مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱٤/ شماره ٤/سال ۱۳۹۲/ص ٥٦-٤١

بررسی موازنه آب خاک، تاریخ کاشت و عملکرد گندم با استفاده از مدل AquaCrop در شرایط دیم و آبیاری محدود

علیرضا توکلی*، عبدالمجید لیاقت و امین علیزاده**

* نگارنده مسئول، نشانی: شاهرود، کیلومتر ۳ جاده شاهرود- بسطام مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، ص. پ. ۳۱۳-۳۶۱۵۵، پیام‌نگار: art.tavakoli@gmail.com

** به‌ترتیب: عضو هیات علمی (استادیار پژوهش) بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)؛ استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران؛ و استاد گروه مهندسی آبیاری دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۲/۱۴

چکیده

مدل‌های شبیه‌سازی، به دلیل ارائه تأثیرات کمّی آب بر عملکرد محصول، ابزاری ارزشمند برای بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه و فزونی بهره‌وری آب هستند. مدل AquaCrop که سازمان خوار بار و کشاورزی جهان (فائو) آن را توسعه داده است، قابلیت بررسی روند تولید را تحت گزاره‌های مختلف دارد. در این تحقیق به‌منظور ارزیابی کارایی نرم‌افزار AquaCrop از داده‌های دو سالهٔ گندم دیم (۸٦-۱۳۸٤) حاصل از یک طرح تحقیقاتی در بالادست حوضهٔ کرخه (استان لرستان) استفاده شده است. آزمایش‌های مزرعه‌ای شامل: دیم، یک نوبت آبیاری در زمان کاشت و یک نوبت آبیاری در بهار بود که در مزارع کشاورزان اجرا شد. کاربرد نرم‌افزار AquaCrop در تحلیل نتایج مزرعه‌ای آزمایش‌های آبیاری محدود گندم دیم، حاکی از قابلیت‌های این نرم‌افزار در برآورد عملکرد، موازنهٔ آب خاک و درصد پوشش گیاهی است. میانگین انحراف نرمال شده مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده برای درصد پوشش گیاهی، مقدار آب خاک و عملکرد دانه به ترتیب برابر ۸/۵۳، ۱۰/۳٤ و ۸/۳٤ درصد به‌دست آمد که مطلوب به نظر می‌رسد. ضریب کارآیی مدل در تخمین عملکرد، موازنهٔ آب خاک و درصد پوشش سبز به ترتیب ۰/۹۳، ۰/۷۸ و ۰/۹۲ است. شاخص سازگاری نزدیک به یک است که نشان از سازگاری مقادیر رطوبت آب خاک، عملکرد دانه و درصد پوشش گیاهی در مدل با مقادیر واقعی دارد. این مدل تخمین تاریخ مناسب کاشت را برای شرایط دیم فقط منوط به عامل بارش و وقوع میزان مشخص آن کرده است و از این‌رو نمی‌تواند برای مناطق سرد و نیمه‌سرد کارآمد باشد، اما در بقیه موارد نتایج نشان‌دهنده توانمندی مدل در تخمین مناسب عملکرد تحت شرایط دیم و آبیاری محدود است.

واژه‌های کلیدی

بهره‌وری آب، پوشش گیاهی، تک‌آبیاری، تعرق، AquaCrop

مقدمه

پراکنش و مقدار بارش از شاخص‌های عمومی زراعت دیم کشور است؛ تغییرات این شاخص‌ها سبب می‌شود که میزان خطرپذیری، زیاد و تغییرات تولید در طول سنوات زراعی مختلف مشهود باشد. برآورد بسیاری از پارامترها مستلزم صرف زمان و انرژی فراوان است. می‌توان با به‌کارگیری نرم‌افزارها، برخی از پدیده‌ها را شبیه‌سازی کرد و آن‌ها را در برنامه‌ریزی مدیریت زراعی به کار گرفت. از آن‌جا که درآمد بخش کشاورزی دیم، همانند عملکرد محصولات این بخش، اندک می‌باشد و به مقدار و پراکنش

© 2015,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

بارش بستگی دارد، لذا مدیریت تولید در زراعت دیم و افزایش بهره‌وری بارش اهمیت فراوان دارد.

برای اصلاح الگوی مصرف آب کشاورزی، آگاهی کامل از رابطه بین مصرف آب و عملکرد محصول و اثر آن بر روند رشد، موازنهٔ آب خاک و بهره‌وری تعرق به عنوان معرّف مصرف مفید، ضروری است. از آن‌جایی‌که تغییر برنامه و مدیریت آبیاری سبب تغییر در موازنهٔ آب خاک می‌شود، مدل‌سازی واکنش محصول به کمبود آب معمولاً سخت و پیچیده است (Bradford & Hsiao, 1982; Hsiao *et al.*, 1976) تلاش برای شناخت این روابط منجر به یافتن روابط تجربی بین آب-عملکرد موسوم به تابع تولید شده است (Vaux *et al.*, 1983). در تجزیه و تحلیل‌های اقتصادی عملکرد محصول- آب مصرفی و یافتن شیوه‌هایی برای بهینه‌سازی مصرف و تخصیص آب، توابع تولید کاربردهای فراوانی داشته است. مفاهیم پایه‌ای روابط عملکرد- آب مصرفی در نشریه آبیاری و زهکشی فائو ۳۳ (Doorenbos & Kassam, 1979) بیان گردیده است. برنامه‌ریزی و تقویم آبیاری CROPWAT (Smith, 1992) نیز از جمله نرم‌افزارهای توسعه یافته به وسیله فائو است که کمبود آب و اثر آن بر تولید محصول را مورد ارزیابی قرار داد.

مدل AquaCrop (Anon, 2010) میزان آب خاک را در ناحیهٔ ریشه و جریان‌های ورودی و خروجی آب را شبیه‌سازی می‌کند و ابزاری است برای شناخت گزاره‌های مختلف مدیریت آبیاری و مصرف مفید آب. مدل AquaCrop (Raes *et al.*, 2009)، که تکامل و توسعه یافته مدل Budget (Raes, 2002) است، دارای ساختار پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر بوده و با چهار جزء اساسی سر وکار دارد: خاک، محصول (رشد، توسعه و عملکرد)، اتمسفر (رژیم حرارتی، بارش، نیاز تبخیر و غلظت دی‌اکسیدکربن) و روابط بین بخشی شرایط محیطی، تنش‌ها و واکنش گیاه (Raes *et al.*, 2009).

جنبه‌های مفهومی و پایه‌ای مدل را استودوتو و همکاران (Steduto *et al.*, 2009) تشریح کرده‌اند و آلگوریتم و نحوهٔ استفاده از نرم‌افزار را راس و همکاران (Raes *et al.*, 2006) توضیح داده‌اند. مدل AquaCrop برای چندین محصول شبیه‌سازی شده است. (Farahani *et al.*, 2009; Garcia-Vila *et al.*, 2009; Geerts *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Alizadeh *et al.*, 2010; Tavakoli *et al.*, 2010; Andarzian *et al.*, 2011; Salemi *et al.*, 2011; Babazadeh & Sarai-Tabrizi, 2012).

اندازه‌گیری تمام پارامترهای مورد نیاز و نیز روند تجمعی شکل‌گیری محصول (زیست توده و دانه) و تبخیر و تعرق واقعی روزانه در سطح مزرعه دشوار است، اما با به کارگیری مدل‌های شبیه‌سازی تولید این کار میسر خواهد بود. بر اساس داده‌های مورد نیاز به عنوان ورودی، مدل با بخشی از داده‌ها واسنجی[1] و با استفاده از بقیهٔ داده‌ها صحت‌سنجی[2] می‌شود.

تبخیر و تعرق[3] از عوامل اصلی رشد و نمو و تولید محصولات کشاورزی محسوب می‌شود و دارای دو جزء تعرق[4] گیاه و تبخیر[5] از سطح خاک است. تعرق گیاه و پوشش سبزینه‌ای، مولد تولید است و جزو مصارف مفید به حساب می‌آید اما تبخیر از خاک جزو مصارف غیرمفید است. این مدل از طریق تفکیک تعرق از تبخیر و تعرق و تعیین میزان زیست توده تولیدی به واسطهٔ شاخص برداشت، مقادیر شاخص بهره‌وری آب و عملکرد محصول را در گام‌های زمانی روزانه برآورد می‌کند. در این مدل از پوشش تاجی[6] که سطح زمین را می‌پوشاند، به جای شاخص سطح برگ[7] و از شاخص بهره‌وری به جای کاهش نسبی عملکرد محصول استفاده می‌شود و شاخص درجه

1- Calibration
2- Verification
3- Evapotranspiration (ET)
4- Transpiration (Tr)
5- Evaporation (E)
6- Canopy Crop = CC
7- Leaf Area Index = LAI

روز رشد[1] اهمیت خاصی دارد (Steduto *et al.*, 2009).

شناخت تغییرات رطوبتی خاک، تبخیر و تعرق و دیگر پارامترهای گیاهی و رشد، از قابلیت‌ها و توانمندی‌های برخی مدل‌ها است، لذا از مدل AquaCrop برای بررسی تولید تحت شرایط دیم و تک‌آبیاری (زمان کاشت و بهاره) استفاده می‌شود تا بر اساس آن‌ها بتوان به اصلاح مدیریت زراعی پرداخت. تعریف و تأثیر گزاره‌های مختلف آبیاری (زمان و میزان) و تأثیر آن بر روند تولید از قابلیت‌های این مدل به‌شمار می‌رود. هر چند این مدل بر مبنای فرایندهای گیاهی- فیزیکی بنا نهاده شده (Steduto *et al.*, 2009) اما فقط به تعداد نسبتاً اندکی از پارامترهای ساده و قابل دسترس به عنوان پارامترهای ورودی نیاز دارد.

تاکنون تحقیقات وسیعی در ارزیابی این مدل صورت گرفته است. گارسیاویلا و همکاران (Garcia-Vila *et al.*, 2009) در پژوهشی روی محصول پنبه گزارش کردند که مدل AquaCrop، عملکرد، بهره‌وری آب، زیست توده و رشد پوشش تاجی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. هنگ و همکاران (Heng *et al.*, 2009) مدل AquaCrop را برای ذرت و در سه منطقه با شرایط متفاوت در اسپانیا، تکزاس و فلوریدای امریکا واسنجی و ارزیابی کرده و نتیجه گرفتند که این مدل قادر است آب مصرفی گیاه را در شرایط تبخیر و تعرق و باد زیاد به شکلی قابل قبول شبیه‌سازی کند. نتیجهٔ بررسی کاربرد مدل AquaCrop برای گیاه کینوآ[2] در بولیوی حاکی از این است که این مدل ابزاری ارزشمند برای بررسی و آزمون اثر تجمعی مکانیسم‌های تحمل به تنش شوری روی این گیاه است (Geerts *et al.*, 2009). سالمی و همکاران (Salemi *et al.*, 2011) طی پژوهشی نشان دادند که با به‌کارگیری مدل AquaCrop بهره‌وری آب برای گندم زمستانه ۰/۹۱ تا ۱/۴۹ کیلوگرم به ازای هر متر مکعب به‌دست آمد که حاکی از سازگاری مناسب آن است. علیزاده و همکاران (Alizadeh *et al.*, 2010) نیز با تحقیقی در کرج نشان دادند که این مدل قادر است تبخیر و تعرق گندم را با دقت نسبتاً مناسب با میانگین مربعات خطای ۴/۹ درصد و حداکثر خطای ۸/۲۱ درصد شبیه‌سازی کند. بابازاده و سرایی‌تبریزی (Babazadeh & Sarai-Tabrizi, 2012) طی پژوهشی روی گیاه سویا در کرج نشان دادند که این مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول، تبخیر و تعرق و بهره‌وری آب، عملکردی قابل قبول دارد و می‌تواند مقدار تبخیر و تعرق محصول را با خطای کمتر از ۴ درصد شبیه‌سازی کند.

هدف از این مطالعه، ارزیابی و آزمون کارآیی مدل AquaCrop در شرایط دیم، تک‌آبیاری در زمان کاشت و تک‌آبیاری بهاره برای شبیه‌سازی تولید گندم دیم و مقایسهٔ آن با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزارع کشاورزان در شهرستان سلسله در استان لرستان است.

مواد و روش‌ها

تئوری مدل

نرم‌افزار AquaCrop همانند برنامه CROPWAT بر روابط عملکرد نسبی و تبخیر و تعرق نسبی (Doorenbos & Kassam, 1979) اما با برخی ویژگی‌های خاص استوار است.

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

که در آن،

Y_x= حداکثر عملکرد؛ Y_a= عملکرد واقعی؛ ET_x= حداکثر تبخیر و تعرق؛ ET_a= تبخیر و تعرق واقعی؛ و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر و تعرق است.

1- Growing Degree Day = GDD

2- Quinoa

نرم‌افزار AquaCrop از طریق تفکیک تعرق گیاه از تبخیر و تعرق، بسط مدل رشدی از رشد اولیه[1] تا پیری[2]، پوشش گیاهی، برآورد و پیش‌بینی عملکرد به عنوان تابعی از زیست تودهٔ نهایی[3] و شاخص برداشت[4]، و نهایتاً تفکیک تأثیرات تنش آبی در چهار جزء رشد پوشش گیاهی توسعه یافت. برآورد تعرق گیاه، سبب تفکیک مصارف مفید و غیرمفید می‌شود. تعرق روزانه (Tr) به واسطهٔ تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه (ETo) و بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) مطابق با رابطهٔ ۲ به زیست توده گیاهی یا قسمت هوایی گیاه تبدیل می‌شود.

$$B_i = WP^* \left(\frac{T_{ri}}{ETo_i} \right) \qquad (۲)$$

که در آن،

WP= بهره‌وری آب نرمال شده و مقدار آن برای گیاه مشخص در شرایط اقلیمی مشابه، ثابت است (Hanks, 1983; Tanner & Sinclair, 1983) و پس از نرمال کردن بهره‌وری آب برای شرایط اقلیمی متفاوت، مقدار آن به یک پارامتر ثابت تبدیل می‌شود (Steduto *et al.*, 2007). مزیت معادلهٔ مورد استفاده در مدل AquaCrop این است که شبیه‌سازی فرایندهای رشد گیاه در این نرم‌افزار با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد، درحالی‌که در رابطهٔ ۱، شبیه‌سازی به‌صورت ماهانه یا فصلی و بر اساس ضریب Ky است. در تمام دورهٔ رشد گیاه، مقدار آب ذخیره شده در ناحیهٔ ریشه از طریق بیلان جریان آب ورودی (آب آبیاری و بارش) و خروجی (رواناب سطحی، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق مفید و غیرمفید) در محدودهٔ عمق رشد و توسعهٔ ریشه شبیه‌سازی می‌شود. میزان ضرایب تنش آبی (K_S) مؤثر بر توسعه و بسط پوشش سبزینه‌ای گیاه، هدایت روزنه‌ای تعرق (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت به‌وسیله کسر تخلیهٔ آب در ناحیهٔ ریشه تعیین می‌شود. علاوه بر آن، بعضی جنبه‌های مدیریتی و عملکرد نهایی محصول با توجه به مدیریت آبیاری (زمان، میزان و نحوه آبیاری) و میزان محدودیت حاصلخیزی خاک از طریق تاثیر آن‌ها بر توسعهٔ رشد گیاه، بهره‌وری آب و سازگار شدن گیاه به تنش‌ها بیان می‌شود.

ورودی و خروجی مدل

مدل AquaCrop بر مبنای فرایندهای بیوفیزیکی پیچیده بنا نهاده شده است (Steduto *et al.*, 2009) اما داده‌های ورودی این مدل نسبتاً ساده و قابل دسترس است و شامل موارد زیر می‌شود:

داده‌های هواشناسی: (داده‌های بارش، تبخیر و تعرق پایه و حداقل و حداکثر دما)، تشعشع (ساعات آفتابی)، باد و رطوبت نسبی.

پارامترهای خاک که به تشریح ویژگی‌های خاک در هر لایه می‌پردازد.

پارامترهای گیاه که رشد محصول و جذب آب در ریشه را تشریح می‌کند.

پارامترهای مدیریت در نرم‌افزار AquaCrop به صورت مدیریت مزرعه و آبیاری همچون عملیات مالچ‌پاشی توصیف می‌شود.

داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه، مقدار بارندگی روزانه، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی از ایستگاه هواشناسی شهرستان سلسله دریافت شد. بر اساس داده‌های اقلیمی نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی و با استفاده از نرم‌افزار ETo-calculator (Anon, 2009)، که با AquaCrop پیوند دارد، و به روش پنمن مانتیس فائو، تبخیر و تعرق گیاه مرجع برآورد شد.

مهم‌ترین خروجی‌ها در نرم‌افزار AquaCrop شامل تغییرات زمانی رطوبت در نیم‌رخ خاک، آب آبیاری مورد نیاز، تغییرات زمانی تبخیر و تعرق، پارامترهای موازنهٔ آب

1- Initial
2- Senescence
3- Biomass = B
4- Harvest Index = HI

خاک، درصد پوشش گیاهی در طول فصل رشد، عملکرد دانه، مادهٔ خشک تولیدی، شاخص برداشت و نیز شاخص بهره‌وری تعرق در تولید دانه و مادهٔ خشک تولیدی است. داده‌های گیاهی ورودی مدل شامل پارامترهای ثابت و داده‌های ویژه کاربر مانند تراکم و فواصل کاشت، عمق ریشه، تاریخ کاشت و مطابق با شرایط آزمایش هستند.

پارامترهای ثابت

مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت برای گیاهان عمدهٔ زراعی در مدل وجود دارد. این پارامترها در یک اقلیم با تغییر زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند. این پارامترها با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب بدون تنش واسنجی شده‌اند. اما لازم است برای شرایط آزمایش و مشخصه‌های خاص ارقام و واریته‌ها، تصحیحات لازم صورت پذیرد، از جمله تراکم بوته (فواصل ردیف‌ها و فواصل بوته‌ها روی ردیف‌ها)، حداکثر عمق توسعهٔ ریشه، دورهٔ زمانی هر یک از مراحل رشد و تاریخ کاشت. پذیرش بی‌قید و شرط فایل پیش‌فرض، ممکن است سبب ناکارآمدی خروجی مدل شود.

دمای پایه (دمایی که پایین‌تر از آن رشد گیاه متوقف می‌شود) و دمای فوقانی رشد (دمایی که بالاتر از آن رشد گیاه متوقف می‌شود) برای گندم به ترتیب صفر و ۲۶ درجهٔ سلسیوس در نظر گرفته شد و بقیهٔ پارامترهای ثابت بر اساس مطالعات قبلی مورد استفاده قرار گرفت (Raes *et al.*, 2006).

پارامترهایی شامل اطلاعات هواشناسی و خاک که تابع زمان، مکان، تراکم کاشت و آبیاری هستند به‌عنوان پارامترهای مخصوص کاربر معرفی شده‌اند. تاریخ سبز شدن، مراحل فنولوژیک رشد، تراکم و میزان بذر، زمان پیری و رسیدگی فیزیولوژیک از جمله فاکتورهای مهمی هستند که کاربر باید آن‌ها را وارد کند. تاریخ سبز شدن علاوه بر شرایط رطوبتی خاک، به عمق کاشت نیز بستگی دارد. تاریخی که در آن ۹۰ درصد بذرها سبز می‌شوند، به‌عنوان تاریخ سبز شدن لحاظ می‌شود (Hsiao *et al.*, 2009). زمان شروع پیری، نزدیک به تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک است و برای هر گونهٔ گیاهی خاص به رژیم دمایی منطقه بستگی دارد. مدل، این قابلیت را دارد که شروع زمان پیری و رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه را با استفاده از درجه روز رشد و مطابق با داده‌های دمایی وارد شده، محاسبه کند.

آزمایش مزرعه‌ای

برای مطالعه تیمارهای مورد نظر، شهرستان سلسله در استان لرستان انتخاب شد که در عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و در ارتفاع ۱۵۶۷ متر بالاتر از سطح دریای آزاد قرار دارد. این منطقه دارای شرایط آب و هوایی نیمه‌سرد است. میانگین ۱۰ سال بارش منطقه، مطابق با آمار هواشناسی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهرستان، برابر ۴۵۷ میلی‌متر است. کل بارش سال‌های زراعی ۸۵-۱۳۸۴ و ۸۶-۱۳۸۵ به ترتیب ۵۴۴ و ۵۷۳ میلی‌متر و متوسط دمای سالانهٔ هوا در دو سال به ترتیب ۱۲ و ۱۵ درجهٔ سلسیوس بوده است. مدل AquaCrop برای محاسبهٔ شاخص درجه روز رشد به‌منظور تعدیل عملکرد زیست توده بر اثر خسارات ناشی از سرما، از داده‌های دمای حداکثر و حداقل روزانه استفاده می‌کند (Raes *et al.*, 2006) که یک شاخص مؤثر در رشد محصول و مراحل فنولوژیک آن است.

داده‌های مورد نیاز خاک از نمونه‌برداری‌های مزرعه‌ای و تعیین ویژگی‌های آن در آزمایشگاه به‌دست آمده است. نتیجهٔ تجزیهٔ فیزیکی و شیمیایی نمونهٔ خاک محل آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

در آزمایش مزرعه‌ای، گندم رقم کراس البرز که در اواخر مهرماه کاشته شد، مورد استفاده قرار گرفت. میزان بذر، برابر ۳۵۰ دانه در متر مربع و با ردیف‌کار کاشته شد. تیمارهای آبیاری محدود که برای مزارع کشاورزان تعریف

شد عبارت‌اند از: تک‌آبیاری ۷۵ میلی‌متری در زمان کاشت، تک‌آبیاری ۵۰ میلی‌متری بهاره و بدون آبیاری (شرایط دیم). مقادیر آب آبیاری، متوسط آب کاربردی در سطح مزرعه است که از طریق اندازه‌گیری سطح مزرعه و حجم آب مورد نیاز نوارهای کشت، تعیین و با استفاده از فلوم WSC شمارهٔ ۳ اندازه‌گیری و آب مورد نیاز از طریق پمپاژ از رودخانه تأمین شد. رطوبت خاک در مراحل مختلف رشد و در تیمارهای مختلف به‌صورت نمونه‌گیری وزنی در دو لایه ۲۵-۰ و ۵۰-۲۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری و با میزان برآورد شده رطوبت خاک توسط مدل مقایسه شد. آبیاری بهاره در مرحلهٔ ظهور سنبله تا گل‌دهی انجام گردید.

مدل بر اساس بخشی از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای واسنجی شد و از داده‌های هواشناسی (دمای حداکثر و حداقل، بارش و تبخیر و تعرق پایه)، داده‌های خاک، اطلاعات آبیاری (شرایط دیم و تک‌آبیاری) و محصول (تاریخ کاشت، درصد پوشش اولیه، درصد پوشش در مرحلهٔ پیری، حداکثر عمق توسعهٔ ریشه و مراحل فنولوژیک رشد) برای اجرای مدل در شرایط دیم و تک‌آبیاری (پاییزه یا بهاره) استفاده شد. میزان پوشش اولیه و مرحلهٔ پیری بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای و با توجه به ثبت مراحل اساسی رشد محصول برآورد گردید. فایل‌های مجزای محصول برای تیمارهای آبیاری ایجاد شد و پس از تطابق و تصحیح لازم، برآورد مدل با شرایط اندازه‌گیری شده (واقعی) مقایسه شد و پس از آن بر اساس فایل اقلیم و فایل‌های اختصاصی محصول و تیمارهای آبیاری، صحت‌سنجی مدل آزمون شد.

جدول ۱- خلاصه برخی ویژگی‌های نمونه‌های خاک در آزمایش‌های مزرعه‌ای

شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	رطوبت نقطهٔ پژمردگی (متر مکعب بر متر مکعب)	رطوبت نقطهٔ ظرفیت زراعی (متر مکعب بر متر مکعب)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	تخلخل (متر مکعب بر متر مکعب)
۲۲/۵	۱۸/۷	۵۸/۸	۰/۱۲	۰/۲۹	۱/۳۸	۰/۴۸

پارامترهای آماری برای اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل AquaCrop رگرسیون خطی بین نتایج برآورد و اندازه‌گیری شده از رطوبت آب خاک، عملکرد دانه و درصد پوشش گیاهی ترسیم و ضریب همبستگی بین این داده‌ها تعیین شد. مشخصه‌های آماری به‌کار رفته برای مقایسهٔ نتایج مدل با مقادیر واقعی که در روابط ۳ تا ۷ بیان می‌شوند عبارت‌اند از: ضریب توده باقی‌مانده[1] (CRM)، درصد حداکثر خطا[2] (ME)، ریشه دوم خطای میانگین مربعات نرمال[3] (NRMSE)، شاخص ویل‌موت (d) یا شاخص سازگاری[4] (Willmott, 1982) و ضریب کارایی مدل[5] (E) (League & Green, 1991).

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i - \sum_{i=1}^{n} S_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i} \quad (۳)$$

$$MAXE = MAX\left(\left|S_i - M_i\right|\right)_{i=1}^{n} \times \frac{100}{\overline{M}} \quad (۴)$$

$$NRMSE\ (\%) = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)^2}{n}}\right) * 100 \ / \ \overline{M} \quad (۵)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|S_i - \overline{M}\right| + \left|M_i - \overline{M}\right|\right)^2} \quad (۶)$$

1- Coefficient of Residual Mass = CRM
2- Maximum Error =ME
3- Normalized Root Mean Square Error = NRMSE
4-Index of Agreement = d
5- Efficiency = E

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(M_i - \overline{M})^2} \qquad (۷)$$

که در آن‌ها،

S= مقادیر پیش‌بینی (برآورد) شده؛ M= مقادیر اندازه‌گیری (مشاهده) شده؛ n= تعداد نمونه‌های مشاهده شده؛ و $\overline{M}$= مقدار متوسط پارامترهای مشاهده شده است. شاخص ریشه دوم خطای میانگین مربعات نرمال، مقادیر کلی یا میانگین نرمال شده انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که مبین عدم اطمینان مطلق مدل است. هرچه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. شاخص ویل‌موت یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن از $-\infty$ تا ۱+ تغییر می‌کند (Eitzinger *et al.*, 2004, Singh *et al.*, 2008). مقدار زیاد درصد حداکثر خطا نشانگر بدترین حالت کارکرد مدل است. شاخص ضریب باقیمانده، ضریب توده باقی‌مانده به‌صورت منفی و مثبت نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌هاست.

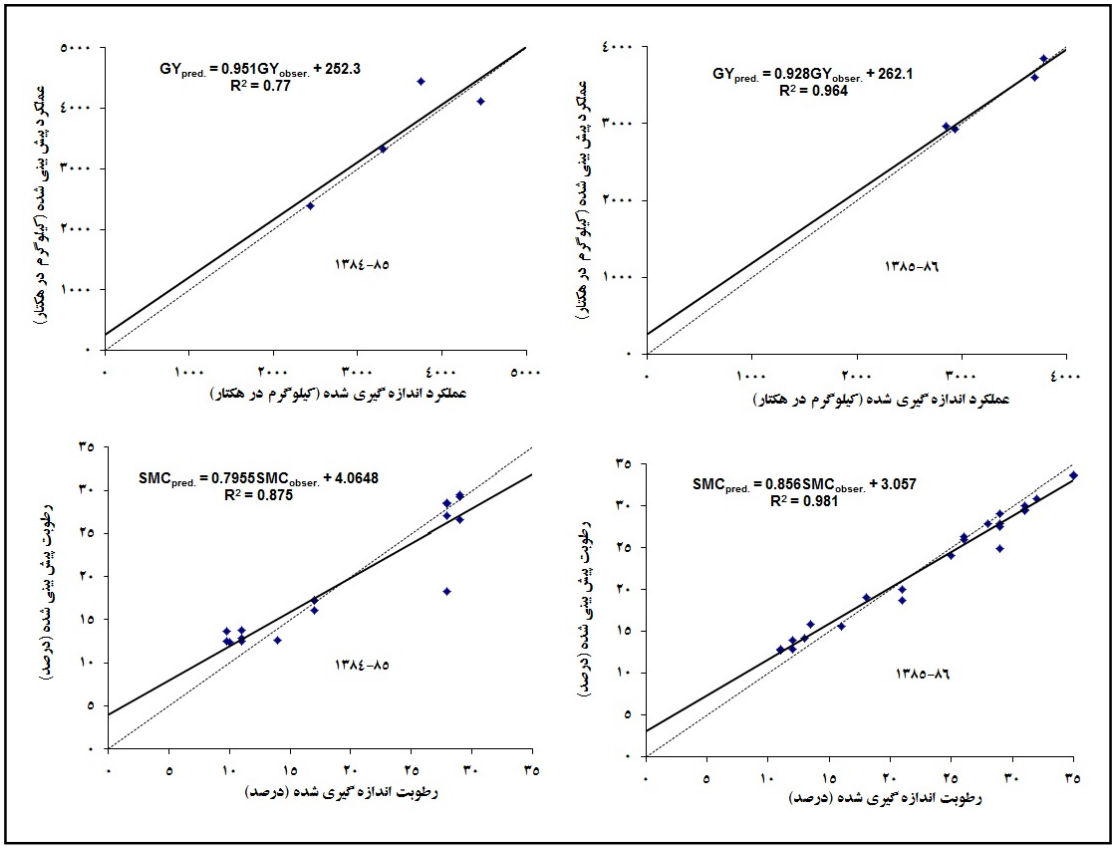
نتایج و بحث

آنالیز شاخص‌های آماری برای میانگین دو سال داده‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار و علامت ضریب توده باقی‌مانده نشان‌دهندهٔ این است که مدل عملکرد دانه و درصد پوشش گیاهی را اندکی بیش از مقدار واقعی و رطوبت آب خاک را کم‌تر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. میانگین انحراف نرمال شدهٔ مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده برای درصد پوشش گیاهی، مقدار آب خاک و عملکرد دانه به‌ترتیب برابر ۸/۵۳، ۱۰/۳۴ و ۸/۳۴ درصد به‌دست آمد که مطلوب است. حداکثر خطا (MAXE) طی دو سال در پارامتر رطوبت آب خاک و درصد پوشش گیاهی وجود دارد و میزان حداکثر خطا در عملکرد دانه ۱۸/۷ درصد است. مقدار شاخص سازگاری (d) نزدیک به ۱ است که نشان از سازگاری مقادیر رطوبت آب خاک، عملکرد دانه و درصد پوشش گیاهی در مدل با مقادیر واقعی دارد. اندرزیان و همکاران (Andarzian *et al.*, 2011) طی پژوهشی گزارش کردند که مدل AquaCrop به خوبی توانسته است رطوبت آب خاک، زیست تودهٔ محصول و عملکرد دانه را شبیه‌سازی کند؛ این محققان ریشه دوم خطای میانگین مربعات نرمال کم‌تر از ۱۰ درصد را به‌دست آوردند. رمضانی‌اعتدالی و همکاران(Ramezani-Etedali *et al.*, 2009) کارایی مدل Cropwat را حدود ۰/۵۸ و ۰/۱۵- برای گندم در دور آبیاری ۷ و ۱۴ روز و علیزاده و همکاران (Alizadeh *et al.*, 2010) نیز کارایی مدل AquaCrop را ۰/۹۸ و ۰/۷۶ را برای دور آبیاری ۷ و ۱۴ روز گزارش کرده‌اند. همچنین حداکثر خطای نسبی برای پیش‌بینی عملکرد گندم توسط مدل Cropwat حدود ۲۵ (Ramezani-Etedali *et al.*, 2009) و توسط مدل AquaCrop حدود ۲۷ درصد (Alizadeh *et al.*, 2010) گزارش شده است.

جدول ۲- شاخص‌های آماری در تعیین درجهٔ اعتماد مدل در برآورد رطوبت آب خاک، عملکرد و پوشش گیاهی (میانگین دو سال)

پارامتر	ریشه دوم خطای میانگین مربعات نرمال (درصد)	درصد حداکثر خطا (درصد)	شاخص ویل‌موت	ضریب توده باقی‌مانده	ضریب کارایی مدل
رطوبت آب خاک	۱۰/۳۴	۳۹/۸	۱/۰۰	۰/۰۰۴	۰/۹۳
عملکرد دانه	۸/۳۴	۱۸/۷	۰/۹۹	-۰/۰۱۵	۰/۷۸
پوشش گیاهی	۸/۵۳	۲۰/۰	۰/۹۹	-۰/۰۶۸	۰/۹۲

مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه و رطوبت خاک در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن همراه با خط همسانی (خط ۱:۱) برای دو سال آزمایش (۸۶-۱۳۸۴) در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده توانمندی مدل در تخمین مناسب عملکرد تحت شرایط دیم و آبیاری محدود است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که خط رگرسیونی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در سال اول و دوم به‌ترتیب دارای ضریب همبستگی برابر با ۰/۷۷ و ۰/۹۶۴ است. مقادیر شبیه‌سازی شدهٔ آب خاک در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ رطوبت خاک همراه با خط همسانی آن‌ها (خط ۱:۱) در شکل ۱ نشان می‌دهد که خط رگرسیونی بین آن‌ها در سال اول و دوم به ترتیب دارای ضریب همبستگی برابر با ۰/۸۷۵ و ۰/۹۸۱ است.

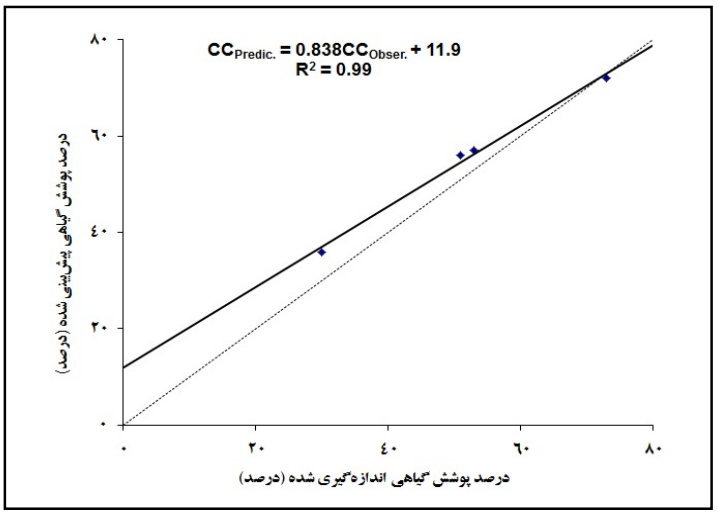


شکل ۱- خط همسانی ۱:۱ عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) و رطوبت خاک (درصد) برآورد و اندازه‌گیری شده، ۸٦-۱۳۸٤

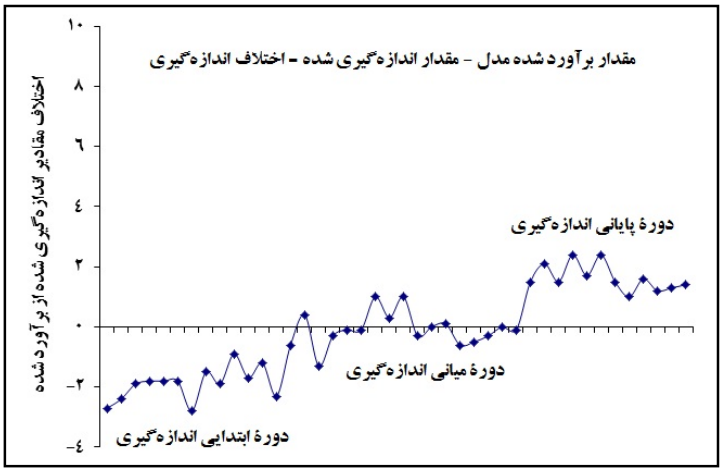
مقادیر شبیه‌سازی شده درصد پوشش گیاهی در مقابل مقادیر مشاهدهٔ شدهٔ آن، همراه با خط همسانی (خط ۱:۱)، در شکل ۲ نشان داده شده است. ضریب همبستگی بین مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده برابر ۰/۹۹ است. درصد پوشش گیاهی در ابتدای فصل برآورد شده توسط مدل کم‌تر از درصد مشاهده شده است.

یکی از نکات مهم در تحلیل مسئله، بررسی میزان اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده توسط مدل در طول زمان است. بررسی ۴۲ نمونه اندازه‌گیری رطوبت خاک در سه دورهٔ اندازه‌گیری، از ابتدای بهار تا برداشت محصول، نشان می‌دهد که دردورهٔ ابتدایی، مقادیر برآورد شده با مدل بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده است؛ در مقادیر رطوبت کم (انتهای فصل)، مدل رطوبت خاک را کم‌تر از مقادیر

اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد (شکل ۳). دورهٔ میانی رشد که همراه با پوشش کامل گیاه است، مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده، تقریباً یکسان است.



شکل ۲- خط همسانی ۱:۱ درصد پوشش گیاهی برآورد و اندازه‌گیری شده، ۸۶-۱۳۸۴



شکل ۳- اختلاف مقادیر اندازه‌گیری با برآورده شدهٔ رطوبت خاک

برای تعیین علت خطای موجود بین رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با برآورد شده، لازم است به شکل‌های ۳ و ۴ توجه شود.

در این شکل‌ها، روند تغییرات رطوبت خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده در طول دو سال آزمایش در سه تیمار دیم، تک‌آبیاری زمان کاشت و تک‌آبیاری بهاره و از اول بهار ترسیم شده است. رطوبت خاک در زمان کاشت (پاییز) در تمام تیمارها تقریبا یکسان و حدود ۱۷-۱۶ درصد برآورد شده است. از آن‌جایی‌که تیمار دیم و تیمار آبیاری بهاره پس از دریافت اولین بارندگی شروع به رشد و نمو خواهند کرد و عملا نسبت به تیمار آبیاری زمان کاشت دارای تاخیر در رشد هستند، لذا برای انجام فرایند مقایسه‌ای دقیق‌تر، تغییرات رطوبت خاک از اول بهار مدنظر قرار گرفت. تغییرات رطوبت خاک طی زمان در شرایط دیم، تک‌آبیاری زمان کاشت و تک‌آبیاری بهاره در دو سال آزمایش حاکی از تطابق مقادیر اندازه‌گیری شده با

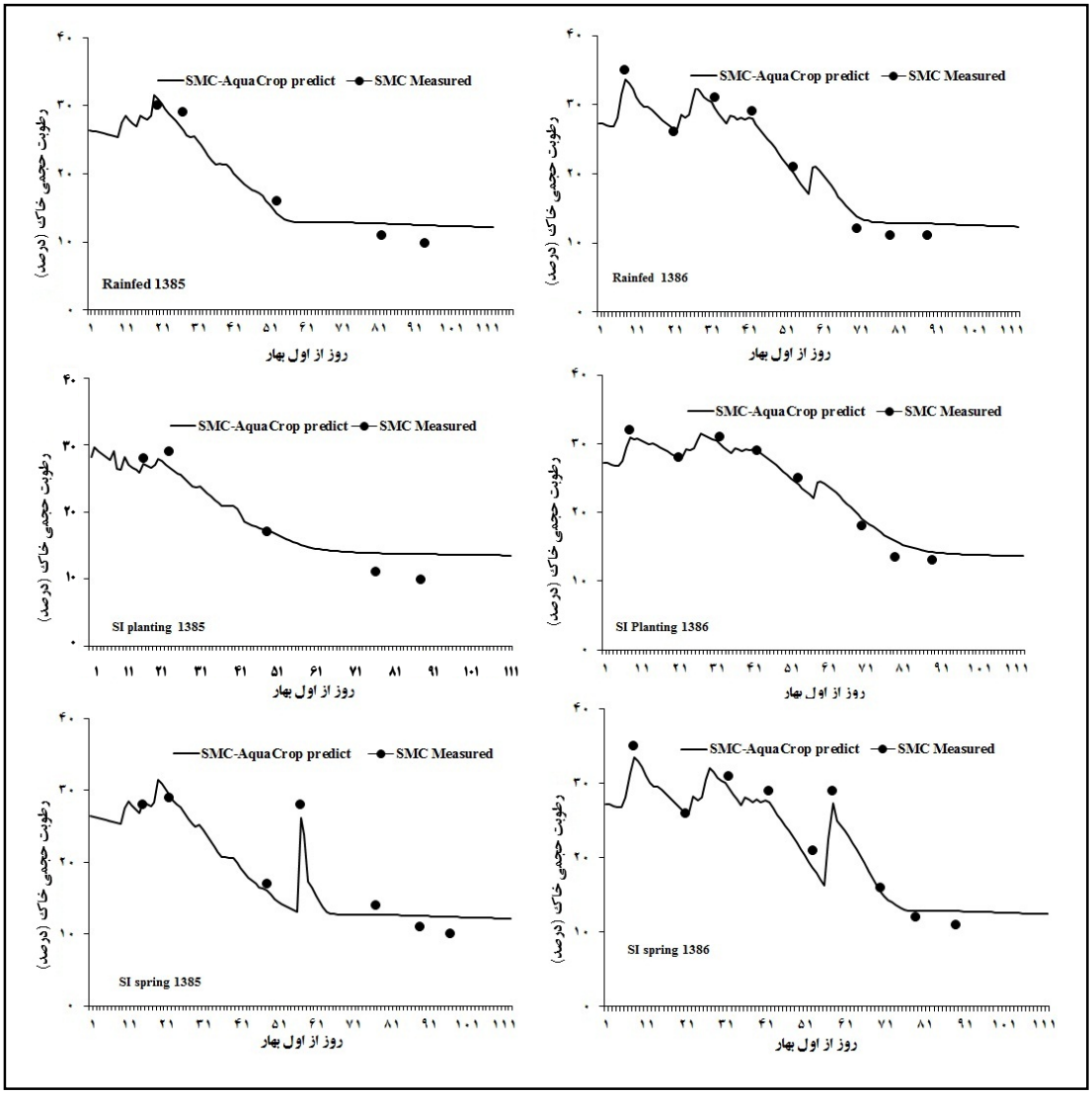
برآورد روزانه مدل است. اما آن‌چه قابل دریافت است این است که در تمام این تیمارها، کم‌ترین میزان خطا در مقادیر اندک رطوبت خاک در ابتدا و انتهای فصل اتفاق می‌افتد و در بقیهٔ موارد، مدل برآورد بسیار مناسبی دارد.

علت کم‌تر بودن مقادیر اندازه‌گیری شده با برآورد مدل در ابتدای زمان نمونه‌برداری را می‌توان ناشی از خطای نمونه‌برداری با دست، اثر رطوبت نسبی و شبنم بر رطوبت سطحی خاک و عدم پوشش کامل سطح زمین دانست. ولی علت کم‌تر بودن مقادیر اندازه‌گیری شده با برآورد مدل در انتهای فصل و در واقع انحراف مقادیر مشاهده شده با برآورد شده را می‌توان به خطای نمونه‌برداری با دست، ترک خوردن خاک در انتهای فصل، اثر درز و ترک بر رطوبت خاک، مخلوط شدن نمونه‌های خاک خشک سطحی با خاک لایه‌های زیرین هنگام نمونه‌برداری و نیز تلفات رطوبت خاک در زمان نمونه‌برداری نسبت داد. با توجه به این‌که در این مرحله محصول وارد مرحله رسیدن فیزیولوژیک می‌شود، این‌گونه تغییرات از کارآیی مدل نخواهد کاست. اتخاذ برخی اقدامات مدیریتی مانند افزودن مواد آلی و اصلاح بافت خاک از بروز درز و ترک جلوگیری می‌کند و البته استفاده از لوازم مناسب اندازه‌گیری رطوبت خاک نیز در بهبود شرایط اندازه‌گیری مؤثر است.

روند تغییرات درصد پوشش گیاهی و بهره‌وری تعرق در تولید دانه در دو سال ۸۵-۱۳۸۴ و ۸۶-۱۳۸۵ تحت شرایط تیمارهای دیم، تک‌آبیاری در زمان زمان کاشت و تک‌آبیاری بهاره، در شکل ۵ نشان داده شده است. آن‌چه از شکل ۵ برمی‌آید، اثر شرایط اقلیمی در دو سال بر پارامترها در تیمارهای مختلف اعم از دیم و مدیریت تک‌آبیاری است. بدیهی است که یک نوبت آبیاری در پاییز، به دلیل این‌که امکان رشد و استقرار محصول فراهم می‌شود، شاخص بهره‌وری تعرق را بهبود می‌بخشد. سطح زیر منحنی‌ها (شکل ۵)، مبین درصد پوشش سبز است که به تبع آن عملکرد محصول و افزایش آن در اثر اعمال مدیریت تک‌آبیاری پاییزه قابل توجیه است. در مقایسه با شرایط دیم، آبیاری بهاره با تأمین رطوبت مورد نیاز در مرحلهٔ حساس ظهور سنبله تا گل‌دهی، سبب بهبود بهره‌وری تعرق می‌شود. درصد پوشش گیاهی (سطح زیر منحنی) در شرایط آبیاری پاییزه نسبت به آبیاری بهاره و دیم قابل توجه است (شکل ۵). همین عوامل سبب شده تا میزان عملکرد دانه نیز در این تیمار کم‌تر باشد.

علیزاده و همکاران (Alizadeh *et al.*, 2010) طی تحقیقی در کرج نشان دادند که مدل در تنش‌های شدید و تیمار تک‌آبیاری، مقدار کارآیی مصرف آب را کمتر از داده‌های اندازه‌گیری شده و در شرایط آبیاری کامل و تنش ملایم، کارآیی مصرف آب را اندکی کم‌تر از مقدار واقعی نشان می‌دهد و از این‌رو این مدل را برای کاربرد در شرایط آبیاری کامل، آبیاری تکمیلی و شرایط دیم مناسب دانسته‌اند. نتیجهٔ ارزیابی مدل AquaCrop توسط آرایا و همکاران (Araya *et al.*, 2010) در اتیوپی نشان می‌دهد که این مدل جرم تودهٔ هوایی و عملکرد محصول را در تاریخ‌های کاشت متفاوت در منطقه مورد مطالعه به خوبی شبیه‌سازی می‌کند.

مطابق با جدول ۳ و برابر با آن‌چه مستند به مراحل حساس رشد گندم در زراعت دیم است، زمان مناسب تک‌آبیاری بهاره در مرحلهٔ ظهور سنبله تا گل‌دهی است که از طریق کنترل تنش رطوبتی معمول این دوره و ایجاد مخزن رطوبتی مناسب برای دورهٔ رشد زایشی محصول، کم‌ترین تأثیر را خواهد داشت. ورود محصول مزرعه به فاز ظهور سنبله تا گل‌دهی نه طی یک روز بلکه در یک دورهٔ زمانی رخ می‌دهد. بر اساس جدول ۳ می‌توان گفت که دویست و پانزدهمین روز (۲۱۵) روز پس از کاشت، مناسب‌ترین زمان آبیاری بهاره است. اما از آن‌جایی‌که در عمل، روز خاص برای انجام دادن عملیات زراعی مفهوم ندارد، بنابراین برای برنامه‌ریزی باید یک دوره و بازه زمانی تعریف شود تا قابلیت کاربردی داشته باشد. در این خصوص نیز یک دوره زمانی حدود سه هفته‌ای منظور می‌شود که بهترین زمان جدول ۳ در میانهٔ آن قرار می‌گیرد. این موضوع برای برنامه‌ریزی تک‌آبیاری زمان کاشت نیز صادق است و بازهٔ زمانی است که برنامه‌های بهبود عملکرد را در شرایط دیم تعیین می‌کند.

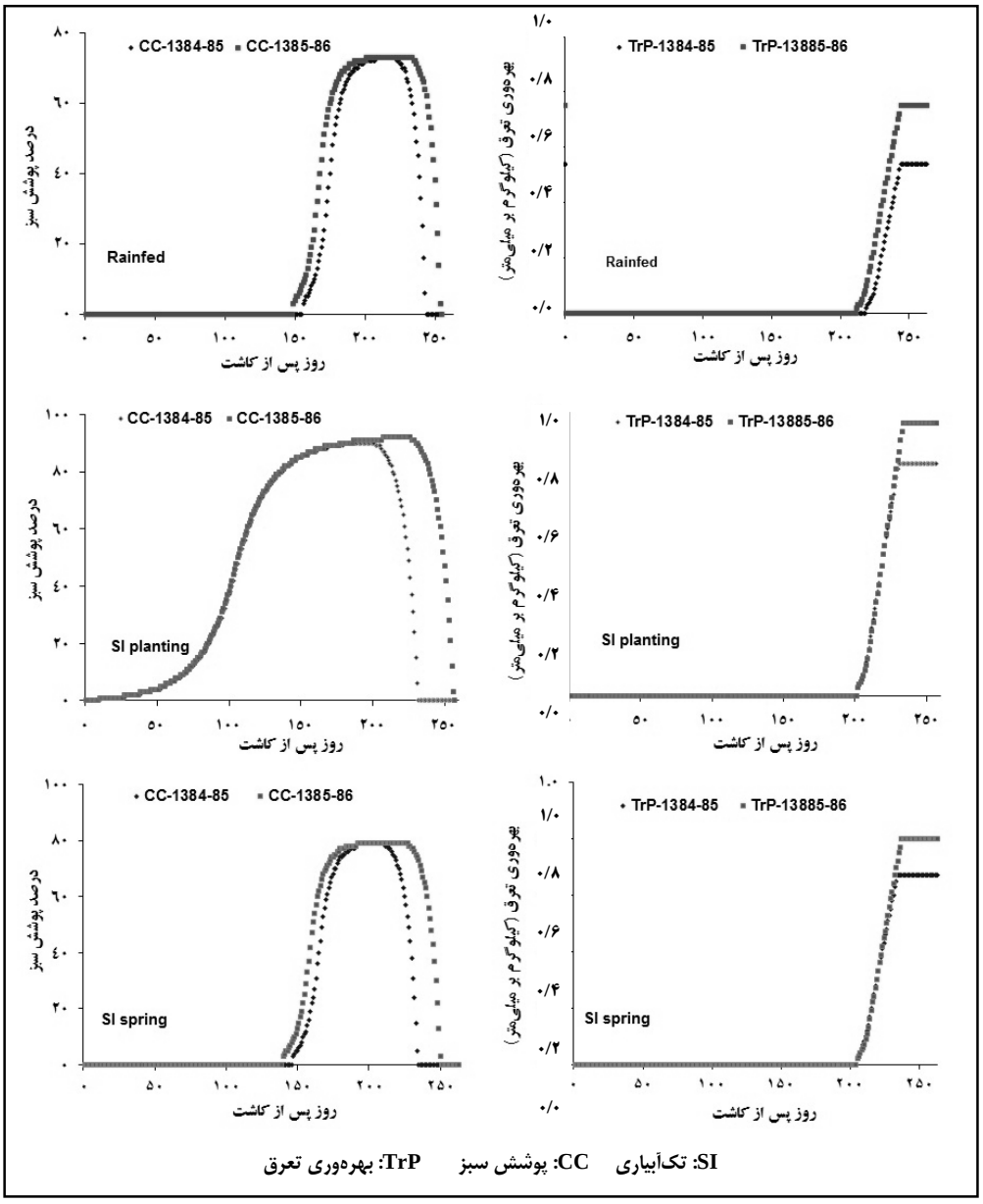


شکل ٤- رطوبت برآورد و اندازه‌گیری شده در تیمارهای دیم و آبیاری (پاییزه و بهاره)، ٨٦-١٣٨٤

جدول ٣- تأثیر زمان اعمال تک‌آبیاری بهاره بر عملکرد و شاخص بهره‌وری تعرق در لرستان

روز پس از کاشت[1] DAP	عملکرد دانه[2] Y (تن در هکتار)	زیست توده[3] B (تن در هکتار)	بهره‌وری تعرق در تولید دانه WP_{Tr} (کیلوگرم بر متر مکعب)	شاخص برداشت[4] HI (درصد)
٢٠٠	٣/٢٩۴	٨/٩۶۴	٠/۶۶	٣۶/٧
٢٠۴	٣/٣١۴	٩/٠٠۶	٠/۶۶	٣۶/٨
٢٠٧	٣/٣٣١	٩/٠٥٧	٠/۶٧	٣۶/٨
٢١١	٣/۶٣٣	٩/٠٩۶	٠/٧٣	٣٩/٩
٢١٥	٣/٨٢۴	٩/٠۴	٠/٧٧	۴٢/٣
٢٢٠	٣/٢٢٨	٨/۶٣٨	٠/۶۶	٣٧/۴

1- Day After Planting = DAP
2- Yield = Y
3- Biomass = B
4- Harvest Index = HI



شکل ٥– درصد پوشش گیاهی و بهره‌وری تعرق در تولید دانه در تیمارهای مختلف، برآورد شده با مدل

تخمین تاریخ کاشت با مدل

فرصت بهره‌گیری از اولین بارش‌های پاییزه، پارامتر مهمی در بهبود بهره‌وری بارش محسوب می‌شود. البته تاریخ کاشت در شرایط دیم با اولین بارش مؤثر مفهوم می‌یابد. برای تخمین تاریخ کاشت در مدل AquaCrop چهار گزاره تعریف شده است. متاسفانه همه این گزاره‌ها منجر به از دست رفتن فرصت استفاده از بخشی از بارش می‌شود. چهار گزاره تعریف شده در مدل به گونه‌ای تعریف شده‌اند که تاریخ کاشت را فقط با بارش مرتبط می‌کند و فاکتور مؤثر دیگر چون دما نادیده گرفته می‌شود. میزان بارش تجمعی از شروع (حداقل ۳۰ میلی‌متر)، بارش تجمعی در ۵ روز متوالی (حداقل ۲۵ میلی‌متر) و بارش

تجمعی ده روزه (حداقل ۴۰ میلی‌متر یا کم‌تر از ۵۰ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل) مبنای تخمین تاریخ کشت خواهند بود. میزان بارش در ایستگاه هواشناسی شهرستان سلسله، طی ۱۰ سال (۷۸-۱۳۷۷ لغایت ۸۷-۱۳۸۶) به ترتیب برابر ۲۹۵، ۳۶۱، ۵۰۴، ۴۷۶، ۴۵۹، ۵۹۰، ۴۷۸، ۵۴۴، ۵۷۳ و ۲۹۴ میلی‌متر بوده است. اگر این گزاره‌ها برای منطقه به‌کار گرفته شوند، گزاره‌های میزان بارش تجمعی از شروع (حداقل ۳۰ میلی‌متر) و بارش تجمعی در ۵ روز متوالی (حداقل ۲۵ میلی‌متر) هم‌سویی کم‌تری دارند. به بیان دیگر، تاریخ کاشت بر اساس روند مدل و بعد از وقوع میزان مشخصی از بارش، یعنی از نیمهٔ دوم آبان ماه به بعد خواهد بود. یادآوری می‌شود که هم اکنون در بسیاری از مناطق تولیدکننده محصولات دیم، همین رویکرد مدل حاکم است. این رویکرد ممکن است در مناطق معتدل و نیمه‌سرد، چون کرمانشاه، قابل توجیه باشد زیرا شرایط اقلیمی (به ویژه دمای هوا) در این مناطق امکان بهره‌گیری از بارش و رشد گیاه را فراهم می‌کند، اما در مناطق سرد که دورهٔ رشد پاییزه محدود است، از دست دادن تاریخ کاشت پذیرفتنی نیست و بهتر است که بر اساس احتمال وقوع بارش، اقدام به کشت کرد که از دههٔ سوم مهر امکان آن فراهم است. ضمن این‌که تک‌آبیاری زمان کاشت در مناطق سرد و نیمه‌سرد با جلو انداختن رشد، امکان بهره‌گیری از بارش‌های پاییزی را فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

هدف از توسعهٔ مدل AquaCrop، که چیدمان آن بر مدیریت مصرف آب و توجه خاص به گیاه استوار است، فراهم کردن ابزاری کارآمد برای شناخت برخی پدیده‌های پنهان در تولید محصول به‌شمار می‌رود که مشتمل است بر موازنهٔ آب خاک، شکل‌گیری و تکامل عملکرد، زیست توده، پوشش سبزینه‌ای و بهره‌وری آب، ارائهٔ گزاره‌های مختلف مدیریتی مصرف آب و ارزیابی مدل‌های محلی برای کمک به بهره‌برداران عرصه مدیریت آب در مزرعه.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای هر محصول با توجه به داده‌ها و اطلاعات محلی ضروری است. با توجه به نتایج و گزارش‌های موجود در خصوص کارآیی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی پارامترهای مورد مطالعه برای ذرت، پنبه و گندم، می‌توان از این مدل در برنامه‌ریزی آبیاری استفاده کرد. مشخص است که لازمهٔ این کار دسترسی به داده‌های مورد نیاز و واسنجی فایل محصول بر اساس شرایط محلی است و استفادهٔ مستقیم از فایل پیش‌فرض محصول ممکن است منجر به نتایج نادرست شود.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در شرایط آزمایش، مدل قادر است پاسخ عملکرد به مقدار آب آبیاری را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی کند، به طوری‌که مقدار ریشه دوم خطای میانگین مربعات برای عملکرد دانه و میزان آب خاک حدود ۸ تا ۱۰ درصد به‌دست آمد. مقدار شاخص سازگاری نزدیک به ۱ حاصل شد که نشان از سازگاری مقادیر آب خاک، عملکرد دانه و درصد پوشش گیاهی در مدل با مقادیر واقعی دارد. این مدل برای تخمین تاریخ کاشت مناسب در شرایط دیم قابل توصیه نیست زیرا فرصت زمانی بهره‌گیری از بارش‌های پاییزه در این مدل نادیده انگاشته شده است.

قدردانی

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی خاص تحت شماره مصوب ۰۰۰۰۰-۸۵۰۴-۰۶-۳۰۰۰۰۰-۱۰۰-۱ است، که با اعتبارات و امکانات موسسهٔ تحقیقات کشاورزی دیم اجرا گردید، که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

Alizadeh, H. A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani-Eetedali, H. and Janbaz, H. R. 2010. Evaluation of AquaCrop model on wheat deficit irrigation in Karaj area. Iranian J. Irrig. Drain. 2(4): 273-283. (in Farsi)

Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A. and Rahnama, A. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. Agric. Water Manag. 100 (1): 1-8.

Anon. 2009. The ETo Calculator. The ETo Calculator Evapotranspiration from a Reference Surface. Reference Manual. Version 3.1. FAO. Rome. Italy.

Anon. 2010. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water. Ver. 3.1.

Araya, A., Keesstra, S. D. and Stroosnijder, L. 2010. Simulating yield response to water of Teff (Eragrostis tef) with FAO's AquaCrop model. Field Crop. Res. 116, 196-204.

Babazadeh, H. and Sarai-Tabrizi, M. 2012. Assessment of AquaCrop model under soybean deficit irrigation management condition. J. Water Soil. 26(3): 329-339. (in Farsi)

Bradford, K. J. and Hsiao, T. C. 1982. Physiological Responses to Moderate Water Stress. In: Lange, O. L., Nobel, P. S., Osmond, C. B. and Ziegler, H. (Eds.) Physiological Plant Ecology. II. Water Relations and Carbon Assimilation. Encyclopedia of Plant Physiology. New Series. Vol. 12B. Sprimger-Verlag, New York. 263-324.

Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage. Paper No. 33. FAO. Rome. Italy.

Eitzinger, J., Trnka, M., Hösch, J., Žalud, Z. and Dubrovský, M. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. Ecol. Modell. 171, 223-246.

Farahani, H. J., Izzi, G., Steduto, P. and Oweis, T. Y. 2009. Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. Agron. J. 101, 469-476.

Garcia-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F. and Steduto, P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. Agron. J. 101, 477- 487.

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 to water of Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) with FAO-AquaCrop. Agron. J. 101, 499-508.

Hanks, R. J. 1983. Yield and Water-Use Relationships. In:Lange, O. L., Kappen, L. and Schulze, E. D. (Eds.) Ecological Studies. Analysis and Synthesis. Vol. 19. Water and Plant Life. Springer-Verlag. Berlin.

Heng, L. K., Evett, S. R., Howell, T. A. and Hsiao, T. C. 2009. Calibration and testing of FAO AquaCrop model for maize in several locations. Agron. J. 101, 488-498.

Hsiao, T. C., Fereres, E., Acevedo, E. and Henderson, D. W. 1976. Water Stress and Dynamics of Growth and Yield of Crop Plants. In: Lange, O. L., Kappen, L. and Schulze, E. D. (Eds.) Ecological Studies. Analysis and Synthesis. Vol. 19. Water and Plant Life. Springer-Verlag, Berlin. 281-305.

Hsiao, T. C., Heng, L. K., Steduto, P., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. Agron. J. 101, 448-459.

Loague, K. and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. J. Contam. Hydrol. 7, 51-73.

Raes, D. 2002. BUDGET, A Soil Water znd Salt Balance Model. Reference Manual. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences Institute for Land and Water Management. Belgium.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2006. Structure, algorithms and functionalities of the FAO crop-water productivity model AquaCrop. International Symposium on Water and Land Management for Sustainable Irrigated Agriculture. April 4-8. Adana. Turkey.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and soft ware description. Agron. J. 101, 438-447.

Ramezani-Etedali, H., Nazari, B., Tavakoli, A. R. and Parsinejad, M. 2009. Evaluation of CROPWAT model in deficit irrigation management of wheat and barley in Karaj. J. Water Soil. 23(1): 119-129. (in Farsi)

Salemi, H. R., Soom, M. A. M., Lee, T. S., Mousavi, S. F., Ganji, A. and Yusoff, M. K. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. African J. Agric. Res. 610, 2204-2215.

Singh, A. K., Tripathy, R. and Chopra, U. K. 2008. Evaluation of CERES-wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. Agric. Water Manag. 95, 776-786.

Smith, M. 1992. CROPWAT, A computer program for irrigation planning and management. FAO. Irrigation and Drainage. Paper No. 46. FAO. Rome.

Steduto, P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. Irrig. Sci. 25, 189-207.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agron. J. 101, 426-437.

Tanner, C. B. and Sinclair, T. R. 1983. Efficient Water Use in Crop Production: Research or Re-Search? In: Taylor, H. M., Jordan, W. R. and Sinclair, T. R. (Eds.) Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. ASA, CSSA and SSSA. Madison. WI.

Tavakoli, A. R., Oweis, T., Ashrafi, Sh., Asadi, H., Siadat, H. and Liaghat, A. 2010. Improving rainwater productivity with supplemental irrigation in upper Karkheh river basin of Iran. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). Aleppo. Syria.

Vaux, H. J. Jr. and Pruitt, W. O. 1983. Crop-water production functions. Adv. Irrig. 2, 61-97.

Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society (SAUO). 63, 1309-1313.

Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.14/No.4/2014/P:41-56

Soil Water Balance, Sowing Date and Wheat Yield Using AquaCrop Model under Rainfed and Limited Irrigation

A. R. Tavakoli*, A. Liaghat and A. Alizadeh

* Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Agricultural & Natural Resources Research Center of Semnan Province (Shahrood), P. O. Box: 36155-313, Shahrood, Iran. Email: art.tavakoli@gmail.com.

Received: 29 December 2012, Accepted: 4 May 2013

Simulation models of the effect of water on crop yield are valuable tools for improving on-farm water management and water productivity. The AquaCrop model has recently been developed by the FAO to predict crop productivity, net water requirements, and water use efficiency for different scenarios, including rainfed and limited irrigation. The model is suitable for evaluating different regions and crops. The present research examined the efficiency of the AquaCrop model for simulating yield, soil moisture content, and crop canopy response to water availability for wheat in rainfed areas. The region under study in Iran was the upper Karkheh River basin in the Selseleh region of Lorestan province during 2005-2007. The on-farm trials included three irrigation treatments (rainfed, single irrigation only at planting time, single irrigation only in spring). To evaluate the model performance and accuracy of prediction, maximum error, normalized root mean square error, and index of agreement were computed from observed and simulated variables (grain yield, soil moisture content, evapotranspiration). The reliability index of normalized RMSE was 8.34% to 10.56% and of efficiency was 0.78 to 0.93. This indicates that the model was able to accurately simulate soil water content of the root zone, grain yield, and crop canopy under research conditions when compared with field data. The d-statistic indicates that the closer the index value is to unity, the better the agreement between the two variables compared and vice versa. The AquaCrop model for estimation of sowing date under rainfed conditions was not efficient because it required a minimum value for precipitation. The model performed satisfactorily for simulation of grain yield, soil water content, and crop canopy for the rainfed and limited irrigation treatments. The AquaCrop requires minimal input data that is readily available or can easily be collected, making it a user-friendly option for users.

Keywords: AquaCrop model, Crop canopy, Single irrigation, Transpiration, Water productivity