

واسنجی و ارزیابی عملکرد مدل آکواکراپ در مدیریت مقدار و زمان اعمال کم آبیاری در گندم

فهیمة شیرشاهی^۱، حسین بابازاده^{۲*}، نیازعلی ابراهیمی پاک^۳ و یعقوب زراعت کیش^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- ۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. h_babazadeh@hotmail.com
- ۳- دانشیار بخش آبیاری موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
- ۴- دانشیار، گروه اقتصاد کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۲۵

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۳۰

چکیده

برنامه ریزی بهینه آبیاری از مولفه‌های اصلی ارتقای کارایی مصرف آب و عملکرد محصول است. مدل‌هایی مثل آکواکراپ که اثرات مقادیر آب بر روی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کنند، ابزارهای مفیدی در بهینه‌سازی مصرف آب در مزرعه می‌باشند. برای بررسی این ویژگی، آزمایشی با ۵ تیمار آبیاری به ترتیب با عمق آبیاری برابر ۱۰۰، ۸۵، ۷۰، ۵۵ درصد تبخیر-تعرق حاصل از لایسیمتر و بدون آبیاری در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در شهرکرد اعمال شد. به منظور ارزیابی تنش آبی در گندم، دوران رشد آن به شش دوره جوانه‌زنی، پنجه‌زنی، ساقه‌دهی، گلدهی، شیری و خمیری و رسیدن گیاه تقسیم شد. مقدار RMSEn در شبیه‌سازی عملکرد دانه کمتر از ۱۰٪ یعنی در واسنجی ۶/۲ و ۷/۷ و اعتباریابی در جوانه‌زنی، پنجه‌دهی، رشد شیری-خمیری و رسیدگی به ترتیب ۲/۱، ۴/۹، ۹/۷ و ۹/۸ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده ایده‌آل بودن مدل‌سازی می‌باشد. نهایتاً مدل به عنوان ابزاری قدرتمند در مدیریت بهینه آبیاری توصیه می‌شود.

کلید واژه‌ها: آکواکراپ، مراحل رشد، عملکرد، کم آبیاری.

مقدمه

(2002). مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی بدون توجه به روابط آب، خاک و گیاه نیازمند صرف وقت و هزینه بوده و همچنین به علت محدودیت این آزمایش‌ها به شرایط مزرعه، کوتاه بودن مدت آزمایش و محدودیت تعداد سناریوهایی که توسط آزمایش بررسی می‌شوند، مدل‌های روابط آب، خاک و گیاه توسعه یافته‌اند. مدل آکواکراپ (Aquacrop) از طریق جداسازی سهم مولد تولید یعنی تعرق، از تبخیر و تعرق و میزان کل ماده خشک تولیدی و به واسطه شاخص برداشت، مقادیر شاخص بهره‌وری آب (تعرق) و عملکرد محصول را در گام‌های زمانی روزانه برآورد می‌کند. همچنین، مدل آکواکراپ، مدلی فراگیر است. زیرا می‌تواند برای تعداد زیادی از محصولات مختلف همچون غلات، گیاهان غده‌ای، گیاهان روغنی، علوفه و... به کار گرفته شود. این مدل، پارامترهای ثابتی را به عنوان پیش فرض دارد که امکان استفاده از آن را برای افراد مبتدی فراهم می‌نماید. تحقیقاتی در ایران و جهان به منظور واسنجی مدل در مناطق مختلف و برای گیاهان مختلف انجام گرفته که گزیده‌ای از آن‌ها به شرح زیر می‌باشد:

کاهش شدید منابع آب، تغییرات اقلیمی و به دنبال آن سیاست‌گذاری‌ها برای کاهش آب تخصیصی به بخش کشاورزی موجب شده که مدیریت مصرف آب در این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردد. برای اصلاح الگوی مصرف آب کشاورزی، آگاهی از رابطه آب و عملکرد محصول و اثر آن بر روند رشد ضروری است. تبخیر-تعرق از فاکتورهای اصلی رشد و نمو محصولات کشاورزی است و به دو مؤلفه تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه جدا می‌شود. آن چه که به عنوان بخش مولد گیاه محسوب می‌شود، ناشی از تعرق گیاه و بخش پوشش سبز آن است. هنگامی که نیاز آبی گیاه تأمین نشود میزان تبخیر-تعرق واقعی گیاه از تبخیر-تعرق پتانسیل که در شرایط آبیاری کامل رخ می‌دهد کمتر شده و به گیاه تنش خشکی وارد می‌شود و عملکرد گیاه کاهش می‌یابد (Dirk, 2002). اگر منابع آب محدود باشد، برای مصرف بهینه آب باید نوع گیاه، مرحله رشد و نوع خاک در نظر گرفته شود و برای اعمال کم آبیاری مقادیر قابل اعتمادی از میزان رطوبت خاک، تنش رطوبتی گیاه و تابع تولید محصول به دست آورد (Zarea Fizabadi and Ghodsi,)

اعمال کم آبیاری، (Salemi et al., 2011) تحقیقی به انجام رسانده‌اند و میزان پارامترهای ارزیابی مدل (به عنوان مثال ریشه میانگین مربعات خطا را برابر با ۲/۳۱ کیلوگرم در هکتار)، رضایت بخش اعلام نموده‌اند.

در پژوهشی در مرکز موراگو به منظور ارزیابی توانایی مدل آکواکراپ در شبیه سازی تبخیر-تعرق واقعی (Eta)، رطوبت خاک (TWC)، عملکرد دانه گندم زمستانه (GY) در آبیاری غرقابی و در مناطق نیمه خشک (Toumi et al., 2016) دریافتند مدل در مرحله واسنجی با مقدار پارامتر خطای به دست آمده برای پوشش گیاهی، تبخیر-تعرق، رطوبت خاک و GY به ترتیب ۴/۶٪، mm/day 23/0، 56/17 و 05/0 ton/ha و مقادیر به دست آمده برای پارامتر مذکور در مرحله صحت‌سنجی برای پوشش گیاهی، تبخیر-تعرق، رطوبت خاک و GY به ترتیب ۷/۸۹٪، mm/day 01/0-، 5/0 و 06/0 ton/ha دارای راندمان شبیه‌سازی بالایی بوده و باقی پارامترهای خطا نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی این چند ویژگی بوده‌اند. (Montoya et al., 2016) با یک آزمایش دو ساله ثابت کرد مدل با دقت قابل قبولی ($R^2 > 0.9$) قادر به شبیه‌سازی اجزای عملکرد گیاه است. به منظور پیشگیری از بیش برآورد بایستی ضریب تنش گرمایی به منظور تعدیل شاخص برداشت (HI) بالا باشد. همچنین (Jin et al., 2014) با واسنجی و صحت‌سنجی مدل آکواکراپ برای گندم پاییزه در شمال چین نشان دادند که میزان ضریب تعیین مدل در شبیه‌سازی پوشش گیاهی (CC)، بیوماس (BY) و عملکرد دانه (GY) به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۹۱ و ۰/۹۳ بوده و مدل را به عنوان ابزاری قدرتمند در تصمیم‌گیری برای تعیین اثر تاریخ‌های مختلف کاشت و برنامه‌های مختلف آبیاری توصیه نموده‌اند.

(Heng et al., 2009) با استفاده از مدل آب-محصول آکواکراپ به شبیه‌سازی رشد ذرت پرداخته و نتایج مدل را با نتایج حاصل از مزرعه مورد مقایسه قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که مدل، در شبیه‌سازی میزان کل ماده خشک، دانه و سطح سایه‌انداز، در شرایط بدون تنش آبی، نتایج رضایت‌بخشی را به دست می‌دهد. اما میزان دقت آن با وارد شدن تنش آبی، به خصوص در دوره پیری کمتر شد. (Todrovic et al., 2009) در جنوب ایتالیا با کشت آفتابگردان تحت رژیم‌های مختلف آبیاری طی سه فصل زراعی (۲۰۰۵-۲۰۰۷) و ارزیابی نتایج با مدل‌های آکواکراپ، کراپ سیس (CropSyst) و ووفاست (WOFOST) به این نتیجه رسیدند که مدل آکواکراپ، ضمن نیاز به داده‌های کمتر، مقدار عملکرد محصول و کل ماده خشک را بهتر از دو مدل دیگر برآورد می‌نماید. (Geerts et al., 2009) با کاشت گیاه بومی کوئینوا طی سه فصل زراعی (۲۰۰۷-۲۰۰۴) در بولیوی و شبیه‌سازی دوره رشد آن با مدل آکواکراپ پرداختند. مدل به-خوبی توانست کاهش شاخص برداشت را طی دوره

کاربرد نرم‌افزار آکواکراپ در تحلیل نتایج مزرعه‌ای آزمایش‌های آبیاری محدود گندم دیم، حاکی از قابلیت‌های این نرم‌افزار در برآورد عملکرد، موازنه آب خاک و درصد پوشش گیاهی است. در این راستا Liaghat، Tavakoli و Alizadeh (2014) با انجام پژوهشی در لرستان میانگین انحراف نرمال شده مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده برای درصد پوشش گیاهی، مقدار آب خاک و عملکرد دانه را به ترتیب برابر ۸/۵۳، ۱۰/۳۴ و ۸/۳۴ درصد به دست آورده‌اند که مطلوب به نظر می‌رسد. ضریب کارایی مدل در تخمین عملکرد، موازنه آب خاک و درصد پوشش سبز به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۷۸ و ۰/۹۲ گزارش شده است. شاخص سازگاری نزدیک به یک بوده که نشان از سازگاری مقادیر رطوبت آب خاک، عملکرد دانه و درصد پوشش گیاهی در مدل با مقادیر واقعی داشته است. در نهایت اعلام داشته‌اند که این مدل تخمین تاریخ مناسب کاشت را برای شرایط دیم فقط منوط به عامل بارش و وقوع میزان مشخص آن کرده است و از این رو نمی‌تواند برای مناطق سرد و نیمه سرد کارآمد باشد، اما در بقیه موارد نتایج نشان‌دهنده توانمندی مدل در تخمین مناسب عملکرد تحت شرایط دیم و آبیاری محدود است.

Heydarinia، Naseri و Naseri (2012) به امکان‌سنجی استفاده از مدل آکواکراپ در برنامه‌ریزی آبیاری برای گیاه آفتابگردان در اهواز پرداختند. نتایج شاخص‌های آماری نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد داشته است، به‌عنوان مثال میزان مجذور مربعات خطای بین عملکرد مشاهده‌شده و اندازه‌گیری شده کمتر از ۵ درصد بوده است. (Alizadeh et al., 2010) با اعمال کم‌آبیاری روی گندم در منطقه کرج بر روی پنج تیمار با ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد نیاز آبی و همچنین یک تیمار تک‌آبیاری و ارزیابی مدل آکواکراپ برای این تیمارها نتیجه گرفتند که برای دور آبیاری ۷روز، مدل در پیش‌بینی مقدار عملکرد دانه، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب، قابلیت خوبی را نشان داده است. اما کارایی مدل برای تیمارهای با دور آبیاری ۱۴روز کمتر بوده است.

(Salemi et al., 2011) با اعمال کم‌آبیاری بر روی گندم زمستانه در حوضه رودخانه گاوخونی در اصفهان و مقایسه آن با نتایج مدل آکواکراپ نتیجه گرفتند که مدل در شبیه‌سازی سطح سایه‌انداز، مقدار دانه و بهره‌وری آب در شرایط تنش آبی عملکردی عالی داشته است به-طوری که ضریب تعیین (R^2) بیشتر از ۰/۹ و سایر خطاها از جمله ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۲/۳۱ درصد است. (Babazadeh and Saraei Tabrizi, 2012) طی پژوهشی روی گیاه سویا در کرج نشان دادند که این مدل در شبیه سازی عملکرد محصول، تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب، عملکرد قابل قبولی دارد و می‌تواند مقدار تبخیر-تعرق را با خطای کمتر از چهار درصد شبیه‌سازی کند. در اصفهان به منظور بررسی قابلیت مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد و پوشش گیاهی گندم پاییزه تحت

طریق مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور بررسی دقت آن در پیش‌بینی پارامترهای مختلفی همچون میزان دانه گندم و مقدار کل ماده خشک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

۲-۱- تشریح شرایط مزرعه

این آزمایش در ایستگاه تحقیقاتی چهار تخته شهرکرد در عرض جغرافیایی ۳۲/۱۸ درجه و طول جغرافیایی ۵۰/۵۶ درجه و ارتفاع ۲۰۶۶ متری از سطح دریا در سال‌های ۱۳۷۵-۱۳۷۶ انجام گردیده است. خاک محل اجرای طرح از نظر خصوصیات فیزیکی در شش عمق، ۰ تا ۲۵ و ۲۵ تا ۵۰ و ۵۰ تا ۷۵ و ۷۵ تا ۱۲۰ و ۱۲۰ تا ۱۴۰ و ۱۴۰ تا ۱۸۵ سانتی‌متر از سطح زمین مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آن در جدول (۱) نشان داده شده است. خاک این ناحیه آزمایش از نظر شیمیایی و حاصلخیزی در دو عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری از سطح زمین مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است. آب مورد استفاده در آزمایش مورد تجزیه قرار گرفت که نتایج حاصل از آن در جدول (۳) ارائه شده است.

خشکی اعمالی، در دوره پرشدن دانه‌ها شبیه‌سازی نماید. مقادیر ضریب تعیین برابر ۰/۸۷ و ۰/۸۳ به ترتیب برای مقدار کل ماده خشک و عملکرد دانه، تحت رژیم‌های مختلف آبیاری به دست آمد. Araya et al., (2010) طی فصل کشت جو (۲۰۰۸، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۹) در ایتوپیا با اعمال سناریوهای آبیاری کامل و کم‌آبیاری و شبیه‌سازی آن با مدل آکواکراپ چنین نتیجه گرفتند که مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه و مقدار کل ماده خشک، تحت شرایط کم‌آبیاری، بیش‌برآورد می‌نماید.

از آن‌جا که این مدل، توسط فائو در حال توسعه و بروز رسانی است و در ضمن نیاز به پارامترهای کمتر در مقایسه با دیگر مدل‌ها، از توانایی بالاتری در برآورد عملکرد گیاهی برخوردار می‌باشد، لذا واسنجی مدل در مناطق مختلف، ضروری به نظر می‌رسد.

اگر چه از زمان توسعه نسخه چهار مدل آکواکراپ مطالعاتی در زمینه ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی اثر کم آبیاری بر محصولات مختلف انجام گرفته است ولی تمرکز بر این نکته که مدل نسبت به تنش آبی در دوره‌های مختلف رشد چه واکنشی دارد، تحقیقات جامعی صورت نگرفته است. لذا مهم‌ترین هدف این تحقیق، واسنجی و ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی واکنش عملکرد گندم در شرایط کم‌آبیاری در دوره‌های مختلف رشد گیاه در اقلیم شهرکرد از

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک محل انجام آزمایش

عمق به سانتی‌متر	۰-۲۵	۲۵-۵۰	۵۰-۷۵	۷۵-۱۲۰	۱۲۰-۱۴۰	۱۸۵-۱۴۰
ظرفیت نگه‌داری رطوبت مزرعه (درصدوزنی)	۲۲/۵	۲۳	۱۷/۲	۱۷/۲	۱۹/۲	۲۰/۶
نقطه پژمردگی خاک PWP	۱۲/۷	۱۲/۹	۷/۸	۷/۸	۹/۷	۱۰/۱
جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	۱/۳۴	۱/۵۷	۱/۷۸	۱/۶۷	۱/۶۹	۱/۶۷
بافت خاک	Silty-clayLoam	SiltyLoam	SandyLoam	SandyLoam	SiltyLoam	SiltyLoam

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی خاک ناحیه آزمایش

نمونه	عمق نمونه برداری (cm)	درصد اشباع	هدایت الکتریکی (dS/m)	واکنش کل اشباع (pH)	درصد مواد خنثی شونده (%)	کربن آلی (%)	ازت کل (%)	فسفر قابل جذب (ppm)	پتاسیم قابل جذب (ppm)
۱	۰-۳۰	۴۵	۰/۳۵	۸/۰۷	۴۰/۴	۰/۵۵	٪۷	۸/۱۵	۳۸۴
۲	۳۰-۶۰	۵۲	۰/۳۲	۸/۰۷	۳۸	۰/۴۸	٪۷/۲	۷/۷	۲۹۳

جدول ۳- تجزیه شیمیایی آب مورد استفاده در آبیاری

میلی اکی والان در لیتر									هدایت الکتریکی	
مجموع کاتیون‌ها	سدیم	منیزیم	کلسیم	مجموع آنیون‌ها	سولفات	کلر	بی کربنات	کربنات	اسیدیته pH	EC×۱۰ ^{-۶} میکرو موس بر سانتی‌متر
۷/۵	۰/۷	۳/۴	۳/۴	۴/۱	۰/۸	۰/۴	۲/۹	-	۷/۷	۳۷۰

- ۱- تیمار E0: آبیاری برابرصد درصد تبخیر و تعرق حاصل از لایسیمتر گندم.
- ۲- تیمار E1: آبیاری براساس ۸۵ درصد تبخیر و تعرق حاصل از لایسیمتر گندم.
- ۳- تیمار E2: آبیاری براساس ۷۰ درصد تبخیر و تعرق حاصل از لایسیمتر گندم.
- ۴- تیمار E3: آبیاری براساس ۵۵ درصد تبخیر و تعرق حاصل از لایسیمتر گندم.
- ۵- تیمار E4: بدون آبیاری .

اعمال تنش در دوره‌های اشاره شده بدین گونه بوده که در زمان اعمال تنش آبی بر روی T1 دوره‌های رشد T2 و T3 و T4 و T5 و T6 براساس ۱۰۰ درصد تبخیر و تعرق واقعی گندم آبیاری شده و در دوره رشد T2، دوره‌های رشد T1 و T3 و T4 و T5 و T6 براساس ۱۰۰ درصد تبخیر و تعرق حاصل از لایسیمتر گندم آبیاری شده است و در دوره رشد T3 دوره رشد و T1 و T2 و T4 و T5 و T6 بر اساس ۱۰۰ درصد تبخیر و تعرق حاصل از لایسیمتر گندم آبیاری شده است و الی آخر تا دوره T6 که مطابق دوره‌های رشد قبلی بوده است. برای هر کرت صفات بیولوژیکی لازم (ارتفاع بوته، طول خوشه، تعداد دانه در خوشه، وزن خوشه، وزن دانه‌های خوشه) اندازه‌گیری شد. به‌منظور تعیین وزن کل (کاه و دانه) عملیات برداشت در ارتفاع دو سانتی‌متری ساقه از سطح زمین صورت گرفته است. در جدول (۴) پارامترهای گیاهی مربوط به گندم به طور خلاصه ارائه شده است.

نتایج تجزیه شیمیایی خاک مزرعه و آب نشان می‌دهد که از نظر شوری و قلیابیت محدودیتی وجود ندارد. لایه شنی موجود در اعماق ۶۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر مانند یک زهکش طبیعی عمل نموده و بنابراین سطح ایستابی در ناحیه عمق ریشه در سراسر سال دیده نمی‌شود. طرح به‌صورت بلوک کاملاً تصادفی در پنج سطح آبیاری به‌طور جداگانه در شش مرحله رشد شامل جوانه‌زنی، پنجه‌دهی، ساقه‌دهی، گل‌دهی، شیری و خمیری دانه و در سه تکرار به مدت سه سال زراعی در شهرکرد انجام شد (شکل ۱). قطعات آزمایشی پس از دیسک و ماله‌کشی با ایجاد کرت‌های آزمایشی برابر با $4 \times 2/5$ متر اعمال گردید و فاصله بین دو کرت مجاور $2/5$ متر بود که از آن به‌عنوان ضریب اطمینان عدم نفوذ آب استفاده شد و انتهای کرت‌ها بسته بود. بنابراین هیچ گونه تلفات سطحی آب وجود نداشت. در هر کرت آزمایشی ۱۲ خط کشت به طول ۴ متر و فاصله ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای تعیین نیاز آبی گیاه از یک لایسیمتر زهکش‌دار به عمق ۳ متر و قطر دو متر که در کنار طرح قرار داشت و در داخل و اطراف آن از گندم وارسته الوند مشابه طرح تحقیقاتی همزمان کشت‌شده، استفاده گردید. تغییرات رطوبتی خاک از طریق نوترون‌متر اندازه‌گیری و میزان رطوبت محاسبه گردید. چنانچه رطوبت خاک داخل لایسیمتر به مقدار کاهش رطوبت مجاز گندم می‌رسید، مقدار ETC یا تبخیر و تعرق گندم به روش بیلان رطوبتی در لایسیمتر زهکش‌دار محاسبه می‌گردید پس از تعیین تبخیر و تعرق واقعی گیاه مقادیر آب آبیاری از طریق کنتور آب با دقت بالا اندازه‌گیری شده و در اختیار هر کرت قرار داده می‌شد و با اعمال تنش‌ها به شرح زیر، آبیاری کرت‌های آزمایشی انجام می‌گرفت.

E0T1	E4T5	E1T4	E3T3	E2T5
E0T5	E4T6	E1T6	E3T2	E2T2
E0T3	E4T3	E1T1	E3T1	E2T5
E0T4	E4T4	E1T3	E3T6	E2T4
E0T2	E4T1	E1T5	E3T5	E2T3
E0T6	E4T2	E1T2	E3T4	E2T1
E1T4	E3T3	E0T1	E2T5	E4T5
E1T6	E3T2	E0T5	E2T2	E4T6
E1T1	E3T1	E0T3	E2T5	E4T3
E1T3	E3T6	E0T4	E2T4	E4T4
E1T5	E3T5	E0T2	E2T3	E4T1
E1T2	E3T4	E0T6	E2T1	E4T2
E2T5	E4T5	E3T3	E1T4	E0T1
E2T2	E4T6	E3T2	E1T6	E0T5
E2T5	E4T3	E3T1	E1T1	E0T3
E2T4	E4T4	E3T6	E1T3	E0T4
E2T3	E4T1	E3T5	E1T5	E0T2
E2T1	E4T2	E3T4	E1T2	E0T6

شکل ۱- شماتیک طرح آزمایشی

جدول ۴- پارامترهای گیاهی مربوط به گندم

پارامتر	واحد	گندم
زمان جوانه زنی		۱۷
زمان گل دهی		۱۷۵
زمان حداکثر پوشش گیاهی	روز پس از کاشت	۱۹۱
زمان شروع پیری پوشش گیاهی		۲۰۱
زمان رسیدگی فیزیولوژیکی		۲۶۵
زمان حداکثر عمق توسعه ریشه		۹۷
طول دوره گلدهی	(روز)	۱۳
ماکزیم عمق ریشه	(cm)	۱۰۰
پوشش گیاهی اولیه	(درصد)	۳/۳۷
حداکثر پوشش گیاهی	(درصد)	۸۰

۲-۲- تئوری مدل آکواکراپ

مدل آکواکراپ، همچون کراپوات (Cropwat)، از معادله (Doorenbos and Kassam 1979) (معادله ۱) که در آن ET نسبی، اساس محاسبه عملکرد می باشد، استفاده می کند.

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

در این معادله، Y_x عملکرد حداکثر، Y_a عملکرد واقعی، ET_x تبخیر و تعرق حداکثر، ET_a تبخیر و تعرق واقعی و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر و تعرق می باشد. در واقع، آکواکراپ با جداسازی تبخیر از تعرق، توسعه یک مدل ساده رشد و پیری تاج پوشش گیاهی به عنوان پایه برآورد تعرق و جداسازی آن از تبخیر، شبیه سازی عملکرد نهایی (Y) به عنوان تابعی از زیست توده نهایی (B) و شاخص برداشت (HI) و تفکیک اثرات تنش آبی در چهار جزء رشد پوشش تاجی گیاه، پیری پوشش تاجی گیاه، بسته شدن روزنه ها و کاهش تعرق و شاخص برداشت توسعه یافته است. جداسازی ET به تعرق (Tr) و تبخیر (E)، از اثر مصرف غیر تولیدی آب توسط تبخیر به خصوص در زمانی که شرایط پوشش گیاهی کامل نیست جلوگیری می کند. تعرق روزانه (Tri) با استفاده از ET_o روزانه و بهره وری آب (WP) که با استفاده از نیاز تعرقی و غلظت دی اکسید کربن نرمال شده است، به وزن زیست توده قسمت هوایی گیاه تبدیل می شود. معادله (۲) بیانگر این رابطه می باشد:

$$B_i = WP^* \left(\frac{Tri}{ET_{oi}}\right) \quad (2)$$

در این معادله، B_i وزن تولید شده قسمت هوایی گیاه در روز i برحسب $Tri, gr.m^{-1}$ مقدار تعرق روزانه (ET_{oi}, mm) تبخیر و تعرق گیاه مرجع در روز i برحسب (WP^*, mm) بهره وری آب نرمال شده برحسب $g.m2$ و مقدار آن در شرایط اقلیمی مشابه، برای گیاهان C3 و همچنین گیاهان C4 ثابت و برابر است (Steduto, Hsiao and Fereres, 2007).

لذا رسیدن از معادله (۱) به معادله (۲)، دلالت بر صحت و عمومی بودن مدل دارد. برتری دیگر معادله (۲) نسبت به معادله (۱)، شبیه سازی فرایندهای رشد گیاه با استفاده از گام های زمانی روزانه است. در حالی که این شبیه سازی، در معادله (۱)، به صورت ماهانه یا فصلی انجام می گیرد.

برای محاسبه عملکرد از زیست توده، مدل از رابطه زیر استفاده می کند:

$$Y = f_{HI} \times HI_0 \times B \quad (3)$$

که در آن HI_0 ، Y و به ترتیب شاخص برداشت مرجع، عملکرد دانه و ضریب تنظیم شاخص برداشت می باشند.

در تمامی دوران رشد گیاه، مقدار آب ذخیره شده در ناحیه ریشه از طریق بیلان آبی جریان آب ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی (رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق) در ناحیه ریشه شبیه سازی می شود. شدت ضرایب تنش بر پارامترهای گیاهی

به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می شود. به علاوه بعضی جنبه های مدیریتی و عملکرد نهایی با تاکید بر تأثیر آن ها بر

توسعه رشد گیاه، بهره‌وری آب و تعدیل محصول به تنش‌ها بیان می‌شود. در پایان میزان زیست توده و شاخص HI تنظیم شده محاسبه می‌گردد (Alizadeh et al., 2010).

۳-۲- ورودی‌های مدل

ورودی‌های مدل شامل چهار دسته اطلاعات اقلیمی، گیاه، مدیریت و خاک است. داده‌های اقلیمی حداقل و حداکثر دما، بارش و تبخیر و تعرق مرجع به صورت روزانه است. اطلاعات اقلیمی مورد نیاز از داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک شهرکرد استفاده و تبخیر و تعرق مرجع نیز براساس روش فائو پنمن مانیتث و با استفاده از برنامه‌ی محاسبه‌گر تبخیر و تعرق مرجع (ET0 Calculator) محاسبه شد. میانگین سالیانه غلظت CO2 برای سال ۱۹۹۲ تا سال ۱۹۹۵ به صورت آماده در مدل (اندازه‌گیری شده در رصدخانه مائونا در هاوایی) وجود دارد.

سیستم اطلاعات گیاهی از دو بخش پارامترهای رشد گیاه بدون تنش‌های شوری، کم‌آبی و کود، میزان تولید گیاهی و بخش معرفی اثر تنش‌های آبی، حاصلخیزی، شوری و دمای هوا بر رشد گیاه می‌باشد. در مدل برای گندم به صورت پیش‌فرض فایل اطلاعات گیاهی گنجانده شده است که برخی پارامترها ثابت بوده و برخی از آن‌ها توسط کاربر به مدل معرفی می‌گردد. پارامترهای ثابت برای شرایط موجود معمولاً در بخش واسنجی تعدیل و تنظیم می‌گردند. در این مطالعه از پارامترهای پیش فرض مدل استفاده شد. داده‌های مربوط به دوره‌های رشد و تراکم کشت به مدل معرفی و حداکثر پوشش تاجی (CCx) با استفاده از داده‌های تراکم کشت (۲۵۰۰۰۰ بوته در هکتار) تعدیل و تنظیم شد. تنش آبی بسته به شدت و زمان تنش و میزان مقاومت محصول، شاخص برداشت را کاهش و یا افزایش می‌دهد (Steduto, Hsiao and Hsiao et al., 2009; Fereres, 2007). تنش آبی در دوره قبل از گل‌دهی سبب افزایش شاخص برداشت و وقوع تنش در دو دوره گل‌دهی و پس از آن ممکن است برای جلوگیری از رشد برگ اثر مثبت و یا به سبب بسته شدن روزنه‌ها اثر منفی بر شاخص برداشت داشته باشد.

اجزای مدیریت شامل دو قسمت مدیریت آبیاری و مدیریت زراعی است. اطلاعات خاک شامل ویژگی‌های هیدرولیکی و فیزیکی خاک است که برای هر لایه از نیمرخ خاک وارد مدل می‌شود.

۴-۲- ارزیابی

به منظور ارزیابی کارایی مدل آکواکراپ، از برخی مشخصه‌های آماری، برای مقایسه مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده استفاده گردید. عبارت است از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE)، حداکثر خطا (ME) و شاخص سازگاری (Index)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (۴)$$

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

$$ME = \text{MAX}(|O_i - P_i|)_{i=1}^n \quad (۶)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}| + |P_i - \bar{O}|)^2} \quad (۷)$$

در معادلات بالا، O_i مقدار مشاهده شده، P_i مقدار پیش‌بینی شده و \bar{O} ، متوسط مقدار مشاهدات می‌باشد. RMSE مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده را از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. هر چه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی بهتر عمل نموده است. براساس تعریف، قدرت پیش‌بینی مدل در صورتی که مقدار RMSE کمتر از ۱۰٪ باشد، عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰٪ باشد، خوب، بین ۲۰ تا ۳۰٪ متوسط و اگر بالاتر از ۳۰٪ باشد، ضعیف برآورد می‌شود (Rinaldy, Losavio and Flagella, 2003). توصیفی است که مقدار آن بین صفر و یک تغییر می‌کند. نزدیک‌تر بودن مقدار d به یک، نشان از سازگاری بیشتر مدل با مقادیر واقعی دارد (Willmott, 1982). مقدار زیاد ME نشان‌دهنده وقوع حداکثر خطا در مدل است.

نتایج و بحث

هدف از واسنجی عملکرد، تنظیم ورودی‌های مدل گیاهی برای تطبیق نتایج با مقادیر مشاهده‌ای است. عملکرد حاصل از پیش‌بینی مدل باید با عملکرد مشاهده‌ای در تیمارهای مختلف کمترین اختلاف را داشته باشند که با اجرای مدل و مقایسه عملکرد حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر مقایسه‌ای و با تکرار آن تا رسیدن به حداقل اختلاف میسر می‌شود.

جدول ۵- مهمترین پارامترهای گیاهی جهت واسنجی مدل آکواکراپ

ردیف	پارامتر	واحد	مقدار پارامتر
۱	دمای پایه رشد	C°	۰
۲	حد بالای دما	C°	۳۰
۳	ضریب رشد پوشش تاجی (CGC)	/day%	۰/۰۴
۴	ضریب کاهش پوشش تاجی (CDC)	/day%	۰/۰۴
۵	ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل (KcTr,x)		۱/۴
۶	حداکثر پوشش گیاهی (CCx)		۰/۸۷
۷	کاهش پوشش تاجی		۴/۷۵
پارامترهای تعیین واکنش گیاه به تنش آبی			
۸	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی		۰/۱۰
۹	آستانه پایین ضریب تنش آبی برای گسترش تاجی گیاه		۰/۵۵
۱۰	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها		۰/۵
۱۱	ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها		۲/۵
۱۲	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی		۰/۴۵
۱۳	ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی		۲/۵
پارامترهای تولید محصول			
۱۴	بهره‌وری آب نرمالیز شده (WP*)	gr/m ²	۱۴
۱۵	شاخص برداشت مرجع (HI0)	%	۳۶

جدول ۶- شاخص‌های آماری واسنجی و اعتباریابی مدل در شبیه‌سازی مدل آکواکراپ

d	Ttest	ME	MAE	RMSE _n (%)	RMSE (Kg/ha)	دوره رشد
۰/۹۹	۰/۳۵	۸/۶	-۷۸/۵۳	۶/۲	۲۷۱/۷	ساقه‌دهی
۰/۹۸	۰/۳۵	۱۸/۹	۳۳/۲۰	۷/۷	۳۲۸/۳	گل‌دهی
۰/۹۸	۰/۲۹	۳/۳	۹۱/۷۳	۲/۱	۱۰۸/۵	جوانه‌زنی
۰/۹۵	۰/۲۱	۸/۴	۱۶۰/۳۳	۴/۹	۲۵۶/۶	پنجه‌زنی
۰/۹۸	۰/۴۲	۵/۰	-۲۰۱	۹/۷	۴۳۹/۰	رشد خمیری
۰/۹۸	۰/۴۵	۱/۹	-۲۳۸/۴۷	۹/۸	۴۴۳/۳	رسیدگی

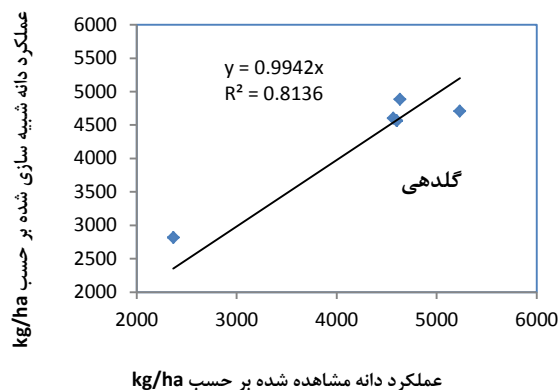
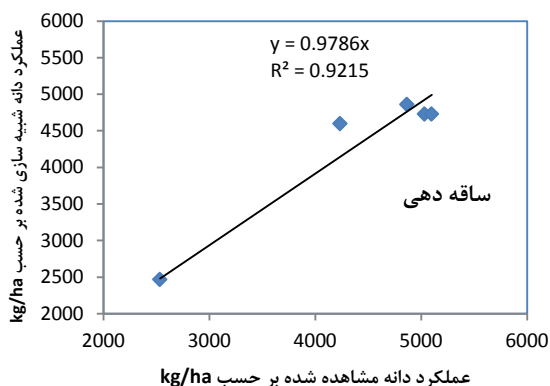
۷/۷ درصد و در مرحله اعتباریابی در تیمارهای اعمال شده در جوانه-زنی، پنجه‌دهی، رشد شیری-خمیری و رسیدگی به ترتیب ۲/۱، ۴/۹، ۹/۷ و ۹/۸ درصد محاسبه شده است. مقدار RMSE از انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده کمتر می‌باشد. میانگین مطلق خطا (MAE) در برخی تیمارها منفی و در برخی مثبت است. مثبت و منفی بودن این شاخص به ترتیب نشان دهنده بیش برآوردی و کم برآوردی مدل در آن دوره رشد است. نزدیک‌تر بودن مقدار d در تمامی دوره‌ها به یک، نشان از سازگاری بیشتر مدل با مقادیر واقعی دارد و به‌طور کلی مدل آکواکراپ قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی عملکرد دانه در حالت کم-آبیاری را دارد (Iqbal et al., 2014; Andarzian et al., 2011; Ghorbanian Kurdabadi et al., 2015).

در جدول (۵)، نتایج مقادیر واسنجی پارامترهای گیاهی گندم ارائه شده است. برای واسنجی و اعتباریابی مدل، از نظر تفاوت اثر تنش بر عملکرد در قبل و بعد از گل‌دهی، تیمارهای اعمال شده در مرحله ساقه‌دهی و گل‌دهی انتخاب شد. سپس بدون تغییر در فایل گیاهی واسنجی شده برای سایر تیمارها مدل اجرا و مقادیر عملکرد حاصل از شبیه‌سازی، با مقادیر اندازه‌گیری شده براساس شاخص‌های آماری بررسی شد. مقادیر شاخص‌های آماری مختلف محاسبه شده برای گندم در جدول (۶)، نشان داده شده است.

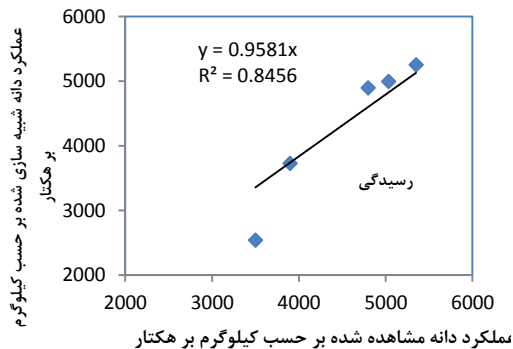
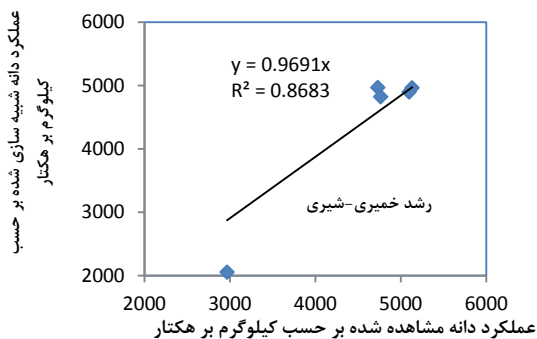
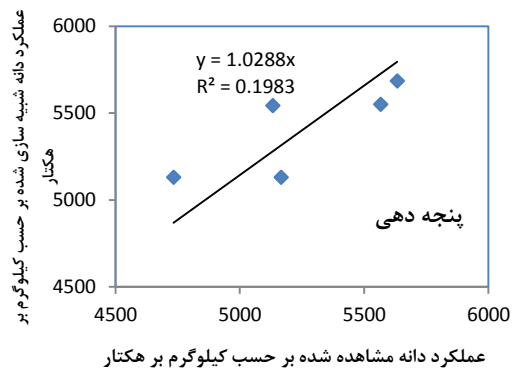
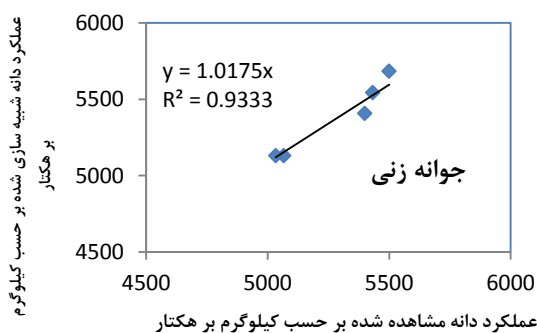
مدل عملکرد دانه را برای تمامی مراحل رشد گیاه با دقتی مناسب شبیه‌سازی کرد. مقدار RMSE_n کمتر از ۱۰٪ تخمین زده شد که نشان‌دهنده ایده‌آل بودن مدل‌سازی می‌باشد (جدول ۶). مقدار این پارامتر در واسنجی مدل در مرحله ساقه‌دهی و گل‌دهی ۶/۲ و

بیانگر دقت مدل باشد و تنها پراکنش نامناسب داده‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به قابل قبول بودن شبیه‌سازی عملکرد دانه در سایر دوره‌های رشد علت این امر را می‌توان بیش‌برآورد و کم‌برآورد کردن مدل در تیمارهای مختلف کم آبیاری دانست.

مقدار ضریب تعیین در مرحله واسنجی قابل قبول بوده و به‌ترتیب در دوره ساقه‌دهی و گل‌دهی ۰/۹۲ و ۰/۸۱ محاسبه برآورد شد (شکل ۲). در شکل (۳) ملاحظه می‌شود که در همه دوره‌های رشد مقدار ضریب تعیین بیش از ۰/۸ محاسبه شده است به جزء در دوره پنجه‌دهی که این ضریب برابر با ۰/۱ بوده ولی شاخص R2 به‌تنهایی نمی‌تواند



شکل ۲- مقایسه عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی



شکل ۳- مقایسه عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مرحله اعتباریابی

مدل در تیمارهای کم آبیاری را گزارش نمودند، همچنین در تحقیقی بر روی فلفل Sam-Amoah، Darko و Owusu- Sekyere (2013) اعلام کردند که مدل آکوآراپ اگر چه دقت و قابلیت خوبی در شبیه سازی عملکرد دانه و پوشش گیاهی در شرایط مدیریت کم آبیاری دارد اما شرایط آبیاری کامل را دقیق تر از شرایط اعمال کم آبیاری شبیه سازی می کند. مدت و زمان اعمال تنش آبی بر گیاه بسیار مهم است. چنانچه تنش آبی در شرایطی اعمال شود که گیاه دچار تنش شدید خشکی نشود، کاهش عملکرد محصول کمتر خواهد بود (Ebrahimi Pak, 2012).

با توجه به داده های جدول (۷) اعمال کم آبیاری قبل از گل دهی سبب افزایش عملکرد و پس از آن سبب کاهش عملکرد شده است. مدل به خوبی عملکرد را در این مراحل شبیه سازی نمود. با توجه به نزدیکی حجم آب مصرفی در تیمارهای مختلف خطای مدل در تیمار E4 بیشتر از سایر تیمارها بوده است. تیمار مذکور در تمام مراحل رشد گیاه نسبت به کم آبیاری حساسیت بیشتری دارد. به عبارت دیگر با کاهش نسبی تبخیر و تعرق گیاه عملکرد نسبی محصول کاهش یافت. تیمار E1 نسبت به کمبود آب حساسیت کمتری داشت. جمعاً خطای مدل در تیمارهای کم آبیاری قابل قبول می باشد. (Salemi et al. 2011) در اصفهان با استفاده از واسنجی مدل برای گیاه گندم، دقت کافی

جدول ۷- آب مصرفی، عملکرد دانه اندازه گیری شده و شبیه سازی شده و خطای مدل در تمامی

تیمارهای اعمال شده در دوره های مختلف رشد گندم

خطای مدل ME	عملکرد دانه شبیه سازی- شده (kg/ha)	عملکرد دانه (kg/ha)	عمق آبیاری	تیمار آبیاری	دوره رشد
۲/۰۲	۵۵۴۳	۵۴۳۳	۵۳۷	E0	جوانه زنی
۰/۱۱	۵۴۰۶	۵۴۰۰	۵۲۵	E1	
۳/۳۳	۵۶۸۳	۵۵۰۰	۵۱۱	E2	
۱/۲۵	۵۱۳۰	۵۰۶۷	۵۰۰	E3	
۱/۹۲	۵۱۳۰	۵۰۳۳	۴۸۴	E4	
۷/۹۸	۵۵۴۳	۵۱۳۳	۵۳۷	E0	پنجه دهی
۸/۳۸	۵۱۳۰	۴۷۳۳	۵۱۵	E1	
-۰/۳۲	۵۵۴۹	۵۵۶۷	۵۰۰	E2	
۰/۸۸	۵۶۸۳	۵۶۳۳	۴۸۵	E3	
-۰/۷۱	۵۱۳۰	۵۱۶۷	۴۷۰	E4	
-۲/۸۷	۴۷۲۷	۴۸۶۷	۵۳۷	E0	ساقه دهی
-۸/۶۹	۴۵۹۶	۵۰۳۳	۵۰۳	E1	
۳/۱۲	۵۲۵۹	۵۱۰۰	۴۷۰	E2	
۸/۵۷	۴۵۹۶	۴۲۳۳	۴۲۹	E3	
۱۷/۴۳	۲۹۷۵	۲۵۳۳	۳۷۵	E4	
۵/۳۵	۴۸۸۱	۴۶۳۳	۵۳۷	E0	گل دهی
۶/۵۳	۴۸۶۵	۴۵۶۷	۵۰۰	E1	
-۱۰/۰۴	۴۷۰۸	۵۲۳۳	۴۶۳	E2	
-۳/۵۷	۴۴۳۶	۴۶۰۰	۴۲۸	E3	
۱۸/۸۶	۲۸۱۳	۲۳۶۷	۳۵۲	E4	
۴/۹۶	۴۹۶۸	۴۷۳۳	۵۳۷	E0	خمیری-شیری
-۳/۳۴	۴۹۶۲	۵۱۳۳	۴۸۷	E1	
-۴/۰۲	۴۸۹۵	۵۱۰۰	۴۲۸	E2	
۱/۰۶	۴۸۱۷	۴۷۶۷	۳۵۹	E3	
-۳۲/۹۹	۱۹۸۸	۲۹۶۷	۲۹۶	E4	
-۸/۷۷	۴۸۸۱	۵۳۵۰	۵۳۷	E0	رسیدن گیاه
-۱۷/۳۳	۳۹۶۸	۴۸۰۰	۴۶۵	E1	
-۱/۳۲	۴۹۶۷	۵۰۳۳	۴۲۰	E2	
۲۷/۳۶	۴۹۶۷	۳۹۰۰	۳۷۸	E3	
-۳۹/۶۳	۳۰۵۹	۵۰۶۷	۳۲۰	E4	

نتیجه‌گیری

نشان داد که مدل آکواکراپ قادر است مقدار عملکرد دانه را در اکثر موارد به‌خوبی شبیه‌سازی کند. مدل جهت شبیه‌سازی عملکرد از بیلان آب استفاده نموده و نیاز به پارامترهای ورودی کمتری نسبت به سایر مدل‌های گیاهی دارد که این موضوع از دقت آن نکاسته است. نتایج نشان داد با ارائه روش مدیریت مناسب مقدار آب معین و موجود و چگونگی زمان استفاده از آن می‌توان عملکرد مطلوب و منطقی را پیش‌بینی کرد و با یک مقدار معین کاهش تبخیر و تعرق نسبی در مرحله‌ای خاص از رشد گیاه، حداقل کاهش محصول را انتظار داشت.

با استفاده از مدل‌های گیاهی می‌توان در هزینه، وقت و انرژی برای مدیریت مصرف آب صرفه جویی نمود و تعداد زیادی سناریو را بعد از اطمینان از صحت نتایج مدل، بررسی کرد. در تحلیل نتایج شاخص‌ها همگی در محدوده ایده‌آل بود و $RMSE_n$ در شبیه‌سازی عملکرد دانه کمتر از ۱۰ درصد محاسبه شد. اعمال کم‌آبیاری قبل از گل‌دهی سبب افزایش عملکرد و پس از آن سبب کاهش عملکرد شده است. مدل به‌خوبی عملکرد را در این دوران شبیه‌سازی نمود. با توجه به نزدیکی حجم آب مصرفی در تیمارهای مختلف خطای مدل در تیمار E4 بیشتر از سایر تیمارها بوده است. لذا نتایج این بررسی

منابع

- 1- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A. and Dejene, T., 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), pp.1838-1846.
- 2- Alizadeh H.A., Nazari, B., Parsinezhad, M., Ramazani Etedali, H. and Janbaz, H. R. 2010. Evaluation of Aquacrop Model on Wheat deficit irrigation in Karaj area, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 4(2), pp. 273-283. (In Persian).
- 3- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A. and Rahnema, A., 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), pp.1-8.
- 4- Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A. and del Rio, S., 2014. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, 135, pp.61-72.
- 5- Babazadeh, H., and Saraei tabrizi, M. 2012. Assessment of AquaCrop Model under Soybean Deficit Irrigation Management Conditions, *Journal of Water and Soil*, 26(2), pp. 329-339. (In Persian).
- 6- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. & Fereres, E. 2011. Aquacrop- Reference Manual. Available at: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
- 7- Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *Irrigation and drainage paper*, 33, p.257.
- 8- Ebrahimi Pak, N.A. 2012. Determination of Wheat Yield Response Factor to Deficit Irrigation at Different Growth Stages, *Journal of Crop Production and Processing (JCPP)*, 2(5). pp. 121-130. (In Persian)
- 9- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J. A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V. and Steduto, P. 2009. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*. 101(3), pp. 499-508.
- 10- Ghorbanian Kour Abadi, M., Liaghat, A., Vatankhah, E., Noory, H. 2015. Simulation of yield and evapotranspiration of forage maize using AquaCrop model, *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 4(2), pp. 47-64.
- 11- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T. and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient field Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), pp. 488-498.

- 12- Heydarinia, M., Naseri, A.A., and Nasab S.B. 2012. Investigation of Aquacrop Model application in irrigation planning of Sunflower in Ahvaz. *Water Engineerig*, 5(12), pp. 37-50. (In Persian).
- 13- Hsiao, T.C., Heng, L.K. Steduto, P., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101, pp. 448-459.
- 14- Jin X-l., Feng, H-k., Zhu, X-k., Li, Z-h., Song, S-n., Song, X-y., et al. 2014. Assessment of the AquaCrop Model for Use in Simulation of Irrigated Winter Wheat Canopy Cover, Biomass, and Grain Yield in the North China Plain. *PLoS ONE*, 9(1), pp. e86938. doi:10.1371/journal.pone.0086938
- 15- Montoya, F., Camargo, D., Ortega, J.F., Córcoles, J.I. and Domínguez, A., 2016. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 164, pp.267-280.
- 16- Rinaldy, M., Losavio, N. and Flagella, Z. 2003. Evaluation of OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. *Agricultural Systems*, 78, pp. 17-30.
- 17- Salemi, h., Mohd Soom, M., Shui Lee, T., Mousavi, F., Ganjiand, A., and Kamil Yusoff, M. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 6(10), pp. 2204-2215.
- 18- Sam-Amoah, L. K., Darko, R. O. and Owusu-Sekyere, J. D. 2013. Calibration and validation of Aquacrop for full and deficit irrigation of hot pepper. *Journal of Agricultural & Biological Science*; 8(2), pp. 175-178.
- 19- Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25, pp. 189-207.
- 20- Tavakoli, A. R., A. Liaghat, and Alizadeh, A. 2014. Soil Water Balance, Sowing Date and Wheat Yield Using AquaCrop Model under Rainfed and Limited Irrigation. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 14(4), pp.41-56. (In Persian).
- 21- Todrovic, M., R., Albrizio, L., Zivotic, M. T., Abi Saab, C., Stockle and Steduto, P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST model in the simulation of sunflower growth under different water regimes, *Agronomy Journal*, 101(3), pp. 509-521.
- 22- Toumi, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Khabba, S., Jarlan, L. and Chehbouni, A., 2016. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 163, pp.219-235.
- 23- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), pp.1309-1313.
- 24- Zarea Fizabadi, A., and Ghodsi, M. 2002. Study on Drought Tolerance of bread Wheat cultivares in cold regions of Iran. *Agricultural sciences and technology*, 16(2), pp. 181-189. (In Persian).