نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۵، جلد ۱۴، آذر - دی ۱۳۹۹، ص. ۱۸۰۲-۱۷۸۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 14, Oct.-Nov. 2020, p. 1789-1802

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی اثر تاریخ کشت بر برنامه‌ریزی آبیاری تناوبی در اراضی شالیزاری با استفاده از مدل SWAP (مطالعه موردی: دشت آستانه- کوچصفهان)

مریم نوابیان[1*]، مهرناز حیدریان[2]، مجید وظیفه دوست[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۲

چکیده

با توجه به کمبود منابع آب، افزایش بهره‌وری آب در کشت گیاه استراتژیک و پرمصرف برنج اهمیت به‌سزایی دارد. تاریخ نشاءکاری و برنامه‌ریزی آبیاری از عوامل مهم در افزایش بهره‌وری آب مورد استفاده در کشت برنج محسوب می‌شوند. هدف از این پژوهش بررسی اثر تاریخ نشاءکاری بر برنامه‌ریزی آبیاری و عملکرد برنج و ارائه یک روش مناسب برای تعیین تاریخ نشاءکاری مناسب با توجه به شرایط آب و هوایی و خصوصیات مزرعه است. برای این منظور مدل SWAP در محدوده دشت آستانه-کوچصفهان با داده‌های سه مزرعه برنج رقم هاشمی واسنجی و در دو مزرعه دیگر اعتبارسنجی شد. شاخص‌های ضریب تبیین بیش‌تر از ۰/۹۸ و RMSE-N کم‌تر از ۱۰ درصد نشان داد، مدل از دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی برخوردار است. مدیریت مناسب آبیاری تناوبی در تاریخ‌های نشاءکاری ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ اردیبهشت ماه با استفاده از مدل به دست آمد. نتایج نشان داد تاریخ نشاءکاری اول اردیبهشت در سال مورد بررسی (۱۳۹۰) به دلیل بهره‌وری آب بر حسب آب آبیاری مناسب‌ترین تاریخ نشاءکاری بود. در این تاریخ نشاءکاری تخلیه مجاز رطوبتی ۹ درصد و دوره تناوب آبیاری ۷ روزه پشنهاد شد. همچنین در این دشت بیشترین و کم‌ترین درصد تخلیه مجاز رطوبتی در خاک رسی و رسی لومی شنی به ترتیب ۱۵ و ۲ درصد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تخلیه مجاز رطوبتی، تاریخ نشاءکاری، دوره تناوب

مقدمه

آبیاری از عوامل کلیدی مهم در تعیین میزان سودآوری تولید برنج محسوب می‌شود و مدیریت بهینه آن در مراحل مختلف رشد با توجه به نیاز گیاه اهمیت دارد. مراحل رشد گیاه برنج با تاکید بر فیزیولوژی و تغذیه به سه دوره‌ی رویشی (مرحله جوانه‌زنی تا ظهور، مرحله گیاهچه‌ای، پنجه‌زنی، مرحله رشد ساقه)، زایشی (تشکیل خوشه، خوشه‌دهی، گل دادن) و رسیدگی فیزیولوژیکی (شیری و خمیری شدن دانه) تقسیم‌بندی شده است (موسوی، ۱۳۸۷). دمای هوا از عوامل محیطی مهم بر عملکرد برنج محسوب می‌شود به طوری‌که دمای مناسب در مراحل رشد برنج مانند جوانه‌زنی، پنجه‌زنی، پر شدن دانه و رسیدگی فیزیولوژیکی نیز به ترتیب نیازمند دمای ۳۵-۲۰، ۳۲ و بیش از ۲۰ درجه سانتی‌گراد و دمای بهینه رسیدن دانه ۲۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد است (موسوی، ۱۳۸۷). دمای کم سبب ایجاد خسارت به بوته برنج و عوارضی نظیر جوانه زدن ناقص، کاهش رشد و تغییر رنگ نشاء، توقف یا کاهش ارتفاع یا تعداد پنجه، خروج پانیکول ناقص و غیرکامل، طولانی شدن دوره گل‌دهی، از بین رفتن خوشچه، رسیدن نامنظم، عقیمی و کاهش عملکرد می‌شود. از این‌رو انتخاب زمان کاشت مناسب می‌تواند شرایط دمایی و محیطی مناسب هر مرحله از رشد را فراهم آورده و دستیابی به حداکثر محصول موثر باشد.

برای تعیین تاریخ کاشت، تراکم بوته و آرایش کاشت مناسب برنج، آزمایشی در سال ۱۳۸۳ در استان لرستان بر روی رقم دم‌سیاه انجام شد. سه تاریخ نشاءکاری ۱۷ و ۲۴ فروردین و ۱۶ اردیبهشت بودند. نتایج نشان داد که با تاخیر در تاریخ کاشت، عملکرد بیولوژیکی افزایش و شاخص برداشت کاهش یافت (ثابتی و جعفرزاده، ۱۳۸۵). موکش و همکاران با بررسی اثر زمان کاشت ۲۵ ژوئن، ۱۰ و ۲۵ جولای بر عملکرد برنج باسماتی نشان داد که اگرچه تاریخ کشت

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان و عضو وابسته گروه آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان
۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان
(*- نویسنده مسئول: Email: Navabian@guilan.ac.ir)

زودتر (۲۵ ژوئن) باعث افزایش عملکرد می‌شود اما کیفیت برنج در کشت دیرهنگام (۲۵ جولای) بهبود می‌یابد (Mukesh et al., 2013). جالوتا و همکاران عملکرد و میزان صرفه‌جویی در آب آبیاری را در کشت برنج در دو تیمار تاریخ نشاءکاری (در سه سطح ۲۵ می، ۱۰ ژوئن و ۲۵ ژوئن) و برنامه آبیاری (در دو سطح آبیاری پس از دو روز زهکشی و آبیاری در مکش خاک ۱۶ کیلوپاسکال) مورد بررسی قرار دادند (Jalota et al., 2009). نتایج نشان داد که بهره‌وری آب در تاریخ نشاءکاری ۲۵ ژوئن (۴ تیر ماه)، ۱۷ درصد بیشتر از ۲۵ می (۴ خرداد ماه) بود. همچنین اثر متقابل تاریخ نشاءکاری و مدیریت آبیاری معنی‌دار نبوده و مدیریت آبیاری بر اساس آبیاری در زمان مکش خاک ۱۶ کیلوپاسکال اگرچه باعث صرفه‌جویی آب آبیاری حدود ۷۰۰ میلی‌متر شد. پژوهشی در مرکز تحقیقات دلتا میسوری به منظور برنامه‌ریزی آبیاری (تعیین دوره تناوب) با در نظر گرفتن دو سطح تخلیه مجاز رطوبتی شامل سطح یک (برنامه آبیاری ۱۰ میلی‌متر در شرایط ۱۲ میلی‌متر کمبود آب خاک) و سطح دو (برنامه آبیاری ۱۵ میلی‌متر در شرایط ۱۹ میلی‌متر کمبود آب خاک) در دو سال زراعی ۲۰۱۴-۲۰۱۳ انجام شد. نتایج نشان داد سطح تخلیه مجاز رطوبتی یک عملکرد بیشتری نسبت به سطح دو داشت (Vories et al., 2017). اعلایی بازکیایی و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی میدانی سه تاریخ کشت اول و بیست اردیبهشت و ده خرداد بر عملکرد برنج رقم هاشمی در رشت در سال‌های ۱۳۹۵و ۱۳۹۶ نشان دادند عملکرد زیستی برنج به ترتیب در اول و ۲۰ اردیبهشت و عملکرد دانه در ۲۰ اردیبهشت بیشتر بود.

مدل‌های شبیه‌ساز یک روش نوین برای بهینه‌سازی مدیریت و طراحی نهاده‌های مختلف کشاورزی و ارتقای بهره‌وری منابع به‌ویژه آب کاربرد گسترده‌ای دارند. از مدل‌های شبیه‌ساز می‌توان به عنوان طرح توسعه‌یافته‌ای از آزمایش‌های صحرایی برای غلبه بر محدودیت‌های زمانی و مالی استفاده کرد. مدل‌های WARM[1] (Confalonieri et al., 2005)، WOFOST[2] (Diepen et al., 1988)، AquaCrop[3] (Raes et al., 2009)، ORYZA2000 (Bouman et al., 2001) و SWAP[4] (Van Dam, 2000) از جمله مدل‌های شبیه‌ساز رشد و توسعه گیاهی هستند که در مطالعات مختلف برای گیاه برنج به‌کار گرفته شده‌اند (Confalonieri et al., 2006).

SWAP یک مدل شبیه‌ساز رشد گیاه است که توانایی شبیه‌سازی رشد گیاه و انتقال آب و املاح را در محیط‌های اشباع و غیراشباع دارد. در مدل SWAP برای شبیه‌سازی رشد گیاه از مدل WOFOST استفاده می‌شود. برای برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین میزان آب مورد نیاز در مراحل مختلف رشد محصول گزینه‌های مختلف شامل ۱- مشخص بودن تاریخ و عمق آب در هر آبیاری، ۲- مشخص بودن تاریخ و عمق آبیاری برای تعدادی از آبیاری‌ها و برآورد سایر تاریخ‌های بهینه آبیاری بر اساس یکی از معیارهای موجود در مدل و ۳- برآورد تاریخ بهینه آبیاری بر اساس یکی از معیارهای موجود در مدل از جمله نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل، میزان آب سهل‌الوصول و میزان کل آب قابل تخلیه توسط گیاه از خاک در مدل SWAP گنجانده شده است (شهیدی و احمدی، ۱۳۹۱).

سینگ و همکاران در هندوستان نشان دادند که مدل SWAP به‌دلیل قابلیت شبیه‌سازی حرکت آب و املاح و رشد محصول یک ابزار مدیریتی مناسب در برنامه‌ریزی و مدیریت آب در مزرعه است (Singh et al., 2006). در پژوهشی در موسسه تحقیقات برنج کشور، شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاه برنج با استفاده از مدل SWAP انجام شد. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (RMSE-N) مجموع ماده‌ی خشک برای واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۴/۴ و ۴/۲ و ضریب تبیین ۰/۹۷ محاسبه شد. نتایج نشان داد مدل SWAP برای شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاه برنج در مدیریت‌های مختلف آبیاری گیلان قابل توصیه است (امیری و همکاران، ۱۳۸۶). نوابیان و همکاران (۱۳۹۰) در پژوهشی از مدل SWAP برای شبیه‌سازی مراحل مختلف رشد گیاه برنج و از مدل بهینه‌سازی برای تعیین عمق و دوره تناوب آبیاری مراحل مختلف رشد استفاده کردند. مقادیر بهینه برنامه آبیاری تناوبی در شوری ۰/۷۵ دسی‌زیمنس بر متردر دوره تناوب آبیاری هشت روز و عمق آب آبیاری ۵۲، ۳۰، ۴۰ و ۱۲ میلی‌متر به‌ترتیب در مراحل رویشی، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدن بدست آمدند. نتایج تحلیل حساسیت مدل SWAP در پژوهش تابعی و همکاران (۱۳۹۴) نیز نشان داد که مدل به عمق آب آبیاری دارای حساسیت زیاد و بارندگی و شوری آب آبیاری دارای حساسیت متوسط می‌باشد. جنوبی و همکاران در غرب استان اصفهان طی پژوهشی با بررسی مدل SWAP در سه مدیریت آبیاری شامل دو سطح آبیاری غرقاب با ارتفاع آب ۳/۵ و ۲/۲ سانتی‌متر و آبیاری تر و خشک بین ۱/۵-۰ سانتی‌متر و هشت رقم برنج گزارش نمودند که بهره‌وری به میزان ۶۱ درصد در همه ارقام برنج در شرایط ۵۰ درصد تنش آبی افزایش یافت (Jonubi et al., 2018).

تغییر الگوی بارش (بابایی فینی و همکاران، ۱۳۹۳) و روند افزایشی دمای هوا (کریمی و همکاران، ۱۳۹۷) در استان گیلان، منجر به توصیه تغییر تقویم نشاءکاری برنج شده‌است، از سوی دیگر انتخاب تاریخ بهینه نشاءکاری نیازمند بررسی اثر آن بر تمام مراحل رشد و عملکرد گیاه می‌باشد که به دلیل محدودیت آزمایش‌های مزرعه‌ای، مدل شبیه‌ساز SWAP می‌تواند در تعیین تاریخ نشاء ابزار مفیدی باشد. از این رو هدف از این پژوهش علاوه بر ارزیابی دقت

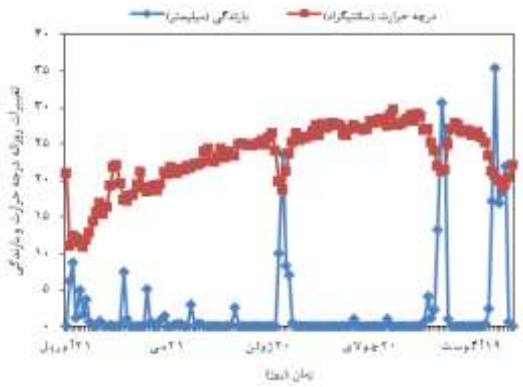
1- Water Accounting Rice Model
2- World Food Studies
3- A crop water productivity simulation model
4- Soil, Water, Atmosphere and Plant

مدل در مقیاس مزرعه، بررسی اثر تاریخ نشاءکاری بر برنامه‌ریزی آبیاری و عملکرد برنج با استفاده از مدل SWAP در نظر گرفته شد.

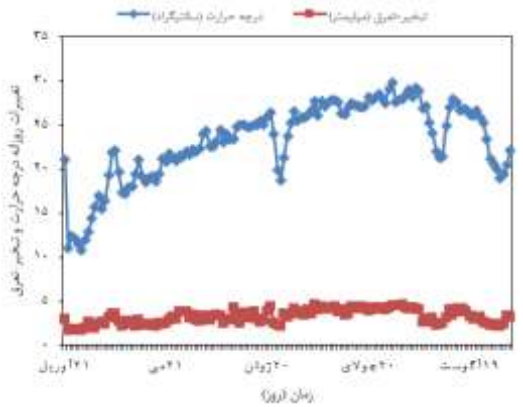
مواد و روش‌ها

آشنایی با منطقه مورد مطالعه

دشت آستانه-کوچصفهان در استان گیلان و در محدوده بین طول‌های شرقی ۴۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱۱ دقیقه و بین عرض‌های شمالی ۳۶ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه واقع شده است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، ۱۳۹۲). دشت آستانه-کوچصفهان در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود قرار دارد و رودخانه سفیدرود عمده‌ترین منبع آبیاری اراضی شالیزاری آن به‌شمار می‌رود. تغییرات دما، بارش و تبخیر-تعرق در سال ۱۳۹۰ (سال مورد مطالعه) در نمودارهای (۱) و (۲) نشان داده شده است.



نمودار ۱- تغییرات روزانه دمای هوا نسبت به بارش در سال زراعی ۱۳۹۰



نمودار .Error! No text of specified style in document**۲- تغییرات روزانه دمای هوا نسبت به تبخیر-تعرق در سال زراعی ۱۳۹۰**

واسنجی مدل شبیه‌ساز SWAP

گام نخست در شبیه‌سازی توسط مدل، واسنجی آن برای شرایط منطقه و گیاه مورد نظر است. برای واسنجی منطقه‌ای مدل SWAP از داده‌های مزرعه یک، دو و سه استفاده شد. مزارع مورد نظر بر اساس داده‌های گیاهی موجود در شالیزارهای دشت آستانه-کوچصفهان در سال ۱۳۹۰، انتخاب و اطلاعات گیاهی از مطالعات سازمان فضایی ایران (۲۰۱۴) استخراج شد که در این مطالعه اطلاعات عملکرد، تاریخ برداشت محصول، تاریخ نشاءکاری، شیوه و مقدار آبیاری به صورت پرسش‌نامه‌ای و ارتفاع گیاه و شاخص سطح برگ با اندازه‌گیری در مراحل مختلف رشد تعیین شده بود. شکل (۱) محدوده مورد مطالعه و موقعیت مزارع را نشان می‌دهد. مشخصات مزارع، شامل موقعیت جغرافیایی، اطلاعات پروفیل خاک، سطح ایستابی و اطلاعات کیفی آب رودخانه سفید رود در جدول (۱) آمده است. تاریخ کشت گیاه برنج در مزارع مورد استفاده در واسنجی و اعتبارسنجی بین ۱۰ تا ۱۵ اردیبهشت ماه بود.

شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی دشت آستانه-کوچصفهان

اطلاعات هواشناسی مورد نیاز مدل

برای شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاه برنج توسط مدل SWAP شرایط مرزی بالادست (سطح خاک) به‌صورت تبخیر-تعرق گیاه برنج انتخاب شد که به روش پنمن –مانتیث محاسبه و اطلاعات مورد نیاز محاسبه آن شامل دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، بارندگی، تشعشع خورشیدی، تبخیر از تشت و سرعت باد از داده‌های سال ۱۳۹۰ از ایستگاه‌های سینوپتیک کیاشهر، کشاورزی رشت و لاهیجان استخراج شد.

اطلاعات خاک

اطلاعات خاک مورد نیاز شامل درصد اجزای معدنی لایه‌های پروفیل خاک و شوری خاک است که برای تعیین مشخصات لایه اول از اطلاعات موسسه تحقیقات برنج استان گیلان (دواتگر ،۱۳۹۳) و برای تعیین مشخصات لایه دوم خاک از نرم‌افزار HWSD (FAO, 2012) استفاده شد. پارامترهای توابع هیدرولیکی خاک شامل رطوبت باقی‌مانده (Θ_{res})، رطوبت اشباع خاک (Θ_s) ، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، پارامتر شکل α و n با استفاده از مدل RETC (Van Genuchten et al., 1991) از طریق درصد اجزای معدنی خاک، ماده آلی و جرم مخصوص ظاهری محاسبه شدند. بر اساس اطلاعات بافت خاک، در دشت مورد مطالعه شش بافت خاک رسی، رسی سیلتی، لومی رسی، لومی، لومی سیلتی و لومی رسی شنی غالب است که پس از اطمینان از دقت مدل SWAP، با اجرای مدل واسنجی شده در آن بافت خاک‌ها، اثر بافت خاک بر برنامه‌ریزی آبیاری در تاریخ کشت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

اطلاعات آبیاری و املاح خاک

مطابق با شرایط کشت برنج آبیاری سطحی انتخاب شد و عمق آب آبیاری به‌گونه‌ای برای مدل تعریف شد که مشابه اراضی شالیزاری شرایط غرقاب (۵ سانتی‌متر آب روی سطح خاک) برقرار باشد. مقادیر شوری بر حسب کل جامدات محلول (TDS) اولیه خاک در عمق ۳۰ سانتی‌متری (دواتگر ، ۱۳۹۳؛ FAO, 2012) و همچنین آب آبیاری، به مدل ارائه شد (جدول ۱).

اطلاعات فیزیولوژیکی گیاه برنج

پارامترهای دمای تجمعی، عمق توسعه ریشه و مراحل رشد بر اساس معادلات (۱ تا ۳) محاسبه شدند (Kroes and Van Dam, 2003). جداول (۲) و (۳) به ترتیب دمای تجمعی مراحل رشد و مرحله توسعه‌یافتگی محاسبه شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهند.

$$T_{sum,i} = \sum (T_{av} - T_b) \quad (۱)$$

$$z = z_0 + (z_x - z_0)\sqrt[n]{\frac{(t - t_0/2)}{(t_x - t_0/2)}} \quad (۲)$$

$$D_s^{j+1} = D_s^j + \frac{T_{eff}}{T_{sum,i}} \quad (۳)$$

که در آن $T_{sum,i}$ مجموع دمای مورد نیاز تا تکامل گیاه (سانتی‌گراد)، T_{av} میانگین و T_b درجه حرارت پایه که در درجات کم‌تر از آن، رشد گیاه متوقف می‌شود و برای برنج ۱۲ درجه سانتی‌گراد فرض می‌شود، j تعداد روز، D_s مرحله توسعه‌یافتگی، T_{eff} دمای موثر که به میانگین درجه حرارت روزانه برحسب درجه سانتی‌گراد وابسته است، z عمق موثر ریشه (متر)، z_0 عمق شخم (متر)، z_x حداکثر عمق موثر ریشه (متر)، t_0 زمان رسیدن گیاه (روز)، t_x زمان تا رسیدن به مرحله z_x، t زمان پس از کاشت و n فاکتور شکل است.

جدول ۱- اطلاعات خاک مزارع مورد مطالعه (برگرفته از گزارش موسسه تحقیقات برنج، ۱۳۹۰ و اطلاعات خاک فائو، ۲۰۱۲)

مزرعه	۱	۲	۳	٤	٥
طول جغرافیایی	۴۹° ۸۰'	۴۹° ۹۶'	۴۹° ۹۹'	۴۹° ۸۱'	۵۰° ۰۳'
عرض جغرافیایی	۳۷° ۲۵'	۳۷° ۲۴'	۳۷° ۲۸'	۳۷° ۲۲'	۳۷° ۲۴'
ایستگاه هواشناسی	لاهیجان	کشاورزی رشت	لاهیجان	لاهیجان	کیاشهر
سطح آب زیرزمینی (متر)	-۰/۹۶	-۲/۰۶	-۱/۴۶	-۲/۰۶	-۱/۴۶
کل جامدات محلول آب آبیاری (میلی‌گرم بر لیتر)	۷۸۰	۷۸۰	۷۸۰	۷۸۰	۷۸۰
کل جامدات محلول خاک (میلی‌گرم بر لیتر)	۴۳۰	۵۴۰	۵۷۰	۵۴۰	۲۳۷۰
بافت خاک	لومی	لومی	لومی سیلتی	لومی	لومی رسی
درصد شن	۳۴	۳۴	۲۴	۳۴	۲۱
درصد سیلت	۴۰	۴۰	۵۲	۴۰	۴۶
درصد رس	۲۶	۲۶	۲۴	۲۶	۳۳
جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۲۸	۱/۲۸	۱/۲۸	۱/۲۸	۱/۲۵
عمق خاک (سانتی‌متر)	۰-۱۵	۰-۱۵	۰-۱۵	۰-۱۵	۰-۱۵
بافت خاک	لومی رسی	لومی رسی	لومی رسی	لومی رسی	لومی رسی
	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶	۲۶
	۴۱	۴۱	۴۱	۴۱	۴۱
	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳	۳۳
جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۵
عمق خاک (سانتی‌متر)	۱۵-۳۰	۱۵-۳۰	۱۵-۳۰	۱۵-۳۰	۱۵-۳۰

جدول .Error! No text of specified style in document**- میانگین دمای تجمعی در مراحل مختلف رشد در مزارع مورد بررسی در تاریخ کاشت ۱۵ اردیبهشت**

دمای تجمعی از مرحله سبزینگی تا گلدهی (درجه سانتی‌گراد)	۱۱۵۱
دمای تجمعی از مرحله گلدهی تا رسیدگی (درجه سانتی‌گراد)	۳۴۲

جدول ۱- مقادیر مرحله۱ توسعه یافتگی ($D_ş$) در مراحل رشد محاسبه شده گیاه برنج بر اساس مراحل فیزیولوژیکی رشد برنج (آقاجانی، ۱۳۹۰)

مرحله رشد	استقرار	پنجه‌زنی	زایشی	رسیدگی	برداشت
مرحله توسعه‌یافتگی	۰	۰/۳۹	۰/۸۱	۱/۳۹	۱/۹۷

پارامترهای فیزیولوژی گیاهی شامل تقسیم‌بندی وزن خشک به اجزای چهارگانه گیاه، سرعت نسبی نگهداری تنفس اجزا (برگ، اندام ذخیره، ساقه و ریشه)، پارامترهای تابع جذب آب فدس و همکاران و پارامترهای جذب ماس و هافمن با توجه به پژوهش‌های پیشین کالینفری و همکاران و آقاجانی (۱۳۹۶) که مشابه فیزیولوژی برنج هاشمی و اقلیم استان گیلان بودند، تعیین شدند (Confalonieri et al., 2006; Maas and Hoffman, 1977; Feddes et al., 1978;). پارامترهای گیاهی حساس مدل بر اساس پژوهش‌های پیشین کالینفری و همکاران و آقاجانی (۱۳۹۶) و تحلیل حساسیت انتخاب شدند (Confalonieri et al., 2006). تحلیل حساسیت مدل با استفاده از معادله (۴) انجام شد (Liu et al., 2007).

$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{\overline{W}}}{\frac{\Delta P}{\overline{P}}} \quad (۴)$$

که در آن S_c ضریب حساسیت بدون بعد، ΔW اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، $\overline{W}$ متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، ΔP میزان اغتشاش پارامتر ورودی (در این پژوهش ۲۵ درصد در نظر گرفته شد) و $\overline{P}$ متوسط مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل می‌باشد.

مقادیر حساسیت مدل به پارامترهای مهم در جدول (۴) آمده‌است. مطابق با طبقه‌بندی ضریب حساسیت کنفالنیری و همکاران که مقادیر صفر، کم‌تر از ۰/۳، محدوده ۱/۵-۰/۳ و بیشتر از ۱/۵ را به

ترتیب بدون حساسیت، حساسیت کم، حساسیت متوسط و حساسیت زیاد اعلام می‌کند و بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای ضریب خاموشی برای هدایت نور مرئی[1] (K_{DIF})، ضریب خاموشی برای پخش نور مرئی[2] (K_{DIR})، حداکثر میزان همانندسازی دی‌اکسید کربن[3] (فاکتور تعیین‌کننده میزان کلروفیل در واحد سطح) (A_{MAX})، سطح ویژه برگ (SLA)، راندمان مصرف نور (EFF)، راندمان تبدیل به ساقه (CVS) و هدایت آبی اشباع لایه اول و دوم (KSAT) به‌عنوان پارامترهای حساس شناخته شدند (Confalonieri et al., 2006). این نتایج با مطالعه کنفالنیری و همکاران، در شمال ایتالیا و مطالعه آقاجانی در شبکه آبیاری سفیدرود گیلان (۱۳۹۶) مطابقت دارد (Confalonieri et al., 2009).

برای تعیین مقادیر پارامترهای حساس در مرحله واسنجی از ترکیب مدل SWAP و مدل بهینه‌سازی با هدف حداقل‌سازی اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی مدل و با روش حل مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شد (رابطه ۵). در فرآیند بهینه‌سازی، مدل الگوریتم ژنتیک پس از تولید تصادفی پارامترهای ذکر شده در دامنه تعریف شده برای هر پارامتر، مدل SWAP اجرا شد و نتایج فایل خروجی گیاهی مدل SWAP با مشاهدات صحرایی پارامتر شاخص سطح برگ مقایسه شد. به‌منظور واسنجی مدل SWAP از مقادیر مشاهداتی شاخص سطح برگ سه مزرعه برنج (یک، دو و سه) در سال ۱۳۹۰ در دشت آستانه-کوچصفهان استفاده شد. مقادیر ضرایب واسنجی در جدول (۵) نشان داده شده است.

$$MinY = 100\left(\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2 / n\right)^{0.5} / \bar{o} \quad (۵)$$

که در آن Y تابع هدف، P_i شاخص سطح برگ شبیه‌سازی، O_i شاخص سطح برگ مشاهداتی، n تعداد شاخص مشاهداتی و $\bar{O}$ میانگین مقادیر شاخص سطح برگ مشاهداتی می‌باشند.

شرایط مرزی پایین‌دست

شرایط مرزی پایین دست به‌صورت عمق آب زیرزمینی (جدول ۱) در نظر گرفته شد که بر اساس گزارش شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان در سال ۱۳۹۰ در مدل اعمال گردید (شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان، ۱۳۹۵).

اعتبارسنجی مدل SWAP

برای اعتبارسنجی مدل SWAP از مقادیر مشاهداتی شاخص سطح برگ مزارع چهار و پنج در سال ۱۳۹۰ در دشت آستانه- کوچصفهان استفاده شد و میانگین پارامترهای گیاهی تعیین شده در مرحله واسنجی در مدل SWAP وارد شد و پس از اعمال اطلاعات مزارع چهار و پنج اعتبار مدل مورد بررسی قرار گرفت. پس از اطمینان از توانایی مدل در شبیه‌سازی فرآیند رشد گیاه برنج در منطقه، برای بررسی اثر بافت خاک و تاریخ نشاءکاری بر برنامه‌ریزی آبیاری، مدل اعتبارسنجی شده برای بافت خاک‌های منطقه اجرا و نتایج آن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. برای تعیین برنامه آبیاری از تابع هدف حداکثرسازی بهره‌وری آب استفاده و پارامترهای عمق آب آبیاری و حداکثر تخلیه رطوبت به روش الگوریتم ژنتیک بهینه‌یابی شدند. قید حداکثر تخلیه مجاز رطوبت در محدوده صفر تا ۱۵ درصد و عمق آب آبیاری در مراحل استقرار، پنجه‌زنی، زایشی و رسیدگی به ترتیب ۵۰، ۴۰، ۳۰ و ۱۰ میلی‌متر با توجه به مقادیر عرف منطقه و مطالعات مهدوی و پورعزیزی (۱۳۸۲) و رضایی و نحوی (۱۳۸۲) انتخاب شدند. همچنین حداکثر عمق آبیاری قابل برنامه‌ریزی در طول دوره رشد ۴۵ سانتی‌متر بر اساس مطالعات رضایی (۱۳۹۴) در نظر گرفته شد.

ارزیابی مدل با شاخص‌های آماری

جهت ارزیابی آماری نتایج شبیه‌سازی شاخص سطح برگ از روابط (۶) تا (۱۲) شامل شاخص‌های ریشه میانگین خطای استاندارد (RMSE)، ریشه میانگین خطای استاندارد نرمال شده (RMSE-N)، انحراف معیار (SD)، ضریب تعیین (CD)، ضریب جرم باقیمانده (CRM)، میانگین خطای مطلق (MAE)، کارایی مدل (EF)و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد (Gauch et al., 2003).

$$RMSE-N = 100\left(\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2 / n\right)^{0.5} / \bar{o} \quad (۶)$$

$$RMSE = \left(\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2 / n\right)^{0.5} \quad (۷)$$

$$SD = \left(\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2 / n\right)^{0.5} \quad (۸)$$

$$CD = \sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2 / \sum_{i=1}^{n}(p_i - \bar{p})^2 \quad (۹)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^{n}|o_i - p_i| / n \quad (۱۰)$$

$$EF = \left(\sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2 - \sum_{i=1}^{n}(o_i - p_i)^2\right) / \sum_{i=1}^{n}(o_i - \bar{o})^2 \quad (۱۱)$$

1- Extinction Coefficient for Dirrect Vsible Light
2- Extinction Coefficient for Diffuse Vsible Light
3- Max. Leaf CO2 Assimilation Rate

جدول ٤- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل SWAP

پارامتر ورودی مدل	واحد	ضریب حساسیت در حالت ۲۵+ درصد	ضریب حساسیت در حالت ۲۵- درصد	متوسط ضریب حساسیت	درجه حساسیت
شاخص سطح برگ در مرحله جوانه‌زنی	m^2/m^2	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	بدون حساسیت
سطح ویژه برگ	ha/kg	۰/۴۰	۱/۷۱	۱/۰۶	متوسط
ضریب خاموشی برای پخش نور مرئی	-	۰/۴۳	۰/۲۹	۰/۳۶	متوسط
ضریب خاموشی برای هدایت نور مرئی	-	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۲	متوسط
راندمان مصرف نور	$kg/ha/hr/(Jm^2s)$	۰/۷۳	۱/۶۰	۱/۱۷	متوسط
حداکثر میزان همانندسازی دی‌اکسیدکربن	kg/ha/hr	۰/۲۳	۱/۸۵	۱/۰۴	متوسط
تبدیل ماده جذب شده به زیست توده –راندمان تبدیل به برگ	kg/kg	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳۰	کم
تبدیل ماده جذب شده به زیست توده – راندمان تبدیل به ریشه	kg/kg	۰/۰۹	۰/۲۷	۰/۱۸	کم
تبدیل ماده جذب شده به زیست توده –راندمان تبدیل به اندام ذخیره‌ای	kg/kg	۰/۱۶	۰/۴۲	۰/۲۹	کم
تبدیل ماده جذب شده به زیست توده – راندمان تبدیل به ساقه	kg/kg	۰/۴۹	۱/۱۱	۰/۸۰	متوسط
هدایت آبی اشباع خاک	cm/day	۰/۲۶	۰/۶۷	۰/۴۷	متوسط
سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک $(\alpha, n, \theta_{res}, \theta_{sat})$	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	بدون حساسیت
عمق آب آبیاری	m	۰/۳۴	۰/۶۶	۰/۵۰	متوسط
شوری خاک	mg/l	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۶	کم

جدول ۵- ضرایب واسنجی تخمین‌زده شده در پژوهش

پارامترها	*واحد*	*مزرعه ۱*	*مزرعه ۲*	*مزرعه ۳*	*میانگین*
هدایت آبی اشباع لایه اول خاک	cm/day	۲۱/۳۸	۲۲/۸۱	۱۲/۸۳	۱۹/۰۱
هدایت آبی اشباع لایه دوم خاک	cm/day	۲/۲۸	۸/۷۴	۳/۳۴	۴/۷۹
سطح ویژه برگ	ha/kg	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۲۵
ضریب خاموشی برای پخش نور مرئی	-	۰/۶۰۲۸۰	۰/۶۹۱۱۵	۰/۴۵۸۳۷	۰/۵۸۴۱۱
ضریب خاموشی برای هدایت نور مرئی	-	۰/۶۸۹۹۰	۰/۵۷۸۵۳	۰/۶۴۴۵۹	۰/۶۳۷۶۷
راندمان مصرف نور	$kg/ha/hr/(Jm^2s)$	۰/۵۲۱۱۲	۰/۶۰۸۱۴	۰/۳۶۰۴۷	۰/۴۹۶۵۸
حداکثر میزان همانندسازی دی‌اکسید کربن	kg/ha/hr	۴۶/۴۷۵	۴۲/۶۱۸	۴۸/۶۶۲	۴۵/۹۱۸
تبدیل ماده جذب شده به زیست توده – راندمان تبدیل به ساقه	kg/kg	۰/۶۶۲۰	۰/۵۵۷۹	۰/۸۱۲۲	۰/۶۷۷۴

$$R^2 = \left(\sum_{i=1}^{n} (o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p}) \right)^2 / \sum_{i=1}^{n} (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^{n} (p_i - \bar{p})^2 \quad (۱۲)$$

که در آن P_i شاخص سطح برگ شبیه‌سازی، O_i شاخص سطح برگ مشاهداتی، n تعداد شاخص مشاهداتی، $\bar{P}$ میانگین مقادیر شاخص شبیه‌سازی و $\bar{O}$ میانگین مقادیر شاخص مشاهداتی می‌باشند.

ضریب R^2 نشان‌دهنده چگونگی برازش، ضریب CD که با R^2 از نظر ماهیتی متفاوت است، نشان‌دهنده نسبت پراکندگی میان مقادیر اندازه‌گیری شده به پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی شده و مقدار MAE نشان‌دهنده دقت مدل است. RMSE مشخص می‌کند که چه مقدار از شبیه‌سازی‌ها بالاتر یا پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد و هرچه این شاخص کم‌تر باشد نشانه شبیه‌سازی بهتر مدل است.

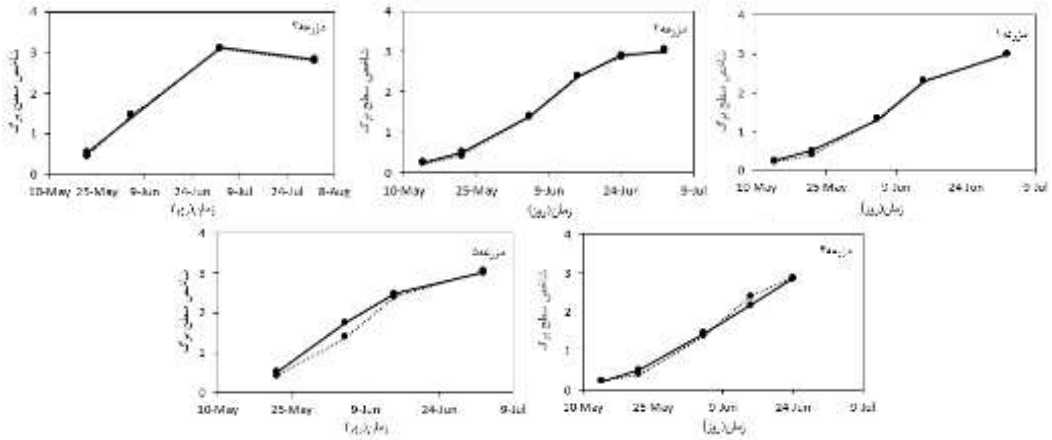
شاخص CRM تمایل مدل در برآورد بالاتر یا پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. هرگاه CRM منفی شود، نشان می‌دهد که مدل تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده دارد و برعکس. در نهایت EF مقدار شبیه‌سازی‌شده را با متوسط مقدار اندازه‌گیری‌شده مقایسه می‌کند. هرگاه EF منفی شود نشان می‌دهد که مقدار متوسط اندازه‌گیری‌شده برآورد بهتری نسبت به مقدار شبیه‌سازی‌شده می‌دهد. هرگاه SD>RMSE شود، نشان می‌دهد که مدل از کارایی مطلوبی برخوردار است. مقادیر RMSE-N در محدوده کم‌تر از ۱۰ درصد بیان کننده کارکرد عالی، در محدوده ۱۰ تا ۲۰ درد بیان کننده کارکرد بسیار خوب و در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد بیانگر کارکرد متوسط و در بیش‌تر از ۳۰ درصد نیز نشان‌دهنده ضعیف بودن کارکرد مدل است (Jamieson et al., 1991).

نتایج و بحث

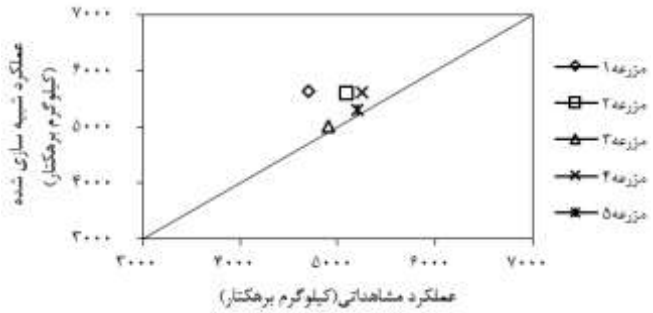
مدل شبیه‌ساز SWAP

مقادیر شبیه‌سازی مدل SWAP و مشاهداتی شاخص سطح برگ و عملکرد برنج رقم هاشمی، برای مزارع انتخاب شده در دشت آستانه-کوچصفهان در نمودار (۳) و (۴) نشان داده شده است. همچنین نتایج ارزیابی آماری واسنجی و اعتبارسنجی شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در جدول (۶) نشان داده شده است. متوسط نتایج آماری نشان داد که مدل SWAP با مقادیر RMSE-N، R^2، EF، MAE، CRM، CD، SD و RMSE به‌ترتیب برابر با ۳/۰۶۸، ۰/۹۹۸، ۰/۹۹۸، ۰/۰۱۹، ۰/۰۱۱، ۰/۹۶۱، ۱/۰۶۴ و ۰/۰۵۲ در واسنجی و برابر با ۹/۱۰۸، ۰/۹۸۶، ۰/۹۷۱، ۰/۰۷۲، ۰/۰۲۷، ۰/۸۷۷، ۰/۹۶۳ و ۰/۱۵۶ در مرحله اعتبارسنجی قادر به شبیه‌سازی شاخص سطح برگ برنج رقم هاشمی در دشت آستانه-کوچصفهان است. نتایج این جدول در راستای مطالعات موریاسی و همکاران و آقاجانی (۱۳۹۶) می‌باشد که نشان دادند مدل SWAP می‌تواند با ضریب تبیین بیش از ۰/۷۰ واسنجی و اعتبارسنجی را انجام دهد (Moriasi et al., 2007). نتایج نشان داد که ضریب RMSE برای همه مزارع واسنجی و اعتبارسنجی کم‌تر از مقدار انحراف معیار (SD) است و نشان از کارکرد مطلوب مدل در مزارع می‌باشد مقادیر مثبت EF نشان‌دهنده برآورد بهتر مقدار شبیه‌سازی شده نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده است. خطای مطلق MAE کم و نزدیک به صفر و مقدار ضریب پراکندگی CD بسیار نزدیک به یک بود و مقدار ضریب RMSE-N کم‌تر از ۱۰ بدست آمد که کارایی مطلوب مدل را نشان می‌دهد. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد که عملکرد مدل منطقی و قابل اعتماد است. همانطور که در نمودار (۴) مشخص است، تمایل مدل در شبیه‌سازی عملکرد برنج به سمت کم‌برآورد است و مزرعه یک کم‌ترین تطابق را با مقدار اندازه‌گیری شده داشت. اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده امکان دارد به‌دلیل تغییرات مکانی و زمانی و خطای اندازه‌گیری باشد که این امر در شرایط مزرعه اجتناب‌ناپذیر است.

برنامه مناسب آبیاری در هر یک از تاریخ‌های کشت با اجرای مدل اعتبارسنجی‌شده SWAP برای دستیابی به هدف حداکثرسازی بهره‌وری آب تعیین و مقادیر آب آبیاری و ماده خشک دانه از نتایج مدل استخراج شد. مقادیر تخلیه مجاز رطوبتی، دوره تناوب، عمق آب آبیاری مصرفی در کل دوره رشد و عملکرد واقعی برنج در تاریخ‌های کشت مورد بررسی، در جداول (۷) تا (۱۲) ارائه شده‌است. عملکرد ماده خشک با استفاده از مقدار شاخص برداشت در تاریخ‌های کشت اول، پنجم، دهم، پانزدهم، بیستم و بیست و پنجم به‌ترتیب برابر با ۰/۴۲، ۰/۴۳، ۰/۴۴، ۰/۴۲، ۰/۳۹ و ۰/۳۷ به عملکرد واقعی تبدیل شد (ثابتی و جعفرزاده ۱۳۸۵).



نمودار ۳- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی شاخص سطح برگ در مزارع معرف دشت آستانه-کوچصفهان (مزارع ۱و۲و۳ واسنجی، مزارع ٤ و٥ اعتبارسنجی)- نمودار شبیه‌سازی نقطه‌چین و مشاهداتی خط پیوسته است.



نمودار ٤- مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی عملکرد در مزارع دشت آستانه-کوچصفهان (مزارع ۱و۲و۳ واسنجی، ٤ و ٥ اعتبارسنجی)

جدول ٦- نتایج آماری دقت مدل SWAP در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ در مزارع معرف در دشت آستانه-کوچصفهان

مزرعه	RMSE-N (%)	R^2	EF	MAE (cm^2/cm^2)	CD	SD (cm^2/cm^2)	RMSE (cm^2/cm^2)
۱	۳/۵۵۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۰۲۰	۰/۹۵۶	۱/۰۴۷	۰/۰۵۲
۲	۲/۸۷۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۰۱۳	۰/۹۵۱	۱/۰۹۶	۰/۰۵۰
۳	۲/۷۶۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	۰/۰۲۳	۰/۹۷۴	۱/۰۴۹	۰/۰۵۵
میانگین	۳/۰۶۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۰۱۹	۰/۹۶۱	۱/۰۶۴	۰/۰۵۲
۴	۸/۲۱۷	۰/۹۹۱	۰/۹۸۶	۰/۰۱۶	۰/۸۸۵	۰/۹۹۰	۰/۱۱۹
۵	۹/۹۹۸	۰/۹۸۲	۰/۹۵۷	۰/۱۲۸	۰/۸۶۸	۰/۹۳۵	۰/۱۹۳
میانگین	۹/۱۰۸	۰/۹۸۶	۰/۹۷۱	۰/۰۷۲	۰/۸۷۷	۰/۹۶۳	۰/۱۵۶

روند تغییرات مقدار تخلیه مجاز آب خاک در تاریخ‌های کشت نشان داد در خاک‌هایی با بافت سنگین‌تر مقدار تخلیه مجاز رطوبتی بیشتر از خاک‌های با بافت سبک‌تر است و محدوده تفاوت میزان تخلیه مجاز آب خاک میان سنگین‌ترین و سبک‌ترین خاک مورد بررسی برای اول و ۲۵ اردیبهشت به ترتیب ۱۳ تا ۱۰ درصد بود. بنابراین مدیریت آب در تاریخ کشت اول اردیبهشت نیاز به دقت بیشتری‌دارد. بیش‌ترین و کم‌ترین تخلیه مجاز رطوبتی برای برنج در این دشت به ترتیب ۱۱/۴ و ۷/۳ درصد پیشنهاد شد که مربوط به تاریخ نشاءکاری ۲۵ و ۵ اردیبهشت ماه بود. تعیین مقدار بهینه تخلیه مجاز رطوبتی امکان افزایش ذخیره آب در خاک و کاهش تلفات آن از طریق نفوذ را فراهم می‌آورد. نتایج پژوهش داگالو و همکاران نیز نشان داد که امکان افزایش بهره‌وری آب از طریق کنترل نفوذعمقی در مزارع برنج غیرگل‌خراب حتی در خاک‌های درشت بافت وجود دارد (Dagalo et al., 2017).

همانطور که در نتایج مشخص است با تغییر تاریخ نشاء از اول اردیبهشت به ۲۵ اردیبهشت در شرایط دمایی و بارندگی در سال مورد مطالعه به میزان آب آبیاری مورد نیاز کل دوره رشد افزوده شد. با توجه به بافت خاک‌های در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی دشت آستانه- کوچصفهان بیش‌ترین و کم‌ترین دوره تناوب به ترتیب در تاریخ نشاء اول و ۵ اردیبهشت پیشنهاد شد و تفاوت محسوسی میان دوره تناوب آبیاری اول و ۲۵ اردیبهشت نبود. نتایج نشان داد دوره تناوب ۶ تا ۷ روز در بازه تاریخ نشاءکاری اول تا ۲۵ اردیبهشت برای دشت آستانه- کوچصفهان قابل توصیه است. آنچه مسلم است انتخاب صحیح دوره تناوب تحت تاثیر شرایط آب و هوایی و حداکثر تخلیه مجاز رطوبت از خاک می‌باشد. مطالعه آقاجانی و همکاران (۱۳۹۲) نیز نشان داد در دوره تناوب ثابت ۸ روز و دوره تناوب متغیر ۶، ۴، ۴ و ۷ روز در مراحل چهارگانه رشد برنج می تواند گزینه مناسبی برای آبیاری برنج رقم هاشمی در رشت باشد.

بررسی عملکرد واقعی برنج در تاریخ نشاءکارهای مورد بررسی نشان داد که بیش‌ترین عملکرد واقعی در تاریخ نشاء ۱۵ اردیبهشت و کم‌ترین آن در اول اردیبهشت روی داد هر چند بیش‌ترین عملکرد ماده خشک در ۲۵ اردیبهشت ماه مشاهده شد. مقایسه بهره‌وری آب آبیاری در تاریخ‌های نشاءکاری مورد بررسی نشان می‌دهد که با تغییر در تاریخ نشاءکاری از اول به سمت ۲۵ اردیبهشت از میزان بهره‌وری آب آبیاری کاسته شد. بنابراین اگر معیار انتخاب تاریخ نشاءکاری میزان بهره‌وری آب باشد تاریخ اول اردیبهشت در سال مورد بررسی قابل توصیه است این در حالی است که در این تاریخ نشاءکاری حداکثر عملکرد واقعی برنج ایجاد نمی‌شود.

جدول ۷- برنامه آبیاری و عملکرد برنج در اول اردیبهشت با شوری آب ۱۶۰۰ و خاک ۵۶۴ میلی‌گرم بر لیتر

بافت خاک	مقدارتخلیه مجاز آب (-)	مقدار آبیاری در طول فصل رشد (cm)	دوره تناوب (day)	عملکرد ماده خشک (kg/ha)	عملکرد واقعی (kg/ha)	بهره‌وری آب آبیاری(kg/m^3)
رسی	۰/۱۴۹	۳۶/۸	۶/۸	۸۸۶۶	۳۷۲۴	۱/۰۱
رسی سیلتی	۰/۱۴۵	۳۶/۰	۷/۱	۹۰۳۸	۳۷۹۶	۱/۰۵
لومی رسی	۰/۱۰۸	۳۷/۶	۷/۰	۱۰۳۸۳	۴۳۶۱	۱/۱۶
لومی	۰/۰۷۸	۳۲/۸	۶/۹	۱۱۰۱۵	۴۶۲۶	۱/۴۱
لومی سیلتی	/۰۵۳	۳۸/۱	۶/۹	۱۰۶۶۸	۴۴۸۱	۱/۱۸
لومی رسی شنی	۰/۰۱۸	۳۵/۴	۶/۶	۱۰۴۰۹	۴۳۷۲	۱/۲۳
میانگین	۰/۰۹۲	۳۶/۱۱	۶/۹	۱۰۰۶۳	۴۲۲۶	۱/۱۷

جدول ۸- برنامه آبیاری و عملکرد برنج در پنجم اردیبهشت با شوری آب ۱۶۰۰ و خاک ۵۶۴ میلی‌گرم بر لیتر

بافت خاک	مقدارتخلیه مجاز آب (-)	مقدار آبیاری در طول فصل رشد (cm)	دوره تناوب (day)	عملکرد ماده خشک (kg/ha)	عملکرد واقعی (kg/ha)	بهره‌وری آب آبیاری(kg/m3)
رسی	۰/۱۳۷	۴۰/۷	۵/۳	۹۰۰۴	۳۸۷۲	۰/۹۵
رسی سیلتی	۰/۰۹۹	۳۸/۷	۵/۶	۸۸۷۷	۳۸۱۷	۰/۹۹
لومی رسی	۰/۰۸۳	۴۰/۴	۶/۰	۱۰۶۸۸	۴۵۹۶	۱/۱۴
لومی	۰/۰۶۵	۳۵/۹	۶/۰	۱۱۴۸۱	۴۹۳۷	۱/۳۸
لومی سیلتی	۰/۰۴۳	۴۰/۹	۵/۶	۱۰۹۹۳	۴۷۲۷	۱/۱۶
لومی رسی شنی	۰/۰۱۳	۳۹/۶	۵/۳	۱۰۷۸۶	۴۶۳۸	۱/۱۷
میانگین	۰/۰۷۳	۳۹/۳۶	۵/۶	۱۰۳۰۴	۴۴۳۱	۱/۱۳

جدول ۹- برنامه آبیاری و عملکرد برنج در دهم اردیبهشت با شوری آب ۱۶۰۰ و خاک ۵۶۴ میلی‌گرم بر لیتر

بافت خاک	مقدارتخلیه مجاز آب (-)	مقدار آبیاری در طول فصل رشد (cm)	دوره تناوب (day)	عملکرد ماده خشک (kg/ha)	عملکرد واقعی (kg/ha)	بهره‌وری آب آبیاری(kg/m3)
رسی	۰/۱۵۰	۴۴/۳	۶/۵	۹۷۶۵	۴۲۹۷	۰/۹۷
رسی سیلتی	۰/۰۹۳	۴۳/۰	۶/۴	۹۴۲۱	۴۱۴۵	۰/۹۶
لومی رسی	۰/۰۸۴	۴۶/۶	۶/۴	۱۱۲۷۵	۴۹۶۱	۱/۰۶
لومی	۰/۱۰۳	۴۲/۸	۶/۵	۱۲۲۶۸	۵۳۹۸	۱/۲۶
لومی سیلتی	۰/۰۶۰	۴۶/۳	۶/۴	۱۱۷۲۸	۵۱۶۰	۱/۱۱
لومی رسی شنی	۰/۰۲۴	۴۴/۳	۶/۸	۱۱۵۶۸	۵۰۹۰	۱/۱۵
میانگین	۰/۰۸۵	۴۴/۵۵	۶/۵	۱۱۰۰۴	۴۸۴۱	۱/۰۸

جدول ۱۰- برنامه آبیاری و عملکرد برنج در پانزدهم اردیبهشت با شوری آب ۱۶۰۰ و خاک ۵۶۴ میلی‌گرم بر لیتر

بافت خاک	مقدارتخلیه مجاز آب (-)	مقدار آبیاری در طول فصل رشد (cm)	دوره تناوب (day)	عملکرد ماده خشک (kg/ha)	عملکرد واقعی (kg/ha)	بهره‌وری آب آبیاری(kg/m3)
رسی	۰/۱۴۸	۴۵/۹	۵/۹	۱۰۲۵۹	۴۳۰۹	۰/۹۴
رسی سیلتی	۰/۱۱۹	۴۳/۸	۶/۰	۱۰۳۲۷	۴۳۳۷	۰/۹۹
لومی رسی	۰/۱۰۰	۴۷/۳	۶/۱	۱۲۱۱۴	۵۰۸۸	۱/۰۸
لومی	۰/۰۷۸	۴۳/۰	۶/۱	۱۲۹۶۵	۵۴۴۵	۱/۲۷
لومی سیلتی	۰/۰۶۷	۴۸/۵	۶/۰	۱۲۴۹۵	۵۲۴۸	۱/۰۸
لومی رسی شنی	۰/۰۳۸	۴۵/۶	۶/۱	۱۲۲۳۲	۵۱۳۷	۱/۱۳
میانگین	۰/۰۹۱	۴۵/۶۸	۶	۱۱۷۳۲	۴۹۲۷	۱/۰۸

جدول ۱۱- برنامه آبیاری و عملکرد برنج در بیستم اردیبهشت با شوری آب ۱۶۰۰ و خاک ۵۶۴ میلی‌گرم بر لیتر

بافت خاک	مقدارتخلیه مجاز آب (-)	مقدار آبیاری در طول فصل رشد (cm)	دوره تناوب (day)	عملکرد ماده خشک (kg/ha)	عملکرد واقعی (kg/ha)	بهره‌وری آب آبیاری(kg/m3)
رسی	۰/۱۴۸	۴۶/۲	۶/۵	۱۰۶۸۶	۴۱۶۸	۰/۹۰
رسی سیلتی	۰/۱۴۱	۴۳/۴	۶/۵	۱۰۷۱۳	۴۱۷۸	۰/۹۶
لومی رسی	۰/۱۳۰	۴۷/۳	۶/۵	۱۲۵۵۴	۴۸۹۶	۱/۰۴
لومی	۰/۰۹۵	۴۲/۹	۶/۶	۱۳۵۴۲	۵۲۸۱	۱/۲۳
لومی سیلتی	۰/۰۸۶	۴۹/۵	۷/۱	۱۲۹۵۱	۵۰۵۱	۱/۰۲
لومی رسی شنی	۰/۰۵۴	۴۵/۵	۶/۸	۱۲۷۷۴	۴۹۸۲	۱/۰۹
میانگین	۰/۱۰۹	۴۵/۸	۶/۷	۱۲۲۰۳	۴۷۵۹	۱/۰۴

جدول ۱۲- برنامه آبیاری و عملکرد برنج در بیست و پنجم اردیبهشت با شوری آب ۱۶۰۰ و خاک ۵۶۴ میلی‌گرم بر لیتر

بافت خاک	مقدارتخلیه مجاز آب (-)	مقدار آبیاری در طول فصل رشد (cm)	دوره تناوب (day)	عملکرد ماده خشک (kg/ha)	عملکرد واقعی (kg/ha)	بهره‌وری آب آبیاری(kg/m3)
رسی	۰/۱۴۹	۴۴/۹	۶/۶	۱۰۹۹۱	۴۰۶۷	۰/۹۱
رسی سیلتی	۰/۱۳۳	۴۳/۸	۶/۹	۱۱۰۶۱	۴۰۹۳	۰/۹۳
لومی رسی	۰/۱۲۹	۴۸/۲	۷/۰	۱۳۲۲۸	۴۸۹۴	۱/۰۱
لومی	۰/۱۲۶	۴۴/۴	۶/۶	۱۴۱۸۲	۵۲۴۷	۱/۱۸
لومی سیلتی	۰/۱۰۴	۴۹/۴	۷/۰	۱۳۶۸۳	۵۰۶۳	۱/۰۲
لومی رسی شنی	۰/۰۴۶	۴۶/۹	۷/۰	۱۳۳۵۴	۴۹۴۱	۱/۰۵
میانگین	۰/۱۱۴	۴۶/۲۷	۶/۸	۱۲۷۴۹	۴۷۱۷	۱/۰۲

نتیجه‌گیری

در این پژوهش صحت مدل SWAP در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ و عملکرد محصول برنج در دشت آستانه-کوچصفهان استان گیلان ارزیابی شد. تحلیل‌های آماری نشان داد که مدل SWAP با دقت قابل قبولی دارای قابلیت برآورد شاخص سطح برگ و عملکرد برنج است. بررسی اثر تاریخ نشاءکاری بر برنامه آبیاری و عملکرد برنج با استفاده از مدل SWAP نشان داد که مدل می‌تواند با لحاظ نمودن فرآیندهای اگروفیزیولوژیکی بر گیاه، توصیه قابل قبولی از تاریخ نشاءکاری مناسب تحت تاثیر شرایط آب و هوایی و خصوصیات آب آبیاری و خاک ارائه نماید. در سال مورد مطالعه (۱۳۹۰) و در دشت آستانه- کوچصفهان بر اساس بهره‌وری آب آبیاری، تاریخ نشاءکاری اول اردیبهشت یعنی جلو انداختن تاریخ نشاء نسبت به زمان عرف منطقه (۱۵ اردیبهشت) توصیه شد هر چند بیشترین عملکرد واقعی برنج در تاریخ نشاءکاری ۱۵ اردیبهشت روی داد. همچنین مقادیر تخلیه مجاز رطوبتی و دوره تناوب مناسب در آبیاری تناوبی در دشت آستانه- کوچصفهان در سال مورد مطالعه به ترتیب به طور میانگین ۹/۵ درصد و ۶/۵ روز پیشنهاد شد. آنچه مسلم است شرایط آب و هوایی (باران و دما)، خصوصیات شیمیایی آب آبیاری و خاک بر عملکرد و برنامه آبیاری برنج موثر است بنابراین نتایج ذکر شده می‌تواند در هر سال زراعی متفاوت باشد. اگرچه اجرای این راهکار برای داده های مزرعه‌ای چند ساله برای افزایش قابلیت تعمیم نتایج آن توصیه می شود اما روش مورد استفاده در این پژوهش برای تعیین اصولی‌تر برنامه آبیاری تناوبی و تاریخ نشاءکاری بهینه در هر سال زراعی توصیه می‌شود.

منابع

اسدی، ر.، رضایی، م. و معتمد، م.ک. ۱۳۸۳. راه‌حل ساده برای مقابله با خشک‌سالی‌ها در شالیزارهای مازندران، فصل‌نامه علمی- ترویجی خشکی و خشک‌سالی کشاورزی. ۴: ۹۰-۸۷.

اعلایی بازکیایی، پ.، امیری، ا.، کاظمی، ح. و رضایی، م. ۱۳۹۸. تاثیر تاریخ کاشت و دور آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج (*Oryza sativa* L.) در شهرستان رشت. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۳ (۲): ۲۹۸-۲۸۳.

امیری، ا.، رضایی، م. یزدانی، م. و رضوی‌پور، ت. ۱۳۸۶. ارزیابی کاربرد مدل SWAP جهت پیش‌بینی عملکرد برنج در شرایط خشکسالی، اولین همایش سازگاری با کم‌آبی. ۲-۵ بهمن، تهران.

آقاجانی، م.، نوابیان، م. وظیفه دوست، م. و رضایی، م. ۱۳۹۲. مقایسه شبیه سازی- بهینه یابی بهره وری آب با دوره ثابت و متغیر

آبیاری برنج رقم هاشمی در رشت. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۷ (۴): ۶۲۳-۶۳۵.

آقاجانی، م. ۱۳۹۶. کاربرد مدل‌های SWAT و SWAP در مدیریت آبیاری برنج بر اساس ویژگی‌های آب، خاک و زه‌آب در شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود، رساله دکترا آبیاری زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

آقاجانی، م. ۱۳۹۰. بهینه‌سازی مدیریت آبیاری تناوبی برنج با استفاده از تلفیق مدل SWAP و الگوریتم ژنتیک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری زهکشی، دانشگاه گیلان.

بابایی فینی، ا.، قاسمی، ا. و فتاحی، ا. ۱۳۹۳. بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند نمایه‌های حدی بارش ایران زمین. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۱ (۳): ۱۰۳-۸۵.

تابعی، م.، برومندنسب، س. سلطانی محمدی، ا. و نصراللهی، ع.ح. ۱۳۹۴. شبیه سازی توزیع شوری درخاک تحت آبیاری قطره‌ای تیپ با آب شور با استفاده از مدل SWAP. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۹ (۳):۶۰۳-۵۹۰.

ثابتی، ع.، و جعفرزاده کنارسر، م. ۱۳۸۵. بررسی اثر تاریخ، تراکم و آرایش کاشت بر عملکرد برنج. مجله کشاورزی. ۸ (۲): ۲۲-۱۳.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان. ۱۳۹۲. گزارش ادامه مطالعه دشت‌های دارای شبکه سنجش کمی و کیفی محدوده مطالعاتی آستانه-کوچصفهان، شرکت مهندسین مشاور طولا رود گیل.

شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان. ۱۳۹۵. بانک آمار سطح آب چاه‌های محدوده‌ی مطالعاتی آستانه-کوچصفهان از سال ۹۴-۸۱، سایت آب منطقه‌ای گیلان www.glrw.ir.

شهیدی، ع، و احمدی، م. ۱۳۹۱. آموزش تصویری مدلSWAP. انتشارات کلک زرین. ۱۶۸ صفحه.

رضایی، م. و نحوی، م. ۱۳۸۲. اثر دور آبیاری بر مقدار مصرف آب و عملکرد برنج در گیلان. مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. تهران. شماره ۸۳: ۲۴۰-۲۳۳.

رضایی، م. ۱۳۹۴. برآورد تاثیر تغییرات میزان کاربرد آب آبیاری بر بهره‌وری آب در سطح وسیع با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و مدلDSSAT . رساله دکترا آبیاری زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

علیزاده، م.ع. و عیسی‌وند، ح. ر. ۱۳۸۵. برنج در مصر، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۲۰۰ صفحه.

کریمی، م.، ستوده، ف. و رفعتی، س. ۱۳۹۷. تحلیل روند تغییرات و پیش‌بینی پارامترهای حدی دمای سواجل جنوبی دریای خزر. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۱۸ (۴۸): ۷۹-۹۳.

کشاورزی، م.ح. ۱۳۷۸. بررسی اثر تراکم بوته و تاریخ نشاءکاری بر روی عملکرد و اجز ای عملکرد ارقام محلی برنج . پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد جیرفت.

دواتگر، ن. ۱۳۹۳. بانک داده، پهنه‌بندی و بسته‌های مدیریت حاصلخیزی خاک‌های استان گیلان، سایت موسسه تحقیقات برنج کشور.http://berenj.areeo.ac.ir

موسوی، ی. ۱۳۸۷. شناسایی مراحل رشد گیاه برنج. سایت برنج www.berenge.com.

مهدوی، ف. و پورعزیزی، م. ۱۳۸۲. مصرف بهینه آب در برنج. سایت برنج. www.berenge.com

نوابیان، م.، آقاجانی، م. وظیفه‌دوست، م. و رضایی، م. ۱۳۹۰. ارائه رژیم بهینه آبیاری برنج تحت تنش شوری با استفاده از مدل SWAP، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵ (۶):۱۴۲۰-۱۴۱۳.

وزارت جهاد کشاورزی. ۱۳۹۵. آمارنامه کشاورزی، جلد اول: محصولات زراعی.

Amiri, E., and Rezaei, M. 2010. Evaluation of Water-Nitrogen Schemes for Rice in Iran, Using ORYZA2000 Model, Communications in Soil Science and Plant Analysis. 4: 2459–2477.

Bouman, B.A.M., Kropff, M.J., Tuong, T.P., Wopereis, M.C.S., Ten Berge, H.F.M., and Van Laar, H.H. ORYZA2000: Modeling Lowland Rice. International Rice Research Institute, and Wageningen University and Research Centre, Los Baños, Philippines and Wageningen, Netherlands. 235 pp.

Confalonieri, R., Gusberti, D., and Acutis, M. 2006. Comparison of WOFOST, Cropsyst and WARM for simulating rice growth (Japonica type – short cycle varieties), Italian Journal of Agro Meteorology. 7-16.

Confalonieri, R., Acutis, M., Donatelli, M., Bellocchi, G., Mariani, L., Boschetti, M., Stroppiana, D., Bocchi, S., Vidotto, F., Sacco, D., Grignani, C., Ferrero, A., and Genovese, G. 2005. WARM: A scientific group on rice modelling, Ital. Journal of Agrometeorol. 2: 54–60.

Confalonieri, R., Bellocchi, G., Boschetti, M., and Acutis, M. 2009. Evaluation of parameterization strategies for rice modeling. Spanish Journal of Agricultural Research. 7(3): 680-686.

Dagalo Hatiye, S., Hari Prasad, K.S., and Ojha, C.S.P. 2017. Water balance and water productivity of rice

SWAP version 3.03. (Ed), Alterra report: Alterra Green World Research, MI: Wageningen University and Research Centre. 773. 211 pp.

Liu, H., Genard, M., Guichard, S., and Bertin, N. 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. Journal of Experimental Botany. 58(13): 3567-3580.

Maas, E.V., and Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. Journal of the Irrigation and Drainage Division. 103(2): 115-134.

Moriasi, J.G., Arnold, M.W., Van Liew, R.L., Bingner, R.D., Harme, M., and Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, Trans. ASABE. 50(3): 885-900.

Mukesh, I., Singh, R.K., Prasad P.D., and RAM, A. 2013. Effects of different transplanting dates on yield and quality of basmati rice (*Oryza sativa*) varieties. Indian Journal of Agronomy. 58 (2): 256_258.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., and Fereres, E. 2009. AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description Agron. 101: 438-447.

Singh, R., Van Dam J.C., and Feddes, R. A. 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. Agricultura Water Management. 82: 253-278.

Van Dam, J.C. 2000. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation, and case studies. PhD-thesis, Wageningen University, The Netherlands. Available at: http://edepot.wur.nl/121243

Van Genuchten, M., Leij, N., and Yates, S. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, Report NO. EPA/600/2-91-065. Ada. Okla. U.S. Environmental protection Agency, Kerr, R.S. Environmental Research laboratory.

Vories, E., Stevens, W.G., Rhine, M., and Straatmann, Z. 2017. Investigating irrigation scheduling for rice using variable rateirrigation, Agricultural Water Management. 179: 314-323.

paddy in unpuddled sandy loam soil, Sustainable Water Resources Management. 3(2): 109-128.

Diepen, C.A., Rappoldt, C., Wolf, J., and van Keulen, H. 1988. Crop growth simulation model WOFOST. Documentation version 4.1, Centre for World Food Studies, Wageningen, The Netherlands. 299 pp.

Facon, T. 2006. Water management in rice in Asia: some issue for the future, http://www.fao.org/docrep/003/x6905e/x6905e0f.htm.

FAO. 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2), Food Agriculture Organization, Rome, Italy and ILASA, Laxenburg, Austria (webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/).

Feddes, R.A., Kowalik, P.J., and Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield, John Wiley and Sons, New York.

Gauch, H.G., Hwang, J.T.G., and Fick, G.W. 2003. Model evaluation by comparison ofmodel-based predictions and measured values. Agronomy Journal. 95: 1442–1446.

Jamieson, P.D., Porter, J.R., and Wilson, D.R. 1991. A test of the computer simulationmodel ARC-WHEATI on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research. 27: 337-350.

Jalota, S.K., Singh, K.B., Chahal, G.B.S., Gupta, R.K., Chakraborty, S., Sood, A., Ray, S.S., and Panigrahy, S. 2009. Integrated effect of transplanting date, cultivar and irrigation on yield, water saving and water productivity of rice (Oryza sativa L.) in Indian Punjab: Field and simulation study. Agricultural Water Management 96: 1096–1104.

Jonubi, R., Verdinejad, V.R., and Salemi, H. 2018. Enhancing field scale water productivity for several rice cultivars under limited water supply, Paddy and Water Environment. 16: 125-141.

Iranian Space Agency. 2014. Development of a rice monitoring system supporting agricultural and environmental management for Caspian zone, using remotely sensed data and geographic information system.

Kroes, J.G., and Van Dam, J.C. 2003. Reference Manual

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 5, Vol. 14, Oct.-Nov. 2020, p. 1789-1802

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۵، جلد ۱۴، آذر - دی ۱۳۹۹، ص. ۱۸۰۲-۱۷۸۹

Investigating the Effect of Transplanting Date on Intermittent Irrigation Planning in Paddy Fields Using SWAP Model (Case Study: Astaneh-Kochesfahan Plain)

M. Navabian[1*], M. Heydarian[2], M. Vazifehdost[3]
Recived: Jun.02, 2020 Accepted: Jul.23, 2020

Abstract

Due to the lack of enough water resources, increasing of the water productivity index in a strategic and high water consuming cultivation like rice is more important. Planting date and irrigation program are important factors in increasing the productivity of rice. This study investigates the effect of transplanting date on irrigation programming and rice yield and provides an acceptable strategy for determining the appropriate planting date with respect to climatic conditions and field characteristics. Therefore, SWAP model was calibrated in the Astaneh-Koushfahan plain with data of three paddy fields (Hashemi variety) and validated with data of two other paddy fields. The R^2 index greater than 0.98 and RMSE-N less than 10% indicated that the model had acceptable accuracy for rice growth simulation. After validation, the optimum management of intermittent irrigation was obtained in planting dates 1, 5, 10, 15, 20 and 25 May. The results showed that in 2011 1 May was the suitable planting date due to higher irrigation water productivity. At this date, 9% allowable moisture depletion and 7 days irrigation intervals were proposed. Also, in this plain, the maximum and minimum moisture allowable depletion was 15 and 2%, respectively in clay and sandy loamy clay soil texture.

Keywords: Intermittent irrigation, Irrigation interval, Moisture allowable depletion, Transplanting date

1- 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
2- M.Sc. Student of Water Engineering Department, Agricultural Sciences Faculty, University of Guilan
3- Assistant Professor of Water Engineering Department, Agricultural Sciences Faculty, University of Guilan
(*- Corresponding Author Email: Navabian@guilan.ac.ir)