نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۸، خرداد - تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۹۳-۲۸۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 18, Jun.-Jul. 2024, p. 281-293

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب نیشکر در شرایط مزرعه و تعیین مقادیر مناسب دور و مقدار آبیاری با مدل AquaCrop

مسعود آل‌کثیر[۱]، منا گلابی*[۲]، عبدعلی ناصری[۳]، محمد الباجی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۴

چکیده

مدل‌سازی گیاهی به عنوان روشی پرکاربرد برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان تحت مدیریت‌های مختلف است. به همین دلیل، در پژوهش حاضر از یک مدل گیاهی آب محور، به نام AquaCrop، برای شبیه‌سازی و تعیین مقدار و دور آبیاری بهینه در مزارع نیشکر دهخدا استفاده گردید. داده‌های این پژوهش از مزارع کشت و صنعت دهخدا در طول سه سال زراعی ۱۴۰۱-۱۳۹۹ برداشت شدند. مجموع مساحت تحت مطالعه ۲۳۰ هکتار بود. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل AquaCrop دارای خطای قابل قبول برای شبیه‌سازی عملکرد ($RMSE<5.6\ tonha^{-1}$) و بهره‌وری آب ($RMSE<2.2\ kgm^{-3}$) بود. همچنین نتایج کارایی مطلوب ($d>0.99$)، دقت عالی ($NRMSE<0.1$) و ضریب تبیین بالا ($R^2>0.94$) نشان داد که می‌توان به نتایج شبیه‌سازی این مدل گیاهی اعتماد کرد. به همین دلیل، ۲۱ سناریوی آبیاری با استفاده از مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد تا براساس آن مناسب‌ترین مقدار و دور آبیاری به‌دست آید. براساس نتایج، دور آبیاری هفت روز و مقدار آبیاری ۳۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار به صورت آبیاری جوی و پشته انتها بسته به‌عنوان گزینه مناسب از نظر عملکرد (۱۳۲ تن در هکتار) و بهره‌وری آب (۴ کیلوگرم بر مترمکعب) تعیین شد. لیکن، این سناریو برای شرایط نرمال آبی است و اگر شرایط تنش آبی ایجاد گردد؛ دور آبیاری حداکثر نه روز و اعمال مقدار آب آبیاری حداقل ۲۱۰۰۰ مترمکعب در هکتار گزینه بهتری برای اجرا در مزارع کشت و صنعت دهخدا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آبیاری، بهره‌وری آب، مدل‌سازی گیاهی، مدیریت آبیاری

مقدمه

نیشکر یکی از گیاهان اساسی در ایران به شمار می‌رود که جایگاه بالایی در تأمین نیاز غذایی و صنایعی مانند خوراک دام، خمیر مایه و الکل‌سازی دارد. در ایران، واحدهای کشت و صنعت نیشکر در استان خوزستان متمرکز هستند و به‌دلیل وابستگی شدید آن‌ها به تأمین آب آبیاری، همگی در مجاورت رودخانه‌های دز و کارون احداث شده‌اند. از این رو، تغییرات دبی این رودخانه‌ها در سال‌های اخیر بر مقدار تولید این واحدها اثر زیادی داشته است. چون احتمال می‌رود در آینده این مشکل افزایش یابد، لزوم داشتن راهبرد لازم برای آبیاری این مزارع حیاتی است (Nouri et al., 2023). با توجه به شرایط آبیاری مزارع نیشکر، تغییر دور و مقدار آبیاری موثرترین روش برای مدیریت آب در مزارع به شمار می‌روند (آل‌کثیر، ۱۴۰۲). لیکن، اجرای سناریوهای مختلف برای تعیین حدود بهینه دور و مقدار آبیاری زمان‌بر و مشمول هزینه‌های بسیار است. برای رفع این مشکل، استفاده از مدل‌گیاهی مانند AquaCrop توسط بسیاری از محققان پیشنهاد شده است (Nasrolahi et al., 2024).

مشخصات گیاه نیشکر در دیتابیس مدل AquaCrop وجود دارد. به همین دلیل کاربرد آن برای شبیه‌سازی نیشکر از نظر محققان دور نمانده است. به‌عنوان مثال، در پژوهشی که در اندونزی انجام شد، عملکرد و بهره‌وری آب نیشکر تحت دو سیستم آبیاری قطره‌ای و سطحی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در صورت تغییر سیستم آبیاری به قطره‌ای، عملکرد بین ۸-۷ درصد و بهره‌وری آب بین ۱۶-۱۲ درصد افزایش خواهد یافت (Mawardhi et al., 2022).

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- دانشیار، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۴- دانشیار، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.golabi@scu.ac.ir)

نتایج شبیه‌سازی عملکرد نیشکر در کشور پاکستان با استفاده از مدل AquaCrop و تحت سناریوهای تغییر اقلیم در طول قرن ۲۱ نشان داد که به مرور عملکرد این گیاه زراعی کاهش خواهد یافت. به همین دلیل، اجرای سناریوهای آبیاری تحت شرایط اقلیمی آینده، نشان داد که با کاهش دور آبیاری و افزایش مقدار آن می‌توان بر کاهش عملکرد نیشکر غلبه کرد (Alvar-Beltran et al., 2021). در پژوهشی، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی همزمان رشد نیشکر با استفاده از سیستم‌های پایش و تصاویر ماهواره‌ای ارتقاء داده شد. بررسی عملکرد سیستم طراحی شده نشان داد که همبستگی ۰/۷ و خطای ۶/۴ درصد داشت. طراحان این سیستم گزارش کردند که این سیستم قادر به تعیین سوء مدیریت‌های آبیاری در مزرعه نیز می‌باشد (Wellens et al., 2021). در داخل کشور نیز محققان مختلفی به بررسی عملکرد نیشکر در کشت و صنعت‌های داخل کشور با استفاده از این مدل گیاهی پرداخته‌اند. گلابی و ناصری (۱۳۹۴) به ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد نیشکر در مزرعه تحقیقاتی شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی پرداختند. نتایج این محققان نشان داد که ضریب تبیین بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برابر با ۰/۹۷ به‌دست آمد که بیانگر قابلیت خوب مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد نیشکر بود. حق‌نظری و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی مدل AquaCrop تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و کود در واحد امیرکبیر پرداختند. این محققان سه سطح آبیاری به همراه سه سطح تأمین کود نیتروژن را در دو سال زراعی مورد شبیه‌سازی قرار دادند. نتایج این محققان نشان داد که آماره‌ی R^2 در دو سال مورد مطالعه بیشتر از ۰/۹۶ بود. به همین دلیل، این محققان مدل AquaCrop را ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی عملکرد نیشکر گزارش کردند. عابدین‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) سناریوهای تغییر تاریخ کاشت و کاهش مصرف آب با ایجاد تنش آبی ۸۰-۴۰ درصد تخلیه رطوبتی خاک را در واحد نیشکر امیرکبیر با استفاده از مدل AquaCrop بررسی کردند. این محققان ابتدا مدل AquaCrop را ارزیابی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب تبیین در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی بیشتر از ۰/۹۸ بود. پس از آن، سناریوهای مد نظر را اجرا کرده و گزارش کردند که در صورت کاهش مصرف آب به ۱۷۱۰۰ مترمکعب در هکتار، عملکرد نیشکر به ۴۲/۲۷ کاهش خواهد یافت و در این صورت ۳۶۰۰ مترمکعب در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود. این محققان این سناریو را به‌عنوان گزینه برتر پیشنهاد کردند. مرادیان وفایی و همکاران (۱۴۰۱) به پیش‌بینی عملکرد نیشکر تحت مدیریت‌های مختلف مزرعه با استفاده از مدل AquaCrop پرداختند. این محققان روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای به همراه کاربرد مالچ و تأمین کود نیتروژن را بر عملکرد نیشکر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که در صورت تغییر آبیاری مرسوم به آبیاری قطره‌ای و اجرای ۸۰ درصد پوشش مالچ و افزایش کود نیتروژن به ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، می‌توان بهترین نتیجه را از نظر عملکرد به‌دست آورد. محمدی معله‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل AquaCrop به برنامه‌ریزی آبیاری براساس توزیع رطوبت خاک در واحد دعبل خزایی در جنوب اهواز پرداختند. در واقع این محققان براساس شرایط آبیاری در مزرعه، رطوبت خاک را به‌عنوان معیار زمان آبیاری در نظر گرفتند. این محققان گزارش کردند که دقت مدل AquaCrop برای تعیین زمان آبیاری بهتر از رطوبت خاک بود.

براساس مرور منابع، تاکنون مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی دور و مقادیر مختلف آبیاری در مزارع نیشکر داخل کشور مورد استفاده قرار نگرفته است. از طرفی، مطابق بیان مسأله، خلاء نتایج در این زمینه برای اجرا در مزارع نیشکر داخل کشور احساس می‌شد؛ بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی مدل AquaCrop و تعیین دور و مقدار بهینه آبیاری محصول نیشکر در کشت و صنعت دهخدا در استان خوزستان، به‌عنوان مطالعه موردی، انجام گردید.

مواد و روش‌ها

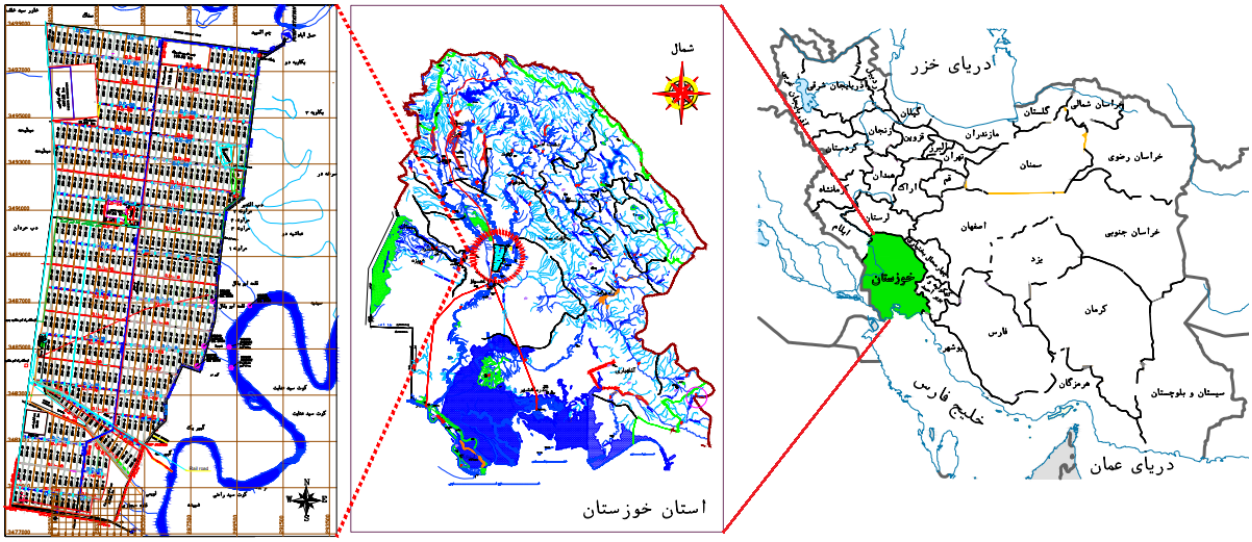
آزمایش مزرعه‌ای

این پژوهش در کشت و صنعت نیشکر دهخدا در حد فاصل راه آهن اهواز- اندیمشک تا رودخانه کارون در شمال شهرستان اهواز طی سه سال متوالی (۱۳۹۹-۱۴۰۱) انجام گردید (شکل ۱). برای برداشت اطلاعات مزرعه‌ای، ۱۰ مزرعه با مجموع مساحت ۲۳۰ هکتار انتخاب گردید و شرایط آزمایش از جمله تعیین مقدار و دور آبیاری، مدیریت مزرعه، برداشت محصول و تعیین عملکرد در طول زمان مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. روش آبیاری جوی و پشته انتها بسته بوده و مقدار آب آبیاری و حداکثر دور آبیاری در طول زمان آزمایش برای مزارع مورد مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقدار آب آبیاری در طول سه سال مطالعه کاهش و دور آبیاری افزایش یافته است. علت آن کاهش آورد رودخانه دز در موقعیت آبگیر کشت و صنعت دهخدا در دو سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱، به دلیل کاهش نزولات جوی در بالادست و نهایتاً کاهش حقابه شرکت دهخدا بود. در انتهای فصل رشد در هر سه سال، گیاه نیشکر توسط دستگاه‌های دروگر نیشکر (هاروستر[1]) برداشت گردید و عملکرد آن توسط باسکول تعیین شد. برای تعیین بهره‌وری آب از رابطه‌ی (۱) استفاده گردید:

$$WP = \frac{Y}{I} \qquad (۱)$$

در این رابطه، WP بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد (کیلوگرم) و I مقدار آب آبیاری (مترمکعب) است.

1 Harvester



شکل ۱- موقعیت کشت و صنعت دهخدا در استان خوزستان و ایران

جدول ۱- مجموع مقادیر آب آبیاری (مترمکعب در هکتار) و متوسط دور آبیاری (روز) در طول سه سال مورد مطالعه

شماره مزرعه	۱۳۹۹		۱۴۰۰		۱۴۰۱	
	مقدار آبیاری	متوسط دور آبیاری	مقدار آبیاری	متوسط دور آبیاری	مقدار آبیاری	متوسط دور آبیاری
۱	۲۷۵۳۹	۹	۲۴۸۵۶	۱۷	۱۸۳۳۵	۱۸
۲	۳۳۱۰۱	۸	۱۹۸۴۶	۱۴	۲۴۷۴۲	۱۸
۳	۳۰۴۳۷	۹	۲۱۲۰۷	۱۳	۱۸۴۱۱	۱۷
۴	۳۴۳۰۶	۹	۲۱۵۹۵	۱۲	۱۸۵۰۹	۲۶
۵	۲۸۷۹۳	۹	۲۴۴۱۶	۱۲	۲۰۱۵۴	۱۸
۶	۳۱۲۹۰	۹	۱۶۷۹۷	۱۵	۲۰۹۱۵	۱۷
۷	۳۷۷۲۶	۸	۱۸۰۳۳	۱۳	۲۳۳۱۱	۲۰
۸	۳۰۱۰۱	۸	۲۱۱۴۷	۱۶	۲۰۵۵۳	۱۷
۹	۳۴۳۵۸	۸	۲۳۸۱۷	۱۵	۲۳۰۹۸	۱۶
۱۰	۳۵۹۸۹	۸	۲۳۷۸۴	۱۳	۲۲۳۲۱	۱۷

مدل AquaCrop

مدل AquaCrop از تبخیر- تعرق (ET) محاسبه شده (رابطه ۲) با فرض تفکیک آن استفاده می‌کند. تفکیک این مولفه به دو جز تبخیر (E) و تعرق (Tr) سبب می‌شود تا مصرف غیر تولیدی آب از معادلات حذف شود (رابطه ۳).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y\left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (۲)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (۳)$$

در این روابط، Yx و Ya به‌ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ETx و ETa به‌ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر- تعرق گیاه، و Ky ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر- تعرق که در آن، Ks و Kc به‌ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (۴)$$

در این رابطه، CC0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) می‌باشد. با تعیین تعرق و تبخیر- تعرق، بیوماس خشک نیز طبق رابطه (۵) برآورد می‌گردد:

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}}\right] \quad (۵)$$

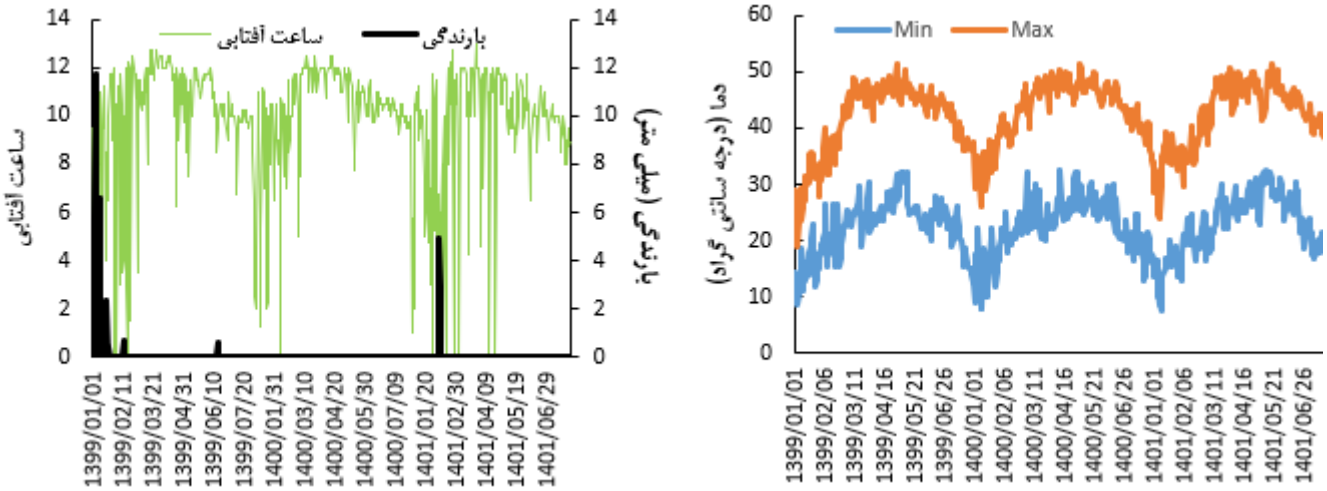
در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب نرمال شده، ETo تبخیر- تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از

ماده‌ی خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$Y = B \times HI \quad (۶)$$

در این رابطه، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس خشک است. در این مدل، شدت تنش آبی (Ks) مؤثر بر توسعه پوشش تاج (CC)، هدایت روزنه‌ای (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به‌وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش یافته و به تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد.

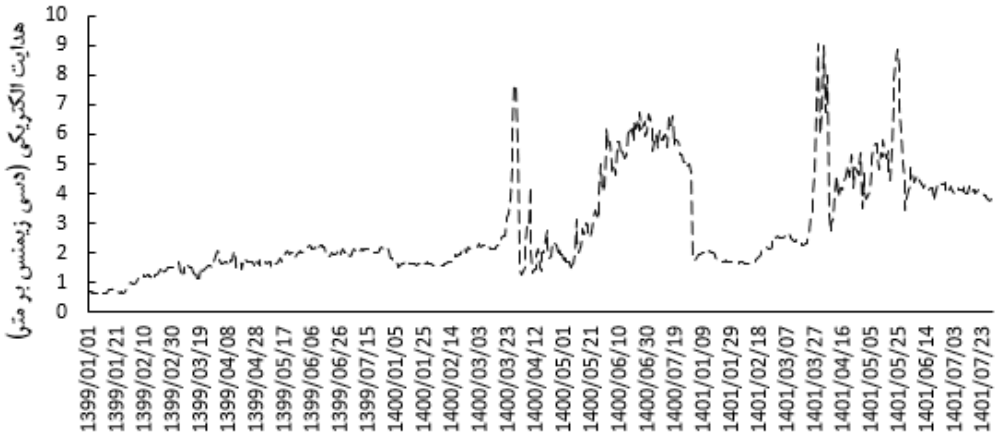
فایل‌های ورودی مدل AquaCrop به چهار دسته‌ی اقلیم، گیاه، مدیریت مزرعه و خاک تقسیم می‌شوند. فایل اقلیم دربرگیرنده چهار فایل دما، تبخیر و تعرق مرجع (ET0)، بارش، میزان دی‌اکسید کربن می‌باشد. در این تحقیق برای تولید فایل اقلیم، از آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک اهواز در طول سال‌های تحت مطالعه استفاده شد (شکل ۲). برای تولید فایل مربوط به گیاه، کاربر باید ابتدا نوع گیاه (باغی، زراعی، علوفه‌ای، دانه‌ای و ...) را مشخص کرده و سپس پارامترهای مورد نیاز را برای مدل آماده کند. فایل مدیریت مزرعه شامل عملیات مدیریت زراعی از جمله آبیاری است (Raes et al., 2023). در این فایل مقدار آب آبیاری مطابق اطلاعات برداشت شده از مزرعه وارد گردید (جدول ۱). متوسط هدایت الکتریکی آب آبیاری در بازه‌ی مورد مطالعه براساس شکل (۳) به مدل AquaCrop وارد شد. فایل خاک شامل مشخصات خاک مزارع از جمله بافت خاک، تعداد لایه، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم است که مطابق جدول (۲) به مدل AquaCrop معرفی شد. پارامترهای گیاهی به دو بخش تقسیم می‌شوند. بخش اول پارامترهایی هستند که با زمان، مدیریت، موقعیت جغرافیایی و اقلیم تغییرات قابل توجهی ندارند و تقریباً ثابت هستند و اصطلاحاً این پارامترها Conservative هستند. محققین برای برخی گیاهان از جمله نیشکر، با استفاده از داده‌های مطمئن و تکرار حداقل سه سال، در مناطق مختلف با اقلیم‌های متفاوت، پارامترهای ثابت مربوط به گیاه را معرفی کرده‌اند. این پارامترها در دیتابیس مدل AquaCrop قرار داده شده است. بخش دوم پارامترهای گیاهی شامل سایر پارامترهای مورد نیاز شبیه‌سازی است که تحت تأثیر عواملی از جمله اقلیم و زمان متغیر هستند. این پارامترها باید توسط کاربر و در دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی مشخص گردند. به این نوع پارامترها Non-conservative یا مدیریتی می‌گویند (Nasrolahi et al., 2024). بدین منظور، پارامترهای گیاهی ثابت براساس دیتابیس مدل و سایر پارامترها براساس اطلاعات برداشت شده از مزرعه و طی دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی تعیین گردیدند. مقادیر این پارامترها در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲- پارامترهای هواشناسی در طول دوره مطالعه

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش (اعداد میانگین مزارع مورد مطالعه است)

عمق خاک (cm)	وزن مخصوص ظاهری خاک (g/cm^3)	رطوبت حجمی در حد ظرفیت زراعی (%)	رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی (%)	بافت خاک	pH	هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)
۰-۲۰	۱/۳۶	۲۶/۳	۱۴/۳	لوم	۷/۸	۳/۳
۲۰-۴۰	۱/۴۲	۲۷	۱۴/۴	لوم	۷/۸	۳/۵
۴۰-۶۰	۱/۴۲	۲۸/۶	۱۴/۴	لوم	۷/۹	۳/۶



شکل ۳- تغییرات شوری آب رودخانه دز در طول دوره مطالعه

جدول ۳- مقادیر پارامترهای گیاهی مدل AquaCrop

ردیف	نام پارامتر	واحد	مقدار اولیه	مقدار نهایی	توضیحات
۱	دمای پایه (Tmin)	درجه سانتی‌گراد	۹	۹	پیش‌فرض
۲	دمای حداکثر (Tmax)	درجه سانتی‌گراد	۳۲	۳۲	پیش‌فرض
۳	پوشش گیاهی اولیه (CCo)	درصد	۰/۹۱	۱/۰	واسنجی
۴	بیشترین پوشش گیاهی (CCmax)	درصد	۹۵	۹۵	پیش‌فرض
۵	ضریب افزایش پوشش گیاهی (CGC)	درصد بر روز	۱۲/۵	۹/۳	واسنجی
۶	ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC)	درصد بر روز	۷/۶	۸/۱	واسنجی
۷	بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)	گرم بر مترمربع	۳۰	۳۰	پیش‌فرض
۸	شاخص برداشت (HI)	–	۳۵	۳۵	پیش‌فرض
۹	حداکثر عمق ریشه (Zr_{max})	متر	۱/۸	۱/۵	واسنجی
۱۰	حداکثر ضریب گیاهی (Kc_{Trx})	–	۱/۱	۱/۰	واسنجی
۱۱	حد آستانه بالا برای توسعه پوشش گیاهی (P_{upper})	–	۰/۲۵	۰/۳	واسنجی
۱۲	حد آستانه پایین برای توسعه پوشش گیاهی (P_{lower})	–	۰/۵۵	۰/۶	واسنجی
	ضریب شکل برای توسعه پوشش گیاهی (Shape-factor)	–	۳/۰	۳/۰	پیش‌فرض
۱۳	حد آستانه بالا برای بسته شدن روزنه (P_{upper})	–	۰/۵	۰/۶	واسنجی
	ضریب شکل برای بسته شدن روزنه (Shape-factor)	–	۳/۰	۳/۰	پیش‌فرض
۱۴	حد آستانه بالا برای زوال پوشش گیاهی (P_{lower})	–	۰/۶	۰/۵	واسنجی
۱۵	ضریب شکل برای زوال پوشش گیاهی (Shape-factor)	–	۳/۰	۳/۰	پیش‌فرض

ارزیابی مدل و ارائه سناریو

ارزیابی مدل AquaCrop طی دو مرحله‌ی واسنجی و صحت-سنجی انجام شد. در مرحله‌ی واسنجی از داده‌های دو سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ و برای صحت‌سنجی از داده‌های سال ۱۴۰۱ استفاده گردید. برای ارزیابی مدل AquaCrop، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به‌ترتیب در روابط ۷ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۷)$$

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

$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)}{n} \quad (۹)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۰)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2} \quad (۱۱)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum(P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum(P_i - \overline{P})^2 \sum(O_i - \overline{O})^2} \quad (۱۲)$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. پس از ارزیابی مدل AquaCrop در دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی، ۲۱ سناریوی آبیاری با استفاده از مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. این سناریوها، با تغییرات دور آبیاری از ۷ تا ۱۳ روز و مقدار آب آبیاری از ۲۱۰۰۰ تا ۳۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار تعیین شدند. بازه‌ی انتخاب شده برای دور و مقدار آبیاری براساس حدود اعمال شده در کشت و صنعت دهخدا در شرایط نرمال در طول دهه‌ی گذشته بود. همچنین، چون برای تولید اقتصادی در این کشت و صنعت، نیاز به تأمین مقدار آب آبیاری در محدوده‌ی اشاره شده و اعمال دور آبیاری حداکثر ۱۳ روز است؛ سناریوهای مد نظر در این بازه انتخاب گردیدند. مشخصات این سناریوها در جدول (۴) نشان داده شده است. هدف این شبیه‌سازی، مقایسه نتایج با شرایط مزرعه و تعیین دور و مقدار بهینه آبیاری بود.

جدول ٤- مشخصات سناریوهای آبیاری براساس دور آبیاری (روز) و مقدار آبیاری (مترمکعب در هکتار)

نام سناریو	دور آبیاری	مقدار آبیاری	نام سناریو	دور آبیاری	مقدار آبیاری
P1I1	۷	۲۱۰۰۰	P4I3	۱۰	۳۳۰۰۰
P1I2	۷	۲۸۰۰۰	P5I1	۱۱	۲۱۰۰۰
P1I3	۷	۳۳۰۰۰	P5I2	۱۱	۲۸۰۰۰
P2I1	۸	۲۱۰۰۰	P5I3	۱۱	۳۳۰۰۰
P2I2	۸	۲۸۰۰۰	P6I1	۱۲	۲۱۰۰۰
P2I3	۸	۳۳۰۰۰	P6I2	۱۲	۲۸۰۰۰
P3I1	۹	۲۱۰۰۰	P6I3	۱۲	۳۳۰۰۰
P3I2	۹	۲۸۰۰۰	P7I1	۱۳	۲۱۰۰۰
P3I3	۹	۳۳۰۰۰	P7I2	۱۳	۲۸۰۰۰
P4I1	۱۰	۲۱۰۰۰	P7I3	۱۳	۳۳۰۰۰
P4I2	۱۰	۲۸۰۰۰	–	–	–

نتایج و بحث

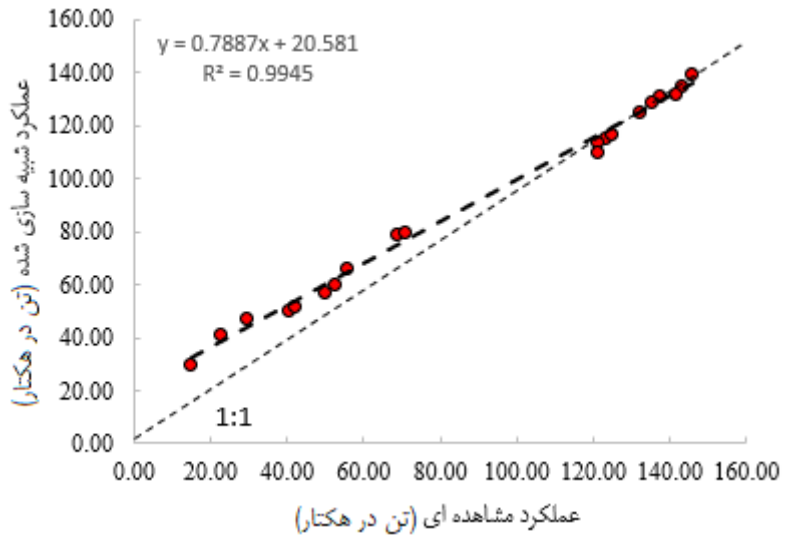
نتایج ارزیابی مدل AquaCrop در مرحله‌ی واسنجی در جدول (۵) نشان داده شده است. واسنجی برای هر دو سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ انجام گردید و پارامترهای ورودی مدل AquaCrop آنقدر تغییر داده شدند که نتایج شبیه‌سازی شده به مقادیر واقعی نزدیک باشد. برای ارزیابی نزدیک بودن نتایج مدل AquaCrop در این مرحله، از آماره-های معرفی شده در روابط (۷) تا (۱۲) استفاده شد. علت آن، آماده-سازی پارامترهای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی هر سناریوی آبیاری در مقادیر و دورهای مختلف آبیاری بود. براساس آماره‌ی MBE، مدل AquaCrop در مرحله‌ی واسنجی برای تعیین عملکرد

و بهره‌وری آب دچار خطای کم‌برآوردی گردید. این نتایج در دو شکل (۴) و (۵) نیز مشاهده می‌شود. البته، با توجه به اینکه نتایج دو سال برای مرحله‌ی واسنجی استفاده شد، تغییرات شرایط مزرعه‌ای در نتایج این مدل نیز مشاهده گردید. در سال نخست که آب آبیاری به اندازه‌ی کافی در اختیار بود، نتایج مدل AquaCrop و مزرعه نزدیک‌تر بودند. پراکنش نقاط نشان داده شده در سمت راست دو نمودار (شکل‌های ۴ و ۵)، نشان‌دهنده‌ی کم‌برآوردی در نتایج است؛ در حالی‌که پراکنش نقاط در سمت چپ که حاصل داده‌های سال دوم است، بالاتر از خط ۱:۱ قرار داشت. در سال دوم که تنش آبی بیشتری در مزارع مشاهده گردید، مدل دارای خطای بیش‌برآوردی شد. لیکن، به‌دلیل مقادیر پایین عملکرد و بهره‌وری آب در سال دوم، اثر آن بر نتایج مرحله‌ی واسنجی محسوس نبود. سایر محققان نیز نشان دادند که مدل AquaCrop در شرایط تنش آبی دچار خطای بیشتری نسبت به شرایط نرمال می‌گردد (Katerji et al., 2013; Nasrolahi et al., 2024). با این وجود، نتایج دو آماره‌ی RMSE و NRMSE نشان داد که این مدل خطای قابل قبولی داشت و دقت آن نیز در محدوده‌ی عالی بود. براساس دو آماره‌ی EF و d، کارایی مدل AquaCrop مطلوب بود. نتایج ضریب تبیین (R^2) نیز نشان داد که در مرحله‌ی واسنجی، مدل AquaCrop توانست بیش از ۹۹ درصد تغییرات را همپوشانی کند. معادله خطوط نشان داده شده در دو شکل (۴) و (۵) نشان داد که به‌دلیل وجود عرض از مبدا بزرگ‌تر از صفر، حتی اگر عملکرد و بهره‌وری آب در شرایط واقعی صفر باشد، مدل AquaCrop، مقادیری برای شرایط وجود حداقل آب در مزرعه شبیه‌سازی می‌کند. این خطا که در مطالعات سایر محققان نیز بدان اشاره شده است (گلابی و ناصری، ۱۳۹۴؛ احمدی و همکاران، ۱۴۰۰)؛ مشکلی در شبیه‌سازی ایجاد نمی‌کند.

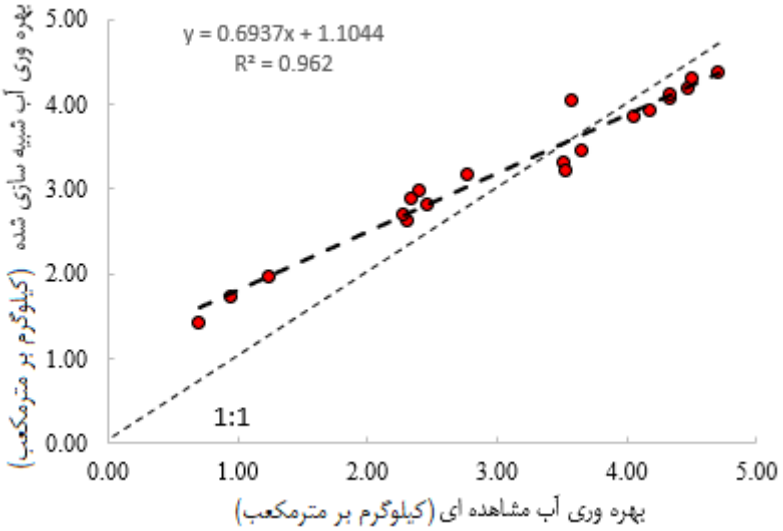
مقایسه‌ی عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله‌ی صحت‌سنجی در شکل (۶) نشان داده شده است. در همه‌ی تیمارها، عملکرد شبیه‌سازی شده بیشتر از مقدار واقعی است. با توجه به اینکه در سال سوم نیز تنش آبی وجود داشت، این نتایج مشابه سال دوم بود. بیشترین و کمترین عملکرد به‌ترتیب ۱۰ و ۳۵ تن در هکتار به‌دست آمد. اختلاف نتایج شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده عملکرد محصول به‌طور متوسط ۴/۱ تن در هکتار بود که نسبت به بازه‌ی تغییرات عملکرد قابل قبول است. نتایج شبیه‌سازی بهره‌وری آب نیز در شکل (۷) مشاهده می‌شود. خطای بیش‌برآوردی در این پارامتر مشاهده می‌شود که ناشی از بیش‌برآوردی عملکرد است. اختلاف عملکرد و بهره‌وری آب در تیمارهای با مقادیر کمتر، نسبتاً زیاد بود. این ناشی از خطای این مدل در شرایط تنش آبی است که توسط بسط‌دهندگان آن و سایر محققان گزارش شده است (Nasrolahi et al., 2024).

جدول ۵- مقادیر آماره‌ها برای صفات مورد مطالعه در مرحله واسنجی

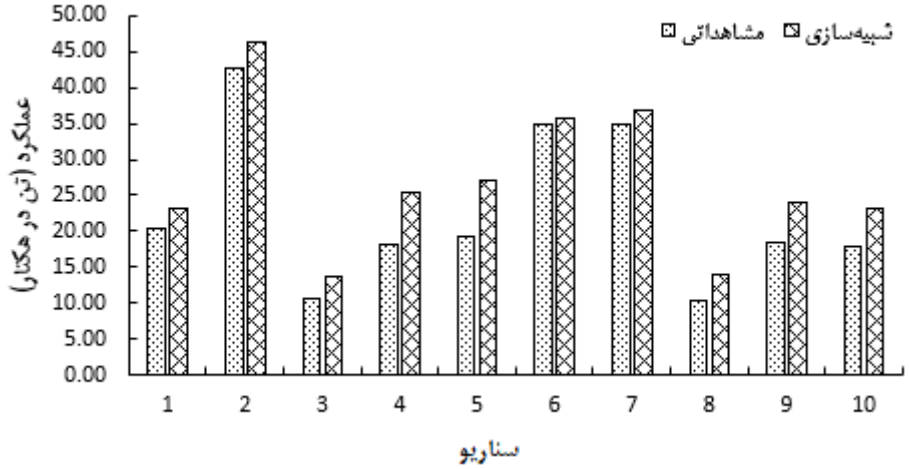
صفات	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d	R^2
عملکرد (تن در هکتار)	-۳/۹	۵/۶	۰/۰۶	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۹
بهره‌وری آب (کیلوگرم در مترمکعب)	-۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۰۵	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۹



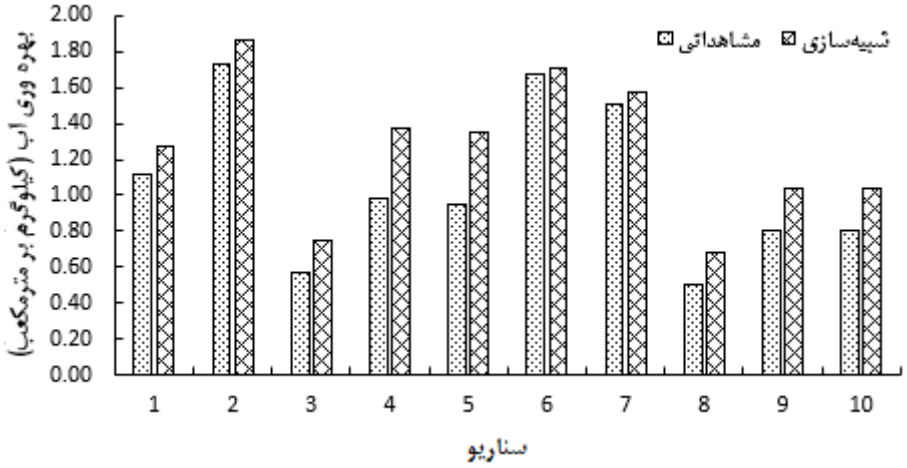
شکل ٤- نتایج همبستگی عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی



شکل ۵- نتایج همبستگی بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله واسنجی



شکل ٦- مقایسه‌ی عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی

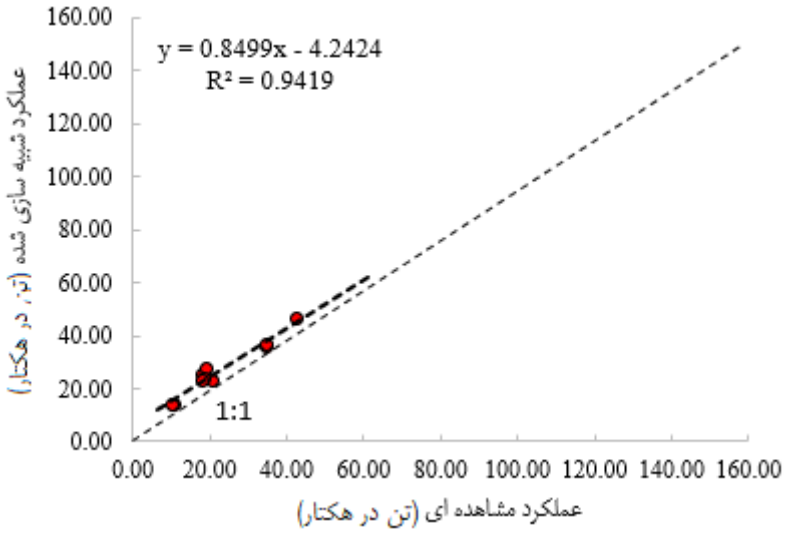


شکل ۷- مقایسه‌ی بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی

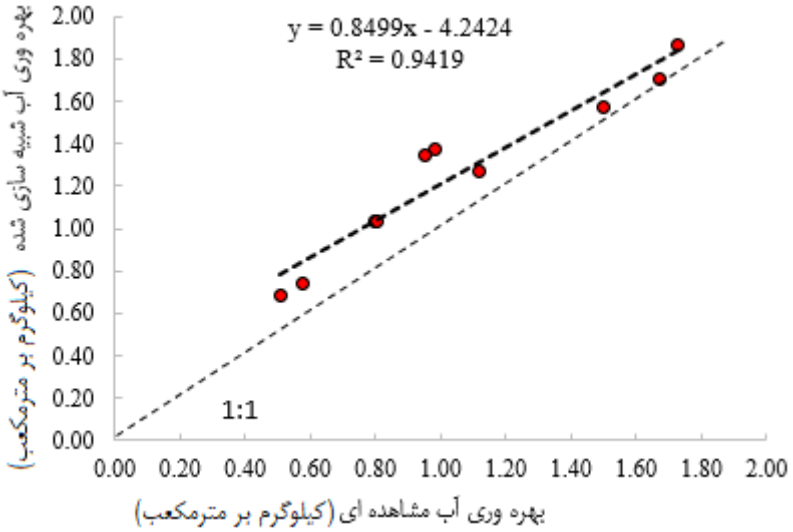
بیش‌برآوردی این مدل در مرحله‌ی صحت‌سنجی با مشاهده‌ی آماره‌ی MBE قابل بیان است. مقدار آماره‌ی RMSE برای عملکرد و بهره‌وری آب در حد قابل قبول بود، لیکن نسبت به مرحله‌ی واسنجی، خطای مدل افزایش یافت (جدول ۶). آماره‌ی NRMSE در محدوده‌ی خوب قرار داشت که نسبت به مرحله‌ی واسنجی، دقت مدل نیز اندکی کاهش نشان داد. تغییرات کارایی مدل نسبت به واسنجی در مقادیر دو آماره‌ی EF و d نیز قابل مشهود است. لیکن، براساس کلیه نتایج، می‌توان به دقت، خطا و کارایی این مدل در مرحله‌ی صحت-سنجی اعتماد کرد. ضریب تبیین برای هر دو پارامتر در این مرحله برابر با ۰/۹۴ بود که نشان‌دهنده‌ی توانایی مدل AquaCrop در پیش‌بینی ۹۴ درصد تغییرات این دو صفت است (شکل‌های ۸ و ۹).

جدول ٦-مقادیر آماره‌ها برای صفات مورد مطالعه در مرحله صحت‌سنجی

صفات	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d	R^2
عملکرد (تن در هکتار)	۱/۴	۴/۶	۰/۱۹	۰/۸۳	۰/۹۹	۰/۹۴
بهره‌وری آب (کیلوگرم در مترمکعب)	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۶۹	۰/۵۸	۰/۹۴

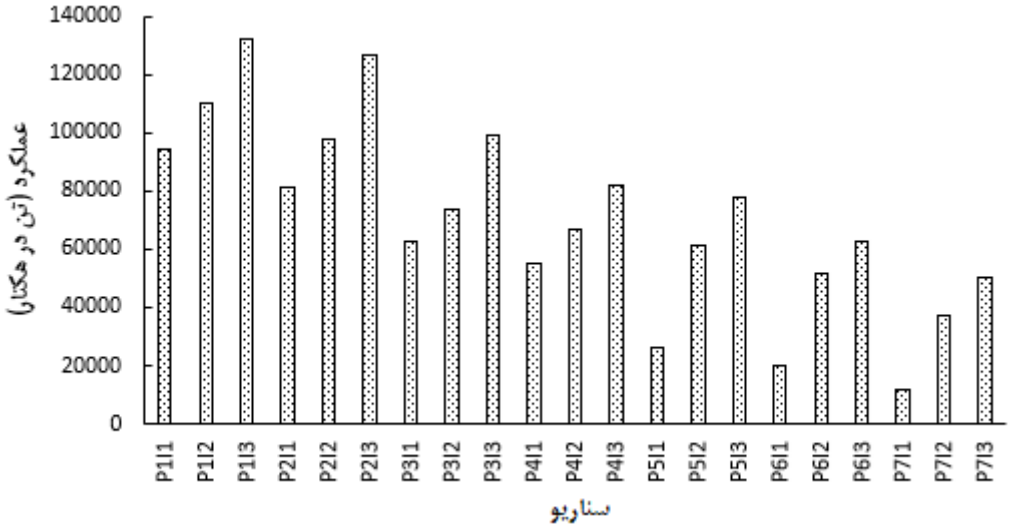


شکل ۸- نتایج همبستگی عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

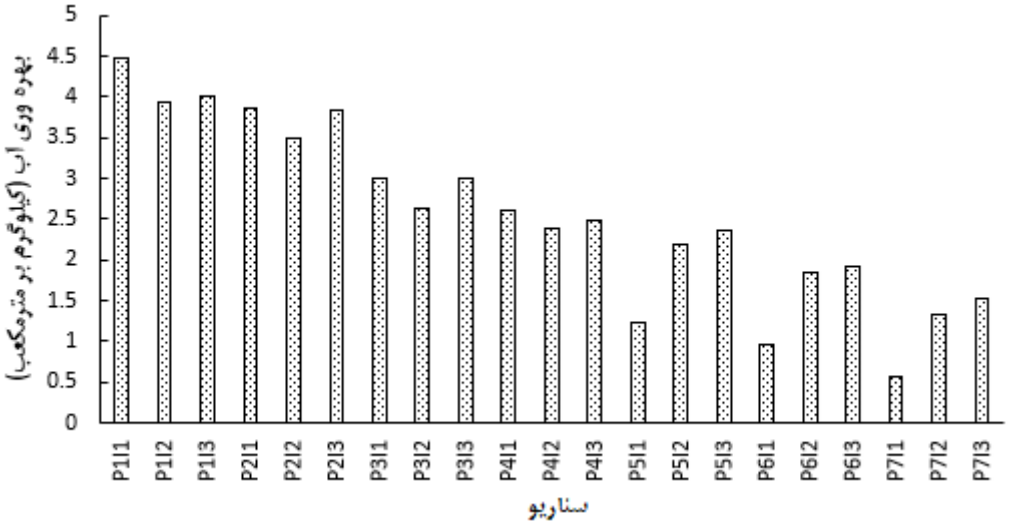


شکل ۹- نتایج همبستگی بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

نتایج سناریوهای اجرا شده، پس از ارزیابی مدل AquaCrop، در دو شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. در این پژوهش، نتایج تغییرات عملکرد محصول نشان داد که با افزایش دور آبیاری و ثابت نگه‌داشتن مقدار آب آبیاری، مقدار پارامتر عملکرد روند کاهشی داشت (شکل ۱۰). به‌صورت متقابل، کاهش مقدار آب آبیاری، در دور ثابت، نیز بر کاهش عملکرد محسوس بود. بالاترین عملکرد در دو سناریوی P1I3 (دور آبیاری هفت روز و مقدار آب آبیاری ۳۳۰۰۰ مترمکعب بر هکتار) و P2I3 (دور آبیاری نه روز و مقدار آب آبیاری ۳۳۰۰۰ مترمکعب) به‌دست آمد. مقایسه‌ی سناریوی P2I3 با دو سناریوی P1I2 و P1I1 نشان داد که اثر مقدار آب آبیاری بر عملکرد نسبت به دور آبیاری بیشتر است. این نتایج در مطالعات مزرعه‌ای نیز به‌دست آمد (شکل‌های ۴، ۶ و ۸). لیکن، با افزایش دور آبیاری، اثر مقدار آب آبیاری کمتر گردید. به‌منظور تعیین سناریوی بهینه، مقادیر بهره‌وری آب برای سناریوهای اجرا شده تعیین گردید (شکل ۱۱). به‌طور کلی، با کاهش دور آب آبیاری، بهره‌وری نیز کمتر شد. چون عملکرد با شدت بیشتری نسبت به مقدار آب آبیاری کاهش یافت. این شرایط برای مقدار آب آبیاری مشاهده نشد. در واقع، در یک دور آبیاری ثابت، کاهش مقدار آب به ۲۱۰۰۰ مترمکعب در هکتار، بهره‌وری نزدیکی نسبت به مقدار ۳۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار داشت. با توجه به دو شکل (۱۰) و (۱۱)، سناریوی P1I3 (دور هفت روز و مقدار آبیاری ۳۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار)، با عملکرد ۱۳۲ تن در هکتار و بهره‌وری آب ۴ کیلوگرم بر مترمکعب، به‌عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود، لیکن در شرایط کمبود آب، مانند سال سوم، می‌توان از سناریوی P3I1 (دور نه روز و مقدار آبیاری ۲۱۰۰۰ مترمکعب در هکتار) استفاده کرد. عملکرد در این سناریو ۵۵ درصد کمتر از P1I3 است، ولی بهره‌وری آب به مقدار سه نزدیک است. در سایر سناریوها، عملکرد کمتر از P3I1 به‌دست خواهد آمد و بهره‌وری آب نیز کمتر از سه می‌شود. مقایسه‌ی این نتایج با شرایط واقعی در سال سوم نشان داد که اعمال دور آبیاری زیاد، با همین مقدار آب، سبب کاهش شدید عملکرد و بهره‌وری آب می‌گردد. براساس نتایج به‌دست آمده از مزرعه (شکل‌های ۴، ۶ و ۸)، به نظر بهتر است در شرایط کمبود آب، دور آبیاری بیشتر از نه روز نشود. گرچه می‌توان مقدار آب آبیاری را تا ۲۱۰۰۰ مترمکعب در هکتار کاهش داد. سناریوسازی با مدل AquaCrop برای مزارع نیشکر توسط سایر محققان نیز انجام شده است. این روش به منظور غلبه بر اثرات تغییر اقلیم در آینده (Alvar-Beltran et al., 2021) و همزمان‌سازی مدیریت آبیاری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (Wellens et al., 2021) بوده است. در این تحقیقات، در ایالت پنجاب، دور آبیاری هفت روزه و مقدار ۲۹۰ متر مکعب در هر آبیاری برای تأمین نیاز آبی نیشکر پیشنهاد شده است. در حالی که در برخی شرایط که تحت تأثیر تغییر اقلیم نیز می‌باشد، دور آبیاری ۱۰ روزه و مقدار ۴۱۰ مترمکعب در هر آبیاری برای نیشکر توصیه شده است. مقایسه این نتایج با پژوهش حاضر نشان می‌دهد که افزایش دور آبیاری بیشتر از ده روز، توسط سایر محققان نیز پیشنهاد نشده است. همچنین، دور آبیاری هفت روز از نظر سایر محققان گزینه مناسبی برای شرایط در دسترس بودن آب آبیاری می‌باشد که مطابق با نتایج تحقیق حاضر است.



شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی عملکرد نیشکر تحت دور و مقادیر مختلف آبیاری (P1 الی P7 به‌ترتیب دورهای آبیاری ۷ الی ۱۳ روز و I1، I2 و I3 مقادیر آبیاری ۲۱۰۰۰، ۲۸۰۰۰ و ۳۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار هستند)



شکل ۱۱- نتایج شبیه‌سازی بهره‌وری آب نیشکر تحت دور و مقادیر مختلف آبیاری (P1 الی P7 به‌ترتیب دورهای آبیاری ۷ الی ۱۳ روز و I1، I2 و I3 مقادیر آبیاری ۲۱۰۰۰، ۲۸۰۰۰ و ۳۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار هستند)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا به ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مزارع واقعی در کشت و صنعت دهخدا در استان خوزستان پرداخته شد. نتایج نشان داد که این مدل توانایی لازم برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب برای شرایط مختلف تأمین آب آبیاری در دورهای مختلف را داشت. به همین دلیل، از این مدل برای شبیه-سازی ۲۱ سناریوی آبیاری استفاده شد تا براساس نتایج به دست آمده، بهینه‌ترین حالت برای مزارع کشت و صنعت دهخدا تعیین گردد. براساس نتایج به دست آمده، در صورت پیاده‌سازی سناریوی P1I3 (دور هفت روز و مقدار آبیاری ۳۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار)، بالاترین عملکرد نسبت به سایر سناریوها به دست می‌آید. لیکن در برخی شرایط، امکان کاهش مقدار آب یا افزایش دور آبیاری ضروری است؛ به همین دلیل می‌توان سناریوی از سناریوی P3I1 (دور نه روز و مقدار آبیاری ۲۱۰۰۰ مترمکعب در هکتار) را پیاده‌سازی کرد. گرچه در این سناریو، عملکرد تا ۵۰ درصد نسبت به P1I3 کاهش خواهد یافت، لیکن نسبت به سایر سناریوها عملکرد و بهره‌وری آب بالاتری خواهد داشت.

تشکر و قدردانی

این مقاله از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز استخراج شده است. بدینوسیله ازحمایت های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.WI1402.281) تشکر و قدردانی می گردد.

منابع

احمدی، م.، قنبرپوری، م. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۰. مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. مدیریت آب در کشاورزی. ۸ (۱): ۳۰-۱۵.

آل کثیر، م. ۱۴۰۲. بررسی اثرات استراتژی های مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد واریته¬های مختلف نیشکر (مطالعه موردی شرکت کشت و صنعت نیشکر دهخدا)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.

حق‌نظری، ف.، قنبریان، م.، شینی‌دشتگل، ع. و رناصری، و. ۱۳۹۹. ارزیابی عملکرد نیشکر تحت تأثیر سطوح آبیاری و کود با استفاده از مدل AquaCrop، تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک، ۲ (۱-۳): ۹۶-۸۷.

عابدین‌زاده، م.، بخشنده، ع.، اندرزیان، ب.، جعفری، س. و مرادی تلاوت، م. ۱۴۰۰، بهینه‌سازی و مدیریت مصرف آب در نیشکر با استفاده از مدل شبیه‌سازی آکواکراپ (مطالعه موردی کشت صنعت امیرکبیر، خوزستان). علوم آب و خاک. ۲۵ (۳) :۹۵-۱۱۴.

گلابی، م.، ناصری، ع. ع. ۱۳۹۴، ارزیابی مدل AquaCrop در پیش-بینی عملکرد نیشکر و شوری پروفیل خاک تحت تنش شوری، تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶ (۴): ۶۹۴-۶۸۵.

محمدی معله‌زاده، ج.، ناصری، ع. ع. و هوشمند، ع. ۱۴۰۱، برنامه-ریزی دور آبیاری گیاه نیشکر و توزیع رطوبت خاک با مدل AquaCrop، آبیاری و زهکشی، ۶ (۱۶): ۱۲۵۴-۱۲۴۵.

مرادیان‌وفایی، س. م.، سلطانی محمدی، ا.، ناصری، ع. ع. و وان اوئل، پ. ۱۴۰۱. پیش‌بینی عملکرد نیشکر تحت مدیریت‌های مختلف مزرعه با استفاده از مدل AquaCrop (مطالعه موردی: کشت و صنعت سلمان فارسی)، آبیاری و زهکشی، ۱۶ (۱-۹۱): ۵۳-۳۹.

Alvar-Beltran, J., Heureux, A., Soldan, R., Manzanas, R., Khan, B. and Dalla Marta, A., 2021, Assessing the impact of climate change on wheat and sugarcane with the AquaCrop model along the Indus River Basin, Pakistan, Agricultural Water Management. 253, p.106909.

Katerji, N., Campi, P. and Mastrorilli, M. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. Agricultural Water Management. 130: 14-26.

Mawardhi, A. D. 2022. Smulating water balance and crop yield for sugarcane plantation in pasuruan using aquacrop model. OISAA Journal of Indonesia Emas. 5(2): 120-127.

Nasrolahi, Al. H., Ahmadee, M. and Rustum, R. 2024. Sensitivity Analysis of AquaCrop Model for Winter Wheat in Different Water Supply Conditions, Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 150(2), 04024002. doi: https://doi.org/10.1061/JIDEDH.IRENG-10099.

Nouri, S. Z., Nasrolahi, A. and Ahmadee, M. 2023. Comparison of Virtual Water Amount and Sugarcane Consumption in Water Shortage Conditions of Khuzestan Region, Iran. Water Harvesting Research. 6(2): 203-212.

Raes, D., Studuto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E., 2023. AquaCrop Reference Manual, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Wellens, J., Stasolla, M., Sall, M. T., Tychon, B. and Neyt, X., 2021, Assimilation of Sentinel-1 Change Detection in the Aquacrop Model: Case of Sugarcane, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.2, Vol. 18, Jun.-Jul. 2024, p. 281-293

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۲، جلد ۱۸، خرداد - تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۹۳-۲۸۱

Simulation of Sugarcane Yield and Water Productivity under Farm Condition and Determination of Appropriate Irrigation Amount and Interval using AquaCrop

Masoud AlKasir[1], Mona Golabi*[2], Abd Ali Naseri[3], Mohammad Albaji[4]
Recived: Apr.20, 2024 Accepted: May.24, 2024

Abstract

Crop modeling is a widely used method for simulating the crop yield under different irrigation managements. Due that, in the study, a water-driven crop model, AquaCrop, was used to simulate and determine the optimal irrigation quantity and interval in Dehkhoda Sugarcane Cultivation and Industry Group (DH) farms. The data were collected from DH farms during 2019-2021. The total area under study was 230 hectares. The evaluation results showed that the AquaCrop model had an acceptable error for simulating yield (RMSE<5.6 ton ha^{-1}) and water productivity (RMSE<2.2 kg m^{-3}). In addition, the results of favorable efficiency (d>0.99), excellent accuracy (NRMSE<0.1) and high determination of coefficient (R2>0.94) showed that the simulation results of AquaCrop can be trusted. For this reason, 21 irrigation scenarios were simulated using the AquaCrop model in order to obtain the most appropriate irrigation amount and interval. Based on the results, close-end furrow irrigation with interval of seven days and the amount of 33000 m^3 ha^{-1} was determined as a suitable option in terms of yield (132 ton ha^{-1}) and water productivity (4 kg m^{-3}). However, this scenario is for normal water conditions and if water stress conditions are created; a maximum of nine days for irrigation interval and at least 21000 m^3 ha^{-1} is a better option for implementation in DH farms.

Key words: Crop Modeling, Irrigation Management, Irrigation Scheduling, Water Productivity

1- M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Associate professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3- Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4- Associate professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding author Email: m.golabi@scu.ac.ir)