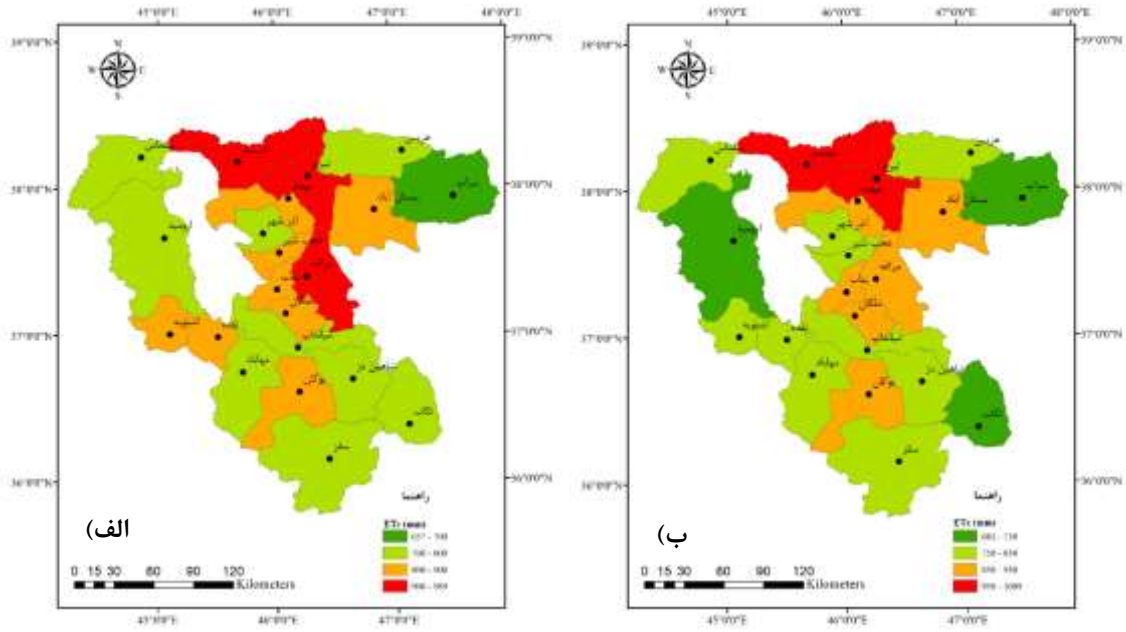
بیش‌ترین مقدار نیاز آبی برای محصول جو در سال‌های ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۳-۱۳۹۲ در ایستگاه مراغه به ترتیب با ۶۵۴/۵ و ۶۷۴/۵ میلی‌متر به دست آمد. کم‌ترین مقدار نیاز آبی محصول جو نیز در سال ۹۴-۱۳۹۳ در ایستگاه تکاب با ۳۳۷/۹ میلی‌متر و در سال ۲۰۱۴ در ایستگاه تبریز با ۴۲۴/۲ میلی‌متر برآورد شد. به‌طور کلی پهنه‌بندی متوسط تبخیرتعرق (ET_C) محصولات گندم و جو در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار تبخیرتعرق محصول گندم در مناطق شبستر، سهند، بستان آباد، آذرشهر، تبریز، عجب شیر، مراغه، بناب، ملکان، نقده و بوکان و بیش‌ترین مقدار تبخیرتعرق محصول جو نیز در ایستگاه‌های شبستر، آذرشهر، تبریز، مراغه، بناب و ملکان واقع در قسمت‌های شرق، شمال شرق حوضه برآورد شده است (شکل ۲). تعیین نیازهای آبی محصولات گندم و جو با استفاده از مدل CROPWAT در این مطالعه نشان دهنده تاثیر شرایط اقلیمی متفاوت در منطقه بر میزان تبخیرتعرق برآورد شده است به‌طوری که تاثیر عواملی چون تغییرات دما بر میزان تبخیرتعرق بالا است. نتایج مطالعه برزگری و ملکی‌نژاد (۱۳۹۵)، باهک (۱۳۹۴) نیز مبین این نکته بوده است. همچنین، نتایج مطالعه تاناسی‌جویس و همکاران نیز نشان داد تغییرات تبخیرتعرق با روند تغییرات تغییرات دماهای بیشینه و کمینه هم‌راستا است (Tanasijevic et al., 2014).



شکل ۲- پهنه‌بندی متوسط تبخیرتعرق محصول الف) گندم و ب) جو در دو سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۳-۱۳۹۲ در ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه

بررسی‌ها نشان داد بیش‌ترین مقدار تبخیرتعرق محصول چغندرقند در سال‌های زراعی ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۳-۱۳۹۲ ایستگاه مراغه و تبریز به ترتیب با ۹۸۴/۳ و ۹۴۳/۷ میلی‌متر برآورد شد. همچنین کم‌ترین مقدار تبخیرتعرق در سال ۹۴-۱۳۹۳ در ایستگاه سراب و به ترتیب با ۶۴۶/۹ میلی‌متر و در سال ۹۳-۱۳۹۲، ایستگاه‌های تکاب و ارومیه با ۷۱۴/۸ میلی‌متر به‌دست آمد. بیش‌ترین مقدار تبخیرتعرق محصول سیب‌زمینی در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در ایستگاه‌های مراغه و تبریز به‌ترتیب با ۱۰۶۲/۳ و ۱۰۱۰/۲ میلی‌متر و در سال ۹۳-۱۳۹۲ در ایستگاه تبریز با ۱۰۳۹/۴ میلی‌متر برآورد شد. همچنین کم‌ترین مقدار تبخیرتعرق در سال‌های مورد مطالعه در ایستگاه سراب به ترتیب با ۶۷۵/۲ و ۶۹۵/۴ میلی‌متر حاصل شد (شکل ۳). بررسی پهنه‌بندی متوسط تبخیرتعرق واقعی محصول چغندرقند و سیب‌زمینی در سطح حوضه نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان تبخیرتعرق (ET_C) در ایستگاه‌های شبستر، تبریز و مراغه، بناب، بستان آباد، سهند، عجب شیر، بناب، ملکان، اشنویه و بوکان برای محصول چغندرقند و همچنین در ایستگاه‌های شبستر، تبریز، بستان آباد، سهند، مراغه، بناب، ملکان و بوکان برای محصول سیب‌زمینی حاصل شده است (شکل ۳). میزان تبخیرتعرق (ET_C) در مدل CROPWAT 8.0 با استفاده از تبخیرتعرق مرجع (ET_O) و ضرایب گیاهی حاصل می‌شود. تبخیرتعرق مرجع (ET_O) تابع شرایط اتمسفری یا به‌عبارتی وابسته به

شرایط اقلیمی و پارامترهای هواشناسی است (برزگری و ملکی‌نژاد، ۱۳۹۷). بررسی‌های پارامترهای هواشناسی از قبیل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد در مناطقی که بیش‌ترین میزان تبخیرتعرق حاصل شده، اغلب دارای رطوبت نسبی پایین، دمای بالاتر بوده و این مناطق در دشت واقع شده‌اند. نتایج مطالعات محققان نیز مبین تاثیر پارامترهای اقلیمی بر میزان تبخیرتعرق و نیاز آبیاری بوده است (پوریوسف و همکاران، ۱۳۹۸؛ Zhang et al., 2011; Tabari et al., 2014; Govere et al., 2020).

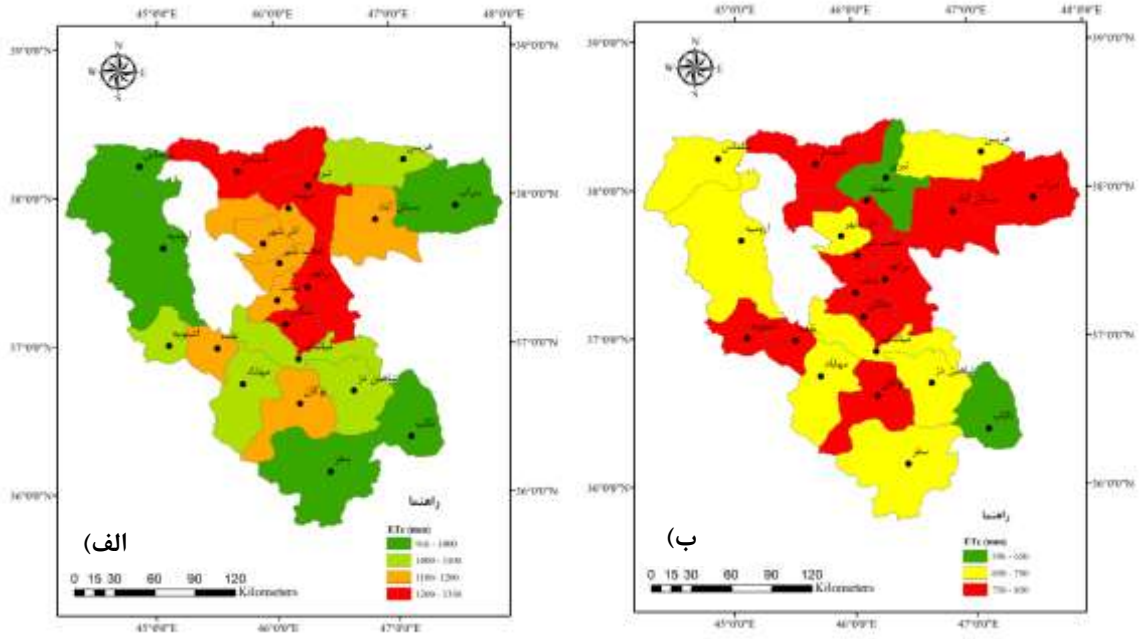


شکل ۳- پهنه‌بندی متوسط تبخیرتعرق محصول الف) چغندرقند و ب) سیب‌زمینی در دو سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۳-۱۳۹۲ در ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه

نتایج پهنه‌بندی تبخیرتعرق محصول پیاز نشان داد در سال ۹۴-۱۳۹۳، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تبخیرتعرق (ET_C) در ایستگاه‌های تبریز و سراب با ۱۳۰۲ و ۹۳۰/۲ میلی‌متر به دست آمد. به‌طور مشابه در سال ۹۳-۱۳۹۲، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تبخیرتعرق (ET_C) در همین ایستگاه‌ها به ترتیب با ۱۳۵۶/۹ و ۹۲۵/۴ میلی‌متر برآورد شد. همچنین بیش‌ترین مقدار تبخیرتعرق در ایستگاه مراغه به ترتیب با ۸۴۰/۲ و۸۵۰ میلی‌متر و کم‌ترین مقدار تبخیرتعرق در ایستگاه سراب به ترتیب با ۵۹۸ و ۵۸۴/۹ میلی‌متر در سال‌های ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۳-۱۳۹۲ به‌دست آمد. پهنه‌بندی متوسط تبخیرتعرق محصول پیاز در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار تبخیرتعرق محصول پیاز در ایستگاه‌های شبستر، سهند، مراغه و ملکان، نقده، بوکان، آذرشهر، عجب شیر، بناب و بستان آباد و بیش‌ترین مقدار تبخیرتعرق محصول یونجه در ایستگاه‌های شبستر، سهند، بستان آباد، سراب، عجب شیر، مراغه، بناب، ملکان، اشنویه و بوکان اغلب واقع در قسمت‌های شرق، شمال شرق برآورد شده است (شکل ۴). مطالعات علیقلی‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) نیز نشان داده است که میزان بالای آب مصرفی محصولات در قسمت‌های شرق حوضه و نیز میزان پایین آب مصرفی محصولات در قسمت‌های غرب حوضه است که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این مطالعه بررسی و مقایسه میزان تبخیرتعرق (ET_C) حاصل از مدل CROPWAT برای کشت‌های گندم، جو، چغندرقند، سیب‌زمینی، پیاز و یونجه در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای سال‌های زراعی ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۳-۱۳۹۲ بود. هدف از این بررسی تاثیر شرایط آب و هوایی متفاوت در برآورد میزان تبخیرتعرق محصولات در مناطق مختلف حوضه بود. در ابتدا مقادیر ET_C با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی در سطح حوضه و ضرایب گیاهی برای محصولات مورد نظر برآورد شد. سپس مقادیر تبخیرتعرق با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 در سطح حوضه پهنه‌بندی شد.



شکل ٤- پهنه‌بندی متوسط تبخیرتعرق محصول الف) پیاز و ب) یونجه در دو سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ و ۹۳-۱۳۹۲ در ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه

نتایج حاصل از مدل CROPWAT 8.0 برای ۲۱ ایستگاه بررسی شده و برای شش محصول نشان داد میزان تبخیرتعرق در سطح حوضه متفاوت بوده که بیانگر شرایط لزوم لحاظ شرایط آب و هوایی در برآورد میزان تبخیرتعرق در پهنه‌های مختلف است. به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان تبخیرتعرق (ET_C) در مناطق شرق، شمال شرق و جنوب‌غربی حوضه اتفاق افتاده است. همچنین نتایج نشان داد که تفاوت در نیازآبی بدست آمده حاصل از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی حتی در بین سال‌های مورد بررسی قابل ملاحظه بوده و تعدد ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه می‌تواند تنوع نیاز آبی کشت‌های غالب منطقه را بهتر نشان دهد. بررسی‌ها در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد در مناطقی که بیش‌ترین میزان تبخیرتعرق حاصل شده، اغلب دارای رطوبت نسبی پایین، دمای بالاتر بوده است. با توجه به شرایط کم‌آبی و وجود کشاورزی ناپایدار در منطقه، برآورد دقیق نیاز آبی محصولات در پهنه‌های مختلف می‌تواند در خصوص مصرف آب در بخش کشاورزی تعیین کننده باشد.

منابع

امینی، ع.، پرهمت، ج. و سدری، م.ح. ۱۳۹۹ . بررسی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محصولات عمده زراعی در حوضه تلوار استان کردستان، مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۲(۲): ۴۸۱-۴۹۱.

امینی، ع.، حیدری، ر. و فقیه، ه. ۱۳۹۳. نقشه پهنه‌بندی اقلیم در تعین نیاز خالص آبیاری محصولات باغی استان کردستان، دانش نوین کشاورزی پایدار، ۱۰(۱): ۱۳-۱.

باهک، ب. ۱۳۹۴. پیش‌بینی و ارزیابی روند بلندمدت الگوهای زمانی دمای زاهدان و تاثیر آن بر تبخیر و تعرق پتانسیل، فصلنامه جغرافیا، ۱۳(۴۴): ۲۵۷-۲۳۹.

برزگری، ف. و ملکی‌نژاد، ح. ۱۳۹۵. بررسی نیاز آبی بخش کشاورزی تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت یزد اردکان)، علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹(۴): ۹۵-۸۵.

برزگری، ف. و ملکی‌نژاد، ح. ۱۳۹۷. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی و پایداری مصرف آب در بخش کشاورزی دشت یزد-اردکان، بوم‌شناسی کشاورزی، ۱۰(۴): ۱۱۷۶-۱۱۶۱.

بیدآبادی م.، بابازاده ح. و سرائی تبریزی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی نیاز آبی پتانسیل گیاهان (مطالعه موردی: سایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران)، مجله محیط زیست و مهندسی آب، ۱(۵): ۵۶-۳۶.

پوریوسف، س.، ناظمی، ا.ح. و صدرالدینی، س.ع. ۱۳۹۸. اثرات تغییر اقلیم بر کارکرد سیستم آبیاری تحت فشار (مطالعه موردی: آبیاری

قطره‌ای سد ستارخان، آذربایجان شرقی)، مجله پژوهش آب ایران، ۳۳: ۹-۱.

حکمت‌نیا، م.، حسینی، س.م. و صفدری، م. ۱۳۹۹. مدیریت منابع آب کشاورزی استان سیستان و بلوچستان از دیدگاه آب مجازی، مجله مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۱(۴۱): ۱۴۹-۱۳۷.

رمضانی اعتدالی، ه.، نظری، ب.، توکلی، ع. و پارسی‌نژاد، م. ۱۳۸۸. ارزیابی مدل CROPWAT در مدیریت کم‌آبیاری گندم و جو در منطقه کرج، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳(۱): ۱۲۹-۱۱۹.

سپاسخواه، ع. ۱۳۷۷. نگرشی دوباره بر روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق گیاهان زراعی. سمینار آموزشی، دانشکده کشارزی، دانشگاه شیراز، ارائه شده به صورت شفاهی.

سرائی تبریزی، م.، پارسی نژاد، م. و بابازاده، ح. ۱۳۹۳. ارزیابی کارائی مدل CROPWAT 8.0 در پیش‌بینی و برآورد مصرف آب و میزان عملکرد محصول سویا با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای در منطقه کرج، نشریه زراعت، ۱۰۲: ۱۷۰-۱۶۱.

شیداییان، م.، ضیاءتبار احمدی، م.خ. و فضل اولی، ر. ۱۳۹۳. تاثیر تغییر اقلیم بر نیاز خالص آبیاری و عملکرد محصول برنج (مطالعه موردی: دشت تجن)، نشریه آب و خاک، ۲۸(۶): ۱۲۸۴-۱۲۹۷.

ضیاءتبار احمدی، م.خ. ۱۳۷۴. بررسی و مقایسه روش‌های محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل در استان مازندران، نیوار، ۴۳: ۷۰-۵۱.

طالبی، ع.، پورمحمدی، س. و رحیمیان، م.ح. ۱۳۸۹. بررسی عوامل مؤثر در تبخیر و تعرق مرجع، با استفاده از آنالیز حساسیت معادله فائو پنمن مانتیث مطالعه موردی: ایستگاه‌های یزد، طبس و مروست، فصلنامه پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۴۲(۷۳): ۱۱۰-۹۷.

طایفه‌رضایی، ح.، احمدآلی، ج. و احمدآلی، خ. ۱۳۹۸. ارزیابی راندمان کل آبیاری و هیدرومدول واقعی با استفاده از روش بیلان آب (مطالعهٔ موردی، دشت نازلوچای ارومیه)، تحقیقات سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۰(۷۶): ۱۴۲-۱۲۵.

علیقلی‌نیا، ت.، رضایی، ح.، بهمنش، ج. و منتصری، م. ۱۳۹۵. تخمین و ارزیابی ردپای آب آبی و سبز محصولات عمده مورد کشت در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳(۳) : ۳۴۴-۳۳۷.

لشکری، ح.، کیخسروی، ق. و رضایی، ع. ۱۳۸۷. تحلیل کارایی مدل CROPWAT در برآورد نیاز آبی محصول گندم در غرب کرمانشاه: شهرستان‌های اسلام آبادغرب، سرپل ذهاب وروانسر، فصلنامه مدرس علوم انسانی، ۱۳(۱): ۲۷۰-۲۴۸.

مبانی مدل تخصیص آب کشاورزی در شرایط خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه.۱۳۹۱. برنامه مدیریت ریسک خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، کارگروه مدیریت پایدار منابع آب و کشاورزی، ۷: ۴۶-۱.

نجفی، پ. و ستار، م. ۱۳۸۴. ارزیابی دقت نرم افزار CROPWAT در تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه اصفهان، مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۱(۱): ۱۱-۱.

نیی‌نیوا، س.پ.، شاهدی، ک.، زاهدی، ص.ا. و انتظامی، ه. ۱۳۹۹. سهم برآورد رواناب ناشی از ذوب برف در تامین نیاز آبی اراضی زراعی زیرحوضه چهل‌گزی، استان کردستان، مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۲(۴): ۹۷۶-۹۶۲.

نیکبخت، ج.، میرلطیفی، س.م. و کمالی، غ.غ. ۱۳۸۰. مقایسه تبخیرتعرق محاسبه شده با روش‌های فائو-پنمن-مانتیث، پنمن-رایت و هارگریوز-سامانی در منطقه تهران. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۸(۴): ۱۳-۳.

Akinbile, C.O., Ogundipe, A., and Davids, R.O. 2020. Crop water requirements, biomass and grain yields estimation for upland rice using CROPWAT, AQUACROP and CERES simulation models. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 22(2): 1-20.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M.1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Rome, Itally, 300 pp.

Banerjee, S., Chatterjee, S., Sarkar, S., and Jena, S. 2016. Projecting Future Crop Evapotranspiration and Irrigation Requirement of Potato in Lower Gangetic Plains of India using the CROPWAT 8.0 Model. Potato Research 59(4): 313-327.

Chaali, N., Ouazaa, S., Jaramillo-Barrios, C.I., Carrillo, G. A.A., and Pedraza, E.Á.Á. 2020. Edaphoclimatic characterization and crop water requirement of Arracacha (Arracacia xanthorrhiza Bancroft) roots in upland production areas. Scientia Horticulturae 272: 109533.

Clarke, D., Smith, M., El-Askari, K. 2001. CROPWAT for Windows: User Guide. IHE.

Deo, K., Mishra, S.R., Singh, A.K., Mishra, A.N., and Singh, A. 2017. Water requirement of wheat crop for optimum production using CROPWAT model. Journal of Medicinal Plants 5(3): 338-342.

Droogers, P., Immerzeel, W.W., and Lorite, I.J. 2010. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations Agriculture Water Management 97: 1351–1359.

46-52.

Nithya, K.B., and Shivapur, A.V. 2016. Study on water requirement of selected crops under tarikere command area using CROPWAT. Irrigation and Drainage Systems Engineering, 5(153): 1-4.

Pushpalatha, R., Amma, S.S., George, J., Rajan, S., and Gangadharan, B. 2020. Development of optimal irrigation schedules and crop water production function for cassava: study over three major growing areas in India. Irrigation Science 1-11.

Rahimi, D., Khademi, S., and Nadafi, S. 2014. Estimation of evaporation and transpiration of wheat plant in Zaraghan station using CROPWAT model. International journal of Advanced Biological and Biomedical Research 2(4): 1362-1370.

Schiermeier, Q. 2014. Water risk as world warms. Nature 505:10‑11.

Surendran, U., Sushanth, C.M., Mammen, G., and Joseph, E.J. 2017. FAO-CROPWAT model-based estimation of crop water need and appraisal of water resources for sustainable water resource management: Pilot study for Kollam district-humid tropical region of Kerala, India. Current Science (00113891), 112 (1).

Tabari, H., Marofi, S., Aeini, A., Talaee, P.H., and Mohammadi, K. 2014. Sensitivity of evapotranspiration to climatic change in different climates. Global and Planetary Change 115: 16–23.

Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L.S., Pizzigalli, C., and Lionello, P. 2014. Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. Agricultural Water Management 144: 54–68.

Zhang, X., Chen, S., Sun, H., Shao, L., and Wang, Y. 2011. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades. Agricultural Water Management 98: 1097–1104.

Govere, S., Nyamangara, J., and Nyakatawa, E.Z. 2020. Climate change signals in the historical water footprint of wheat production in Zimbabwe. Science of the Total Environment 742:140473.

Hargreaves, G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 120(6):1132-39.

Hill, R.W., Rayan, K.H., Butters, R.L., Keller, A.A., Stewart, F.R., and Bomen, R.J. 1983. CRSPM yield simulation model. Utah State University. Logan. Utah.

Khattak, M.S. 2017. Impacts of Climate Change on Crop Water Requirement under Multi-Representative Concentration Pathways during Mid-Century: A Case Study of Di Khan. Journal of Engineering and Applied Sciences (JEAS), Peshawar, 36(1).

Khazaei, B., Khatami, S., Alemohammad, S.H., Rashidi, L., Wu, C., Madani, K., Kalantari, Z., Destouni, G., and Aghakouchak, A. 2019. Climatic or regionally induced by humans? Tracing hydro-climatic and land-use changes to better understand the Lake Urmia tragedy. Journal of Hydrology 569: 203-217.

Kousari, M.R., Asadi Zarch, M.A., Ahani, H., and Hakimelahi, H. 2013. A survey of temporal and spatial reference crop evapotranspiration trends in Iran from 1960 to 2005. Climatic Change 120: 277–298.

Kuo, Sh. F., Lin, B.J., and Shieh. H.J. 2001. CROPWAT Model to Evaluate Crop Water Requirements in Taiwan. International Commission on Irrigation and Drainage. 1st Asian Regional Conference, Seoul.

Mansouri, Z., and Menani, M.R. 2017. Assessment of the Water Needs of Apricot and Olive Crops under Arid Climatic Conditions: Case Study of Tinibaouine Region (Northeast of Algeria). International Journal of Geomate 12(30):

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2164-2174

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۷۴-۲۱۶۴

Water–use Zoning of Major Crops Obtained from CROPWAT 8.0 Model in the Urmia Lake Basin

O. Raja[1*], M. Parsinejad[2]

Recived: Aug.01, 2020 Accepted: Nov.01, 2020

Abstract

In this study, the water-use zoning (ET_C) of wheat, barley, potato, sugar beet, onion and alfalfa crops obtained from CROPWAT 8.0 model using ArcGIS 10.3 software and data from 21 synoptic meteorological stations in the Urmia Lake basin has been at 2013-14 and 2014-15. At First, the average ET_C values were estimated using climatic data, longitude and latitude, meteorological station height, soil and crop in the two years and then in the whole basin zoned and classified. Overall, the results showed that the rate of evapotranspiration was different across the basin, which indicates the effect of weather conditions in different areas of the basin on the value of evapotranspiration. Investigations also showed that the difference in water demand obtained from meteorological station data between the years under study is significant and the number of meteorological stations in the region can improve the diversity of water needs of the major crops in the region. Surveys of climatic parameters in the studied stations showed that in the areas where the highest rate of evapotranspiration was obtained, it was often with low relative humidity and higher temperature. Due to the problem of water scarcity, accurate estimation of water-use of crops in different areas can be decisive for water consumption in agriculture. Therefore, it is necessary to consider climatic differences in estimating evapotranspiration and irrigation requirement of agricultural crops for sustainable management.

Keywords: Climate condition, CROPWAT, Evapotranspiration, Urmia Lake basin

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2- Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: omid.raja@ut.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۸۷-۲۱۷۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2175-2187

مقاله پژوهشی

تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری بر انار رقم رباب نی‌ریز در شهرستان کازرون استان فارس

محمدعلی شاهرخ نیا[1*]، علیرضا بنیان پور[2]، دادگر محمدی[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۴

چکیده

اگرچه انار یکی از محصولات باغی مهم کشور است، تحقیقات کمی در خصوص مدیریت آبیاری آن انجام شده است. به منظور بررسی تاثیر مدیریت آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب انار رقم رباب نی‌ریز، آزمایشی در یکی از باغات انار شهرستان کازرون فارس انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل انجام آبیاری در مقادیر مختلف تخلیه رطوبت در دسترس خاک ۳۵، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد بود. یک تیمار نیز که مدیریت آبیاری آن کاملا توسط باغدار انجام می‌شد، بعنوان شاهد در نظر گرفته‌شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. رطوبت خاک در تیمارهای مختلف با دستگاه رطوبت‌سنج بلوک گچی اندازه‌گیری میشد و پس از رسیدن رطوبت خاک به حدود مورد نظر آبیاری به میزان مورد نیاز برای رسانیدن رطوبت خاک به حد ظرفیت مزرعه انجام می‌شد. باغ به سیستم آبیاری قطره‌ای مجهز بود و میزان آب آبیاری توسط کنتورهای واسنجی شده اندازه‌گیری می‌گردید. آزمایش به مدت دوسال انجام و میزان آب مصرفی، میزان عملکرد محصول و بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف برآورد و با مقایسه میانگین ها مورد بررسی قرار گرفت. با اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاه و سایر پارامترهای هواشناسی مورد نیاز، خطوط مبنای تنش بالایی و پایینی از روش ایدسو استخراج گردید. با برآورد هزینه و درآمد، تجزیه و تحلیل اقتصادی نیز انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش کل میزان آب داده شده تا حد ۱۹۵۸۰ مترمکعب در هکتار(شاهد)، میزان محصول نیز تا نزدیک ۳۶ تن در هکتار افزایش یافت در حالیکه در حد تخلیه رطوبتی ۳۵ درصد، میزان آب مصرفی کل ۱۰۵۱۱ مترمکعب در هکتار و میزان محصول ۲۸ تن در هکتار بود. میزان بهره‌وری آب کل در تیمارهای مختلف از ۱/۸۲ تا ۳/۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود که با افزایش مصرف آب، بهره‌وری کاهش یافت. تفاوت مقادیر بهره‌وری آب و عملکرد بین دو تیمار تخلیه رطوبتی ۳۵٪ و ۵۰٪ از نظر آماری معنی‌دار نگردید. از نظر اقتصادی بهترین تیمار، تیمار آبیاری در تخلیه رطوبتی ۳۵٪ بود که با توجه به تحقیقات گذشته می‌توان آن را به عنوان حد آغاز تنش آبی در درخت انار در نظر گرفت. از خطوط مبنای تنش پایینی و بالایی به دست آمده در این تحقیق که مشابه آن در تحقیقات قبلی مشاهده نشده است، می‌توان بعنوان ابزاری جهت مدیریت آبیاری درختان انار در منطقه مورد مطالعه و سایر نقاط مشابه بهره جست. بنابراین به طور کلی بهترین تیمار آزمایش، انجام آبیاری در تخلیه رطوبت ۳۵٪ بود که در مناطق کم آب تا تخلیه رطوبت ۵۰٪ نیز نتایج مطلوبی به بار می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: انار، بهره‌وری آب، تخلیه رطوبت خاک، دمای پوشش گیاه، نی‌ریز

مقدمه

کم‌آبی در سال‌های گذشته بسیاری از دشت‌های کشور و از جمله استان فارس را تحت تاثیر قرار داده است. بنابراین لازم است به منظور کاهش تاثیر کم‌آبی بر تولید محصولات کشاورزی، تاثیر کم آبی یا تنش خشکی بر محصولات مهم هر منطقه مورد بررسی قرار گرفته تا بهتر بتوان منابع آبی موجود را مدیریت نمود. انار (*Punica granatum* L.) میوه‌ای نیمه گرمسیری است که بومی ایران و کشورهای اطراف آن می باشد. انار میوه‌ای با ارزش تغذیه‌ای بالا و از مهم‌ترین محصولات باغی ایران، است که ۶ درصد از کل محصولات باغی ایران را تشکیل می‌دهد. ایران حدود ۹۰ هزار هکتار سطح زیر کشت انار و تولیدی حدود ۷۱۵ هزار تن در سال ۱۳۹۷ داشته است که میزان قابل توجهی در سطح جهان است. استان‌های فارس با سهم ۳۸ درصدی، یزد با سهم ۱۴ درصدی، لرستان باسهم ۵ درصدی، و خراسان‌رضوی باسهم ۴ درصدی در رتبه‌های اول تا چهارم تولیدکنندگان انار کشور قراردارند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). در

۱- دانشیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
۲- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
۳- مربی پژوهشی بخش تحقیقات اقتصادی، اجتماعی و ترویجی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email:mashahrokh@yahoo.com
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.5.6

سال‌های اخیر تحقیقاتی در خصوص تاثیر تنش خشکی و مدیریت آبیاری بر درخت انار انجام گرفته است. راد و همکاران (۱۳۹۴) اثر تنش خشکی بر عملکرد انار رقم رباب نی‌ریز را در یزد که یک منطقه خشک است مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اثر تنش خشکی بر عملکرد و کیفیت میوه در مقایسه با شاخص‌های رشدی گیاه بیشتر بود. تنش خشکی باعث کاهش عملکرد، کاهش اندازه میوه و کاهش میزان اجزای میوه از جمله آریل، هسته، آب و پوست و افزایش مواد جامد محلول و اسید قابل تیتراسیون شد. ایشان برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس رطوبت ۷۵ درصدی خاک و سیستم آبیاری تحت فشار بابلر را توصیه نمودند. طاوسی و همکاران (۱۳۹۵) تاثیر تنش‌های شوری و خشکی را روی یک رقم انار در خراسان جنوبی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که انار درختی مقاوم در مقابل شوری و حساس به کم آبی است. کاوند و همکاران (۱۳۹۶) تاثیر سایبان، محلول‌پاشی کائولین، تنک میوه و آبیاری تکمیلی را بر سفیدشدگی دانه انار مورد بررسی قراردادند و نتیجه گرفتند که استفاده از سایبان و کاهش فواصل آبیاری باعث کاهش و تنک میوه باعث افزایش عارضه سفیدشدگی دانه انار میگردد.

چوپاد و همکاران نشان دادند که استفاده ازآبیاری قطره ای در باغات انار سبب صرفه‌جویی ۶۶ درصدی در مصرف آب در مقایسه با آبیاری سطحی می‌شود (Chopade et al., 2001). بسته به وضعیت خاک و اقلیم درحدود ۵ تا ۶ هزار مترمکعب آب در هر هکتار برای آبیاری انار لازم است (Holland et al., 2009). در یک بررسی که در کشور هند انجام شد، میزان بهره‌وری آب درختان انار در دو سیستم آبیاری سطحی و قطره‌ای بترتیب ۲/۷۹ و ۴/۸۱ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش شد (Kumar et al., 2012). در تحقیقی تاثیر تنش خشکی یکنواخت و غیر یکنواخت (کم‌آبیاری مداوم و کم‌آبیاری تنظیمی) در طول فصل رشد روی یک رقم انار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تنش یکنواخت به صورت آبیاری به اندازه ۵۰ درصد تبخیروتعرق گیاه باعث کاهش ۲۲ درصدی وزن میوه‌ها و افزایش ۲۸ درصدی تعداد میوه‌ها گردید. در تنش غیریکنواخت که محدودیت آب در دوره گلدهی و شکل‌گیری میوه اعمال شد باعث افزایش تعداد میوه در درخت و ثابت ماندن عملکرد گردید. تنش شدید در تابستان باعث کاهش ۲۴ درصدی مصرف آب و ۷ درصدی وزن میوه ها گردید. ترک‌خوردگی میوه‌ها نیز خیلی کم بود و فقط در یک فصل از سه فصل مورد بررسی مشاهده شد. بنابراین تیمار تنش در دوره‌های اول رشد شامل گلدهی و شکل‌گیری میوه بعنوان بهترین تیمار تنش انتخاب گردید (Intrigliuolo et al., 2013). منا و همکاران نشان دادند که تنش خشکی تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات کیفی میوه و آب میوه انار گذاشته و ارزش تغذیه‌ای و ظاهری آنرا به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد (Mena et al., 2013). لاریبی و همکاران بیان داشتند که کم آبیاری بسته به اینکه در چه دوره فنولوژیکی گیاه اتفاق بیفتد میتواند برای کنترل زمان رسیدن میوه، افزایش خصوصیات کیفی میوه و بهبود شرایط نگهداری پس از برداشت مورد استفاده قرار گیرد (Laribi et al., 2013). پرویزی و همکاران تاثیر آبیاری و سایر عوامل را بر عملکرد انار رقم رباب نی‌ریز مورد بررسی قرار دادند و تیمار آبیاری به میزان ۷۵ درصد محدوده ریشه به همراه کود حیوانی را بعنوان بهترین گزینه تشخیص دادند (Parvizi et al., 2014, 2016). طاوسی و همکاران زمان آبیاری درختان انار را در تخلیه رطوبتی ۴۰ درصد در نظر گرفتند (Tavousi et al., 2015). بوگونو و همکاران شروع تنش آبی در درختان انار را در تخلیه رطوبتی بین ۴۷ تا ۱۲ درصد دانستند (Bugueno et al., 2016). در یک بررسی، نتیجه به کار بردن دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی بر عملکرد انار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تفاوتی بین حجم پوشش گیاه در دو حالت مشاهده نشد. در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی عملکرد و اندازه میوه‌ها بزرگتر بود و ۱۰ درصد آب کمتر استفاده شد (Zhang et al., 2017). آیارس و همکاران مقادیر آب مورد نیاز انار در دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی را در کالیفرنیای آمریکا بترتیب ۹۳۲ و ۸۴۳ میلیمتر گزارش نمودند (Ayars et al., 2017). میزان بهره‌وری آب نیز بترتیب ۵/۵۸ و ۵/۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. سلاحورزی و همکاران اثر کم آبیاری بر محصول انار را در تربت حیدریه مورد بررسی قرار دادند. میزان آب مورد نیاز در دو سال متوالی در شرایط بدون تنش آبی بترتیب ۹۳۰ و ۹۷۲ میلی‌متر و میزان بهره‌وری آب ۲/۱۵ و ۲/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب بود (Selahvarzi et al., 2017). در تحقیقی اثر مقادیر مختلف و دور آبیاری روی یک رقم انار در شرایط آب و هوایی مدیترانه ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آبیاری به اندازه ۷۵ درصد تبخیروتعرق تجمعی از تشتک تبخیر کلاس A در دور آبیاری ۶ روزه بهترین بهره وری آب را به وجود آورد (Dinc et al., 2018). مارات و همکاران تاثیر دورهای مختلف آبیاری قطره‌ای بر رشد و عملکرد درخت انار در یک خاک سبک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که عملکرد، ترک‌خوردگی میوه و سایر پارامترهای رشدی گیاه تحت تاثیر دور آبیاری قرار می گیرد و هرچه دور آبیاری کمتر باشد بهتر است. بویژه برای خاک‌های سبک دور آبیاری یک روز توصیه شد (Marathe et al,. 2018).

جامع‌ترین تحقیقات درزمینه استفاده ازدمای پوشش سبز گیاه در برنامه‌ریزی آبیاری توسط ایدسو و همکاران انجام شده است که مرجع تحقیقات بعدی قرارگرفته است (Idso, 1982; Idso et al., 1981). ایشان شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) را بر اساس خط مبنای پایینی (خط بی تنش) و بالایی (خط بیشترین تنش) معرفی نمودند. این خطوط رابطه تفاوت مقادیر دمای پوشش سبزگیاه و دمای هوا رابه کمبود فشار بخار هوا نشان می‌دهند. کلاوسون وبلاد اندازه‌گیری

دمای پوشش سبز گیاه را مناسب تر از اندازه‌گیری رطوبت خاک برای شروع عملیات آبیاری و نیزجهت کاهش مصرف آب دانستند (Clawson and Blad, 1982). سپاسخواه وکاشفی پوردر برنامه ریزی آبیاری درختان لیموشیرین جهرم، استفاده از دمای پوشش سبز گیاه را مناس بدانستند (Sepaskhah and Kashefipour, 1995). استیل و همکاران استفاده از چهار روش را برای برنامه‌ریزی آبیاری ذرت شامل تانسیومتر، بیلان آب، دمای پوشش گیاه و مدل Cerez-Maize مفید دانستند. با استفاده از این روش‌هاحدود ۳۰ ٪ در مصرف آب صرفه جویی گردید (Steele et al., 2000). لوبو و همکاران با اندازه گیری دمای پوشش گیاه بهترین زمان آبیاری لوبیا را تعیین نمودند و ۳۸ ٪ درمصرف آب صرفه جویی کردند (Lobo et al., 2004). کرمونا و همکاران اظهار داشتند که با توجه به این که اندازه‌گیری دمای پوشش گیاه زمان شروع آبیاری را نشان می‌دهد، برای تعیین مقدار آبیاری یا زمان اتمام آبیاری می‌توان آنرا به صورت ترکیبی باروش‌های دیگر بکار برد(Cremona et al., 2004). شاهرخ‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) در آبیاری گوجه فرنگی، شاهرخ‌نیا و کرمی (۱۳۹۶) در برنامه ریزی آبیاری انگور یاقوتی، و اردم وهمکاران در برنامه ریزی آبیاری هندوانه و لوبیا، از اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاه استفاده کرده و آنرا روش مناسبی دانستند (Erdem et al., 2005, 2006).

نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که انار گیاهی حساس به کم آبی بوده و مدیریت آبیاری تاثیر محسوسی بر عملکرد کمی و کیفی محصول آن دارد. استان فارس جایگاه نخست تولید انار در کشور را دارد و بررسی اثر تنش خشکی بر این محصول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اندازه‌گیری دمای پوشش گیاه، یکی از روش‌های مدیریت آبیاری و بررسی تنش خشکی بوده و در خصوص انار اطلاعات اندکی در این زمینه وجود دارد. بنابراین در این تحقیق به بررسی اثر کم آبی بر یک رقم معروف انار در استان فارس و تعیین خطوط تنش بالایی و پایینی برای آن پرداخته شده‌است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در یکی از باغات دارای درختان انار رقم رباب نی‌ریز در شهرستان کازرون استان فارس اجرا شد. متوسط دراز مدت دما، رطوبت هوا، تبخیر و بارندگی منطقه بترتیب ۲۳ درجه سانتی‌گراد، ۴۲ درصد، ۳۰۳۸ میلی‌متر و ۳۴۶ میلی‌متر می‌باشد. با در نظر گرفتن ضریب باران موثر ارائه شده توسط فائو (۰/۷۵)، میزان باران موثر متوسط منطقه حدود ۲۶۰ میلی‌متر برآورد می‌گردد. خاک باغ تحت آزمایش با دارا بودن ۴۴ درصد شن، ۴۰ درصد سیلت و ۱۶ درصد رس در کلاس بافتی متوسط (Loam) قرار می‌گیرد. مقدار جرم مخصوص ظاهری خاک، رطوبت ظرفیت مزرعه و رطوبت نقطه پژمردگی نیز با انجام آزمایش بترتیب ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ۱۹ و ۹ درصد وزنی به دست آمد. شوری آب و خاک باغ مورد بررسی بترتیب ۱/۳۱ و ۰/۵۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. کلیه درختان باغ تحت سیستم آبیاری قطره‌ای با چهار قطره‌چکان تنظیم‌شونده بودند که به صورت لوپ در اطراف درختان قرار داشتند. جهت انجام آزمایش درختانی یکنواخت و هم اندازه انتخاب گردیده و تیمارهای مختلف مدیریت آبیاری اعمال گردید. آبیاری در مقادیر مختلف تخلیه رطوبتی خاک از ۳۵٪ الی ۸۰٪ انجام شد. به این منظور رطوبت خاک قبل از آبیاری، با استفاده از دستگاه رطوبت سنج بلوک‌گچی ساخته شده توسط شرکت هلندی Eijkelkamp اندازه‌گیری گردید. بلوک‌های گچی در عمق حدود ۳۰ الی ۶۰ سانتی‌متری و در بین دو قطره چکان متوالی به فاصله تقریبی یک متر از تنه درخت نصب شدند. اندازه‌گیری رطوبت خاک در فواصل یک روز در میان انجام می‌شد و با رسیدن میزان تخلیه رطوبت خاک به مقادیر مورد نظر (۳۵، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد) در هر تیمار، نسبت به آبیاری درختان تا رسیدن به میزان رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (Field Capacity) اقدام می‌شد. میزان آب آبیاری درختان هر تیمار با کنتورهای حجمی واسنجی شده اندازه‌گیری و تحویل می‌شدند. تیمارهای آبیاری عبارت بودند از:

تیمار ۱- آبیاری در زمان تخلیه رطوبت خاک ۸۰ درصد، تیمار ۲- آبیاری در زمان تخلیه رطوبت خاک ۶۵ درصد، تیمار ۳- آبیاری در زمان تخلیه رطوبت خاک ۵۰ درصد، تیمار ۴- آبیاری در زمان تخلیه رطوبت خاک ۳۵ درصد، تیمار ۵- آبیاری با مدیریت معمول باغدار.

همزمان با اندازه‌گیری رطوبت خاک، در ساعت ۱۲ الی ۱۴، دمای پوشش گیاه بوسیله دماسنج مادون قرمز دستی انجام شد. دما و رطوبت هوا نیز به وسیله دماسنج لحظه‌ای هوا و دستگاه رطوبت‌سنج لحظه‌ای هوا اندازه‌گیری گردید. آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار اجرا و در هر تکرار ۲ عدد درخت هم اندازه قرار گرفت. برای اطمینان از مشابه بودن درختان انتخابی، اندازه‌گیری قطر و ارتفاع تاج درختان انجام شد.در طول دوره آزمایش عملیات نگهداری باغ شامل کوددهی، هرس، دفع علفهای هرز و آفات در زمان مناسب انجام شد. درختان باغ به سیستم آبیاری قطره‌ای مجهز بودند. راندمان سیستم آبیاری قطره‌ای نیز ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. در پایان فصل میزان محصول تولیدی هر درخت اندازه گیری و با تقسیم میزان محصول تولیدی به میزان آب آبیاری مصرفی، بهره‌وری آب آبیاری محاسبه گردید. آب مصرفی را به دو صورت آب مصرفی آبیاری و آب مصرفی کل می‌توان در نظر گرفت. آب مصرفی آبیاری مقدار آبی است که از طریق آبیاری به درختان داده شد و در آن میزان بارندگی لحاظ نگردید. آب مصرفی کل مجموع آب آبیاری و آب بارندگی موثر می باشد. با تقسیم میزان محصول به میزان آب مصرفی کل، بهره‌وری آب کل به دست آمد. به منظور تجزیه و تحلیل‌های آماری، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن و

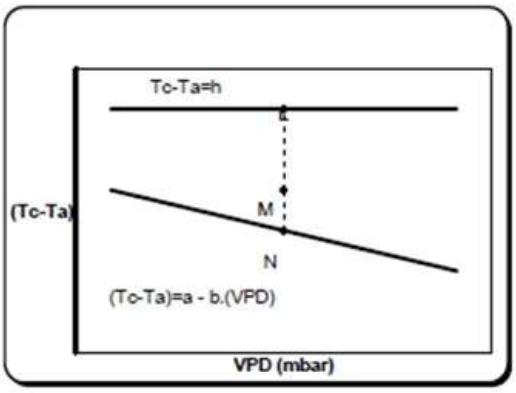
نرم‌افزار SAS انجام شد.

شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) را بر اساس خط مبنای پایینی (خط بی‌تنش) و بالایی (خط بیش‌ترین تنش) معرفی شده است (Idso, 1982). این خطوط مبنای پایینی و بالایی، رابطه تفاوت مقادیر دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوا را به کمبود فشار بخار هوا نشان می‌دهند (شکل ۱). در این شکل Tc و Ta بترتیب دمای پوشش سبز گیاه و دمای هوا و vpd کمبود فشار بخار هوا می‌باشد. اندیس‌های ul , ll نشان دهنده خطوط مبنای پایینی و بالایی می‌باشد. بدین ترتیب شاخص تنش آبی را به صورت رابطه ۱ می‌توان بیان نمود.

$$CWSI = \frac{MN}{LN} = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{ll}}{(T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_{ll}} \quad (۱)$$

با توجه به شکل (۱) مشاهده می‌گردد که در یک روز خاص با یک کمبود فشار بخار (vpd) خاص، هر چه میزان تنش آبی بیش‌تر شود، تفاوت دمای گیاه و دمای هوا افزایش یافته، نقطه M به سمت بالا حرکت کرده و مقدار شاخص تنش آبی (CWSI) با توجه به رابطه (۱) افزایش می‌یابد. در این تحقیق برای هر یک از تیمارها، نقاط اندازه‌گیری شده تفاوت دمای گیاه و هوا (Tc-Ta) در مقابل کمبود فشار بخار (vpd) ترسیم و خطوط تنش بر اساس تعریف ایدسو به آنها برازش شد. به منظور تعیین معادله خط تنش بالایی به دو روش عمل شد. در روش اول از برون‌یابی خطوط تنش بدست آمده قبلی استفاده گردید. در روش دوم از روش ترسیمی ایدسو استفاده شد. اساس روش ترسیمی بر این اصل استوار است که وقتی هوا از بخار آب اشباع می‌شود، میزان تعرق گیاه نیز کم می‌شود ولی به صفر نمی‌رسد. بلکه به دلیل شیب فشار بخار بین پوشش گیاهی و هوا (AVPG) عمل تعرق ادامه خواهد داشت. بنابراین وقتی مقدار (Tc-Ta) بیشتر از مقدار عرض از مبدا خط مبنای پایینی شود، تعرق گیاه متوقف می‌شود. با قرار دادن مقدار AVPG در فرمول خط تنش پایینی، معادله خط مبنای تنش بالایی که به صورت خطی کاملا افقی می‌باشد به دست می‌آید. در رابطه ۲، e_c^* فشار بخار اشباع در درجه حرارت گیاه، و e_a^* فشار بخار اشباع در درجه حرارت هوا می‌باشد.

$$AVPG = e_c^* - e_a^* \quad (۲)$$



شکل ۱- موقعیت خط تنش بالایی و پایینی به روش ایدسو (۱۹۸۲)

ارزیابی اقتصادی

به منظور انتخاب سودمندترین تیمار از لحاظ اقتصادی منافع و هزینه‌های حاصل از یک هکتار انار برآورد گردید. منافع از حاصل‌ضرب قیمت در عملکرد محاسبه شد. در این رابطه قیمت هر کیلوگرم انار سالم (تحویل در باغ) ۳۵۰۰ تومان و برای هرکیلوگرم انار دانه سفید یا انار با کیفیت پایین ۱۰۰۰ تومان در نظر گرفته شد. در مورد هزینه‌ها تنها هزینه میزان آب مصرفی در تیمارهای مورد بررسی متفاوت بود. جهت برآورد هزینه آب، قیمت سایه‌ای هر متر مکعب آب براساس هزینه اجاره آب در منطقه (به ازای هر متر مکعب آب ۲۷۷۸ تومان) منظور گردید.

نتایج و بحث

نتایج سال اول

جدول ۱ نتایج تجزیه واریانس داده‌ها و جدول ۲ مقادیر آب آبیاری اعمال شده، میزان عملکرد و بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف در سال اول آزمایش را نشان می‌دهد. جدول ۱ نشان می‌دهد که اثر تیمارهای آزمایش بر میزان محصول و بهره‌وری آب در سطح ۱٪ معنی‌دار بوده است. طبق جدول ۲ بیشترین میزان عملکرد مربوط به تیمار ۵ (تحت مدیریت باغدار) با ۳۵۲۹۳ کیلوگرم در هکتار بود که با کاهش میزان آب آبیاری، میزان عملکرد نیز به تدریج کاهش و به کمترین مقدار خود در تیمار ۱ (۲۰۵۲۰ کیلوگرم در هکتار) رسید.

میزان کاهش محصول در تیمارهای مختلف کم آبی از ۲۲ درصد در تیمار ۴ تا ۴۲ درصد در تیمار ۱ متغیر بود. بیشترین میزان آب آبیاری مربوط به تیمار ۵ (تحت مدیریت باغدار) با ۱۶۶۱۴ مترمکعب در هکتار بود. کمترین میزان آب آبیاری مربوط به تیمار ۱ (آبیاری در تخلیه رطوبتی ۸۰ درصد) با ۴۸۴۸ متر مکعب در هکتار بود که تقریبا ۷۱ درصد کمتر از تیمار ۵ بود. با کاهش ۷۱ درصدی در میزان آب آبیاری نسبت به تیمار تحت مدیریت باغدار، حدود ۴۲ درصد کاهش در میزان محصول مشاهده گردید. کاهش محصول با ۵۰ درصد کاهش مصرف آب (تیمار ۴)، ۲۲ درصد بود. بنابراین میزان کاهش محصول کمتر از نصف میزان کاهش آب آبیاری بوده است. بررسی مقادیر بهره‌وری آب آبیاری این موضوع را روشن‌تر می‌کند. مقادیر بهره‌وری آب آبیاری محاسبه شده در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین میزان بهره‌وری آب آبیاری به ترتیب مربوط به تیمارهای ۱ و ۵ برابر با ۴/۲۳ و ۲/۱۲ کیلوگرم بر متر مکعب بود. میزان آب مصرفی کل که جمع آب آبیاری و بارش موثر می‌باشد با در نظر گرفتن بارندگی موثر ۲۸۶ میلی‌متر، در تیمارهای مختلف از ۷۷۰۷ تا ۱۹۴۷۳ متر مکعب در هکتار متغیر بود. میزان بهره‌وری مصرف آب کل نیز در تیمارهای ۱ تا ۵ بترتیب از ۲/۶۶ تا ۱/۸۱ به دست آمد.

جدول ۱- تجزیه واریانس داده های سال اول

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		عملکرد	بهره‌وری آب آبیاری
تکرار	۲	۲۴/۳۱۴^{ns}	۰/۱۰۸^{ns}
تیمارهای آزمایشی	۴	۵۹۲/۴۸**	۲/۰۸۹**
خطای آزمایش	۸	۸/۴۰۴	۰/۰۲۴
کل	۱۴	۶۲۵/۱۹۷	۲/۲۲۱
ضریب تغییرات (C.V.)		٪۴/۴۰	٪۴/۵۰

جدول ۲- میزان عملکرد، بهره وری و آب آبیاری مصرفی در سال اول

تیمار	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	کاهش محصول نسبت به تیمار ۵ (٪)	آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)	آب مصرفی کل (مترمکعب در هکتار)	کاهش مصرف آب آبیاری نسبت به تیمار ۵ (٪)	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)	بهره‌وری آب کل (کیلوگرم بر مترمکعب)
تیمار ۱	۲۰۵۲۰ d	۴۲	۴۸۴۸	۷۷۰۷	۷۱	۴/۲۳ a	۲/۶۶
تیمار ۲	۲۳۰۸۰ c	۳۵	۵۶۷۳	۸۵۳۲	۶۶	۴/۰۷ a	۲/۷۱
تیمار ۳	۲۵۵۷۳ bc	۲۸	۷۳۹۸	۱۰۲۵۷	۵۵	۳/۴۶ b	۲/۴۹
تیمار ۴	۲۷۴۱۳ b	۲۲	۸۳۵۹	۱۱۲۱۸	۵۰	۳/۲۸ b	۲/۴۴
تیمار ۵	۳۵۲۹۳ a	۰	۱۶۶۱۴	۱۹۴۷۳	۰	۲/۱۲ c	۱/۸۱

نتایج سال دوم

نتایج سال دوم آزمایش در جداول ۳ و۴ آورده شده است. مشاهده می‌گردد که نتایج کلی به دست آمده در سال دوم آزمایش تقریبا شبیه به نتایج سال اول آزمایش می‌باشد. در سال دوم بیشترین و کمترین میزان بهره‌وری آب آبیاری به ترتیب مربوط به تیمار ۱ و ۵ با ۴/۶۵ و ۱/۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب بود. میزان آب آبیاری تیمارهای مختلف از ۴۶۱۹ تا ۱۸۱۵۹ متر مکعب در هکتار متغیر بود. حداکثر میزان کاهش مصرف آب آبیاری و کاهش محصول نسبت به تیمار تحت مدیریت باغدار بترتیب ۷۵ و ۴۰ درصد بود. مقادیر آب مصرفی کل با لحاظ نمودن ۱۵۳ میلی‌متر بارش موثر از ۶۱۴۷ تا ۱۹۶۸۷ متر مکعب در هکتار در تیمارهای ۱ تا ۵ متغیر بود. مقایسه مقادیر آب مصرفی در دو سال آزمایش نشان می‌دهد که میزان آب مصرفی کلیه تیمارها در سال اول بیشتر از سال دوم بوده است. بررسی داده‌های هواشناسی این دو سال نشان داد که در سال اول میزان تبخیر، متوسط دما و ساعات آفتابی بیشتر از سال دوم بوده که بدین معنی است که در سال اول نیاز آبی گیاه بیشتر بوده است.

میانگین نتایج دو سال آزمایش

نتایج تجزیه واریانس مرکب و میانگین عملکرد، بهره‌وری آب مصرفی کل و آب آبیاری مصرفی در دو سال آزمایش در جداول ۵ و ۶ آورده شده‌است. جدول ۵ نشان می‌دهد که اثر سال و اثر متقابل سال و تیمار بر میزان عملکرد و بهره‌وری آب در سطح ۵٪ معنی‌دار نبوده است. اما اثر تیمارهای آزمایش بر میزان عملکرد و بهره‌وری آب در سطح ۱٪ معنی‌دار بوده است.

جدول ۳- تجزیه واریانس داده های سال دوم

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		عملکرد	بهره وری آب آبیاری
تکرار	۲	۲۷/۰۱۸ ns	۰/۱۲۵ ns
تیمارهای آزمایشی	۴	۵۷۲/۴۵ **	۲/۹۲۹ **
خطای آزمایش	۸	۲۱/۲۱۵	۰/۰۴۷
کل	۱۴	۶۲۰/۶۸۵	۳/۱۰۱
ضریب تغییرات (C.V.)		٪۶/۷۴	٪۶/۱۳

جدول ٤- میزان عملکرد، بهره‌وری و آب آبیاری مصرفی در سال دوم

تیمار	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	کاهش محصول نسبت به شاهد (٪)	آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)	آب مصرفی کل (مترمکعب در هکتار)	کاهش مصرف آب آبیاری نسبت به شاهد (٪)	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)	بهره‌وری آب کل (کیلوگرم بر مترمکعب)
تیمار ۱	۲۱۴۹۳ d	۴۰	۴۶۱۹	۶۱۴۷	۷۵	۴/۶۵ a	۳/۵۰
تیمار ۲	۲۳۹۷۳ c	۳۳	۵۹۶۸	۷۴۹۶	۶۷	۴/۰۲ b	۳/۲۰
تیمار ۳	۲۶۵۸۷ bc	۲۶	۷۵۳۶	۹۰۶۴	۵۹	۳/۵۳ c	۲/۹۳
تیمار ۴	۲۸۶۵۳ b	۲۰	۸۲۷۷	۹۸۰۵	۵۴	۳/۴۶ c	۲/۹۲
تیمار ۵	۳۵۹۳۳ a	۰	۱۸۱۵۹	۱۹۶۸۷	۰	۱/۹۸ d	۱/۸۳

نتایج بررسی میزان عملکرد نشان می‌دهد که تفاوت عملکرد تیمار ۱ با تیمار ۲، تیمار ۲ با تیمار ۳ و تیمار ۳ با تیمار ۴ از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیست. اما تفاوت عملکرد تیمارهای ۱ ، ۳ و۵ باهم معنی‌دار می‌باشد. در مورد بهره‌وری آب، بجز تیمار۳و۴، تفاوت سایر تیمارها با یکدیگر معنی‌دار می‌باشد. بیشترین و کمترین بهره‌وری آب آبیاری بترتیب مربوط به تیمارهای ۱ و ۵ با ۴/۴۴ و ۲/۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب بود. می‌توان گفت که در دو سال آزمایش با ۷۳ درصدکاهش میزان آب آبیاری، میزان محصول ۴۱ درصد کاهش یافته است. میزان آب مصرفی کل در تیمار ۱ تا ۵ از ۶۹۲۷ تا ۱۹۵۸۰ متر مکعب در هکتار تغییر کرد. بهره‌وری مصرف آب کل نیز در تیمار تحت مدیریت باغدار ۱/۸۲ و در تیمارهای ۱ تا ۴ از ۳/۰۸ تا ۲/۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود. به طور کلی می‌توان گفت با افزایش آب آبیاری یا آب مصرفی کل، میزان محصول افزایش و بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کل کاهش قابل توجهی یافت. میزان کاهش مصرف آب در اثر مدیریت آبیاری در این تحقیق با نتایج چوپاد (۲۰۰۱) همخوانی دارد. همچنین میزان آب مصرفی انار با نتایج هولاند و همکاران (۲۰۰۹)، دینک و همکاران (۲۰۱۸)، آیارس و همکاران (۲۰۱۷)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)، و راد و همکاران (۱۳۹۴) همخوانی دارد. مقادیر بهره‌وری آب به دست آمده در این بررسی با نتایج به دست آمده توسط طاوسی و همکاران (۱۳۹۵)، کومار و همکاران (۲۰۱۲)، اینتریگلیولو و همکاران (۲۰۱۳)، پرویزی و همکاران (۲۰۱۴و ۲۰۱۶)، سلاح ورزی و همکاران (۲۰۱۷) همخوان است.

جدول ۵- تجزیه واریانس مرکب داده های آزمایشی

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		عملکرد	بهره وری آب آبیاری
سال	۱	۴۲/۴۸۳ ns	۰/۰۶۹ ns
خطای آزمایش	۴	۲۶/۰۶۵	۰/۱۱۷
تیمارهای آزمایشی	۴	۱۱۶۲/۳ **	۴/۹۴۶ **
اثرمتقابل سال × تیمار	۴	۰/۴۴۰ ns	۰/۰۷۲ ns
خطای آزمایش	۱۶	۱۴/۸۹۶	۰/۰۳۵
کل	۲۹	۱۲۴۶/۱۸	۵/۲۳۹
ضریب تغییرات (C.V.)		٪۵/۷۵	٪۵/۴۰

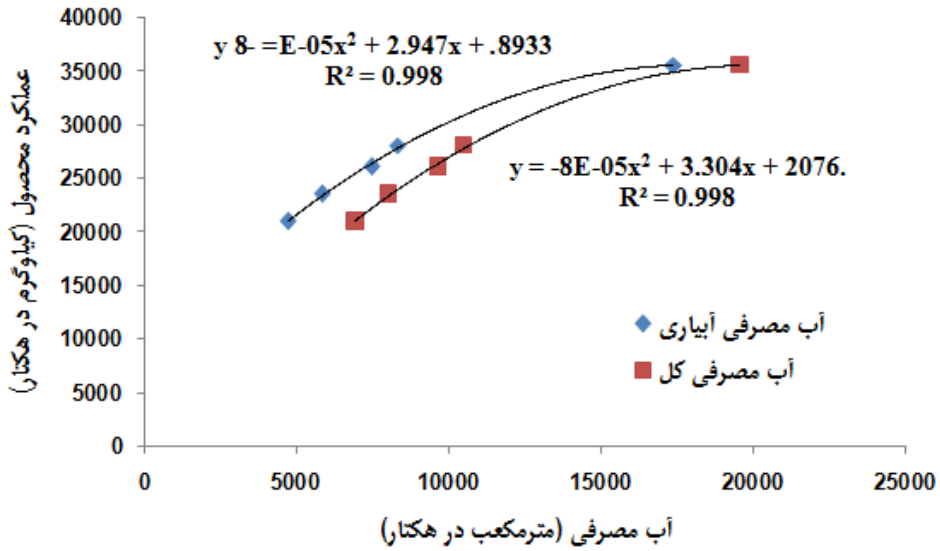
جدول ٦- میانگین عملکرد، بهره وری و آب آبیاری مصرفی در دو سال

تیمار	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	کاهش محصول نسبت به شاهد (٪)	آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)	آب مصرفی کل (مترمکعب در هکتار)	کاهش مصرف آب نسبت به شاهد (٪)	بهره‌وری آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب)	بهره‌وری آب کل (کیلوگرم بر مترمکعب)
تیمار ۱	۲۱۰۰۷ d	۴۱	۴۷۳۳	۶۹۲۷	۷۳	۴/۴۴ a	۳/۰۸
تیمار ۲	۲۳۵۲۷ cd	۳۴	۵۸۲۰	۸۰۱۴	۶۷	۴/۰۴ b	۲/۹۵
تیمار ۳	۲۶۰۸۰ bc	۲۷	۷۴۶۷	۹۶۶۰	۵۷	۳/۴۹ c	۲/۷۱
تیمار ۴	۲۸۰۳۳ b	۲۱	۸۳۱۸	۱۰۵۱۱	۵۲	۳/۳۷ c	۲/۶۸
تیمار ۵	۳۵۶۱۳ a	۰	۱۷۳۸۷	۱۹۵۸۰	۰	۲/۰۵ d	۱/۸۲

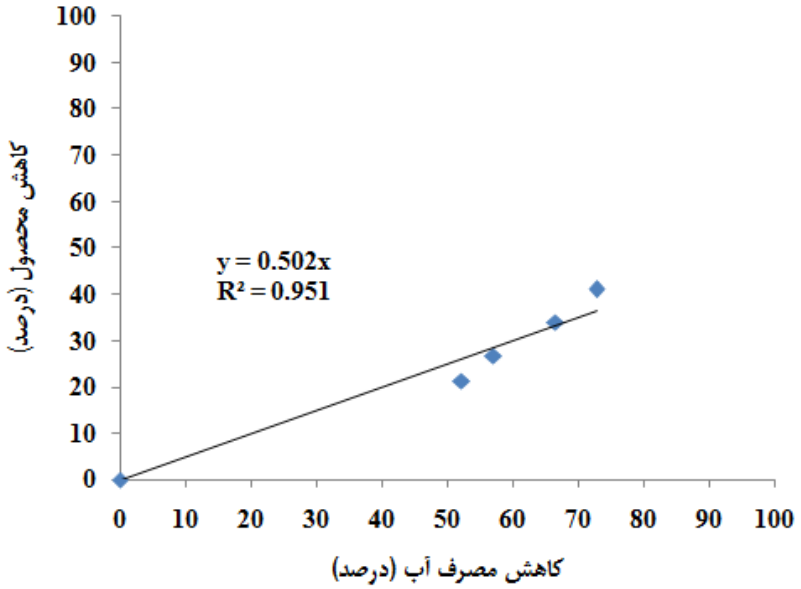
*در هر ستون تیمارها در سطح ۵ درصد با استفاده از آزمون دانکن معنی‌دار بودند

شکل ۲ رابطه بین میزان عملکرد محصول و آب مصرفی را نشان می‌دهد. در گیاهان زراعی و باغی با افزایش میزان آب کل دریافتی تا یک حد مشخص، افزایش محصول و پس از این حد گیاه دچار کاهش محصول می‌شود. این حد برای گیاهان مختلف متفاوت است. رابطه برازش شده به این داده‌ها نشان می‌دهد که حداکثر میزان محصول تولیدی در آب آبیاری ۱۸۴۲۰ یا آب کل ۲۰۶۵۰ متر مکعب در هکتار بوده و پس از آن با افزایش میزان آب مصرفی، عملکرد کاهش یافته است. جدول ۶ نشان می‌دهد میزان آب مصرفی کل و آبیاری تیمار ۵ بترتیب با مقادیر ۱۷۳۸۷ و ۱۹۵۸۰ متر مکعب در هکتار تقریبا نزدیک به این دو مقدار می‌باشد. شکل ۳ رابطه درصد کاهش محصول به درصد کاهش آب آبیاری را نشان می‌دهد. این رابطه که برای پیش‌بینی میزان محصول در اثر کاهش مصرف آب مفید است، نشان می‌دهد که با کاهش میزان آب آبیاری، میزان کاهش محصول حدودا نصف خواهد بود. بعنوان مثال اگر باغدار ۳۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی نماید و میزان آب مصرفی را از ۱۷۳۸۷ به ۱۲۱۷۰ برساند، میزان محصول ۱۵ درصد کاهش یافته و از ۳۵/۶ تن در هکتار به حدود ۳۰/۳ تن در هکتار می‌رسد.

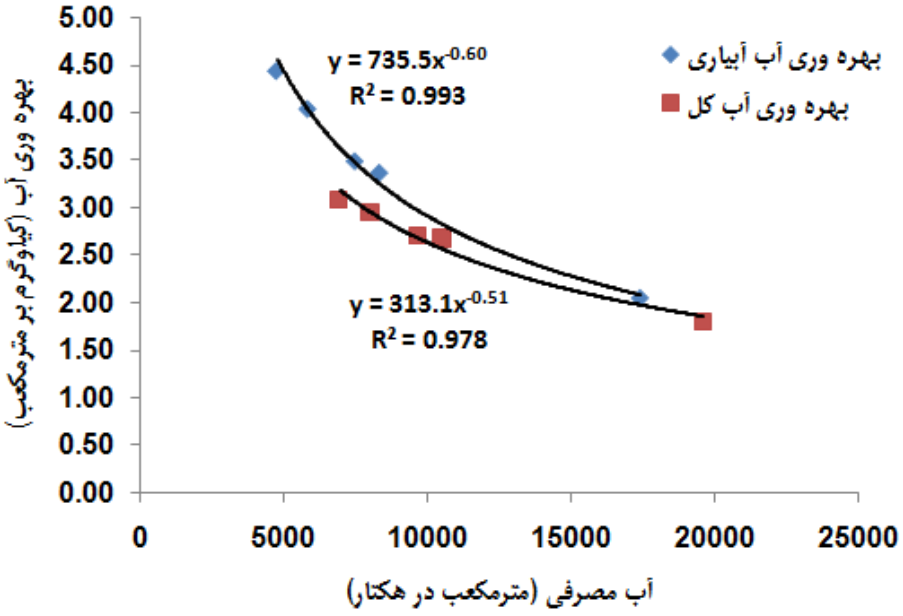
شکل ۴ رابطه بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کل نسبت به آب مصرفی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش میزان آب مصرفی، بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کل با رابطه‌ای توانی کاهش یافته و به حدود اعداد ۲ و ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب رسیده است. شکل ۵ رابطه درصد کاهش محصول تیمارهای مختلف نسبت به شاهد با میزان آب مصرفی آبیاری و آب مصرفی کل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش آب مصرفی، میزان کاهش محصول نسبت به شاهد به صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. بنابراین در شرایطی که میزان آب مصرفی توسط باغدار بیشتر از حد مورد نیاز است، با کاهش مقدار قابل توجهی آب، کاهش محصول کم خواهد بود.



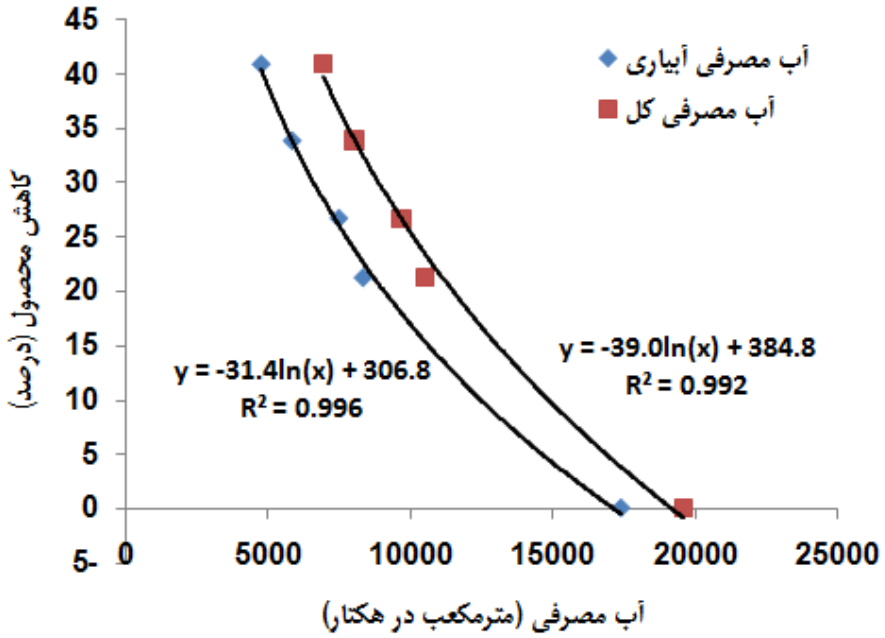
شکل ۲- رابطه عملکرد محصول انار رقم رباب با مقدار آب مصرفی آبیاری و آب مصرفی کل



شکل ۳- رابطه درصد کاهش محصول انار رقم رباب به درصد کاهش آب آبیاری در آزمایش حاضر



شکل ٤- تغییرات بهره‌وری آب نسبت به آب مصرفی درختان انار رقم رباب



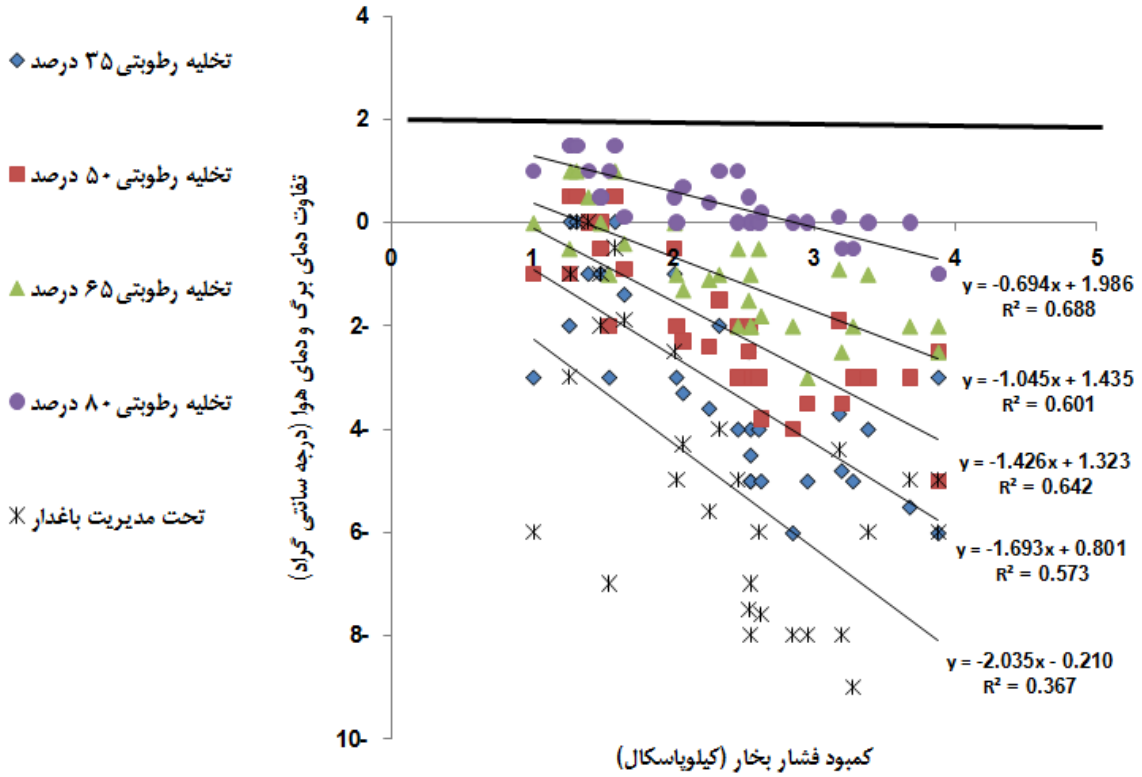
شکل ۵- رابطه کاهش محصول درختان انار رقم رباب با میزان آب مصرفی

شکل ۶ رابطه تفاوت دمای برگ گیاه و هوا (Tc-Ta) با کمبود فشار بخار (vpd) را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. طبق روشی که توسط ایدسو (۱۹۸۲) ارائه گردیده، با داشتن خط مبنای تنش پایینی (Lower stress baseline) و خط مبنای تنش بالایی (Upper stress baseline) می‌توان زمان شروع آبیاری را از طریق اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاه به وسیله دماسنج مادون قرمز دستی تعیین نمود. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، تحقیقات قبلی (طاوسی و همکاران، ۲۰۱۵ و بوگونو و همکاران، ۲۰۱۶)، و توصیه‌های فائو، می‌توان تخلیه رطوبتی ۳۵ درصد را بعنوان شروع تنش آبی و خط مربوطه را بعنوان خط مبنای تنش پایینی برای درخت انار رقم رباب نی‌ریز در نظر گرفت. برای استخراج خط مبنای تنش بالایی لازم بود تیماری با تنش آبی حداکثر (تخلیه رطوبتی ۱۰۰ درصد یا بدون آبیاری) به تحقیق اضافه شود، که این امر به دلیل احتمال آسیب جدی به درختان باغ امکان‌پذیر نبود. اما با استفاده از دو روش مختلف، خط مبنای تنش بالایی استخراج گردید. با استفاده از برون یابی سایر خطوط، خط مبنای تنش بالایی که خطی راست و کاملا افقی است برای تخلیه رطوبتی ۱۰۰ درصد به دست آمد (y=2.18). با استفاده از روش گرافیکی ارائه شده توسط ایدسو، معادله خط مبنای تنش بالایی به شکل (y=1.98) به دست آمد. بنابراین می‌توان با تقریب، خط (y=2.0) را بعنوان خط مبنای تنش بالایی در نظر گرفت. با توجه به اینکه در تحقیقات قبلی داخل و خارج کشور خطوط تنش پایینی و بالایی برای درختان انار ارائه نگردیده است، تا زمان ارائه روابط مناسب برای سایر ارقام انار، می توان از روابط ارائه شده در این تحقیق برای سایر ارقام انار نیز استفاده نمود.

جدول ۷ نتایج تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی را در باغ مورد آزمایش نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر سود خالص، اقتصادی‌ترین تیمار، تیمار ۴ (تخلیه رطوبتی ۳۵٪) و پس از آن تیمار ۲ (تخلیه رطوبتی ۶۵٪) می‌باشد. تیمار ۳ (تخلیه رطوبتی ۵۰٪) و تیمار ۵ (تحت مدیریت باغدار) از نظر اقتصادی تقریبا نزدیک به هم می‌باشند. غیر اقتصادی‌ترین تیمار، تیمار ۱ (تخلیه رطوبتی ۸۰٪) می‌باشد. بنابراین اگرچه تیمار تخلیه رطوبتی ۸۰ درصد بیشترین میزان بهره‌وری آب را داشت، اما چون از نظر اقتصادی قابل توجیه نیست، مورد قبول باغداران نیز قرار نخواهد گرفت. بنابراین به نظر می‌رسد بهترین تیمار مدیریت آبیاری در این تحقیق با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی، صرفه‌جویی در میزان آب و کمترین تنش آبی وارده به گیاه تیمار آبیاری در تخلیه رطوبتی ۳۵ درصد (تیمار ۴) باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که مقدار آب داده شده به درختان انار رقم رباب نی‌ریز تاثیر معنی‌داری بر میزان محصول تولیدی دارد به گونه‌ای که حداکثر میزان محصول تولیدی در میزان آب کل (آب آبیاری + باران موثر) ۲۰۶۵۰ متر مکعب در هکتار و به میزان حدود ۳۶ تن در هکتار مشاهده شد. با کاهش میزان آب مصرفی از این حد، میزان محصول نیز کاهش یافت که میزان کاهش محصول حدود نصف میزان کاهش مصرف آب بود.



شکل ٦- رابطه تفاوت دمای برگ و هوا با کمبود فشار بخار در تیمارهای مختلف آبیاری درختان انار رقم رباب

جدول ۷- هزینه و منافع محاسبه شده بر اساس نتایج آزمایش برای یک هکتار باغ انار

تیمار	درآمد ناخالص (میلیون ریال در هکتار)	کل هزینه سالانه (میلیون ریال در هکتار)	سود خالص (میلیون ریال در هکتار)	رتبه بندی اقتصادی
تیمار ۵	۹۵۰	۸۹۱	۵۹	۳
تیمار ۴	۸۱۸	۶۳۹	۱۷۹	۱
تیمار ۳	۶۷۳	۶۱۶	۵۷	۴
تیمار ۲	۶۴۷	۵۷۰	۷۷	۲
تیمار ۱	۴۲۰	۵۴۰	-۱۲۰	۵

بنابراین موضوع برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری در باغات انار موضوع مهمی است که بایستی مدنظر قرار گیرد. تجزیه و تحلیل های اقتصادی نشان داد که تیمار آبیاری در تخلیه رطوبتی ۳۵٪ بیشترین میزان سود خالص را در بر داشته و طبق نتایج تحقیقات گذشته این تیمار می‌تواند بعنوان تیمار شروع تنش آبی در انار در نظر گرفته شود. با استفاده از نتایج این تحقیق، اندازه‌گیری دمای پوشش سبز گیاه و روش ایدسو، خطوط تنش مبنای بالایی و پایینی برای درخت انار به دست آمد که از روابط این خطوط می‌توان برای مدیریت آبیاری باغات انار رقم رباب نی‌ریز در منطقه استفاده کرد. با توجه به عدم یافت معادلات مشابه برای درختان انار در کشور و دنیا، می‌توان از این روابط، با دقت کمتر در سایر نقاط و سایر رقم ها نیز بهره جست که انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه پیشنهاد می‌شود.

منابع

احمدی، ک.، عبادزاده،ح.ر.، حاتمی، ف.، حسین‌پور، ر.، و عبدشاه، ه. ۱۳۹۷. آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۶، جلد سوم: محصولات باغبانی، وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکزفناوری اطلاعات و ارتباطات.

راد، م.ه.، اصغری، م.ر.، و عصاره، م.ح. ۱۳۹۴. اثر تنش خشکی بر

رشد، عملکرد و کیفیت میوه انار (*Punica granatum* L.) رقم رباب نی ریز در شرایط اقلیمی خشک. مجله به زراعی نهال و بذر، ۳۱ (۱): ۷۵-۹۰.

شاهرخ نیا، م.ع.، و کرمی، م.ج. ۱۳۹۶. بررسی اثر مقادیر مختلف آب آبیاری بر عملکرد انگور یاقوتی. مجله مهندسی آبیاری و آب، ۲۸: ۱۰۸-۱۲۲.

شاهرخ نیا، م.ع.، جوکار، ل. و رخشنده رو، م. ۱۳۹۵. بررسی تنش آبی با استفاده از شاخص‌های دمای برگ و رطوبت خاک بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گوجه فرنگی نشایی. مجله مهندسی آبیاری و آب، ۲۶: ۹۷-۱۱۱.

طاوسی، م.، کاوه، ف.، علیزاده، ا.، بابازاده، ح.، و تهرانی فر، ع. ۱۳۹۵. اثر کم آبیاری و شوری بر میوه انار رقم شیشه کپ (مطالعه موردی شهرستان فردوس، خراسان جنوبی). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۰(۴): ۴۹۹-۵۰۷.

کاوند، م.، ارزانی، ک.، برزگر، م.، و میرلطیفی، م. ۱۳۹۶. تاثیر سایبان، محلول پاشی کائولین، تنک میوه و آبیاری تکمیلی بر کاهش عارضه سفیدشدگی آریل انار رقم ملس ترش ساوه. مجله به زراعی نهال و بذر، ۳۳(۱): ۸۵-۱۱۲.

Ayars, J.E., Phene, C.J., Phene, R.C., Gao, S., Wang, D., Day, K.R., and Makus, D.J. 2017. Determining pomegranate water and nitrogen requirements with drip irrigation. Agricultural Water Management 187: 11-23.

Bugueño, F., Livellara, N., Varas, F., Undurraga, P., Castro, M., and Salgado, E. 2016.Responses of young *Punica granatum* plants under four different water regimes. Ciencia e Investigacion. Agraria 43(1): 49-56.

Chopade, S.Q., Gorantiwar, S.D., Pampattiwar, P.S., and Supe, V.S. 2001.Response of pomegranate to drip, bubbler and surface irrigation methods. Advances in Horticulture and Forestry 8: 53–59.

Clawson, K.L., and Blad, B.L. 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. Agronomy Journal 74: 311-316.

Cremona, M.V., Stutzler, H. and Kage, H. 2004. Irrigation scheduling of Kohlrabi using crop water stress index. Horticultural Science 39(2): 276-279.

Dinc, N., Aydinsakir, K., Isik, M., Bastug, R., Ari, N., Sahin, A., and Buyuktas, D. 2018. Assessment of different irrigation strategies on yield and quality characteristics of drip irrigated pomegranate under Mediterranean conditions. Irrigation Science 36: 87–96.

Erdem, Y., Sehirali, S., Erdem, T., and Kenar, D. 2006. Determination of crop water stress index for irrigation scheduling of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Turkish Journal of Agriculture and Forestry 30:195-202.

Erdem, Y., Erdem, T., Orta, H., and Okursoy, H. 2005. Irrigation scheduling for watermelon with crop water stress index (CWSI). Journal of Central European Agriculture 6: 449-460.

Holland, D., Hatib, K., and Bar-Yáakov, I. 2009. Pomegranate: botany, horticulture, breeding. In: Horticultural Reviews, Janick, J. (ed.), 35, Wiley-BlackWell Publication.

Idso, S.B. 1982. Non-water stressed base line: A key to measuring and interpreting plant water stress. Agricultural Meteorology 27: 59-70.

Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J. and Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree day parameter for environmental variability, Agricultural Meteorology 24: 45-55.

Intrigliolo, D.S., Bonet, L., Nortes, P.A., Puerto, H., Nicolas, E., and Bartual, J. 2013. Pomegranate trees performance under sustained and regulated deficit irrigation. Irrigation Science 31: 959-970.

Kumar, S., Singh, R., Asrey, R., and Nangare, D.D. 2012.Techno-economic evaluation of integrating canal water harvesting and drip irrigation for pomegranate production in a dry eco-region. Irrigation and Drainage 61(3): 366-374.

Laribi, A.I., Palou, L., Intrigliolo, D.S., Nortes, P.A., Rojas-Argudo, C., Taberner, V., Bartual, J., and Perez-Gago, M.B. 2013.Effect of sustained and regulated deficit irrigation on fruit quality of pomegranate cv. 'Mollar de Elche' at harvest and during cold storage. Agricultural Water Management 125: 61-70.

Lobo, F.A., Oliva, M.A., Resende, M., Lopes, N.F., and Maestri, M. 2004.Infrared thermometry to schedule irrigation of common bean. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 39: 113-121.

Marathe, R.A., Babu, K.D., and Chaudhari, D.T. 2018. Nutrient uptake, growth and yield of pomegranate as influenced by irrigation frequencies under light textured soils. Journal of Environmental Biology 39: 143-148.

Mena, P., Galindo, A., Collado-Gonzalez, J., Ondona, S., Garcia-Viguera, C., Ferreres, F., Torecillas, A., and Gil-Izquierdo, A. 2013. Sustained deficit irrigation affects the colour and phytochemical characteristics of pomegranate juice. Journal of the Science of Food and Agriculture 93: 1922-1927.

Parvizi, H., Sepaskhah, A.R., and Ahmadi, S.H. 2016. Physiological and growth responses of pomegranate tree (*Punica granatum* L. cv. Rabab) under partial root zone drying and deficit irrigation regimes. Agricultural Water Management 163:146-158.

Parvizi, H., Sepaskhah, A.R., and Ahmadi, S.H. 2014.Effect of drip irrigation and fertilizer regimes on fruit yields and water productivity of a pomegranate (*Punica granatum* L. cv. Rabab) orchard. Agricultural Water Management 146: 45-56.

Selahvarzi, Y., Zamani, Z., Fatahi, R., and Talaei, A.R. 2017. Effect of deficit irrigation on flowering and fruit properties of pomegranate (*Punica granatum* cv. Shahvar). Agricultural Water Management 192: 189-197.

Sepaskhah, A.R., and Kashefipour, S.M. 1995. Evapotranspiration and crop coefficient of sweet lime under drip irrigation. Agricultural Water Management 27: 331-340.

Steele, D.D., Stegman, E.C., and Knighton, R.E. 2000. Irrigation management for corn in the northern Great Plains, USA. Irrigation Science 19(3): 107-114.

Tavousi, M., Kaveh, F., Alizadeh, A., Babazadeh, H., and Tehranifar, A. 2015.Effects of drought and salinity on yield and water use efficiency in pomegranate tree. Journal of Materials and Environmental Science 6(7): 1975-1980.

Zhang, H., Wang, D., Ayars, J.E., and Phene, C.J. 2017. Biophysical response of young pomegranate trees to surface and sub-surface drip irrigation and deficit irrigation. Irrigation Science 35: 425-435.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2175-2187

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۱۸۷-۲۱۷۵

Influence of Different Irrigation Management on Rabab-Neyriz Pomegranate Cultivarin Kazerun City of Fars Province

M.A. Shahrokhnia[1]*, A. Bonyanpur[2], D. Mohammadi[3]
Recived: Jul.17, 2020 Accepted: Oct.25, 2020

Abstract

Although pomegranate is one of the major horticultural products in Iran, little research has been done on its irrigation management. In order to investigate the effect of irrigation management on the yield and productivity of 'Rabab-Neyriz' pomegranate trees, an experiment was conducted in one of the pomegranate orchards of Kazerun city in Fars province. Experimental treatments included irrigation at different amounts of available soil moisture depletion at 35, 50, 65 and 80%. A treatment that was completely irrigated by the orchard ownerwas also considered as control. The experiment was performed in a randomized complete block designwith three replications. Soil moisture was measured in different treatments with gypsum block moisture meter. After the soil moisture reached the desired limits, the required amount of irrigation was applied to bring the soil moisture to the field capacity. The orchard was equipped with drip irrigation system and the amount of irrigation water was measured by calibrated flow meters. The experiment was performed for two years and the amount of water used, the yield and water productivity in different treatments were estimated and evaluated by comparing the average values. By measuring the temperature of plant canopy and other required meteorological parameters, the upper and lower stress baselines were extracted by Idso method. Economic analysis was also performed by estimating cost and revenue. The results showed that with the increase of the total water to 19580 cubic meters per hectare (control), the amount of crop yield also increased to 36 tons per hectare, while at soil moisture depletion of 35% the total used water was 10511 cubic meter and the yield was 28 tons per hectare. The total water productivity in different treatments varied from 1.82 to 3.08 kg / m^3, which decreased with increasing the applied water. Differences in water productivity and yield between the 35 and 50% moisture depletion treatments were not statistically significant. Economically, the best treatment for irrigation was the 35% moisture depletion that according to the previous studies, it can be considered as the beginning of water stress in the pomegranate tree. The lower and upper stress baselines obtained in this study, which has not been reported in previous studies, can be used as a tool to manage the irrigation of pomegranate trees in the study area and other similar regions. Therefore, in general, the best treatment of experiment was irrigation at 35% soil moisture depletion. In low water areas up to 50% soil moisture depletion also brings good results.

Keywords: Neyriz, Plant canopy temperature, Pomegranate, Soil moisture depletion, Water productivity

1- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
2- Assistant Professor, Crop and Horticultural Science Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
3- Economic, Social and Extension Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran
(*- Corresponding Author Email: mashahrokh@yahoo.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۰۲-۲۱۸۸

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2188-2202

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند با کاربرد روش‌های سامانه استنتاج فازی– عصبی، سری‌های زمانی و رگرسیونی

ابوالفضل ناصری[1*]، آینور ناصری[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۴

چکیده

برداشت و بهره‌برداری مداوم و بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند از سال ۱۳۶۲ موجب افت بیش از ۱۴ متر از سطح آب گردیده است. بنابراین بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی در این آبخوان یک ضرورت مدیریتی است و لازمه آن الگوبندی کمی مصرف، تحلیل روند بهره‌برداری و آینده‌پژوهی وضعیت آن است. این پژوهش با هدف تحلیل و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند در دوره آماری ۵۰ ساله با کاربرد روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی– عصبی انجام گردید. برای الگوبندی، آزمون و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند از روش‌های متعدد سری‌های زمانی، دو روش رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی– عصبی استفاده گردید. الگوبندی، آزمون و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی برای ۵۰ سال صورت گرفت که ۳۵ سال (از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۷) برای مراحل الگوبندی و آزمون و ۱۵ سال (از ۱۳۹۸ تا ۱۴۱۲) برای آینده‌پژوهی استفاده گردید. نتایج نشان داد دقیق‌ترین روش برای تحلیل و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند، روش سامانه استنتاج فازی – عصبی بود. در طول ۳۵ سال گذشته سطح آب زیرزمینی بیش از ۱۴ متر و به طور میانگین هر سال حدود ۴۰ سانتی‌متر افت داشته است. با فرض ادامه یافتن شرایط موجود بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، میانگین افت تجمعی سطح آب زیرزمینی، در سال ۱۴۱۲ برابر ۲۰/۰۳ متر خواهد بود. برای صیانت از منابع آب زیرزمینی در منطقه، سناریو و شرایط مختلف صرفه‌جویی در مصرف آب پیش‌بینی و پیشنهاد گردید.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، آینده‌پژوهی، استنتاج فازی–عصبی، شبکه عصبی مصنوعی، شمال سهند، منطق فازی

مقدمه

منابع آب زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین منابع آب در تولید محصولات کشاورزی در کشور به شمار می‌رود. برداشت بیش از حد مجاز و در برخی مواقع بی‌رویه، موجب کاهش سطح آب زیرزمینی در بسیاری از نقاط کشور گردیده است (Siadat, 2000). آمار نشان می‌دهد میزان تخلیه از منابع آب زیرزمینی سطح کشور در ۵۰ سال اخیر از ۱۸/۷ میلیارد متر مکعب (از سال ۱۳۴۸) به بیش از ۶۲ میلیارد مترمکعب افزایش یافته است. منابع آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند یکی از منابع مهم برای تامین آب شهری و آبیاری اراضی کشاورزی در شمال سهند می‌باشد. منابع آب زیرزمینی در استان شامل ۳۴۸۰۹ حلقه چاه با تخلیه ۹۰۲ میلیون متر مکعب، ۱۸۹۹ رشته قنات با تخلیه ۲۷۳ میلیون متر مکعب و ۱۹۸۰ دهنه چشمه با تخلیه ۱۳۹ میلیون متر مکعب و در مجموع تخلیه کل سالانه از منابع آب زیرزمینی استان برابر ۱/۳ میلیارد متر مکعب است (بی‌نام، ۱۳۹۸). بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی در شمال سهند از اولویت‌ها و ضروریات مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی به شمار می‌رود. اولین گام برای صیانت از این منابع زیرزمینی، با الگوبندی کمی مصرف، تحلیل روند استفاده و آینده‌پژوهی وضعیت آب زیرزمینی امکان‌پذیر است. روش‌های الگوبندی و آینده‌پژوهی شامل روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیون و سامانه استنتاج فازی– عصبی است.

الگوهای داده محور مانند روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیون و سامانه استنتاج فازی– عصبی در واقع الگوی شبیه سازی شده کمی از تغییرات الگوی واقعی آبهای زیرزمینی است. به طور کلی، مدل (الگو) ابزاری برای توجیه و معرفی واقعیت با بیان و تفسیری ساده است. مدل‌های آب زیرزمینی توجیهی از واقعیت است و اگر به صورت

۱- دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: nasseri_ab@yahoo.com)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.25.6

مناسبی تنظیم شده باشد، می‌تواند به عنوان ابزاری جهت پیش‌بینی‌های لازم برای مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شود (ناصری و ناصری، ۱۳۹۸). برای مطالعه سیستم‌های جریان آب زیرزمینی مدل‌های مختلفی استفاده می‌شود. مجموعهٔ آنها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم‌بندی نمود. این مدل‌ها شامل مدل مخازن ماسه‌ای، مدل‌های آنالوگ که شامل مدل‌های جریان مایعات لزج و مدل‌های الکتریکی بوده و مدل‌های ریاضی که شامل مدل‌های عددی و تحلیلی می‌باشند. اخیرا انصاری فر و همکاران (۲۰۲۰) برای ارزیابی تغییرات سطح آب زیرزمینی بندر گز در خلیج گرگان از مدل ریاضی در حالت دایمی و غیردایمی استفاده نموده‌اند (Ansarifar et al., 2020). همچنین لاله‌زاری و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از روش عددی تفاضلات محدود سطح آب زیرزمینی در دشت باغ ملک در استان خوزستان را برای یک دوره ۱۲ ساله شبیه‌سازی نموده‌اند (Lalehzari et al., 2020).

در سال‌های اخیر روش‌های مختلف سری زمانی برای تحلیل، بررسی روند و آینده‌پژوهی سطح و کیفیت آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف دنیا مورداستفاده قرار گرفته، کارآیی و توانمندی آن تا حدود قابل پذیرش مورد تأیید قرار گرفته است (Choubin et al., 2017; Gibrilla et al., 2018; Taweesin et al., 2018; Yang et al., 2017). از سوی دیگر، در سال‌های اخیر پژوهشگران متعدد (Irvine et al., 2015; Vandersteen et al., 2015; Johnson et al., 2012; Adhikary et al., 2012; Rau et al., 2012; Rakhshandehroo and Amiri, 2012; Peterson et al., 2010; Hatch et al., 2010)، مطالعات آب‌های زیرزمینی را با استفاده از سری‌های زمانی تحلیل نموده و یافته‌های موفقیت‌آمیز را گزارش نموده‌اند. بررسی منابع نشان داد کاربرد نسبتا قدیمی روش‌های سری‌های زمانی برای تحلیل مولفه‌های تغذیه، ذخیره و تخلیه بیلان آب زیرزمینی توسط چاو وکیرلیوتیز (Chow and Kareliotis, 1970) صورت گرفته است. سامانی و همکاران (Samani et al.,1994) با تحلیل سری‌های زمانی تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت بهشهر، توانمندی این روش را برای الگوبندی تائید نموده‌اند. فانگیر (Vangeer, 1996) برای درون‌یابی مکانی تغییرات سطح آب زیرزمینی از الگوهای انتقال باکس جینکنس استفاده نموده است. رحمانی و سدهی (۱۳۸۳) برای الگوبندی و پیش‌بینی وضعیت سطح آب زیرزمینی دشت بهار و چیت‌سازان و همکاران (۱۳۸۶) برای دشت شهرکرد و زاهدی و قویدل (۱۳۸۱) برای حوضه آبریز ارومیه از تحلیل سری زمانی استفاده نموده‌اند. سالاس و همکاران (Salas et al., 1980) و سن (Sen, 1998) برای تحلیل مطالعات هیدرولوژی و اقلیمی، مناسبترین الگو را ARIMA معرفی نموده‌اند.

محاسبات نرم و هوشمند با ترکیب روش‌هایی همانند منطق فازی، محاسبات تکاملی و شبکه عصبی در دهه‌های اخیر به عنوان روش‌های نوین تحلیل و آینده‌پژوهی پدیده‌های مهندسی توسعه یافته‌اند. یکی از مهم‌ترین انواع این محاسبات نرم، سامانه استنتاج فازی– عصبی است که در سال ۱۹۹۳ توسط یانگ (Yang) بسط یافته است. بررسی‌ها نشان داد گستره تحلیل تغییرات مکانی و یا زمانی سطح آب زیرزمینی و یا آینده‌پژوهی آن با سامانه استنتاج فازی–عصبی وسیع نبوده و مطالعات محدودی در این مورد وجود دارد که در ادامه به چند یافته مرتبط و با اهمیت اشاره می‌گردد. دهقانی و همکاران (Dehghani et al., 2009) با استفاده از سه روش شبکه عصبی مصنوعی، سامانه استنتاجی فازی– عصبی تطبیقی و زمین آمار، برای درون‌یابی سطح آب زیرزمینی دشت قزوین و خلقی و حسینی ((Kholghi and Hosseini, 2009) برای درون‌یابی ضریب انتقال سفره را تحلیل نموده و و سامانه استنتاج فازی عصبی را دقیق‌ترین روش اعلام نموده‌اند. خاشعی سیوکی (Khashei-Siuki et al., 2013) الگوهای شبکه عصبی مصنوعی، سامانه استنتاج فازی– عصبی و رگرسیونی را برای برآورد سطح ایستابی آبخوان مورد استفاده قرار داده و اعلام نموده‌اند الگوی شبکه عصبی برای ماه آذر و سامانه فازی– عصبی برای ماه شهریور دقیق‌ترین نتیجه را تولید نموده و نتایج الگوی رگرسیونی در برآورد سطح ایستابی آبخوان همواره کم‌ترین دقت را داشته است.

با توجه به ضرورت الگوبندی کمی مصرف و آینده‌پژوهی روند بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در حاشیه شرقی دریاچه ارومیه و با عنایت به اهمیت صیانت و بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند (در استان آذربایجان شرقی) و نیز بنا به توانمندی و شایستگی روش‌های آینده‌پژوهی رفتار پدیده‌های مهندسی آب از جمله سری‌های زمانی، رگرسیون و سامانه استنتاج فازی– عصبی، اهداف این پژوهش عبارت از الف) تحلیل تغییرات زمانی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند، ب) آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی با االستفاده از الگوی مناسب و ج) پیش‌بینی سناریوهای اجرایی برای صرفه جویی در مصرف آب زیرزمینی در منطقه بود.

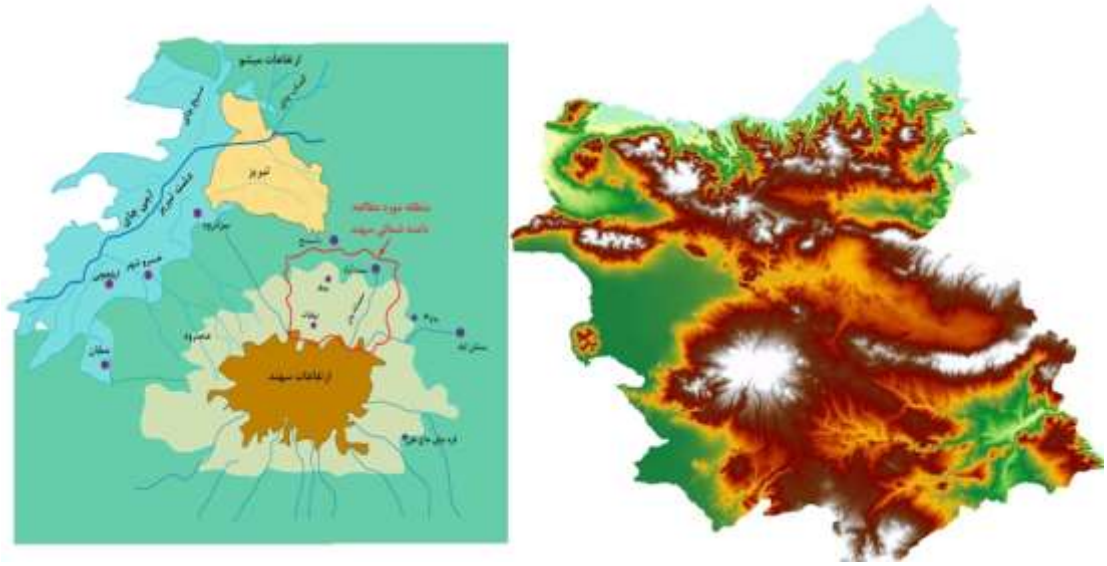
برتری مشخص پژوهش نسبت به پژوهش‌های مشابه عبارت است از الف) تحلیل زمانی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند، که برای اولین‌بار صورت می‌گیرد، ب) کاربرد روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیون و سامانه استنتاج فازی – عصبی در الگوبندی و آینده پژوهی رفتار سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند و ج) پیشنهاد سناریوهای اجرایی برای صرفه جویی در مصرف آب زیرزمینی در منطقه. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در صیانت از منابع آب زیرزمینی و مدیریت پایدار آن به ویژه در حاشیه دریاچه ارومیه بسیار مفید باشد.

مواد و روش‌ها

مشخصات جغرافیایی و اقلیمی منطقه

دامنه شمالی سهند در شمال کوه سهند در استان آذربایجان‌شرقی در جنوب و جنوب‌شرق تبریز واقع شده و شامل دره‌های هروی، سعیدآباد، قزلجه میدان، لیقوان و کرجان است (شکل ۱). منطقه مورد بررسی بین ۳۷ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه تا ۴۷ درجه طول شرقی قرار گرفته است. وسعت آبخوان دامنه شمالی سهند برابر ۳۹۶ کیلومترمربع است (بی‌نام، ۱۳۹۸). میانگین ضریب ذخیره در این آبخوان سه درصد برآورد شده است. به دلیل برداشت از آب زیرزمینی به طور میانگین هر سال نزدیک ۴۰ سانتی‌متر از سطح آب زیرزمینی کاسته می‌شود. ضخامت متوسط سفره ۱۲۰ متر و ضخامت لایه اشباع در دامنه شمالی سهند ۹۰ متر است. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار قابلیت انتقال آب سفره ۵۰ و ۶۸۰ مترمربع در روز است (بی‌نام، ۱۳۹۸). برای بررسی وضعیت سفره زیرزمینی دامنه شمالی سهند و تحلیل تغییرات زمانی آن از آمار آب‌های زیرزمینی وزارت نیرو استفاده گردید (بی‌نام، ۱۳۹۸). میانگین ۳۰ ساله بارش و تبخیر از منطقه به ترتیب برابر ۳۲۰ و ۹۵۰ میلی‌متر در سال و میانگین دمای منطقه ۸ درجه سانتی‌گراد است.

در این پژوهش از میانگین سطح آب زیرزمینی در ماه‌های مختلف سال به عنوان سطح میانگین سالانه در آبخوان دشت استفاده شد. برای الگوبندی، آزمون و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند از روش‌های متعدد سری‌های زمانی، دو روش رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی– عصبی استفاده گردید. در این پژوهش، الگوبندی، آزمون و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی برای ۵۰ سال (از سال آبی (۶۳-۱۳۶۲ تا ۹۷-۱۳۹۶) صورت گرفت. در مجموع ۳۵ سال (از سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۷) برای مراحل الگوبندی و آزمون و ۱۵ سال (از ۱۳۹۸ تا ۱۴۱۲) برای آینده‌پژوهی استفاده گردید.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان و دامنه شمالی سهند

کاربرد روش‌های تحلیل و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی

الف) روش سری‌های زمانی

در این پژوهش برای الگوبندی، آزمون و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند از روش‌های متعدد سری‌های زمانی استفاده گردید. این روش‌ها شامل گام تصادفی، گام تصادفی با ضریب ۰/۴-، میانگین ثابت، میانگین متحرک ساده ، هموارسازی نمایی ساده، هموارسازی نمایی خطی براون، هموارسازی نمایی خطی هالت، هموارسازی نمایی کوادراتیک براون، هموارسازی نمایی وینتر، ARIMA(1,1,1)، ARIMA(0,1,2)، ARIMA(1,1,2) و ARIMA(2,1,1) بود. در این بررسی، سری زمانی افت سطح آب زیرزمینی به صورت مجموعه‌ای از مشاهدات سالانه با هدف تحلیل توصیف و آینده‌پژوهی آن است. توصیف فرآیند شامل رسم نمودار داده‌ها، تشخیص ایستائی و ناایستائی آن و بررسی خودهمبستگی سری افت سطح آب زیرزمینی است. آینده‌پژوهی شامل برآورد مقادیر آینده سری بر مبنای داده‌های مشاهده شده است (نیرومند، ۱۳۷۶).

برای تشخیص الگوی اولیه برای سری افت سطح آب زیرزمینی از تابع خودهمبستگی نمونه (AC_k یاACF) و تابع خودهمبستگی جزء

(PACF) استفاده گردید (Brockwell and Davis, 1996; Chatfield, 1996).

تابع خودهمبستگی نمونه در سری‌های افت سطح آب زیرزمینی عبارت از همبستگی بین سری افت سطح آب زیرزمینی با همان سری در تأخیر سال k است. مقدار AC_k از رابطه زیر برآورد گردید (Chatfield, 1996):

$$AC_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k}(GWL_t - \overline{GWL})(GWL_{t+k} - \overline{GWL})}{\sum_{t=1}^{n}(GWL_t - \overline{GWL})^2} \quad (۱)$$

که درآن AC_k ضریب خودهمبستگی سری افت سطح آب زیرزمینی در تاخیرk، $\overline{GWL}$ میانگین سری سطح آب زیرزمینی و GWL_t مقدار سری در زمان t و n تعداد مشاهدات سری (برحسب سال آبی) می‌باشد. برای تابع خودهمبستگی جزء، دامنه بحرانی برابر $\pm\frac{1.96}{\sqrt{n}}$ پیشنهاد شده است (Chatfield, 1996). تابع خودهمبستگی جزء (PAC_k یا PACF) عبارت است از همبستگی بین سری افت سطح آب زیرزمینی در زمان‌های t و t+k وقتی‌که وابستگی خطی سری افت سطح آب زیرزمینی در t+1 و...و t+k-1 حذف شده باشد، تابع خودهمبستگی جزء برای تغییرات سطح آب زیرزمینی از رابطه زیر برآورد گردید (نیرومند، ۱۳۷۶):

$$PAC_{kk} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & AC_1 & \dots & AC_1 \\ AC_1 & 1 & \dots & AC_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ AC_{k-1} & AC_{k-2} & \dots & AC_k \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & AC_1 & \dots & AC_1 \\ AC_1 & 1 & \dots & AC_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ AC_{k-1} & AC_{k-2} & \dots & 1 \end{vmatrix}} \quad (۲)$$

به صورت ویژه، ضرایب خود خودهمبستگی جزء برای تاخیرهای ۱ و ۲ به صورت زیر برآورد می‌گردد.

$$PAC_1 = AC_1 \quad (۳)$$

$$PAC_2 = (AC_2 - AC_1^2)/(1 - AC_1^2)$$

نمودار تغییرات ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزء تا تأخیرهای به تعداد یک‌سوم کل مشاهدات با خودهمبستگی نگار و خودهمبستگی جزء نگار نشان داده می‌شود و در آن دامنه بحرانی به‌صورت خطوط موازی رسم می‌گردد. با عنایت به الگوی نهایی و مناسب این پژوهش، الگوی اتورگرسیو تلفیقی میانگین متحرک ARIMA(p,d,q) به‌صورت زیر تشریح می‌شود. در ادامه ملاحظه خواهد شد که سایر الگوهای سری زمانی ازنظر دقت دارای اولویت نبوده و به همین دلیل در این بخش تشریح نگردید. اطلاعات دقیق در مورد سایر روش‌ها در Brockwell and Davis (1996) می‌توان یافت.

$$GWLt = \rho\,1\ GWLt\text{-}1 + \rho\,2\ GWLt\text{-}2 + \cdots + \rho\,p\ GWL\ t\text{-}p + et + \theta\,1et\text{-}1 + \cdots + \theta\,qet\text{-}q \quad (۴)$$

که در آن:p و q به ترتیب مراتب الگوی اتورگرسیو و میانگین‌متحرک و n تعداد مشاهدات سری است. ضرایب الگو یعنی ρ و θ با روش حداکثر درستنمایی با استفاده از نرم‌افزار MINITAB به دست آمد. برای انتخاب بهترین الگو از بین الگوهای مختلف، از شاخص‌های خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، خطای میانگین (ME)، خطای خالص میانگین (MAE)، معیارهای آگاهی آکائیک (AIC) و معیار BIC استفاده گردید. هریک از این معیارها به‌صورت برآورد گردید:

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(GWL1 - GWL2)^2\right]} \quad (۵)$$

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(GWL1 - GWL2). \quad (۶)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|GWL1 - GWL2|. \quad (۷)$$

$$AIC = \ln\ \sigma^2 + \frac{2}{T}(p+q) \quad (۸)$$

$$BIC = \ln\ \sigma^2 + \frac{\ln T}{T}(p+q) \quad (۹)$$

$$SBIC = \ln(\hat{\sigma}^2) + k\ln(T)/T \quad (۱۰)$$

که در آن GWL 1 و GWL 2 به ترتیب افت سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و برآورد شده با الگوی موردنظر است. در این بررسی، σ^2 واریانس داده‌ها است.

ب) روش رگرسیون

برای الگوبندی، آزمون و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی، علاوه بر روش‌های سری‌های زمانی از روش رگرسیون خطی و درجه دوم نیز استفاده گردید. الگوهای خطی و درجه دوم به صورت زیر تعریف گردید:

$$GWL = \alpha + \beta\ Year \quad (۱۱)$$

$$GWL = \alpha + \beta\ Year + \gamma\ Year^2 \quad (۱۲)$$

که در آن GWL سطح آب زیرزمینی و Year سال آبی مورد بررسی است. ضرایب این دو معادله از طریق حل چندین معادله با دو مجهول در معادله خطی و سه مجهول در معادله درجه دوم با استفاده از نرم‌افزارMINITAB به دست آمد. برای تعیین دقت این الگوها در برازش و آینده‌پژوهی داده‌های افت سطح آب زیرزمینی، علاوه بر برخی آماره‌های دقت که در رابطه (۴) تا (۹) یاد شد، از ضریب تبیین (یا تعیین) و به صورت زیر استفاده گردید.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(G\hat{W}L - GWL)^2}{\sum_{i=1}^{n}G\hat{W}L^2} \quad (۱۳)$$

ج) سامانه استنتاج فازی– عصبی

سامانه استنتاج فازی– عصبی از یک سامانه مبتنی بر قاعده‌های منطقی (فازی) و یک شبکه مبتنی بر قابلیت استخراج دانش از

اطلاعات عددی (شبکه عصبی) ترکیب یافته است. در این سامانه، ایجاد رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی به عهده بخش فازی سامانه، و بهینه‌سازی پارامترهای تابع عضویت به عهده بخش عصبی سامانه است. این سامانه از چهار جزء الف) فازی نمودن با توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی، ب) پایگاه قواعد با قوانین فازی، ج) ترکیب قواعد برای استنتاج سازوکارها، و د) غیرفازی نمودن نتایج خروجی سامانه، تشکیل یافته است (Krueger et al., 2011). استنتاج فازی انواع مختلف از جمله ممدانی (Mamdani)، لارسن (Larsen)، تسوکاماتو (Tsukamato) و تاکاگی- سوگنو –کانگ (Takagi-Sugeno-Kang; TSK) را شامل می‌شود. نوع اخیر پرکاربردترین نوع در سامانه استنتاج فازی – عصبی است Takagi and Sugeno ,1985). این نوع شامل مجموعه‌ای از قواعد "اگر – آنگاه" است و مرتبه اول این نوع با متغیر ورودی سنجه زمانی اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی x و متغیر خروجی سطح آب زیرزمینی f ، دو قانون شرطی زیر را شامل است: قانون شرطی اول: اگر متغیر ورودی سنجه زمانی اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی(x) برابر A1 باشد، آنگاه:

$$f_1=p_1A_1+r_1 \qquad (۱۴)$$

قانون شرطی دوم: اگر متغیر ورودی سنجه زمانی اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی(x) برابر A_2 با شد، آنگاه:

$$f_2=p_2A_2+r_2 \qquad (۱۵)$$

که در آن p_1 و p_2 و r_1 و r_2 پارامترهای تابع خروجی هستند. بدون احتساب متغیر ورودی غیرفازی، معماری سامانه استنتاج فازی- عصبی دارای پنج لایه است. در این سامانه با بهره‌گیری از داده‌های آموزشی، پارامترهای توابع عضویت در لایه اول و لایه چهارم به گونه‌ای مشخص می‌شوند که به ازای ورودی دلخواه، خروجی مناسب و شایسته‌ای حاصل گردند. پارامترهای لایه اول و چهارم به ترتیب غیر خطی و خطی هستند. مطابق توصیه پژوهشگران برای آموزش لایه اول از روش پس‌انتشار و در لایه چهارم از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود (Jang and Sun, 1997). لایه گره‌های ورودی: در این لایه درجه عضویت گره‌های ورودی به بازه‌های مختلف فازی با استفاده از تابع عضویت مشخص می‌گردد. یعنی:

$$O_{1,i}=\mu_{Ai}(x) \quad for \quad i=1,2 \qquad (۱۶)$$

که در آن: $\mu_{Ai}(x)$ تابع عضویت گوسین بوده و از یکی از رابطه‌های زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu_{Ai}(x)=\frac{1}{1+\left[\left(\frac{x-c_i}{a_i}\right)^2\right]^{b_i}} \qquad (۱۷)$$

$$\mu_{Ai}(x)=\exp\left[-\left[\left(\frac{x-c_i}{a_i}\right)^2\right]\right] \qquad (۱۸)$$

و در آن: x مقادیر ورودی به گره i و c_i و a_i به ترتیب مراکز و واریانس‌های قابل تنظیم است. لایه گره‌های قاعده: هر گره در این لایه درجه فعالیت یک قانون را از رابطه زیر مشخص می‌کند.

$$O_{2,i}=w_i=\Pi^n{}_{j=1}\left(\mu_{Ai}(x)\right)_j \qquad (۱۹)$$

لایه نرمال شده یا گره استاندارد: خروجی این لایه نرمال شده مقادیر لایه قبلی از رابطه زیر است.

$$O_{3,i}=\overline{w}_i=\frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \qquad (۲۰)$$

که در آن: $\overline{w}_i$ درجه فعالیت نرمال شده قانونiام است. لایه نتایج: در این لایه، خروجی هر گره از رابطه زیر برآورد می‌شود.

$$O_{4,i}=\overline{w}_i f_i=\overline{w}_i\left(\sum_{j=1}^{n} p_{ij}x_j\right) \quad for\ i=1,2 \qquad (۲۱)$$

لایه گره‌های خروجی: در این لایه هر گره، مقدار خروجی نهایی را به صورت زیر محاسبه می‌نماید.

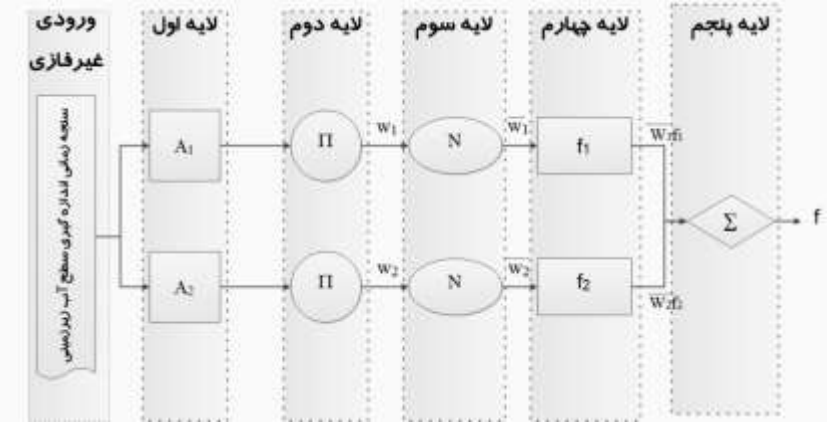
$$O_{5,i}=\sum_i \overline{w}_i f_i \qquad for\ i=1,2 \qquad (۲۲)$$

ترتیب لایه‌ها و معماری کلی الگوی فازی-عصبی برای تحلیل سطح آب زیرزمینی در شکل۲ نشان داده شده است. در این مطالعه، با استفاده از رابطه زیر داده‌های ورودی به سامانه استنتاج فازی-عصبی به صورت نرمال درآمدند:

$$x_i=\frac{x-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \qquad (۲۳)$$

که در آن x مقدارواقعی،x_i، x_{min}و x_{max} به ترتیب استاندارد شده مقدار واقعی، مقادیر حداقل و حداکثر داده‌ها می‌باشند. برای تحلیل افت سطح

ایستابی با سامانه استنتاج فازی -عصبی یک مجموعه ورودی و خروجی مناسب در نظر گرفته شدند. متغیرهای ورودی شامل دوره زمانی سنجش سطح آب زیرزمینی از سال آبی ۶۳- ۱۳۶۲ تا ۹۷- ۱۳۹۶ و متغیرهای خروجی شامل افت سطح آب زیرزمینی هرکدام به تعداد ۳۵ زوج مرتب بودند. داده ها با رابطه (۲۰) به صورت نرمال درآمده و وارد سامانه گردید. پس از تصادفی نمودن داده‌های اندازه گیری شده، درصد داده های لازم برای آموزش، اعتبارسنجی و آزمونی به ترتیب برابر ۶۰، ۱۵و ۲۵ درصد، درنظر گرفته شدند. از توابع مختلف انتقال (تحریک) با قاعده ممانتوم و با گام یک و ضریب ۰/۷ استفاده گردید. حداکثر تعداد اپوک برابر ۱۰۰۰ درنظر گرفته شدند.



شکل ۲- معماری کلی الگوی فازی-عصبی برای تحلیل سطح آب زیرزمینی

ارزیابی عملکرد روش‌های سری‌های زمانی و سامانه استنتاج فازی – عصبی

برای ارزیابی عملکرد الگوهای پیش‌بینی، معیارها و فراسنج‌های مختلفی وجود دارد. این فراسنج‌ها به طور عمده بر مبنای تفاوت بین مقادیر خروجی و پیش‌بینی شده و مقادیر خروجی‌های مطلوب و مقادیر واقعی استوار است. در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد سامانه‌ها از فراسنج‌های میانگین مربعات خطا (MSE) و میانگین قدر مطلق درصد خط (MAE) و ضریب تبیین (R^2) به صورت‌های زیر استفاده گردید.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{H} - H)^2}{n} \quad (۲۴)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{(\hat{H} - H)}{H}}{n} \quad (۲۵)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{H} - H)^2}{\sum_{i=1}^{n}\hat{H}^2} \quad (۲۶)$$

که در آن: $\hat{H}$، H و n به ترتیب مقادیر خروجی و ورودی الگوی پیش بینی و n تعداد مشاهدات است. برای تحلیل سری‌های زمانی و رگرسیون از نرم افزار MINITAB و برای تحلیل سامانه استنتاج فازی– عصبی از نرم افزار NEUROSOLUTIONS استفاده گردید.

نتایج و بحث

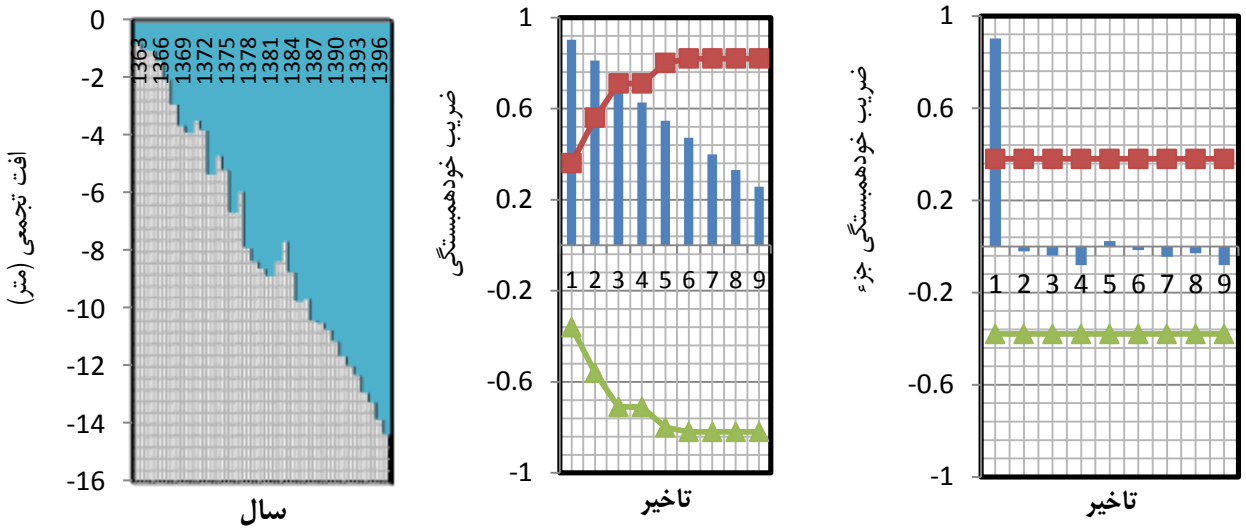
میانگین افت تجمعی سطح آب زیرزمینی از سال آبی ۶۲-۱۳۶۱ تا ۹۷-۱۳۹۶ نسبت به مقادیر سال پایه (سال آبی ۶۲ -۱۳۶۱) در شکل ۳ رسم شده است. نتایج نشان داد در طول ۳۵ سال مورد بررسی، سطح تجمعی آب زیرزمینی به جز در پنج مورد از ۳۵ مورد روند کاهشی داشته است. در پنج مورد از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۳ خیزهایی به اندازه ۶۵ سانتی‌متر در سطح آب زیرزمینی اتفاق افتاده است. در طول ۳۵ سال گذشته بیش از ۱۴ متر (حدود ۱۷۰ میلیون مترمکعب) سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند افت داشته است. می‌توان گفت به طور میانگین هرسال حدود ۴۰ سانتی‌متر (معادل پنج میلیون مترمکعب) از سطح آب زیرزمینی در این دشت کاسته می‌شود.

تحلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی با الگوهای سری‌های زمانی، رگرسیونی و استنتاج فازی- عصبی

بر اساس سری افت سطح آب زیرزمینی، نمودار تابع خودهمبستگی (ACF) و تابع خودهمبستگی جزء (PACF) تا نه سال تاخیر درشکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزء به صورت خطهای عمودی و حدود بالا و پایین همبستگی‌ها به صورت دو خط در راستای محور افقی رسم شده است. روند کاهشی در هر دو ضریب همبستگی به طور واضح قابل مشاهده است. میرایی سریع در نمودار خودهمبستگی جزء مشخص است. تغییرات فصلی در هیچ کدام از نمودارها مشاهده نگردید. نتایج نشان داد توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزء به ترتیب تا سال‌های دوم و اول به ترتیب با ضرایب ۰/۸۱ و ۰/۹۰ معنی‌دار بوده‌اند. بنابراین به عنوان تشخیص اولیه هر دو الگوی اتورگرسیو و میانگین متحرک می‌تواند در الگوبندی افت سطح آب زیرزمینی سهیم باشند. ارزیابی اولیه نشان داد سری افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در طول ۳۵ سال روند ناایستائی داشت. برای تفکیک روند و ایستاسازی سری داده‌ها از عمل یک‌بار تفاضلی استفاده گردید.

بعد از ارزیابی ضرایب خودهمبستگی و خودهمبستگی جزء، الگوی

مناسب سری زمانی بر مبنای کمینه بودن آماره‌های خطاسنجی تشخیص و انتخاب می‌گردد. تشخیص اولیه نشان داد سهم هر دو الگوی اتورگرسیو و میانگین متحرک افت تجمعی سطح آب زیرزمینی محرز است. مشخصات الگوهای مختلف سری زمانی قابل انتخاب برای تحلیل تغییرات زمانی افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در جدول ۱ ارائه شده است. شاخص‌های مختلف برای انتخاب مناسب‌ترین الگو در این جدول ارائه شده است. با در نظر گرفتن همه این شاخص‌ها، الگوی ARIMA(1,1,1) مناسب‌ترین الگو برای تبیین افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند تشخیص داده شد. مقدار معیار آگاهی آکائیک این الگو برابر ۱/۲۰- بود.



شکل ۳- سری زمانی افت تجمعی (سمت چپ)، ضرایب خودهمبستگی (وسط) و خودهمبستگی جزء (سمت راست) افت تجمعی سطح آب زیرزمینی

جدول ۲- الگوهای ممکن سری زمانی و رگرسیونی برای انتخاب مناسب‌ترین الگوی افت سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند

ردیف	روش‌های الگوبندی	RMSE	MAE	ME	AIC	SBIC
	الگوهای سری‌های زمانی					
۱	گام تصادفی	۰/۷۳	۰/۵۹	-۰/۴۰	-۰/۵۸	-۰/۵۴
۲	گام تصادفی با ضریب ۰/۴۰-	۰/۶۱	۰/۴۴	۰/۰۰	-۰/۸۷	-۰/۷۸
۳	میانگین ثابت برابر ۷/۴۵-	۴/۱۱	۳/۴۶	۰/۰۰	۲/۹۴	۳/۰۳
۴	میانگین متحرک ساده دوجزئی	۰/۸۷	۰/۷۰	-۰/۶۰	-۰/۱۷	-۰/۰۸
۵	هموارسازی نمایی ساده	۰/۷۳	۰/۵۷	-۰/۳۹	-۰/۵۳	-۰/۴۴
۶	هموارسازی نمایی خطی براون	۰/۶۷	۰/۵۲	-۰/۱۰	-۰/۶۸	-۰/۵۹
۷	هموارسازی نمایی خطی هالت	۰/۵۹	۰/۴۴	۰/۰۸	-۰/۹۰	-۰/۷۷
۸	هموارسازی نمایی کوادراتیک براون	۰/۷۰	۰/۵۴	۰/۰۰	-۰/۵۹	-۰/۵۰
۹	هموارسازی نمایی وینتر	۰/۶۷	۰/۴۷	-۰/۱۳	-۰/۶۲	-۰/۴۹
۱۰	ARIMA(1,1,1)	۰/۵۰	۰/۳۷	-۰/۰۳	-۱/۲۰	-۱/۰۶
۱۱	ARIMA(0,1,2)	۰/۵۰	۰/۳۶	-۰/۰۲	-۱/۱۵	-۱/۰۶
۱۲	ARIMA(1,1,2)	۰/۵۱	۰/۳۵	-۰/۰۳	-۱/۱۲	-۰/۹۵
۱۳	ARIMA(2,1,2)	۰/۵۰	۰/۳۴	-۰/۰۳	-۱/۰۹	-۰/۸۷
۱۴	ARIMA(2,1,1)	۰/۵۲	۰/۳۷	-۰/۰۷	-۱/۱۸	-۰/۹۰
	الگوهای رگرسیونی					
۱۵	برازش خطی	۰/۵۵	۰/۴۲	۰/۰۰	-۱/۰۲	-۰/۸۸
۱۶	برازش درجه دوم	۰/۵۴	۰/۴۲	۰/۰۰	-۱/۰۰	-۰/۸۳

بنابراین الگوی انتخاب شده ARIMA (1,1,1) برای تبیین سری زمانی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند از نوع اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده و به صورت زیر به دست آمد:

$$GWL_t = 0.225 + 0.446\,GWL_{t-1} + a_t - 1.05\,a_{t-1} \quad (۲۴)$$

که در آن GWL_t افت سطح آب زیرزمینی در زمان مشخص t و GWL_{t-1} افت سطح آب زیرزمینی در زمان ماقبل است. متغیر a_t و a_{t-1} فرآیند اغتشاش در دو زمان متوالی می‌باشد. آماره ارزیابی و آزمون ضرایب الگوی حاصل در جدول ۳ نشان داده شده است. ضریب اتورگرسیو و میانگین متحرک الگو در سطح کمتر از پنج درصد معنی‌دار بود.

جدول ۳- مقادیر و سطح احتمال معنی‌داری ضریب الگوی سری زمانی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده ARIMA

نوع الگو	ضریب	خطای استاندارد	نسبت آماره t	مقدار p
AR1	۰/۴۴۶	۰/۱۸	۲/۵	۰/۰۲
MA1	۱/۰۵۴	۰/۰۳	۳۹/۱	۰/۰۰
ثابت الگو	-۰/۲۲۵			

برای تحلیل تغییرات زمانی سطح آب زیرزمینی از الگوهای رگرسیونی نیز استفاده گردید. نتایج دو الگوی منتخب بر مبنای آماره‌های خطاسنجی در جدول ۲ ارائه شده است. از بین دو الگوی منتخب، الگوی برازش خطی به دلیل داشتن کم‌ترین مقدار معیار آگاهی آکائیک و نیز سهولت کاربرد برای تحلیل افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند انتخاب گردید. الگوی خطی حاصل به صورت زیر بود:

$$GWL = -0.386 - 0.392\,Year \quad (۲۵)$$

که در آن GWL افت سطح آب زیرزمینی و Year سال مورد ارزیابی می‌باشد. یادآوری می‌نماید از مجموع ۵۰ سال دوره آماری افت سطح آب زیرزمینی، بخشی از داده ها برای الگوبندی، بخشی برای آزمون و بخشی نیز برای آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی استفاده گردید. مقادیر اندازه‌گیری‌شده و برآورد شده افت تجمعی سطح آب زیرزمینی با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق‌شده، با الگوی رگرسیونی و استنتاج فازی- عصبی در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود بیش از ۹۶ درصد از تغییرات افت تجمعی سطح آب زیرزمینی با الگوهای یاد شده قابل تبیین است. بنابراین الگوهای به‌دست‌آمده به‌طور رضایت‌بخشی داده‌های افت سطح آب زیرزمینی در این دامنه شمالی سهند را برازش نموده است. از بین روش‌های منتخب، ترتیب دقت هریک از روش ها در الگوبندی افت تجمعی سطح آب زیرزمینی به صورت استنتاج فازی – عصبی، الگوی رگرسیونی و با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق‌شده بود. در پژوهش‌های پیشین، سن (Sen, 1988) و سالاس (Salas et al., 1980) روش الگوبندی ARIMA را معتبرترین روش برای الگوبندی زمانی رفتارهای پدیده‌های هیدرولوژیک و پدیده‌های وابسته به اقلیم معرفی نموده‌اند. به نظر می‌رسد رفتار سری‌های افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در دامنه شمال سهند مشابه رفتار مولفه های تخلیه و تغذیه سطح آب زیرزمینی باشد (رحیمی و غیور، ۱۳۸۹). دلیل این تشابه از آنجا ناشی می‌شود که داده‌های سری افت سطح آب زیرزمینی دارای ضریب خودهمبستگی معنی‌داری بوده و مقادیر سری در یک سال مشخص به مقادیر سری در سال ماقبل خود وابسته و همبسته بود. همین ویژگی است که سهم الگوی اتورگرسیو را برجسته می‌نماید. همچنین همبستگی جزئی سری دارای مقادیری معنی‌دار بود و سهم میانگین متحرک الگو نیز برجسته بود. بنابراین الگوی زمانی برازش شده به افت سطح آب زیرزمینی نیز با این یافته سازگار تشخیص داده شد. بنابراین الگوی انتخاب شده برای بیان سری زمانی افت سطح آب زیرزمینی از نوع اتورگرسیو میانگین متحرک (ARIMA) و به‌صورت ARIMA(1,1,1) با مشخصات جدول ۳ تنظیم شد.

برای الگوبندی تغییرات سطح آب زیرزمینی با سامانه استنتاج فازی– عصبی، متغیرها به صورت فازی وارد شبکه شدند. برای فازی نمودن متغیرهای ورودی از هر دو تابع عضویت گوسی و زنگوله‌ای استفاده گردید. نتایج استفاده از این توابع در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد در شرایط استفاده هم‌زمان از تابع عضویت، الگوی فازی و تابع انتقال و با نظر داشت فراسنج‌های ارزیابی عملکرد الگوها، ردیف شماره ۲ از جدول ۴ با تابع عضویت گوسی، الگوی فازی تاکاگی– سوگنو، تابع انتقال آکسون، میانگین مربعات خطا (MAE) برابر با ۰/۰۰۱، میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAE) برابر با ۰/۰۰۳و ضریب تبیین(R^2) برابر ۰/۹۹ به عنوان مناسب‌ترین الگوی سامانه استنتاج فازی– عصبی انتخاب گردید. مقادیر اندازه گیری شده سطح آب زیرزمینی و برآورد شده با سامانه استنتاج فازی- عصبی در شکل ۴ نشان داده شده است.

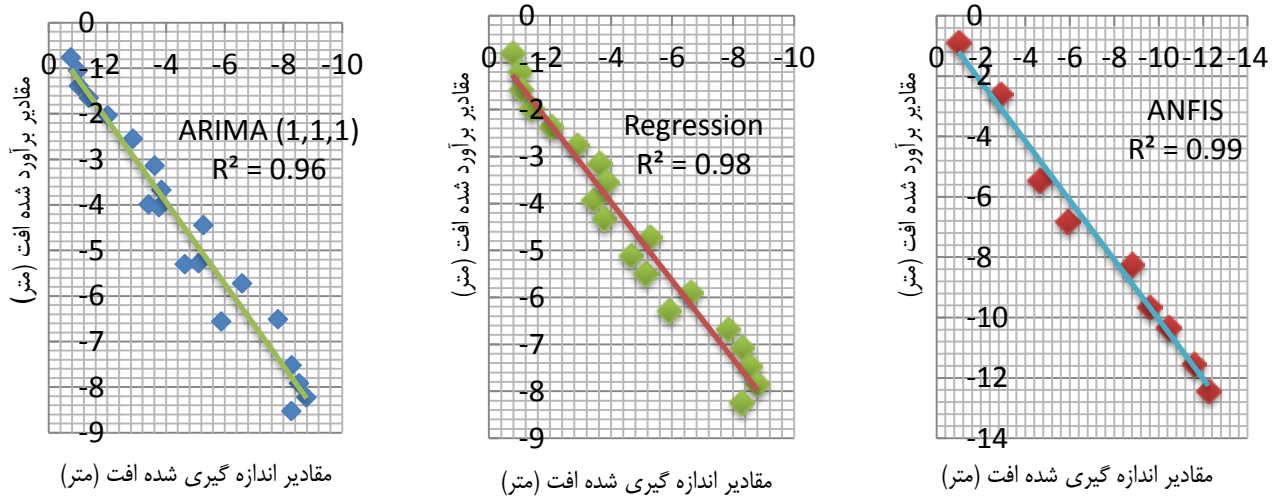
جدول ٤- تابع عضویت، الگوی فازی، تابع انتقال و دقت سناریوهای مختلف الگوبندی تغییرات سطح آب زیرزمینی

ردیف	تابع عضویت	الگوی فازی	تابع انتقال	میانگین مربعات خطا (MSE)	میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAE)	ضریب تبیین (R^2)
۱	زنگوله‌ای	تاکاگی – سوگنو	آکسون	۰/۰۰۶	۰/۰۶۳	۰/۹۵
۲	گوسی	تاکاگی – سوگنو	آکسون	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۹۹
۳	گوسی	تسوکاموتو	آکسون	۰/۰۸۳	۰/۱۷۵	۰/۳۸
۴	زنگوله‌ای	تسوکاموتو	آکسون	۰/۰۵۷	۰/۱۷۰	۰/۹۰
۵	گوسی	تاکاگی – سوگنو	سیگموید	۰/۰۱۹	۰/۱۱۰	۰/۸۷
۶	گوسی	تاکاگی – سوگنو	تانژانت هیپربولیک آکسون	۰/۰۱۲	۰/۰۹۲	۰/۸۹
۷	گوسی	تاکاگی – سوگنو	آکسون	۰/۰۰۳	۰/۰۴۰	۰/۹۷
۸	گوسی	تاکاگی – سوگنو	آکسون	۰/۰۰۹	۰/۰۷۸	۰/۹۳
۹	گوسی	تاکاگی – سوگنو	آکسون	۰/۰۰۲	۰/۰۳۱	۰/۹۶
۱۰	گوسی	تاکاگی – سوگنو	آکسون	۰/۱۶۷	۰/۳۳۰	۰/۸۴

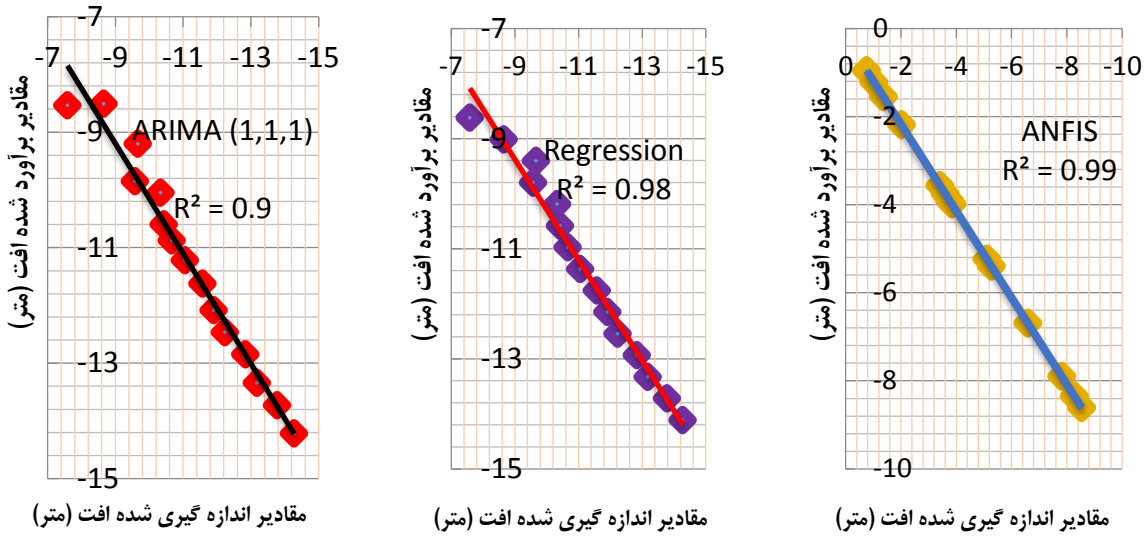
پس از شناسائی الگوها و برآورد پارامترها، لازم است درستی تشخیص الگوها بررسی شود. با توجه به این که سری باقیمانده‌ها نتیجه برآورد پارامترهای الگو است. بنابراین بررسی درستی تشخیص الگو با تحلیل سری باقیمانده‌ها صورت گرفت. تغییرات باقیمانده‌ها روند خاصی نداشت. بنابراین می‌توان گفت تغییرات باقیمانده‌ها تصادفی بوده و الگوی استنتاج فازی- عصبی با کمترین ضریب تعیین (۰/۰۱)، نسبت به الگوهای اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده (با ضریب تعیین برابر با ۰/۱۱) و الگوی رگرسیونی (با ضریب تعیین برابر با ۰/۳۱) دقیق‌تر بود. چون روند باقیمانده الگوی استنتاج فازی- عصبی معنی‌دار نبود.

آزمون الگوهای سری‌های زمانی، رگرسیونی و استنتاج فازی- عصبی

پس از مرحله الگوبندی داده‌ها بر مبنای آمار ۲۰ سال، آزمون الگوهای سری‌های زمانی، رگرسیونی و استنتاج فازی- عصبی با داده‌های واقعی ۱۵ سال دیگر صورت گرفت. نتایج مقایسه افت سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و برآورد شده نشان داد الگوی حاصل از برازش، نتایج رضایت‌بخش و قابل قبولی دارد (شکل ۵).



شکل ٤- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در مرحله الگوبندی با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده (سمت چپ)، الگوی رگرسیونی (وسط) و استنتاج فازی- عصبی (سمت راست)



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در مرحله آزمون با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده (سمت چپ)، الگوی رگرسیونی (وسط) و استنتاج فازی- عصبی (سمت راست)

با فرض ادامه یافتن شرایط موجود بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند، برای انتهای سال پیش‌بینی ۱۴۱۲، میانگین افت سطح آب زیرزمینی با روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی– عصبی به ترتیب برابر ۲۰/۳۳، ۱۹/۹۹ و ۱۹/۷۸ متر و به طور میانگین برابر۲۰/۰۳ متر معادل ۲۴۲/۸ میلیون متر مکعب خواهد بود.

تحلیل تفاوت روش‌ها در آینده پژوهی افت سطح آب زیرزمینی

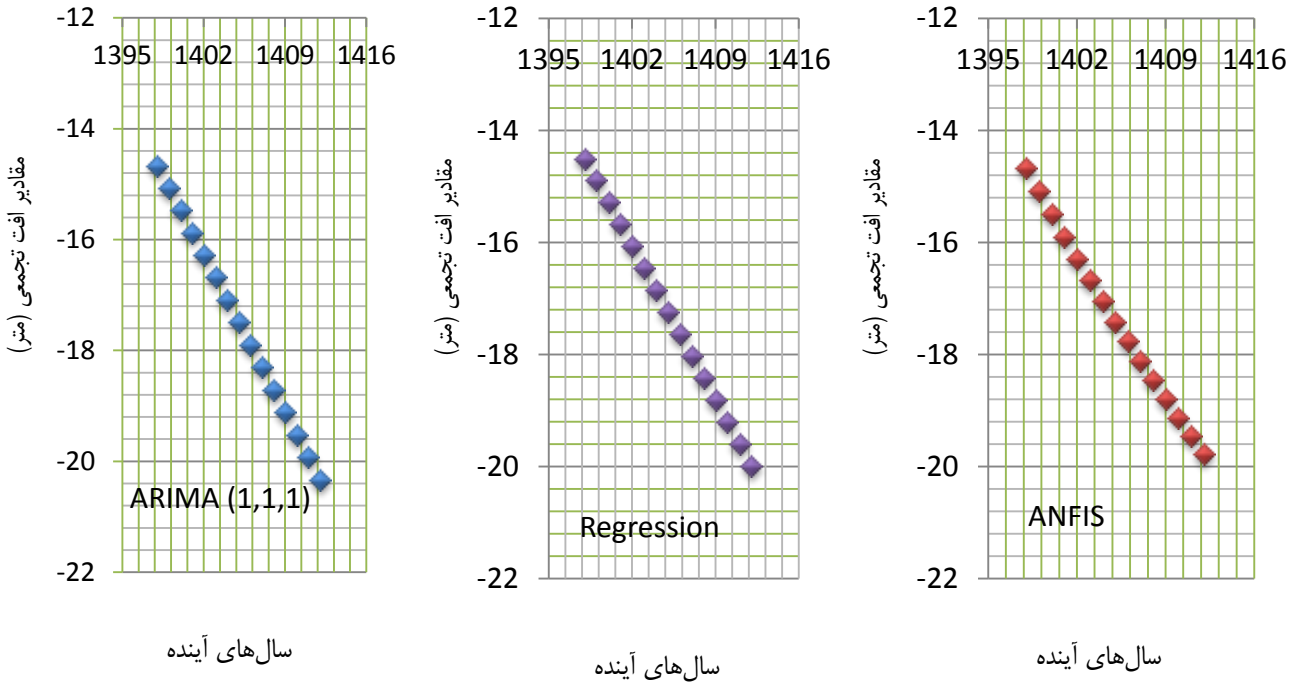
برای بررسی تفاوت روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی – عصبی در آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی، از تحلیل واریانس استفاده گردید. نتایج نشان داد تفاوت روش‌ها در آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی در سطح احتمال کمتر از یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین افت سالانه سطح آب زمینی در دامنه شمالی سهند نشان داد با روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی– عصبی به ترتیب ۴۱ (معادل ۴/۹۷ میلیون متر مکعب)، ۳۹ (معادل ۴/۷۳ میلیون مترمکعب) و ۳۶ (معادل ۴/۳۶ میلیون متر مکعب) سانتی‌متر از سطح آب زیرزمینی در این منطقه کاسته می شود. مشاهده می‌شود نتایج آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی روش‌های سری‌های زمانی و رگرسیونی بسیار شبیه هم هستند. با توجه به فرآیند الگوسازی، آزمون و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی می‌توان گفت یافته‌های حاصل از روش استنتاج فازی–عصبی نسبتا دقیق‌تر از سایر روش‌ها بود.

آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی با روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی–عصبی

مرحله آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی برای ۱۵ سال از سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ تا سال آبی۱۲-۱۴۱۱ صورت گرفت (شکل ۶). این مرحله پس از مرحله الگوبندی داده‌ها و آزمون الگوها بود. مقادیر پیش‌بینی‌شده حاصل از روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی– عصبی نشان داد برای سال‌های آینده، روند افت سالانه سطح آب زیرزمینی به‌صورت افزایشی خواهد بود (شکل ۶).

جدول ۵- تحلیل واریانس روش‌ها در آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	نسبت F	مقدار P
بین روش‌ها	۰/۰۱۱	۲	۰/۰۰۵۵	۱۵/۹۴	نزدیک صفر
درون روش‌ها	۰/۰۱۳	۳۹	۰/۰۰۰۳		
کل	۰/۰۲۴	۴۱			



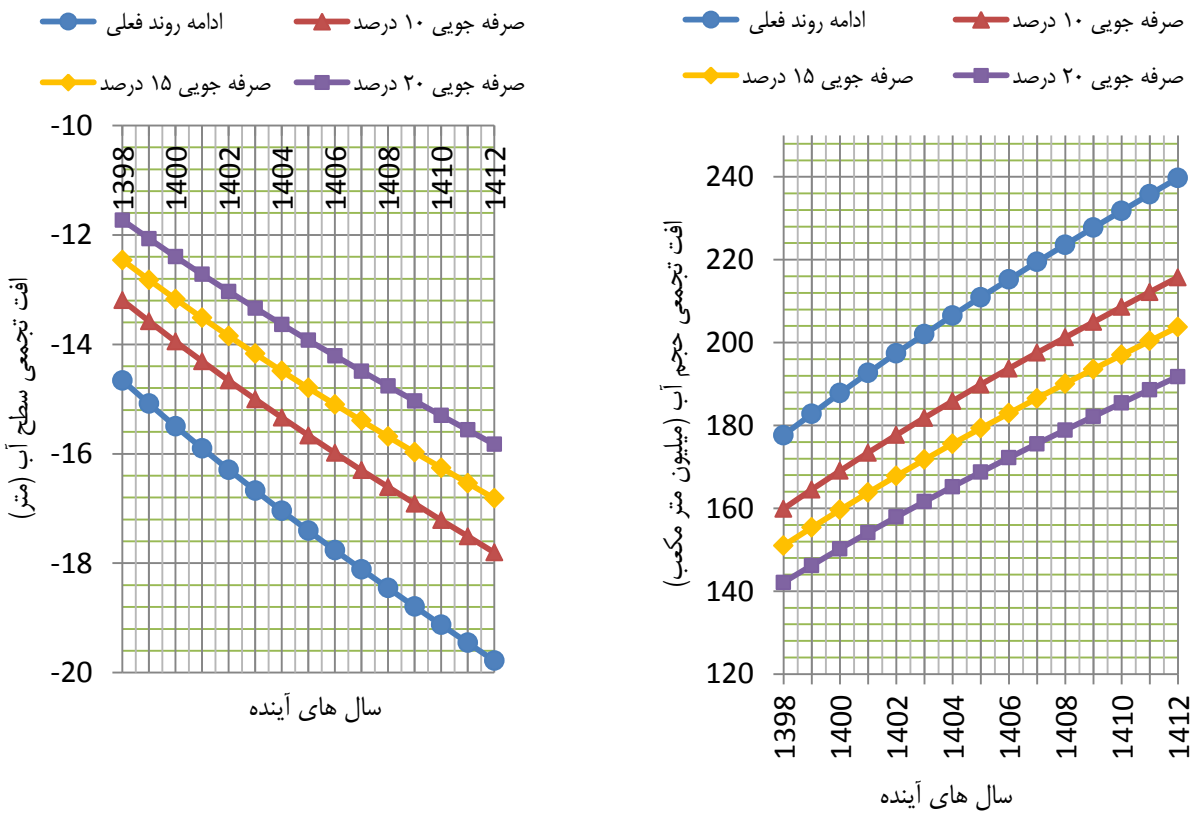
شکل ٦- مقادیر آینده افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در مرحله آینده‌پژوهی با الگوی اتورگرسیو میانگین متحرک تلفیق شده (سمت چپ)، الگوی رگرسیونی (وسط) و استنتاج فازی- عصبی (سمت راست) برای دوره ۹۸-۱۳۹۷ تا ۱۲-۱٤۱۱

در پژوهش‌های پیشین دهقانی و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از سه روش شبکه عصبی مصنوعی، سامانه استنتاجی فازی- عصبی و زمین آمار، درون‌یابی سطح آب زیرزمینی دشت قزوین را مقایسه نموده و سامانه استنتاج فازی عصبی با حداکثر ضریب همبستگی و حداقل میانگین مربعات خطا، دقیق‌تر از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و زمین آمار گزارش نموده‌اند. این سه روش را خلقی و حسینی (۲۰۰۹) برای درون‌یابی ضریب انتقال سفره به کار برده و سامانه استنتاج فازی عصبی را دقیق‌ترین روش اعلام نموده‌اند.

برای صیانت از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند، سناریو و شرایط مختلف صرفه‌جویی در مصرف آب از این منابع برمبنای روش استنتاج فازی— عصبی (به عنوان دقیق ترین روش) پیش‌بینی گردید. سناریوها شامل ادامه روند بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی (بدون برنامه صرفه‌جویی)، برنامه صرفه‌جویی در مصرف آب از منابع آب زیرزمینی با سه شرایط ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد صرفه‌جویی با شروع از سال ۱۳۹۸ خواهد بود که در آن صورت تغییرات سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند به‌صورت شکل ۷ است. در صورت اعمال برنامه صرفه جویی به‌اندازه ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، افت تجمعی سطح آب زیرزمینی در سال ۱۴۱۲ به ترتیب برابر ۱۷/۸۰-، ۱۶/۸۱-، ۱۵/۸۲- متر خواهد بود. درصورتی‌که با ادامه روند کنونی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمال سهند، افت تجمعی سطح آب در انتهای سال آینده پژوهی (۱۴۱۲) برابر ۱۹/۷۸- متر خواهد بود.

تغییرات کاهش حجم آب زیرزمینی در سناریوی ادامه روند بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی (بدون برنامه صرفه‌جویی) از سال ۱۳۹۸ تا سال ۱۴۱۲ از ۱۷۸ تا ۲۴۰ میلیون مترمکعب، تغییرات در سناریوی اعمال برنامه صرفه‌جویی به اندازه ۱۰ درصد، از ۱۶۰ تا ۲۱۶ میلیون مترمکعب، تغییرات در سناریوی اعمال برنامه صرفه‌جویی به اندازه ۱۵ درصد، از ۱۵۱ تا ۲۰۴ میلیون مترمکعب و تغییرات در سناریوی اعمال برنامه صرفه‌جویی به اندازه ۲۰ درصد، از ۱۴۲ تا ۱۹۲ میلیون مترمکعب خواهد بود (شکل ۷). برای استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند راهکارهای اساسی شامل افزایش میزان تغذیه یا کاهش میزان تخلیه از منابع آب زیرزمینی است. راهکارهایی عمومی ذیل برای صیانت از آب‌های زیرزمینی در این منطقه پیشنهاد می‌شود. بدیهی است جزییات و ویژگی‌های هریک از این راهکارها، نیازمند بررسی‌های امکان‌سنجی و کارشناسی دقیق است. الف) صرفه‌جویی در مصرف آب برای تولید بهینه محصولات کشاورزی، ب) استفاده از روش‌های بهبود کارآیی آبیاری، ج) افزایش نفوذ از بارش یا جریان‌های سطحی یا آب آبیاری، د) استفاده از فناوری‌های نوین برای بهبود شاخص بهره‌وری مصرف آب آبیاری، ه)

توسعه و ارتقاء مشارکت کشاورزان و بهره‌برداران در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، و) یکپارچه‌سازی اراضی کشاورزی با هدف کاهش قطعات کوچک زراعی و افزایش شاخص‌های عملکرد آبیاری، ز) تسطیح اراضی زراعی به ویژه در اراضی بزرگ و یک‌پارچه، ح) اطلاع‌رسانی عمومی و فرهنگ‌سازی لازم برای استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی، ط) آگاه‌سازی عمومی از شرایط بحرانی منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند، ی) اصلاح الگوی کشت متناسب با دانش بومی، شرایط اقلیمی، اقتصاد کشاورزی و استعداد اراضی کشاورزی و ملاحظات پایداری کشاورزی، ک) شناسایی چاه‌های کم بازده و برنامه‌ریزی برای استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی، ل) مطالعه، بررسی و اجرای طرح‌های مناسب آب‌خیزداری، م) مطالعه، بررسی و اجرای طرح‌های مناسب پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی، ن) امکان‌سنجی تلفیق یا تجمیع چاه‌ها و انتقال آب آن‌ها با لوله‌های مناسب



شکل ۷- تغییرات سطح و حجم آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند در سال‌های آینده و تأثیر سناریوهای صرفه‌جویی در بهره‌برداری از منابع آب

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند در دوره آماری ۵۰ ساله با کاربرد روش‌های سری‌های زمانی، رگرسیونی و سامانه استنتاج فازی– عصبی انجام گردید. دقیق‌ترین روش برای تحلیل و آینده‌پژوهی افت سطح آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند، روش سامانه استنتاج فازی – عصبی بود. نتایج نشان داد در طول ۳۵ سال گذشته سطح آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند بیش از ۱۴ متر (حدود ۱۷۰ میلیون مترمکعب) و به طور میانگین هر سال حدود ۴۰ سانتی‌متر افت داشته است. برای ۱۵ سال آینده، روند افت سالانه سطح آب زیرزمینی به‌صورت افزایشی خواهد بود. با فرض ادامه یافتن شرایط موجود بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند، میانگین افت سطح آب زیرزمینی، در سال ۱۴۱۲ به طور میانگین برابر ۲۰/۰۳ متر و معادل ۲۴۲/۸ میلیون متر مکعب خواهد بود. برای صیانت از منابع آب زیرزمینی در منطقه، سناریو و شرایط مختلف صرفه‌جویی در مصرف آب پیش‌بینی گردید. به عنوان مثال در سناریوی اعمال برنامه صرفه جویی به اندازه ۱۰ درصد، تغییرات کاهش حجم آب زیرزمینی از سال ۱۳۹۸ تا سال ۱۴۱۲ از ۱۶۰ تا ۲۱۶ میلیون مترمکعب خواهد بود. با توجه به وسعت آبخوان، اعمال سناریوهای پیشنهادی برای صرفه جویی در مصرف آب زیرزمینی می‌تواند در صیانت از منابع آب

منطقه، بسیار مفید باشد. برای استفاده پایدار از منابع آب زیرزمینی در دامنه شمالی سهند راهکارهای اساسی شامل افزایش میزان تغذیه یا کاهش میزان تخلیه از منابع آب زیرزمینی است. راهکارهایی عمومی با قابلیت اجرایی برای صیانت از آب‌های زیرزمینی در این منطقه پیشنهاد گردید. ادامه پژوهش با تحلیل تغییرات کیفی و آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی دامنه شمالی سهند برای تکمیل پژوهش حاضر مفید به نظر می‌رسد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی به خاطر تهیه امکانات و اعتبارات لازم برای اجرای این پژوهش، سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

بی‌نام، ۱۳۹۸. بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی کشور تا پایان سال آبی ۹۷-۱۳۹۶. شرکت مدیریت منابع آب ایران، معاونت مطالعات پایه و مدیریت حوضه‌های آبریز، وزارت نیرو. ایران

چیت‌سازان، م.، میرزائی، س.ی. و چینی‌پرداز، ر. ۱۳۸۶. منطقه‌بندی آبخوان شهرکرد با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی. مجله علوم. دانشگاه شهید چمران اهواز. قسمت ب. ۱ – ۱۵.

رحمانی، ع. ر.، و سدهی، م. ۱۳۸۳. پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت همدان- بهار با الگو سری‌های زمانی. مجله آب و فاضلاب. جلد ۱۵ شماره ۳ : ۴۲ – ۴۹.

رحیمی، د.، و غیور، ح. ۱۳۸۹. تحلیل دبی رودخانه کارون با تبدیل باکس-کاکس وسری‌های زمانی. مجله تحقیقات جغرافیایی، جلد ۲۵، شماره ۴ . ۱۳۵ – ۱۵۱.

زاهدی، م.، و قویدل رحیمی، ی. ۱۳۸۱. شناخت، طبقه‌بندی و پیش‌بینی خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل سری زمانی هالت- وینترز. فضای جغرافیائی.جلد ۶ ۱۹- ۴۸.

ناصری، ا.، و ناصری، آ. ۱۳۹۸. مصرف بهینه منابع آب زیرزمینی در حاشیه شمالی دریاچه ارومیه. انتشارات آرنا. ۶۴ ص.

نیرومند، ح. ۱۳۷۶. تحلیل سری‌های زمانی، روش‌های یک متغیری و چند متغیری (ترجمه). دانشگاه فردوسی مشهد.

Adhikary, S.K., Rahman, M., and Gupta, A.D. 2012. A stochastic modeling technique for predicting groundwater table fluctuations with time series analysis. International Journal of Applied Science and Engineering Research 1(2): 238-249

Ansarifar, M.M., Salarijazi, M., Ghorbani, K., and Kaboli, A.R. 2020. Simulation of groundwater level in a coastal aquifer. Marine Georesources & Geotechnology 38(3): 257-265.

Brockwell, P.J., and Davis, R.A. 1996. Introduction to time series and forecasting. Springer-Verlag, New York, Inc. p.449

Chatfield, C. 1996. The analysis of time series: an introduction. CRC press; p.205.

Choubin, B., and Malekian, A. 2017. Combined gamma and M-test-based ANN and ARIMA models for groundwater fluctuation forecasting in semiarid regions. Environmental Earth Sciences 76(15), p.538.

Chow, V.T., and Kareliotis, S.J. 1970. Analysis of stochastic hydrologic systems. Water Resources Research 16: 1569-1582.

Dehghani, A.A., Asgari, M., and Mosaedi, A. 2009. Comparison of geostatistics, artificial neural networka and adaptive neuro-fuzzy inference system approaches in groundwater level interpolation (case study: Ghazvin aquifer). J. Agric. Sci. Natur. 16: 517-536

Gibrilla, A.G., Anornu, G., and Adomako, D. 2018. Trend analysis and ARIMA modeling of recent groundwater levels in the White Volta River basin of Ghana. Groundwater for Sustainable Development 6:150-163.

Hatch, C.E., Fisher, A.T., Ruehl, C.R., and Stemler, G. 2010. Spatial and temporal variations in streambed hydraulic conductivity quantified with time-series thermal methods. Journal of Hydrology 389(3-4):276-288.

Irvine, D.J., Cranswick, R.H., Simmons, C.T., Shanafield, M.A., and Lautz, L.K. 2015. The effect of streambed heterogeneity on groundwater-surface water exchange fluxes inferred from temperature time series. Water Resources Research 51(1): 198-212.

Jang, J.S.R., and Sun, C.T. 1997. Neuro-fuzzy modeling and control, proceeding of the IEEE. 83(3):378-406.

Johnson, T.C., Slater, L.D., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F.D., and Elwaseif, M. 2012. Monitoring groundwater-surface water interaction using time-series and time-frequency analysis of transient three-dimensional electrical resistivity changes. Water Resources Research 48(7).

Khashei-Siuki. A., Ghahraman, B., and Kouchakzadeh, M. 2013. Comparison of ANN, Anfis and regression models to estimate groundwater level of Neyshaboor aquifer. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 1(7):10-22

Science1994; IRI. 5 (1& 2): 49-58.

Sen, Z. 1998. Small sample estimation of the time average in climate time series. International Journal of Climatology 18: 1725-1732.

Siadat, H. 2000. Iranian agriculture and salinity. Soil and Water Research Institute of Iran, Tehran, Iran, p.103.

Takagi, T., and Sugeno, M. 1985. Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control IEEE Trans. Syst., Man, Cybern 15(1):116-132.

Taweesin, K., Seeboonruang, U., and Saraphirom, P. 2018. The Influence of Climate Variability Effects on Groundwater Time Series in the Lower Central Plains of Thailand. Water 10(3), p.290.

Vandersteen, G., Schneidewind, U., Anibas, C., Schmidt, C., Seuntjens, P., and Batelaan, O. 2015. Determining groundwater-surface water exchange from temperature-time series: Combining a local polynomial method with a maximum likelihood estimator. Water Resources Research 51(2): 922-939.

Vangeer, F.C. 1996. An estimation of Box Jenkins transfer noise models for spatial interpolation of ground water head series: Journal of Hydrology 192: 65-80.

Yang, Q., Wang, Y., Zhang, J., and Delgado, J. 2017. A comparative study of shallow groundwater level simulation with three time series models in a coastal aquifer of South China. Applied Water Science 7(2): 689-698.

Kholghi, M., and Hosseini, S.M. 2009. Comparison of groundwater level estimation using neuro-fuzzy and ordinary kriging. Journal of Environmental Modeling and Assessment 14(6):729-753.

Krueger, E., Prior, S.A., Kurtener, D., Rogers, H.H., and Runion, G.B. 2011. Characterizing root distribution with adaptive neuro-fuzzy analysis. International Agrophysics 25: 93-96.

Lalehzari, R., Boroomand Nasab, S., Moazed, H., Haghighi, A., and Yaghoobzadeh, M. 2020. Simulation-optimization modeling for water resources management using NSGAII-OIP and MODFLOW. Irrigation and Drainage 69(3): 317-332.

Peterson, R.N., Santos, I.R., and Burnett, W.C. 2010. Evaluating groundwater discharge to tidal rivers based on a Rn-222 time-series approach. Estuarine, Coastal and Shelf Science 86(2):165-178.

Rakhshandehroo, G.R., and Amiri, S.M. 2012. Evaluating fractal behavior in groundwater level fluctuations time series. Journal of hydrology 464:550-556.

Rau, G.C., Andersen, M.S., and Acworth, R.I. 2012. Experimental investigation of the thermal time-series method for surface water-groundwater interactions. Water Resources Research 48(3).

Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V.M., and Lane, W.L. 1980. Applied modeling of hydrologic time series. Water Resources publications. Littleton. Colorado, p.484.

Samani, N., Raeissi, E., and Soltani, A. 1994. Modeling the stochastic behavior of the Fars River. J.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2188-2202

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۰۲-۲۱۸۸

Prediction of Variations of Groundwater Levels for the North of Sahand with Neural-Fuzzy Inference System, Time Series and Regression

A. Nasseri[1*], A. Nasseri[2]

Recived: Jul.21, 2020 Accepted: Oct.25, 2020

Abstract

Unsustainable application of groundwater in the north of Sahand (East Azarbaijan, Iran) caused a decline more than 14m in water level from 1983 (1362) by now. Therefore, the optimum and sustainable utilization of this resource is a management necessity which is depending on modeling, trend analysis and future study of its how application. The present study was conducted with the aim of groundwater level analysis in the north of Sahand with time series, regression and neural-fuzzy inference system methods. The modeling, test and future studying were made for 50 years which 35 years (from 1983 to 2018) were applied to model and test; and 15 years (from 2019 to 2033) were applied to future study. Results showed that based on indices of performance evaluations, neural-fuzzy inference system produced more precise than other methods to analyze groundwater levels. The groundwater level declined more than 14m with an annually of 40cm and its will be 20.03m in 2034 with current conditions of applications of groundwater. Some conservational scenarios are recommended to improve consumption patterns for groundwater resource in this plain.

Keywords: Groundwater, Future study, Fuzzy logic, Neural-fuzzy inference system, Neural network, Time series.

1- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran
(*- Corresponding Author Email: nasseri_ab@yahoo.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۱۶-۲۲۰۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2203-2216

مقاله پژوهشی

اثر همزمان کم‌آبیاری و جریان ترجیحی بر نگهداشت باکتری *ایشریشیاکولی* در خاک

زینب احمدی مقدم[۱*]، سیدحسن طباطبائی[۲]، و عزیزا... ابراهیمی کهریزسنگی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۴

چکیده:

آلودگی میکروبی یکی از انواع آلودگی منابع آب است که با سلامت جانداران در ارتباط است. در این پژوهش انتقال باکتری *ایشریشیاکولی* در شرایط کم‌آبیاری و در حضور جریان‌های ترجیحی بررسی شده است. سطوح آبیاری ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد ظرفیت زراعی و تعداد دفعات آبیاری ۵ مرتبه انتخاب شدند. یک مجرای جریان ترجیحی از شن ریزدانه در وسط ستون‌های خاک با بافت لوم شنی به صورت مصنوعی ایجاد شد. سویه باکتری استاندارد ATCC-25922 به صورت سوسپانسیون به سطح خاک تزریق شد. تعداد باکتری لایه‌های مختلف خاک به روش شمارش زنده تعیین شد. نتایج نشان داد با کاهش سطح آبیاری، میزان عمق انتقال باکتری کاهش می‌یابد و بیشترین تجمع باکتری در سطح خاک اتفاق می‌افتد به طوری که در تیمار با سطح آبیاری ۶۰ درصد ظرفیت زراعی حدود ۷۰ درصد میزان غلظت باکتری در عمق پنج سانتی‌متری خاک مشاهده شد. از این رو در شرایط کم‌آبیاری برای جلوگیری از انتقال آلودگی باکتریایی به آب‌های سطحی، باید توجه ویژه گردد. سطح ویژه و پتانسیل ماتریک بیش‌تر در اطراف ناحیه جریان ترجیحی، سبب افزایش میزان غلظت باکتری در مرز بین خاک با اطراف ناحیه ترجیحی شد. متوسط میزان غلظت باکتری در لایه سطحی خاک (پنج سانتی‌متری) در سطوح آبیاری ۱۲۰و ۱۰۰ درصد در شرایط جریان ترجیحی در محل نزدیک به جریان ترجیحی حدود ۲۵ و ۱۴ درصد نسبت به تیمار نظیرش در حالت بدون جریان ترجیحی بیش‌تر شد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی آب، *ایشریشیاکولی*، کم‌آبیاری، پیکره خاک.

مقدمه

اطلاع از وضعیت حرکت و تجمع آلاینده‌ها در خاک و پیامد انتقال آن‌ها به منابع آب‌های زیرزمینی و چرخه غذایی انسان، از جمله مسائل مهمی است که پژوهش‌های زیادی را در دهه اخیر متوجه خود ساخته است. آلاینده‌های میکروبی از جمله آلودگی‌های است که بر سلامت جانداران اثرگذار است و از طریق پساب و کودهای دامی در کشاورزی به منابع آب وارد شده و با تجمع در سطح خاک سبب انتقال باکتری‌ها به محیط اطراف می‌شوند (Bradford et al., 2014). استفاده از فاضلاب برای آبیاری باید مطابق با استانداردها باشد تا بارآلودگی میکروبی سبب آلودگی‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی نشود (Tabatabaei et al., 2020). عامل اصلی بیماری‌های میکروبی در آب پاتوژن‌ها هستند. عمومی‌ترین راه انتقال پاتوژن‌ها به بدن موجودات زنده از طریق آب آشامیدنی است. پاتوژن‌های موجود در فاضلاب‌های خام را می‌توان به سه دسته باکتری‌ها، ویروس‌ها، پروتوزوا وکرم‌های روده‌ای تقسیم کرد (Talon et al., 2005). کلیفرم‌های روده‌ای گروه بزرگی از باکتری‌های بی‌هوازی اختیاری، گرم منفی، بدون اسپور و میله‌ای شکل هستند این دسته از باکتری‌ها ناشی از مدفوع جانوران خونگرم هستند. وجود این باکتری در آب نشان‌دهنده ناکافی بودن فرآیند تصفیه و همچنین آلودگی آب به مدفوع انسان و حیوان هستند. اندازه‌گیری غلظت عوامل بیماری‌زای میکروبی اغلب مشکل است به همین دلیل از ریزجانداران شاخص برای سنجش آن‌ها استفاده می‌شود ریزجانداران شاخص به نحوی انتخاب می‌شوند که اندازه‌گیری آن‌ها آسان است و به وفور در فضولات انسانی و حیوانی وجود دارند و احتمال وجود آن‌ها نشان‌دهنده حضور پاتوژن‌ها است. از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به *ایشریشیاکولی* اشاره کرد.

ویژگی‌های خاک مانند ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک، اسیدیته خاک، دما، بافت و ساختمان خاک،رطوبت خاک، اسیدیته خاک و مواد آلی در خاک نقش اساسی در دوام و نگهداشت ریزجانداران هم‌چون باکتری‌ها دارد. هر چه میزان موادآلی در خاک

۱- دانشجوی دکتری، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۳- استادیار، بازنشسته گروه میکروبیولوژی دانشگاه شهرکرد
(*- نویسنده مسئول: Email: Zahmadimoghadam2014@gmail.com)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.8.9

نسبت به مواد معدنی بیشتر باشد بقای باکتری‌های کلی‌فرم مدفوعی افزایش می‌یابد (Tate, 1978). در خاک‌های دست‌نخورده چون ساختمان خاک حفظ می‌شود میزان انتقال باکتری بیش‌تر از خاک‌های دست‌خورده است (زند سلیمی و همکاران، ۱۳۸۵). دما و اسیدیته خاک از عوامل موثر بر میزان رشد باکتری هستند و نتایج نشان داده‌است که در محیط اسیدی میزان زنده‌مانی باکتری کم‌تر است (Kemp et al., 1992). قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض نور خورشید سبب از بین رفتن عوامل بیماری‌زا، به ویژه در سطح خاک می‌شود. گرمای بیش از حد نور خورشید با اثر روی اسیدهای نوکلئیک ریزجانداران سبب کاهش زنده‌مانی آن‌ها می‌شود (Wiliam, 2012). اثر دما به هدایت حرارتی خاک وابسته است در خاکی که دارای هدایت حرارتی بیش‌تری است نسبت به خاک با هدایت حرارتی کم‌تر سریع‌تر سرد و گرم می‌شود در خاک‌های با بافت سبک این امر مشهودتر است چون خاک‌های با بافت سبک دارای هدایت حرارتی بیش‌تری هستند (Bonan,2002). ترک‌زبان و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی اثر میزان رطوبت خاک و شدت جریان‌های مختلف بر نگهداشت باکتری بیان کردند با کاهش میزان محتوای آب میزان احتباس باکتری در خاک افزایش می‌یابد و با افزایش میزان شدت جریان، نگهداشت باکتری در خاک کمتر می‌شود(Torkzaban et al., 2008). نتایج نشان داده‌است که میزان باکتری با گذر زمان در خاک کاهش می‌یابد و تجمع باکتری در لایه سطحی خاک بیش‌تر از اعماق است (Stocker et al., 2015). در شرایط رطوبتی نزدیک به اشباع تعداد باکتری‌ها و میزان زنده‌مانی آن‌ها نسبت به شرایط غیراشباع بیش‌تر است (مقصودی، ۱۳۸۸ و Mubiru et al., 2000).

منافذ بزرگ فضاهای خالی هستند که راه‌ها و معابری برای جریان پیشرو فراهم می‌کنند (Skopp, 1981). خروج آب یا زهکشی از منافذ درشت خاک بسیار سریع‌تر از منافذ با قطر کوچک انجام می‌شود (Ehlers and Goss, 2003). در شرایطی که خاک در حالت اشباع باشد احتمال ایجاد جریان‌های ترجیحی بیشتر است. منافذ درشت می‌توانند در طی فرایندهای فیزیکی و زیستی در خاک ایجاد شوند از فرایندهای فیزیکی می‌توان به انجماد و انبساط آب و از فرایندهای زیستی سوراخ شدن خاک در اثر فعالیت‌های موجودات زیر خاکی و همچنین نفوذ ریشه‌ها در درون خاک اشاره کرد. نقش اساسی جریان‌های ترجیحی این است که می‌توانند حجم زیادی از آب را در پیکره خاک وارد کنند و با حرکت عمیق‌تر، آلاینده را در درون محیط پیستونی شکل در پروفیل خاک انتقال دهند (Ehlers and Goss, 2003). در حضور جریان‌های ترجیحی به دلیل سرعت بیش‌تر میزان انتقال باکتری بیش‌تر است. تغییرات سرعت جریان میان منافذ درشت و پیکره خاک یا میان لایه‌های خاک با هدایت هیدرولیکی متفاوت عامل مهم انتقال آلاینده‌ها در سیستم‌های جریان ترجیحی است (Allaire et al., 2002a and 2002b). جریان ترجیحی اغلب شامل منافذ درشت بوده و دلالت بر جریان در میان منافذ نسبتاً بزرگ شامل: کانال‌ها، شکاف‌ها، فضاهای نیمه‌بزرگ موجود در درون خاک دارد. در این منافذ نیروی نگهداشت آب عمدتاً کمتر از نیروی ثقل است (Ehlers and Goss, 2003). ابوآشور و همکاران انتقال باکتری را در ستون‌های خاک و با ایجاد جریان ترجیحی را بررسی کردندو نتایج نشان داد تعداد باکتری خروجی از ستونی که منافذ درشت داشته، نسبت به ستون دیگر بسیار بیشتر بود (Abu-Ashour et al., 1998). بردفورد و همکاران در پژوهشی انتقال باکتری ایشریشیاکولی را در شرایط اشباع بررسی و بیان کردند وجود منافذ درشت و درز و شکاف‌ها مقدار نگهداشت فیزیکی را کاهش داده و سبب انتقال باکتری به لایه های زیرین می‌گردد (Bradford et al., 2006). احتمال انتقال باکتری در ماکروپورها در خاک‌های مرطوب بیش‌تر است و به همین دلیل باکتری‌های معلق از قطر منافذ بزرگ‌تر عبور خواهند کرد و سبب انتقال باکتری به عمق‌های پایین‌تر در شرایط اشباع نسبت به شرایط غیراشباع می‌گردد (Unc and Goss, Wang et al., 2014; 2003). وانگ و همکاران اثر جریان ترجیحی را در انتقال باکتری تحت شرایط محلول‌هایی با قدرت یونی مختلف بررسی کردند آن‌ها شکاف‌هایی را به صورت مصنوعی برای بررسی جریان ترجیحی ایجاد کردند و نتایج نشان داد که جریان‌های ترجیحی سبب انتقال بیشتر باکتری می‌شوند و با افزایش میزان قدرت یونی میزان نگهداشت باکتری در خاک بیشتر می‌گردد (Wang et al., 2013). اخوان و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی اثر ماکروپورهای ایجاد شده در ستون‌های خاک به صورت مصنوعی با قطر متفاوت دریافتند حضور جریان‌های ترجیحی سبب انتقال بیش‌تر باکتری در ستون‌های‌خاک در شرایط اشباع می‌شود. جریان‌های ترجیحی به ساختمان خاک و پیوسته بودن منافذ خاک وابسته است به گونه‌ای که ممکن است خاکی سطوح جذب بالاتری داشته باشد ولی به دلیل ساختمان منسجم آن میزان پالایش باکتری کمتر باشد (زند سلیمی و همکاران، ۱۳۸۵). گلبداغی (۱۳۹۰) دریافتند که گیاهان دارای ریشه‌های طول و قطر بیش‌تر نسبت به گیاهان با ریشه‌های با عمق‌کمتر سبب ایجاد جریان‌های ترجیحی در محیط خاک می‌شوند و عمق انتقال باکتری را در شرایط اشباع و غیراشباع افزایش می‌دهند.

فرایندهای مهم و اثرگذار بر نگهداشت باکتری در خاک جذب (Attachment)، رهاسازی (Detachment) و پالایش فیزیکی (Straining) است. پالایش فیزیکی یکی از مکانیسم‌های مهم بر نگهداشت کلوئیدها و پاتوژن‌ها است و بیش‌تر در مناطق دارای لبه-های تیز و دارای منافذ ریز که قادر به عبور یک یا چندین کلوئید هستند، اتفاق می‌افتد (Sasidharan et al., 2015). در شرایط رطوبتی اشباع و نزدیک به اشباع انتقال باکتری به اعماق بیش‌تر است و پالایش فیزیکی باکتری در شرایط غیراشباع نسبت به شرایط اشباع بیش‌تر است (Powelson and Mills, 2001).

یکی از راهکارهای مدیریتی در مواقع کمبود منابع آب استفاده از روش کم‌آبیاری است. در واقع کم‌آبیاری کاهش میزان آب با پذیرش کاهش مقدار محصول است و استراتژی بهینه‌سازی آب در مرحله حساس رشد است. کم‌آبیاری سبب افزایش کارایی میزان مصرف آب می‌گردد از مزایای دیگر کم‌آبیاری می‌توان کاهش شستشوی ریزمغذی‌ها، افزایش کیفیت محصول، افزایش محصول در واحد سطح، کاهش طول دوره کاشت و سازگاری گیاه با شرایط کم‌آبی را نام برد (Lehmann et al., 2011). روش‌های اعمال کم‌آبیاری به وسیله تغییرات در دور و حجم آبیاری نسبت به آبیاری کامل قابل اعمال است. انتخاب هر کدام از این روش‌ها بستگی به شرایط آب هوایی منطقه، نوع مرحله رشد گیاه، کیفیت آب و خاک دارد. پژوهش‌های کمی در زمینه اثر کم‌آبیاری بر انتقال باکتری انجام شده است. لی و ون (۲۰۱۶) به بررسی اثر مدیریت آبیاری با پساب بر انتقال باکتری درشرایط کشت مختلف پرداخته و دریافتند که با اعمال کم‌آبیاری میزان غلظت باکتری در عمق پنج سانتی‌متری سطح خاک با آبیاری قطره‌ای سطحی افزایش غیرمعنی‌دار می‌یابد و اعلام کردند با اعمال کم‌آبیاری میزان آلودگی باکتری با روش آبیاری قطره‌ای زیر سطحی نسبت به آبیاری سطحی کاهش معنی‌داری دارد (Li and Wen, 2016).

با توجه به کمبود منابع آب، استفاده از روش‌های کم‌آبیاری امروزه در حال توسعه است ولی استفاده از این روش‌ها باید در بررسی انتقال آلاینده نیز مورد ارزیابی قرار گیرد تا آثار آن بر کیفیت خاک و آب لحاظ گردد. جریان‌های ترجیحی نیز به دلایل مختلف در سطح مزرعه ایجاد می‌شوند و با توجه به اهمیت آن‌ها در انتقال آلاینده‌ها نیاز است در شرایط واقعی آبیاری در مزرعه و کم‌آبیاری مورد ارزیابی قرار گیرند. در پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده بیش‌تر انتقال باکتری در شرایط اشباع بررسی شده است و توجهی به شرایط آبیاری واقعی در مزرعه و روش‌های مدیریتی آبیاری صورت نگرفته است لذا در این پژوهش سعی شده است با توجه به اهمیت جریان‌های ترجیحی با اعمال سطوح آبیاری مختلف نگهداشت باکتری در پروفیل خاک و در شرایط جریان ترجیحی بررسی گردد.

مواد و روش‌ها

مشخصات خاک و ستون‌ها

آزمایش‌ها درون ستون‌هایی از جنس (پی وی سی) با قطر ۱۶۰ و طول ۳۰۰ میلی‌متر در فضای باز دانشگاه شهرکرد انجام شدند. برای جلوگیری از جریان‌های جانبی در جداره‌های ستون، دیواره‌های ستون با پارافین مایع آغشته شدند. کف ستون‌ها با توری پوشانده شد و کمی شن با توجه به دانه‌بندی خاک به عنوان زهکش در کف ستون‌ها ریخته شد. خاک با بافت لوم شنی مورد استفاده در این پژوهش از اراضی دانشگاه شهرکرد تهیه شد و ابتدا خاک هوا-خشک گردید و از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل: بافت خاک با روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، جرم‌مخصوص ظاهری به روش استوانه‌های نمونه‌بردار (Black and Hartge, 1986)، جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر، pH به وسیله دستگاه pHسنج، ظرفیت زراعی و رطوبت نقطه پژمردگی دائم با دستگاه صفحات فشاری، ماده آلی با روش اکسیداسیون تر (Walkly and Black, 1983)، قطر ذرات خاک با روش دانه‌بندی، سطح ویژه ذرات با روش BET و هدایت هیدرولیکی اشباع با روش بار ثابت (KLute, 1986) تعیین شدند.

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. میزان رطوبت ظرفیت‌زراعی و پژمردگی دایم آن به ترتیب ۲۷ و ۱۰ درصد حجمی، تخلخل ۴۳ درصد و میزان هدایت هیدرولیکی ۰/۳۰ سانتی‌متر بر دقیقه به دست آورده شد. میزان ایشریشیاکولی در خاک قبل از انجام آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد که خاک فاقد باکتری ایشریشیاکولی بوده است. در جدول ۲ برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک آورده شده است. آب برای آبیاری از آب شرب دانشگاه شهرکرد تأمین شد که منبع آن آب شهری است و دارای میزان هدایت الکتریکی ۰/۳ دسی‌زیمنس بر متر و واکنش ۷/۵ است.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک و شن مورد مطالعه

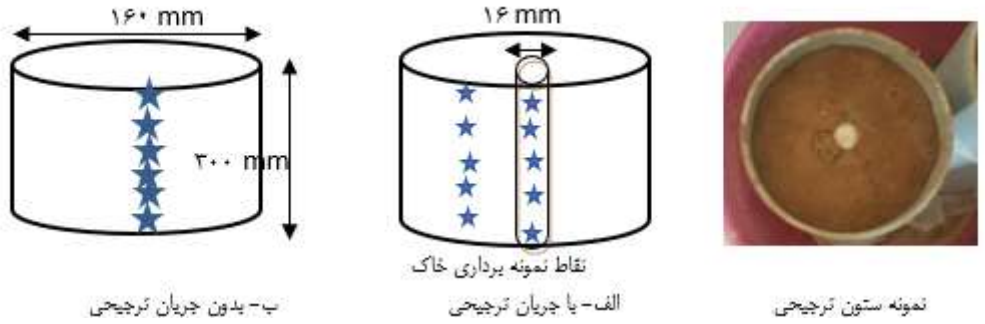
مکان استفاده	بافت خاک	ظرفیت زراعی	رطوبت در نقطه پژمردگی دایم	چگالی ظاهری	هدایت هیدرولیکی	موادآلی	سطح ویژه	قطر متوسط ذرات	تخلخل
	–	درصد حجمی	درصد حجمی	g/cm^3	$cm.min^{-1}$	%	$m^2.g^{-1}$	میلی متر	درصد
پیکره خاک	لوم شنی	۲۷	۱۰	۱/۵	۰/۳۰	۲/۱	۶/۲	۰/۱۲	۴۳/۲
ناحیه ترجیحی	شنی	۱۸	۵	۱/۸	۴	۰	–	۱	۳۰/۷

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه

pH	هدایت الکتریکی	$Mg^{2+}+Ca^{2+}$	Cl^-	Na^+	SAR
-	dS/m	meq. L^{-1}	meq. L^{-1}	meq. L^{-1}	
۶/۹۷	۰/۲۳	۰/۸	۰/۲	۱/۰۸	۱/۷

برقراری جریان ترجیحی

چون بررسی و تحلیل شرایط جریان ترجیحی در شرایط واقعی سخت و خیلی پیچیده است مکان‌های جریان ترجیحی به صورت مصنوعی ایجاد می‌شوند ازجمله می‌توان به پژوهش خالد و همکاران(۲۰۱۸)، وانگ و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد در این پژوهش نیز جریان‌های ترجیحی به صورت مصنوعی ایجاد شدند. برای برقراری جریان ترجیحی ستون‌ها از کف در ظرف آبی قرار داده شدند و لوله به قطر ۱۶ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر در وسط ستون جای گذاری گردید و خاک لوم شنی در لوله خارجی با قطر ۱۶۰ میلی‌متر ریخته شد. خاک در ستون‌ها به صورت لایه لایه ریخته شد که برای هر لایه پنج‌سانتی‌متری با توجه به میزان جرم مخصوص ظاهری خاک، جرم خاک برای پرکردن پنج سانتی‌متری ستون محاسبه گردید و پس از تعیین جرم خاک مورد نیاز، دقیقاً همان مقدار خاک به وسیله ترازو توزین و داخل استوانه ریخته شد و پس از پهن کردن خاک در کف ستون، به سطح خاک به وسیله کوبه‌ای ضربه زده شد، تا سطح خاک فقط به اندازه ۵ سانتی‌متر از کف بالا آمده باشد پس ستون‌ها از داخل آب برداشته می‌شود و بعد از خارج شدن آب اضافه از انتهای ستون و تثبیت خاک در لوله با قطر ۱۶۰ میلی متر، لوله ۱۶ میلی‌متر به ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر به آرامی بیرون کشیده می‌شود تا خاک اطراف آن ریزش پیدا نکند و سپس با شن ریزدانه با کمک یک قیف پر گردید (Wang et al., 2013) (شکل ۱-الف). ستون‌ها در محیط قرار داده شدند تا میزان رطوبت اولیه آن‌ها به رطوبت سهل‌الوصول برسد. در ستون‌هایی هم بدون شرایط جریان ترجیحی از خاک به صورت لایه لایه پر شدند (شکل۱-ب) و رطوبت اولیه این ستون‌ها به رطوبت مرز پایین رطوبت سهل‌الوصول رسانده شد.



شکل ۱- نمایی از ستون‌های آزمایش

سطوح آبیاری

سطوح آبیاری T120، T100، T80 و T60 انتخاب شدند و با برقراری جریان با دبی ثابت در واحد سطح آبیاری شدند. تیمار ۱۰۰ درصد تیمار شاهد بود که به اندازه رطوبت ظرفیت زراعی آبیاری شدند و در تیمار ۱۲۰ درصد ۲۰ درصد بیش‌تر از تیمار T100 و تیمارهای ۶۰ و ۸۰ درصد نیز به ترتیب ۴۰ و ۲۰ درصد کمتر از تیمار T100 آبیاری شدند. رطوبت اولیه ستون‌ها در آبیاری اول برابر با مرز پایین رطوبت سهل‌الوصول در تیمار ۱۰۰ درصد بود. برای سنجش رطوبت خاک از دستگاه رطوبت سنج SM300 استفاده شد که دارای میزان دقت مطلوبی در مقایسه اندازه‌گیری با رطوبت به روش وزنی بود. ستون‌ها پنج مرتبه آبیاری شدند و مبنای زمان آبیاری بر اساس رطوبت اولیه تیمار سطح آبیاری ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه بود. زمانی که متوسط رطوبت آن به مرز پایین رطوبت سهل‌الوصول نزدیک بود آبیاری بعدی انجام می‌شد. تاریخ تزریق باکتری و اعمال آبیاری‌ها ۱۷ شهریور، ۲۱ شهریور، ۲۵ شهریور، ۲۹ شهریور و ۲ مهر سال ۱۳۹۸ در فضای باز دانشگاه شهرکرد انجام شد.

سوسپانسیون باکتری

برای تهیه سوسپانسیون باکتری ایشریشیاکولی از سویه بی خطر ATCC-25922 با قطر متوسط ۳ میکرومتر و طول حدود ۱۰ میکرومتر استفاده شد و ابتدا روی محیط کشت نوترینت‌آگار تزریق شد و این محیط کشت‌ها در دمای ۳۷ درجه سلسیوس داخل انکوباتور به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند و سپس کلنی‌های رشد کرده برداشته و داخل محلول ۱۰ میلی‌مولار کلرید سدیم ریخته شدن. بعد از تهیه سوسپانسیون اولیه با دستگاه اسپکتوفتومتر طول موج ماکزیمم برای غلظت باکتری ایشریشیاکولی در محلول سوسپانسیون تعیین شد و با

تکرار سوسپانسیونی تهیه شد که میزان اولیه باکتری‌ها در هر میلی‌لیتر آن دارای غلظت متوسط ۱×۱۰^{۸} سلول باشد و به ازای این سوسپانسیون میزان چگالی نوری (Optical Density, OD) آن با دستگاه اسپکتوفتومتر (Unico UV-1200) قرائت شد تا برای هر مرحله تهیه سوسپانسیون نمونه‌ای از آن داخل دستگاه اسپکتوفتومتر قرار داده شود و اگر به میزان مورد نظر رسید تزریق باکتری به خاک انجام می‌شد. پالس ورودی باکتری به میزان ۶۰ سی‌سی (۱۰ درصد حجم بیشترین سطح آبیاری) و قبل از هر آبیاری روی سطح خاک به صورت یکنواخت ریخته شد (Sepehrnia et al., 2018).

بعد از آبیاری‌ها با تقسیم ارتفاع ستون به شش لایه مساوی، از هر لایه برای شمارش باکتری‌های ایشریشیاکولی باقیمانده نمونه‌برداری گردید. نمونه‌برداری از ستون‌های جریان ترجیحی در دو مکان داخل پیکره خاک و نزدیک به موقعیت جریان ترجیحی انجام شد (شکل ۱) و در ستون‌های بدون جریان ترجیحی فقط نمونه از پیکره خاک در اعماق مختلف گرفته شد. اعماق نمونه‌برداری ۲/۵، ۷/۵، ۱۲/۵، ۱۷/۵، ۲۲/۵ و ۲۷/۵ سانتی‌متر انتخاب شدند و در صورت زه‌آب خروجی میزان غلظت باکتری در زه آب نیز سنجیده شد. برای تعیین جمعیت باکتری در نیمرخ خاک، از روش شمارش زنده استفاده گردید. بدین منظور یک گرم خاک از نمونه ها برداشته و به آن‌ها ۹ سی‌سی آب مقطر اضافه شد و هر نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در شیکر قرار داده شد (Guber., 2005). بعد از تهیه سری‌های رقت از نمونه‌های خاک، ۱۰۰ میکرولیتر از رقت‌های مختلف روی محیط کشت آئوزین متیلین بلو (EMB) کشت شد. پلیت‌ها در دمای ۳۷ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند و سپس تعداد کلنی‌های باکتری شمارش و ثبت شد (Connie et al., 2011).

سنجش بیلان جرم باکتری در پروفیل خاک

برای مقایسه بهتر نتایج از نسبت S/C0 استفاده شد که S میزان نگهداشت باکتری (کلنی در میلی‌لیتر) در هر عمق و C0 میزان غلظت اولیه باکتری ورودی است. برای مقایسه میزان نگهداشت[1] در اعماق مختلف پروفیل خاک در تیمارهای مختلف میزان کل باکتری در تیمارهای بدون جریان ترجیحی (چون فقط شامل یک منحنی توزیع باکتری در پروفیل خاک هستند) با محاسبه مساحت زیر منحنی محاسبه گردید و با نسبت گرفتن میزان نگهداشت در هر عمق (S) به میزان کل باکتری ورودی در خاک، شاخص نگهداشت باکتری در هر عمق محاسبه گردید:

$$SI_z = \frac{S_z}{C_0} \qquad (۱)$$

در این رابطه S_z سطح زیر منحنی نگهداشت باکتری در عمق z (کلنیCFU) و C0 کل باکتری ورودی به ستون خاک است.

ضریب پالایش باکتری

میزان فیلتر شدن باکتری در خاک (در صورت وجود زه‌آب خروجی) با محاسبه ضریب پالایش سنجید که رابطه آن به شکل زیر است. که در این رابطه C0 میزان غلظت باکتری ورودی و C میزان غلظت باکتری در زه‌آب خروجی در عمق Z است (ماتس و همکاران، ۱۹۸۸).

$$\gamma_f = Ln(\frac{C_0}{C})\frac{1}{z} \qquad (۲)$$

نتایج و بحث

تغییرات رطوبتی در ستون‌های آزمایش و دمایی در محیط آزمایش

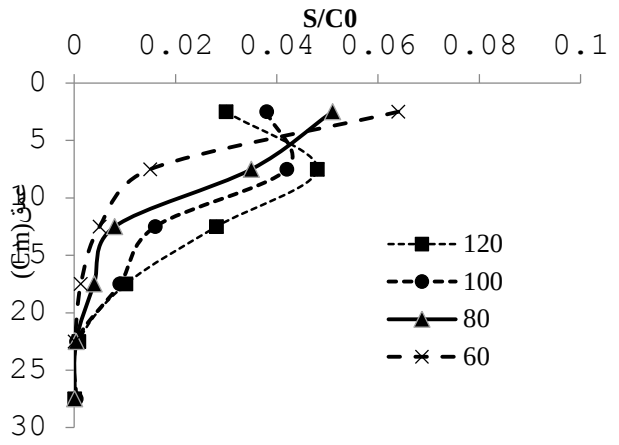
متوسط ماکزیمم دما، متوسط دما و متوسط حداقل دما در محل انجام آزمایش در طول دوره پنج آبیاری ۳۲/۲، ۱۹/۲ و ۶ درجه سلسیوس بود. متوسط رطوبت خاک قبل از آبیاری در تیمارهای T60، T80، T100 و T120 ۱۵، ۱۷/۰، ۱۷/۸ و ۱۹/۲ و بعد آبیاری در تیمارهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ به ترتیب ۲۲/۰۷، ۲۵/۸۲، ۲۸/۰۳ و ۳۱/۵ درصد حجمی بود.

انتقال باکتری (بدون جریان ترجیحی) بعد از آبیاری اول

شکل ۲ میزان نگهداشت باکتری در پیکره خاک و در ستون‌های بدون جریان ترجیحی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل میزان غلظت باکتری *ایشرشیاکولی* با افزایش عمق کاهش یافته و این کاهش در تیمارهای کم‌آبیاری T80 و T60 قابل توجه است. بیش‌ترین تجمع باکتری در تمامی تیمارها در لایه سطحی خاک اتفاق افتاده است. میزان نسبت S/C0 در عمق ۲/۵ سانتی‌متری در تیمار T60 نسبت به تیمار آبیاری T120، T100 و T80 به ترتیب ۲/۱۱، ۱/۶۸ و ۱/۲۵ برابر بیش‌تر بود. متوسط میزان نگهداشت باکتری در لایه آخر در تیمارهای T120 و T100 بیش‌تر از تیمارهای کم‌آبیاری است چون در این تیمارها حجم آبیاری بیش‌تر بوده و سبب انتقال بیش‌تر باکتری نسبت به دو تیمار دیگر شده است. نتایج نشان می‌دهد که در عمق ۲۲/۵ سانتی‌متری خاک نسبت S/C0 در تیمار T120 در ستون‌ها به ترتیب ۱۱/۲۵، ۲/۸ و ۱/۹ برابر نسبت به تیمارهای T60، T80و T100 افزایش نشان داد.

خالد و همکاران دریافتند در شرایط جریان غیراشباع میزان نگهداشت باکتری در خاک بیش‌تر است و تجمع باکتری‌ها در لایه سطحی خاک بیش‌تر از اعماق خاک است که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد (Khaled et al., 2017).

1- retention



شکل ۲- میزان نگهداشت باکتری در پیکره خاک با سطوح آبیاری مختلف در شرایط بدون جریان ترجیحی

بین افزایش عمق و میزان نگهداشت باکتری رابطه معکوسی وجود دارد و علت غیریکنواختی در توزیع نگهداشت باکتری در خاک نیز به دلیل پالایش فیزیکی است که تابعی از اندازه ذرات و نیروهای هیدرودینامیکی است میزان پالایش فیزیکی باکتری ایشرشیاکولی با کاهش اندازه ذرات محیط متخلخل (افزایش منافذ ریز در خاک) و کاهش سرعت جریان افزایش می‌یابد و (Bradford et al., 2006). می‌توان بیان کرد در شرایط غیراشباع و در تیمارهای کم‌آبیاری به دلیل کاهش میزان سرعت جریان آب در پیکره خاک، احتمال پالایش فیزیکی نسبت به تیمارهای دیگر بیش‌تر است و هر چه میزان رطوبت به شرایط اشباع نزدیک‌تر باشد، حرکت باکتری آسان‌تر شده و میزان نگهداشت باکتری در طول پروفیل خاک کاهش می‌یابد (Powelson and Mills, 2001). از آنجائی که مکانیسم انتقال باکتری بیشتر بر مبنای انتقال توده‌ای (Advection) تا انتقال پخشیدگی است لذا آب نقش بسیار مهمی در انتقال بر عهده دارد و کمبود آب می‌تواند شدت انتقال را کاهش دهد که نتایج این پژوهش نیز حاکی از آن است که بیشترین انتقال باکتری توسط تیمار T120 و کمترین انتقال باکتری توسط تیمار T60 انجام شده است. لی و ون دریافتند اعمال کم‌آبیاری سبب می‌شود میزان غلظت باکتری در عمق پنج سانتی‌متری سطح خاک با آبیاری قطره‌ای سطحی افزایش غیرمعنی‌داری یابد (Li and Wen, 2016). فرخیان فیروزی و همکاران بیان کردند در شرایط غیراشباع عمده باکتری‌ها در سطح خاک نگهداشته و با افزایش عمق مقدار نگهداشت باکتری کاهش می‌یابد (Farrokhian Firouzi, 2015). در رطوبت‌های نزدیک به اشباع انتقال باکتری سریع‌تر صورت می‌گیرد و جذب باکتری در خاک درشت‌بافت کاهش می‌یابد ولی به دلیل پالایش فیزیکی تجمع و نگهداشت باکتری در سطح خاک بیش‌تر است (Powelson and Mills., 2001, Jiang et al., 2005).

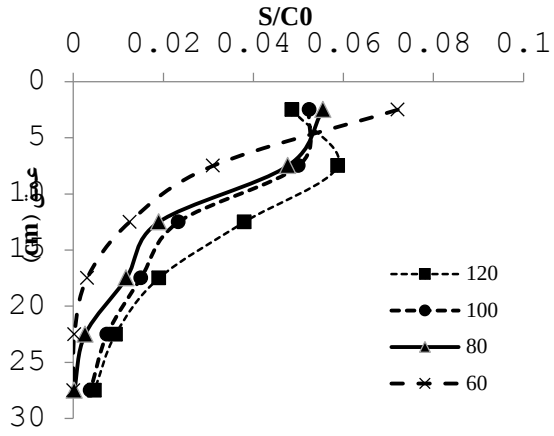
نگهداشت باکتری در شرایط وجود جریان ترجیحی بعد از آبیاری اول

شکل ۳ میزان نگهداشت باکتری در نزدیک جریان ترجیحی را نشان می‌دهد. متوسط میزان نگهداشت باکتری در عمق ۲/۵ سانتی‌متری در تیمار T60 نسبت به تیمارهای T120، T100 و T80 به ترتیب ۱/۴۸، ۱/۳۷ و ۱/۳۰ برابر بیش‌تر گردید و نتایج نشان می‌دهد در شرایط جریان ترجیحی انتقال باکتری در سطح خاک بیش‌تر صورت گرفته است. نسبت میزان نگهداشت باکتری در تیمار T60 در ناحیه نزدیک به جریان ترجیحی نسبت به همین تیمار در ستون بدون جریان ترجیحی ۱۳ درصد بیش‌تر است. در ستون‌های با شرایط جریان ترجیحی میزان نگهداشت باکتری در عمق ۲۲/۵ سانتی‌متری در تیمار T120به ترتیب ۳۹/۵، ۳/۵۷و ۱/۲۵ برابر نسبت به تیمارهای T60، T80و T100 گردید که بیان‌گر این است که با کاهش سطح آبیاری میزان انتقال باکتری به لایه‌های پایین‌تر در ستون خاک کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان بیان کرد اثر جریان‌های ترجیحی در تیمارهای با سطح آبیاری بالاتر بیش‌تر است زیرا حجم زیادی از آب را در پیکره خاک وارد می‌کنند و با حرکت پیستونی شکل سبب انتقال آلودگی به عمق بیش‌تر می‌شود (and Goss, Ehlers 2003). انصاری و همکاران (۱۳۹۸) و احمدی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۷) بیان کردند میزان هدایت هیدرولیکی اشباع تأثیر زیادی بر انتقال املاح در خاک و بر منحنی رخنه دارد.

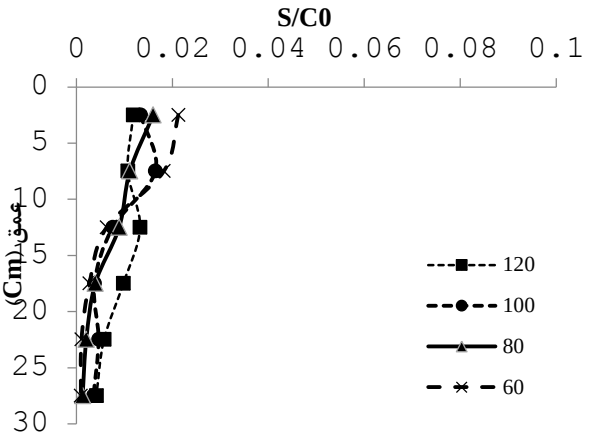
شکل ۴ میزان نگهداشت باکتری داخل ناحیه جریان ترجیحی را در اعماق مختلف خاک نشان می‌دهد. بر اساس شکل میزان جذب

در ناحیه جریان ترجیحی ناچیز است به دلیل بالا بودن میزان هدایت هیدرولیکی درون ناحیه جریان ترجیحی شدت جریان بیش‌تر است و سبب حرکت آب و آلاینده به سمت پیکره خاک شده است. بر اساس شکل ۴ نیز میزان انتقال باکتری در تیمارهای با سطح آبیاری بالاتر، بیش‌تر از تیمارهای کم‌آبیاری است به طوری که میزان نگهداشت باکتری در عمق ۲۷/۵ سانتی‌متری در تیمار T120نسبت به تیمارهای T100، T80 وT60 به ترتیب ۸/۲۵، ۲/۱ و ۴/۵ برابر بیش‌تر گردید. وانگ و همکاران و اخوان و همکاران نیز با بررسی اثر جریان ترجیحی بر انتقال باکتری دریافتند میزان نگهداشت باکتری در ناحیه مصنوعی ایجاد شده جریان ترجیحی، ناچیز است (Wang et al., 2013, Akhavan et al., 2018).

مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ نیز نشان می‌دهد میزان نگهداشت باکتری در تمامی اعماق در داخل ناحیه ترجیحی کمتر از میزان نگهداشت در پیکره خاک است به طوری که در عمق ۷/۵ سانتی‌متری میزان نگهداشت باکتری در ناحیه پیکره خاک در تیمارهای T120،T100، T80 و T60 به ترتیب ۵/۲، ۳، ۴/۳ و ۱/۹ برابر نسبت به تیمار نظیرشان در داخل ناحیه جریان ترجیحی است و بیانگر انتقال بیش‌تر و جذب کمتر باکتری‌ها در داخل ناحیه جریان ترجیحی است.



شکل ۳- نگهداشت باکتری نزدیک به ناحیه جریان ترجیحی



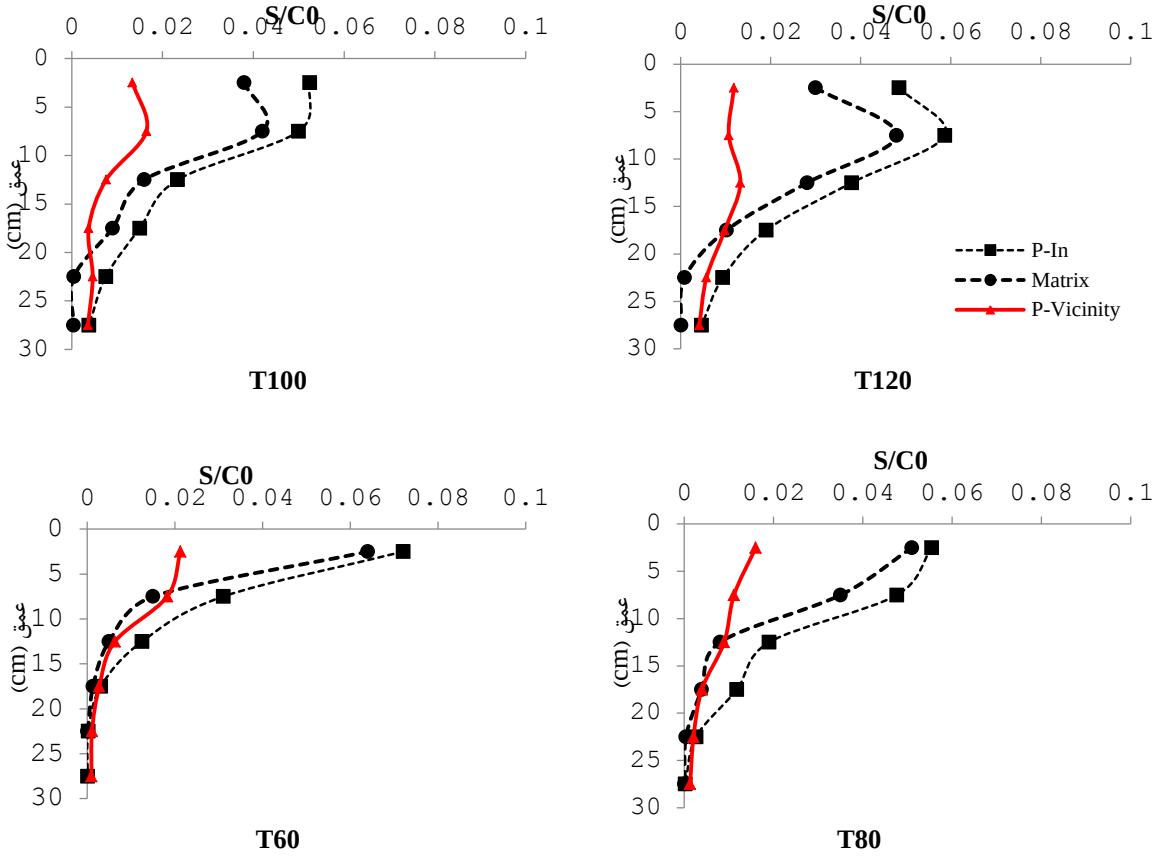
شکل ٤- نگهداشت باکتری در داخل ناحیه جریان ترجیحی

به دلیل عدم وجود بار منفی ذرات و هیچ‌گونه ماده آلی در ناحیه جریان ترجیحی، میزان باکتری در این ناحیه در اثر نگهداشت فیزیکی است. بردفورد و همکاران بیان کردند اگر نسبت اندازه ذرات کلوئید به اندازه ذرات خاک بزرگتر از ۰/۲ درصد گردد احتمال پالایش فیزیکی افزایش می‌یابد. قطر متوسط ذرات شن در داخل ناحیه جریان ترجیحی این پژوهش ۱/۰ میلی‌متر و قطر ذرات باکتری سویه مورد بررسی ۳ میکرومتر است و نسبت آن‌ها ۰/۲۵ درصد می‌گردد لذا نگهداشت فیزیکی می‌تواند نقشی در نگهداشت باکتری در این ناحیه داشته باشد (Bradford et al., 2003).

نگهداشت باکتری در شرایط حضور و عدم حضور جریان ترجیحی بعد از آبیاری اول

در شکل ۵ میزان نگهداشت باکتری را در پیکره خاک (بدون جریان ترجیحی Matrix)، در نزدیک ناحیه جریان ترجیحی (P-vicinity) و داخل ناحیه ترجیحی (P-In) مقایسه می‌کند. بر اساس شکل میزان نگهداشت باکتری در نزدیک جریان ترجیحی بیش‌تر از ستون‌های بدون جریان ترجیحی شده و این میزان در تیمارهایی با سطح آبیاری بیش‌تر مشهودتر است. علت افزایش بیش‌تر نگهداشت باکتری در مجاورت ناحیه جریان ترجیحی نشان دهنده انتقال جرم از سمت ناحیه جریان ترجیحی به پیکره خاک است (Wang et al., 2013) که شاید علت این امر به دلیل پتانسیل ماتریک بیش‌تر خاک در اطراف ناحیه جریان ترجیحی و بالاتر بودن میزان سطح ویژه خاک با بافت لوم‌شنی نسبت به خاک شنی دانست. همچنین بر اساس نتایج پژوهش‌های انجام شده انتقال باکتری در منافذ ماکرو زمانی صورت می‌گیرد که شرایط محیط متخلخل مرطوب باشد و باکتری‌ها معلق در این حالت از منافذ ماکرو عبور می‌کنند به همین دلیل میزان انتقال باکتری در شرایط اشباع نسبت به حالت غیراشباع بیش‌تر است (Unc and Goss, 2003). بر اساس شکل ۵، میزان انتقال باکتری در نزدیک جریان‌های ترجیحی به اعماق خاک بیش‌تر شده است به طوری که میزان نگهداشت باکتری در عمق ۲۷/۵ سانتی‌متری خاک تیمارها با سطح آبیاری T120، T100 و T80 به ترتیب ۱۱، ۱۵/۹ و ۷/۳ برابر نسبت به تیمارهای نظیرشان در شرایط بدون جریان

ترجیحی شده است. در تیمار T60 در ستون بدون جریان ترجیحی میزان نگهداشت باکتری در عمق ۲۷/۵ سانتی‌متری خاک صفر بود در حالی که در حالت جریان ترجیحی ۲۱۰۰ کلنی باکتری مشاهده شد. بر اساس شکل در داخل ناحیه جریان ترجیحی در تمامی تیمارها میزان نگهداشت باکتری در پروفیل خاک دارای روند تغییرات کمتری نسبت به پیکره خاک در حالت بدون جریان ترجیحی و در نزدیک به ناحیه جریان ترجیحی است. گلبداغی (۱۳۹۰) نیز بیان کرد در شرایط وجود جریان ترجیحی انتقال باکتری به اعماق پروفیل خاک بیش‌تر است. زند سلیمی و همکاران (۱۳۸۵) نیز دریافتند در خاک‌های دست نخورده به دلیل حفظ ساختمان خاک و حضور جریان‌های ترجیحی میزان انتقال باکتری به عمق نسبت به خاک دست‌خورده بیش‌تر است.



شکل ۵- مقایسه تغییرات نگهداشت باکتری بعد از آبیاری اول

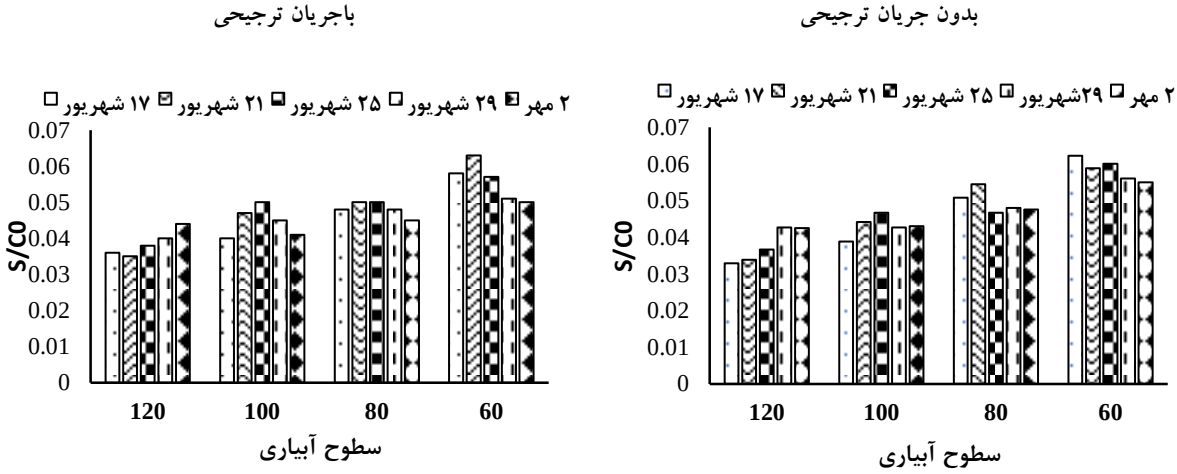
در پیکره خاک (Matrix)، نزدیک به ناحیه جریان ترجیحی (P-Vicinity) و درون ناحیه جریان ترجیحی (P-In)

تغییرات نگهداشت باکتری در لایه سطحی خاک

در شکل ۶ میزان نگهداشت باکتری به غلظت ورودی باکتری (S/C0) در عمق ۵ سانتی‌متری سطح خاک در چهار سطح آبیاری را در ماتریکس ستون‌های بدون جریان ترجیحی و جریان ترجیحی را نشان می‌دهند. چون مواد آلی در تیمارها ثابت بود اختلاف میزان باکتری‌ها در تیمارها بیش‌تر تحت تأثیر شرایط رطوبتی قرار گرفته است. بر اساس شکل اوج غلظت باکتری در آبیاری سوم در تیمارهای T120 و T100 مشاهده می‌شود که بعد از گذشت ۸ روز از شروع اولین آبیاری است. در تیمارهای با سطح آبیاری بالاتر غلظت باکتری در سطح خاک با افزایش تعداد آبیاری بیش‌تر از تیمارهای کم‌آبیاری شده است که بیانگر اهمیت میزان رطوبت خاک بر حفظ و بقای باکتری‌ها است. در تیمار T60 و T80 میزان باکتری در آبیاری‌های مختلف تغییرات قابل توجهی را بعد از آبیاری دوم به بعد ندارد زیرا در این تیمار به دلیل حجم آب کمتر سطح خاک دارای رطوبت نسبتاً کمتری از تیمارهای دیگر بودند و به دلیل رطوبت کمتر باکتری‌ها بقای کمتری را داشتند. افزایش دمای بالای ۲۰ درجه سلسیوس سبب افزایش میزان مرگ و میر باکتری می‌شود (Taylor and Burrows, 1971, McFeters & Stuart., 1972) و باکتری‌ها در دمای پایین‌تر

از ۱۵ درجه سلسیوس دارای رشد بهتری است (Kemp et al., 1992). در طول دوره آزمایش این پژوهش حداکثر دمای تمامی روزها بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس و متوسط دمای روزانه ۱۹ درجه سلسیوس بود. به دلیل بالابودن دمای محیط و افزایش تبخیر نگهداشت باکتری‌ها در سطح خاک در تیمارهای کم‌آبیاری افزایش قابل‌توجهی را نداشته است. گرمای بیش از حد نور خورشید با اثر روی اسیدهای نوکلئیک ریزجانداران سبب کاهش زنده‌مانی آن‌ها می‌شود به ویژه در خاک‌های بابافت سبک که دارای هدایت حرارتی بالاتری هستند (Brown, 2001).

میزان نگهداشت باکتری در عمق ۵ سانتی‌متری خاک در تیمارهای با سطح آبیاری T120، T100 بعد از آبیاری پنجم در حالت بدون جریان ترجیحی نسبت به آبیاری اول به ترتیب ۲۹/۵ و ۱۰/۸ درصد افزایش داشت ولی در تیمار T60 و T80 به ترتیب ۱۱/۶ و ۶/۳۱ درصد کاهش داشتند. میزان نگهداشت باکتری در عمق ۵ سانتی‌متری خاک در تیمارهای T120، T100 بعد از آبیاری پنجم ۲۲/۲ و ۲ درصد افزایش داشتند ولی در تیمار T60 و T80 به ترتیب ۱۴ و ۸ درصد کاهش داشت. بعد از آبیاری سوم در هر دو حالت میزان باکتری در تیمار T100 کاهش یافته است و در تیمار T120 روند افزایشی غیرمعنی‌داری دیده می‌شود. استوکر و همکاران بیان کردند که میزان بقای باکتری در لایه سطحی خاک با گذر زمان (بلند مدت) در خاک کاهش می‌یابد و تجمع باکتری در لایه سطحی خاک بیش‌تر از اعماق است (Stocker et al., 2015).

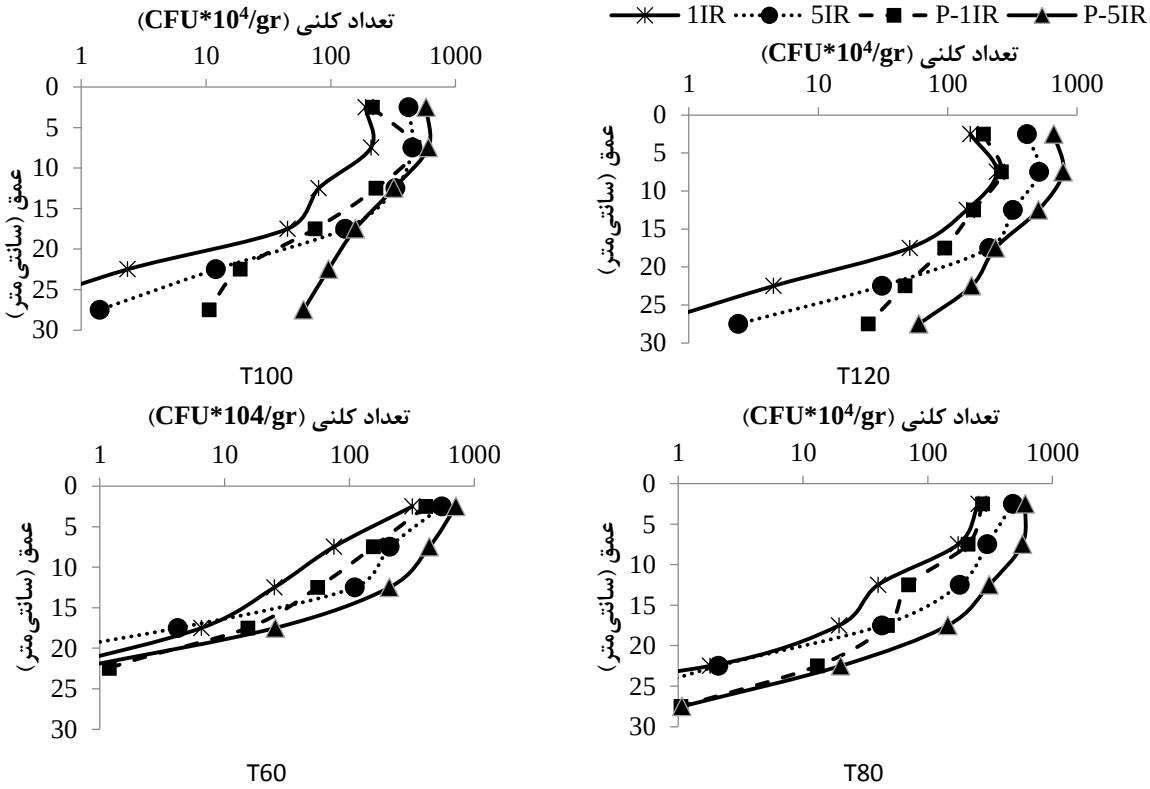


شکل ٦- روند تغییرات نگهداشت باکتری بعد از هر آبیاری در سطح خاک در سطوح مختلف آبیاری

تغییرات نگهداشت باکتری در پروفیل خاک بعد از آبیاری پنجم

شکل ۷ توزیع باکتری در عمق های مختلف خاک در سطوح آبیاری مختلف بعد از آبیاری اول و بعد از آبیاری پنجم در دو ناحیه نزدیک به جریان ترجیحی (ستون‌های دارای شرایط جریان ترجیحی) و ناحیه پیکره خاک (بدون جریان ترجیحی) آورده شده است. بر اساس این شکل‌ها نگهداشت باکتری در تیمارهای T60 و T80 به ترتیب در عمق بیش‌تر از ۱۷/۵سانتی‌متری خاک نسبت به دو تیمار دیگر در دو حالت کم‌ترگردید. از دلایل آن می‌توان به حجم کمتر آبیاری (آبشویی) و نفوذ کم‌تر آب و آلاینده به لایه‌های پایینی خاک اشاره کرد و همچنین میزان رطوبت اولیه این دو تیمار در آبیاری‌های دوم به بعد کم‌تر از تیمارهای T120 و T100 بوده و کاهش رطوبت این تیمارها سبب مرگ‌و میر بیشتر باکتری‌ها و کاهش انتقال باکتری در عمق نسبت به دو تیمار دیگر شده است. منحنی‌های نگهداشت باکتری بعد از آبیاری پنجم در شرایط جریان ترجیحی مشابه آبیاری اول بیانگر این است که بعد از آبیاری پنجم میزان انتقال باکتری بیش‌تر از ستون‌های بدون جریان ترجیحی در نزدیک به ناحیه جریان ترجیحی اتفاق افتاده است. بعد از آبیاری پنجم در تیمارهای T120 و T100 در عمق‌هایی مختلف در هر دو شرایط بدون و با جریان ترجیحی نگهداشت باکتری افزایش یافته است و می‌توان علت آن را بقای باکتری به دلیل شرایط رطوبتی بهتر نسبت به تیمارهای کم‌آبیاری بیان کرد. زنده ماندن باکتری ایشریشیاکولی تابع دما، شرایط رطوبتی و میزان مواد غذایی است. اگر شرایط مناسب باشند باکتری‌ها به رشد خود ادامه می‌دهند (Byappanahalli and Fujioka, 1998; Gagliardi and Karns, 2000). در این پژوهش تغییر شرایط رطوبتی خاک به ویژه در تیمارهای کم آبیاری و شرایط دمایی زنده‌ماندن باکتری‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. عدم سازگاری متابولیسم باکتری‌ها با کمبود مواد غذایی در خاک سبب کاهش طول عمر آن‌ها می‌شود که این مورد برای باکتری *ایشریشیاکولی* نیز صادق است (Klein and Caida, 1967). مایسنر و همکاران نیز بیان کردند که نوسانات رطوبت خاک سبب ایجاد

رویدادهای خشک و مرطوب می‌شود و بر فعالیت ریزجانداران اثر گذار است (Meisner et al., 2017). در جدول ۳ میزان شاخص نگهداشت باکتری در اعماق مختلف خاک در ستون بدون جریان ترجیحی (پیکره خاک) بعد از آبیاری اول و آبیاری پنجم آورده شده است. بر اساس جدول ۳ میزان شاخص نگهداشت در عمق‌های ۵-۰ و ۱۰-۵ بیش‌ترین مقادیر را در تمامی تیمارها بعد از آبیاری اول و پنجم دارد و نشان‌دهنده میزان پالایش بالا در عمق سطحی ده سانتی‌متری خاک است.



شکل ۷- مقایسه تغییرات نگهداشت باکتری بعد از آبیاری اول و پنجم در پروفیل ستون‌های خاک با سطوح آبیاری مختلف(IR1 و IR5 در پیکره خاک بدون جریان ترجیحی بعد از آبیاری اول و آبیاری پنجم، P-IR1 و P-IR5 نزدیک به جریان ترجیحی بعد از آبیاری اول و پنجم)

جدول ۳- میزان شاخص نگهداشت باکتری بر حسب درصد در عمق‌ها و سطوح آبیاری مختلف (در پیکره خاک)

سطح آبیاری	۱۲۰		۱۰۰		۸۰		۶۰	
عمق خاک	IR1	IR5	IR1	IR5	IR1	IR5	IR1	IR5
۵-۰	۲۲/۴	۲۲/۶	۳۳	۲۳/۱۸	۴۹/۶۷	۲۶/۵	۶۸,۳۷	۳۰/۳۵
۱۰-۵	۶۰/۵۸	۱۶/۹	۴۰	۱۶	۳۵/۹	۱۴/۳	۱۶	۱۳/۹۸
۱۵-۱۰	۱۵/۹۶۶	۱۵/۳	۱۶/۵	۱۴/۳	۸/۲	۸/۸	۵/۳۷	۵/۹
۲۰-۱۵	۰/۸۳	۹/۷۵	۸/۵	۸/۴	۴	۴/۱	۱/۴	۲/۱
۲۵-۲۰	۰/۴	۴/۴۵	۰/۵	۲/۶	۰/۴	۰/۸	۰/۰۹	۰/۰۸
۳۰-۲۵	۰/۰۷۳	۰/۶۲	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰	۰/۰
مجموع	۱۰۰	۶۹/۷	۹۸	۶۴/۸۶	۹۸	۵۴/۶۵	۹۱/۴	۵۲/۵

متوسط میزان شاخص نگهداشت باکتری در دو آبیاری ده سانتی‌متر عمق سطحی خاک در تیمارهای T60، T80، T100 و T120 به ترتیب به ترتیب ۴۴/۹، ۵۷، ۶۳ و ۶۴/۴۲ درصد گردید. بعد از آبیاری پنجم در تیمارهای T80 و T60 میزان نگهداشت باکتری این لایه نسبت به آبیاری اول کاسته شده و در این دو تیمار نسبت به تیمارهای T120 و T100 میزان انتقال باکتری به لایه‌های پایین‌تر از ۱۵ سانتی‌متری محدود شده است. از عمق ۱۵ سانتی‌متری تا ۳۰ سانتی‌متری در این دو تیمار میزان نگهداشت باکتری نسبت به آبیاری

اول به دلیل آبشویی کمتر، برخلاف تیمارهای T100 و T120 کاسته شده است.

غلظت باکتری زه‌آب خروجی

بیش ترین سطح آبیاری ستون ها ۱۲۰ درصد نسبت به ظرفیت مزرعه بوده و رطوبت خاک‌ها به حد اشباع نرسیدند و زه‌آب خروجی در تیمارها حتی در شرایط جریان ترجیحی مشاهده نشد و تنها در تیمار ۱۲۰ درصد ظرفیت مزرعه زه‌آب خروجی بعد از یک آبیاری رخ داد و بیانگر این است که در شرایط آبیاری واقعی میزان پالایش فیزیکی در خاک نسبت به شرایط اشباع بیش‌تر است و انتقال باکتری به اعماق پایین‌تر کاهش می‌یابد. در آبیاری سوم در تیمار ۱۲۰ درصد با جریان ترجیحی حدود ۱۰۵ سی‌سی خروجی داشت. میزان غلظت باکتری در زه‌آب خروجی در آبیاری سوم ۴۵۰ کلنی در میلی‌لیتر شد و سهم عمده جریان آب و آلاینده در ناحیه جریان ترجیحی به سمت پیکره خاک اتفاق افتاده است. ضریب نگهداشت رابطه دوبرابر ۳۹درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده بالا بودن میزان فیلتراسیون باکتری در خاک مورد مطالعه است.

نتیجه‌گیری

بر اساس این پژوهش، یافته‌های زیر به دست آمد:

- میزان نگهداشت باکتری با افزایش عمق خاک کاهش می‌یابد. این موضوع نشان دهنده این است که خاک همانند یک فیلتر طبیعی در پالایش آلاینده‌های میکروبی عمل می‌کند. با افزایش میزان سطح آبیاری میزان نگهداشت باکتری در اعماق پایین‌تر خاک بیش‌تر می‌شود به طوری‌که در تیمار T120 میزان نگهداشت باکتری در عمق ۲۷/۵ سانتی‌متری در حالت بدون جریان ترجیحی ۱۱ برابر بیش‌تر از تیمار T60 گردید و در ناحیه جریان ترجیحی میزان نگهداشت باکتری در عمق ۲۷/۵ سانتی‌متری در تیمار T120حدود ۴/۵ برابر بیش‌تر از تیمار T60 در همین عمق بود.
- با اعمال کم‌آبیاری در ستون‌هایی با رطوبت اولیه یکسان، انتقال باکتری کاهش و تجمع بیش‌تر باکتری‌ها در سطح خاک اتفاق می‌افتد به طوری که در تیمار با سطح آبیاری ۶۰ درصد (T60) متوسط میزان تجمع باکتری در نزدیک به ناحیه ترجیحی ۱/۲۸و در ستون بدون جریان ترجیحی ۱/۸ برابر نسبت به میزان نگهداشت باکتری در سطح آبیاری ۱۲۰ درصد شد. تجمع بیش از حد باکتری در سطح خاک احتمال ورود آلاینده به آب‌های سطحی و آلوده شده محصولات کشاورزی را افزایش می‌دهد.
- در جریان غیراشباع و شرایط کم‌آبیاری بیش‌تر بودن هدایت هیدرولیکی جریان در ناحیه جریان ترجیحی و همچنین بالابودن میزان پتانسیل ماتریک خاک اطراف ناحیه جریان ترجیحی و سطح ویژه آن، سبب افزایش غلظت آلاینده در مرز بین ناحیه جریان ترجیحی و پیکره خاک می‌شود. در تیمار با سطح آبیاری ۱۲۰ و ۱۰۰ درصد متوسط میزان نگهداشت باکتری در لایه سطحی خاک (پنج سانتی‌متری) در محل نزدیک به جریان ترجیحی حدود ۲۵ و ۱۴ درصد نسبت به تیمار نظیرش در حالت بدون جریان ترجیحی بیش‌تر شد. این مسئله نشان می‌دهد وجود جریان‌های ترجیحی در پیکره خاک در مناطقی با حجم بارندگی زیاد (که احتمال اشباع شدن خاک وجود دارد) اهمیت دارد و احتمال انتقال آلاینده به اعماق خاک را افزایش می‌دهد. بالعکس در مناطق با بارندگی کم، نقش جریانات ترجیحی در انتقال آلودگی به اعماق بسیار کم‌رنگ می‌شود و در عوض در نواحی نزدیک به جریانات ترجیحی تجمع باکتری وجود خواهد داشت.
- به دلیل کاهش رطوبت در سطح خاک به ویژه در تیمارهای کم‌آبیاری T60 و T80 انتقال آلاینده و جریان آب به اعماق پایین‌تر از ۱۷/۵ و ۲۲/۵ سانتی‌متر محدود می‌گردد و سبب تجمع باکتری بیش‌تر در سطح خاک می‌گردد به طوری که تجمع باکتری در تیمار T60 حدود ۷۰ دصد و در تیمار T80 در حدود ۵۰ درصد در عمق پنج سانتی‌متری خاک شد.

منابع

احمدی‌مقدم، ز. و طباطبائی، س.ح. تعیین دقت دو مدل CDE وMIM با استفاده از روش حل معکوس در انتقال آلودگی تری‌کلرواتیلن (TCE) در یک محیط متخلخل کربناته، نشریه مهندسی نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۲(۱): ۱۱-۱.

اخوان، س.، ابراهیمی، س.، نوابیان، م.، مجتهدی، ع.، شعبانپور، م. و موحدی نایینی، ع. ۱۳۹۸. بررسی شاخص‌های جذبو پالایش ترابری باکتری ای‌کولای در سیستم‌جریان ترجیحی، مجله علمی کشاورزی مهندسی زراعی.۴۲(۱): ۱-۱۱.

انصاری، ف.، طباطبائی، س.ح.، عباسی، ف، و علایی، ا. ۱۳۹۸. آنالیز حساسیت پارامترهای هیدرولیکی محیط متخلخل در حل معکوس انتقال برومید، نشریه علوم آب و خاک(علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۳ (۳): ۳۶۶-۳۵۵.

زند سلیمی، س.، محبوبی، ع.ا.، مصدقی، م.ر.، رشیدیان، م، و فیروز منش، م. ۱۳۸۵. بررسی اثر تیمارهای خاک بر منحنی رخنه باکتری اشریشیاکولی آزاد شده از کودهای آلی مختلف، مجله آب و فاضلاب.۵۹: ۶۳-۷۴.

گلبداغی، ن. ۱۳۹۰. حرکت باکتری اشریشیاکولی در ستون‌های دست نخورده خاک‌های با بافت و مدیریت کشت متفاوت، پایان نامه ارشد رشته مهندسی کشاورزی خاکشناسی گرایش فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

مقصودی، ج. ۱۳۸۸. اثر وضعیت رطوبت خاک بر زنده مانی کلیفرم های روده‌ای در یک خاک تیمار شده با کودهای دامی و لجن فاضلاب. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

Allaire, S.E., Gupta, S.C., Nieber, J., and Moncrief, J.F. 2002b. Role of macropore continuity and tortuosity on solute transport in soils: 1. Effects of initial and boundary conditions. Journal of Contaminant Hydrology 58(3-4):299-321.

Abu-Ashour, J., Joy, D.M., Lee, H., Whiteley, H.R., and Zelin, S. 1994. Transport of microorganisms through soil. Water Air Soil Pollution 75:141–158.

Akhavan, S., Ebrahimi, S., Mojtahedi, A., Navabian, M., Shabanpour, Ma., and Movahedi Naeini, A.2019. Simulation of columnar transfer and retention of Escherichia coli bio-pollutant index in a saline saturated soil. International Journal of Engineering and Technology 10(4):1067-1075.

Bradford, S.A., Simunek, J., and Walker, S.L. 2006. Transport and straining of Ecoli O157: H7 in saturated porous media. Water Resources Research 42(12).

Bradford, S.A., Wang, Y., Kim, H., Torkzaban, S., and Šimůnek, J. 2014. Modeling microorganism transport and survival in the subsurface. Journal of Environmental Quality 43 (2): 421–440

Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A., Ed., Methods of Soil Analysis, Part 1— Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison, 363-382.

Byappanahalli, M., and Fujioka, R. 1998. Evidence that tropical soil environment can support the growth of Escherichia coli. Water Science Technolgy 38:171–174.

Connie, R., Mahon, Donald C., Lehman, George Manuselis. Textbook of diagnostic microbiology, 2011.Chapter 1, page 14.

Ehlers, W., and Goss, M. 2003. Water Dynamics in Plant Production. CABI Publishing., PP288.

Farrokhian Firouzi, A., Homaee, M., Klumpp, E., Kasteel, R., and Tappe, W. 2015. Bacteria transport and retention in intact calcareous soil columns under saturated flow conditions. J. Hydrol. Hydromech., 63(2):102–109.

Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysys, hydrometer method. PP. 404-408. In: A. Klute et al., (Eds). Methods of Soil Analysis. Part III, 3rd Ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.

Gagliardi, J.V., and Kams, J.S. 2000. Leaching of Escherichia coli O157:H7 in diverse soils under various agricultural management practices. Appl Env Microbiol., 66: 877-883.

Guber, A.K., Shelton, D.R., and Pachepsky, Y.A. 2005. Transport and retention of manure-borne coliforms in soil. Vadose Zone J. 4, 828–837.

Jiang, S., Pang, L., Buchan, G.D., Simunek, J., Noonan, M.J., and Close, M.E. 2010. Modeling water flow and bacterial transport in undisturbed lysimeters under irrigations of dairy shed effluent and water using HYDRUS-1D. Water Research (Oxford)., 44(4): 1050-1061.

Khaled, S. 2017. Modeling fecal bacteria transport and retention in agricultural and urban soil under saturated and unsaturated flow conditions. Water Research 110:313-320.

Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. PP. 635 – 662. In: Klute, A. (Ed.) Method of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed., ASA/SSSA Monograph.

Klein, D.A. and Caida, L.E. 1967. Escherichia coli die out from normal soil as related to nutrient availability and the indigenous microflora Can. J. Microboial., 13:1461-1470.

Kemp, J.S., Paterson, E., Gammack, S.M., Cresser, M.S., and Kiliham, K. 1992. Leaching of genetically modified Pseudomonas fluorescens through organic soils: Influence of temperature, soil pH, and roots. Biol Fertil Soils., 13:218-224.

Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., and Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota — a review. Soil Biol. Biochem. 43: 1812–1836.

Li, J., and Wen, J. 2016. Effects of water managements on transport of E. coli in soil-plant system for drip irrigation applying secondary sewage effluent. Agricultural Water Management 178 12–20.

Mathess, G., Peckdegger, A., and Schroefer, J. 1988. Persistence and transport of bacteria and viruses in groundwater-a conceptual evaluation. Journal of Contaminant Hydrology 2: 171-188.

Meisner, A., Leizeaga, A., Rousk, J., and Baath, E. 2017. Partial drying accelerates bacterial growth recovery to rewetting. Soil Biology & Biochemistry 112:269-276.

Mcfeters, G.A., and Stuart, D.G. 1972. Survival of coliform bacteria in natural waters. Field and

Escherichia coli and Salmonella Dublin in slurry on pasture and the infectivity of S. Dublin for grazing calves. Br. Vet. J., 127: 536-543.

Tate, R.L. 1978. Cultural and encvironmental factors affecting the longevity of Escherichia coli in histosols. Applied and Environmental Microbiology 35: 925-929.

Torkzaban, S., Bradford, S.A., van Genuchten, M.T. and Walker, S.L. 2008. Colloid transport in unsaturated porous media: The role of water content and ionic strength on particle straining. Journal of Contaminant Hydrology 96: 113–127.

Unc, A., and Goss, M.J. 2003. Movement of faecal bacteria through the vadose zone. Water, Air, and Soil Pollution 149: 327-337.

Tabatabaei, S.H., Nourmahnad, N., Golestani Kermani , So., Tabatabaei S.A., Heidarpour, M. and Najafi, P. 2020. Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions - A review. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture 9: 193- 220

Wang, Y., Scott, A. and Simunek, J. 2013. Transport and fate of microorganisms in soils with preferential flow under different solution chemistry conditions. Journal Water Resource Research 49: 2424–2436.

Walkly, A., and Black, I.A. 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration. Soil Sci., 37:29–38.

Wiliam M.M. 2012. Effects of Temperature and Soil Organic Content on the Growth and Survival of E. coli in Sandy Soil. Thesis Master of Science in Environmental Engineering. The American University in Cairo. The American University in Cairo School of Sciences and Engineering.

laboratory studies with membrane filter chambers. Appl. Microbiol. 24:805-811.

Mubiru DN., Coyne, MS. and Grove, JH. 2000 Mortality of Escherichia coli O157:H7 in two soils with different physical and chemical properties. J Environ Qual 29: 1821–1825.

Powelson, D.K. and Mills, A.L. 2001. Transport of Escherichia coli in sand columns with constant and changing water contents. Journal of Environmental Quality, 30: 238–245.

Skopp, J. 1981. Comment on ‘Micro-meso and macroporosity of soil. Soil Science Society of America Journal 45:1244–1246.

Stocker, M.D., Pachepsky, Y.A., Hill, R.L., and Shelton, D.R. 2015. Depth-dependent survival of Escherichia coli and enterococci in soil after manure application and simulated rainfall. Appl. Environ. Microbiol. 81:4801–4808.

Sasidharan, S., Torkzaban, S., Bradford, S.A., Kookana, R., Page, D., and Cook, P.G. 2016. Transport and retention of bacteria and viruses in biochar-amended sand. Science of the Total Environment. 548–549:100–109.

Sepehrniaa, N., Bachmann, J., Hajabbasia, M.A., Afyunia, M., and Horn, M.A. 2018. Modeling Escherichia coli and Rhodococcus erythropolis transport through wettable and water-repellent porous media. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 172: 280–287.

Soil Temperature. In G. 2002. Bonan, Ecological Climatology: Concepts and Applications (pp. 185-191). Cambridge University Press.

Tallon, P., Magajana, B., Lofranco, C., and Leung, K. 2005. Microbial indicator of fecal contamination in water: a current perspective. Water Air and Soil Pollution 166: 139-166.

Taylor, R.J., and Burrows, M.R. 1971. The survival of

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2203-2216

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۱۶-۲۲۰۳

Simultaneous Effects of Deficit Irrigation and Preferential Flow on *Escherichia coli* Retention in Soil

Z. Ahmadimoghadam[1*], S.H. Tabatabaei[2], A. Ebrahimi[3]
Recived: Jun.02, 2020 Accepted: Nov.14, 2020

Abstract

Microbial contamination is one of the most important type of water resources contamination as associated with the health of animal and human. In this study, *E. coli* retention under deficit irrigation conditions and presence of preferential flow was investigated using a column study. The irrigation levels were 120, 100, 80, and 60% of soil field capacity (named T120, T100, T80, and T60, respectively) and the number of irrigation event were five. One preferential pathway was artificially created in the middle of the soil columns. Cells were injected from top of the soil surface. The number of bacteria after irrigation in different layers was monitored. The results showed that by reducing the irrigation level from T120 to T60, bacterial transport decreased within the soil profile. The highest accumulation of bacteria was observed on the soil surface. In the T60, about 70% of the retention was at a depth of 5 cm. Therefore, deficit irrigation, could limit bacteria movement within the soil profile so that may potentially result the surface water contamination. Preferential flow, caused greater retention of bacteria in the vicinity of matrix as compared to the control columns. The bacterial retention in the vicinity of preferential pathway in the 0-5 cm layer irrigation level T120 and T100 was about 25% and 15% higher than the treatment similar to them in the non-preferential flow state.

Keywords: *Escherichia coli*, Matrix, soil Profile, Water pollution

1- Ph.D. Student in Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord
2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord
3- Assistant Professor, Retired of Department of Microbiology, Shahrekord University, Shahrekord
(*- Corresponding Author Email: Zahmadimoghadam2014@gmail.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۳۳-۲۲۱۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2217-2233

مقاله پژوهشی

بررسی اثر آبیاری تکمیلی و کود نیتروژن بر خصوصیات کمی و کیفی گندم در مازندران

محمد اسماعیل کمالی[1*]، مهرداد شهابیان[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲

چکیده

در استان مازندران بسیاری از کشاورزان گندم را به‌صورت دیم کشت می‌نمایند که عملکرد آن نسبت به گندم آبی پایین است. لذا در این پژوهش اثر انجام آبیاری تکمیلی در مراحل حساس رشد و مصرف تقسیطی کود نیتروژن بر عملکرد و خصوصیات کیفی گندم رقم مروارید در ایستگاه تحقیقاتی پهناب ساری مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی و در ۴ تکرار در سال‌های ۹۴، ۹۶ و ۹۷ اجرا شد. تیمارهای اصلی شامل A1= یک نوبت آبیاری در مرحله گل‌دهی، A2= یک نوبت آبیاری در مرحله دانه‌دهی، A3= دو نوبت آبیاری شامل آبیاری در مراحل گل‌دهی و دانه‌دهی و A4= تیمار شاهد (به‌صورت دیم) و تیمارهای فرعی شامل B1= مصرف کود اوره به میزان ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار و در ۴ تقسیط (۲۵٪ قبل از کشت، ۲۵٪ پنجه‌زنی، ۲۵٪ ساقه دهی و ۲۵٪ آبستنی) و B2= مصرف کود اوره به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و در ۵ تقسیط (۲۵٪ قبل از کشت، ۲۵٪ پنجه‌زنی، ۲۵٪ ساقه‌دهی، ۲۵٪ آبستنی و ۲۵٪ گل‌دهی) بود. اندازه‌گیری از صفات گندم شامل درصد پروتئین، وزن هزار دانه، تعداد سنبلچه در سنبله، تعداد سنبلچه غیر بارور و طول سنبله بوده است. تجزیه‌وتحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS نشان داد که در هر سه سال پژوهش، آبیاری بر شاخص‌های وزن هزار دانه، درصد پروتئین و سنبلچه غیر بارور در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر معنی‌داری داشته است و در بین تیمارهای آبیاری نیز تیمار A3 بهترین نتیجه را داشته است که به‌طور میانگین افزایش ۲۵ درصدی را بر درصد پروتئین نشان داد. این تیمار به‌طور میانگین باعث افزایش ۸/۵ درصدی وزن هزار دانه و کاهش ۲۲ درصدی تعداد سنبلچه غیر بارور نیز شد. بهترین تیمار تک آبیاری جهت بهبود وزن هزار دانه، پروتئین و تعداد سنبلچه غیر بارور، تیمار آبیاری در زمان دانه دهی بود. همچنین آبیاری تکمیلی و کوددهی تأثیر چشمگیری بر طول سنبله و تعداد سنبلچه در سنبله نداشت. در مورد کوددهی، مصرف ۲۵ درصد از تقسیط کود اوره در زمان گل‌دهی، بر روی وزن هزار دانه در هر سه سال آزمایش در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر معنی‌دار داشته و بر روی تعداد سنبلچه در سنبله در دو سال تأثیر داشته و بر روی سایر ویژگی‌ها اثر مشخصی نداشت. همچنین آبیاری و کوددهی در دو سال از سه سال آزمایش دارای اثر متقابل بر روی پروتئین بودند. بر طبق نتایج، بهترین تیمار آبیاری، دو نوبت آبیاری شامل آبیاری در مراحل گل‌دهی و دانه دهی و بهترین تیمار کوددهی، مصرف کود اوره به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و در ۵ تقسیط می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری تکمیلی، نیاز آبیاری، عملکرد دانه، کود اوره، کیفیت دانه گندم

مقدمه

گندم نقش مهمی در تأمین کالری و پروتئین مردم ایران است. بطوریکه بیش از ۴۵ درصد پروتئین و ۵۵ درصد کالری موردنیاز جمعیت کشور را تأمین می‌کند. بیشترین مواد تشکیل‌دهنده دانه گندم نشاسته (۶۰ تا ۷۰ درصد) و پروتئین (۷ تا ۱۸ درصد بسته به نوع گندم) می‌باشند. این محصول به سه صورت دیم، آبی و آبیاری تکمیلی کشت می‌شود. مناطقی که در آن گندم به‌صورت دیم کشت می‌شود عبارتند از اقلیم‌های معتدل، مناطق نیمه گرمسیری با باران زمستانه، مناطق گرم نزدیک استوا، مناطق با ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر از سطح دریا و مناطق گرم دور از استوا که در فصل زمستان بارندگی طولانی مدت دارند. در مناطق نیمه گرمسیری که باران زمستانه دارند و دوره رشد گندم با بارندگی‌های آن مناطق همزمانی دارد از جمله مناطق شمالی ایران، گندم به‌صورت دیم همراه با آبیاری تکمیلی کشت می‌شود (کیانی، ۱۳۹۴). آبیاری تکمیلی عبارت است از افزایش مقدار معینی آب به خاک برای تأمین نیاز آبی گیاهان دیم در مناطقی که بارندگی تکافوی نیاز آبی گیاه را نداده و یا دارای توزیع نامناسب است (امداد و فرشی، ۱۳۷۷). آبیاری تکمیلی نقش مهمی در بخش کشاورزی در دنیا ایفا می‌کند و تقریباً در ۸۰ درصد اراضی کشاورزی دنیا و ۶۰ درصد تولید در دنیا، آبیاری به‌صورت تکمیلی انجام می‌گیرد.

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.
۲- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: kamalipasha@yahoo.com
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.15.6

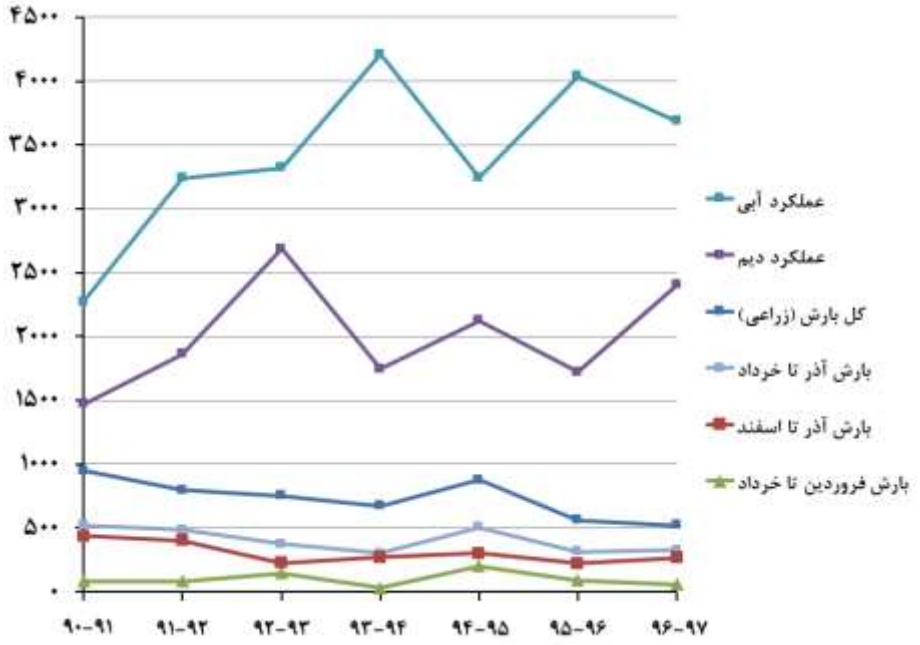
باید توجه نمود که رابطه مصرف آب و محصول‌دهی یک رابطه خطی نیست و برای دست یافتن به کارایی مصرف آب بالاتر، باید مقدار آب موردنیاز گیاه را با دقت بیش‌تری برآورد نمود. همچنین در مدیریت آبیاری تکمیلی مسئله اصلی و اساسی علاوه بر مقدار آب آبیاری، تعیین زمان آبیاری است.

آخرین آمار وزارت جهاد کشاورزی نشان می‌دهد که سطح کشت گندم در سال زراعی ۹۷-۹۶ بیش از ۴۹ هزار هکتار است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸). سطوح کشت آبی و دیم گندم در استان مازندران در سال‌های مختلف متفاوت است. اما موضوعی که وجود دارد آن است که بسیاری از کشاورزان به دلیل میانگین بارش سالانه مناسب و مشکلات تأمین آب، توجه چندانی به آبیاری گندم نمی‌کنند و خواسته یا ناخواسته گندم را به‌صورت دیم کشت می‌نمایند. بطوریکه در سال زراعی ۹۲-۹۱ که سطح زیر کشت گندم مازندران بیش از ۴۸ هزار هکتار بوده است، بیش از ۹۱ درصد از سطح زیر کشت گندم در استان (بیش از ۴۴ هزار هکتار) را گندم دیم شامل بوده است. اما متوسط عملکرد گندم دیم در این سال ۲۱۲۶ کیلوگرم در هکتار نسبت به گندم آبی با عملکرد ۳۲۴۶ کیلوگرم در هکتار بود. در سال زراعی ۹۳-۹۲ نیز بیش از ۷۷ درصد از سطح کشت تقریباً ۵۶ هزار هکتاری گندم به‌صورت دیم کشت شد. این موضوع در سالیان اخیر بهبود یافته و در سال زراعی ۹۷-۹۶ تقریباً نیمی از سطح کشت گندم آبی بود (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸). همان‌طور که تغییرات میزان عملکرد گندم آبی و دیم و نیز بارش در سال ۹۶-۹۰ در شکل (۱) نشان می‌دهد در سال ۹۳-۹۲ با افزایش میزان بارش در فروردین تا خرداد ماه (با اینکه میزان بارش در آذر تا اسفند کاهش یافته بود)، میزان عملکرد گندم دیم افزایش یافته است. با توجه به اینکه شرایط حساس از نظر نیاز آبی برای گندم، زمان گلدهی و دانه دهی است (کیانی، ۱۳۹۴) که در منطقه مورد مطالعه تقریباً در اردیبهشت‌ماه می‌باشد، این موضوع نشان می‌دهد که انجام آبیاری تکمیلی می‌تواند باعث افزایش عملکرد گردد. آمار بلند مدت بارش در منطقه موردمطالعه نیز نشان می‌دهد پراکنش بارندگی تطابق مناسبی با نیاز آبی گندم در مراحل حساس رشد آن از جمله گل‌دهی و دانه‌دهی ندارد. در نتیجه باید توجه نمود که شاخص میانگین سالانه مقدار بارش به‌تنهایی شاخص مناسبی برای زراعت دیم نیست و پراکنش زمانی و مکانی بارش در طول دوره رشد، تأثیر به سزایی بر عملکرد گندم دارا می‌باشد. با توجه به محاسبات کتاب مرجع "برآورد آب موردنیاز گیاهان عمده زراعی و باغی کشور" که با استفاده از داده‌های هواشناسی بلندمدت به‌دست‌آمده است (فرشی و همکاران، ۱۳۷۶)، میزان نیاز آبی گندم در شهر ساری ۳۴۸/۱ میلی‌متر می‌باشد که ۱۹۵/۲ میلی‌متر آن توسط بارش تأمین می‌شود و درنتیجه نیاز آبیاری گندم ۱۵۲/۹ میلی‌متر می‌باشد. لذا جهت حصول عملکرد مناسب، نیاز به انجام آبیاری حداقل به‌صورت آبیاری تکمیلی است. باید توجه نمود که مقدار بارش لحاظ شده در این مرجع، میانگین آمار بلندمدت بارش می‌باشد و در عمل باید میزان بارش صورت گرفته در همان سال را لحاظ نمود و برنامه آبیاری با آن تطبیق گردد.

از طرفی دیگر عملکرد بیشتر کشت آبی نشان می‌دهد که گندم به شرایط رطوبتی محیط پاسخ مثبت می‌دهد. اسدی و همکاران (۱۳۸۲) در تحقیق خود بیان کرد که گندم حساسیت زیادی به تنش خشکی در مراحل خوشه‌دهی و پر شدن دانه دارد. حکمت شعار نیز بیان کرد که تنش آبی در مرحله زایشی اجزای عملکرد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (حکمت شعار، ۱۳۷۲). در نتیجه به دلیل غیر پیش‌بینی بودن عوامل تأثیرگذار در زراعت دیم از جمله بارش و نیاز به آب جهت افزایش عملکرد، اِعمال شیوه‌های مدیریتی فنی-زراعی از جمله آبیاری تکمیلی امری ضروری است. وزیری (۱۳۷۶) بیان کرد که با انجام یک یا دو بار آبیاری گندم دیم در مراحل حساس به کمبود رطوبت، عملکرد دانه ۲ تا ۵ برابر افزایش می‌یابد.

از جمله فاکتورهای مؤثر بر افزایش راندمان مصرف کودهای شیمیائی بخصوص نیتروژن رطوبت مناسب خاک می‌باشد. با انجام آبیاری تکمیلی شرایطی مناسب نیز برای استفاده مفید از سایر نهاده‌های کشاورزی از جمله کود ایجاد می‌شود (Shearman et al., 2011). رطوبت خاک به دو طریق بر راندمان مصرف کودهای شیمیایی مؤثر است. ۱- تسهیل و افزایش جذب مواد غذایی، ۲- افزایش تولید ماده خشک (علیزاده و کوچکی، ۱۳۶۵). همچنین در تحقیقات بسیاری، کاهش کارایی مصرف آب تحت شرایط کمبود نیتروژن گزارش شده است (Brueck and Senbayram, 2009).

بنابراین با توجه به اینکه مقدار بارش و توزیع آن مشخص نیست، درک صحیح از عکس‌العمل محصول گندم دیم نسبت به مصرف نیتروژن و آبیاری تکمیلی از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود. در بین کودهای شیمیایی همبستگی بالایی بین نیتروژن و عملکرد (۵۷ درصد) گزارش شده است (Davis et al., 2012). نیتروژن فراوان‌ترین ماده معدنی است که گیاهان به آن نیاز دارند و تقسیط دو یا سه بار نیتروژن باعث می‌شود وزن هزار دانه به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر تقسیط قرار گیرد (Thomas and Throne, 1975). در تحقیقی در شمال چین رابطه بین جذب نیتروژن از خاک با میزان رطوبت خاک تحت ۴ رژیم رطوبتی شامل T1= بدون آبیاری بعد از جوانه‌زنی، T2= آبیاری تکمیلی در زمان ساقه دهی و گل‌دهی، T3= آبیاری تکمیلی در زمان کاشت، ساقه دهی و گل‌دهی، T4= آبیاری تکمیلی قبل از زمستان، ساقه دهی و گل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت (Wu et al., 2018). نتایج نشان داد که در تیمار T2 میزان جذب نیتروژن از خاک بعد از جوانه‌زنی به میزان ۲۳ الی ۲۶ درصد در سال ۲۰۱۳-۲۰۱۲ و ۱۶۲ تا ۱۷۷ درصد در سال ۲۰۱۴-۲۰۱۳ افزایش یافته است.



شکل ۱- مقدار عملکرد و بارش در سال‌های مختلف در استان مازندران (عملکرد بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و بارش بر حسب میلی‌متر)

در بررسی اثر آبیاری تکمیلی بر تغییرات رطوبت خاک و رشد و عملکرد گندم، نتایج نشان داد که بهترین عمق برای اندازه‌گیری مقدار آب آبیاری جهت آبیاری تکمیلی، عمق ۴۰ سانتی‌متری است. (Man, et al., 2016)، تحقیقی در لبنان نیز نشان داد که آبیاری تکمیلی باعث افزایش ۲۸ و ۲۲ درصدی عملکرد در دو رقم گندم شده است. همچنین کود نیتروژن به میزان ۱۵۰ کیلوگرم نیز باعث افزایش ۱۲ و ۲۴ درصدی و کود نیتروژن به میزان ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش ۱۶ و ۳۸ درصد در دو رقم گندم شده است (karam et al., 2009). همچنین بسیاری از محققان افزایش عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک را به علت افزایش سطح نیتروژن گزارش نموده‌اند (Abdelkhalek et al., 2015). در تحقیقی نشان داده شد که کمبود نیتروژن در زمان گلدهی باعث کاهش وزن هزار دانه می‌گردد (Hiroshi et al., 2007). بررسی‌ها نشان داده است که در بسیاری از تحقیقات انجام شده، میزان بهینه آبیاری تکمیلی ۶۰-۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (Wang et al., 2013). همچنین میزان نیتروژن موردنیاز گندم برای تولید یک تن دانه ۵۰-۳۰ کیلوگرم برآورد شده است که باید به‌صورت کود به خاک اضافه می‌شود (Ryan et al., 2009). در تحقیقی در چین بیان شد که آبیاری تکمیلی و مصرف کود نیتروژن در مراحل ساقه دهی و گل‌دهی گندم نان بهاره، کارایی مصرف آب، کارایی مصرف نیتروژن، وزن هزار دانه و عملکرد دانه را به ترتیب به میزان ۱۴/۶، ۳۹/۶، ۹/۳ و ۴/۷ درصد افزایش داد (Xiao et al., 2009).

در ایران نیز تحقیقات مشابهی انجام شده است. جعفری وفا و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی در کردستان نشان دادند که آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و دانه‌دهی بر وزن خشک بوته، تعداد سنبلچه، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و درصد پروتئین دانه تأثیر معنی‌داری داشته است. در تحقیقی تأثیر زمان آبیاری تکمیلی و حد بهینهٔ کاربرد نیتروژن بر روی گندم در گچساران بررسی شد (حیدرپور و طلایی، ۱۳۹۵). نتایج نشان بهترین تیمار آبیاری تکمیلی، ۵۰ میلی‌متر آبیاری در مرحلهٔ گل‌دهی بود که عملکرد دانه را ۴۳ درصد افزایش داد. سدری و همکاران (۱۳۹۵) بیان کردند که در شرایط آبیاری تکمیلی در مراحل خوشه‌دهی و دو هفته پس از خوشه‌دهی با مصرف ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، عملکرد دانه به ترتیب ۸۴۹، ۱۳۵۷، ۱۵۴۰ و ۱۷۹۰ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت که در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. تحقیقی در گرگان نشان داد که آبیاری تکمیلی تأثیر معنی‌داری بر روی عملکرد گندم داشته است و در ۴ سال آزمایش به ترتیب ۶۹، ۶، ۲۱ و ۸۸ درصد افزایش عملکرد را ایجاد نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که در سال‌هایی که سهم باران از کل آب مصرفی گیاه حدود ۷۵ درصد بود، عملکرد گندم آبی با عملکرد گندم دیم تفاوت معنی‌داری نداشت (کیانی و نوری نیا، ۱۳۹۳). تحقیقی در استان لرستان نشان داد که مصرف نیتروژن باعث افزایش عملکرد دانه شده است (حسین پور و همکاران، ۱۳۹۷).

جدول ۱- وضعیت دما و بارش فصلی در منطقه موردنظر در سال‌های مورد مطالعه

سال	میانگین دما	مجموع بارش در سال زراعی
۱۳۹۳-۱۳۹۴	۱۸/۲	۶۷۲/۳
۱۳۹۵-۱۳۹۶	۱۸/۰	۵۶۲/۱
۱۳۹۶-۱۳۹۷	۱۸/۳	۵۸۹/۳

لذا در این تحقیق تأثیر آبیاری تکمیلی و مصرف کود نیتروژن بر کمیت و کیفیت گندم مورد بررسی قرار گرفت. هدف این تحقیق تعیین تأثیر آبیاری تکمیلی در مراحل حساس رشد، تعیین حساس‌ترین مرحله رشد نسبت به تنش آبی، میزان آب موردنیاز برای آبیاری تکمیلی و تأثیر استفاده از کود نیتروژن همراه با آبیاری تکمیلی در مرحله گلدهی گندم مدنظر بود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در ایستگاه تحقیقاتی پهناب در نزدیکی شهرستان ساری و در موقعیت جغرافیایی ۵۲/۹۶ درجه شرقی و ۳۶/۶۴ درجه شمالی و در سال‌های ۹۴-۹۳، ۹۶-۹۵ و ۹۷-۹۶ انجام شد. اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن[1] دارای وضعیت مرطوب بود. همچنین بر اساس خصوصیات دما، بارش و توپوگرافی دارای اقلیم معتدل و مرطوب (معتدل خزری) بود. میانگین دما و مجموع بارش محل آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

در این تحقیق اثر آبیاری تکمیلی در دو مرحله رشد گیاه (گل‌دهی و دانه دهی) و نیز مصرف کود نیتروژن بر روی گندم رقم مروارید مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش به‌صورت کرت‌های یک‌بار خردشده در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با ۴ تکرار اجرا شد. تیمارهای اصلی شامل A1= یک نوبت آبیاری در مرحله گل‌دهی، A2= یک نوبت آبیاری در مرحله دانه‌دهی، A3= دو نوبت آبیاری در مرحله گل‌دهی+دانه‌دهی و A4= تیمار شاهد با رفتار آبی عرف زارع (دیم) و تیمارهای فرعی شامل B1= مصرف نیتروژن به میزان ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در چهار تقسیط (۲۵٪ قبل از کشت، ۲۵٪ پنجه‌زنی، ۲۵٪ ساقه‌دهی و ۲۵٪ آبستنی) و B2= مصرف نیتروژن به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در پنج تقسیط (۲۵٪ قبل از کشت، ۲۵٪ پنجه‌زنی، ۲۵٪ ساقه‌دهی، ۲۵٪ آبستنی و ۲۵٪ گل‌دهی) بود. کرت‌های موردنظر به ابعاد ۳×۳ مترمربع می‌باشند. برای جلوگیری از نشت آب در بین کرت‌ها، بین کرت‌ها و بلوک‌ها ۱ متر فاصله در نظر گرفته شده است (شکل ۲). آبیاری به‌صورت سطحی انجام گرفت. آماده‌سازی‌های لازم در قبل از کشت، طبق نقشه طرح صورت گرفت. عملیات کاشت هر ساله تقریباً در تاریخ ۲۰ آبان انجام شد. میزان بذر مورد استفاده ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار بوده است. برای تعیین بافت خاک، از خاک مزرعه نمونه تهیه شد و درصد شن، رس و سیلت آن در آزمایشگاه خاک‌شناسی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران انجام گردید که مشخصات آن در جدول (۲) نشان داده شده است.

عمق آب آبیاری موردنیاز طبق فرمول زیر به مقداری مدنظر بود که رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه گندم که ۳۰ سانتی‌متر است به حد ظرفیت زراعی برسد.

$$I = (FC - W) \times \rho b \times D \qquad (۱)$$

که در آن I = عمق آب آبیاری (سانتی‌متر)، FC= درصد وزنی رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی، W= درصد وزنی رطوبت خاک در زمان قبل از آبیاری، ρb= جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی مترمکعب) و D= عمق توسعه ریشه (سانتی‌متر) می‌باشد. درصد رطوبت خاک در زمان قبل از آبیاری به روش وزنی اندازه‌گیری شد. پس از تعیین عمق آب آبیاری، حجم آب آبیاری برای هر کرت با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$V = I \times A \qquad (۲)$$

که در آن V= حجم آب ورودی به هر کرت (مترمکعب)، I= عمق آب آبیاری (متر) و A= مساحت کرت (مترمربع) می‌باشد. شایان ذکر است که در تیمار A3 (آبیاری در زمان گل‌دهی+دانه‌دهی)، میزان آب آبیاری آن در مراحل گل‌دهی و دانه‌دهی نصف میزان آب مصرفی در تیمارهای A1 (آبیاری در زمان گل‌دهی) و A2 (آبیاری در زمان دانه‌دهی) بوده است. به‌عبارتی‌دیگر در تیمار آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی+دانه‌دهی، میزان آب آبیاری در زمان گل‌دهی آن نصف میزان آب آبیاری برای تیمار آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی بود. همچنین در تیمار آبیاری تکمیلی گل‌دهی+دانه‌دهی، میزان آب آبیاری در زمان دانه‌دهی نیز نصف میزان آب آبیاری برای تیمار آبیاری تکمیلی در زمان دانه‌دهی می‌باشد. صفات مورد ارزیابی در این تحقیق طول سنبله، تعداد سنبلچه در سنبله، سنبله غیر بارور، درصد پروتئین و وزن هزار دانه گندم بود. برای این منظور در مرحله رسیدگی و برداشت تعداد ۲۰ بوته از هر کرت برداشت شده و صفات موردنظر اندازه‌گیری شده است (شکل ۳). جهت تجزیه‌وتحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SPSS استفاده گردید که در این راستا ضمن بررسی توصیفی مقادیر متغیرهای موردنظر در تیمارهای مختلف، جهت مقایسه بین

1- De Martounne

تیمارها از تحلیل واریانس استفاده شده است و در صورت معنی‌داری اثرات مربوط به دو عامل آبیاری و کوددهی از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد استفاده گردید. همچنین برای درک بهتر نتایج، نقشه مقایسه میانگین و آزمون خوشه‌ای نیز انجام شد که در آن تمام صفت‌ها در کنار هم برای تمام تیمارها با هم مقایسه شدند. برای این امر ابتدا بر روی تمام داده با استفاده از فرمول زیر استانداردسازی انجام شد.

$$Xi^*=(Xi-Xave)/d \quad (۳)$$

که در این معادله، Xi* داده استاندارد شده، Xi داده موردنظر، Xave میانگین داده موردنظر و d انحراف معیار داده موردنظر می‌باشد. سپس نقشه حرارتی و تجزیه‌وتحلیل خوشه‌ای آنها تهیه گردید.





شکل ۲- نمایی از گندم در مرحله خوشه‌دهی (تصویر سمت راست) و مرحله رسیدگی (تصویر سمت چپ)

جدول ۲- الف- مشخصات فیزیکو شیمیایی خاک محل اجرای تحقیق

عمق خاک (cm)	هدایت الکتریکی (ds/m)	درصد اشباع (٪)	اسیدیته گل اشباع (pH)	کربنات کلسیم معادل (٪)	درصد ماده آلی (٪)
۰-۳۰	۰/۹۹	۶۱	۷/۴۹	۱۳	۳/۱۴

جدول ۲- ب- مشخصات فیزیکو شیمیایی خاک محل اجرای تحقیق

عمق خاک (cm)	درصد کربن آلی (٪)	ماسه (٪)	لای (٪)	رس (٪)	بافت	فسفر قابل جذب (mg/kg)	پتاسیم قابل جذب (mg/kg)
۰-۳۰	۱/۸۳	۱۸	۳۹	۴۳	C	۴/۵	۱۸۵



شکل ۳- نمونه‌برداری از کرت‌های مختلف طرح

نتایج و بحث

میزان آب مصرفی در سال‌های مختلف بر طبق جدول (۳) می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان آب مصرفی در تیمار A3 نصف مجموع آب مصرفی در تیمارهای A1 و A2 می‌باشد. شایان ذکر است که میزان آب آبیاری در تیمار گل‌دهی+دانه دهی کمتر از تیمار گل‌دهی بوده است. دلیل آن این است که در تیمار گل‌دهی+دانه‌دهی، میزان آب آبیاری در مرحله گل‌دهی نصف میزان آب آبیاری تیمار گل‌دهی بود. این موضوع برای آبیاری در زمان دانه‌دهی نیز صدق می‌کند. نتایج تحقیقی در گرگان نیز میزان آب مصرفی موردنیاز برای آبیاری تکمیلی گندم در سه سال آزمایش را ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر در ماه‌های فروردین و اردیبهشت برآورد کرده بود (کیانی و همکاران، ۱۳۹۳). پس از اندازه‌گیری تمامی صفات موردنظر در این آزمایش، نتایج در هر سال مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند تا معنی‌داری و یا عدم معنی‌داری تیمارها و نیز برهم‌کنش آنها مشخص گردد. در صورت وجود اثر متقابل نیز مقایسه میانگین بر روی اثر متقابل انجام پذیرفت. در ادامه نتایج تجزیه‌وتحلیل داده‌ها برای هر سه سال ارائه می‌گردد.

جدول ۳- میزان آب مصرفی در سال‌های مختلف آزمایش (میلی‌متر)

سال زراعی	تیمار A1	تیمار A2	تیمار A3	تیمار A4
۹۳-۹۴	۳۶	۲۳	۲۹/۵	۰
۹۵-۹۶	۴۰	۱۵	۲۷/۵	۰
۹۶-۹۷	۳۲	۲۰	۲۶	۰

نتایج سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳

نتایج تجزیه واریانس، مقایسه میانگین تیمارهای آبیاری، مقایسه میانگین تیمارهای کوددهی و اثر متقابل آبیاری و کوددهی برای ویژگی درصد پروتئین به‌صورت جداول (۴) الی (۷) می‌باشد. نقشه مقایسه میانگین و تجزیه خوشه‌ای تأثیر تیمارها بر روی صفات گندم نیز به‌صورت شکل (۴) می‌باشد. توجه شود که در نقشه حرارتی (گرافیکی) مقایسه میانگین، برای صفت تعداد سنبلچه غیر بارور باید برعکس در نظر گرفته شود. زیرا برای این صفت هرچه میزان آن کمتر باشد، وضعیت آن بهتر می‌باشد.

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری و کوددهی بر اجزای عملکرد گندم در سال ۹۴-۹۳

منبع خطا	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)			
		طول سنبله	سنبلچه در سنبله	وزن هزار دانه	پروتئین
بلوک	۳	۰/۴۶ ns	۰/۲۲ ns	۰/۹۷ ns	۲/۸۴ ns
آبیاری	۳	۱/۴۰ ns	۷/۵۳ *	۳۵/۹۷ **	۷/۱۸ **
خطا (۱)	۹	۰/۳۳	۳/۰۷	۰/۹۰	۰/۹۰
کود	۱	۰/۶۶ ns	۱۲/۷۳ *	۴/۸۷ *	۵/۸۹ *
آبیاری×کود	۳	۰/۰۹ ns	۰/۵۴ ns	۱/۳۶ ns	۵/۱۰ *
خطا (۲)	۱۲	۰/۶۵	۲/۱۵	۰/۶۳	۱/۱۷
ضریب تغییرات	--	۷/۰۴	۱۰/۱۰	۴/۵۶	۱۴/۵۳

ns عدم معنی‌داری * معنی‌داری در سطح ۵ درصد ** معنی‌داری در سطح ۱ درصد

جدول ٥- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر اجزای عملکرد گندم در سال ۹۴-۹۳

تیمار	طول سنبله	سنبلچه در سنبله	وزن هزار دانه	درصد پروتئین
آبیاری در زمان گلدهی+دانه دهی (A1)	۱۱/۰۰ a	۱۷/۴۱ a	۴۷/۱۴ a	۱۱/۷۰ a
آبیاری در زمان گلدهی (A2)	۱۰/۹۱ a	۱۷/۷۷ a	۴۶/۴۴ a	۱۰/۰۲ bc
آبیاری در زمان دانه دهی (A3)	۱۰/۱۶ a	۱۵/۵۶ ab	۴۷/۰۹ a	۱۱/۰۰ ab
دیم (A4)	۱۰/۳۳ a	۱۷/۰۷ ab	۴۲/۶۹ b	۹/۶۰ c

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.

جدول ٦- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف کودی بر اجزای عملکرد گندم در سال ۹۴-۹۳

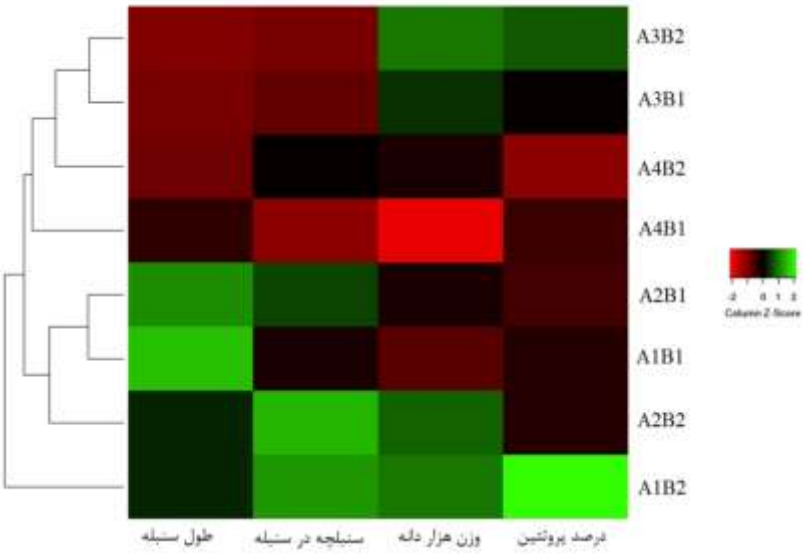
تیمار	طول سنبله	سنبلچه در سنبله	وزن هزار دانه	درصد پروتئین
۲۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره (B1)	۱۰/۷۵ a	۱۶/۷۳ b	۴۵/۴۵ b	۱۰/۱۶ b
۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره (B2)	۱۰/۴۶ a	۱۷/۳۴ a	۴۶/۲۳ a	۱۱/۰۱ a

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.

جدول ۷- اثر متقابل کود و آبیاری بر پروتئین در سال ۹۴-۹۳

تیمار	A1B1	A1B2	A2B1	A2B2	A3B1	A3B2	A4B1	A4B2
مقدار	۱۰/۲۱ bc	۱۳/۱۹ a	۹/۸۵ bc	۱۰/۲۰ bc	۱۰/۵۲ bc	۱۱/۴۸ b	۱۰/۰۳ bc	۹/۱۸ c

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.



شکل ٤- نقشه مقایسه میانگین و تجزیه خوشه‌ای تأثیر آبیاری تکمیلی و کوددهی بر روی ویژگی‌های گندم پس از استاندارد کردن داده‌ها در سال زراعی ۹۴-۹۳

نتایج سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵

نتایج تجزیه واریانس، مقایسه میانگین تیمارهای آبیاری، مقایسه میانگین تیمارهای کوددهی و اثر متقابل آبیاری و کوددهی برای ویژگی سنبلچه غیر بارور به‌صورت جداول (۸) الی (۱۱) می‌باشد. نقشه مقایسه میانگین و تجزیه خوشه‌ای تأثیر تیمارها بر روی صفات گندم نیز به‌صورت شکل (۵) می‌باشد.

جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری و کوددهی بر اجزای عملکرد گندم در سال ۹۶-۹۵

منبع خطا	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)				
		طول سنبله	سنبلچه در سنبله	سنبلچه غیر بارور	وزن هزار دانه	پروتئین
بلوک	۳	۰/۱۲ ns	۰/۱۵ ns	۰/۰۷ ns	۰/۰۴ ns	۰/۷۶ *
آبیاری	۳	۰/۴۷ ns	۰/۰ ns	۰/۶۳ **	۲۵/۱۸ **	۲/۱۹ **
خطا (۱)	۹	۰/۴۱	۰/۸۹	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۲۹
کود	۱	۰/۰۳ ns	۰/۰۴ ns	۰/۴۴ ns	۳/۲۹ *	۱/۰۰ *
آبیاری×کود	۳	۰/۳۶ ns	۱/۱۰ ns	۰/۷۱ **	۰/۴۷ ns	۱/۴۱ **
خطا (۲)	۱۲	۰/۲۱	۰/۷۷	۰/۱۰	۰/۳۵	۰/۱۶
ضریب تغییرات	--	۴/۷۵	۴/۴۱	۱۴/۰۷	۳/۱۷	۶/۰۱

ns عدم معنی‌داری * معنی‌داری در سطح ۵ درصد ** معنی‌داری در سطح خطای ۱ درصد

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر اجزای عملکرد گندم در سال ۹۶-۹۵

تیمار	طول سنبله	سنبلچه در سنبله	سنبلچه غیر بارور	وزن هزار دانه	پروتئین
آبیاری در زمان گلدهی+دانه دهی	۱۱/۵۱ a	۱۸/۶۹ a	۳/۲۷ a	۵۴/۳۴ a	۱۳/۴۱ a
آبیاری در زمان گلدهی	۱۱/۵۱ a	۱۸/۶۵ a	۳/۰۷ a	۵۱/۸۵ b	۱۳/۲۳ ab
آبیاری در زمان دانه دهی	۱۱/۳۹ a	۱۸/۶۰ a	۳/۰۳ a	۵۳/۹۵ a	۱۲/۹۲ b
دیم	۱۰/۹۹ a	۱۸/۶۴ a	۳/۶۵ b	۵۰/۵۸ c	۱۲/۲۲ c

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف کودی بر اجزای عملکرد گندم در سال ۹۶-۹۵

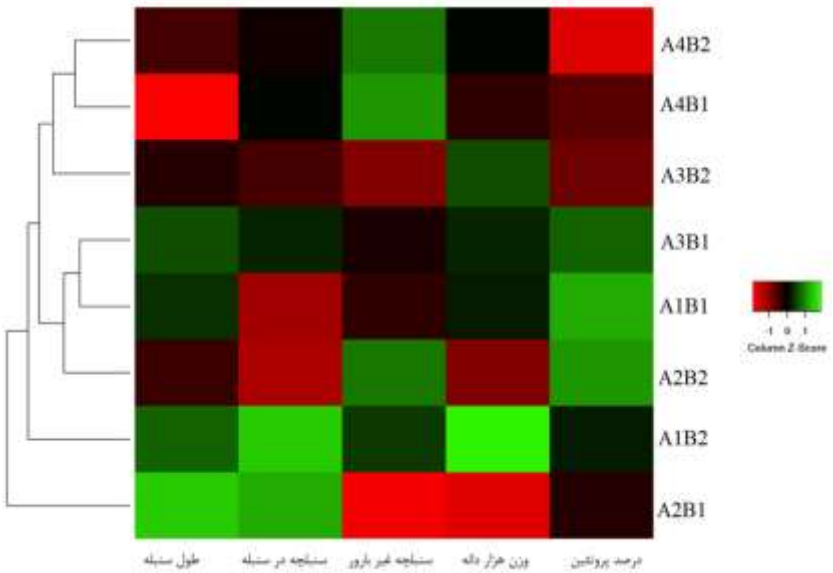
تیمار	طول سنبله	سنبلچه در سنبله	سنبلچه غیر بارور	وزن هزار دانه	پروتئین
۲۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره	۱۱,۳۸ a	۱۸,۶۸ a	۳,۱۴ a	۵۲,۳۶ b	۱۳,۱۲ a
۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره	۱۱,۳۲ a	۱۸,۶۱ a	۳,۳۸ a	۵۳,۰۰ a	۱۲,۷۷ a

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.

جدول ۱۱- اثر متقابل کود و آبیاری بر سنبلچه غیر بارور در سال ۹۶-۹۵

تیمار	A1B1	A1B2	A2B1	A2B2	A3B1	A3B2	A4B1	A4B2
مقدار	۳/۱۳ bc	۳/۴۲ cd	۲/۵۵ a	۳/۶۰ cd	۳/۱۸ bc	۲/۸۸ ab	۳/۷۰ d	۳/۶۰ cd

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.



شکل ۵- نقشه مقایسه میانگین و تجزیه خوشه‌ای تأثیر آبیاری تکمیلی و کوددهی بر روی ویژگی‌های گندم پس از استاندارد کردن داده‌ها در سال زراعی ۹۶-۹۵

نتایج سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶

نتایج تجزیه واریانس، مقایسه میانگین تیمارهای آبیاری، مقایسه میانگین تیمارهای کوددهی و اثر متقابل آبیاری و کوددهی برای ویژگی درصد پروتئین و وزن هزار دانه به‌صورت جداول (۱۲) الی (۱۶) می‌باشد. نقشه مقایسه میانگین و تجزیه خوشه‌ای تأثیر تیمارها بر روی صفات گندم نیز به‌صورت شکل (۶) می‌باشد.

جهت تجزیه‌وتحلیل تیمارهای مورد بررسی بر روی صفات موردنظر، هر صفت در سه سال آزمایش مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه نتایج آن ارائه می‌گردد.

پروتئین

تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی درصد پروتئین گندم در

سال‌های مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در سال‌های زراعی ۹۴-۹۳ و ۹۷-۹۶ تیمارهای آبیاری و کوددهی دارای اثر متقابل بر روی پروتئین بودند. بطوریکه در سال ۹۴-۹۳ تیمار آبیاری در زمان گل‌دهی+دانه‌دهی و کوددهی به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار بهترین تأثیر را بر روی درصد پروتئین دارا بوده است که نسبت به تیمار شاهد موجب افزایش ۳۱ درصدی گردیده است. در سال ۹۷-۹۶ نیز تیمارهای آبیاری در زمان دانه‌دهی و ۲۰۰ کیلوگرم کود و تیمار آبیاری در زمان گل‌دهی+دانه‌دهی و ۲۵۰ کیلوگرم کود دارای بیشترین تأثیر بر روی درصد پروتئین بوده است که به ترتیب موجب افزایش ۴۱ و ۳۴ درصدی گردیده‌اند. در سال زراعی ۹۶-۹۵ نیز اثر آبیاری بر روی درصد پروتئین معنی‌دار بوده است و کوددهی معنی‌دار نبوده است.

جدول ۱۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری و کوددهی بر اجزای عملکرد گندم در سال ۹۷-۹۶

منبع خطا	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)				
		طول سنبله	سنبلچه در سنبله	سنبلچه غیر بارور	وزن هزار دانه	درصد پروتئین
بلوک	۳	۰/۱۵ ns	۰/۷۱ ns	۰/۱۴ ns	۰/۸۴ns	۳/۱۴ *
آبیاری	۳	۱/۵۹**	۴/۳۴ **	۱/۵۴ **	۲۰/۵۰ **	۱۷/۷۸ **
خطا (۱)		۰/۴۷	۱/۲۴	۰/۴۷	۱/۶۸	۰/۷۶
کود	۱	۰/۰۰ns	۰/۱۵ns	۰/۱۶ns	۱۰/۷۰ **	۰/۵۳ ns
آبیاری×کود	۳	۰/۱۷ ns	۱/۳۲ ns	۰/۰۹ ns	۲/۳۲ *	۱۲/۸۴ **
خطا (۲)	۲۱	۰/۱۴	۰/۷۰	۰/۱۸	۰/۵۶	۰/۶۳
ضریب تغییرات	--	۵/۶۲	۶/۲۷	۱۸/۴۹	۳/۷۲	۱۳/۹۴

ns عدم معنی‌داری * معنی‌داری در سطح ۵ درصد ** معنی‌داری در سطح خطای ۱ درصد

جدول ۱۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف آبیاری بر اجزای عملکرد گندم در سال ۹۶-۹۷

تیمار	طول سنبله	سنبلچه در سنبله	سنبلچه غیر بارور	وزن هزار دانه	درصد پروتئین
آبیاری در زمان گل‌دهی+دانه‌دهی	۱۱/۵۰ a	۱۸/۸۵ a	۲/۷۲ a	۵۰/۵۵ a	۱۴/۸۳ a
آبیاری در زمان گل‌دهی	۱۰/۷۰ b	۱۷/۱۰ b	۳/۴۱ b	۴۹/۶۹ b	۱۳/۳۴ b
آبیاری در زمان دانه‌دهی	۱۰/۶۵ b	۱۷/۵۸ b	۳/۷۴ b	۴۹/۲۱ b	۱۵/۳۲ a
دیم	۱۰/۵۱ b	۱۷/۷۶ b	۳/۵۱ b	۴۶/۸۱ c	۱۲/۰۴ c

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.

جدول ۱۴- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف کودی بر اجزای عملکرد گندم در سال ۹۷-۹۶

تیمار	طول سنبله	سنبلچه در سنبله	سنبلچه غیر بارور	وزن هزار دانه	درصد پروتئین
۲۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره	۱۰/۸۵ a	۱۷/۹۰ a	۳/۴۲ a	۴۸/۴۹ b	۱۳/۷۶ a
۲۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره	۱۰/۸۳ a	۱۷/۷۶ a	۳/۲۸ a	۴۹/۶۴ a	۱۴/۰۲ a

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.

جدول ۱۵- اثر متقابل کود و آبیاری بر پروتئین در سال ۹۷-۹۶

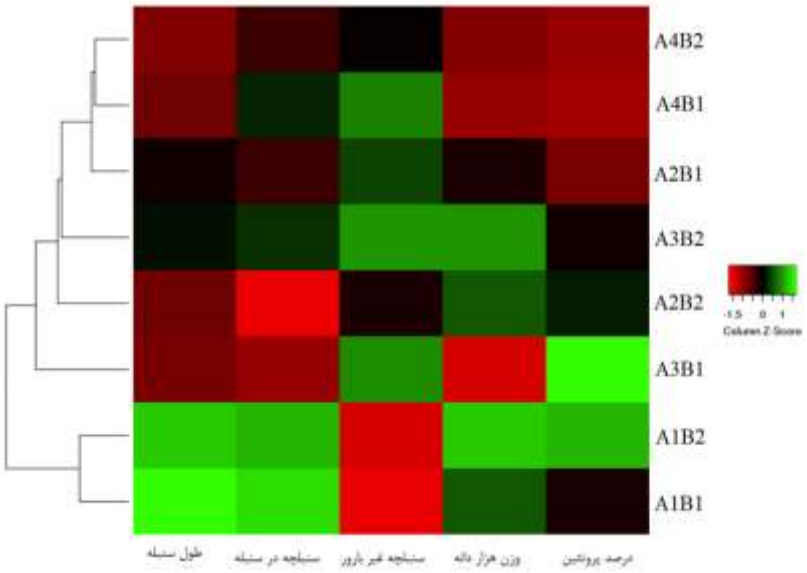
تیمار	A1B1	A1B2	A2B1	A2B2	A3B1	A3B2	A4B1	A4B2
مقدار	۱۳/۶۱ bc	۱۶/۰۶ a	۱۲/۴۹ cd	۱۴/۱۹ b	۱۶/۹۵ a	۱۳/۶۹ bc	۱۱/۹۶ d	۱۲/۱۲ d

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.

جدول ۱۶- اثر متقابل کود و آبیاری بر وزن هزار دانه در سال ۹۷-۹۶

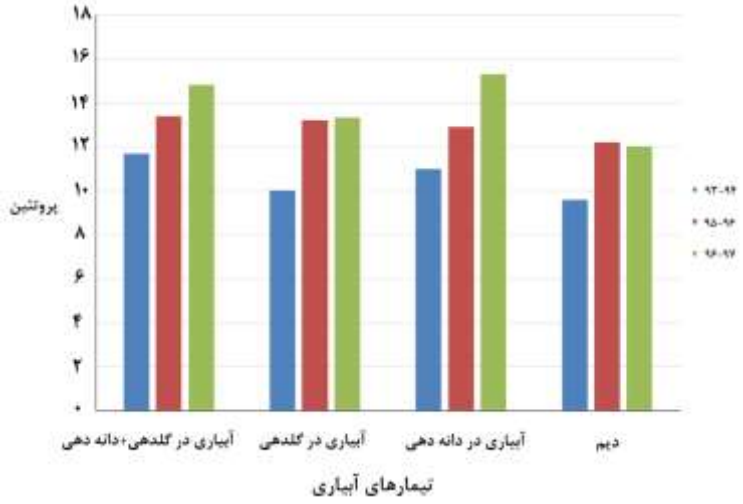
تیمار	A1B1	A1B2	A2B1	A2B2	A3B1	A3B2	A4B1	A4B2
مقدار	۵۰/۱۵ ab	۵۰/۹۵ a	۴۹/۲۷ bc	۵۰/۱۰ ab	۴۷/۸۵ cd	۵۰/۵۸ ab	۴۶/۶۸ d	۴۹/۹۵ d

*حروف مشترک از لحاظ آماری در یک سطح قرار می‌گیرند.



شکل ٦- نقشه مقایسه میانگین و تجزیه خوشه‌ای تأثیر آبیاری تکمیلی و کوددهی بر روی ویژگی‌های گندم پس از استاندارد کردن داده‌ها در سال زراعی ۹۷-۹٦

برای آبیاری نیز آبیاری در زمان گل‌دهی+دانه‌دهی و آبیاری در زمان گل‌دهی بیشترین تأثیر را بر روی درصد پروتئین دارا بوده‌اند که به ترتیب موجب افزایش ۱۰ و ۸ درصدی گردیده‌اند. این نتیجه با نتایج تحقیق جعفری وفا و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت دارد. در تحقیق مذکور نیز بیشترین درصد پروتئین از تیمار آبیاری تکمیلی گندم در مرحله گل‌دهی بدست آمد و کمترین درصد پروتئین نیز از تیمار دیم بدست آمد. دلیل آن این است که تنش آبی باعث بسته شدن نسبی روزنه‌ها و یا کاهش درجه گشودگی آنها شده و در نتیجه جذب و تثبیت دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد. این امر باعث می‌شود میزان کل مواد پرورده برای پرشدن دانه کاهش یابد (جواد الاسلامی و همکاران، ۱۳۸۴). رضوی (۱۳۸۷) نیز در تحقیقی بیان کرد که آبیاری تأثیر معنی‌داری بر روی پروتئین دارد و انجام آبیاری در سه مرحله ظهور خوشه، گل‌دهی و دانه بستن سبب تولید بیشترین درصد پروتئین دانه شد.



شکل ۷- تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی درصد پروتئین گندم

وزن هزار دانه

تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی وزن هزار دانه گندم در سال‌های مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. برای شاخص وزن هزار دانه در هر سه سال آزمایش، تیمارهای آبیاری و کوددهی

معنی‌دار بوده‌اند، و اثر متقابل آنها در یک سال ۹۷-۹۶ معنی‌دار بود. بهترین تیمار آبیاری نیز برای این سال‌ها آبیاری در زمان گل‌دهی+دانه‌دهی (به ترتیب با ۳/۷۴، ۳/۷۶، و ۴/۴۵ گرم افزایش نسبت به تیمار دیم معادل با ۱۰/۵، ۷ و ۸ درصد افزایش) بوده است. دلیل آن این است که با کمبود آب در محیط خاک، گیاه نمی‌تواند عناصر غذایی موجود در خاک را به‌خوبی جذب نماید و درنتیجه تولید مواد فتوسنتزی کاهش پیدا می‌کند و این کاهش بر روی ذخایر غذایی دانه و وزن هزار دانه، تأثیر می‌گذارد (جعفری وفا و همکاران، ۱۳۹۸). این نتیجه با نتیجه تحقیق قنبری و همکاران (۲۰۱۱) با اقلیمی مشابه منطقه موردمطالعه که با انجام آبیاری ۵ گرم افزایش در وزن هزار دانه (از ۴۰ به ۴۵ گرم) را به دست آوردند، مطابقت داشته است. همچنین نتیجه تحقیقی سه‌ساله در مراغه نیز نشان داد که با انجام ۹۵ میلی‌متر آبیاری تکمیلی میزان وزن هزار دانه ۲/۹ گرم نسبت به تیمار دیم افزایش یافته است (توکلی، ۱۳۸۲). در صورت تک آبیاری نیز در هر سه سال تیمارهای آبیاری تفاوت معنی‌داری نسبت به تیمار دیم داشته‌اند. اما در بین تیمار آبیاری در زمان دانه‌دهی و تیمار آبیاری در زمان گل‌دهی، در دو سال تیمار آبیاری در زمان دانه‌دهی تأثیر بیشتری نسبت به تیمار آبیاری در زمان گلدهی داشته است هرچند فقط در یک سال این تفاوت معنی‌دار بوده است. این موضوع با نتیجه تحقیق تدین و امام (۱۳۸۶) مطابقت داشته است. در تحقیق مذکور تیمار آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی و یا دانه‌دهی تفاوت معنی‌داری نسبت به تیمار دیم داشته‌اند. در بین آنها نیز تیمار آبیاری در زمان دانه دهی تأثیر بیشتری نسبت به تیمار آبیاری در زمان گل‌دهی بر روی وزن هزار دانه داشته است. هرچند اختلاف آنها اندک (۰/۵۸ و ۰/۶۲ گرم برای دو سال آزمایش) بوده است. در تحقیقی بر روی تأثیر آبیاری تکمیلی بر گندم نیز اظهار شد که آبیاری تکمیلی در مراحل مختلف رشد گندم تأثیر مثبتی بر تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه دارد (Tahmasebi Sarvestani et al., 2008).

برای تیمارهای کوددهی نیز تیمار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره بیشترین تأثیر را در هر سه سال در سطح احتمال ۵ درصد دارا بوده است که با نتایج هیروشی و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت دارد. همچنین مقایسه نتایج سه‌ساله وزن هزار دانه نشان می‌دهد که تیمارها در سال زراعی ۹۶-۹۵ دارای میانگین وزن هزار دانه بیشتری نسبت به سال‌های دیگر داشته است. برای پی بردن به دلیل این موضوع، میزان دما و بارش در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد در این سه سال بررسی شد (جدول ۱۶). بررسی‌ها نشان داد که میانگین دما در طول دوره رشد گندم در سه سال مورد مطالعه به ترتیب ۱۸/۲، ۱۸/۰۵ و ۱۸/۳ درجه سانتی‌گراد بوده است که تغییری نداشته است. اما نتایج نشان داد که میزان بارش در فروردین و اردیبهشت تأثیر بیشتری نسبت به مجموع بارش در کل دوره رشد بر وزن هزار دانه دارد و ازآنجایی‌که میزان بارش در فروردین و اردیبهشت سال زراعی ۹۶-۹۵ بیشتر از سال‌های دیگر است، مقدار وزن هزار دانه در این سال نیز بیشتر از سال‌های دیگر است. در اثر متقابل آبیاری و کوددهی در سال ۹۷-۹۶ نیز بهترین تیمار، تیمار A1B2 (آبیاری در زمان گل‌دهی+دانه‌دهی با مصرف ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره) بوده است.

سنبلچه غیر بارور

تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی سنبلچه غیر بارور گندم در سال‌های مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است. این شاخص در دو سال زراعی ۹۶-۹۵ و ۹۷-۹۶ اندازه‌گیری شد که در سال ۹۶-۹۵ تیمار آبیاری و اثر متقابل آبیاری و کوددهی معنی‌دار شده است و تیمار کوددهی معنی‌دار نشده است. لذا مقایسه میانگین بر روی اثر متقابل آبیاری و کوددهی انجام شد. نتایج نشان داد که بهترین تیمار در این سال نیز تیمار آبیاری در زمان گلدهی و مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود بوده است که باعث کاهش ۳۱ درصدی در میزان سنبلچه غیر بارور شده است. دلیل آن این است که آبیاری تکمیلی در زمان گل‌دهی باعث می‌شود گرده‌افشانی بهتر انجام شود. این امر از عدم تلقیح گل‌ها جلوگیری می‌کند و در نتیجه سنبلچه غیر بارور کمتر ایجاد گردد. در واقع تنش آبی در مرحله گل‌دهی باعث کاهش تعداد سنبلچه‌های بارور می‌شود. همچنین کیانی (۱۳۹۴) بیان کرد که تنش آبی در مرحله گل‌دهی به دلیل اینکه رشد ریشه کاهش می‌یابد و از خاک جذب بسیار کم می‌شود، خسارت جبران‌ناپذیری به تشکیل تعداد دانه وارد می‌کند. در سال زراعی ۹۷-۹۶ نیز تیمار آبیاری معنی‌دار شد، ولی کوددهی معنی‌دار نشد. بهترین تیمار آبیاری نیز آبیاری در زمان گلدهی+دانه دهی بوده است که باعث کاهش ۲۲ درصدی مقدار سنبلچه غیر بارور شده است. جعفری وفا و همکاران (۱۳۹۸) و باقری و حیدری شریف‌آباد (۱۳۸۶) این تأثیر را تایید کردند و بیان کردند که تنش آبی در زمان گرده‌افشانی ممکن است باعث کاهش تعداد سنبلچه یا باروری سنبلچه‌ها گردد. امام و نیک نژاد (۱۳۹۰) نیز بیان کردند که تنش آبی موجب کاهش تعداد دانه در سنبلچه می‌گردد.

جدول ۱۷- میزان بارش در طول دوره رشد گندم در سال‌های آزمایش

	۹۴-۹۳	۹۶-۹۵	۹۷-۹۶
مجموع بارش از اول آذر تا آخر اردیبهشت	۳۰۰/۵	۳۱۴/۵	۳۲۴/۶
مجموع بارش در فروردین و اردیبهشت	۳۰/۴	۹۰/۳	۵۸/۱



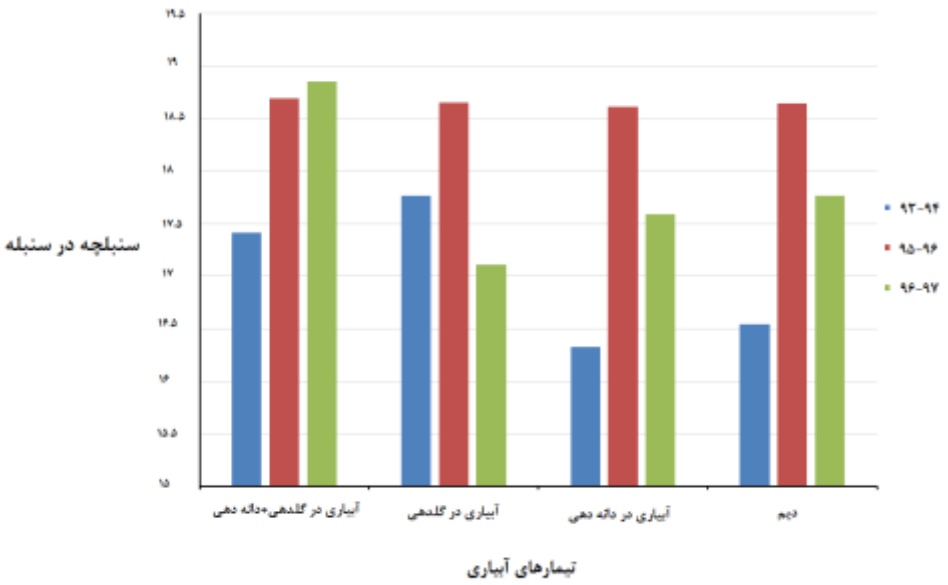
شکل ۸- تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی وزن هزار دانه



شکل ۹- تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر سنبلچه غیر بارور در سال‌های مورد آزمایش

سنبلچه در سنبله

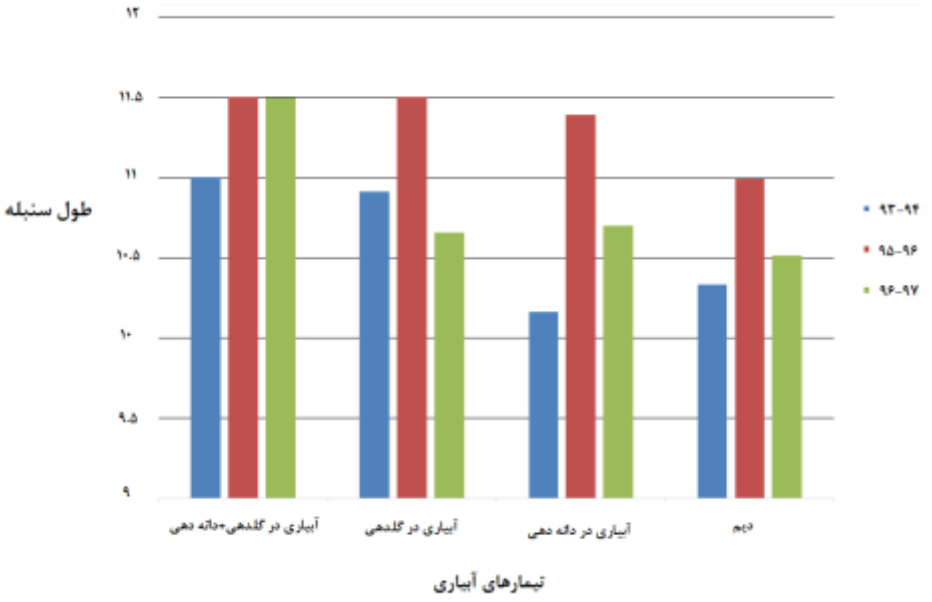
تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی سنبلچه در سنبله گندم در سال‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. برای این شاخص در سال زراعی ۹۴-۹۳ تیمار کوددهی، در سال ۹۶-۹۵ هیچ تیماری و در سال ۹۷-۹۶ تیمار آبیاری معنی‌دار بوده است. در مورد کوددهی در سال ۹۴-۹۳ تیمار ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار بهترین تأثیر را داشته است که موجب افزایش ۴ درصدی گردید. در مورد آبیاری نیز در سال ۹۷-۹۶ تیمار آبیاری در گل‌دهی+دانه دهی بیشترین تأثیر را داشت و موجب افزایش ۶ درصدی گردید و بقیه تیمارها تأثیر معنی‌داری نداشته‌اند. در نتیجه به نظر می‌رسد آبیاری تکمیلی و کوددهی تأثیر چشمگیری بر روی این صفت نداشته است که با نتایج تحقیق قنبری و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت داشته است. همچنین این نتایج تقریباً با نتایج تحقیق تدین و امام (۱۳۸۶) مطابقت دارد. در تحقیق مذکور این‌طور نتیجه‌گیری شده بود که بین تیمارهای آبیاری تکمیلی در مرحله گلدهی، آبیاری تکمیلی در مرحله دانه دهی و تیمار دیم اختلاف معنی‌داری در مقدار سنبلچه در سنبله مشاهده نشده است. اما در تحقیق جعفری وفا و همکاران (۱۳۹۸)، آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و آبیاری تکمیلی در مرحله پر شدن دانه باعث افزایش تعداد سنبلچه نسبت به تیمار دیم شدند. اما این دو تیمار اختلاف معنی‌داری با هم نداشتند.



شکل ۱۰- مقایسه تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی سنبلچه در سنبله در سال‌های مورد آزمایش

طول سنبله

تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی طول سنبله گندم در سال‌های مختلف در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در مورد این شاخص در سال‌های ۹۴-۹۳ و ۹۶-۹۵ هیچ‌کدام از تیمارهای آبیاری و کوددهی تأثیر معنی‌داری نداشته‌اند و در سال ۹۷-۹۶ تیمار آبیاری تأثیر معنی‌داری داشته، ولی کوددهی تأثیر معنی‌داری نداشته است. بهترین تیمار نیز در سال ۹۷-۹۶ تیمار آبیاری در گل‌دهی+دانه‌دهی بوده است که موجب افزایش ۱۰ درصدی گردیده است و بقیه تیمارها تفاوت معنی‌داری با هم نداشته‌اند. تأثیر کمتر آبیاری تکمیلی و کوددهی بر روی طول سنبله آن است که این تیمارها در مراحل گل‌دهی و دانه‌دهی که گندم در فاز زایشی است، اعمال شد که در این فاز، آب و مواد غذایی کمتر مصروف رشد رویشی گندم می‌شود که این موضوع با نتایج تحقیق قنبری و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت داشته است.



شکل ۱۱- مقایسه تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر روی طول سنبله در سال‌های مورد آزمایش

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در هر سه سال تحقیق، آبیاری بر روی شاخص‌های وزن هزار دانه، درصد پروتئین و سنبلچه غیر بارور تأثیر معنی‌داری داشته است و در بین تیمارهای آبیاری نیز تیمارهای آبیاری در زمان گل‌دهی+دانه دهی بهترین نتیجه را داشته است که باعث افزایش ۳۱، ۳۴ و ۱۰ درصدی بر روی درصد پروتئین، افزایش ۱۰/۵، ۷ و ۸ درصدی بر روی وزن هزار دانه و نیز کاهش ۱۰ و ۲۲ درصدی تعداد سنبلچه غیر بارور شده است. در صورت امکان، انجام دو بار آبیاری در مراحل گل‌دهی و دانه‌بندی به کشاورزان قابل توصیه می‌باشد. در صورت تک آبیاری نیز بهترین تیمار جهت بهبود وزن هزار دانه، پروتئین و تعداد سنبلچه غیر بارور، تیمار آبیاری در زمان دانه‌دهی بوده است. میزان آب آبیاری موردنیاز جهت آبیاری تکمیلی در منطقه موردمطالعه و با بافت خاک رسی در زمان گل‌دهی ۳۲ الی ۴۰ میلی‌متر، در زمان دانه‌دهی ۱۵ الی ۲۳ میلی‌متر و در زمان گل‌دهی+دانه‌دهی ۲۶ الی ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. باید توجه داشت که این میزان نیاز آب آبیاری در شرایطی است که در زمان موردنیاز بارشی صورت نگیرد و درصورت بارش می‌توان میزان بارش مؤثر را از میزان نیاز آب آبیاری کسر نمود. همچنین نتایج نشان داد که آبیاری تکمیلی می‌تواند شاخص‌های کمی و کیفی گندم را بهبود دهد. اما باید توجه داشت که غیرقابل‌پیش‌بینی بودن شرایط اقلیمی مخصوصاً بارش، مدیریت آبیاری گندم را با مشکل مواجه می‌کند و این موضوع پایداری تولید و نیز دستیابی به حداکثر عملکرد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ازآنجایی‌که غیرقابل‌پیش‌بینی بودن شرایط اقلیمی گریزناپذیر است، لذا جهت حصول عملکرد مناسب، پایش شرایط رطوبتی خاک و انجام آبیاری در زمانی که رطوبت خاک کافی نیست، ضروری است. از طرفی دیگر این تحقیق برای شرایط در دسترس بودن آب می‌باشد. در صورت در دسترس نبودن آب کافی به میزان ذکر شده، می‌توان این مقدار را کاهش داد. بطوریکه نتایج تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که آبیاری حتی به اندازه بخشی از نیاز آب آبیاری نیز می‌تواند موجب بهبود شاخص‌های برداشت گردد (Karam et al., 2009). در مورد کوددهی، مصرف ۲۵ درصد از تقسیط کود اوره در زمان گل‌دهی، بر روی وزن هزار دانه در هر سه سال آزمایش و بر روی تعداد سنبلچه در سنبله در دو سال در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر معنی‌دار داشته و بر روی سایر ویژگی‌ها یا در یک سال اثر داشته یا اصلاً اثری نداشت. همچنین آبیاری و کوددهی در دو سال از سه سال آزمایش دارای اثر متقابل بر روی پروتئین بودند. به‌عبارتی‌دیگر در شرایط آبیاری مطلوب، واکنش گندم به افزایش نیتروژن مخصوصاً در صفت درصد پروتئین بیشتر بوده است. درحالی‌که در شرایط تنش آبی، واکنش گیاه به افزایش نیتروژن کمتر بود. بر طبق نتایج، بهترین تیمار آبیاری، دو نوبت آبیاری شامل آبیاری در مراحل گل‌دهی و دانه‌دهی و بهترین تیمار کوددهی، مصرف کود اوره به میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار و در ۵ تقسیط می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی به شماره ۹۴۰۰۸۳-۰۰۴-۱۰-۶۰-۴ در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی است که در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران اجرا شده است. بدین وسیله از زحمات همه کسانی که در اجرای آن همکارانی نموده‌اند، تشکر می‌گردد.

منابع

احمدی، ک.، عبادزاده، ح. ر.، حاتمی، ف.، عبدشاه، ه. و کاظمیان، ا. ۱۳۹۸. آمارنامه کشاورزی: سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶، جلد اول: محصولات زراعی. انتشارات وزارت جهادکشاورزی، معاونت برنامهریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. چاپ اول. ۸۷ ص.

اسدی، ح.، نیشابوری، م.ر. و سیادت، ح. ۱۳۸۲. تعیین ضریب حساسیت گندم به تنش رطوبتی در مراحل مختلف رویش در منطقه کرج. مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۴، شماره ۳. ص ۵۸۶-۵۷۹.

امام، ی. و نیک نژاد، ی. ۱۳۹۰. مقدمه‌ای بر فیزیولوژی عملکرد گیاهان زراعی (ترجمه). انتشارات دانشگاه شیراز. چاپ سوم. ۵۹۴ص.

امداد، م.ر. و صباغ فرشی ع. ا. ۱۳۷۷. بررسی اثر آبیاری تکمیلی در افزایش محصول گندم در کشور. نشریه فنی شماره ۱۰۵۰، موسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ایران. ۲۱ ص.

باقری، ع. و حیدری شریف‌آباد، ح. ۱۳۸۶. بررسی اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد و محتوی یون‌ها در *Hordeum sativum* L.) گیاه جو بدون پوشینه. نشریه بوم شناسی گیاهان زراعی (دانش نوین کشاورزی). دوره ۳، شماره ۷. ص ۱۵-۱.

تدین، م. ر. و امام، ی. ۱۳۸۶. اثر آبیاری تکمیلی و مقدار فراهمی آب بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی صفات فیزیولوژیک دو رقم گندم دیم، دوره ۱۱. شماره ۴۲. ص ۱۵۶-۱۴۵.

توکلی، ع. ر. ۱۳۸۲. اثر مقادیر مختلف آبیاری تکمیلی و نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم دیم رقم سبلان. مجله نهال و بذر، جلد ۱۹، شماره ۳. ص ۳۸۱-۳۶۷.

ثقه الاسلامی، م.ج.، کافی، م.، مجیدی هروان، ا.، درویش، ف. و نورمحمدی، ق. ۱۳۸۴. تأثیر کم آبیاری بر عملکرد و بازده استفاده از آب سه گونه ارزن. مجله علوم کشاورزی، سال یازدهم، شماره ۴. ۱۳۱-۱۲۱.

جعفری وفا، ه.، حیدری، غ. و خالص‌رو ش. ۱۳۹۸. اثر آبیاری تکمیلی وکودهای زیستی بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم دیم، نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار /جلد ۲۹ شماره۲. ص ۱۸۷-۱۷۳.

حسین پور، ط.، رحمتی، م.، احمدی، ع. و دولتشاه، ج. ۱۳۹۷. اثرات میزان های مختلف مصرف کود نیتروژن و آبیاری تکمیلی بر خصوصیات زراعی و عملکرد دانه ارقام گندم دیم. نشریه زراعت دیم ایران. دوره ۷، شماره ۱. ص ۳۲-۱۵.

حیدرپور، ن. و طلایی، س. ۱۳۹۵. تأثیر هنگام آبیاری تکمیلی و میزان نیتروژن بر عملکرد و ویژگی های زراعی گندم دیم رقم کوهدشت، مجله علوم گیاهان زراعی ایران، دورهٔ ۴۷ ، شماره ۴، ص ۵۴۹-۵۴۱.

رضوی، ر. ۱۳۸۷. اثر حذف آبیاری در مراحل رشد گندم بر کارآیی مصرف آب و عملکرد کمی و کیفی آن. مجله علوم خاک و آب، دوره ۲۲، شماره ۱. ۱۴۵-۱۳۷.

سدری، م. ح.، گلچین، ا.، فیضی اصل، و. و سی و سه مرده، ع. ۱۳۹۵. اثرات مصرف بهینه نیتروژن بر کارایی استفاده از آب باران و عملکرد گندم دیم در رژیم های متفاوت رطوبتی. نشریه زراعت دیم ایران، دوره ۵، شماره ۱. ص ۸۵-۶۳.

علیزاده ا. و کوچکی، ع. ۱۳۶۵. اصول زراعت در مناطق خشک، جلد دوم (ترجمه). انتشارات آستان قدس رضوی. ۲۷۰ ص.

فرشی، ع. ا.، شریعتی، م. ر.، جارالهی، ر.، قائمی، م. ر.، شهابی‌فر، م. و تولائی، م. م ۱۳۷۶. برآورد آب موردنیاز گیاهان عمده زراعی و باغی کشور. جلد اول (گیاهان زراعی). انتشارات نشر آموزش کشاورزی وابسته به معاونت آموزش و تجهیز نیروی انسانی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، چاپ نخست. ۹۱۸ ص.

کیانی، ع.ر.، نوری نیا، ع. ع. ۱۳۹۳. بررسی بهره وری بارش و آبیاری تکمیلی در چند رقم گندم. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک. جلد ۲۱، شماره ۵. ص ۱۷۳-۱۵۵.

کیانی، ع. ر. ۱۳۹۴. راهنمای جامع آبیاری گندم. انتشارات نشر آموزش کشاورزی، چاپ اول. ۲۱۱ ص.

Abdelkhalek, A.A., Darwesh, RKh., and El-Mansoury, MAM. 2015. Response of some wheat varieties to irrigation and nitrogen fertilization using ammonia gas in North Nile Delta region. Annals of Agricultural Science. http://dx.doi.org/10.1016/j.aoas.2015.10.012

Brueck, H., and Senbayram, M. 2009. Low nitrogen supply decreases water-use efficiency of oriental tobacco. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 172: 216–223.

Davis, J.G., Westfall, D.G., Mortvedt, J.J., and Shanahan, J.F. 2012. Feertilizing winter wheat. Agron. J. 84: 1198-1203.

Ghanbari Malidarreh, A., Rajabi Vandechali, M., Ebadi, A., and Dastan, S. 2011. The effect of complementary irrigation in growth stage on yield, qualitative and quantitative indices of wheat. American Eurasian Journal of Agriculture and Environmental Science 11(3): 320-325.

Hiroshi, N., Satoshi, M., and Kusuda, O. 2007. Effect of nitrogen application rate and timing on grain yield and protein content of the bread cultivar in south western Japan. Plant Production Seince 11:151- 157.

Karam, F., Kabalan, J., Rouphael, Y., and Oweis, T. 2009. Yield and water-production functions of two durum wheat cultivars grown under different irrigation and nitrogen regimes. Journal of Agricultural Water Management, Volume 96, Issue 4:603-615.

Man, J., Shi, Y., Yu, Z., and Zhang, Y. 2016. Root growth, soil water variation, and grain yield response of winter wheat to supplemental irrigation. Journal of Plant Production Science, Volume 19, 2016 - Issue 2

Shearman, V.J., Sylvester-bradely, R., Scott, R.K., and foulkes, M.J. 2011. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. Crop Science 45: 175–185.

Tahmasebi Sarvestani, Z., Modarres Sanavy, SAM., and Roohi, A. 2008. Yield and yield components of dryland wheat genotypes under supplemental irrigation. 14th Australian Agronomy Conference, 21-25 September, Adelaide, SA.

Thomas, S.M., and Thorne, G.N. 1975. Effect of nitrogen fertilizer on photosynthesis and ribulose 1, 5-diphosphate carboxylase activity in spring wheat in the field. Exp. Bot. 26: 43-51.

Wang X, Shi Y, Guo Z, Zhang Y, Yu Z. 2015. Water use and soil nitrate nitrogen changes under supplemental irrigation with nitrogen application rate in wheat field. Field Crop Research. 183: 117-125.

Wu, B., Zhang, H., and Wang, D. 2018. Timely supplemental irrigation changed nitrogen use of wheat by regulating root vertical distribution. Journal of plant nutrition and and soil science. Volume 181, issue 3. p 396-408.

Xiao, G., Zhang, Q., Wang, R., and Xiong, R. 2009.

Effects of elevated CO_2 concentration supplemental irrigation and nitrogenous fertilizer application on rain-fed spring wheat yield. Acta Ecologica Sinica 29: 205-210.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2217-2233

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۳۳-۲۲۱۷

Effects of Supplemental Irrigation and Nitrogen Fertilization on Yield and Qualitative Characteristics of Wheat in Mazandaran

M. I. Kamali[1*], M. Shahabian[2]

Recived: Apr.17, 2020 Accepted: Sep.23, 2020

Abstract

Many farmers plant rainfed wheat in Mazandaran province that produces lower yield than irrigated wheat. Therefore, in this study, effects of supplemental irrigation in sensitive growth stages accompanied with the split application of nitrogen on yield and qualitative characteristics of wheat (Morvarid veriety) was studied in Pahnab station (Sari). This study was carried out as Complete Random Blocks Plot in split plot with four replications in 2015, 2017 and 2018. The main treatments included A1= irrigation on flowering, A2= irrigation on grain filling, A3= irrigation on flowering and grain filling and A4= rainfed (control treatment). The minor treatments included B1= 200 kg/ha urea application and in four splits (25% before planting, 25% at tillering, 25% at stem extension and 25% at booting) and B= 250 kg/ha urea application and in five splits (25% before planting, 25% at tillering, 25% at stem extension, 25% at booting and 25% at flowering). The considered characteristics were protein percentage, 1000-grain weight, the number of spikelet in spike, infertile spikelet and spike length. Analysis was conducted by SPSS and showed that in every three years, irrigation was effective on 1000-grain weight, protein percentage and infertile spikelet in significance level of 0.05 and the best treatment was A3 that resulted 25% increase in protein, 8.5% increase in 1000-grain weight and 22% decrease in infertile spikelet. For one irrigation, the best treatment was irrigation in grain filling for improving 1000-grain weight, protein percentage and infertile spikelet. For spike length and number of spikelet in spike, results showed that supplemental irrigation and fertilizing had no significant effects. For fertilizing, urea application on flowering had significant effect on 1000-grain weight in every 3 years and on the number of spikelet in spike in 2 years in significance level of 0.05; however, had no significant effects on others characteristics. In addition, there was a significant effect of the interaction between irrigation and fertilization in 2 years on protein percentage. Based on results, the best irrigation treatment is (A3) irrigation on flowering and grain filling and the best fertilization treatment is 250 kg/ha urea application in 5 splits.

Keywords: Fertilization, Supplemental irrigation, Wheat, Water requirement, 1000-grain weight

1- Asisstant Professor, Soil and Water Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran
2- Asisstant Professor, Soil and Water Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: kamalipasha@yahoo.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۴۳-۲۲۳۴

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2234-2243

مقاله پژوهشی

تأثیر میانگین شعاع ذرات خاک در برآورد منحنی رطوبتی آب –خاک بر اساس مدل آریا و پاریس

محمد مهدی چاری[۱*]، علیرضا وحیدی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۲۲

چکیده

با توجه به اینکه به دست اوردن توزیع اندازه ذرات نسبت به منحنی رطوبتی خاک ساده‌تر است تعدادی از پژوهشگران از تشابه بین منحنی توزیع تجمعی اندازه ذرات و منحنی مشخصه رطوبتی خاک برای به دست آوردن منحنی رطوبتی استفاده می‌کنند که یکی از آنها مدل آریا و پاریس است. مدل آریا و پاریس یک مدل فیزیکی–تجربی است که به طور گسترده برای به دست آوردن منحنی رطوبتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل ابتدا منحنی توزیع اندازه ذرات به n بخش مجزا تقسیم شده و قطر هر بخش برابر با میانگین قطر بخش بالایی و پایین است. در این مدل معمولا از میانگین‌گیری حسابی استفاده می‌شود. در این پژوهش تاثیر انتخاب میانگین حسابی، هندسی و هارمونیک به عنوان شعاع متوسط ذرات جامد در بافت‌های مختلف خاک و مکش‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ۱۹ نمونه خاک در دشت سیستان با بافت‌های شنی، لوم شنی، لومی، لوم سیلتی و رسی مورد ارزیابی قرار گرفت. در خاک با بافت سبک مانند خاک شنی و لوم شنی بهترین نتایج زمانی به دست آمد که از میانگین هارمونیک استفاده شد. در خاک‌های لوم و لوم سیلتی بهترین نتایج زمانی به دست آمد که از میانگین‌گیری هندسی به عنوان قطر میانگین بخش‌های مختلف خاک استفاده شد. در خاک سنگین مانند خاک رسی بهترین نتایج مربوط به میانگین‌گیری حسابی بود. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از میانگین‌گیری با روش‌های مختلف باعث افزایش دقت مدل آریا و پاریس در برآورد رطوبت خاک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، توزیع اندازه ذرات، منحنی مشخصه آب خاک

مقدمه

منحنی مشخصه آب–خاک یک از ویژگی‌های بنیادی خاک برای تعیین مقدار آب در دسترس گیاه و همچنین مدل‌سازی حرکت آب و املاح در خاک می‌باشد (Medina et al., 2002). تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک باروش‌های مستقیم گران، وقت‌گیر و پرزحمت است لذاروش‌های غیر مستقیم برای بیان منحنی رطوبتی توسعه یافته‌اند. در این روش‌ها منحنی مشخصه آب–خاک با استفاده از پارمترهای زود یافت خاک (درصد شن، سیلت، رس و ...) به دست می‌آیند. در میان روش‌های غیر مستقیم، توابع انتقالی (Saxton et al., 1986; Rawls and Brakensiek, 1985; Vereecken et al., 1989; Wosten et al., 2001; Schaap; Haghverdi et al., 2012) و روش‌های استفاده از هندسه فرکتال (Tyler and Wheatcraft 1990; Rieu and Sposito, 1991; Bird et al., 2000; Ghanbarian- Alvijeh et al., 2010; Ghanbarian-Alvijeh and Hunt, 2012; Chari and Dahmardeh, 2019) به طور گسترده مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته‌اند.

در توابع انتقالی از خصوصیات ساده‌تر خاک نظیر بافت، چگالی ظاهری و مواد آلی جهت محاسبه منحنی رطوبتی استفاده می‌گرددکه شامل سه گروه ۱) برآورد میزان رطوبت در پتانسیل ماتریک مشخص (Ghanbarian and Millán, 2010)، ۲) برآورد رابطه نگهداشت آب خاک با یک نگرش مدل فیزیکی مفهومی (Arya and Paris, 1981; Arya et al., 1999) و ۳) برآورد پارامترهای یک تابع نگهداشت (Saxton et al., 1986; Wosten et al., 2001) می‌باشد.

با توجه به اینکه به دست اوردن توزیع اندازه ذرات نسبت به منحنی رطوبتی خاک ساده‌تر است آریا و پاریس بر مبنای تشابه بین منحنی توزیع تجمعی اندازه ذرات و منحنی مشخصه رطوبتی خاک یک روش فیزیکی–تجربی (ترکیبی از فرض‌های فیزیکی و روابط تجربی) بر اساس توزیع اندازه ذرات و چگالی ظاهری خاک برای به دست آوردن منحنی مشخصه آب –خاک ارائه کردند (Arya and

۱– استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
۲– استادیار گروه مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی بم
(*– نویسنده مسئول: Email: mmahdichari@uoz.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.18.9

Paris, 1981؛ Sepaskhah and Rafiee, 2008). با توجه به سادگی و اهمیت مدل آریا و پاریس تحقیقاتی زیادی در زمینه استفاده از این مدل در برآورد منحنی رطوبتی صورت گرفته است. در این مدل ابتدا منحنی توزیع اندازه ذرات به n بخش مجزا تقسیم شده و قطر هر بخش برابر با میانگین قطر بخش بالایی و پایین است و معمولا از میانگین‌گیری حسابی استفاده می‌شود (رضایی و همکاران، ۱۳۹۰). در این مدل از یک پارامتر مقیاس (α) استفاده می‌شود که نقش بسیار مهمی در تعیین منحنی رطوبتی دارد (فولادمند و همکاران، ۱۳۸۳). با استفاده از پارامتر مقیاس می‌توان شعاع منافذ را از روی شعاع ذرات خاک تخمین زد.

آریا و پاریس نتیجه گرفتند که مقدار پارامتر مقیاس برای خاک‌های مورد آزمایش بین ۱/۳۵ تا ۱/۴ بوده و به طور متوسط برابر با ۱/۳۸ در نظر گرفتند (Arya and Paris, 1981). آریا و همکاران از سه روش مقدار ثابت (۱/۳۸)، خطی، لجستیک (غیر خطی S شکل) پارامتر مقیاس را به دست آورده و منحنی رطوبتی را پیش‌بینی کردند (Arya et al., 1999).

تایلر و ویت کرافت با استفاده از بعد فرکتال به دست آمده از مقادیر تعداد ذرات خاک در مقابل شعاع ذرات خاک برای بخش‌های مختلف مقدار پارامتر مقیاس را به دست آوردند و نشان دادند که پارامتر مقیاس دارای مفهوم فیزیکی است (Tyler and Wheatcraft, 1989). واز و همکاران با ارزیابی اعتبار مدل آریا و پاریس در ۱۰۴ نمونه از خاک‌های برزیل نشان دادند که استفاده از روش پارامتر مقیاس متغییر باعث افزایش دقت برآورد منحنی رطوبتی می‌شود. واز و همکاران پارامتر مقیاس را به صورت تابعی از مقدار رطوبت بیان کردند (Vaz et al., 2005). رضایی و همکاران (۱۳۸۳) ضرایب پیشنهادی آریا و همکاران (۱۹۹۹) برای برآورد پارامتر مقیاس در روش خطی را به گونه‌ای اصلاح کردند که این ضرایب مستقل از بافت خاک بوده و به چگالی ظاهری و نسبت پوکی بستگی داشته باشد. تاو و همکاران با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و مدل آریا و پاریس یک روش جدید برای محاسبه منحنی رطوبتی آب –خاک ارائه کردند و نشان دادند که این روش دارای دقت مناسبی است (Tao et al., 2017).

هوانگ و همکاران روش آریا وپاریس و فردلاند و همکاران (۲۰۰۲) را در پیش‌بینی منحنی رطوبتی برای تعدادی از نمونه‌های خاک کشور چین مورد مقایسه قرار دادند. در این تحقیق برای بدست آوردن پارامتر مقیاس در روش آریا و پاریس از روش خطی و از میانگین حسابی شعاع ذرات استفاده کردند. نتایج نشان داد که دقت روش فردلاند و همکاران (۲۰۰۲) بیشتر از روش آریا و پاریس است (Huang et al., 2009). رضایی و همکاران (۱۳۹۰) شش روش مختلف برآورد پارامتر مقیاس شامل مقدار ثابت، خطی، لجستیک، تایلر و ویت‌کرافت (۱۹۸۹)، واز و همکاران (۲۰۰۵)، رضایی و همکاران (۱۳۸۳) برای ۱۴ نمونه خاک منطقه شرق گیلان با بافت‌های مختلف مورد بررسی قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش خطی دارای بالاترین دقت می‌باشد. آنتنورو و همکاران روش‌های مدل لجستیک و خطی را در برآورد پارامتر مقیاس برای تعدادی از خاک‌هاس سسیل مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که که مدل لجستیک دارای دقت کمی بیشتر از مدل خطی هست. و در انتها رابطه‌ای بین فاکتور مقیاس بهینه و مقدار رس خاک و چگالی ظاهری خاک ارائه کرد (Antinoro et al., 2014).

اگرچه تحقیقات نسبتاً جامعی در زمینه استفاده از مدل آریا و پاریس برای تخمین منحی رطوبتی صورت گرفته است اما تا کنون مطالعه‌ای در زمینه تاثیر انتخاب میانگین هندسی و هارمونیک به عنوان شعاع متوسط ذرات جامد در بخش‌های مختلف منحنی دانه‌بندی صورت نگرفته است. در نتیجه این پژوهش با هدف مقایسه میانگین حسابی، هندسی و هارمونیک به عنوان شعاع متوسط ذرات جامد در بافت‌های مختلف خاک و مکش‌های متفاوت صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

مدل آریا و پاریس

روابط پایه‌ای مدل آریا و پاریس که ارتباط رطوبت حجمی و مکش آب در خاک را بیان می‌کند به صورت زیر است:

$$V_{Vi} = \left(\frac{w_i}{\rho_s}\right) e = \pi r_i^2 l_i \quad (۱)$$

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_b} - 1 \quad (۲)$$

$$\theta_i = \rho_b \sum_{j=1}^{i} V_{Vj} \quad (۳)$$

$$n_i = \frac{3w_i}{4\pi\rho_s \bar{R}_i^3} \quad (۴)$$

$$l_i = 2n_i^{\alpha_i} R_i \quad (۵)$$

$$r_i = 0.186\bar{R}_i \sqrt{en_i^{(1-\alpha_i)}} \quad (۶)$$

$$h_i = \frac{2\gamma cos\beta}{\rho_w g r_i} \quad (۷)$$

و با استفاده از ترکیب معادله (۶) و (۷) داریم:

$$h_i = \frac{0.18}{\bar{R}_i \sqrt{en_i^{(1-\alpha_i)}}} \quad (۸)$$

در روابط بالا اندیس i در تمامی مولفه‌ها نشان دهنده ارزش مولفه در iمین بخش از منحنی نوزیع اندازه ذرات است. V_{Vi} حجم منافذ خاک، w_i کسر جرمی ذرات خاک، ρ_s جرم مخصوص حقیقی، ρ_b جرم مخصوص ظاهری، r_i میانگین اندازه شعاع منافذ، l طول منافذ، e نسبت پوکی، θ_i رطوبت حجمی خاک هنگامی که تمام

منافذ از کوچکترین تا منافذ بخش i ام از آب پر شده باشد، n_i تعداد درات خاک با شکل کروی، $\bar{R}_i$ میانگین اندازه شعاع ذرات جامد کروی خاک، h مکش رطوبتی خاک و α پارامتر مقیاس است. γ و β به ترتیب کشش سطحی ($N\ m^{-1}$) و زاویه تماس آب با خاک است.

تعیین پارامتر مقیاس

برای تعیین α در ابتدا باید تعداد ذرات خاک با شکل واقعی (N_i) را در هر بخش از منحنی دانه‌بندی خام i به‌دست آورد. از آنجاکه ذرات خاک کاملا کروی نیستند فرض می‌شود که هر قسمت از منحنی دانه‌بندی تعداد ذرات کروی خاک (n_i) با تعداد ذرات واقعی خاک (N_i) با استفاده از پارامتر مقیاس (α_i) به هم مرتبط هستند:

$$n_i^{\alpha} = N_i \quad or \quad \alpha = \frac{logN_i}{logn_i} \qquad (۹)$$

به طور معمول برای اندازه‌گیری α از سه روش پارامتر مقیاس ثابت، منحنی رشد لجستیک و اصل تشابه استفاده می‌شود. نتایج بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که دقت روش اصل تشابه بیشتر از دو روش دیگر است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۰، فولادمند و همکاران، ۱۳۸۳). در این تحقیق به منظور تعین α از اصل تشابه استفاده شد.

اصل تشابه

آریا و همکاران (۱۹۹۹) نشان دادند که بین $logN_i$ و $\log\left(\frac{w_i}{R_i^3}\right)$ رابطه خطی وجود دارد:

$$logN_i = \mathrm{a} + \mathrm{b}\log\left(\frac{w_i}{\bar{R}_i^3}\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن، a و b ثابت‌های تجربی هستند و به وسیله آریا و همکاران برای تعدادی از خاک‌ها ارائه شده است (Arya et al., 1999). از ترکیب رابطه (۹) و (۱۰) خواهیم داشت:

$$\alpha_i = \left[\frac{\mathrm{a} + \mathrm{b}\log\left(\frac{w_i}{\bar{R}_i^3}\right)}{logn_i}\right] \qquad (۱۱)$$

روش پیشنهادی

به طور معمول در تحقیقات گذشته برای به دست آوردن $\bar{R}_i$ برای بخش i ام منحنی دانه‌بندی از میانگین حسابی استفاده شده است:

$$\bar{R}_i = \frac{R_i + R_{i+1}}{2} \qquad (۱۲)$$

در این پژوهش برای به دست آوردن مقدار شعاع متوسط ذرات خاک برای بخش i ام منحنی دانه‌بندی علاوه از میانگین حسابی از میانگین هندسی (رابطه، ۱۳) و میانگین هارمونیک (رابطه، ۱۴) استفاده شد:

$$\bar{R}_{Gi} = \sqrt{R_i . R_{i+1}} \qquad (۱۳)$$

$$\bar{R}_{Hi} = \frac{2}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{i+1}}} \qquad (۱۴)$$

تعیین مقدار متوسط شعاع ذرات خاک با استفاده هر هریک از روابط ۱۲، ۱۳ و ۱۴ سبب می‌گردد که مقدار n_i، α ، h_i و رطوبت حجمی را تحت تاثیر قرار گیرد. در این پژوهش مقدار متوسط شعاع ذرات خاک به دست آمده از روش‌های مختلف برای بافت‌های متفاوت خاک مورد بررسی قرار گرفت.

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از ۱۹ نمونه خاک با بافت‌های مختلف از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری مزرعه سد سیستان در دانشگاه زابل استفاده شد که مشخصات آماری آنها در جدول (۱) موجود می‌باشد. بافت خاک به روش هیدرومتر و جرم مخصوص ظاهری با روش سیلندر محاسبه گردید. به منظور تعیین منحنی توزیع تجمعی اندازه ذرات خاک (احزای کوچکتر از ۲ میلی‌متر) از روش هیدرومتری ۸ قرائت استفاده شد. با استفاده از دستگاه صفحات فشاری میزان رطوبت هر نمونه خاک در سه تکرار در پتاسیل‌های صفر، ۵-، ۳۳-، ۱۰۰-، ۵۰۰- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- بعضی از خواص فیزیکی خاک‌های این پژوهش

بافت خاک	تعداد	شن (٪)		سیلت (٪)		رس (٪)	
		حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
لومی	۸	۵۰	۲۹	۴۱	۲۹	۲۵	۱۵
رسی	۲	۲۲	۱۴	۳۷	۲۹	۵۶	۴۰
شنی	۲	۸۶	۸۴	۱۰	۹	۷	۴
لوم سیلتی	۴	۵۰	۳۵	۵۵	۵۰	۱۹	۱۱
لوم شنی	۳	۶۰	۵۳	۳۴	۲۰	۱۴	۹

ارزیابی روش‌ها

به منظور ارزیابی روش‌های مختلف در پیش‌بینی منحنی رطوبتی، از شاخص‌های آماری جذر مربع میانگین خطاهای نرمال شده (*NRMSE*، رابطه ۱۵)، میانگین خطا (*ME*، رابطه ۱۶)، نسبت میانگین خطای هندسی (*GMER*، رابطه ۱۷) و خط رگرسیون استفاده گردید:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\Sigma(p_i - o_i)^2 / n}}{\overline{p}} \quad (۱۵)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}(o_i - p_i)}{n} \quad (۱۶)$$

$$GMER = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\ln(\varepsilon_i)}{n}\right] \quad (۱۷)$$

در این روابط o_i و p_i به‌ترتیب مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده در i، $\overline{0}$ و $\overline{p}$ میانگین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، ε نسبت خطا که از تقسیم p_i به o_i به‌دست می‌آید و n تعداد نمونه‌ها می‌باشد. هرچه مقدار *NRMSE* و *ME* نزدیک به صفر باشد مدل مناسب‌تر است. مقدار بهینه *GMER* برابر با یک می‌باشد و تطبیق بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی را نشان می‌دهد. همچنین برای درک بهتر عملکرد مدل‌ها، مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل‌های مختلف برای خاک‌هایی با بافت مختلف رسم گردید.

نتایج و بحث

فاکتور مقیاس(α)

مقادیر حداقل و حداکثر پارامتر مقیاس (α) برای قسمت‌های مختلف منحنی دانه‌بندی هر خاک و سه روش میانگین‌گیری هندسی و میانگین‌گیری هارمونیک در جدول ۲ ارائه شده است. بیشترین مقدار پارامتر مقیاس مربوط به خاک لوم‌شنی و روش میانگین هارمونیک با مقدار ۱/۵۵ و کمترین مقدار مربوط به خاک رس و روش میانگین حسابی با مقدار ۱/۰۶۷ بود. بیشترین تغییرات فاکتور مقیاس مربوط به خاک شنی و لوم شنی است. مقدار فاکتور مقیاس در خاک‌های سبک بزرگتر از خاک‌های سنگین است. واز و همکاران نشان دادند که مقدار فاکتور مقیاس برای خاک‌های سبک (شنی و لوم شنی) بزرگتر از خاک‌های سنگین است (Vaz et al., 2005). نتایج فولادمند و همکاران (۱۳۸۳) و خشنود یزدی و قهرمان (۱۳۸۳) نیز با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. در تمامی خاک‌ها روش میانگین حسابی دارای کمترین مقدار و روش میانگین هارمونیک دارای بیشترین مقدار است. روش میانگین هندسی مابین دو روش ذکر شده قرار داشت.

جدول ۲- مقدار حداکثر و حداقل α به دست آمده در خاک‌ها و روش‌های مختلف

بافت خاک	میانگین حسابی		میانگین هندسی		میانگین هارمونیک	
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
شن	۱/۱۱	۱/۴۸	۱/۰۸	۱/۴۹	۱/۰۸	۱/۵۱
لوم شنی	۱/۱۵	۱/۵۰	۱/۱۳	۱/۵۲	۱/۱۲	۱/۵۵
لوم	۱/۲۴	۱/۳۵۳	۱/۲۵۱	۱/۳۷۲	۱/۲۶	۱/۴۱
لوم سیلتی	۱/۱۱	۱/۲۱	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۱۳	۱/۲۷
رس	۱/۰۶	۱/۲۳	۱/۰۸	۱/۲۵	۱/۰۸	۱/۲۵

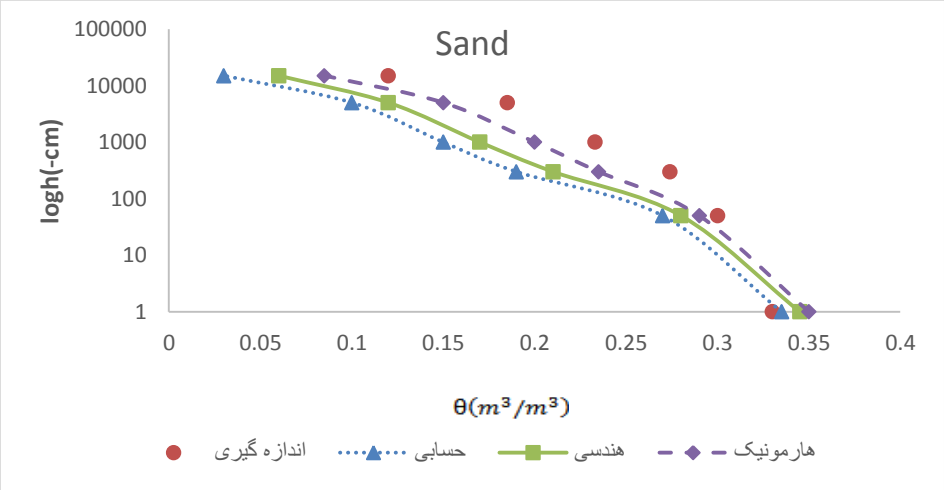
منحنی رطوبتی

در جدول ۳ پارامترهای آماری روش‌های مختلف شامل NRMSE، ME و GMER برای ۱۹ نمونه بافت خاک مختلف مورد مطالعه بیان گردیده است. همچنین برای درک بهتر در شکل‌های ۱ تا ۵ منحنی مشخصه آب خاک ۵ نمونه خاک با بافت مختلف با استفاده از شعاع ذرات به دست آمده از میانگین‌های حسابی، هندسی و هارمونیک محاسبه شده رسم گردیده است.

خاک شنی

شکل (۱) منحنی رطوبتی به دست آمده با روش‌های مختلف تعیین فاکتور مقیاس را برای خاک شنی نشان می‌دهد. به طور کلی شکل ۱ نشان می‌دهد که در مکش‌های کم دقت هر سه روش میانگین‌گیری تعیین فاکتور مقیاس نزدیک به یکدیگر بوده و با افزایش مکش اختلاف بین روش‌های محاسبه منحنی رطوبتی افزایش یافته است. بر اساس جدول ۳ کمترین مقدار NRMSE در خاک شنی برابر با ۰/۰۲۲ برای روش میانگین هارمونیک برای به

دست آوردن فاکتور مقیاس به دست آمده است و بیشترین مقدار NRMSE برابر با ۰/۲۹۵ برای میانگین حسابی است. مقدار ME برای به‌دست آوردن فاکتور مقیاس با استفاده از میانگین‌های حسابی، هندسی و هارمونیک به ترتیب برابر با ۰/۰۷۳، ۰/۵۲ و ۰/۰۲۷ $(\frac{m^3}{m^3})$ است. بیشترین مقدار GMER مربوط به روش میانگین‌گیری هارمونیک با مقدار ۰/۸۹۱ است. به طور کلی نتایج شکل ۱ و جدول ۲ نشان می‌دهد که در خاک شنی نتایج مربوط به استفاده از میانگین هارمونیک برای شعاع متوسط ذرات خاک بیشترین دقت را در مقایسه با سایر روش‌ها نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. کمترین دقت نیز مربوط به استفاده از میانگین حسابی برای شعاع متوسط ذرات خاک است. دقت میانگین هندسی از حسابی بیشتر و از میانگین هارمونیک کمتر می‌باشد.



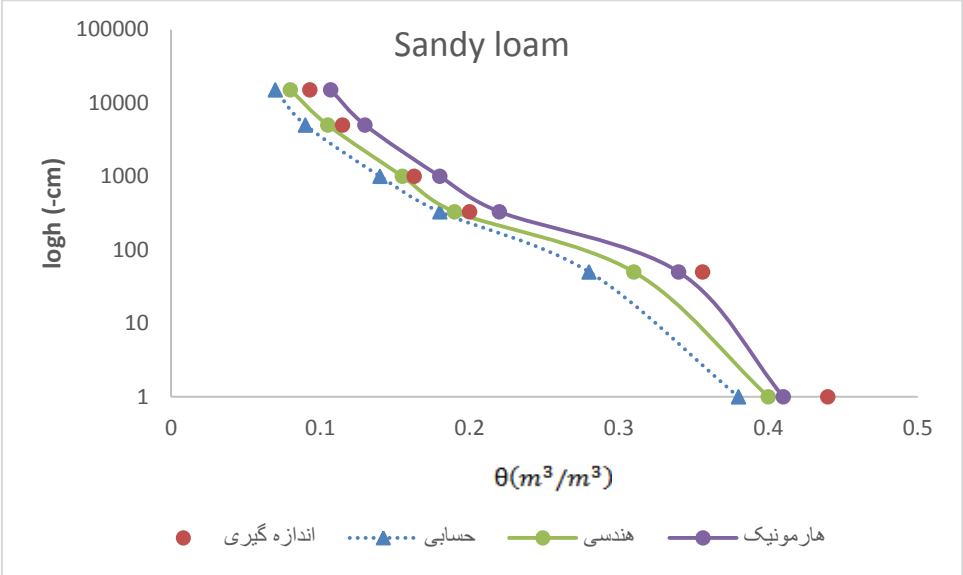
شکل ۱- منحنی مشخص آب خاک برای خاک شنی

خاک لوم شنی

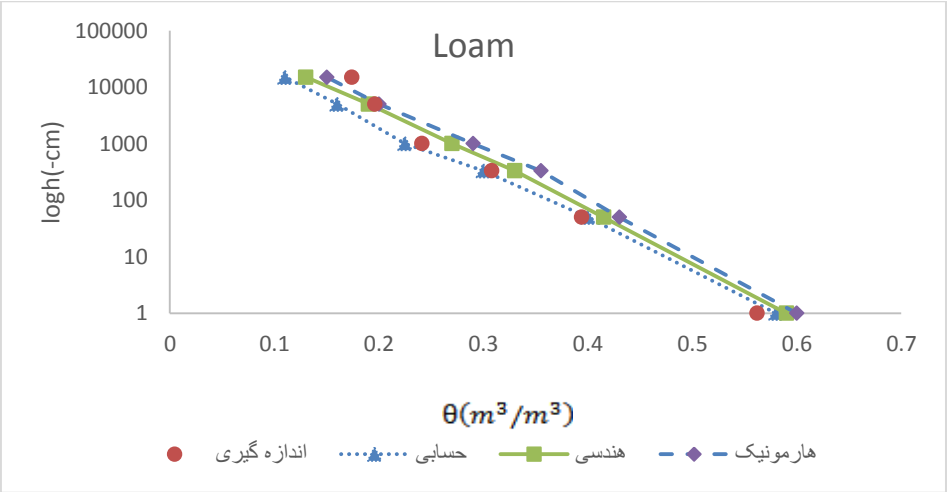
مطابق شکل (۲) در خاک لوم شنی برای مکش های کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر آب کم (در نتیجه خاک دارای رطوبت زیاد) روش میانگین‌گیری هارمونیک دارای دقت بیشتر نسبت به سایر موارد است. در مکش‌های متوسط دقت روش میانگین‌گیری هندسی بیشتر می‌شود به طوری که که مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش‌های ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ سانتی‌متر برابر با ۰/۱۶ و ۰/۱۱۵ بوده و رطوبت تخمین زده شده با روش میانگین‌گیری هندسی در این مکش‌ها به ترتیب برابر با ۰/۱۵۵ و ۰/۱۰۵ است. برای ۳ نمونه خاک لوم‌شنی مورد مطالعه در این تحقیق مقدار متوسط NRMSE به ترتیب برای میانگین‌گیری حسابی، هندسی و هارمونیک ۰/۲۹۷، ۰/۱۴۷ و ۰/۱۱۱ بود که نشان‌دهنده دقت بیشتر روش میانگین‌گیری هارمونیک در خاک لوم‌شنی است. مقدار ME در میانگین‌گیری حسابی و هندسی مقدار مثبت و در میانگین‌گیری هارمونیک دارای مقدار منفی بود که نشان‌دهنده کم‌برآورد روش میانگین‌گیری حسابی و هندسی و بیش‌برآورد روش میانگین‌گیری هارمونیک است. فولادمند و همکارن (۱۳۸۳) نشان دادند که روش میانگین‌گیری حسابی مقدار رطوبت را کم‌برآورد اندازه‌گیری می‌کند. روش میانگین‌گیری هارمونیک با GMER برابر با ۰/۹۱۳ دارای بهترین نتایج بود. با افزایش مکش در خاک لوم‌شنی دقت روش میانگین‌گیری هندسی و هارمونیک بیشتر از میانگین‌گیری حسابی است. روش میانگین‌گیری هارمونیک در خاک لوم‌شنی دارای بهترین نتایج بود.

خاک لوم

مطابق شکل ۳ در خاک لومی تا مکش نزدیک به ۱۰۰۰ سانتی‌متر دقت استفاده از میانگین‌گیری حسابی برای شعاع ذرات بیشتر از دو روش دیگر در تخمین رطوبت است. با افزایش مقدار مکش دقت استفاده از روش میانگین‌گیری حسابی برای شعاع ذرات کاهش می‌یابد و دقت روش میانگین‌گیری هندسی افزایش یافته است و در نهایت برای مکش‌های خیلی زیاد بیشترین دقت مربوط به میانگین‌گیری هارمونیک است. برای ۸ خاک با بافت لومی مقدار متوسط NRMSE برای میانگین‌های حسابی، هندسی و هارمونیک به ترتیب برابر با ۰/۱۵۷، ۰/۰۹۷ و ۰/۲۰۱ است. مقدار ME برای میانگین‌گیری حسابی برابر با ۰/۰۲۴ و برای میانگین‌گیری هارمونیک برابر با ۰/۳۷- است که نشانده این است که میانگین‌گیری حسابی مقدار رطوبت را کم‌برآورد و میانگین‌گیری حسابی مقدار رطوبت را بیش‌برآورد نشان می‌دهد. مقدار GMER مربوط به روش میانگین‌های حسابی، هندسی و هارمونیک به ترتیب برابر با ۰/۸۴۱، ۰/۹۵۵ و ۱/۱۲۴ بود. به طور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در خاک لومی دقت روش میانگین هندسی بیشتر از دو روش دیگر است.



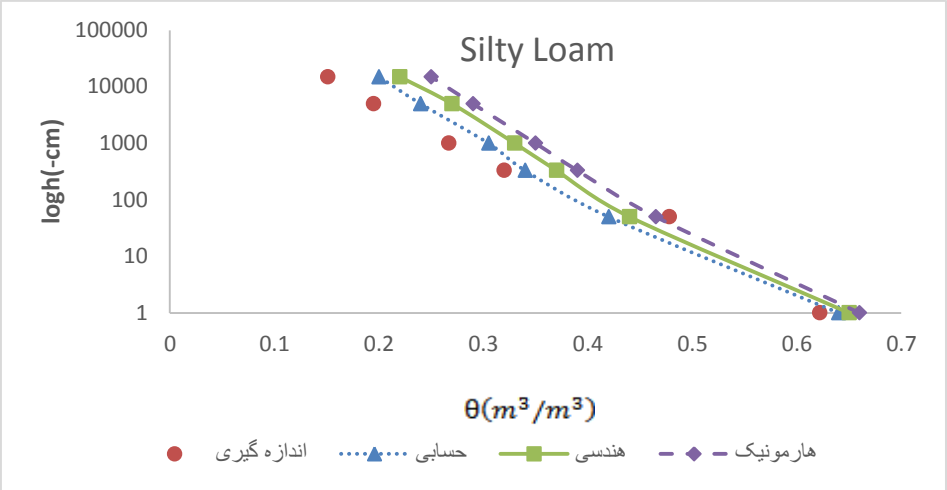
شکل ۲- منحنی مشخص آب خاک برای خاک لوم شنی



شکل ۳- منحنی مشخص آب خاک برای خاک لوم

خاک لوم سیلتی

برای نمونه خاک لوم سیلتی رسم شده در شکل ۴ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده بین ۰/۶۲۲ تا ۰/۱۵۱ درصد حجمی است و در این خاک مقادیر رطوبت محاسبه شده با استفاده از میانگین‌گیری حسابی بین ۰/۶۴ تا ۰/۲۰ درصد حجمی، برای میانگین‌گیری هندسی ۰/۶۵ تا ۰/۲۲ و برای میانگین‌گیری هارمونیک بین ۰/۶۶ تا ۰/۲۵ است. کمترین مقدار NRMSE برای خاک‌های لومی سیلتی استفاده شده در این تحقیق برابر با ۰/۲۰۵ برای روش میانگین گیری حسابی بود. مقدار ME برای میانگین‌گیری حسابی، هندسی و هارمونیک به ترتیب برابر ۰/۰۱۹، ۰/۰۸۸- و ۰/۱۲۳- بود. مقدار ME منفی نشان دهنده بیش‌برآورد این روش‌ها میانگین‌گیری هندسی و هارمونیک در به دست آوردن رطوبت است. مقدار GMER دارای بهترین نتایج با مقدار ۰/۹۰۱ برای میانگین‌گیری حسابی بود. اگرچه دقت روش استفاده از میانگین‌گیری حسابی در برآورد رطوبت نسبت به دو روش هندسی و هارمونیک کمی بهتر است ولی به طور کلی روش آریا و پاریس در این خاک دارای کمترین دقت در بین خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش بود.

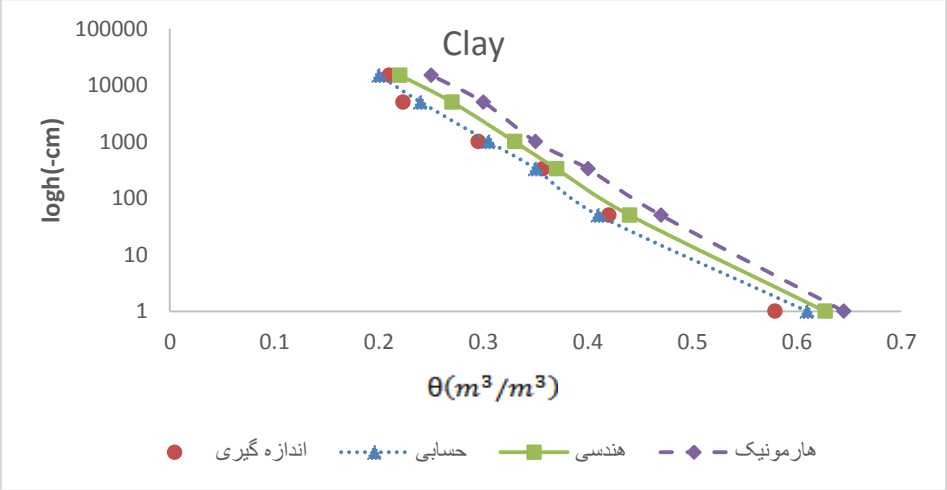


شکل ٤- منحنی مشخص آب خاک برای خاک لوم سیلتی

خاک رسی

در خاک رسی در مکش‌های کم و متوسط رطوبت تخمین زده شده با استفاده از میانگین‌گیری هندسی و حسابی نزدیک به رطوبت اندازه گیری شده است به طوری که که در مکش ۵۰ سانتی‌متر رطوبت اندازه‌گیری شده برابر با ۰/۴۲ درصد حجمی و رطوبت تخمین زده شده با میانگین‌گیری هندسی و حسابی به ترتیب برابر با ۰/۴۴ و ۰/۴۱ درصد حجمی و در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر مقدار رطوبت اندازه‌گیری برابر با ۰/۳۵۷ و رطوبت محاسبه شده با میانگین‌گیری هندسی ۰/۳۷ و حسابی ۰/۳۵ بود. مقدار رطوبت تخمین زده شده با روش میانگین‌گیری هارمونیک در مکش ۵۰ سانتی‌متر برابر با ۰/۴۷ و در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر ۰/۴ است (شکل ۵). مقدار ME برای دو نمونه خاک رسی مورد استفاده در این تحقیق در هر سه روش به دست آوردن رطوبت منفی بود که نشان دهنده بیش‌برآورد این سه روش در محاسبه مقدار رطوبت است. مقدار GMER برای هر سه روش بزرگتر از یک بود و برای روش میانگین‌گیری حسابی با مقدار ۱/۰۳۲ بهتر از دو روش دیگر است. به طورکلی در خاک رسی مقدار رطوبت تخمین زده شده با روش میانگین‌گیری هارمونیک دارای کمترین دقت و روش استفاده از میانگین‌گیری حسابی دارای بیشترین دقت است.

جدول (۴) مقایسه میانگین مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از میانگین‌گیری حسابی، هندسی و هارمونیک با استفاده از شاخص‌های آماری ریشه مربع میانگین خطاهای نرمال شده، میانگین خطا و نسبت میانگین خطای هندسی را برای تمامی خاک‌ها نشان می‌دهد.



شکل ٥- منحنی مشخص آب خاک برای خاک رسی

جدول ۳- مقادیر خصوصیات آماری روش‌های مختلف تعیین فاکتور مقیاس

بافت خاک	پارامتر آماری	میانگین حسابی	میانگین هندسی	میانگین هارمونیک
شن	NRMSE	۰/۳۳۲	۰/۲۷۵	۰/۲۰۳
	ME	۰/۰۷۳	۰/۰۴۵	۰/۰۲۷
	GMER	۰/۶۰۵	۰/۷۲۱	۰/۸۶۵
لوم شنی	NRMSE	۰/۲۹۷	۰/۱۴۷	۰/۱۱۱
	ME	۰/۰۴۷	۰/۰۳۹	−۰/۰۱۲
	GMER	۰/۸۷۰	۰/۹۱۳	۱/۰۹۷
لوم	NRMSE	۰/۱۵۷	۰/۰۹۷	۰/۲۰۱
	ME	۰/۰۲۴	۰/۰۱۰	−۰/۰۳۷
	GMER	۰/۸۴۱	۰/۹۵۵	۱/۱۲۴
لوم سیلتی	NRMSE	۰/۲۰۵	۰/۲۳۴	۰/۳۲۶
	ME	۰/۰۱۹	−۰/۰۸۸	−۰/۱۲۳
	GMER	۰/۹۰۱	۱/۲۳۴	۱/۳۵۴
رسی	NRMSE	۰/۰۵۸	۰/۱۰۵	۰/۲۰۴
	ME	−۰/۰۰۱	−۰/۰۷۸	−۰/۱۲۵
	GMER	۱/۰۳۲	۱/۱۵۴	۱/۱۶۸

مقدار NRMSE برای روش میانگین‌گیری حسابی، هندسی و هارمونیک به ترتیب برابر با ۰/۲۰۹، ۰/۱۷۱ و ۰/۲۱۹ است. مقدار ME برای روش میانگین‌گیری حسابی و هندسی مثبت بوده و برای میانگین‌گیری هارمونیک کوچکتر از صفر و منفی است. که نشان‌دهنده بیش‌برآورد روش میانگین‌گیری هارمونیک در برآورد رطوبت است. مقدار GMER دارای بهتریت نتایج در روش میانگین‌گیری هندسی با مقدار ۰/۹۸۷ است. به طور کلی نتایج برای کل خاک‌ها نشان می‌دهد که دقت روش میانگین‌گیری هندسی بهتر از دو روش دیگر می‌باشد اگرچه دقت دو روش دیگر نیز نزدیک به روش میانگین‌گیری هندسی است.

جدول ٤- مقادیر میانگین شاخص‌های آماری بر اساس روش‌های مختلف

پارامتر آماری	میانگین گیری حسابی	میانگین گیری هندسی	میانگین گیری هارمونیک
NRMSE	۰/۲۰۹	۰/۱۷۱	۰/۲۱۹
ME	۰/۰۳۳	۰/۰۰۳	−۰/۰۵۴
GMER	۰/۸۴۹	۰/۹۸۷	۱/۱۲۲

نتیجه‌گیری

به طور معمول در روش آریا و پاریس به منظور تخمین رطوبت از میانگین حسابی شعاع در هر بخش از منحنی دانه‌بندی استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش میانگین‌گیری هندسی و میانگین‌گیری هارمونیک برای تخمین رطوبت استفاده شد و با رطوبت تخمین زده با روش میانگین‌گیری حسابی در خاک‌های متفاوت و مکش های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بر اساس شاخص آماری NRMSE، ME و GMER مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در خاک های شنی و لوم شنی روش میانگین‌گیری هارمونیک دارای دقت بیشتری از سایر روش است. در خاک با بافت لومی روش میانگین‌گیری هندسی دارای دقت بیشتری بود و در خاک‌هاس سنگین مانند خاک رسی و لوم‌سیلتی روش میانگین‌گیری حسابی دارای بیشترین دقت بود. همچنین بر اساس میانگین کل خاک‌ها روش میانگین‌گیری هندسی دارای بهترین نتایج بود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-9819-122 انجام شد که بدین‌وسیله از آن تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

خشنودیزدی، ع.ا.، و قهرمان، ب. ۱۳۸۳. بررسی روابط بافت خاک و پارامتر مقیاس‌بندی برای برآورد رطوبت خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۵(۲۰): ۱۷-۳۴.

رضـــایی، ح.، نیشـــابوری م. ر.، و سپاســـخواه ع ر. ۱۳۸۳. ارزیـــابی شبیه‌سازی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس توزیع دانـه‌بنـدی ذرات خاک، مجله دانش کشاورزی. ۱۵(۲): ۱۱۹-۱۳۰.

رضایی، ل.، شعبانپور، م.، دواتگر، ن. ۱۳۹۰. برآورد پارامتر مقیاس بـه روشهای مختلف در مدل آریا و پاریس برای بهبود تخمین منحنی مشخصه آب خاک. دانش آب و خاک. ۳ (۲۱): ۱۰۳-۱۱۴.

فولادمنـد، ح.، سپاسـخواه، ع.ر.، نیـازی، ج. ۱۳۸۳. تخمـین منحنـی مشخصه آب خاک بـا اسـتفاده از منحنـی دانـه بنـدی و چگـالی ظاهری خاک. مجله علوم و فنون کشاورزی و منـابع طبیعـی. ۳: ۱-۱۲.

Antinoro, C., Bagarello, V. Ferro, V., Giordano, G., and Iovino M. 2014. A simplified approach to estimate water retention for Sicilian soils by the Arya–Paris model. Geoderma 213: 226–234.

Arya, L.M., and Paris, JF. 1981. A physic empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data. Soil Science Society of America Journal 45: 1023-1030.

Arya, L.M., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th., and Shouse, P.J. 1999. Scaling parameter to predict the soilwater characteristic from particle size distribution data. Soil Science Society of America Journal 63: 510-519.

Bird, N., Perrier, E., and Rieu, M. 2000. The water retention curve for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. Eur. J. Soil Sci. 55:55–63.

Chari, M.M., and Dahmardeh, M.R. 2019. Evaluating fractal dimension of the soil particle size distributions and soil water retention curve obtained from soil texture components. Archive of agronomy soil science. https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1686140

Ghanbarian-Alavijeh, B., and Millán, H. 2010. Point pedotransfer functions for estimating soil water retention curve. Int. Agrophys 24: 243-251.

Huang, M., Fredlund, D.G., Fredlund M.D. 2009. Comparison of Measured and PTF Predictions of SWCCs for Loess Soils in China. Geotech Geol Eng. DOI 10.1007/s10706-009-9284-x.

Medina, H., Tarawally, M., del Valle, A and Ruiz, M.E. 2002: Estimating soil water retention curve in rhodic ferralsols from basic soil data. Geoderma 108: 277–285.

Rawls W.J., and Brakensiek, D.L. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones E., Ward T.J. (Eds.), Watershed Manage. Eighties. Proceedings of the Sym-posium of ASAE, Denver, pp: 293–299.

Rieu, M., and Sposito, G. 1991. Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties: I. Theory. Soil Sci. Soc. Am. J, 55: 231 – 1238.

Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. J., 50, 1031–1036.

Sepaskhah, A.R., and Rafiee, M.R. 2008. Evaluation of scaling parameter to predict soil water characteristic curve using improved particle size distribution. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering 35 (B5):549-556.

Schaap, M.G., Nemes, A and van Genuchten, M.Th., 2004. Compar-ison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. Vadose Zone J. 3: 1455–1463.

Tao, H., Chen, C., Jiang, P., and Tang, L. 2017. Soil water characteristic curves based on particle analysis. Procedia Engineering 174: 1289-1295.

Tyler, S.W., and Wheatcraft, S.W. 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. Soil Science Society of America Journal. 53: 987-996.

Tyler, S.W., and Wheatcraft, S.W. 1990. Fractal processes in soil water retention. Water Resour Research 26:1047–1054.

Vereecken, H., Maes J., Feyen, J., and Darius P. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. Soil Sci, 148: 389–403

Wosten J.H.M., Pachepsky, Y.A., and Rawls, W.J. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. Journal of Hydrology 251: 123–150.

Vaz, C.M.P., Iossi, M.F., Naime, J.M., Macedo, A., and Reichert JM, Reinert DJ and Cooper M, 2005. Validation of the Arya and Paris water retention model for Brazilian soils. Soil Science Society of America Journal 69: 577-583.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2234-2243

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۴۳-۲۲۳۴

Effect of Mean Radius of Soil Particles on Estimation of Water-Soil Moisture Curve based on Aria- Paris Model

M.M. Chari[1]*, A.R. Vahidi [2]

Recived: May.26, 2020 Accepted: Oct.13, 2020

Abstract

It is much easier to measure solid phase data or particle size distribution than soil water retention curve, some researchers use the similarity between the shape of particle size distribution and soil water characteristic curve. One of the soil water characteristic curve is the Aria and Paris model. The Aria and Paris model is a physical based model that is widely used to obtain the soil water retention curve. In this model, the particle size distribution curve was divided into n separate fractions, which the diameter of each fraction is equal to the mean of the upper and lower limit diameter. This model usually uses arithmetic average. In this study, the effect of arithmetic mean, geometric and harmonic means as the mean radius of solid particles in different soil textures and suctions were investigated. For this purpose, 19 soil samples in SiStan regoin with sandy, sandy loam, loam, and silty loam and clay textures were evaluated. In coarse soils such as sandy and sandy loam, the best results were obtained when the harmonic mean was used In the loam and silt loam soils, the best results were obtained when geometric average was used as the mean diameter of the different fractions. In clay soil, the best results were related to arithmetic average. In general, it can be concluded that using the different methods of means the accuracy of Aria and Paris models increases in estimating the water content.

Keywords: Soil moisture characteristic curve, Particle size, Soil texture

1- Assistance Professor ,Water Engineering Department, University of Zabol
2- Assistance Professor, Bam University
(*- Corresponding Author Email: mmahdichari@uoz.ac.ir)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۵۶-۲۲۴۴

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2244-2256

مقاله پژوهشی

ارزیابی حجم آب کاربردی و بهره‌وری آب در کانون‌های اصلی تولید پسته کشور

(استان‌های کرمان، خراسان‌رضوی، یزد و سمنان)

سیدحسن موسوی‌فضل[۱*]، محمدحسن رحیمیان[۲]، نادر کوهی[۳]، حمید ریاحی[۴]، مجید کرامتی[۵]، فریبرز عباسی[۶]، جواد باغانی[۷]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۲۱

چکیده

تولید پسته در ایران سابقه طولانی دارد. اهمیت کشت پسته و کمبود آب در کشور، ضرورت ارتقاء بهره‌وری آب برای این محصول با ارزش را آشکارتر ساخته است. این پژوهش با هدف اندازه‌گیری میدانی حجم آب کاربردی پسته در شرایط زارعین، مقایسه آن با نیاز آبی و سند ملی آب و نیز تعیین بهره‌وری آب پسته در استان‌های خراسان رضوی، سمنان، کرمان و یزد از مهرماه ۱۳۹۵ به مدت یک سال انجام شد. در چهار استان عمده‌ی تولید پسته، ۸۸ باغ انتخاب و در آن‌ها حجم آب کاربردی، بهره‌وری آب، عملکرد و برخی پارامترهای دیگر اندازه‌گیری شد. در این پژوهش، از تحلیل واریانس برای بررسی تفاوت عملکرد، حجم آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید پسته، استفاده شد. نتایج پژوهش نشانگر تفاوت معنی‌دار حجم آب کاربردی و شاخص بهره‌وری آب در تولید پسته در استان‌های منتخب بود، اما عملکردها به هم نزدیک بوده و تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها مشاهده نشد. میانگین عملکرد، حجم آب کاربردی، بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب با احتساب بارش مؤثر به‌ترتیب ۱۷۶۴ کیلوگرم در هکتار، ۸۰۵۷ مترمکعب در هکتار و ۰/۲۶ و ۰/۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. نتایج نشان داد که حجم آب کاربردی تقریباً در تمام باغ‌های پسته‌ی کشور کمتر از نیاز خالص آبیاری است و متوسط عملکرد در مقایسه با سایر کشورها حدود ۵۰ درصد کمتر است. مهم‌ترین علل پایین بودن عملکرد پسته در کشور را می‌توان کم‌آبیاری اجباری، شوری، خرده مالکی، مدیریت ضعیف باغ‌ها و ارقام نامناسب عنوان کرد.

واژه‌های کلیدی: نیاز آبی، راندمان کاربرد، نیاز آبیاری

مقدمه

تولید پسته در کشور سابقه‌ی طولانی دارد. پسته‌ی ایران به دلیل کیفیت بالای آن در بین‌کشورهای تولیدکننده این محصول در دنیا کم نظیر است. از حدود ۷۰ سال پیش با شروع صادرات، پسته ارزش‌اقتصادی و تجاری ویژه‌ای در اقتصاد ایران پیدا کرد و جایگاه آن به عنوان سومین منبع تأمین ارز بعد از نفت و فرش تقریباً تثبیت شد (عبداللهی عزت آبادی، ۱۳۸۷). در رتبه‌بندی مزیت نسبی صادرات کشورهای عمده صادرکننده پسته جهان براساس صادرات غیرنفتی، ایران در رتبه اول و کشورهای هنگ‌کنگ، ترکیه و آلمان در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (پاکروان و همکاران ۱۳۹۰).

سطح زیرکشت قابل توجه باغ‌های پسته‌ی کشور در استان‌های کرمان، یزد، سمنان، خراسان رضوی، خراسان جنوبی، مرکزی، قم، سیستان و بلوچستان و اصفهان قرار دارند. ایران با بیش از ۴۵۰ هزار هکتار سطح زیرکشت پسته (در ۲۲ استان کشور) از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان این محصول در دنیا به‌شمار می‌رود (حسینی فرد و همکاران، ۱۳۹۶).

امروزه پسته در ایران با مسایل و مشکلاتی چون عملکرد کم (نسبت به کشورهای رقیب)، هزینه‌های بالای تولید، کم آبی، فرآوری و بسته‌بندی نامناسب روبروست (یزدان‌پناه و جعفری طاهری، ۱۳۸۳).

۱- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، شاهرود، ایران.
۲- استادیار پژوهشی مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.
۳ و ۴ - به ترتیب استادیار و مربی پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران
۵- مربی پژوهشی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، خراسان رضوی ، ایران.
۶ و ۷- به ترتیب استاد و استادیار پژوهشی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
(*- نویسنده مسئول: (Email: HMousavifazl@yahoo.com
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.1.2

براساس آمارنامه وزرات جهاد کشاورزی (۱۳۹۶) متوسط عملکرد پسته در کشور حدود ۸۴۸ کیلوگرم در هکتار است. متوسط عملکرد پسته کشور در باغ‌های ۱۸ تا ۲۰ ساله (در صورتی که خوب مدیریت شده باشند) به یک تن در هکتار می‌رسد در حالی که بر اساس آمار فائو، در آمریکا باغ‌های در سال ششم به عملکرد یک تن در هکتار و در سال دوازدهم به حدود ۴ تن در هکتار می‌رسند. آمریکا با سطح زیر کشت کمتر از یک پنجم سطح زیرکشت پسته ایران، به تولید یک و نیم برابری نسبت به ایران دست یافته است (نظری، ۱۳۹۲). بر اساس آمار سازمان خواروبار جهانی (فائو) در حال حاضر آمریکا با عملکرد ۴ تن در هکتار، بالاترین عملکرد را در میان کشورهای تولید کننده پسته در دنیا دارد. ترکیه و ایتالیا با عملکرد ۳ تن در هکتار دارای رتبه دوم و سوم و ایران با متوسط کمتر از یک تن در هکتار در رتبه چهارم قرار دارد (FAO, 2014). متخصصین و کارشناسان صنعت پسته، دلایل زیادی برای این امر عنوان نموده‌اند. مهم‌ترین آن‌ها: عدم استفاده از پایه و ارقام پر بازده، خرده مالکی، کمیت و کیفیت پایین آب آبیاری، شور و قلیا بودن خاک اغلب باغ‌های پسته،اختصاص خاک‌های درجه ۲ و ۳ به کشت پسته، مدیریت ضعیف باغ‌ها از جنبه‌های مختلف و شرایط اقلیمی اشاره نمود (حسینی فرد و همکاران، ۱۳۹۶).

پسته به‌عنوان گیاهی مقاوم به خشکی شناخته می‌شود که قادر است با مقادیر اندکی آب، زنده بماند و حتی مقدار اندکی محصول تولید کند (Goldhamer, 2005; Sanden, 2004). درخت پسته می‌تواند ریشه‌های خود را تا عمق ۲/۵ متری از سطح خاک توسعه دهد تا بتواند رطوبت لایه‌های زیرین را در دوره‌های خشک سال جذب نماید (Goldhamer, 2005). همچنین گفته شده که در مواقع کاهش رطوبت خاک تا حد پژمردگی دائم (PWP)، ریشه‌های پسته در تمامی اعماق خاک، می‌توانند فعالیت خود را برای ۴ تا ۵ هفته بطور کامل متوقف نمایند (Kanber, 1993). در عین حال، باید اذعان نمود که درخت پسته به منظور دستیابی به کارکرد و تولید مناسب، به آب کافی نیاز دارد (Goldhamer, 2005). درخت پسته آب را سریعتر از دیگر درختان میوه مصرف می‌کند. چنانچه درخت پسته در دوره‌های حساس با تنش آبی مواجه شود اثرات منفی بر فرآیندهای درونی درخت خواهد داشت (Goldhamer, 2005) .

از طرف دیگر پسته یک گیاه متحمل به شوری است ولی میزان عملکرد این گیاه در شوری‌های بالا به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد (ابطحی و کریمیان، ۱۳۷۳). سندن و همکاران نیاز آبی درختان بالغ پسته را بسته به بافت خاک، شوری، روش آبیاری و مدیریت، بین ۷۶۲ تا ۱۲۷۰ میلی‌متر گزارش کرده‌اند (Sanden, 2016).

در ایران، بسته به روش آبیاری (غرقابی، قطره‌ای و یا بابلر)، حجم متفاوتی از آب آبیاری در باغ های پسته مصرف می‌شود که بین ۴۰۰۰ تا ۹۰۰۰ (مترمکعب در هر هکتار) در طول سال متغیر است. در شرایط شور فلات مرکزی ایران نظیر یزد، عمق آب کاربردی باغ های پسته بسیار زیاد است و در روش‌های غرقابی، گاهی به حدود ۱۷۰۰ تا ۴۵۰۰ میلی‌متر هم می‌رسد (رحیمیان، ۱۳۹۲).

مطالعات انجام شده در خصوص بیلان آبی باغ‌های پسته در استان کرمان نشان می‌دهد باغ های پسته در طول فصل از ۸۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ مترمکعب در هکتار آب مصرف می‌نمایند. این مقدار، صرفاً آب وارد شده به کرت بوده و تلفات انتقال آب و غیره در آن لحاظ نشده است در بسیاری از باغ‌ها، این مقدار آب به طور متوسط در ۸ نوبت آبیاری (دور آبیاری ۴۵ روزه) در اختیار درختان قرار می‌گیرد، که حداقل ۳ تا ۴ نوبت آن، بعد از برداشت محصول در فصل پاییز و زمستان انجام می‌پذیرد (موذن‌پورکرمانی، ۱۳۷۴).

نتایج تحقیق محمدی محمدآبادی و همکاران (۱۳۸۷) نشان داد، تغییر سیستم آبیاری از روش سطحی به زیرسطحی (تراوا) برای درختان بارور پسته که قبلاً آبیاری آن‌ها به روش سطحی انجام می‌شده، امکان‌پذیر است و می‌توان با کاربرد آب به میزان ۴۰ و ۶۰ درصد تبخیر از تشتک کلاس A (معادل حجم آبیاری حدود ۴۷۸۳ و ۷۱۷۴ متر مکعب در هکتار) به عملکرد مناسب کمی و کیفی محصول پسته دست یافت. بهترین تیمار در شرایط انجام این آزمایش، تیماری بود که آبیاری آن با روش زیرزمینی و مصرف ۶۰ درصد تبخیر از تشتک (۷۱۷۴ متر مکعب در هکتار در سال) با دور ۱۴ روزه انجام شد. به‌طوری که کلیه صفات کمی و کیفی مربوط به این تیمار در مقایسه با کلیه تیمارها از شرایط مطلوب‌تری برخوردار بود. بر اساس نتایج این تحقیق، کاربرد آب با مقادیر کمتر از ۴۰ درصد تبخیر از تشتک کلاس A (۴۷۸۳ متر مکعب در هکتار)، نمی‌تواند نتایج مطلوبی را به همراه داشته باشد.

میرزایی و چیذری (۱۳۸۳) در تحلیلی اقتصادی برای تعیین کارایی فنی و کاربرد حجم بهینه آب در تولید پسته اظهار داشتند که تنها راه نجات منطقه و حفظ استمرار تولید پسته، استفاده از اصول اقتصادی است. به‌عبارت دیگر با حذف رانت‌ها و دریافت هزینه اجتماعی منابع آب تحت عنوان آب‌بها می‌توان کشاورزان را وادار به بکارگیری اصول اقتصادی نمود. به‌طوری‌که اگر سیستم بازار (نهاده و محصول) رقابتی بوده و فنّاوری تولید، برای تمام کشاورزان یکسان باشد، کشاورزان روش حداکثر سازی سود را انتخاب خواهند نمود که در این صورت، مقدار بهینه آب برای حداکثر سازی سود ۷۷۹۳ مترمکعب در هکتار است. با فرض اینکه شرایط مذکور صادق نباشد کشاورزان مجبور به استفاده از روش حداقل سازی هزینه خواهند شد. اگر کشاورزان بر اساس حداقل سازی هزینه عمل کنند، مقدار بهینه آب به‌طور متوسط برابر ۷۲۹۴ مترمکعب در هکتار است. با توجه به اینکه هم‌اکنون هر بهره‌بردار به‌طور متوسط ۹۱۰۴ مترمکعب آب مصرف می‌کند، درصورتی‌که کشاورزان بر اساس حداقل سازی هزینه عمل نمایند، مشکل اضافه برداشت آب برطرف خواهد شد.

کمبود آب در ایران یک واقعیت ذاتی است که با توجه به روند

روزافزون نیاز بخش‌های مختلف (شرب، صنعت و کشاورزی) به آب، مشکل کم آبی در سال‌های آینده بحرانی‌تر خواهد شد. یکی از راهکارهای مؤثر و عملی، استفاده بهینه و صرفه‌جویی در مصرف آب در تمامی بخش‌ها به‌ویژه کشاورزی است. برآورد دقیق و تعیین شاخص‌های مدیریت مصرف آب از جمله مقدار آب کاربردی، راندمان آبیاری و بهره‌وری آب محصولات زراعی و باغی در کشور از مهم‌ترین ابزارها و شاخص‌های کلیدی در برنامه‌ریزی‌های کلان مربوط به تأمین، تخصیص و مصرف آب در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی است. برای تعیین نیاز آبی باغ‌های پسته برآوردهای متعددی با روش‌های علمی و نرم افزارهای کامپیوتری در کشور ارائه شده است. مبنای برخی از این توصیه‌ها، محاسباتی بوده و برخی دیگر نیز از طریق اندازه‌گیری عمق آب آبیاری در دوره‌های مختلف آبیاری بوده است. بنابراین برای تعیین نیاز آبی پسته در کشور، مراجع متعددی وجود دارد که اعداد و ارقام متفاوتی برای نیاز آبی پسته در یک منطقه ارائه کرده‌اند. این تفاوت‌ها حتی به بیش از دو برابر نیز می‌رسد. از این‌رو ضرورت دارد که این اعداد و ارقام مورد بررسی بیشتر قرار گیرند و مناسب‌ترین مقادیر برای نیاز آبی در هر منطقه توصیه گردد. از سوی دیگر، برای حجم آب کاربردی باغ‌های پسته در کشور نیز ارقام دقیقی وجود ندارد و به‌صورت موردی و در برخی از مناطق، پژوهش‌هایی انجام و اعداد و ارقامی گزارش شده است. این پژوهش با هدف اندازه‌گیری حجم آب کاربردی در شرایط زارعین، محاسبه آب مورد نیاز و مقایسه آن با سند ملی آب و ارزیابی بهره‌وری آب پسته در استان‌های خراسان رضوی، سمنان، یزد و کرمان انجام شد.

مواد و روش‌ها

سطح زیر کشت پسته در کشور بیش از ۴۵۰ هزار هکتار است. از این مقدار سطح زیر کشت، ۷۴/۲ درصد آن درختان بارور و ۲۵/۸ درصد نهال غیربارور است. استان کرمان با بیش از ۶۰ درصد سطح بارور پسته کشور، مقام اول و سه استان خراسان رضوی، یزد و سمنان به ترتیب مقام‌های دوم، سوم و چهارم را به‌خود اختصاص داده‌اند. این چهار استان جمعاً حدود ۸۵ درصد سطح باغ‌های بارور و ۱۸ استان دیگر فقط ۱۵ درصد از باغ‌های بارور پسته را به خود اختصاص داده‌اند. تولید پسته درکشور حدود ۳۰۵-۱۵۰ هزار تن در سال است. جدول ۱ سطح زیرکشت و تولید پسته در کشور را نشان می‌دهد (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۶).

جدول ۱- سطح زیرکشت، تولید و میانگین عملکرد در قطب‌های تولید پسته (آبی) در کشور

استان	سطح (هکتار)		میانگین عملکرد	کل تولید
	بارور	غیربارور	(kg/ha)	(تن)
کرمان	۲۰۳۲۲۰	۹۳۵۵	۵۵۲	۱۱۲۲۸۷
خراسان رضوی	۵۲۰۸۳	۳۴۹۱۸	۱۱۷۰	۶۰۹۰۴
سمنان	۱۱۲۵۹	۷۸۲۴	۱۱۵۵	۱۳۰۱۲
یزد	۳۱۹۵۰	۱۲۸۶۹	۱۴۹۸	۴۷۸۶۰
سایر استان‌ها	۶۰۵۶۶	۳۳۲۹۲	-	۷۰۳۵۷
جمع کل/میانگین	۳۵۹۰۷۸	۹۸۲۵۸	۸۴۸	۳۰۴۴۲۰

این پژوهش برای اندازه‌گیری و تعیین حجم آب کاربردی و بهره‌وری آب باغ‌های پسته کشور به‌صورت میدانی، در ۸۸ باغ از استان‌های خراسان‌رضوی، سمنان، کرمان و یزد از مهرماه ۱۳۹۵ تا مهر ۱۳۹۶ (به مدت یکسال) انجام شد. جدول ۲ شهرستان‌های مورد مطالعه در هر استان و تعداد باغ‌های منتخب را نشان می‌دهد. در این پژوهش حجم آب کاربردی باغ‌های (بدون دخالت در برنامه آبیاری باغداران) اندازه‌گیری و تعیین شد. حجم آب کاربردی، عملکرد و سایر کمیت‌های مربوط به این دو شاخص در سامانه‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای و در باغ‌های دارای بافت خاک سبک تا سنگین و باغدارانی با سطح تحصیلات دیپلم و بالاتر از دیپلم اندازه‌گیری شد. کمیت‌های اندازه‌گیری شده شامل شوری آب آبیاری، مقدار تولید هر باغ، بافت خاک، تعداد نوبت آبیاری، عملکرد پسته و حجم آب کاربردی بودند. اطلاعات دیگری مانند نوع شبکه آبیاری، روش آبیاری، ارتفاع باغ‌ها از سطح دریا یادداشت برداری شد. در انتخاب باغ‌ها سعی شد از سطوح مختلف مدیریتی (ضعیف، متوسط و خوب) و سامانه‌های آبیاری سنتی و قطره‌ای گزینش انجام شود. اندازه‌گیری‌های تعیین حجم آب کاربردی با در نظر گرفتن عوامل مختلفی نظیر؛ روش آبیاری، اندازه قطعات، کیفیت آب و خاک باغ‌ها ، نوع شبکه و اقلیم انجام شد. در هر باغ دبی آب آبیاری در چند نوبت در طول فصل زراعی با ابزار مناسب (فلوم WSC و دبی سنج‌های اولتراسونیک) اندازه‌گیری و تعیین شد. تعداد نوبت‌های آبیاری و مدت زمان هر نوبت آبیاری نیز ثبت می‌شد.

جدول ۲- شهرستان‌های مورد مطالعه در هر استان و تعداد باغ‌های منتخب

ردیف	استان	شهرستان‌های مورد مطالعه	تعداد باغ‌های انتخابی
۱	سمنان	دامغان – میامی – گرمسار	۱۸
۲	خراسان رضوی	فیض آباد	۹
۳	کرمان	کرمان – رفسنجان – زرند	۲۹
۴	یزد	مهریز – ابرکوه	۳۲
جمع			۸۸

تعیین تبخیر و تعرق برای برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان زراعی و باغی هر منطقه، متاثر از شرایط اقلیمی حاکم بر آن منطقه و ویژگی‌های گیاه مورد نظر است که به ترتیب در دو پارامتر ET0 و Kc خلاصه می‌شوند:

$$ETc = K_c \times ET_0 \quad (۱)$$

که ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)، K_c ضریب گیاهی (بدون واحد) و ET_c تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر در شرایط استاندارد یا همان تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مورد نظر (میلی متر در روز) است. در واقع، منظور از ET_0 نیاز تبخیری اتمسفر است که معادل با میزان تبخیر از یک سطح مرجع (نظیر چمن و یا یونجه) می‌باشد. بنابراین، ET_0 حائز مقداری حداکثری بوده و صرفاً تابع شرایط جوی منطقه است. منظور از ET_c نیز حداکثر تبخیر و تعرقی است که گیاه می‌تواند در شرایط استاندارد و عاری از هر گونه تنش محیطی و مدیریتی انجام دهد (Doorenbos and Pruitt, 1977). نیاز آبی خالص درختان پسته بر اساس داده‌های نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی برای سال انجام تحقیق و ده سال گذشته به روش پنمن مانتیث محاسبه، و با مقادیر نیازآبی ارائه شده در سند ملی مقایسه شد. سپس با برآورد میزان بارش موثر در طول فصل رشد و با عنایت به میزان آب کاربردی و عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در مزرعه، بهره‌وری آب پسته در استان‌ها، و منابع آبی مختلف محاسبه شد.

بهره وری آب

بهره‌وری آب در کشاورزی، یکی از شاخص‌های مصرف بهینه‌ی آب آبیاری است که به‌عنوان شاخصی دقیق و علمی برای سنجش مصرف بهینه‌ی آب و تولیدات کشاورزی در نظر گرفته می‌شود. براساس تعریف کلی، بهره‌وری آب نسبتی است که در مخرج کسر آن آب کاربردی (آب آبیاری و بارندگی) و در صورت آن موارد قابل توجهی از مفاهیم کمی از جمله عملکرد محصول قرار می‌گیرد. عموماً دو مفهوم بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب، کاربرد بیشتری داشته و در تحلیل‌ها و تصمیم‌گیری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهره‌وری فیزیکی آب، مقدار محصول تولید شده به ازای واحدحجم آب کاربردی است که بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب بیان می‌شود (عباسی و همکاران، ۱۳۹۶). بهره‌وری از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$WP = CY/(CW+R_e) \quad (۲)$$

WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب آب کاربردی)، CY عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، CW حجم آب کاربردی در تولید پسته (مترمکعب در هکتار) و Re بارندگی موثر در طول فصل زراعی (مترمکعب در هکتار)

تحلیل واریانس داده‌ها

برای بررسی تغییرات عملکرد، حجم آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید پسته، از تحلیل واریانس استفاده شد. نظر به ماهیت اندازه‌گیری‌ها، هر باغ پسته به‌عنوان یک تکرار در نظر گرفته شد. برای بررسی کفایت تعداد باغ‌ها برای اندازه‌گیری حجم آب کاربردی و عملکرد از رابطه (۳) استفاده شد (Sarmad et al., 2001).

$$n = \frac{z^2\sigma^2}{(\overline{x}-\mu)^2} \quad (۳)$$

n تعداد اندازه‌گیری‌های لازم برای تحلیل واریانس عملکرد و حجم آب کاربردی در تولید پسته، z برابر ۱/۹۶ در سطح اعتماد ۹۵ درصد، σ^2 واریانس، $\overline{x}$ میانگین اندازه‌گیری‌ها و μ مقدار هر اندازه‌گیری است.

نتایج و بحث

از آنجایی که مبنای بررسی کفایت داده‌ها برای معتبر بودن تحلیل‌های آماری، توزیع نرمال است، متغیر نرمال استاندارد (Z) در تحلیل داده‌های پژوهش‌های کشاورزی، مستقل از سطح زیر کشت، سامانه‌های آبیاری، ویژگی‌های فیزیکوشیمایی خاک، و ... است. در این توزیع، میانگین داده‌ها، واریانس آنها و تعداد داده‌ها نقش اساسی دارند. هرچه واریانس داده‌ها زیادتر باشد به تعداد داده‌های بیشتری برای تحلیل نیاز خواهد بود. بنابراین براساس تجزیه و تحلیل‌های

آماری، حداقل تعداد اندازه‌گیری‌های لازم در هر استان تعیین شد. جدول ۳ پارامترهای آماری و حداقل تعداد باغ‌های لازم برای داده‌برداری را نشان می‌دهد. نتایج اولیه نشان داد که واریانس داده‌ها در استان یزد نسبت به سه استان دیگر بیشتر است. به همین دلیل در این استان بایستی حداقل ۳۰ اندازه‌گیری صورت می‌گرفت. برای اطمینان از اعتبار داده برداری‌ها سعی شد تعداد باغ‌های انتخابی در هر استان بیشتر از حداقل لازم باشد. لازم به ذکر است که در استان کرمان، علیرغم این‌که سطح زیر کشت پسته بیشتر از مجموع سطح زیرکشت سه استان دیگر بود، اما واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده قابل توجه نبوده و ضرورتی برای افزایش اندازه‌گیری‌ها وجود نداشت. از آنجاییکه ماهیت پژوهش اندازه‌گیری آب کاربردی با پژوهش‌های مرسوم در آزمایشات کشاورزی متفاوت است. زیرا تنوع اقلیمی، مدیریت زراعی، بافت خاک، نیاز آبی و عوامل شناختی، موجب افزایش واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده، می‌گردد. بنابراین، این تصور وجود داشت که ضریب تغییرات و واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده زیاد باشد. بر همین اساس سعی شد تعداد اندازه‌گیری‌های عملکرد محصول و حجم آب کاربردی باغ های، بیشتر از حداقل اندازه‌گیری‌ها در نظر گرفته شود تا نتایج از نظر تحلیل آماری قابلیت اعتماد بالایی داشته باشند.

کفایت تعداد اندازه‌گیری‌ها برای کل باغ‌های انتخابی نیز محاسبه شد. خلاصه شاخص‌های آماری در جدول ۴ ارائه شده است. تعداد اندازه‌گیری‌های حجم آب کاربردی و عملکرد پسته در پژوهش حاضر، بیشتر از تعداد اندازه‌گیری‌های لازم در نظر گرفته شد (جدول ۴).

جدول ۳- میانگین، انحراف معیار و کفایت اندازه‌گیری‌ها در باغ‌های پسته استان‌های منتخب

ردیف	استان	میانگین آب کاربردی (مترمکعب در هکتار)	انحراف معیار	حداقل تعداد داده‌ی لازم	تعداد اندازه‌گیری‌ها
۱	سمنان	۷۳۹۴	۱۴۶۸	۱۵	۱۸
۲	خراسان رضوی	۵۵۷۹	۸۵۲	۹	۹
۳	کرمان	۶۷۱۳	۱۳۵۶	۱۶	۲۹
۴	یزد	۱۱۱۷۷	۳۱۲۵	۳۰	۳۲

جدول ٤- میانگین، انحراف معیار و کفایت اندازه‌گیری‌ها در باغ‌های منتخب

شاخص آماری	عملکرد پسته (کیلوگرم در هکتار)	حجم آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)
میانگین	۱۶۷۸	۸۶۶۰
انحراف معیار	۷۱۹	۳۲۵۱
تعداد اندازه‌گیری لازم	۷۱	۵۴
تعداد اندازه‌گیری‌های انجام‌شده	۸۸	۸۸

تعداد آبیاری باغ‌های پسته در استان‌های منتخب

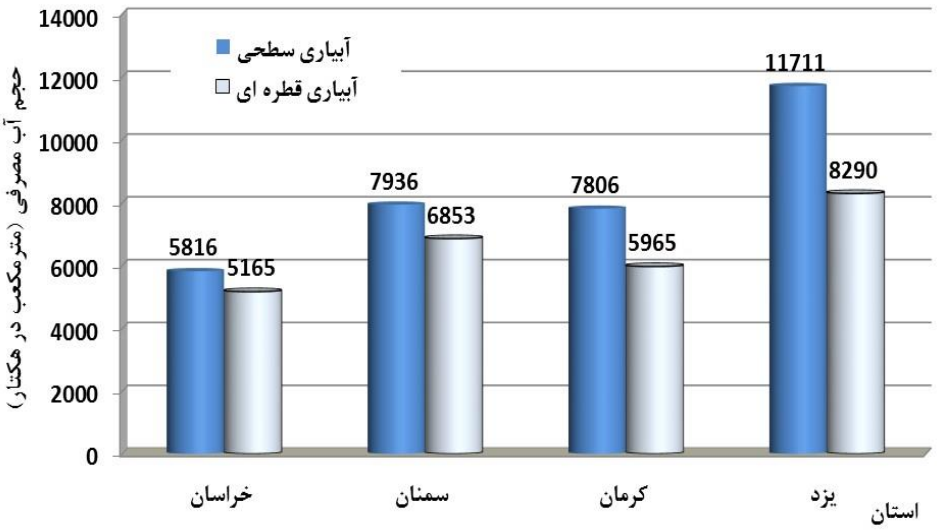
درخت پسته در هر مرحله از رشد و در هر مقطعی از فصل، نیازمند مقدار مشخصی آب است. باغداران درختان پسته را پس از برداشت محصول (اواخر مهر ماه) یک نوبت آبیاری می‌کنند. پس از آن در آذر ماه یک آبیاری به‌عنوان آب قوس برای باغ‌های انجام می‌شود. در فاصله بهمن تا اسفند ماه نیز آب دوم زمستانه به باغ‌های پسته داده می‌شود. پس از آبیاری زمستانه، آبیاری باغ‌های پسته معمولا از اواخر اردیبهشت آغاز می‌شود. در روش‌های آبیاری سطحی، دور آبیاری در هر منطقه (براساس مقدار آب در دسترس) از ۳۰ تا ۶۰ روز متغیر است. جدول ۵، میانگین تعداد آبیاری‌ها در استان‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۵- متوسط تعداد آبیاری باغ‌های پسته

ردیف	نام استان	تعداد آبیاری	
		آبیاری سنتی	آبیاری قطره‌ای (سطحی)
۱	خراسان رضوی	۹	۸
۲	سمنان	۸	۲۲
۳	کرمان	۷	۲۱
۴	یزد	۸	۱۲

مقایسه حجم آب مصرفی باغ‌های پسته

در این پژوهش حجم آب کاربردی (بعلاوه آب آبشویی در زمستان) در باغ‌های خراسان رضوی، سمنان، کرمان و یزد در یک سال اندازه‌گیری و نیاز خالص آبیاری، نیاز آبشویی براساس روش آبیاری (سنتی و قطره‌ای) محاسبه شد. شکل ۱ میانگین حجم آب کاربردی را در استان‌ها به تفکیک روش آبیاری نشان می‌دهد. متوسط آب کاربردی در استان‌های مورد بررسی در روش آبیاری سطحی و قطره‌ای به‌ترتیب برابر ۸۳۱۷ و ۶۵۶۶ متر مکعب در هکتار شد. حجم آب کاربردی در خراسان رضوی، کرمان و سمنان نزدیک به هم، اما در یزد تفاوت بیشتری داشت. این اختلاف به دلیل شوری بیشتر آب، خاک و درجه حرارت بالاتر در یزد بوده است.



شکل ۱- متوسط حجم آب کاربردی در سامانه‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای

عبداللهی عزت آبادی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی که برای تعیین راندمان آبیاری در ۲۸۶ باغ پسته در شهرستان‌های انار و رفسنجان انجام دادند، حجم آب کاربردی را در طول سال از ۹۷۰ تا ۲۷۰۰۰ و به‌طور متوسط ۹۷۳۰ مترمکعب برای هر هکتار بدست آوردند. در پژوهشی دیگر در خصوص سامانه‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی پسته در سیرجان، حجم آب کاربردی از ۴۶۰۰ تا ۱۰۵۰۰ مترمکعب در هکتار بدست آمد (کوهی، ۱۳۹۴). موذن‌پور و همکاران (۱۳۹۶) در یک پژوهش لایسیمتری، حجم آب کاربردی پسته را برای درختان ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ ساله به‌ترتیب برابر با ۲۲۹۰، ۲۵۰۰، ۲۷۴۰، ۴۵۲۰، ۴۶۰۰ و ۵۶۲۰ مترمکعب در هکتار به دست آوردند. در پژوهشی حجم آب کاربردی باغ‌های پسته‌ی کالیفرنیا را (سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۰) حدود ۱۲ هزار مترمکعب در هکتار گزارش نموده‌اند (بخش منابع آب کالیفرنیا، ۲۰۱۴)[۱]. براساس نتایج این پژوهش، در تمام استان‌ها حجم آب کاربردی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری سطحی کاهش یافته است. از طرفی تقریبا در تمام باغ‌های پسته، حجم آب کاربردی (در طول دوره رشد به همراه آبشویی زمستانه) توسط باغداران کمتر از نیاز خالص آبیاری باغ‌های است و کم‌آبیاری اجباری با شدت و ضعف در تمام باغ های پسته مورد مطالعه یک واقعیت غیر قابل انکار است. بنابراین تبدیل سامانه‌های آبیاری سنتی (سطحی) به آبیاری قطره‌ای در باغ‌های پسته امری ضروری است و می‌تواند بخش نسبتا زیادی از کم‌آبیاری‌های اجباری را جبران نماید. علاوه بر آن، چنانچه سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به‌خوبی اجرا و مدیریت شوند و باغ‌های پسته به سامانه‌های اندازه‌گیری و پایش رطوبت خاک مجهز شوند، می‌توان به حفظ و پایداری سفره‌های آب زیرزمینی نیز کمک نمود.

آبیاری در طول فصل رشد برای پسته نیز مانند سایر گیاهان از مهم‌ترین عملیات داشت است. حساس‌ترین مراحل رشد پسته به آب آبیاری و پیامدهای آن به‌ترتیب زیر است (حسینی‌فرد و همکاران، ۱۳۹۶).

۱- سقط جنین و پوکی؛ آبیاری در زمان گلدهی (عموماً فروردین ماه) و زمان پر شدن مغز (تیرماه). ۲- خندانی؛ آخرین آب قبل از برداشت، بسته به رقم (عموماً اوایل شهریور ماه) ۳- تعداد دانه در

۱- California Department of Water Resources

درخت؛ آبیاری در زمان تشکیل میوه و پس از گرده افشانی (عموماً اواخر فروردین ماه) ۴- رسیدگی؛ عموماً در اواخر مرداد و اوایل شهریور ماه ۵- وزن و اندازه میوه

تحلیل تغییرات حجم آب کاربردی پسته در استان‌های مختلف

با استفاده از تحلیل واریانس، تفاوت احتمالی حجم آب کاربردی در تولید پسته در استان‌های خراسان رضوی، سمنان، کرمان و یزد بررسی شد. نتایج نشان داد تفاوت حجم آب کاربردی در تولید پسته در استان‌های منتخب در سطح کمتر از یک درصد معنی‌دار است (جدول ۶).

جدول ٦- تحلیل واریانس حجم آب کاربردی در باغ های منتخب

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	نسبت F	مقدار P
بین استان‌ها	۳/۷۱۹×۱۰^۸	۳	۱/۲۳۹×۱۰^۸	۲۱/۴۶	کمتر از یک درصد
درون استان‌ها	۴/۱۰۱×۱۰^۸	۷۱	۵/۷۷۶×۱۰^۶		
کل کشور	۷/۸۲×۱۰^۸	۷۴			

حجم آب کاربردی در استان‌های کشور را می‌توان به دو خوشه اصلی تقسیم‌بندی نمود. در خوشه اول حجم آب کاربردی در باغ‌های پسته استان یزد با میانگین ۱۱۱۷۷ مترمکعب در هکتار، در خوشه دوم حجم آب کاربردی در استان‌های سمنان (۷۳۹۴ مترمکعب در هکتار)، خراسان رضوی (۵۵۷۹ مترمکعب در هکتار) و کرمان (۶۷۱۳ مترمکعب در هکتار) قرار دارند. میانگین وزنی (نسبت به سطح زیرکشت) و حسابی حجم آب کاربردی در تولید پسته در استان‌های منتخب برای هر دو روش‌های آبیاری سنتی (سطحی) و قطره‌ای محاسبه و در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- میانگین وزنی و حسابی حجم آب کاربردی در باغ‌های منتخب

روش آبیاری	وزنی	حسابی
سنتی (سطحی)	۸۳۵۰	۹۵۴۹
قطره‌ای	۵۹۰۰	۶۵۶۶
بدون در نظر گرفتن روش آبیاری	۷۱۲۵	۸۰۵۷

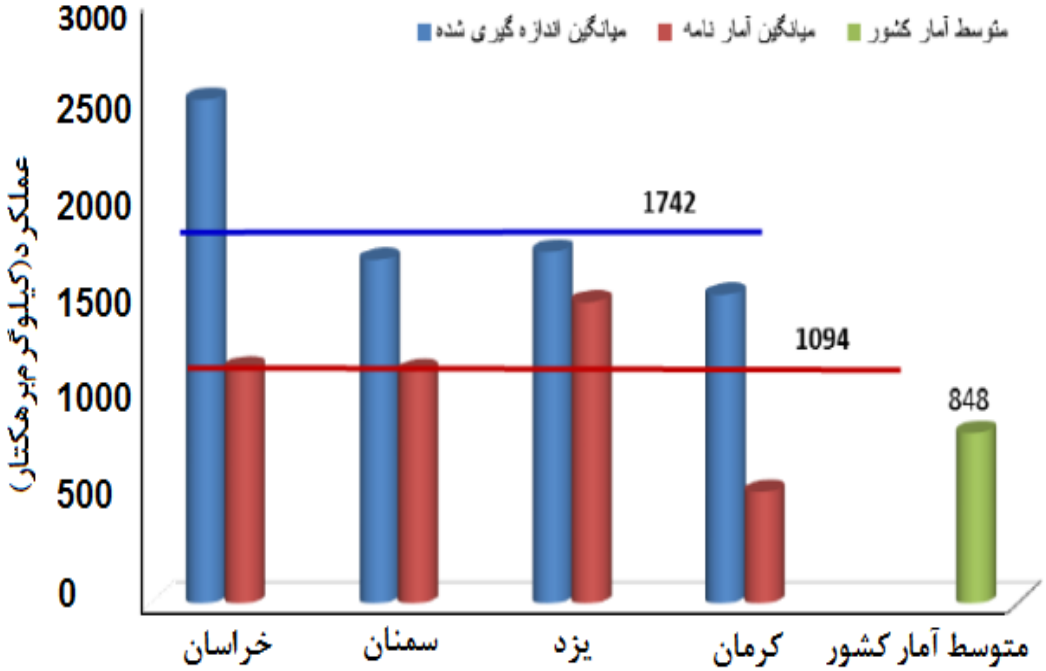
عملکرد محصول

عدم تولید یکنواخت و یکسان در سال‌های متوالی همان سال‌آوری است که در محصول پسته وجود دارد. سال‌آوری پسته می‌تواند به عوامل فیزیولوژیک درونی ارتباط داشته باشد. عوامل آب و هوایی مانند سرما زدگی اوایل فصل، بادهای گرم و خشک، تأمین نشدن نیاز سرمای زمستانه و آفات و بیماری‌ها نیز در سال‌آوری پسته نقش اساسی دارند (سیدی و اسماعیل‌پور، ۱۳۸۵). برای اجتناب از این‌گونه خطاها، میانگین سه ساله عملکرد محصول (سال اجرای تحقیق و دو سال قبل آن) برای باغ های منتخب ملاک عمل قرار گرفت. میانگین عملکرد اندازه‌گیری شده در استان‌های خراسان رضوی، یزد، سمنان و کرمان به‌ترتیب برابر ۲۵۰۶، ۱۷۵۰، ۱۷۰۸ و ۱۵۱۱ کیلوگرم پسته خشک در هکتار شد (شکل ۲). میانگین وزنی عملکرد محصول در استان‌های یزد، سمنان و کرمان تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند که دلیل آن احتمالا شباهت نسبتا بیش‌تر شرایط آب و هوایی، کیفیت آب و خاک و سطح مدیریت باغ‌های است. در استان خراسان رضوی به دلیل شرایط مناسب‌تر آب و هوا، کیفیت آب و خاک و سطح مدیریت مناسب‌تر زراعی، میانگین عملکرد بیش‌تر از سایر استان‌ها بود.

تحلیل تغییرات عملکرد پسته در استان‌ها

برای بررسی تغییرات عملکرد پسته در استان‌های سمنان، خراسان رضوی، کرمان و یزد از تحلیل واریانس استفاده شد. نتایج نشان داد تفاوت عملکرد در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار نیست (جدول ۸).

میانگین عملکرد پسته خشک در استان‌های منتخب ۱۷۴۲ کیلوگرم در هکتار بود. بیشترین عملکرد از باغ‌های استان خراسان رضوی با میانگین ۲۵۰۶ کیلوگرم در هکتار و کمترین آن از باغ‌های استان کرمان با میانگین ۱۵۱۶ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. عملکرد پسته از باغ‌های استان‌های سمنان و یزد به ترتیب ۱۷۰۸ و ۱۷۵۰ کیلوگرم در هکتار بود. شکل ۲ مقایسه میانگین عملکرد اندازه‌گیری شده‌ی محصول را در باغ‌های منتخب استان‌ها با متوسط عملکرد پسته براساس آمار نامه (آمارنامه محصولات باغی، ۱۳۹۶) نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد که متوسط عملکرد اندازه‌گیری شده در باغ‌های منتخب نسبت به میانگین عملکرد آمارنامه بیشتر است. علت آن مشارکت تمام جامعه آماری در محاسبه میانگین در آمارنامه است. به‌عبارت دیگر چون در محاسبه میانگین در آمارنامه، تمام سطوح باغ‌های در کل هر استان در نظر گرفته شده است، طبیعی است که میانگین عملکرد نسبت به زمانی که تعداد کمتری از جامعه آماری در محاسبه میانگین دخالت دارند کمتر باشد.



شکل ۲- مقایسه متوسط عملکرد اندازه‌گیری شده باغ های پسته با متوسط استانی و کشوری (کیلوگرم در هکتار)

جدول ۸- تحلیل واریانس عملکرد خشک پسته در باغ‌های منتخب

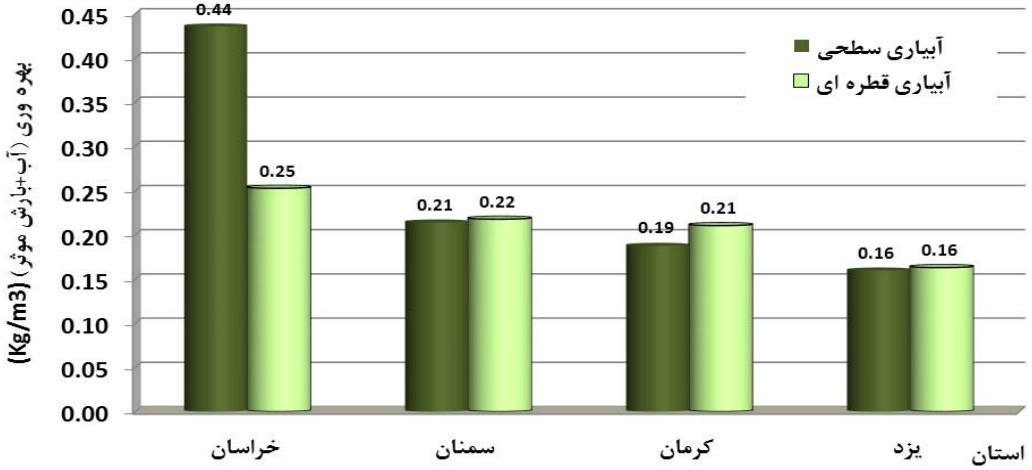
منبع تغییرات	مجموع مربعات (×۱۰۶)	درجه آزادی	میانگین مربعات (×۱۰۶)	نسبت F	مقدار P
بین استان‌ها	۳/۰۸۹	۳	۱/۰۲۹	۲/۰۸	۰/۱۱
درون استان‌ها	۳۵/۱۴۰	۷۱	۰/۴۹۵		
کل کشور	۳۸/۲۳	۷۴			

با دقت در اعداد شکل مذکور مشاهده می‌شود که میانگین عملکرد در استان کرمان براساس آمارنامه خیلی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در این پژوهش کمتر و این تفاوت معنی‌دار است. علت آن رها شدن بخش‌های زیادی از باغ های استان به‌دلیل کاهش منابع آبی است، در حالیکه این سطوح در محاسبه عملکرد استان لحاظ می‌شوند. از طرف دیگر در استان خراسان‌رضوی متوسط عملکرد اندازه‌گیری شده بیشتر از متوسط عملکرد آمارنامه است. علت آن می‌تواند وجود شرایط بهتر برای تولید پسته و کشاورزان پیشرو در منطقه اجرای تحقیق (فیض آباد) نسبت به سایر مناطق پسته‌کاری استان خراسان‌رضوی باشد. بطورکلی داده‌های حاصل از یک طرح پژوهشی نسبت به برآوردها و نظرات کارشناسی که از راه‌های غیر پژوهشی به دست می‌آید، دقیق‌تر و از اعتبار بیشتری برخوردارند.

بهره‌وری آب در باغ های پسته

بهره‌وری فیزیکی آب در استان‌های مختلف و در هر دو سامانه‌ی آبیاری سنتی و قطره‌ای تعیین و مقایسه شد. بهره‌وری آب در سامانه آبیاری سنتی در استان‌های خراسان‌رضوی، سمنان، کرمان و یزد به‌ترتیب برابر ۰/۴۴، ۰/۲۴، ۰/۲۴ و ۰/۱۶ کیلوگرم برای هر مترمکعب در هکتار و در سامانه آبیاری قطره‌ای در استان‌های خراسان‌رضوی، سمنان، کرمان و یزد نیز به‌ترتیب برابر ۰/۲۵ ۰/۲۲ ۰/۲۱ و ۰/۱۶ کیلوگرم برای هر مترمکعب در هکتار به دست آمد (شکل ۳). میانگین بهره‌وری آب در استان‌های مورد بررسی در روش آبیاری سطحی و قطره‌ای به‌ترتیب برابر با ۰/۲۲ و ۰/۲۵ کیلوگرم برای هر مترمکعب در هکتار شد. بهره‌وری آب در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و سنتی (به‌جز خراسان‌رضوی) به دلیل کم‌آبیاری‌های اجباری تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند. در خراسان‌رضوی اختلاف بهره‌وری آب معنی‌دار بود که احتمالا به دلیل کم بودن تعداد باغ‌های دارای سیستم آبیاری قطره‌ای بوده است. اما چرا بهره‌وری آب پسته در تمام استان‌ها کم و تفاوت نسبتا زیادی با متوسط بهره‌وری در بین کشورهای تولیدکننده پسته دارد؟ مطابق رابطهٔ بهره‌وری آنچه باعث کوچک بودن عدد

بهره‌وری است، کوچک بودن عدد صورت کسر و یا بزرگ بودن مخرج کسر است. یعنی صرفه نظر از بزرگ بودن مخرج کسر (حجم آب کاربردی برای تولید پسته)، کوچک بودن صورت کسر هم موجب کم شدن عدد بهره‌وری می‌شود. واقعیت آن است که متوسط عملکرد پسته در کشور بسیار با متوسط جهانی فاصله دارد و این عملکرد در کشور با پتانسیل‌های موجود در باغ‌های و شرایط کشور فاصله زیادی دارد که با برنامه‌ریزی‌های مدیریتی می‌توان به عملکردهای بالاتری دست یافت. بنابراین برای افزایش بهره‌وری آب پسته علاوه بر مدیریت مصرف آب برای افزایش راندمان آبیاری، بایستی با اصلاح و ارتقاء مدیریت باغ‌های پسته، عملکرد محصول را افزایش داد. لایی (۱۳۹۷) مهم‌ترین چالش‌ها و عملکرد پایین باغ‌های پسته در ایران را عدم آگاهی کشاورزان از ارقام تجاری و تطابق خصوصیات آن‌ها با شرایط اقلیمی، عدم هماهنگی تعداد پایه گرده افشان با پایه‌های مادری (در امریکا ۱ به ۸ ولی در ایران ۱ به حدود ۱۹۰)، عدم همزمان بودن گرده افشانی پایه‌های پدر و مادر، عدم یکنواختی پایه‌ها به دلیل تفرق ژنتیکی، عدم انتخاب پایه مناسب، رعایت نکردن اصول تغذیه در باغ‌ها، عدم رعایت زمان مناسب آبیاری، رعایت نکردن زمان مناسب برای برداشت، رعایت نکردن اصول مبارزه با آفات و بیماری‌ها، شخم نامناسب پای درختان، عدم رعایت اصول صحیح هرس، عدم رعایت اصول مکانیزاسیون عنوان کرده است.



شکل ۳- میانگین بهره‌وری آب (آبیاری و بارش موثر) باغ های پسته در سامانه‌های آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب در هکتار)

تحلیل تغییرات بهره‌وری آب پسته در استان‌های منتخب

تحلیل واریانس بهره‌وری آب پسته در استان‌های منتخب سمنان، خراسان‌رضوی، کرمان و یزد در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان داد تفاوت بهره‌وری آب در استان‌های یادشده بسیار معنی‌دار بود. دلیل اصلی این تفاوت به اختلاف عملکرد محصول و حجم آب کاربردی مرتبط است. میانگین شاخص بهره‌وری آب در تولید پسته از باغ‌های استان‌های خراسان‌رضوی، سمنان، کرمان و یزد به‌ترتیب برابر ۰/۳۷، ۰/۲۵، ۰/۲۷ و ۰/۱۶ و میانگین بهره‌وری این چهار استان ۰/۲۶ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمد. بهره‌وری بالاتر آب در استان خراسان‌رضوی به دلیل شرایط آب و هوایی نسبتا مناسب‌تر در مقایسه با سه استان دیگر، کیفیت بهتر آب، خاک و نیز مدیریت بهتر در باغ‌های پسته این استان است. شرایط آب و هوایی سخت‌تر در استان یزد، شوری نسبتا زیاد منابع آب و خاک که نیازمند آب بیشتر برای تامین نیاز آبی و آبشویی باغ‌های است، علت کمتر شدن عدد بهره‌وری آب در این استان است.

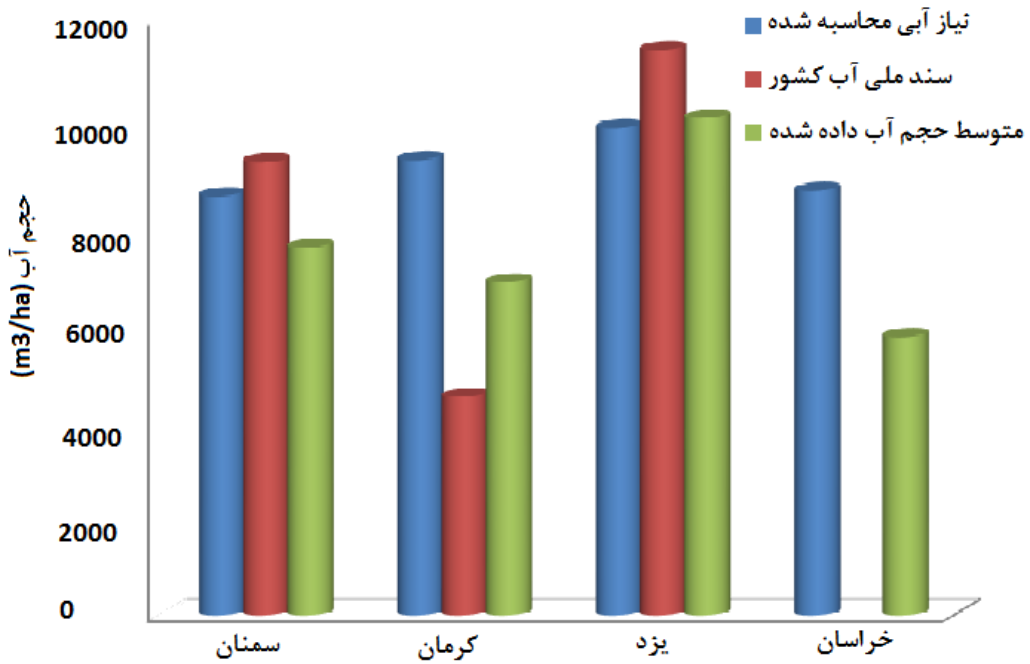
جدول ۹- تحلیل واریانس بهره‌وری آب پسته باغ‌های منتخب

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	نسبت F	مقدار P
بین استان‌ها	۰/۲۹۵	۳	۰/۰۹۸	۱۱/۷۰	کمتر از یک درصد
درون استان‌ها	۰/۵۹۶	۷۱	۰/۰۰۸		
کل کشور	۰/۸۹۱	۷۴			

نیاز آبی پسته

برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از داده‌های سازمان هواشناسی کشور در ده ساله‌ی اخیر (دوره آماری ۱۳۹۵- ۱۳۸۶)، استفاده شد و با کمک نرم‌افزار ET0 Calculator محاسبات انجام شد. نیاز خالص آبیاری، براساس تبخیر و تعرق گیاه مرجع و ضریب گیاهی پسته برای هر منطقه تعیین شد. در محاسبه نیاز خالص آبیاری، سطح خاک خیس شده در روش آبیاری سنتی (سطحی) ۱۰۰ درصد و در روش آبیاری قطره‌ای حداکثر ۶۷ درصد در نظر گرفته شد (علیزاده، ۱۳۸۵).

در محاسبه نیاز آبی درختان پسته بالای ۱۵ سال، حداقل ضریب گیاهی در طول دوره رشد ۰/۴۰ و حداکثر ۰/۶۰ در نظر گرفته شد. در ایران، ضریب گیاهی پسته از ۰/۴۰ تا ۰/۶۰ ملاک عمل قرار می‌گیرد (موذن‌پور کرمانی و همکاران، ۱۳۹۶). در محاسبه نیاز آبی در پژوهش حاضر نیز، ضریب گیاهی پسته براساس مقادیر ارائه شده در کتاب برآورد نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشور در نظر گرفته شد (فرشی و همکاران، ۱۳۷۶). شکل ۴ مقایسه حجم آب کاربردی، نیاز آبی محاسبه شده براساس داده‌های هواشناسی ۱۰ ساله و سند ملی آب را نشان می‌دهد.



شکل ٤- مقایسه حجم آب کاربردی با نیاز خالص آبیاری و سند ملی (مترمکعب در هکتار)

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که حجم آب کاربردی در اغلب باغ‌های پسته کشور کمتر از نیاز خالص آبیاری (بدون در نظر گرفتن راندمان آبیاری) است. این موضوع نشان می‌دهد که کم‌آبیاری ناخواسته (اجباری) در باغ‌های پسته وجود دارد. به‌دلیل آنکه این کم‌آبیاری‌ها در سراسر فصل رشد اعم از مراحل حساس و غیر حساس به‌صورت یکنواخت اتفاق می‌افتد، به‌شدت بر عملکرد پسته تاثیر گذاشته و یکی از عوامل مهم، در ایجاد فاصله زیاد با متوسط عملکرد جهانی پسته، ناشی از همین مسئله است. از طرف دیگر با توجه به تک محصولی بودن باغ‌های پسته، امکان تامین و جابجایی آب از سایر محصولات به نفع پسته در مراحل حساس رشد نیز وجود ندارد. بنابراین تبدیل سامانه‌های آبیاری سنتی (سطحی) به سامانه‌های آبیاری قطره‌ای (سطحی و زیرسطحی) یکی از راهکارهای رفع کم‌آبی از باغ‌های پسته و جبران بخشی از کم‌آبیاری‌های اجباری است. کاهش منابع آب (خصوصا منابع آب زیرزمینی) و عدم تناسب مساحت باغ‌ها با منابع آب موجود نیز عاملی است که حذف بخش‌هایی از باغ‌های پسته در کشور را موجب خواهد شد.

بهره‌وری آب پسته در سطح کشور کم و تفاوت نسبتا زیادی با متوسط بهره‌وری در بین کشورهای تولیدکننده پسته دارد. براساس فرمول بهره‌وری، آنچه باعث کم شدن شاخص بهره‌وری است، کوچک بودن صورت کسر و یا بزرگ بودن مخرج کسر است. چنانچه راندمان آبیاری و نیاز آبشویی باغ‌های پسته نیز محاسبه و لحاظ گردد، مقدار نیاز آبیاری باغ‌های پسته (نیاز ناخالص) خیلی بیشتر از حجم آب کاربردی فعلی خواهد شد. بنابراین، می‌توان گفت که در رابطه

بهره‌وری آب پسته، مخرج کسر بزرگ نبوده و امکان کم کردن آن (در شرایط فعلی) تقریبا وجود ندارد. از طرف دیگر، کوچک بودن صورت کسر در فرمول بهره‌وری فیزیکی هم می‌تواند موجب کم شدن عدد بهره‌وری گردد. واقعیت آن است که متوسط عملکرد پسته در کشور با متوسط جهانی و با پتانسیل‌های موجود در کشور فاصله‌ی زیادی دارند. مهم‌ترین علل پایین بودن عملکرد باغ‌های پسته در کشور شامل: خرده مالکی، اختصاص اراضی نامرغوب و ضعیف به کشت پسته، ضعف در مدیریت باغ‌ها، کیفیت نامناسب آب، خشکسالی‌های پیاپی، افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی، تغییرات شدید اقلیمی، کیفیت نامناسب سموم و آفت‌کش‌ها، ضعف مکانیزاسیون در باغ‌های پسته، ارقام نامرغوب و تغذیه نامناسب باغ‌های پسته می‌باشند. بنابراین، افزایش عملکرد پسته در کشور با اصلاح و ارتقاء مدیریت زراعی و باغی، انجام برنامه‌های آموزشی، ارتقاء مدیریت مصرف آب، آموزش بهره‌برداری صحیح از سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار، تغذیه درست و مناسب باغ‌ها، رعایت اصول و نکات فنی در احداث باغ‌ها، استفاده از نظرات کارشناسان و خبرگان و کاربرد نتایج تحقیقاتی در مورد پسته به سهولت امکان پذیر است.

در این پژوهش، متوسط حجم آب کاربردی در باغ‌های انتخابی چهار استان کشور (که سطح زیر کشت و تولید قابل توجهی دارند) تعیین شد. براساس نتایج به دست آمده از این پژوهش، کم‌آبیاری اجباری در باغ‌های پسته کاملا مشهود است و کم‌آبیاری در باغ‌های پسته نقش اساسی در افت عملکرد دارد. اما علاوه بر کم‌آبیاری، عوامل دیگری نیز در پایین بودن عملکرد دخالت دارند که به‌طور مفصل در این گزارش به آن‌ها پرداخته شد. با توجه به کمبود آب و کاهش شدید منابع آبی از طرفی و اهمیت تولید پسته در کشور از طرف دیگر، ارتقاء مدیریت آبیاری در باغ‌های پسته ضروری است. برای مدیریت بهینه آبیاری در مزارع و باغ‌ها، همواره دو سوال مهم و اساسی مطرح و پاسخ درست به آن‌ها در افزایش راندمان آبیاری و مدیریت بهینه مصرف آب، نقش اساسی دارد. این دو سوال مهم، زمان و مدت آبیاری است. امروزه به دلیل پیشرفت‌های علمی و صنعتی و وجود ابزار و وسایل مختلف، دستیابی به جواب این دو سوال به‌راحتی امکان‌پذیر است. با توجه به اینکه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار در سطوح نسبتا زیادی از باغ‌های پسته‌ی کشور انجام و در آینده نیز به سرعت در حال گسترش است و از طرفی در بین باغداران پسته، کشاورزان عمده‌مالک زیادی وجود دارند، بنابراین، تجهیز باغ‌های پسته به ابزار و وسایل اندازه‌گیری رطوبت خاک و یا سامانه‌های پایش رطوبت خاک می‌تواند در استفاده بهتر از آب و ارتقاء مدیریت آبیاری نقش اساسی داشته باشد. برای دست‌یابی به این مهم، هوشمندسازی سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار در باغ‌های پسته پیشنهاد می‌گردد.

منابع

ابطحی، ع.، و کریمیان، ن. ۱۳۷۳. واکنش نهال‌های دو واریته پسته در رابطه با مقادیر و انواع مختلف شوری خاک در شرایط گل‌خانه. کنگره علوم خاک ایران. ص ۱۴۹-۱۴۸.

بی‌نام. ۱۳۹۵. آمارنامه کشاورزی (محصولات باغی) سال زراعی ۱۳۹۴. وزارت جهادکشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات.

بی‌نام. ۱۳۹۶. آمارنامه کشاورزی (محصولات باغی) سال زراعی ۱۳۹۵. وزارت جهادکشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات.

پاکروان، م.، مهرابی بشرآبادی، ح.، گیلانپور، ا. و اسماعیلی، ف. ۱۳۹۰. بررسی وضعیت صادراتی پسته ایران با رویکرد مزیت نسبی و نقشه ریزی تجاری. اقتصاد کشاورزی و توسعه، سال نوزدهم، شماره ۷۶ .

حسینی‌فرد، س.ج.، بصیرت، م.، صداقتی، ن. و اخیانی، ا. ۱۳۹۶. دستورالعمل فنی مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاهی درختان پسته. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. پژوهشکده پسته کشور.

رحیمیان، م.ح. ۱۳۹۲. استفاده از الگوریتم توازن انرژی سطحی زمین (SEBAL) برای تخمین تبخیر و تعرق پسته. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهرکرد.

سیدی، م.، و اسماعیل‌پور، ع. ۱۳۸۵. سال‌آوری در پسته و عوامل موثر در آن. موسسه تحقیقات پسته کشور. مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی.

عباسی، ف.، عباسی، ن. و توکلی، ع.ر. ۱۳۹۶. بهره‌وری آب در بخش کشاورزی؛ چالش‌ها و چشم‌اندازها. نشریه آب و توسعه پایدار، جلد۴، شماره ۱، ص. ۱۴۴-۱۴۱.

عبداللهی عزت آبادی، م. ۱۳۸۷. نقش سیاست‌گذاری ناهماهنگ در توسعه ناپایدار کشت پسته با تأکید بر منابع آبی. مجله اقتصادکشاورزی و توسعه، ۱۶ (۶۳): ۱۳۷-۱۱۷.

عبداللهی عزت آبادی، م.، محمدی محمد آبادی، ا.، صداقت، ر. سعیدی، م.، نیکویی، ر.، عسگری حسن آبادی، س.، و میرزایی، غ. ۱۳۹۳. بررسی نسبت بهینه اقتصادی آب به زمین در مناطق پسته‌کاری شهرستان‌های انار و رفسنجان. گزارش نهایی موسسه تحقیقات پسته کشور. ۴۲ ص.

علیزاده، ا. ۱۳۸۵. طراحی سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار. جلد دوم. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع).

کوهی چله، ن. ۱۳۹۴. ارزیابی سیستم‌های زیرسطحی در باغ‌های پسته استان کرمان (منطقه سیرجان). گزارش پژوهشی. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان. ۹۱ صفحه.

لایی، ق. ۱۳۹۷. چالش‌های مدیریت باغ‌های پسته در ایران. سومین همایش ملی علوم زیستی. اسفند ماه ۹۷. دامغان.

محمدی محمدآبادی، ا.، حسینی‌فرد، س.ج. و صداقتی، ن. ۱۳۸۷. اثرات تغییر سیستم آبیاری از روش سنتی (غرقابی) به زیرسطحی بر درختان بارور پسته در کرمان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۲ (۴۳): ۴۵-۲۹.

موذن‌پور کرمانی، م.، محمدی محمد آبادی، ا.، بادیه نشین، ع. و نوری، ح. ۱۳۹۶. اندازه‌گیری تبخیر و تعرق و ضریب گیاهی پسته در منطقه رفسنجان. نشریه هواشناسی کشاورزی. جلد ۵. شماره ۲. ص ۵۵-۴۷.

موذن‌پور کرمانی، م. ۱۳۷۴. بررسی میزان مقاومت درختان پسته به خشکی و تعیین مناسب‌ترین دور و عمق آبیاری. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، سازمان تحقیقات،آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات پسته رفسنجان.

میرزایی خلیل آبادی، ح. م. و چیذری، ا. ح. ۱۳۸۳ . تعیین کارائی فنی و مقدار بهینه آب در تولید پسته (مطالعه موردی شهرستان رفسنجان). پژوهش و سازندگی. شماره ۶۲، بهار ۸۳. ص ۴۹-۴۳.

نظری، ع. ۱۳۹۲. پسته. ماهنامه داخلی انجمن پسته ایران، سال پنجم، شماره ۸۹.

یزدان‌پناه، ا. و جعفری طاهری، س. ۱۳۸۳. رقابت‌پذیری محصولات کشاورزی ایران در بازارهای جهانی (مطالعه موردی پسته). مجله علمی ترویجی بررسی‌های بازرگانی. مرداد و شهریور ماه، شماره ۷.

Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 144 pp.

Ferguson, L., Beede, R.H., Freeman, M.W., Haviland, D.R., Holtz, B.A., and Kallsen, C.E. 2005. Pistachio production manual. Fruit and Nut Research and Information Center, University of California, Davis, USA.

Goldhamer, D.A. 2005. Tree water requirements and regulated deficit irrigation. Pistachio Production Manual. 4th Ed. Ferguson L. University of California, Davis.

Kanber, R.A., Yazar, S., and Ksal H.K. 1993. Irrigation response of pistachio (*Pistachio vera* L.) Irrig. Sci. 14: 7-14.

Sanden, B. 2016. Water Use of Pistachio and Salinity Effects, Crop Water Stress. Proceedings of Conference of CSU Fresno Center for Irrigation Technology, Fresno, USA. PP. 242- 243.

Sarmad, Z., Bazargan, A., and Hejazi, E. 2001. Research Methods in Behavioral Sciences. Agah Publishing, Tehran, 405 pp.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2244-2256

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۵۶-۲۲۴۴

Evaluation of Irrigation Water Application and Productivity of Pistachio in the main Producer Regions of Iran (Kerman, Khorasan Razavi, Yazd and Semnan Provinces)

S.H. Mousavi Fazl[1]*, M.H. Rahimian[2], N. Koohi[3], H. Riahi[4], M. Keramati[5], F. abbasi[6], J. Baghani[7]

Recived: Oct.05, 2020 Accepted: Nov.11, 2020

Abstract

Pistachio production in Iran has a long history. Iran's pistachio quality is unique among the world's producing countries. Increasing water productivity for this strategic product is essential. The water consumed for pistachio in Iran has not been determined. In some parts of the country, researches have been carried out and quantities for pistachio irrigation water application are reported. In order to measure irrigation water application of pistachio under farmers conditions and compare it with water requirement and the national document, this research was conducted from October 2016 for one growing season in some gardens of Khorasan Razavi, Semnan, Kerman and Yazd provinces. In these provinces, 88 gardens were selected and in each of them, irrigation water application (without intervention in their irrigation program), yield, water productivity, and some other parameters were determined. The results showed that water consumption and water productivity in the studied provinces were significantly different. The yields of the gardens of the four provinces were close to each other. The average yield of pistachio, irrigation water application and water productivity were 1764 kg/ha, 8057 m^3/ha and 0.26 kg/m^3, respectively. The results showed that the amount of water application in all pistachio gardens were less than the net irrigation water requirement.

Keywords: Application efficiency, Irrigation requirement, Water productivity

1- Research Assistant, Agricultural Engineering Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Semnan province (Shahrood), AREEO, Shahrood, Iran
2- Research Assistant, National Salinity Research Center, AREEO, Yazd, Iran
3 and 4- Research Assistant and Research Instructor, respectively, Agricultural Engineering Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Kerman Province, AREEO, Kerman, Iran
5- Research Instructor, Agricultural Engineering Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Khorasan Razavi province, AREEO, Mashhad, Iran
6 and 7- Research Professor and Research Assistant, respectively, Agricultural Engineering Research Institute. AREEO, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: HMousavifazl@yahoo.com)

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۶۷-۲۲۵۷

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2257-2267

مقاله پژوهشی

واسنجی و صحت‌سنجی مدل گیاهی AquaCrop جهت شبیه‌سازی عملکرد سه رقم گندم تحت تنش رطوبتی مختلف

امیرحسین قدیریان[۱]، مصطفی یعقوب‌زاده[۲*]، غلامرضا زمانی[۳]، علی شهیدی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۶/۲۳

چکیده

استفاده بهینه از منابع آب موجود و مدیریت آن‌ها با توجه به علم روز، امری بسیار حیاتی است این مهم سبب شده تا استفاده از مدل‌های گیاهی در جهت بررسی اثرات کم‌آبیاری روی عملکرد محصولات کشاورزی اهمیت پیدا کند. بدین منظور، بررسی اثر تنش رطوبتی بر عملکرد و صفات رشدی در سه رقم افق،روشن و نارین و واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌گیاهی AquaCropبرای این ارقام در سال زراعی ۹۷-۹۶ در مزرعه تحقیقاتی واقع در بیرجند انجام شد. تحقیق در قالب فاکتوریل به‌صورت طرح بلوک کامل تصادفی با ۶ تیمار و سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آبیاری شامل ۱۰۰(تیمار شاهد)، ۷۵(تنش متوسط) و ۵۰(تنش شدید) درصد نیاز آبی گندم و ۳ تیمار دیگر مربوط به دو رقم جدید افق و نارین و یک رقم قدیمی و بومی روشن کشت شدند. نتایج مقایسه‌ی میانگین انجام‌شده نشان داد، میانگین اثر ساده تنش رطوبتی، اثر ساده ارقام و اثر متقابل تنش در ارقام مختلف در صفات مختلف معنی‌دار بودند. پس از آنالیز و مقایسه میانگین صفات گیاهی، مدل گیاهی AquaCrop برای تنش‌های ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی در دو پارامتر عملکرد دانه و بیوماس واسنجی شد. پس از مرحله اعتبار سنجی مدل، صحت سنجی مدل با تنش ۵۰ درصد نیاز آبی انجام شد. نتایج صحت سنجی مدل نشان داد مقادیر عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده مدل، همبستگی و رابطه قابل قبولی نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده عملکرد دانه با توجه به شاخص‌های ارزیابی NRMSEو R^2 دارد. مقدار شاخص NRMSE عملکرد دانه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای میانگین تنش‌های رطوبتی ۱۰۰ و ۷۵ درصد در مرحله واسنجی ارقام افق، روشن و نارین به ترتیب ۰/۰۹، ۰/۸۸ و ۱/۵۱ درصد به دست آمد. این مقادیر در صحت سنجی مدل در تنش ۵۰ درصد به ترتیب ۱/۴۹ ، ۳/۱۴ و ۰/۰۸ درصد مشاهده شد. همچنین برای اطمینان از صحت سنجی مدل، نتایج با استفاده از داده‌های عملکرد اندازه‌گیری شده رقم روشن در سال زراعی ۸۸-۱۳۸۷مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به مقادیر محاسبه‌شده در شاخص‌های آماری می‌توان به این نتیجه رسید مدل کارایی قابل قبولی برای واسنجی ارقام مختلف گندم می‌تواند به ما بدهد که این مهم به دلیل تعداد بالا و روزافزون ارقام مختلف گندم کاربرد بسیاری در منطقه دارد.

واژه‌های کلیدی: عملکرد گندم، تنش رطوبتی، مدل AquaCrop، واسنجی، ارقام گندم

مقدمه

امروزه با توجه به رشد روزافزون جمعیت و افزایش نیاز به مواد غذایی فشار بیشتری برای تأمین غذای موردنیاز بر منابع طبیعی وارد می‌شود. از سوی دیگر این مهم باعث شده است که بخش کشاورزی که اصلی‌ترین بخش در تأمین نیاز غذایی انسان است، می‌بایست در جهت توسعه پایدار گام بردارد. از دیدگاه سازمان جهانی خواروبار کشاورزی (FAO[۵])، توسعه پایدار عبارت است از مدیریت و حفاظت منابع طبیعی پایه و هدایت و تحولات فناوری و نهادی، به‌طوری‌که از تأمین نیازهای انسانی برای نسل‌های کنونی و آینده بشریت به‌صورت مستمر و پایدار اطمینان حاصل شود.خشک‌سالی به‌تنهایی بزرگ‌ترین استرس غیرزنده‌ای است که منجر به کاهش عملکرد محصولات زراعی می‌شود، همچنین تولید این محصولات زراعی حتی در شرایط پرتنش محیطی ضروری است (Budak, 2013). گندم در ایران بیشتر در مناطقی با بارندگی کم کشت می‌شود که در این مناطق همواره آبیاری تکمیلی لازم است. بر اساس آمارهای سایت FAO در ایران کشت گندم به حدود ۷/۳ میلیون هکتار و تولید کل ۱۴/۵ میلیون تن

۱- دانش آموخته ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند
۲ و ۴- عضو هیئت‌علمی گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند
۳- عضو هیئت‌علمی گروه علوم زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه بیرجند
(*- نویسنده مسئول: Email:M.Yaghoobzadeh@birjand.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.26.7

5- Food and Agriculture Organization of the United Nations

و طور متوسط با بهره‌وری حدود ۲ تن در هکتار می‌باشد. تنش خشکی تأثیر قابل‌توجهی بر رشد گیاه دارد، اگرچه دامنه کاهش به دلیل تفاوت در زمان تنش و شدت استرس واردشده و رقم مورداستفاده در منطقه بسیار متفاوت است (Farshadfar, 2012).

بخش کشاورزی در اقتصاد ملی و تأمین غذای جامعه نقش اساسی دارد و در جهت دستیابی به پایداری در این بخش، ضروری است از منابع و ابزارهای تولید در این بخش به بهترین شکل ممکن استفاده شود تا ضمن کاهش در مصرف این منابع، سودآوری و رفاه کشاورزان نیز افزایش یابد (مهاجرانی و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع، به‌عنوان یک عامل اصلی محدودکننده تولید، نقش مهمی را در تعیین نوع فعالیت‌های زراعی ایفا می‌کند. ازاین‌رو، ارزیابی آب موردنیاز سیستم‌های کشاورزی همواره از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (Osamu et al., 2005).

خشکی علت اصلی کاهش عملکرد گیاه گندم است. این واقعیت وجود دارد همواره تقاضای آب برای محصولات کشاورزی افزایش می‌یابد و سؤال اساسی آن است که چگونه می‌توان تولیدات کشاورزی را همراه با استفاده پایدار از منابع آبی و حفاظت از آن افزایش داد (Duggan and Fowler. 2006). یک تکنیک برای مدیریت کارآمد منابع آب آبیاری، استفاده از مدل‌های جدید در تعیین نیاز آبی و زمان‌بندی آبیاری در کنار فعالیت‌هایی در راستای اصلاح گیاهان، از مدیریت‌های کارآمد درزمینهٔ توسعه پایدار منابع آب در کشاورزی می‌باشد (سلیمانی، ۱۳۹۴). استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، محدودیت‌های موجود در تحقیقات صحرایی را تا حد قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده و آن‌ها را تبدیل به ابزاری توانا در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب کرده است (Kroes et al., 2008).

دقت نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی به‌دقت داده‌های موردنیاز بستگی داشته و در صورت دسترسی به این داده‌ها و واسنجی صحیح، این مدل‌ها می‌توانند بدون محدودیت‌های مکانی و زمانی موجود در تحقیقات صحرایی و صرف هزینه و زمان کمتر جهت ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثرات درازمدت این مدیریت‌ها به کار گرفته شوند (Kuo et al. 2006). بنابراین این مدل‌ها توصیه‌های عملی را برای کشاورزان و کسانی که به‌صورت گسترده روی برنامه‌ریزی کم آبیاری و استفاده از آب‌شور تحت شرایط مختلف تأمین آب و شرایط مختلف مدیریت محصول کار می‌کنند، فراهم می‌نماید (Singh, 2006).

اندرزیان و همکاران برای شبیه‌سازی عملکرد کشت گندم تحت تیمارهای مختلف آبیاری در ناحیه جنوبی ایران (اهواز، خوزستان) از مدل AquaCrop استفاده نمودند. این مدل توانست میزان آب خاک ناحیه ریشه، عملکرد و ماده خشک را با تفاوت ۱۰ درصد نسبت به مقادیر واقعی آن‌ها تخمین بزند. در این تحقیق مشخص شد که در سال‌های تر با به کار بردن عمق آبیاری به میزان ۲۰۰ میلی‌متر در مراحل کاشت، جوانه‌زنی، کشیدگی ساقه، گلدهی یا پر شدن دانه‌ها بالاترین عملکرد محصول حاصل می‌شود. همین نتیجه برای سال‌های معمولی با به کار بردن عمق آبیاری به میزان ۲۰۰ میلی‌متر در مراحل کاشت، کشیدگی ساقه، گلدهی و همچنین برای سال‌های خشک با به کار بردن عمق آبیاری ۳۰۰ میلی‌متر در مراحل کاشت، جوانه‌زنی، گلدهی و پرشده دانه‌ها صادق می‌باشد (Andarziyan et al., 2011).

نظر به اینکه در استان خراسان جنوبی، کمبود آب و کاهش کیفی منابع آب‌وخاک از عوامل اصلی کاهش تولید می‌باشند، کاربرد روش کم آبیاری و استفاده از ارقام مقاوم به خشکی دو راهبرد مدیریتی جهت تعدیل وضعیت خشک‌سالی و بحران آب قلمداد شده و از اولویت خاصی برخوردار است. حال در صورتی که میزان آب قابل‌دسترس مشخص باشد، با محاسبه عمق بهینه آب آبیاری می‌توان سطح زیر کشت بهینه را نیز تعیین نمود که تهیه این اطلاعات، کمک بزرگی به امر تصمیم‌گیری در بخش مدیریت آبیاری خواهد نمود (شهیدی، ۱۳۸۷).

مؤمنی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل رشد گیاهی CropSyst برای تحلیل بهره‌وری آب، به‌عنوان شاخصی از راندمان مصرف آب در بررسی توسط مدل نشان داد که رسیدن رطوبت اولیه خاک به حد ظرفیت زراعی، (حدود ۱۹/۶ درصد)، عدم جمع‌آوری کل باقیمانده گیاهی از روی زمین، بارندگی و تاریخ کشت زودهنگام نسبت به روش مرسوم در منطقه و تعداد بذر (۳۰۰ عدد در مترمربع) در افزایش بهره‌وری آب و عملکرد مؤثر می‌باشند. بنابراین جنبه نوآوری و اهداف این تحقیق شامل واسنجی و صحت سنجی مدل AquaCrop برای سه رقم مختلف جدید و پرکاربرد در منطقه و استفاده از حالت‌های مختلف تیمار آبی برای واسنجی و صحت سنجی مدل هست.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه بیرجند در فاصله ۵ کیلومتری غرب شهر بیرجند در مسیر جاده بیرجند- طبس، مجاور روستای امیرآباد قرار دارد در آذرماه فصل پاییز کشت شد. این منطقه ازنظر اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم با عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۵۳ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی و با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا انجام شد. متوسط بارندگی این منطقه کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر و میانگین سالانه‌ی دمای آن ۱۶ درجه سانتی‌گراد است.

آزمایش به‌منظور بررسی اثر تنش خشکی بر عملکرد و اجزاء عملکرد سه رقم گندم انجام شد. این تحقیق در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در ۳ رقم مختلف گندم (S1، S2و S3 به ترتیب رقم‌های افق، روشن و نارین) و سطوح مختلف آبیاری (D1، D2 و D3 به ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) اجرا گردید. ابتدا مراحل آماده‌سازی زمین (شخم، دیسک، لولر) انجام گرفت و سپس بر اساس نقشه‌ی کاشت عملیات کرت بندی بر روی قطعه زمین مذکور صورت انجام شد. ابعاد کرت‌ها ۳×۲ (متر در متر)، فاصله‌ی بین کرت‌ها ۱ متر و فاصله‌ی بین بلوک‌ها هم ۱/۱۵ متر برای هر کرت در نظر گرفته شد. بر اساس آنالیز خاک، مقدار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریبل و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم به خاک داده شد به‌طوری‌که کودهای فسفره و پتاسیمی و حدود یک‌چهارم کود ازتِ، قبل از کشت در سطح کرت‌های آزمایشی به‌طور یکنواخت توزیع و با بیل به زیرخاک برده شد. بقیه کود ازتِ در سه نوبت در مراحل پنجه دهی، ساقه رفتن و خوشه‌دهی به میزان مساوی در سطح داخل کرت‌ها توزیع و با آب آبیاری به داخل خاک هدایت شد. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک و جدول ۲ خصوصیات شیمیایی آب قابل‌مشاهده می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

درصد اندازه ذرات Particle size percentage			بافت خاک Soil texture	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) Bulk density (g.cm-3)	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی‌زیمنس بر متر) EC of saturation extract (dS.m-1)	اسیدیته pH	کربن آلی (٪) Organic carbon (%)	فسفر قابل‌جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Absorbable phosphorus (mg.kg-1)	پتاسیم قابل‌جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Absorbable potassium ($mg.kg^{-1}$)	عمق خاک (سانتی‌متر) Depth (cm)
رس (درصد) Clay (%)	سیلت (درصد) Silt (%)	شن (درصد) Sand (%)								
۱۴/۱	۴۳/۵	۴۲/۴	Loam	۱/۴	۸/۱۲	۷/۸	۰/۴۹	۱۰/۶۲	۲۵/۹۲	۳۰-۰
۲۱/۶	۴۳/۲	۳۵/۲	Loam	۱/۲۵	۷/۵۱	۷/۴	۰/۴۱	۸/۴۳	۳۲/۱۴	۶۰-۳۰
۲۵/۲	۳۱/۵	۴۳/۴	Loam	۱/۳۳	۶/۹۳	۷/۳	۰/۳۵	۹/۷	۳۴/۱۵	۹۰-۶۰

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب

آنیون‌ها Anions (meq/lit)				کاتیون‌ها Cations (meq/lit)				نسبت جذب سدیم SAR	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) EC ($dS.m^{-1}$)
So_4^{2-}	Co_3^{2-}	Hco_3^-	Cl^-	K^+	Na^+	Mg^{++}	Ca^{++}			
۶/۴	۰	۴/۹	۸/۸	۰/۰۸	۱۳/۳	۲/۷	۳/۵	۷/۵	۸	۱/۴

برنامه‌ریزی آبیاری

در این تحقیق برنامه‌ریزی آبیاری و اعمال رژیم‌های مختلف آب، بر اساس کمبود رطوبت خاک و با معیار قرار دادن تیمار بدون تنش آبی انجام شد (زمانی، ۱۳۸۷). اولین آبیاری پس از کاشت بذرها، به‌منظور جوانه‌زنی و سبز شدن یکنواخت در تاریخ ۲۶ آذرماه ۱۳۹۶ با آب شیرین و به میزان یکسان برای کرت‌های آزمایشی صورت گرفت. در طی دوره رشد گندم، تعداد نوبت‌های آبیاری برای سطوح آبیاری D1,D2,D3 یکسان و برابر با ۱۰ نوبت بود. میزان آب ورودی به هر کرت توسط یک کنتور حجمی دقیق اندازه‌گیری و به داخل کرت هدایت شد. تاریخ و میزان آب مصرف‌شده برای هر یک از تیمارهای آبیاری در جدول زیر ارائه‌شده است. حجم آب مصرفی برای سطوح آبیاری D1,D2,D3 به ترتیب برابر با ۵۳۴۰، ۴۰۸۰ و ۲۸۲۰ مترمکعب در هکتار بود. (زمانی، ۱۳۸۷)

محاسبه بیوماس در مدل AquaCrop

با توجه به موارد گفته‌شده مقدار بیوماس بر اساس میزان آب مصرفی توسط گیاه (مقاله تعرق) تخمین زده می‌شود؛ بنابراین ارتباط بین تعرق و میزان بیوماس تولیدشده در مدل (Biomass & Tr) با در نظر گرفتن موارد زیر بیان می‌گردد :

جدول ۳- تاریخ، نوبت و میزان آب مصرفی برای هر تیمار

روز پس از کاشت	تاریخ آبیاری	نوبت آبیاری	سطوح مختلف آبیاری		
			D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)
۱	۹۶/۹/۲۶	اول	۳۰	۳۰	۳۰
۹۳	۹۶/۱۲/۱۴	دوم	۸۷	۷۰	۵۳
۱۰۷	۹۶/۱۲/۲۸	سوم	۹۵	۷۶	۵۷
۱۲۱	۹۷/۱/۱۲	چهارم	۱۱۴	۹۱	۶۸
۱۳۵	۹۷/۱/۲۶	پنجم	۱۲۱	۹۷	۷۳
۱۴۹	۹۷/۲/۹	ششم	۱۱۳	۹۰	۶۷
۱۶۳	۹۷/۲/۲۳	هفتم	۱۰۰	۸۰	۶۰
جمع			۶۶۰	۵۳۴	۴۰۸
			۶۶۰۰	۵۳۴۰	۴۰۸۰

نقش تابش خورشید در هر دو فرآیند تعرق گیاه و جذب کربن، مسیر مشترک جهت انجام عمل تعرق گیاه (روزنه‌ها) و جذب دی‌اکسید کربن (CO^2)، رابطه بین جذب و تنفس در گیاه و همان‌طوری که در رابطه ۱ مشاهده می‌گردد، در این مدل از پارامتر کارایی مصرف آب (WP) در تخمین مقدار بیوماس استفاده‌شده است.به‌طوری‌که :WP: کارایی مصرف آب ($g\ m^{-2}/\ mm^{-1}$) ، Tc: مقدار تعرق گیاه (mm/day^{-1})

$$WP = \frac{Biomass}{\sum T_c} \qquad ۱$$

در اقلیم‌های مختلف مقدار WP توسط Tanner و Sinclair در سال۱۹۸۳ برای بسیاری از گیاهان محاسبه‌شده است، لیکن با توجه به متغیر بودن مقدار آن در شرایط مختلف، شبیه‌سازی میزان عملکرد و از بین بردن تغییرات اقلیمی اثرگذار بر این پارامتر (تبخیر تعرق گیاه مرجع (ETo) و غلظت دی‌اکسید کربن) پارامتر WP نرمال‌سازی می‌گردد. درنتیجه گیاهان در گروه‌های مشابه ازلحاظ کربن ۳ و ۴ (C3,C4)تقسیم‌بندی می‌گردند. در این صورت WP (کارایی مصرف آب نرمال شده) در مدل AquaCrop از رابطه ۲ زیر حاصل می‌گردد.

$$WP^* = \left[\frac{Biomass}{\sum\left(\frac{T_C}{ET_0}\right)}\right]_{CO_2(2000)} \qquad ۲$$

بدین ترتیب مقدار بیوماس از رابطه ۳ قابل تخمین می‌باشد.به‌طوری‌که:

WP: کارایی مصرف آب نرمال شده توسط تبخیر و تعرق گیاه مرجع و غلظت دی‌اکسید کربن (ton/ha یا gm^{-2})، ETo: تبخیر و تعرق مرجع (mm/day)، Tc: مقدار تعرق گیاه (mm/day^{-1})

$$\text{Biomass} = \text{WP} * \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Tc}{ETo}\right)i \qquad ۳$$

در مدل AquaCrop تمایزی بین بهره‌وری آب بیوماس (WP) و بهره‌وری آب تبخیر و تعرق یافته(WPET) یا بهره‌وری آب مصرفی (WUE) قائل شده است. بهره‌وری آب بیوماس (WP) اشاره دارد به مقدار بیوماس تولیدشده به ازای مقدار آب تعرق یافته به‌وسیله گیاه که بیانگر رابطه ۴ و ۵ است. این مفهوم به مدل اجازه می‌دهد تا مقدار بیوماس (B) را از مجموع مقدار آب تعریق یافته ($\sum Tr$) تخمین بزند.

$$B=WP*\sum Tr \qquad ۴$$

$$WP=\frac{biomassproduced}{watertramspired}\ kg(biomass)/m^3(Tr) \qquad ۵$$

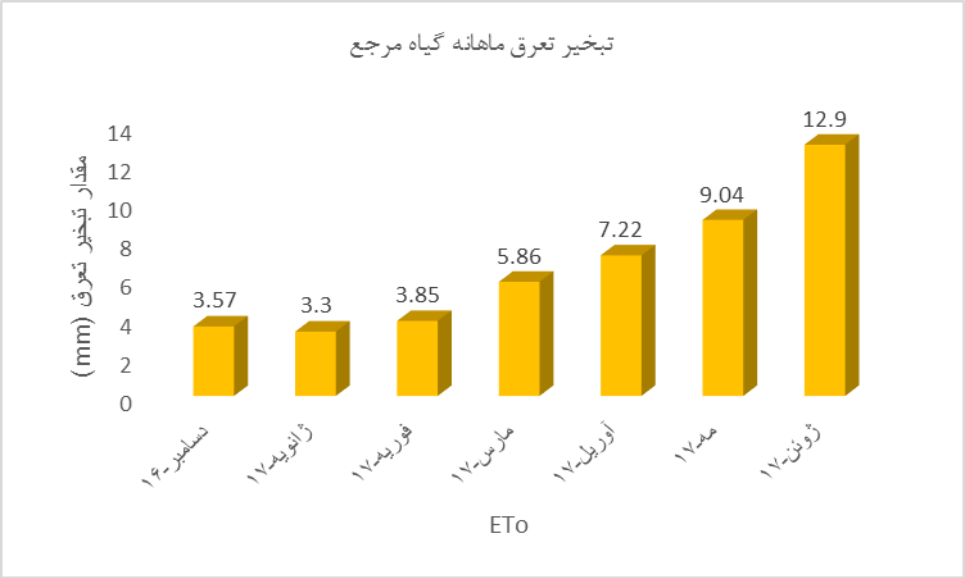
بهره‌وری آب_ عملکرد دانه(WPET) اشاره به ارتباط بین میزان محصول (عملکرد دانه Y) تولیدشده و تبخیر و تعرق (ET) گیاه دارد.

$$WP_{ET}=\frac{yieldproduced}{waterevapotranspired}\ kg(yield)/m^3(ET) \qquad ۶$$

به‌صورت کلی تغییرات اساسی صورت گرفته جهت شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان توسط مدل AquaCrop عبارت‌اند از:

۱- تأثیر شاخص برداشت (HI) در تخمین میزان بیوماس نهایی جهت محاسبه عملکرد محصولات لحاظ شده است.

۲- در این مدل مقدار تبخیر و تعرق گیاهی از هم تفکیک‌شده و به‌صورت تبخیر از سطح خاک و تعرق روزنه‌ای در محاسبه عملکرد نهایی در نظر گرفته‌شده است. ازآنجایی‌که در ابتدای رشد گیاهان (مرحله اولیه) سطح پوششی گیاهان کم است، بنابراین مقدار تبخیر از سطح خاک قابل‌توجه بوده و نباید در محاسبه مقدار آب مصرفی توسط گیاهان در نظر گرفته شود. در این مدل برای محاسبه میزان تبخیر از سطح خاک از رابطه ریچی[۱] (۱۹۷۲) استفاده‌شده است. برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از مدل CropWat با استفاده از داده‌های هواشناسی و مزرعه‌ای استفاده گردید (شکل ۱).



شکل ۱- میزان تبخیر تعرق گیاه مرجع به‌صورت ماهانه از ابتدای کاشت تا زمان برداشت

اجرای مدل

اجرای مدل ممکن است به‌صورت منفرد یا چندگانه صورت گیرد که انتخاب آن به عهده کاربر می‌باشد. با اجرای چندگانه کاربر می‌تواند اثر تغییر آب و هوایی در سال‌های مختلف را بر توسعه و تولید محصول مشاهده کند. البته این نوع اجرای مدل برای گیاهان مختلف در سال‌های متمادی نیز اجرا می‌شود. پس از اجرای برنامه، خروجی‌های مدل به‌صورت نمودار یا عدد و به‌صورت روزانه، ده‌روزه و یا ماهیانه ارائه می‌گردد. خروجی مدل شامل صفحات آب خاک، گیاه، اتمسفر، پروفیل آب خاک، پارامترهای بیلان آب خاک و محصول تولیدشده می‌باشد.

برای تجزیه تحلیل آماری صفات در این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Exel-macro به کمک آزمون ANOVA و مقایسه‌های میانگین اثرات اصلی با استفاده از آزمون LSD محافظت‌شده در سطح احتمال ۱و ۵ درصد انجام شد. شکل‌ها و نمودارها نیز به کمک نرم‌افزار EXCEL 2013 ترسیم شد.در این تحقیق به‌منظور ارزیابی نتایج مدل از ۷ شاخص آماری NRMSE[1]، RMSE[2]، R^2[3]، ME[4]، EF[5]، CRM[6] و NSE[7] مورد استفاده قرار گرفت.

1- Normal Root Mean Squared Error
2- Root Mean Squared Error
3- R Squared
4- Mean Error
5- Ejection Fraction
6- Residual Coefficient
7- Nash–Sutcliffe

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت مدل AquaCrop

نتایج آنالیز حساسیت مدل AquaCrop برای برخی پارامترهای ورودی به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد محصول گندم نشان می‌دهد که مدل نسبت به زمان شروع جوانه‌زنی، حداکثر عمق مؤثر ریشه، زمان رسیدن به ماکزیمم عمق ریشه، دمای پایه رشد و حد آستانه‌بالای دما حساسیت ندارد از طرف دیگر حساسیت مدل نسبت به پوشش کانوپی اولیه (CC0) تراکم کشت، ضریب رشد کانوپی (CGC)، ضریب کاهش کانوپی (CDC) و زمان شروع دوره کاهش حساسیت کم است، بنابراین خطای حاصل از اندازه‌گیری این داده‌ها قابل‌چشم‌پوشی است. این در حالی است که حساسیت مدل نسبت به تغییرات حداکثر پوشش گیاهی، زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی، زمان برداشت و رسیدگی فیزیولوژیکی، ضریب گیاهی مربوط به تعرق (KCn1)، بهره‌وری آب نرمال شده (WP) و شاخص برداشت مرجع (II) بیشتر از سایر پارامترها است. ازاین‌رو بایستی این داده‌ها با دقت بیشتری اندازه‌گیری شوند زیرا در غیر این صورت خطای قابل‌توجهی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مدل به وجود می‌آید، بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که حساسیت مدل به پارامترهای ورودی تابع شرایط مزرعه‌ای نوع گیاه و اقلیم منطقه بوده ولی بااین‌وجود در اکثر تحقیقات، میزان حساسیت مدل نسبت به پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)، ضریب تعرق گیاهی (KCir) و شاخص برداشت مرجع (HI) متوسط به بالا گزارش‌شده است. بر همین اساس طبق

گزارش سالمی [1] و همکاران (۲۰۱۱)، مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم نسبت به KCT WP* و دمای هوا حساسیت متوسطی دارد. درحالی‌که بابا زاده و سرائی تبریزی (۱۳۹۱)، نشان دادند که مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول گیاه سویا نسبت به پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده، شاخص برداشت (HI)، زمان پر شدن غلاف و زمان گلدهی حساسیت بالایی دارد. تحقیقات محمدی و همکاران (۱۳۹۴)، نیز نشان داد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم نسبت به پارامترهای تراکم کشت، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، زمان سبز شدن بذرها، زمان رسیدن به ماکزیمم پوشش، زمان رسیدن به گلدهی، طول دوره گلدهی، حد آستانه‌بالای دما حساسیت کمی دارد و حساسیت مدل نسبت به تغییرات HI WPKCI و دمای ماکزیمم هوا بالا و بیشتر از سایر پارامترهاست. لازم به ذکر است تهیه این پارامترها برای تنش ۱۰۰ و ۷۵ در بخش واسنجی مدل یکسان می‌باشد.

نتایج حاصل از واسنجی مدل

مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی استفاده می‌شوند، درواقع بیان ریاضی ساده‌شده‌ای از یک سیستم زراعی واقعی بوده و در عمل دربرگیرنده همه فرآیندهای بیولوژیک، فیزیکی و شیمیایی دخیل در سیستم‌های زراعی نمی‌باشند. به همین دلیل ضرایب و روابط ریاضی به‌کاررفته در آن‌ها در یک دامنه مشخص تا حدودی تحت تأثیر شرایط محیطی هر منطقه خواهد بود. در چنین شرایطی به‌منظور اطمینان از صحت عملکرد مدل، فرآیند واسنجی باید باهدف انطباق بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده صورت گیرد. در این تحقیق، از داده‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری شده برای تنش‌های ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ جهت واسنجی مدل AquaCropاستفاده شد.

در این بخش مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در جدول ۴ و ۵ برای عملکرد دانه، عملکرد بیوماس و کارایی مصرف آب در دو سطح ۱۰۰و ۷۵ و ارقام کشت‌شده آمده است. جداول ۴ و ۵ به ترتیب نتایج واسنجی پارامترهای مذکور را برای تنش ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی را نشان می‌دهند.

سعادتی و همکاران (۱۳۹۵) در شبیه‌سازی عملکرد ارقام گندم تحت تیمارهای مختلف آبیاری در منطقه مشهد گزارش کردند که میزان RMSE، NRMSE و R^2 برای عملکرد دانه در مرحله واسنجی مدل به ترتیب برابر با ۳۷۶ (کیلوگرم در هکتار)، ۷ درصد و ۰/۶۳ می‌باشد. نتایج پژوهش کلانکی و همکاران (۱۳۹۶) به‌منظور بررسی اثر تلفیق مدیریت آبیاری و تاریخ کشت بر کارایی مصرف آب ذرت با استفاده از مدل DSSAT نشان داد که در مرحله واسنجی مدل، میزان NRMSE، d و R^2 برای شاخص سطح برگ به ترتیب برابر با ۶/۸، ۰/۹ و ۰/۹۱ و برای عملکرد دانه برابر با ۲/۲۸، ۱ و ۱ گزارش‌شده است.

از روی مقادیر معیارهای ارزیابی به‌دست‌آمده عملکرد دانه و بیوماس در تنش ۱۰۰ درصد نیاز آبی و عملکرد و بیوماس تولیدی تنش ۷۵ درصد نیاز آبی می‌توان بیان نمود که مقادیر NRMSE که به‌نوعی کارایی مدل را در محاسبه عملکرد دانه در این سطوح تنش نشان می‌دهد.کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار NRMSE میانگین تنش‌های ۱۰۰ و ۷۵ درصد ارقام افق،روشن و نارین به ترتیب در برآورد پارامترهای عملکرد دانه و بیوماس تولیدشده رقم افق (۰/۰۸۱ درصد) و (۶/۹۸ درصد) ، رقم روشن (۰/۷۳ درصد) (۲/۲۲ درصد) و رقم نارین (۱/۵۱ درصد) (۵/۲۴ درصد) مشاهده شد. همچنین در خصوص کارایی مصرف آب مقدار خطای نسبی برای کلیه ارقام کشت‌شده به ترتیب در تنش ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۱۰/۸۱ و ۷/۴۷ درصد در مرحله واسنجی به دست آمد.

نتایج به‌دست‌آمده از صحت‌سنجی مدل

پس از مرحله واسنجی، کارایی مدل و صحت نتایج به‌دست‌آمده داده‌های واسنجی شده تنش‌های ۱۰۰ و ۷۵ برای تنش ۵۰ درصد موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور، مدل AquaCrop بر اساس پارامترهای آنالیز حساسیت شده در مدل اجرا شد. در جدول ۶ نتایج صحت‌سنجی پارامترهای عملکرد دانه، بیوماس و کارایی مصرف آب ارائه‌شده است. با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری جدول ۵ می‌توان بیان نمود که مدل AquaCrop به‌خوبی عملکرد دانه و بیوماس را برای ارقام افق، روشن و نارین در منطقه بیرجند شبیه‌سازی نموده است. در فرآیند صحت‌سنجی برای رقم افق جدول ۷ و جدول ۸، کمترین و بیشترین مقدار NRMSE به ترتیب در برآورد پارامترهای عملکرد دانه (۱/۴۹) و بیوماس (۳/۷۷ درصد) مشاهده شد . مقادیر صحت سنجی شده رقم روشن در جدول ۷ و جدول ۸ برای کمترین و بیشترین مقدار NRMSE به ترتیب در برآورد بیوماس تولیدشده (۹۶/ ۰درصد) و عملکرد دانه (۳/۱۴ درصد) و کمترین و بیشترین مقدار NRMSE رقم نارین به ترتیب در برآورد عملکرد دانه (۰/۰۸۵ درصد) و بیوماس تولیدشده (۱۱/۸۸ درصد) مشاهده گردید. نتایج به‌دست‌آمده از صحت سنجی مدل AquaCrop نشان می‌دهد مدل در برآورد عملکرد دانه NRMSE کمتر درنتیجه دقت بیشتری در محاسبه عملکرد دانه نسبت به بیوماس تولیدی به ما می‌دهد. همچنین مقدار خطای نسبی کارایی مصرف مدل بین مقدار شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی برای تنش ۵۰ درصد به مقدار ۸/۶۹ درصد بود. نتایج پژوهش سعادتی و همکاران (۱۳۹۵) در شبیه‌سازی عملکرد ارقام گندم تحت تیمارهای مختلف آبیاری در منطقه مشهد

1- Salemi

نشان داد که میزان RMSE، NRMSE و R^2 برای عملکرد دانه در مرحله صحت‌سنجی مدل به ترتیب برابر با ۵۴۱ (کیلوگرم در هکتار)، ۱۰ درصد و ۰/۴۷ بود. در پژوهشی دیگر، میزان RMSE در مرحله صحت‌سنجی مدل CERES-Wheat برای شبیه‌سازی حداکثر شاخص سطح برگ حدود ۶ درصد، برای عملکرد دانه و ماده خشک کل حدود ۵ درصد و برای مراحل فنولوژی گیاه در حدود ۲ درصد گزارش‌شده است. ضریب تبیین نیز به‌غیراز شبیه‌سازی مرحله گرده‌افشانی (۰/۲۵) برای بقیه موارد بین ۰/۹۰ تا ۰/۹۴ است (دلقندی، ۱۳۹۱).

جدول ٤- مقادیر مربوط به پارامترهای گیاهی در تیمار تنش رطوبتی ۱۰۰ درصد و ارقام گندم در مرحله واسنجی مدلAquaCrop

WP kg/mm/ha		Biomass, t/ha		Yield, t/ha		ارقام
Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	
۱۱/۴۹	۱۰/۶۹	۷/۴۷	۶/۹۵	۲/۳۴	۲/۳۳	S1/افق
۱۳	۱۲/۴۰	۸/۴۵	۸/۰۶	۲/۹۶	۳/۰۳	S1/افق
۱۱/۲۶	۱۰/۲۵	۷/۳۲	۶/۶۶	۲/۲۲	۲/۰۱	S1/افق
۱۲/۸۰	۱۳/۱۲	۸/۳۲	۸/۵۳	۳/۳۰	۳/۳۵	S2/روشن
۱۱/۶۳	۱۰/۰۸	۷/۵۶	۶/۵۵	۲/۹۳	۲/۸۰	S2/روشن
۱۱/۸۳	۱۱/۶۷	۷/۶۹	۷/۵۹	۲/۷۶	۲/۸۰	S2/روشن
۱۱/۹۵	۱۲/۳۶	۷/۷۷	۸/۰۳	۲/۳۳	۲/۶۰	S3/نارین
۱۳/۱۷	۱۵/۹۶	۸/۵۶	۱۰/۳۷	۳/۰۲	۳/۲۵	S3/نارین
۱۰/۸۱	۹/۹۳	۷/۰۳	۶/۴۵	۱/۸۹	۲/۲۸	S3/نارین

جدول ۵- مقادیر مربوط به پارامترهای گیاهی در تیمار تنش رطوبتی ۷۵ درصد و ارقام گندم در مرحله واسنجی مدلAquaCrop

WP kg/mm/ha		Biomass, t/ha		Yield, t/ha		ارقام
Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	
۱۱/۲۶	۸/۴۲	۶/۲۴	۴/۶۶	۱/۸۶	۱/۷۷	S1/افق
۹/۴۰	۷/۴۶	۵/۲۱	۴/۱۳	۱/۶۶	۱/۵۸	S1/افق
۱۰/۶۳	۹/۵	۵/۸۹	۵/۲۶	۱/۹۵	۱/۸۲	S1/افق
۱۱/۱۰	۹/۴۴	۶/۱۵	۵/۲۳	۱/۸۲	۱/۵۱	S2/روشن
۱۱/۱۳	۱۱/۳۴	۶/۱۷	۶/۲۸	۱/۹۶	۲/۲۸	S2/روشن
۹/۹۲	۹/۱۵	۵/۵	۵/۰۷	۲/۰۱	۱/۹۳	S2/روشن
۹/۰۶	۶/۷۲	۵/۰۲	۳/۷۲	۱/۲۶	۰/۹۷	S3/نارین
۹/۶۱	۸/۲۰	۵/۳۲	۴/۵۴	۱/۳۸	۱/۵۱	S3/نارین
۸/۱۵	۷/۵۱	۴/۵۲	۴/۱۶	۰/۹۲	۱/۰۱	S3/نارین

جدول ٦- مقادیر مربوط به پارامترهای گیاهی در تیمار تنش رطوبتی ۵۰ درصد و ارقام گندم در مرحله صحت سنجی مدل AquaCrop

WP kg/mm/ha		Biomass, t/ha		Yield, t/ha		ارقام
Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	
۱۱/۸۵	۱۰/۱۱	۵/۳۳	۴/۵۵	۱/۴۱	۱/۶۸	S1/افق
۱۰/۱۷	۹/۰۳	۴/۵۸	۴/۰۶	۱/۳۲	۱/۲۶	S1/افق
۱۰/۴۴	۱۰/۳۱	۴/۷۰	۴/۶۴	۱/۵۲	۱/۶۲	S1/افق
۱۳/۲۵	۱۲/۳۴	۵/۹۶	۵/۵۵	۱/۷۲	۲/۱۴	S2/روشن
۱۲/۶۲	۱۸/۸۷	۵/۶۸	۸/۴۹	۱/۸۶	۲/۸۵	S2/روشن
۹/۱۱	۷/۹۸	۴/۱۰	۳/۵۹	۱/۵۲	۱/۴۸	S2/روشن
۷/۶۹	۴/۹۵	۳/۴۶	۲/۲۲	۰/۶۹	۰/۷۳	S3/نارین
۹/۴۰	۷/۸۵	۴/۲۳	۳/۵۳	۰/۷۷	۰/۸۳	S3/نارین
۸/۵۷	۶/۳۴	۳/۸۶	۲/۸۵	۰/۵۰	۰/۶۷	S3/نارین

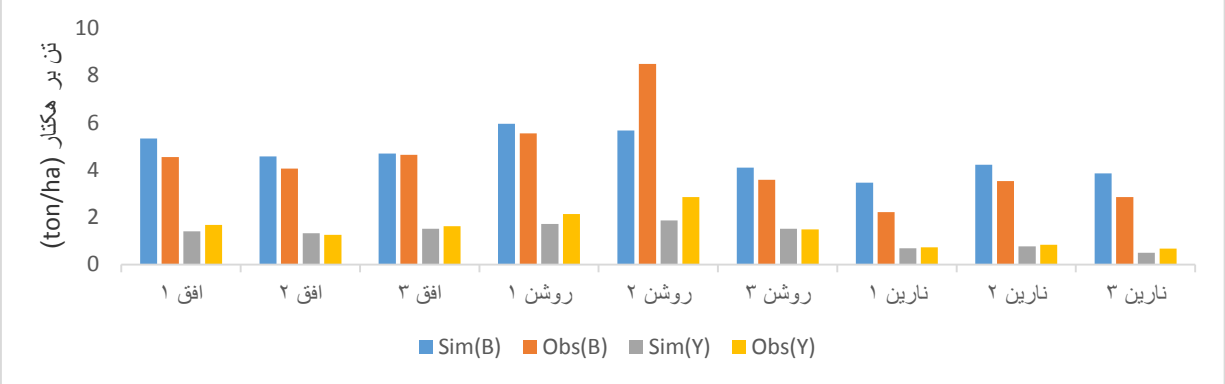
جدول ۷- معیارهای ارزیابی در تیمار ۵۰ درصد تنش رطوبتی و ارقام گندم در مرحله صحت‌سنجی برای عملکرد دانه در مدل AquaCrop

ارقام	NRMSE(%)	ME (%)	EF	CRM	R^2	RMSE	RE	NSE
S1/افق	۱/۴۹	-۰/۱	۰/۱۸	-۰/۰۷	۰/۶۱	۰/۱۷	-۰/۰۲	۰/۱۸
S2/روشن	۳/۱۴	-۰/۴۶	-۰/۲۳	-۰/۲۷	۰/۹۸	۰/۶۲	-۰/۰۸	-۰/۲۳
S3/نارین	۰/۰۸	-۰/۰۹	-۱/۵۲	-۰/۱۴	۰/۸۸	۰/۱	-۰/۰۵	-۱/۵۲

جدول ۸- معیارهای ارزیابی در تیمار ۵۰ درصد تنش رطوبتی و ارقام گندم در مرحله صحت سنجی برای عملکرد دانه در مدل AquaCrop

ارقام	NRMSE(%)	ME (%)	EF	CRM	R^2	RMSE	RE	NSE
S1/افق	۳/۷۷	۰/۴۵	-۳/۳۶	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۵۴	۰/۰۳	-۳/۵۶
S2/روشن	۰/۹۶	-۰/۶۳	۰/۳۱	-۰/۱۲	۰/۵	۱/۶۶	-۰/۰۳	۰/۳۱
S3/نارین	۱۱/۸۸	۰/۹۷	-۲/۵۱	۰/۲۵	۰/۹۹	۱	۰/۰۸	-۲/۵۱

نتایج مربوط به جدول۶ به‌صورت نمودار میله‌ای در شکل ۲ برای هر تکرار از ارقام در سطح تنش ۵۰ درصد می‌توان مشاهده نمود که در این نمودار به ترتیب Sim(Y) و Obs(Y) مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه برای عملکرد گندم و Sim(B) و Obs(B) مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه برای وزن بیوماس در واحد تن بر هکتار است.



شکل ۲- مقایسه داده‌های شبیه‌سازی‌شده با داده مزرعه‌ای برای عملکرد و بیوماس در سطح تنش ۵۰ درصد نیاز آبی

در این پژوهش به‌منظور اطمینان از مقدار صحت سنجی شده، میانگین عملکرد دانه رقم روشن کشت‌شده در این تحقیق با مقدار عملکرد این رقم در سال زراعی ۱۳۸۷ با شوری آب یکسان و یکسان فرض نمودن حاصلخیزی خاک و مقدار آب آبیاری تنها با تغییر داده‌های هواشناسی برای مدل صحت سنجی شد(زمانی و همکاران ۱۳۸۷). نتایج میانگین شاخص‌های ارزیابی صحت سنجی در ۲ سطح تنش آبی ۵۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی برای رقم روشن در جدول ۹ آمده است. نتایج شاخص NRMSE نشان داد که مدل برای سال زراعی و داده‌های هواشناسی متفاوت برای شبیه‌سازی عملکرد کاربردی و دقیق هست.

جدول ۹- معیارهای ارزیابی میانگین تنش ۱۰۰ و ۵۰ درصد تنش رطوبتی برای رقم روشن در مرحله صحت‌سنجی برای عملکرد دانه در مدل AquaCrop

رقم	NRMSE (%)	ME (%)	EF	CRM	R^2	RMSE	RE	NSE
روشن S2	۹/۴۳۲	-۱	۰/۶۲۴	-۰/۱۱	۰/۹۹۷	۰/۵۷۹	-۰/۰۰۳	۰/۶۲۴

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از داده‌های یک سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ برای دو رقم افق و نارین و دو سال زراعی ۱۳۸۷ و ۱۳۹۶ برای رقم روشن، مدل گیاهی AquaCrop در واحد مزرعه دانشگاه

بیرجند واسنجی شد. پارامترهای واسنجی شده به توضیح در این مقاله ذکر گردید ولی هدف اصلی در این مقاله صحت سنجی و اثبات کاربردی بودن این مدل برای منطقه است.

در این تحقیق سه رقم گندم تحت سه تنش رطوبتی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به این‌که برای هر تیمار آبی سه رقم مختلف گندم وجود داشت. بنابراین مدل با استفاده از یک تیمار آبی برای هر سه رقم در تنش رطوبتی ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه واسنجی و در تنش ۵۰ درصد نیاز آبی این واسنجی مورد صحت سنجی قرار گرفت. همچنین با استفاده از داده‌های رقم روشن که در سال زراعی ۱۳۸۷ برای دو تنش ۱۰۰ و ۵۰ درصد صحت سنجی شد. نتایج نشان داد که مدل با این روش و داده‌های یک سال زراعی به‌خوبی واسنجی و صحت سنجی می‌شود. به‌طوری‌که مدل توانست مقادیر عملکرد و زیست‌توده آب را برای سه رقم گندم تحت تنش رطوبتی با دقت خوبی برآورد نماید. همچنین در سطوح کم آبیاری مدل نیز توانست به‌خوبی شبیه‌سازی کند.

مقدار شاخص NRMSE عملکرد دانه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای میانگین تنش‌های رطوبتی ۱۰۰ و ۷۵ درصد در مرحله واسنجی ارقام افق، روشن و نارین به ترتیب ۰/۰۹ ، ۰/۸۸ و ۱/۵۱ درصد به دست آمد. این مقادیر در صحت سنجی مدل در تنش ۵۰ درصد به ترتیب ۱/۴۹ ، ۳/۱۴ و ۰/۰۸ درصد مشاهده شد. نتایج شاخص NRMSE نشان داد که مدل برای سال زراعی و داده‌های هواشناسی متفاوت برای شبیه‌سازی عملکرد کاربردی و دقیق می‌باشد.

با توجه به نتایج، مدل توانست با کمترین تعداد تیمار تنش رطوبتی، واسنجی و عملکرد و بیوماس را با دقت نسبتاً بالایی بر هر سه رقم کشت‌شده، شبیه‌سازی نماید. اما در این حالت دقت مدل نسبت به حد واسط تنش رطوبتی یعنی تنش ۷۵ درصد نیاز آبی کمی کاهش یافت. به‌طورکلی با توجه به‌سادگی و دقت بالای مدل AquaCrop و نیاز به حداقل داده‌های ورودی که به‌آسانی قابل‌اندازه‌گیری می‌باشند، می‌توان از این مدل جدید برای ارزیابی سناریوهای مختلف آبیاری باکیفیت‌های مختلف برای ارقام جدید در هر منطقه در جهت بهینه‌سازی مصرف آب و مدیریت آبیاری برای گیاه گندم استفاده نمود.

فهرست منابع

بابازاده، ح. و سرائی تبریزی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم -آبیاری سویا. نشریه آب‌وخاک علوم و صنایع کشاورزی. ۲۶(۲): ۳۳۹-۳.

دلقندی، م.، اندرزیان، ب.، برومند نصب، س.، مساح بوانی، ع.ر. و جواهری، ا. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل CERES-Wheat نسخه 4.5DSSAT در شبیه‌سازی رشد عملکرد و مراحل فنولوژی گندم در شرایط مدیریت‌های مختلف تخصیص آب در مزرعه (مطالعه موردی : شهرستان اهواز). نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸(۲): ۹۱-۸۲.

زمانی، غ.ر.، شهیدی، ع. کشکولی، ح. ع. و حسینی س.م. ۱۳۸۷. اثر برهم‌کنش شوری و کم آبیاری بر عملکرد کمی و کیفی دو رقم گندم: دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز، دانشگاه چمران.

سعادتی، ز.، دلبری، م. امیری، ا. پناهی، م. رحیمیان، م. ح. و قدسی، م. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی عملکرد ارقام گندم تحت تیمارهای مختلف آبیاری. نشریه حفاظت منابع آب‌وخاک، ۵(۳۵): ۷۳-۸۵.

سلیمانی، ع. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم با استفاده از مدل ET-HS. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، دوره۹، شماره۳۹(۳): ۲۱۵-۲۰۵.

عابدین پور، م. مدیریت آب در کشاورزی با مدل AquaCrop، جهاد دانشگاهی دانشگاه اصفهان.

کلانکی، م. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر مدیریت آبیاری در افزایش بهره‌وری آب گیاه ذرت با در نظر گرفتن تغییر اقلیم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه زابل، زابل.

کلانکی، م.، کاراندیش، ف. و صابرعلی، س.ف. ۱۳۹۶. اثر تلفیق مدیریت آبیاری و تاریخ کشت بر کارایی مصرف آب ذرت با استفاده از مدل DSSAT. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۳۱(۴): ۵۲۲-۵۰۹.

کوچکی، ع. ۱۳۷۰. مبانی فیزیولوژیکی رشد و نمو گیاهان زراعی. انتشارات آستان قدس رضوی.

گلکار حمزیی یزد،ح. و فرداد، ح. ۱۳۸۱. تحلیل اقتصادی کم آبیاری گندم در شرایط کرج. علوم کشاورزی ایران. ۳۳(۲): ۳۰۵-۳۱۲.

محمدی، م.، قهرمان، ب. داوری، ک. انصاری، ح. و شهیدی، ع. ۱۳۹۴. اعتبارسنجی مدل AquaCropبه‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گندم زمستانه تحت شرایط هم‌زمان تنش شوری و خشکی. نشریه آب‌وخاک علوم و صنایع کشاورزی، ۲۹(۱): ۸۴-۶۷.

محمدی، م.، داوری، ک. قهرمان، ب. انصاری، ح. و حق‌وردی، ا. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش هم‌زمان شوری و خشکی (مطالعه موردی : مشهد). نشریه پژوهش آب در کشاورزی

(علوم و صنایع کشاورزی).۲۹(۳): ۲۹۵-۲۷۷.

مؤمنی، ر.، بهبهانی، م.ر. نظری فر، م. ه. و آزادگان، ب. ۱۳۹۰. ارزیابی سناریوهای افزایش بهره‌وری مصرف آب گندم دیم در حوزه کرخه با استفاده از آنالیزهای مدیریتی مدل رشد گیاهی CropSyst. مدیریت آب و آبیاری، (۱)۱: ۲۹-۴۰.

Aghayari, F., KHALILI, F., andARDAKANI, M.R. 2016. Effect of deficit irrigation, partial irrigation and superabsorbent polymer on yield and yield components of corn (cv. KSC703).

Akram, M. 2011. Growth and yield components of wheat under water stress of different growth stages. Bangladesh Journal of Agricultural Research 36(3): 455-468.

Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., and Rahanama, A. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran.Agric.Water Manag.100:1-8

Budak, H., Kantar, M., and Kurtoglu, K.Y. 2013.Drought tolerance in modern and wild wheat. Scientific World Journal.

Dettori, M., Cesaraccio, C., Motroni, A., Spano, D. and Duce, P. 2011. Using CERES-Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy. Field Crops Research 120:179–188.

Duggan, B.L., and Fowler, D.B. 2006. Yield structure and kernel potential of winter wheat on the Canadian prairies. Crop Science 46(4): 1479-1487.

F.A.O. Statistical database. Available online: Http// www. FAO. Org. 2016.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., and Basra, S.M.A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development 29:185.

Farshadfar, E., Rashidi, M., Mahdi, M.J., and Zali, H. 2013. GGE biplot analysis of genotype. Environment interaction in chickpea genotypes. Eur. J. Exp. Biol. 3:417.

Hang, A. N., & Miller, D. E. 1983. Wheat Development as Affected by Deficit, High Frequency Sprinkler Irrigation 1. Agronomy Journal 75(2): 234-23.

Hussain, A., Ahmad, M.M.A., Wajid, A., and Ahmad, Z. 1997. Effect of irrigation during various development stages on yield, components, yield and harvest index of different wheat cultivars. Pakistan Journal of Agricultural Sciences 34: 1-4.

Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., and Jacobs, C.M.J. 2009. SWAP version 3.2. Theory description and user manual (No. 1649 (02)). Alterra.

Kuo, S.F., Lin, B.J., and Shieh, H.J. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. Agricultural Water Management 82:433-451.

Dastfal, M., Brati, V., Navabi, F., and Haghighat Nia, H. 2009. Effect of Terminal Drought Stress on Grain Yield and Its Components in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes in Dry and Warm Conditions in South of Fars Province. Seed and Plant Production Journal 25(3):329-344.

Mohajerani, H., Mosaedi, A., Kholghi, M., Maftah Halghi, M., and Saad Aldin, A. 2011. Estimating crop water requirement of wheat by Cropwat model in Kordkouy-Golestan province. National Conference on Water Scarcity.

Osamu, T., Yoshida, K., Hiroaki, S., Katsuhiro, H. and Hajime Tangi, H. 2005. Estimation ofirrigation water using cropwat model at KM35 project site, in Savannakhet, LAO, PDR. Proceedings of the International Symposium on Role of Water Sciences in Transboundary River Basin Management. 10-12 March. Ratchathani, Thailand.

Salemi, H., Soom, M.A.M., Lee, T.S., Mousavi, S.F., Ganji, A., and Yusoff, M.K. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. African Journal of Agricultural Research, 610: 2204- 2215.

Singh, R. 2004. Simulation on direct and cyclic use of saline waters for sustaining Cotton-Wheat in a semi-arid area of north-west India. Agricultural Water Management, 66, 153-162.

Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., and Fereres, E. 2009. AquaCropThe FAO crop model to simulate yield response to water: I concepts and underlying principles. Agronomy Journal 101: 426–437

Zong-Ming, W.A.N.G., Zhang, B., Xiao-Yan, L. I., Kai-Shan, S.O.N. G., Dian-Wei, L. I. U., & Zhang, S. Q. 2006. Using CropSyst to Simulate Spring Wheat Growth in Black Soil Zone of Northeast China1. Pedosphere 16(3):354-361.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2257-2267

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۲۶۷-۲۲۵۷

Calibration and Verification AquaCrop Plant Model to Simulate the Performance of Three Different Wheat Varieties under Drought Stress

A.H. Ghadirian[1], **M. Yaghoob Zadeh***[2], **G.R. Zamani**[3], **A. Shahidi**[4]
Recived: Jun.04, 2020 Accepted: Sep.13, 2020

Abstract

Optimal use of available water resources and their management is very important according to modern science. This has led to the importance of using plant models to study the effects of low water on agricultural yields. In order to investigate the effect of moisture stress on yield and growth traits in three cultivars of horizon, clear and narin and weeding and validation of vegetative model AquaCrop for these cultivars were performed in 96-97 crop year on a research farm located in Birjand. The research was conducted in the form of a factorial randomized complete block design with 6 treatments and three replications. Irrigation treatments included 100 (control treatment), 75 (medium stress) and 50 (severe stress) percentage of wheat water requirement and 3 other treatments related to two new cultivars of Ofogh and Narin and one old and native cultivar Roshan. The results of the mean comparison of the mean mean of the simple effect of moisture stress, the simple effect of cultivars and the interaction effect of stress on different cultivars were significant in different traits. After analyzing and comparing the average plant traits of the AquaCrop plant model for stresses of 100 and 75%, the water requirement was measured in two parameters of grain yield and biomass. After the validation stage, the model validation model was performed with 50% water stress. The results of the model validation showed that the model calculations showed a close and acceptable simulation value compared to the measured value of grain performance according to NRMSE and R^2 evaluation indicators. The NRMSE index value of the simulated and measured grain mass for the mean moisture stresses of 100 and 75% in the horizontal and horizontal digits of Rosin, Narin and Narin cultivars was 0.99, 0.88 and 1.51%, respectively. These values were observed in the model validation in 50% stress to 1.49, 3.14 and 0.88%, respectively. Also, to ensure the accuracy of the model, using the measured performance data, the bright figure in the 2009-2010 crop years was validated by changing the re-meteorological data. According to the values calculated in the statistical indicators, it can be concluded that the model can provide us with an acceptable efficiency for measuring different wheat cultivars, which is very important in the region due to the high and increasing number of different wheat cultivars.

Keywords: AquaCrop model, Calibration, Moisture stress, Wheat varieties, Wheat yield

1- M.Sc. Department of Water Engineering, University of Birjand
2 and 4- Department of Water Science and Engineering, Birjand University
3- Department of Agricultural Sciences and Plant Breeding, Birjand University
(*- Corresponding Author Email: M.Yaghoobzadeh@birjand.ac.ir)