ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد برنج تحت کشت آبیاری تناوبی

مسعود پورغلام آمیجی[۱]، عبدالمجید لیاقت[۲]، مجتبی خوش روش[۳]

تاریخ ارسال: ۱۳۹۸/۰۲/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۰۶
مقاله پژوهشی

چکیده

کشت برنج در شمال ایران که از لحاظ استراتژیک و اقتصادی بسیار مهم می‌باشد، مستلزم تغییر مدیریت آبیاری با استفاده از روش آبیاری سنتی (آبیاری غرقابی) است. مدل‌های گیاهی که بتواند عملکرد محصول را در مدیریت‌های مختلف آبیاری و شرایط مختلف شبیه‌سازی کند، بسیار سودمند در صرف وقت و هزینه خواهد بود. در این پژوهش از آخرین نسخه مدل AquaCrop استفاده شد. در همین راستا، پژوهشی به‌منظور مقایسه سطوح مختلف دور و مقدار آبیاری و تأثیر آن بر میزان مصرف آب، عملکرد شلتوک و بهره‌وری آب برنج در اراضی شالیزاری شهرستان بابلسر واقع در استان مازندران در تابستان ۱۳۹۷ به انجام رسید. این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، در سه تکرار و چهار تیمار در مجموع در ۱۲ کرت آزمایشی انجام شد. تیمارها به ترتیب عبارت بودند از TI (آبیاری سنتی/ غرقابی)، AI_1، AI_3 و AI_5 (آبیاری تناوبی به ترتیب یک، سه و پنج روز پس از ناپدید شدن آب از سطح خاک). بعد از اعمال شیوه‌های مختلف آبیاری و ثبت میزان آب تجمعی داده‌شده به تیمارها، میزان عملکرد دانه و بهره‌وری آب نیز مشخص شد. برای کمی سازی و صحت سنجی اثرات مدیریت‌های مختلف آب بر عملکرد برنج؛ واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز حساسیت مدل بر اساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای انجام شد. بعد از واسنجی، مدل برای چهار تیمار مذکور اجرا شد و نتایج نشان داد که مدل توانست عملکرد محصول را با دقت بالا ($d>۰/۸۱$ و $R^2>۰/۸۶$) برای مدیریت‌های مختلف آبیاری شبیه‌سازی کند. خطای نسبی مدل AquaCrop برای تخمین عملکرد محصول در تیمارهای TI، AI_1، AI_3 و AI_5 به ترتیب ۱/۹۸-، ۷/۱۷، ۲/۲۵ و ۳/۷۵- محاسبه شد. مقدار متوسط جذر میانگین مربعات خطا نیز ۰/۲۳۳ تن در هکتار به دست آمد. بنابراین با توجه به شبیه‌سازی قابل‌قبول مدل AquaCrop در تخمین عملکرد محصول، استفاده از آن در مدیریت‌های مختلف آبیاری، تنش رطوبتی خاک و در شرایط اقلیمی مشابه با این پژوهش توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری غرقابی، بهره‌وری آب، AquaCrop، شالیزار، شبیه‌سازی.

[۱]- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ۰۹۳۹۰۲۳۶۴۲۳، Mpourgholam6@ut.ac.ir
[۲]- استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، ۰۹۱۲۲۱۵۹۷۴۸، Aliaghat@ut.ac.ir (نویسنده مسئول)
[۳]- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، ۰۹۱۱۳۵۲۱۶۵۴، Khoshravesh_m24@yahoo.com

مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آب در ایران و شرایط خاص جغرافیایی کشور، استفاده از مدیریت‌ها و شیوه‌های نوین آبیاری با مصرف کمتر آب امری بدیهی خواهد بود (لیاقت و همکاران، ۱۳۹۷). با اعمال مدیریت صحیح در سیستم آب، خاک و گیاه می‌توان ضمن افزایش محصول، یک کشاورزی پایدار ایجاد کرد (Xu et al., 2019; Fadul et al., 2020). از طرفی انجام کارهای پژوهشی در سطح کشور که بتواند به اعداد دقیقی درباره حجم آب مصرفی محصولات مختلف در کشور منتهی شود، امری لازم و ضروری بوده و نتایج آن می‌تواند کمک شایانی به تصمیم‌گیری مسئولین مرتبط با آب و کشاورزی نماید.

آبیاری در مناطق شالیزار با استفاده از رژیم آبیاری غرقابی و با نگه‌داشتن ۵-۳ سانتی‌متر آب روی خاک برای فصل رشد انجام می‌شود. دو استان مازندران و گیلان ۸۰-۷۰ ٪ از برنج کل ایران را تولید می‌کنند (Amiri et al., 2011) که تولید آن به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی و متعاقب آن کمبود آب قرار دارد (Pan et al., 2017).

محصول برنج پس از گندم بیشترین سطح اراضی کشاورزی را در جهان به خود اختصاص داده و غذای اصلی حدود نیمی از مردم جهان و اغلب مردم کشورهای در حال توسعه است. بر اساس آخرین آمار در ایران، در سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶ سطح زیر کشت اراضی شالیزاری کشور بالغبر ۶۲۲۹۹۱ هکتار بوده است. اراضی زیر کشت برنج در ایران به‌طور عمده متعلق به پنج استان گیلان (۳۵/۳ درصد)، مازندران (۳۴/۳ درصد)، خوزستان (۱۰/۹ درصد)، گلستان (۹/۹ درصد)، و فارس (۳/۴ درصد) است. همچنین مقدار تولید این محصول در سطح کل کشور بالغبر ۳۱۰۶۳۸۰ تن بوده که استان مازندران با ۱۱۱۳۷۱۵ و استان گیلان با ۱۰۹۳۶۶۵ تن بیشترین مقدار تولید محصول را به خود اختصاص داده‌اند (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۹۸).

آبیاری غرقاب دائم در شالیزار با راندمان بسیار پایین باعث مصرف بیش از نیاز واقعی آب می‌شود بنابراین لازم است روش‌های صرفه‌جویی و افزایش بهره‌وری آب برای تولید برنج مورد ارزیابی و استفاده قرار گیرد. یکی از راهکارهای موجود روش آبیاری تناوبی یا اعمال تنش آبی می‌باشد. Pan et al, (2017) نشان دادند که آبیاری تناوبی باعث کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری مصرف آب در برنج می‌شود که می‌توان از آن به‌عنوان یک راهکار مدیریت آبیاری در هنگام خشک‌سالی و کمبود آب استفاده کرد. این روش در اوایل دهه ۱۹۸۰ در ماداگاسکار توسعه یافت (Bhuiyan, 1992). آبیاری تناوبی را می‌توان روشی برای افزایش بهره‌وری آب برنج، کاهش مصرف آب و افزایش یا حفظ عملکرد با کمترین هزینه و بدون نیاز به لوازم و تجهیزات گران‌قیمت قلمداد کرد.

در همین راستا Mote et al. (2017) تأثیر دوره‌های تر و خشک و مدیریت آبیاری برنج در اراضی پست و کم ارتفاع در ایالت Telangana هند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که با حفظ عملکرد برنج (بیش از هفت تن در هکتار)، می‌توان ۳۵-۲۶٪/۶ در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. همچنین بهره‌وری بالاتر آب در روش AWD[1] نشان می‌دهد که محصول برنج را می‌توان با اتخاذ یک رژیم آبیاری مطلوب با موفقیت و بدون کاهش عملکرد، رشد داد (Monaco & Sali, 2018). Amiri et al, (2011) با بررسی مدیریت آبیاری برنج در استان گیلان بر روی رقم هاشمی، مقدار بهره‌وری آب بر اساس میزان آبیاری (WP_I) را در محدوده ۰/۹۲-۰/۲۹ کیلوگرم دانه بر مترمکعب آبیاری محاسبه نمود. بسیاری از محققان گزارش کرده‌اند که بهره‌وری آب برنج با توجه به ورودی کل آب (آبیاری به‌اضافه بارندگی) به‌طور متوسط ۰/۴ کیلوگرم دانه در مترمکعب است (Tuong et al., 2005) که آبیاری تناوبی و صرفه‌جویی در آب، منجر به افزایش بهره‌وری آن به میزان ۱-۰/۸ کیلوگرم دانه در

[1] Alternate wetting and drying

مترمکعب می‌شود (Yang et al., 2017; Mote et al., 2017).

استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی یکی از ابزارهای مدیریتی جهت برآورد عملکرد گیاهان تحت شرایط تنش خشکی و شوری و تنش‌های تغذیه‌ای می‌باشد. در سال اخیر مدل‌های مختلفی برای مطالعه مدیریت آبیاری و تأثیر تنش در سطح مزرعه به‌کاررفته است. نسخه جدید مدل AquaCrop میزان عملکرد محصول تحت تنش‌های رطوبتی و شوری و همچنین شوری نیمرخ خاک را نیز برآورد می‌کند (FAO. 2017). در همین رابطه، ذبیحی و همکاران (۱۳۹۴) عملکرد برنج تحت مدیریت‌های زهکشی سطحی و زیرزمینی را با مدل AquaCrop شبیه‌سازی کردند و متوسط مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج را ۱۹۱/۵ محاسبه کردند. یافته‌های این پژوهش، کارایی مناسب مدل AquaCrop در شبیه‌سازی فرایند رشد و تأثیر زهکشی سطحی و زیرزمینی بر عملکرد برنج را تأیید می‌کند و می‌توان از این مدل جهت بهبود مدیریت آبیاری در اراضی شالیزاری استفاده نمود. ذبیحی و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیق دیگری تأثیر تنش خشکی بر عملکرد، کارایی مصرف آب و شوری ناحیه ریشه برنج را با استفاده از مدل AquaCrop ارزیابی کردند و نتیجه مطلوب این مدل را تأیید کردند. همچنین حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۴) مدل AquaCrop برای تخمین عملکرد محصول ذرت مورد استفاده قرار دادند. نتیجه این پژوهش نشان داد که خطای نسبی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد محصول از ۲/۹ تا ۳۰/۸ درصد متغیر بود. همچنین کارایی این مدل در تخمین شوری خاک را نیز قابل‌قبول برآورد کردند.

روش آبیاری مزرعه تأثیر مهمی بر مدل AquaCrop در برآورد آب مصرفی گیاه بر اساس پایش رطوبت خاک در منطقه ریشه دارد که تحت سناریوهای مختلف می‌تواند عملکرد محصول، نیاز آبی گیاه و کارایی مصرف آب گیاه را تحت شرایط مختلف ازجمله کم‌آبیاری شبیه‌سازی کند (Pirmoradian & Davatgar, 2019). نتایج مطالعات مختلف برای محصولات گندم، جو، برنج، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای و چغندرقند نشان می‌دهد که مدل شبیه‌سازی AquaCrop با توجه به امکان تعریف و تأثیر شرایط مختلف کم‌آبیاری بر عملکرد محصول، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه و افزایش بهره‌وری آب مورد استفاده قرار گیرد (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷؛ Abdul-Ganiyu et al., 2018).

با توجه به اینکه برنج یکی از مهم‌ترین گیاهان راهبردی برای اقتصاد کشور و مردم مناطق شمالی محسوب می‌شود، بررسی پژوهش‌هایی که بتواند نتایج قابل‌قبولی را در شرایط کم‌آبی و کمیابی حاصل کند، بسیار مفید و ارزشمند خواهد بود (پورغلام آمیجی و همکاران، ۱۳۹۷). پژوهش‌های مشابه با این تحقیق بیشتر بر روی شیوه اعمال آبیاری تناوبی با توجه به نیاز آبی، دورهای مختلف آبیاری بر اساس تبخیر از تشت و دوره‌های مختلف رشد متمرکز بوده است اما روش تناوب آبیاری در این مطالعه با سایر مطالعات انجام‌شده متفاوت است و با توجه به سهولت اجرا توسط کشاورزان، برنامه‌ریزی‌شده است. همچنین استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نظیر AquaCrop برای تخمین عملکرد محصول (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷) در مکان و زمان‌های مختلف با توجه به شرایط و نوع کشت خاص اراضی شالیزاری مورد اهمیت فراوان می‌باشد. با توجه اهمیت بازنگری در شیوه سنتی مصرف آب در اراضی شالیزاری و ارائه راهکارهای نوین، مطالعه حاضر با هدف مقایسه مدیریت‌های مختلف آبیاری در اراضی شالیزاری، از نظر میزان آب مصرفی، عملکرد و بهره‌وری آن انجام شد.

مواد و روش‌ها

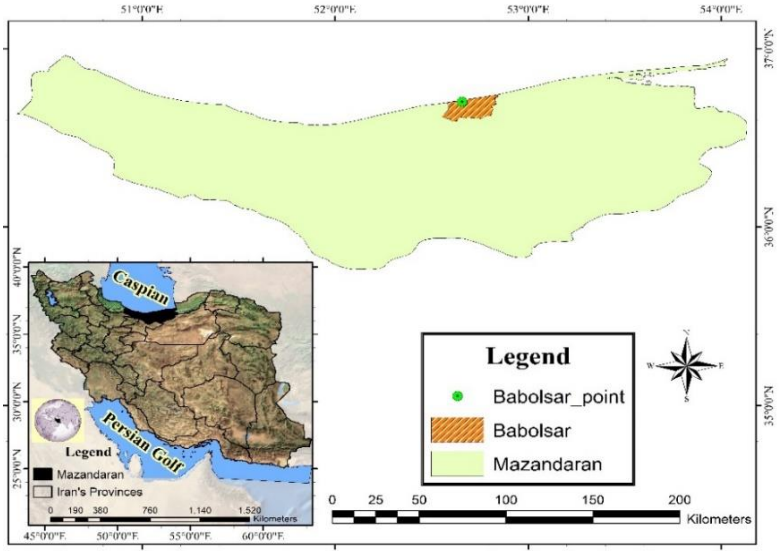
منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در یکی از اراضی شالیزاری روستای آرمیچ‌کلا واقع در شهرستان بابلسر به انجام رسید. شهرستان بابلسر یکی از شهرهای ساحلی استان مازندران بوده و با ۵۲ درجه و ۳۹ دقیقه طول جغرافیایی (°E) و ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه عرض جغرافیایی (°N) با تراز ۲۱- متر از سطح دریا در شمال ایران و در کرانه‌های جنوبی دریای خزر واقع شده است. بر اساس داده آماری درازمدت ۳۰ ساله، میانگین دمای سالانه شهرستان بابلسر حدود ۱۷/۴۶ درجه سانتی‌گراد بوده و بارندگی سالیانه آن برابر با ۹۰۶ میلی‌متر می‌باشد (داده آماری سال ۲۰۱۸-۱۹۸۸). بر اساس طبقه‌بندی به روش دومارتن دارای اقلیم خیلی مرطوب تیپ الف می‌باشد و حداکثر بارندگی‌ها در پاییز و حداقل آن در بهار رخ می‌دهد. آمار هواشناسی از جمله درجه حرارت، رطوبت نسبی، بارندگی، تبخیر و ساعت آفتابی از ایستگاه هواشناسی شهرستان بابلسر جمع‌آوری که در جدول (۱) قابل مشاهده است. شکل (۱) نیز موقعیت جغرافیایی منطقه موردمطالعه را نشان می‌دهد.

جدول (۱): اطلاعات مربوط به هواشناسی در طول دوره کشت (اردیبهشت تا مرداد سال ۱۳۹۷)

ماه	میانگین درجه حرارت			میانگین رطوبت نسبی			مجموع ماهانه		
	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	بارندگی	تبخیر	ساعات آفتابی
اردیبهشت	۱۸/۴	۲۶/۱	۲۲/۲	۵۵	۸۹	۷۲	۰/۱	۶۷/۷	۱۳۶/۵
خرداد	۲۰/۸	۲۷/۳	۲۴	۶۰	۹۱	۷۵	۱۸/۲	۱۴۷/۳	۲۰۳/۲
تیر	۲۵/۲	۳۳	۲۹/۱	۶۰	۹۰	۷۵	۳۲/۸	۱۸۵/۷	۲۹۲/۹
مرداد	۲۵/۷	۳۲/۶	۲۹/۱	۶۵	۹۲	۷۸	۰	۱۴/۵	۱۹

واحد درجه حرارت، رطوبت نسبی، بارندگی و تبخیر به ترتیب سانتی‌گراد، میلی‌متر و میلی‌متر می‌باشد. برای دما و رطوبت مقدار متوسط و برای بقیه عوامل، مجموع هر پارامتر در ماه ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی محل انجام آزمایش

ویژگی‌های آب و خاک

برای تعیین ویژگی‌های آب آبیاری، نمونه‌ای از آب آبیاری برداشت و به آزمایشگاه انتقال داده شد. سپس پارامترهای موردنیاز اندازه‌گیری شدند. در جدول (۲) ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری نشان داده‌شده است. ضمن اینکه منبع آب مورداستفاده از چاه کم‌عمق بود.

جدول (۲): ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری

نوع پارامتر	واحد اندازه‌گیری	مقدار
EC	dS/m	۱/۲۸۶
pH	-	۶/۸۱
کلر	meq/l	۹/۶
کربنات	meq/l	۰
بی‌کربنات	meq/l	۸/۹
کلسیم	meq/l	۷/۸
سدیم	meq/l	۶/۷۳
پتاسیم	meq/l	۰/۰۶۵
منیزیم	meq/l	۳/۸
سولفات	mg/l	۱۸/۹۶
نیترات	mg/l	۰/۵

عملیات شخم و آماده‌سازی زمین به‌طور یکنواخت در هر کرت انجام شد و مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (جدول ۳) در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر قبل از نشاکاری در آزمایشگاه خاک و آب اندازه‌گیری شد. مقدار شوری عصاره اشباع خاک در حد معقول بوده و بافت خاک در کرت‌های مورد بررسی که قسمتی از اراضی شالیزاری می‌باشد، از نوع لوم است. دیگر خصوصیات مهم خاک تحت آزمایش نظیر نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل‌جذب که برای توصیه کودی استفاده می‌شود در جدول (۳) قابل مشاهده است.

تیمارها

آزمایش از نوع فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و در چهار تیمار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل اشباع یا غرقاب دائم (TI)، آبیاری ۱ روز بعد از ناپدید شدن آب از سطح خاک و به عبارتی بین حالت اشباع و ظرفیت مزرعه (AI_1)، آبیاری ۳ روز بعد از ناپدید شدن آب از سطح خاک یا ظرفیت مزرعه (AI_3) و آبیاری ۵ روز بعد از ناپدید شدن آب از سطح خاک یا به عبارتی در حد خشک شدن و تنش رطوبتی (AI_5). تعداد کل کرت‌های آزمایشی ۱۲ عدد و مساحت کرت‌ها به ابعاد ۱× ۱ متر بود. شخم اولیه و ثانویه، تسطیح و ایجاد پشته‌های حد واسط بین کرت‌ها برای تمام کرت‌ها به‌طور یکسان انجام گرفت و کودهای مصرفی شامل نیتروژن، فسفر و پتاس بر اساس نتایج آزمون خاک جدول (۳) به‌طور یکسان در هر کرت مصرف شد.

جدول (۳): ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نوع پارامتر	واحد اندازه‌گیری	مقدار
EC	dS/m	۱/۱۸۹
بافت خاک	Type	Loam
رس	%	۲۲/۹۴
سیلت	%	۵۰
شن	%	۲۷/۰۶
ρ_s	g/cm^3	۲/۶۷
FC	%	۳۷/۸۶
PWP	%	۱۸/۹۳
نیتروژن کل	%	۰/۱۶۸
پتاسیم قابل‌جذب	mg/l	۲۰۰
فسفر قابل‌جذب	mg/l	۹۴/۴۵

نشاکاری در مرحله سه-چهار برگی (ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر) انجام شد و در هر کرت ۲۵ کپه برنج در هر مترمربع نشا شد. با توجه به نوع آبیاری غرقابی و به‌منظور جلوگیری از تلفات نشت جانبی، مرز کرت‌ها تا ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر بالا آورده شد و به‌منظور کاهش هدر رفت آب از طریق نشت جانبی روی پشته‌ها با پلاستیک پوشانده شده و پوشش مذکور تا لایه غیرقابل نفوذ (عمق ۵۰ سانتی‌متر) به داخل زمین فرو برده شد. مزیت دیگر این کار جلوگیری از رشد علف‌های هرز بر روی پشته‌ها می‌باشد.

اندازه‌گیری‌ها

دو هفته اول به دلیل حساسیت نشای برنج به تناوب خشکی و ده روز آخر به علت سهولت در برداشت، اعمال تیمار نشده است. از تاریخ نشا (۱۶ اردیبهشت) تا اعمال تیمار (۲۹ اردیبهشت) هر کرت حدود ۸۴ لیتر آب مصرف کرده و بعد از تاریخ مذکور اعمال تیمار شروع شد. برنج کاشته شده از نوع طارم (رقم گل پنبه) بوده و عامل اصلی مدیریت‌های مختلف آبیاری را شامل می‌شد. در دوره‌های اولیه رشد، مصرف آب به علت رشد

طولی و پنجه‌زنی تقریباً بالا بود و بعد از آن به علت کاهش نسبی دما و اثر بارندگی بر روی رطوبت خاک، روزهای بیشتری به طول می‌انجامید تا آب از سطح خاک محو شود. چون اعمال مدیریت آبیاری بعد از ناپدید شدن آب از سطح خاک صورت می‌گرفت و تا تیغه دائمی آبیاری انجام می‌شد؛ بعد از رشد ارتفاعی برنج به علت سایه افکنی و افزایش کنوپی، زمان بیشتری برای ناپدید شدن آب لازم بود. ۵۰ روز بعد از نشاء به عبارتی در بازه پنج تا ۱۰ تیر خوشه‌های برنج ظاهر شد و در حدود دو هفته زمان لازم بود تا شلتوک به مرحله برداشت برسد.

از شروع اعمال تیمار تا پایان دوره، میزان مصرف آب در تمامی تیمارها ثبت شد. جدول (۴)، زمان‌بندی انجام عملیات زراعی قبل از کاشت، مرحله نشاء و تا برداشت محصول و سپس برداشت نمونه‌ها از کرت را نشان می‌دهد.

جدول (۴): اطلاعات زراعی مختلف و زمان‌بندی انجام کل عملیات زراعی صورت گرفته

شخم زمین	کرت بندی	کودپاشی	نشاکاری	اعمال تیمار	خوشه‌دهی	پایان آزمایش	برداشت	طول کل دوره
۹۷/۰۱/۱۵	۹۷/۰۲/۰۱	۹۷/۰۲/۱۴	۹۷/۰۲/۱۶	۹۷/۰۲/۳۰	۹۷/۰۴/۰۷	۹۷/۰۴/۲۳	۹۷/۰۵/۰۴	۸۲ روز

در حال حاضر رژیم‌های گوناگون آبیاری توسط زارعین مختلف در دست اجرا است اما عموماً و به‌طور غالب رژیم استغراق دائم به عمق حدود سه الی پنج و گاهی اوقات هشت تا ۱۰ سانتی‌متر در سطح منطقه رواج دارد که گاهی با زهکشی میان فصل نیز همراه می‌باشد. در این تحقیق شاهد اعمال مدیریت‌های مختلف آب برای رسیدن به بهره‌وری بالا با راهکار غیره سازه‌ای خواهیم بود. میزان بهره‌وری آب آبیاری (WP_I[1]) و بهره‌وری آبیاری + بارندگی (WP_{I+R}) در فواصل زمانی معین با استفاده از روابط زیر تعیین شدند (Tuong & Bouman, 2005).

$$WP_I\ (Kg/m^3) = \frac{Y}{I} \qquad (۱)$$

$$WP_{I+R}\ (Kg/m^3) = \frac{Y}{I+R} \qquad (۲)$$

که در آن Y عملکرد دانه برنج ($kgha^{-1}$)، I مقدار آب آبیاری ($m3ha-1$)، R کل بارندگی در طول دوره کشت ($m3ha-1$) و WPI و WPI_{+R} بهره‌وری (kgm^{-3}) می‌باشند. WPI+R برای ارزیابی مدیریت آبیاری شاخص مهم‌تری است زیرا راندمان آبیاری در مخرج کسر و میزان حجم آب آبیاری اثرگذار است.

مدل AquaCrop

برای شبیه‌سازی فرایند رشد گیاه و تخمین عملکرد از مدل AquaCrop (Version 6.0, 2017) که سازمان خواربار جهانی (فائو) با تجدیدنظر در نشریه شماره ۳۳ این سازمان توسعه داده است، استفاده شد. این مدل با تفکیک ET_a به تبخیر از سطح خاک (E_a) و تعرق (T_a) و مجزا نمودن عملکرد نهایی (Y) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت توسعه یافت. جدا نمودن ET_a به E_a و T_a سبب می‌شود که بخش غیر مؤثر آب در تولید محصول (تبخیر) در نظر گرفته نشود. این موضوع به‌ویژه زمانی که هنوز پوشش گیاهی تکمیل‌نشده، حائز اهمیت است (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۵). این مدل قادر است میزان عملکرد محصول را در شرایط کم آبیاری و در صورت وجود تنش شوری تخمین بزند. برای محاسبه میزان عملکرد محصول از رابطه (۳)، که بر اساس تبخیر و تعرق نسبی و همچنین بر اساس معادله بیلان آب عمل می‌کند، استفاده شد:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \qquad (۳)$$

[1] Irrigation Water Productivity

که در آن Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ETx و ETa به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر و تعرق گیاه و Ky ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به میزان کاهش تبخیر و تعرق است. کارایی مصرف آب (WUE[1]) نیز از نسبت مقدار عملکرد در هر تیمار به ETc همان تیمار طبق رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$WUE = \frac{Y}{ET_c} \qquad (۴)$$

که Y عملکرد محصول ($kgha^{-1}$) و ETc آب مصرفی گیاه ($m3ha^{-1}$) در طی دوره رشد می‌باشد. تنش شوری خاک ضریب رشد گیاه (GGC[2]) را نسبت به بیشینه کاهش می‌دهد. برای شبیه‌سازی تأثیر تنش بر مقدار عملکرد، AquaCrop گروهی از ضریب‌ها را که مبتنی بر توسعه کنوپی و بسته شدن روزنه‌هاست، در نظر می‌گیرد. مدل جریان آب در داخل خاک را بر اساس معادله بیلان آبی به کار می‌گیرد که شامل فرایندهای رواناب، نفوذ، توزیع مجدد یا زهکشی داخلی، نفوذ عمقی، صعود مویینگی و تبخیر و تعرق است (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷). مدل AquaCrop وزن خشک کل گیاه (زیست‌توده) را شبیه‌سازی می‌کند. داده‌های ورودی مدل شامل چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه است.

داده‌های اقلیمی شامل میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه، دمای حداقل و حداکثر روزانه، رطوبت نسبی حداکثر و حداقل روزانه، مقادیر بارندگی روزانه، سرعت باد، ساعات آفتابی و میانگین سالیانه غلظت CO_2 است. از اطلاعات آماری سال ۱۳۹۷ ایستگاه هواشناسی بابلسر برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع ET_o در دوره رشد برنج، به روش پنمن-مانتیث و با استفاده از نرم‌افزار EToCalculator که با مدل AquaCrop پیوند دارد، استفاده شد. غلظت CO_2 موجود در اتمسفر از مقادیر محاسبه‌شده در مدل (اندازه‌گیری‌شده و تخمین زده‌شده از سال ۱۹۰۲ تا سال ۲۰۹۹ واقع در رصدخانه Mauna Loa در هاوایی) به دست آمد. مقادیر بارندگی در فصل رشد نیز به‌صورت روزانه به مدل داده شد.

داده‌های خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (Ksat)، مقدار رطوبت حجمی در نقطه اشباع (θsat)، ظرفیت مزرعه (θfc)، پژمردگی دائم (θpw_p) بافت و هدایت الکتریکی (EC) از مهم‌ترین این داده‌ها می‌باشند. خلاصه‌ای از خصوصیات خاک مزرعه مورد مطالعه در جدول (۳) آمده است.

داده‌های گیاهی دو نوع ورودی دارند که برخی از آن‌ها ثابت[3] و برخی دیگر متغیر و غیرثابت[4] هستند. مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت باگذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند و با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده‌اند. همه پارامترهای مربوط به مکان و پارامترهای ویژه گیاهی، مانند حداکثر عمق ریشه، تراکم گیاه، زمان کاشت و مدیریت آبیاری در گروه پارامترهای مخصوص کاربر (غیرثابت) طبقه‌بندی می‌شوند که باید به‌درستی وارد شوند (حسن‌لی و همکاران، ۱۳۹۴). در این پژوهش، شبیه‌سازی مقدار عملکرد دانه برنج رقم طارم در طول فصل کشت و تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری تناوبی بررسی شد.

داده‌های مدیریتی مزرعه به دو بخش اصلی تقسیم شده‌اند: مدیریت مزرعه و حاصلخیزی آن و مدیریت آبیاری. حاصلخیزی مزرعه بدون محدودیت و به‌طور کامل در نظر گرفته شد. داده‌های مدیریت آبیاری شامل روش آبیاری و مقادیر و کیفیت آب آبیاری در طول فصل رشد است. از روش آبیاری کرتی دارای مرز و مدیریت‌های مختلف آبیاری تناوبی استفاده شد.

پارامترهای ارزیابی

ارزیابی مدل در تخمین عملکرد محصول و واسنجی و صحت سنجی آن با استفاده از شاخص‌های

[1] Water Use Efficiency
[2] Canopy Growth Coefficient
[3] Conservative
[4] Non-Conservative

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE[1])، خطای نسبی (RE[2]) و شاخص سازگاری d به کمک روابط (۵-۷) انجام شد:

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

$$RE = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100 \quad (۶)$$

$$d = 1 - [\frac{\sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2}{[\sum_{i=1}^{n}(|p_i - \overline{o}| + |o_i - \overline{o}|)^2]}] \quad (۷)$$

در روابط فوق؛ o_i مقادیر اندازه‌گیری شده، p_i مقادیر شبیه‌سازی‌شده، n تعداد مشاهدات، $\overline{o}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و $\overline{p}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده است (Loague and Green, 1991). مقدار RMSE، میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل است و بیانگر اندازه نسبی خطا نیست. واحد آن به پارامتر مربوط به شبیه‌سازی وابسته است. هر چه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است (Singh et al., 2006).

درصد خطای نسبی (RE) کم برآورد و یا بیش برآورد مدل را نشان می‌دهد و به‌صورت مقادیر مثبت، منفی و یا صفر بیان می‌شود. ضریب d نشان‌دهنده سازگاری روند شبیه‌سازی عملکرد است و هر چه به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، دقت شبیه‌سازی بالاتر است (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۴).

نتایج و بحث

واسنجی مدل

بعد از اجرای مدل AquaCrop، مقدار ضرایب و پارامترهای مدل با سعی و خطا طوری تعیین شدند که نتایج شبیه‌سازی مدل، کمترین خطا یا بیشترین تطابق را با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه داشته باشند. مقدار بهینه پارامترها زمانی به دست می‌آیند که با تغییر ترکیبی از پارامترها، همچنان نتیجه شبیه‌سازی قابل قبول باشد. این کار در چند مرحله تکرار شده و سپس ضرایبی که مطابق جدول (۵) قابل مشاهده است، از مدل استخراج شد. برخی ضرایب با توجه به این تحقیق واسنجی‌شده و برخی دیگر از حالت پیش‌فرض موجود در مدل استفاده شد. برای مقایسه نتایج مدل با نتایج مشاهده‌ای و صحت‌سنجی نتایج و ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل، از شاخص خطای نسبی بین عملکرد دانه در دو حالت استفاده شد. بعد از تغییر ضرایب ثابت مدل و قابل‌قبول بودن خطای بین دو حالت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی، ضرایب مذکور به‌عنوان ضرایب واسنجی ثبت شدند (جدول ۵).

با توجه به تیمارهای مدیریت آبیاری به‌ویژه تیمارهای سه و پنج روز پس از ناپدید شدن آب از سطح خاک (AI_3 و AI_5)، تغییر ضرایب تا رسیدن به نتیجه مطلوب سخت بوده و دقت ضرایب واسنجی فاکتور شکل تابع تنش آب، فاکتور تخلیه آب برای کنترل بسته شدن روزنه‌ها، فاکتور تخلیه آب برای کنترل شروع پیری پوشش گیاهی، مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد کنوپی، مدت‌زمان کاشت تا خوشه‌دهی و مدت‌زمان کاشت تا شروع پیری پوشش گیاهی باید از دقت بالایی برخوردار باشند (Abdul-Ganiyu et al., 2018).

جدول (۵): مقادیر ضریب واسنجی‌شده در مدل AquaCrop

[1] Root Mean Square Error

[2] Relative Error

مقدار	واحد اندازه‌گیری	نوع پارامتر
دمای پایه	^{o}c	۸
دمای ماکزیمم	^{o}c	۳۰
پوشش گیاهی اولیه	%	۳/۵
ضریب افزایش پوشش گیاهی	%day	۱۲/۵
پوشش گیاهی ماکزیمم	%	۹۵
ضریب کاهش پوشش گیاهی	%day	۹/۱
فاکتور تخلیه آب برای توسعه برگ‌ها (حد پایین)	-	۰
فاکتور تخلیه آب برای توسعه برگ‌ها (حد بالا)	-	۰/۴
فاکتور شکل تابع تنش آب	-	۳
فاکتور تخلیه آب برای کنترل بسته شدن روزنه‌ها	-	۰/۵
فاکتور تخلیه آب برای کنترل شروع پیری پوشش گیاهی	-	۰/۵۵
شاخص بهره‌وری آب	gr/cm^2	۱۹
شاخص برداشت مرجع	%	۵۰
حداکثر طول ریشه	cm	۳۰-۴۰
آستانه تحمل شوری	dS/m	۳/۵
شیب کاهش شوری	%	۱۲
تراکم کشت	n/ha	۲۵۰۰۰۰
مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی	day	۶
مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد کنوپی	day	۴۵
مدت‌زمان کاشت تا خوشه‌دهی	day	۵۳
مدت‌زمان کاشت تا شروع پیری پوشش گیاهی	day	۷۰
مدت‌زمان کاشت تا برداشت محصول	day	۸۲

آنالیز حساسیت

به‌منظور آنالیز حساسیت مدل، دامنه تغییرات ضریب حساسیت به سه کلاس حساسیت زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی شد. اگر پاسخ مدل به تغییر در پارامترها بیشتر از ۱/۵ باشد، دارای حساسیت زیاد است. پاسخ مدل به تغییر در پارامترهای ورودی بین ۰/۳ تا ۱/۵ به ترتب نشان‌دهنده و یا کمتر از ۰/۳، به ترتیب نشان‌دهنده حساسیت متوسط و کم می‌باشد (Geertz et al, 2009). مقدار حساسیت محاسبه‌شده برای تعدادی از پارامترهای ورودی مدل AquaCrop در جدول (۶) ارائه شده است. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده، زمان از کاشت تا پیری پوشش گیاهی، زمان تا رسیدن به ماکزیمم پوشش گیاهی و رطوبت اولیه خاک بیشتر از سایر پارامترها است. برای مثال اگر فقط یک درصد در رطوبت ورودی به مدل خطا ایجاد شود، عملکرد دانه ۳/۴-۰/۰ تن در هکتار کم یا بیش تخمینی خواهد داشت. بنابراین بایستی این داده‌ها با دقت بیشتری اندازه‌گیری شود (ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۴) زیرا در غیر این صورت خطای قابل‌توجه در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل به وجود می‌آید (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷).

جدول (۶): ضریب حساسیت پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

پارامتر ورودی مدل	حساسیت در حالت ۵۰+٪	حساسیت در حالت ۵۰-٪	درجه حساسیت
ضریب گیاهی	۰/۶۶	۰/۹۹	متوسط
ضریب افزایش سطح سایه‌انداز	۰/۴۲	۰/۵۶	متوسط
بهره‌وری آب نرمال شده	۰/۹۴	۱/۰۱	زیاد
زمان از کاشت تا پیری پوشش گیاهی	-۲/۲۹	۰/۴۳	متوسط-زیاد
عمق ریشه	۰/۰۲	۰/۱۷	کم
فاکتور تخلیه آب برای توسعه برگ‌ها	۰/۰۱	۰/۰۰۶	کم
شاخص برداشت	۰/۹۹	۱/۰۰	متوسط
فاکتور شکل تابع تنش آب	۰/۰۱	۰/۰۰۹	کم
زمان تا رسیدن به ماکزیمم پوشش گیاهی	-۱/۷۲	-۰/۳۷	متوسط-زیاد
ماکزیمم پوشش گیاهی	۰/۵۶	۰/۶۶	متوسط
پوشش گیاهی اولیه	۰/۰۸	۰/۰۷	کم
رطوبت اولیه خاک	-۷/۷۲	۲/۱۲	زیاد
فاکتور تخلیه آب برای کنترل بسته شدن روزنه‌ها	۰/۰۱	۰/۰۲	کم
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	۰/۰۱	۰/۰۲	کم

صحت‌سنجی

بعد از واسنجی مدل و تعیین ضرایب با حساسیت بالا، برای چهار تیمار آزمایش شامل اشباع یا غرقاب دائم (TI)، آبیاری یک روز بعد از ناپدید شدن آب از سطح خاک (AI_1)، آبیاری سه روز بعد از ناپدید شدن آب از سطح خاک (AI_3) و آبیاری پنج روز بعد از ناپدید شدن آب از سطح خاک (AI_5) مدل AquaCrop اجرا شد. همان‌طور که در جدول (۷) مشخص است، کمترین خطای شبیه‌سازی مربوط به تیمار شاهد (TI) با ۱/۹۸- درصد بوده و بهترین شبیه‌سازی در بین تیمارها می‌باشد که در راستای نتایج تحقیقات انجام‌شده قبلی است (Abdul-Ganiyu et al., 2018; Xu et al., 2019). تیمار AI_5 که طولانی‌ترین دوره خشکی در بین تیمارهای آبیاری است، خطای کمتری نسبت به تیمار آبیاری یک روز در میان (AI_1) و خطای بیشتری نسبت به AI_3 داشته که نکته قابل‌توجهی می‌باشد. دلیل این امر این است که انتظار می‌رود هر چه دور آبیاری برنج طولانی‌تر شده و سطح خاک بیشتر خشک شود، عملکرد بیشتر کاهش می‌یابد و مدل AquaCrop نیز چنین تصوری را داشته و همین امر باعث شده خطای بین تیمارها برخلاف انتظار کمی متفاوت باشد.

در واقع مدل مذکور، عملکرد دانه در تیمار شاهد را بالاترین مقدار برآورد کرده و با یک شیب ملایمی کاهش داده است اما در واقعیت، آبیاری تناوبی اعمال‌شده باعث حفظ و حتی بهبود عملکرد دانه برنج شده است. بیشترین خطای شبیه‌سازی به تیمار AI_1 با مقدار ۷/۱۷ درصد مربوط می‌شود. نکته دیگر میانگین عملکرد دانه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل AquaCrop می‌باشد که به‌طور قابل‌توجهی برابر با ۵/۷۳۵ تن در هکتار برای داده مزرعه‌ای (Mote et al., 2017) و ۵/۷۷۱ تن در هکتار برای مقادیر شبیه‌سازی‌شده به‌دست‌آمده است که حاکی از برآورد مناسب مدل است.

Yang et al. (2017) اظهار داشتند که برنج می‌تواند در آب با عمق کم، محصول بیشتری نسبت به شرایط غرقابی تولید کند. چون آبیاری تناوبی و با عمق کم، باعث افزایش دمای آب در طی روز و کاهش آن در شب می‌شود که این امر سبب پنجه‌زنی بیشتر و رشد بهتر خواهد شد. Mote et al. (2017) نشان دادند که آبیاری متناوب، تعداد پنجه، سطح برگ و زیست‌توده بیشتری نسبت به غرقاب دائم تولید می‌کند. همچنین با اعمال دور مناسبی از آبیاری با درصد کمی کاهش در

عملکرد، می‌توان در مصرف آب آبیاری به میزان بالایی صرفه‌جویی نمود (Pan et al., 2017).

جدول (۷): مقایسه نتایج مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج

تیمار	عملکرد (تن در هکتار)		
	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	درصد خطا
TI	۶/۱۱	۵/۹۸۹	-۱/۹۸
AI_5	۶/۰۲	۵/۷۹۴	-۳/۷۵
AI_3	۵/۶۶	۵/۷۸۵	۲/۲۱
AI_1	۵/۱۵	۵/۵۱۹	۷/۱۷

نتایج شاخص‌های آماری جهت ارزیابی مدل AquaCrop برای مرحله صحت‌سنجی در جدول (۸) ارائه شده است. مقادیر شاخص آماری پارامتر عملکرد دانه، کارایی خوب مدل را نشان می‌دهد. رابطه خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده با مقدار کم RMSE وجود داشت (۰/۲ تن بر هکتار) و دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد برنج را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. ذبیحی و همکاران (۱۳۹۴) و Xu et al. (2019) به چنین نتیجه‌ای دست یافتند.

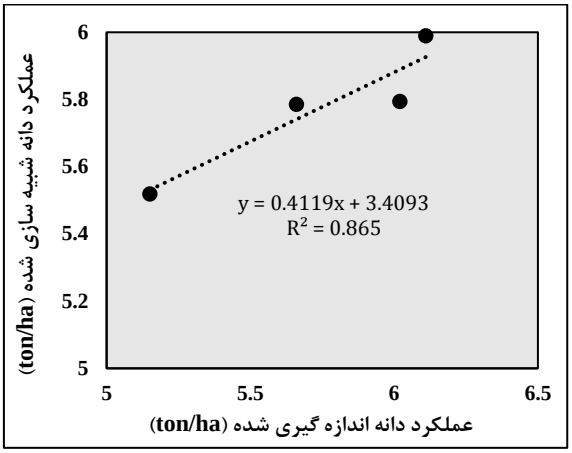
جدول (۸): ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی

پارامتر	شاخص‌های ارزیابی		
	RMSE	RE	d
عملکرد دانه	۰/۲۳۳	۳/۷۸	۰/۸۱۴

مقدار شاخص سازگاری نیز (d) به یک نزدیک بود. شاخص آماری درصد خطای نسبی که میانگین خطای نسبی شبیه‌سازی مدل AquaCrop در چهار تیمار را نشان می‌دهد، بسیار ناچیز بوده (کمتر از ۴ درصد) و تخمین قابل‌قبول مدل را نشان می‌دهد. در مطالعه درزی و همکاران (۱۳۹۴) و حسن‌لی و همکاران (۱۳۹۴) این شاخص را بین ۷/۳۲ تا ۱۶/۳ درصد گزارش کردند که نشان می‌دهد نتیجه این پژوهش مطلوب بوده است.

مدل AquaCrop برای تمامی تیمارها اجرا شد و مقادیر مشاهده‌شده عملکرد محصول در مطالعه میدانی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل مقایسه شد. در شکل (۲) شبیه‌سازی خوب و رضایت‌بخش مدل AquaCrop در عملکرد محصول برای تیمارهای مختلف قابل مشاهده است. ضریب تبیین ۰/۸۶ بیانگر شبیه‌سازی مطلوب و صحت واسنجی انجام‌شده را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات انجام‌شده نیز در محدوده ۰/۸ تا ۰/۹۸ بوده و صحت این برآورد را تأیید می‌کند (Pirmoradian & Davatgar,. 2019; Xu et al., 2019؛ ذبیحی و همکاران، ۱۳۹۴).

مدل مذکور توانسته پیوستگی خوبی بین تیمارهای مورد مطالعه ایجاد کند و ضمن برآورد خوب در تیمار TI، تخمین عملکرد دانه قابل‌قبولی در تیمار AI_1، AI_3 و AI_5 را به ثبت برساند.



شکل (۲): مقایسه مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل AquaCrop

مقایسه بهره‌وری

به دلیل اهمیت میزان مصرف آب و بهره‌وری و همین‌طور عملکرد شلتوک نسبت به سایر اجزای عملکرد، جدول (۹) تهیه شده است تا این عامل را به‌وضوح نشان دهد. نتایج نشان داد که مدیریت‌های مختلف آبیاری نقش بسیار مهمی در صرفه‌جویی مصرف آب و همچنین بهره‌وری آب آبیاری داشته‌اند.

مقدار صرفه‌جویی مصرف آب تحت تأثیر اعمال آبیاری تناوبی در سه تیمار نسبت به شاهد بسیار قابل‌توجه بوده اما با این حال تیمار AI_1 با صرفه‌جویی ۳۴ درصدی و تیمار AI_5 با صرفه‌جویی ۵۶ درصدی در میزان آب به ترتیب حائز کمترین و بیشترین رتبه بودند. این نکته اثر خود را در بهره‌وری نشان خواهد داد.

نکته قابل‌تأمل این است که میزان عملکرد شلتوک دقیقاً روند عکس میزان مصرف آب را طی کرده است. یعنی آبیاری پنج روز بعد از ناپدید شدن آب (AI_5) کمترین کاهش عملکرد و تیمار AI_1 بیشترین کاهش عملکرد با مقدار ۱۵ درصد را داشته است. این امر بیانگر این موضوع است که مقدار عملکرد شلتوک تحت تأثیر تنش، بیشتر شده و آبیاری با دورهای مختلف تا پنج روز تأثیر چندانی بر میزان عملکرد شلتوک ندارد. در رژیم آبیاری یک، سه و پنج روز پس از ناپدید شدن آب از سطح خاک، ایجاد شرایط تهویه بهتر، بستر مناسب برای توسعه ریشه و جذب عناصر غذایی منجر به افزایش عملکرد شده است.

رژیم آبیاری پنج روز پس از ناپدید شدن آب سطحی با توجه به ۵۶ درصد کاهش مصرف آب، فقط ۱/۵ درصد کاهش عملکرد داشته و این نکته زمانی حائز اهمیت است که میزان بهره‌وری در این تیمار نسبت به شاهد بیش از دو برابر شده است. این رابطه بین دو تیمار دیگر در مقدار آب مصرفی، عملکرد شلتوک و بهره‌وری برقرار است.

از آنجایی که تیمار آبیاری پنج روز در میان تیمار برتر از لحاظ بهره‌وری شده و دوره تناوب خشکی بیشتر از آن اعمال نشد، لذا مدل AquaCrop برای تیمارهای ۷ و ۱۰ روزه نیز اجرا شد. نتایج نشان از عدم توانایی مدل در دوره‌های آبیاری تناوبی طولانی و کاهش شدید عملکرد و بهره‌وری می‌باشد. بنابراین کشت برنج در بازه طولانی و تناوب شدید خشکی توصیه نمی‌شود.

جدول (۹): بررسی درصد تغییرات مصرف آب، عملکرد و بهره‌وری تیمارهای مختلف نسبت به تیمار شاهد

تیمار	کاهش مصرف آب نسبت به شاهد (٪)	کاهش عملکرد شلتوک نسبت به شاهد (٪)	افزایش بهره‌وری آب نسبت به شاهد (٪)	افزایش بهره‌وری + بارندگی نسبت به شاهد (٪)
AI_1	۳۴/۴۵	۱۵/۷۱	۲۷/۹۱	۲۵/۰۰
AI_3	۴۵/۳۹	۷/۳۶	۶۸/۷۶	۶۱/۸۶
AI_5	۵۶/۰۷	۱/۴۷	۱۲۳/۱۴	۱۰۷/۰۷

با توجه به روند افزایشی میزان کاهش مصرف آب نسبت به تیمار شاهد در دورهای آبیاری بالاتر، میزان بهره‌وری افزایش یافته است. با این توضیح که تیمار AI_1 با ۲۷/۹۱ درصد، تیمار AI_3 به میزان ۶۸/۷۶ درصد و تیمار AI_5 با ۱۲۳/۱۴ درصد به ترتیب کمترین تا بیشترین افزایش بهره‌وری نسبت به تیمار شاهد را ثبت کرده‌اند. برای بهره‌وری با استفاده از بارندگی هم این روند تکرار شده است. با توجه به بحران‌های موجود در زمینه آب در چند سال گذشته که عمدتاً ناشی از کاهش نزولات جوی در اثر تغییرات آب و هوایی و نیز افزایش تقاضا برای آب بوده است، لازم است از منابع آبی موجود به بهترین نحو استفاده شود و با اعمال مدیریت صحیح آبیاری، بهره‌وری آب را در بخش کشاورزی تا حد ممکن افزایش داد.

Yang et al. (2017) و Monaco & Sali (2018) گزارش کردند که برنج نسبت به دیگر گیاهان زراعی تحت آبیاری، بیشترین سطح زیرکشت را دارا بوده و بازده آبیاری آن نیز نسبت به دیگر غلات کمتر است، به‌طوری‌که برای تولید یک کیلوگرم برنج مقدار مصرف آب از ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ لیتر متغیر بوده که حدوداً سه برابر بیشتر از گندم است. بنابراین با روش‌های مدیریت آب آبیاری می‌توان ضمن کاهش مصرف آب، بهره‌وری را ارتقا بخشید. با توجه به نتایج جدول (۶) و یافته‌های تحقیق، این امر امکان‌پذیر می‌باشد. لازم به ذکر است تیمار TI با مقدار ۷۴۹۰، تیمار AI_1 با ۴۹۱۰، تیمار AI_3 با ۴۰۹۰ و تیمار AI_5 با ۳۲۹۰ مترمکعب در هکتار به ترتیب بیشترین تا کمترین میزان مصرف آب را داشته‌اند. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر، نیازی به ارتفاع زیاد آب در سطح شالیزاری نبوده و می‌توان با توجه به شرایط منطقه و در صورت داشتن آب مطمئن، یکی از روش‌های مدیریت آبیاری با دورهای مختلف را در کشت برنج اعمال نمود. با اعمال این مدیریت می‌توان از صرفه‌جویی در مصرف آب (به مقدار حداقل ۲۵۸۰ تا حداکثر ۴۲۰۰ مترمکعب در هکتار)، افزایش بهره‌وری و در نهایت کاهش هزینه تولید و افزایش درآمد کشاورزان بهره‌مند شد. چون این روش نیازمند هزینه گزاف برای ایجاد سیستم نبوده و یک روش غیر سازه‌ای می‌باشد، انتظار بر این است که مورد توجه مسئولین امر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

اگرچه، آبیاری غرقابی به دلیل کنترل علف‌های هرز و ایجاد یک ذخیره مطمئن و نیز عملکرد بالا، مطلوب کشاورزان می‌باشد ولی الزاماً باعث افزایش عملکرد و بهره‌وری نمی‌شود و بسته به نوع رقم در برخی موارد استفاده از آبیاری تناوبی و یا اشباع نمودن خاک زراعی، موجب بهبود عملکرد برنج خواهد شد. افزایش روزافزون جمعیت و نیاز به مواد غذایی بیشتر، باعث فشار بر منابع آب به‌منظور تولید محصول شده است. یافتن روش‌هایی برای تولید بیشتر برنج در ازای مصرف کمتر آب، به‌منظور تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان و حفظ سلامت محیط‌زیست ضروری است. در این پژوهش تیمارهای مختلف مدیریت آبیاری اعمال شد و نتیجه نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین عملکرد دانه و بهره‌وری حاصل‌شده با توجه به مصرف بسیار کمتر آب بین تیمارهای با دور آبیاری طولانی با تیمار شاهد مشاهده نشد. به‌طورکلی خشک و تر کردن متناوب خاک می‌تواند بهره‌وری آب را افزایش داده و حتی باعث بهبود عملکرد نیز شود. تیمار آبیاری پنج روز پس از

ناپدید شدن آب در این تحقیق، نمونه بارزی در این باره می‌باشد. از طریق کاربرد هرگونه روش، مدیریت و فناوری‌های آبیاری مبتنی بر صرفه‌جویی آب، می‌توان روش کاشت غیر هوازی (غرقابی) برنج را به نیمه هوازی (تناوبی) تغییر داد. این تغییر روش تغییرات چشمگیری در حفظ آب، موجودیت مواد آلی و بهره‌وری خاک به وجود می‌آورد. این موارد بخش اول تحقیق حاضر را شکل می‌داد که نتایج آن کامل تشریح شد.

بخش دوم که اهمیت بیشتری دارد، استفاده از مدل‌های گیاهی نظیر AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه در شرایط تنش خشکی می‌باشد. هدف فائو از توسعه مدل AquaCrop، فراهم کردن ابزاری برای کمک به کشاورزان و مدیران جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری در سیستم‌های مختلف کشاورزی موجود در سراسر جهان است. بنابراین ارزیابی و اعتبارسنجی مدل به‌ویژه برای محصولات استراتژیک نظیر برنج ضروری است. در صورت واسنجی درست و ورود داده‌ها با دقت بالا، این مدل‌ها شاید بتوانند در شرایط اقلیمی مشابه با این پژوهش به‌راحتی استفاده شوند و عملکرد محصول برنج را در تیمار و مدیریت‌های مختلف آبیاری شبیه‌سازی کنند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و بررسی کارایی مدل با شاخص‌های ارزیابی، مدل AquaCrop دقت قابل‌قبولی در شبیه‌سازی عملکرد برنج با شرایط آبیاری تناوبی در اقلیم مرطوب شمال ایران را داشته و تحت سناریوهای مختلف قابلیت کاربرد دارد.

منابع

ابراهیمی پاک، ن.، اگدرنژاد، ا. و خدادادی دهکردی، د. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل Aquacrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تیمارهای کم‌آبیاری و کاربرد سطوح مختلف سوپر جاذب. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸ (۳): ۱۶۶-۱۸۴.

پورغلام آمیجی، م.، لیاقت، ع.، نازی قمشلو، آ. و خوش‌روش، م. ۱۳۹۷. اثر آب زیرزمینی کم‌عمق و شور روی رشد و زیست‌توده برنج. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۲ (۴): ۴۹۹-۵۱۶.

حسن‌لی، م.، افراسیاب، پ. و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل‌های AquaCrop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶ (۳): ۴۸۷-۴۹۸.

ذبیحی، ا.، درزی نفت چالی، ع. و خوش‌روش. م. ۱۳۹۴. عملکرد برنج تحت مدیریت‌های زهکشی سطحی و زیرزمینی و ارزیابی مدل آکواکراپ. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۵ (۲۰): ۱۴۹-۱۶۲.

ذبیحی، ا.، درزی نفت چالی، ع. و خوش‌روش. م. ۱۳۹۵. آنالیز اثر تنش خشکی بر عملکرد، کارایی مصرف آب و شوری ناحیه ریشه برنج. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۹ (۴): ۳۷۵-۳۸۵.

لیاقت، ع.، پورغلام آمیجی، م. و مشهوری نژاد، پ. ۱۳۹۷. اثر آبیاری سطحی و زیرسطحی با آب شور و مالچ بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت و توزیع املاح در خاک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۲ (۴): ۶۶۱-۶۷۴.

آمارنامه کشاورزی. ۱۳۹۸. وزارت جهاد کشاورزی. جلد اول-محصولات زراعی، سال زراعی ۹۷-۱۳۹۶، ۹۵ ص.

Abdul-Ganiyu, S., Kyei-Baffour, N., Agyare, W. A., & Dogbe, W. 2018. Evaluating the Effect of Irrigation on Paddy Rice Yield by Applying the AquaCrop Model in Northern Ghana. In Strategies for Building Resilience against Climate and Ecosystem Changes in Sub-Saharan Africa (pp. 93-116). Springer, Singapore.

Amiri, E., Razavipour, T., Farid, A & Bannayan, M. 2011. Effects of Crop Density and Irrigation Management on Water Productivity of Rice Production in Northern Iran: Field and Modeling Approach, Communications in Soil Science and Plant Analysis, 42 (17): 2085-2099.

Bhuiyan, S. I. 1992. Water management in relation to crop production: case study on rice. Outlook on Agriculture, 21 (4): 293-299.

Fadul, E., Masih, I., De Fraiture, C., & Suryadi, FX. (2020). Irrigation performance under alternative field designs in a spate irrigation system with large field dimensions. Agricultural Water Management, 231: 105989.

FAO. 2017. AquaCrop update and new features (Version 6.0), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Loague, K., & Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of contaminant hydrology, 7 (1-2): 51-73.

Monaco, F., & Sali, G. 2018. How water amounts and management options drive Irrigation Water Productivity of rice. A multivariate analysis based on field experiment data. Agricultural Water Management, 195: 47-57.

Mote, K., Rao, V. P., Ramulu, V., Kumar, K. A., & Devi, M. U. 2017. Standardization of alternate wetting and drying (AWD) method of water management in low land rice (Oryza sativa (L.)). International Journal of Plant Production, 11 (4): 515-532.

Pan, J., Y. z. Liu., X. Zhong., R. M. Lampayan., G.R. Singleton., N. Huang., K. Liang., B.Peng., & K. Tian. 2017. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N inputs in South China. Agriculture Water Management, 184: 191–200.

Pirmoradian, N., & Davatgar, N. 2019. Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. Agricultural water management, 213: 97-106.

Singh, R., Helmers, M. J., & Qi, Z. 2006. Calibration and validation of DRAINMOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile landscapes. Agricultural Water Management, 85 (3): 221-232.

Tuong, T. P., Bouman, B. A. M., & Mortimer, M. 2005. More rice, less water–integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice based systems in Asia. Plant Production Sciences, 8 (3): 229-239.

Xu, J., Bai, W., Li, Y., Wang, H., Yang, S., & Wei, Z. 2019. Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. Agricultural Water Management, 213: 289-297.

Yang, J., Zhou, Q., & Zhang, J. 2017. Moderate wetting and drying increases rice yield and reduces water use, grain arsenic level, and methane emission. The Crop Journal, 5(2): 151-158.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال یازدهم. شماره چهل و یکم. پاییز۱۳۹۹

Evaluation of AquaCrop Model for Estimating Rice Yield under Alternative Irrigation

Masoud Pourgholam-Amiji[1], Abdolmajid Liaghat[2], Mojtaba Khoshravesh[3]

Abstract

Rice production in northern region of Iran which is strategically and economically very important, requires irrigation management changing with traditional irrigation method (flood irrigation). Plant models that can simulate crop yield in different irrigation management and different conditions will be very beneficial in terms of time and cost. The latest version of the AquaCrop model was used in this study. In this regard, a research was conducted in summer of 2018 to investigate the effect of different levels of irrigation on water consumption, rice yield and water productivity in paddy field of Babolsar, Mazandaran, Iran. The experiment was performed in the field in a randomized complete block design with three replicates and four treatments in 12 plots. The treatments were TI (Traditional/flood Irrigation), AI1, AI3 and AI5 (Alternative Irrigation one, three and five days after disappearance of water from the soil surface, respectively). After applying different irrigation practices and recording the amount of cumulative water given to the treatments, grain yield and water productivity were also determined. To quantify and verify the effects of different water management on rice yield, calibration, validation and sensitivity analysis of the model was performed based on field measurements. After calibration, the model was performed for the four treatments and the results showed that the model could simulate the yield of the product for irrigation management with high accuracy (0.81<d and 0.86<R2). The relative error of the AquaCrop model for the estimation of yield in TI, AI_1, AI_3 and AI_5 treatments was calculated to be 1.98, 7.17, 2.25 and -3.75, respectively. Average of Root Mean Square Error was obtained at 0.233 t/ha. Therefore, due to the acceptable simulation of AquaCrop model in crop yield estimation, its use in different irrigation management, soil moisture stress and in similar climatic conditions to this research is recommended.

Keywords: Flood Irrigation, Productivity, AquaCrop, Rice, Simulation.

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. (Email: Mpourgholam6@ut.ac.ir)
2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. (Email: Aliaghat@ut.ac.ir) (Corresponding Author)
3- Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. (Email: Khoshravesh_m24@yahoo.com)