نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۷، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۹، ص. ۶۴-۵۳

Water Management in Agriculture
Vol. 7, No. 1, Spring and Summer 2020, 53-64

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گندم در دشت هندیجان با استفاده از مدل AquaCrop*

محمدعلی برزیکار [۱]، اصلان اگدرنژاد[۲]*، آرش تافته[۳] و نیازعلی ابراهیمی پاک[۴]

چکیده

با توجه به اهمیت گیاه گندم، کاشت آن در بسیاری از دشت‌های استان خوزستان انجام می‌شود. لیکن شرایط کاشت برای این گیاه زراعی در همه دشت‌ها یکسان نیست؛ بنابراین نیاز است آزمایش‌های متعددی برای تعیین شرایط مناسب کاشت آن انجام شود. این آزمایش‌ها سبب صرف وقت و هزینه بسیاری می‌شوند. به همین دلیل استفاده از مدل‌های گیاهی مانند AquaCrop برای بررسی سناریوهای مختلف تأمین آب آبیاری و تاریخ کاشت بسیار ضروری است. براساس این هدف، پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop و شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گندم در دشت هندیجان انجام شد. بدین منظور، داده‌های موردنیاز از ۹ زمین زراعی در طی دو سال زراعی (۱۳۹۵-۱۳۹۳) برداشت شد. بیشترین عملکرد گندم در این مطالعه برابر با ۱۶۲۶ کیلوگرم بر هکتار (با بهره‌وری آب ۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب) بود. نتایج صحت‌سنجی مدل AquaCrop نشان داد که این مدل برای شبیه‌سازی هر دو پارامتر عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی شد (≤۰ میانگین خطای اریب). دقت (≥۰,۱ جذر میانگین مربعات نرمال شده) و کارایی (≤۰ کارایی مدل) این مدل برای شبیه‌سازی هر دو پارامتر مذکور مطلوب بود؛ بنابراین از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گندم برای سه مقدار آب آبیاری ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر در سه تاریخ کاشت دهه اول، دوم و سوم آبان استفاده شد. نتایج نشان داد که کاربرد آب آبیاری ۷۰۰ میلی‌متر و رعایت تاریخ کاشت دهه سوم آبان سبب دستیابی به عملکرد ۱۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار و بهره‌وری آب ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب شد.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کاشت، سناریوهای آبیاری، مدل آب-محور، مدل‌سازی گیاهی

مقدمه

گیاه زراعی گندم یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی ایران است که به‌طور متوسط ۴۵ درصد کالری و ۷۰ درصد پروتئین مصرفی مردم را تأمین می‌کند. با توجه به خصوصیات این گیاه، کاشت آن در همه استان‌ها انجام می‌شود. استان خوزستان نیز به دلیل دارا بودن رودخانه‌های بزرگ (Albaji et al., 2016)، یکی از مراکز مهم کاشت این گیاه زراعی محسوب می‌شود. علی‌رغم این موضوع، بهره‌وری آب برای این گیاه زراعی بسیار پایین است به‌طوری‌که اکثر محققان مقدار آن را بین ۰/۳ تا ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب تخمین زده‌اند (Farahani and Oweis, 2008; Tavakoli et al., 2008). این مشکل ناشی از عدم رعایت مناسب مقدار آب مصرفی و تاریخ کاشت صحیح است. تأمین

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
[۲] استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. (* نویسنده مسئول: a_eigder@ymail.com)
[۳] استادیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
[۴] دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
* مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز
تاریخ دریافت: ۹۹/۵/۵
تاریخ پذیرش: ۹۹/۶/۲۶
DOR: 20.1001.1.24764531.1399.7.1.6.3

مقدار آب آبیاری مناسب در مراحل اولیه رشد و مرحله گلدهی تا دانه بستن سبب افزایش عملکرد و بهبود بهره‌وری آب می‌شود (Farahani and Oweis, 2008). از طرف دیگر، کاهش اتلاف آب در سایر دوره‌های رشد نیز به افزایش این شاخص کمک شایانی می‌کند (Blum, 2009; Farre and Faci, 2009; Geerts and Raes, 2009). تاریخ کاشت نامناسب نیز به دلیل عدم برنامه‌ریزی مناسب آبیاری اثر زیادی بر عملکرد گندم دارد. این موضوع به‌خصوص در شرایط خشک‌سالی اثر بیشتری پیدا می‌کند.

با توجه به اینکه مزارع بسیاری در استان خوزستان تحت کشت گندم هستند، هر کدام از آن‌ها مقدار آبیاری و تاریخ کاشت خاصی برای زراعت گندم دارند. این موضوع سبب شده است تا محققان نتوانند آزمایش‌های کاملی برای دستیابی به اهداف موردنظر انجام دهند. چون این آزمایش‌ها نیازمند صرف وقت و هزینه بسیار هستند. جهت رفع این مشکل، محققان مدل‌های گیاهی مختلفی را بسط داده‌اند تا با استفاده از آن‌ها بتوان سناریوهای مختلف تأمین آب را بر گیاهان زراعی بررسی کرد (Geerts and Raes, 2009). مدل AquaCrop ازجمله مهم‌ترین مدل‌های زراعی است که توسط سازمان خواروبار کشاورزی (فائو) بسط داده‌شده است و به دلیل سادگی، نیاز به داده‌های کمتر، کاربردی بودن و دقت قابل‌قبول نسبت به سایر مدل‌های رشد گیاهی برتری دارد (Heng et al., 2009). این مدل گیاهی تاکنون برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی مختلف مانند جو، ذرت، چغندرقند و ذرت مورداستفاده قرارگرفته است (Katerji et al., 2013; Masanganise et al., 2013; Hsiao et al., 2009; Heng et al., 2009). در این تحقیقات مشاهده شد که دقت و کارایی این مدل برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی قابل‌قبول بود. در تحقیقی دیگر که توسط گارسیا ویلا و فرس انجام شد، مدیریت آبیاری در مزارع جنوب اسپانیا موردبررسی قرار گرفت. این محققان با اعتماد به نتایج مدل AquaCrop، سناریوهای مختلفی را برای کاهش سطوح کشت و افزایش قیمت محصول بر اساس تغییرات مقدار آب در دسترس ارائه کردند (Garcia-Vila and Fereres, 2012). ابراهیمی‌پاک و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از مدل AquaCrop به شبیه‌سازی گیاه زراعی کلزا پرداختند و نشان دادند که این مدل دقت مناسبی برای تعیین عملکرد و بهره‌وری آب این گیاه زراعی داشت.

با توجه به خصوصیات مدل AquaCrop، از این مدل برای شبیه‌سازی گیاه زراعی گندم نیز استفاده‌شده است. به‌عنوان‌مثال، مخابلا و بولاک (Mkhabela and Bullock, 2012) از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در غرب کانادا استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق ایشان نشان داد که مقدار R^2 برای شبیه‌سازی عملکرد توسط این مدل گیاهی برابر با ۰/۶۶ بود. به همین دلیل، این محققان گزارش کردند که توانایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گندم قابل‌قبول بود. مبن و همکاران از این مدل برای شبیه‌سازی گندم در منطقه پنسیلوانیا استفاده کردند. این محققان نیز گزارش کردند که این مدل دقت مناسبی داشت (Mebane et al., 2013). سالمی و همکاران از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی اثر کم‌آبیاری و آبیاری کامل بر عملکرد گندم استفاده کردند. این محققان نشان دادند که این مدل دقت بالایی برای شبیه‌سازی عملکرد این گیاه زراعی داشت. (Salemi et al., 2011). شمس نیا و پیرمرادیان عملکرد گندم را با استفاده از مدل AquaCrop در شرایط اقلیمی شیراز ارزیابی کردند. این محققان نشان دادند که دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی این گیاه زراعی مطلوب بود (Shamsnia and Pirmoradian, 2013).

دشت هندیجان یکی از مناطق مهم کشت گندم در استان خوزستان می‌باشد که به دلیل شوری آب‌وخاک و عدم برنامه‌ریزی صحیح آبیاری، از عملکرد و بهره‌وری مصرف پایینی در کشت گندم برخوردار است. به همین دلیل لازم است راهکارهایی برای رفع این مشکلات ارائه شود. با توجه به‌مرور منابع، در این تحقیق ابتدا مدل AquaCrop تحت واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. سپس از این مدل برای شبیه‌سازی اثر تغییر عمق آبیاری و تاریخ کاشت بر عملکرد و بهره‌وری مصرف گندم استفاده شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با بررسی سه پایلوت اصلی طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۳ در دشت هندیجان در استان خوزستان انجام شد.

این منطقه بین مختصات ۳۲ درجه ۴۹ دقیقه تا ۴۷ و ۴۹ شرقی و ۱۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۰ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی قرار دارد. منبع اصلی آب این دشت رودخانه زهره است. خصوصیات اقلیمی محدوده طرح مانند دیگر نواحی دشت خوزستان در تابستان متأثر از توده‌های هوای گرم و خشک صحرایی آفریقا و بیابان‌های حجاز است. در سایر فصول تحت تأثیر آب‌وهوای مدیترانه‌ای، رطوبت نسبی آن بالا و بارندگی کمی اتفاق می‌افتد. از نظر تقسیم‌بندی اقلیمی، به روش دومارتن به‌عنوان منطقه خشک و به روش آمبرژه منطقه بیابانی گرم طبقه‌بندی‌شده است. بافت خاک در محدوده مورد مطالعه به‌طور عمده سنگین تا خیلی سنگین است. آب زیرزمینی دارای نوسان زیاد بوده و در بیشتر ایام سال در عمق کمی از سطح زمین قرار دارد که سبب زه‌دار شدن اراضی می‌گردد. هدایت الکتریکی آب آبیاری نیز برابر با ۳ دسی‌زیمنس بر متر است. کشت عمده این منطقه گندم آبی است و آب آبیاری در این مزارع به‌صورت سنتی و طی شش آبیاری تأمین می‌شود. مقدار عملکرد گندم در این منطقه بسیار پایین است و در اکثر مزارع کمتر از ۱ تن در هکتار است.

در این دشت سه مزرعه به‌عنوان پایلوت انتخاب شدند. این سه مزرعه طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۳ مورد مطالعه قرار گفتند. سپس کلیه اطلاعات مورد نیاز مدل Aquacrop از قبیل اطلاعات اقلیمی (نظیر حداقل و حداکثر دمای منطقه، دمای روزانه، میزان بارندگی و ...)، اطلاعات گیاهی (نظیر تاریخ کاشت و برداشت، عملکرد و...)، اطلاعات خاک و اطلاعات مدیریت مزرعه و آبیاری (نظیر کیفیت آب آبیاری، زمان و مقدار آب آبیاری و...) در این مزارع تعیین شد. متوسط برخی خصوصیات خاک مزارع مورد مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده است. در مدل AquaCrop، داده‌های برداشت‌شده از مزرعه وارد می‌شود و این مدل گیاهی از طریق از رابطه (۱) مقدار عملکرد گندم را شبیه‌سازی می‌کند (Geerts et al., 2009).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y\left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \qquad (۱)$$

که در این رابطه، Yx و Ya به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ETx و ETa به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه و Ky ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق است. عملکرد و زیست‌توده کل نیز به ترتیب از روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند.

$$B = WP^{*}\left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}}\right] \qquad (۲)$$

$$Y = B \times HI \qquad (۳)$$

که در این روابط، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی (رابطه ۴)، WP بهره‌وری آب، ETo تبخیر-تعرق گیاه مرجع، Y و B به ترتیب عملکرد و زیست‌توده خشک و HI شاخص برداشت است.

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \qquad (۴)$$

که در آن، Ks و Kc به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC توسعه پوشش تاج از زمان جوانه‌زنی تا مقدار بیشینه (رابطه ۵) هستند.

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \qquad (۵)$$

که در این رابطه، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)، CC0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) می‌باشد. در این مدل، شدت تنش آبی (Ks) مؤثر بر توسعه پوشش تاج (CC)، هدایت روزنه‌ای (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به‌وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش‌یافته و به‌تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد.

به‌منظور واسنجی مدل AquaCrop، از داده‌های برداشت‌شده در مزارع پایلوت مشابه استفاده شد. این اطلاعات به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. بدین منظور ابتدا با استفاده از این اطلاعات

و براساس رابطه (۶)، تحلیل حساسیت انجام شد (Geerts et al., 2009).

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \qquad (۶)$$

که در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، Pm مقدار برآورد شده پارامتر مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل‌شده و Pb مقدار برآورد پارامتر مورد نظر براساس داده ورودی پایه می‌باشد. برای تحلیل حساسیت مدل به هر پارامتر، در هر مرحله یکی از عوامل ورودی مدل به مقدار ۲۵ درصد تغییر داده می‌شد و بقیه پارامترها ثابت نگه‌داشته می‌شدند (Geerts et al., 2009). در هر مرحله مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، Sc <۱۵ حساسیت بالا، ۱۵> Sc >۲ حساسیت متوسط، Sc <۲ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (Geerts et al., 2009). در مرحله واسنجی، پارامترهای با حساسیت متوسط و بالا آن‌قدر تغییر داده شدند تا مقادیر آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) به کمترین مقدار و کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R2) به بیشترین مقدار ممکن رسیدند. سپس صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های زراعی سال‌های دوم و سوم انجام شد و آماره‌های اشاره‌شده انجام شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۷) تا (۱۲) نشان داده‌شده‌اند.

جدول ۱- متوسط برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک سه مزرعه موردمطالعه

عمق (سانتی‌متر)	هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی‌متر بر ساعت)	EC (دسی‌زیمنس بر متر)	pH (-)	رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی دائم (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	بافت خاک
۰-۳۰	۲/۶	۱۲/۹	۷/۱	۰/۳۳	۰/۲۱	۱/۲۹	سیلتی‌رسی
۳۰-۶۰	۳/۲	۷/۶	۷/۴	۰/۳۲	۰/۱۹	۱/۲۹	سیلتی‌رسی
۶۰-۹۰	۲/۴	۶/۰	۷/۵	۰/۳۵	۰/۲۲	۱/۲۷	سیلتی‌رسی

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

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

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

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

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

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

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی‌شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده‌ی

دقت عالی مدل است. هم‌چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲- ۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل‌های رشد گیاهی مقدار عامل مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد عامل مورد نظر عدد کوچک‌تری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

پس از واسنجی، صحت‌سنجی با استفاده از این مدل انجام شد. به‌منظور صحت‌سنجی، از اطلاعات برداشت‌شده از سه مزرعه مطالعاتی در دشت هندیجان طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۳ استفاده شد. این اطلاعات شامل مقادیر آب آبیاری، خصوصیات خاک مزارع، تاریخ کاشت، داشت و برداشت گندم و خصوصیات هواشناسی منطقه بود. با استفاده از این پارامترها، میزان عملکرد و بهره‌وری آب برای مقادیر مختلف آب آبیاری در هر سه پایلوت مورد مطالعه تعیین شد. سپس با استفاده از مدل AquaCrop، دو تیمار تغییر مقدار آب آبیاری (I1: ۳۰۰، I2: ۵۰۰، I3: ۷۰۰ میلی‌متر) و تاریخ کاشت (T1: ۵ آبان، T2: ۱۵ آبان و T3: ۲۵ آبان) مورد مطالعه قرار گرفتند. انتخاب این تیمارها براساس مقدار آب آبیاری عرف منطقه مورد مطالعه و تاریخ کاشت گندم در دشت هندیجان بود. مقدار آب آبیاری برای تیمارهای I3-I1 با در نظر گرفتن شش آبیاری در طول فصل رشد و در نظر گرفتن نیاز آب آبیاری گندم در دوره رشد بود.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل AquaCrop پیش از واسنجی انجام شد و برخی نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که این مدل نسبت به تغییرات اکثر پارامترهای ورودی حساسیت متوسط داشت. تغییرات برخی پارامترها نیز مانند ضریب گیاهی برای تعرق بر خروجی این مدل حساسیت تقریباً بالایی داشت. پارامترهایی که دارای حساسیت بیشتر از مقدار دو بودند تحت واسنجی قرار گرفتند. نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. برخی پارامترها در این جدول برابر با مقدار پیش‌فرض در نظر گرفته شد. این پارامترها برای گیاه زراعی گندم در هر منطقه ثابت است. برخی پارامترها مانند مدت‌زمان کاشت تا دوره‌های مختلف گیاهی نیز با اندازه‌گیری مزرعه‌ای تعیین شدند.

جدول ۲- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل‌های رشد گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم

پارامتر	مقدار Sc در حالت ۲۵٪+	مقدار Sc در حالت ۲۵٪-	درجه حساسیت
رطوبت در ظرفیت زراعی	۱/۵	۴/۶	کم-متوسط
رطوبت در نقطه پژمردگی	۱/۳	۱/۵	کم-کم
رطوبت در حالت اشباع	۱/۸	۲/۴	کم-متوسط
ضریب گیاهی برای تعرق	۹/۶	۸/۸	متوسط-متوسط
عمق مؤثر ریشه	۳/۷	۵/۶	متوسط-متوسط
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۷/۲	۳/۳	متوسط-متوسط
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۳/۹	۶/۷	متوسط-متوسط

جدول ۳- مقادیر عوامل گیاهی مورداستفاده در مدل‌های رشد گیاهی AquaCrop

توضیح عامل	مقدار	واحد	توضیح
مدل AquaCrop			
دمای پایه	۰	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۲۶	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
ضریب رشد کانوپی	۴/۹	درصد روز	پیش‌فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۱/۵	سانتی‌متر مربع	پیش‌فرض
عمق مؤثر ریشه	۰/۳۵	متر	اندازه‌گیری
مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۴	روز	اندازه‌گیری
مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۱۰۵	روز	اندازه‌گیری
مدت‌زمان کاشت تا دوره پیری	۱۴۵	روز	اندازه‌گیری
مدت‌زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۶۵	روز	اندازه‌گیری
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۴	گرم بر مترمربع	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۹۲	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۲۳	–	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۶۷	–	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۵/۷	درصد روز	پیش‌فرض
ضریب کاهش پوشش	۸/۱	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۰۵	درصد بر روز	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۲/۲	–	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۲/۸	–	واسنجی

نتایج آماری مقایسه نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در جدول ۴ نشان داده شده است. براساس این نتایج، مدل AquaCrop در مرحله واسنجی دچار خطای بیش‌برآوردی بر شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب شد. مقادیر این خطا براساس آماره RMSE به ترتیب برابر با ۰/۴ تن و ۰/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی بود. این نتایج به همراه مقادیر به‌دست‌آمده برای آماره NRMSE نشان داد که دقت این مدل برای شبیه‌سازی این دو پارامتر در محدوده ۰/۱-۰ و رتبه عالی بود. مقادیر آماره EF برای عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب برابر با ۰/۶۰ و ۰/۰۸ و مقادیر d برای این دو پارامتر به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۹۹ بود؛ بنابراین، کارایی این مدل برای شبیه‌سازی دو پارامتر مذکور، براساس دو آماره EF و d، نیز قابل‌قبول بود (جدول ۴). نتایج به‌دست‌آمده از مرحله صحت‌سنجی نیز نشان داد که مقدار آماره MBE برای عملکرد و بهره‌وری آب بزرگ‌تر از صفر بود. درنتیجه این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب دچار خطای بیش‌برآوردی شد (جدول ۴). مقدار آماره NRMSE برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب مورد بین ۰/۱-۰ قرار داشت در نتیجه دقت این مدل برای شبیه‌سازی این دو پارامتر عالی بود. مقادیر EF و d برای عملکرد به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۹۹ و برای بهره‌وری آب به ترتیب برابر با ۰/۱۰ و ۰/۹۸ بود (جدول ۴). درنتیجه کارایی به‌دست‌آمده برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب توسط مدل AquaCrop نیز قابل‌قبول بود. براساس این نتایج، می‌توان به‌دقت و کارایی این گیاهی اعتماد کرد.

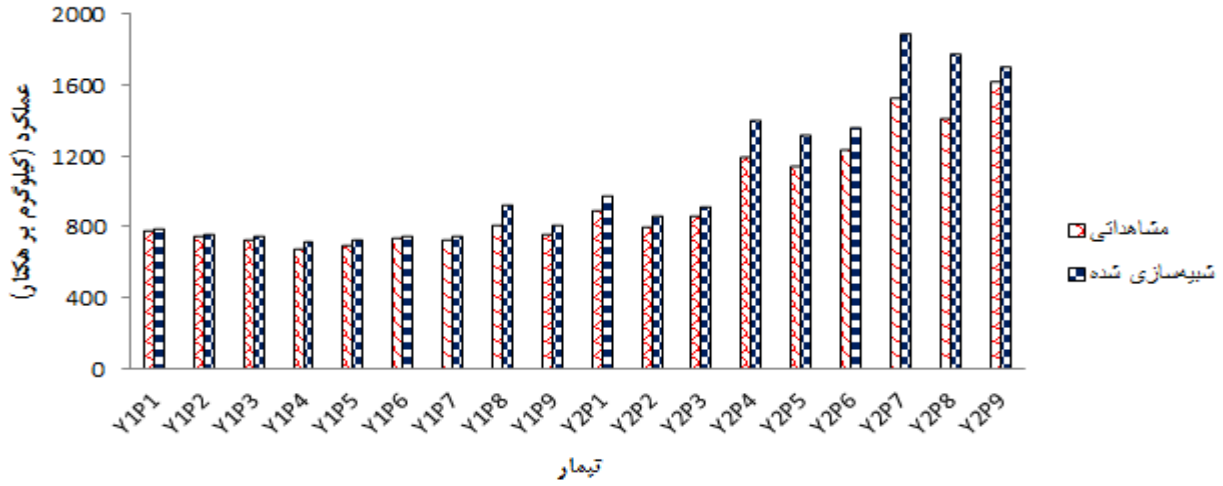
نتایج به‌دست‌آمده برای مقایسه عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در شکل ۱ نشان داده‌شده است. براساس این نتایج، عملکرد مشاهداتی در سال دوم بیشتر از سال اول بود. به نظر می‌رسد دلیل آن وقوع بارش بیشتر در سال دوم بود. همچنین، در پایلوت‌های ۷ الی ۹، مقدار عملکرد بیشتر از سایر پایلوت‌ها بود. به نظر می‌رسد این اختلاف به دلیل مقدار آبیاری بیشتر در این سه پایلوت بود. با توجه به شوری بالای آب آبیاری و خاک مزرعه

(جدول ۱) و عدم تأمین کافی نیاز آبی گندم در طول دوره رشد، مقدار عملکرد گندم در سه پایلوت مورد مطالعه بسیار پایین بود. به‌طوری‌که مقدار عملکرد بیشتر از ۲ تن در هکتار مشاهده نشد. مقادیر شبیه‌سازی‌شده عملکرد در این پایلوت‌ها بیشتر از مقادیر مشاهداتی بود. این نتایج در جدول ۵ نیز تأیید شده بود. با افزایش مقدار آب آبیاری، عملکرد محصول نیز با شیب بالایی افزایش یافت (شکل ۲). به دلیل شوری بالای محیط کشت، آب آبشویی برای متعادل کردن محیط رشد گیاه لازم است. به همین دلیل، با افزایش آب آبیاری، عملکرد نیز افزایش یافت. مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد، به‌طور متوسط دچار ۸ درصد خطا شد. این نتایج با مشاهدات محققانی مانند هنگ و همکاران (Heng et al., 2009) و اندرزیان و همکاران (Andarzian et al., 2011) مطابقت داشت. بنابراین، این مقدار برای این مدل قابل‌قبول است.

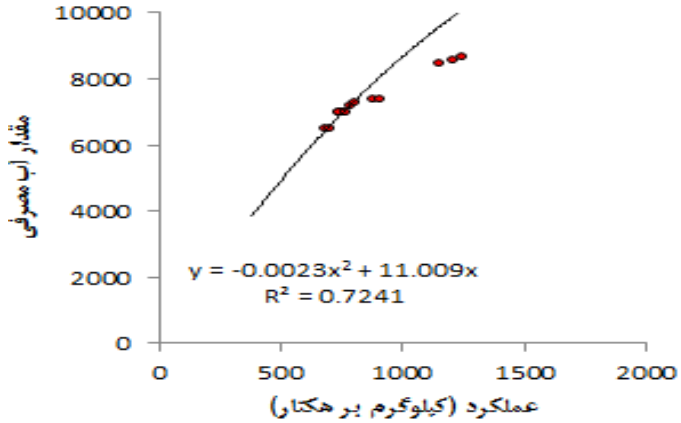
نتایج به‌دست‌آمده برای بهره‌وری آب در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با افزایش مقدار آب آبیاری یا عملکرد دانه، در هر دو سال، بهره‌وری آب نیز دستخوش تغییرات شده است. بااین‌وجود، در هیچ‌کدام از پایلوت‌ها مقدار این پارامتر بیشتر از ۰/۲ کیلوگرم بر مترمکعب نشد. این مقدار کمتر از حد گزارش‌شده برای گندم در دشت‌های کشور است (Tavakoli and Oweis, 2008). این موضوع به دلیل عملکرد پایین گندم و بالا بودن مصرف آب آبیاری است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی بهره‌وری آب نیز نشان داد که مدل AquaCrop به‌طور متوسط دچار خطایی برابر با ۷ درصد شد.

جدول ٤- نتایج آماره‌های مختلف برای عملکرد و بهره‌وری آب در مرحله‌های واسنجی و صحت‌سنجی

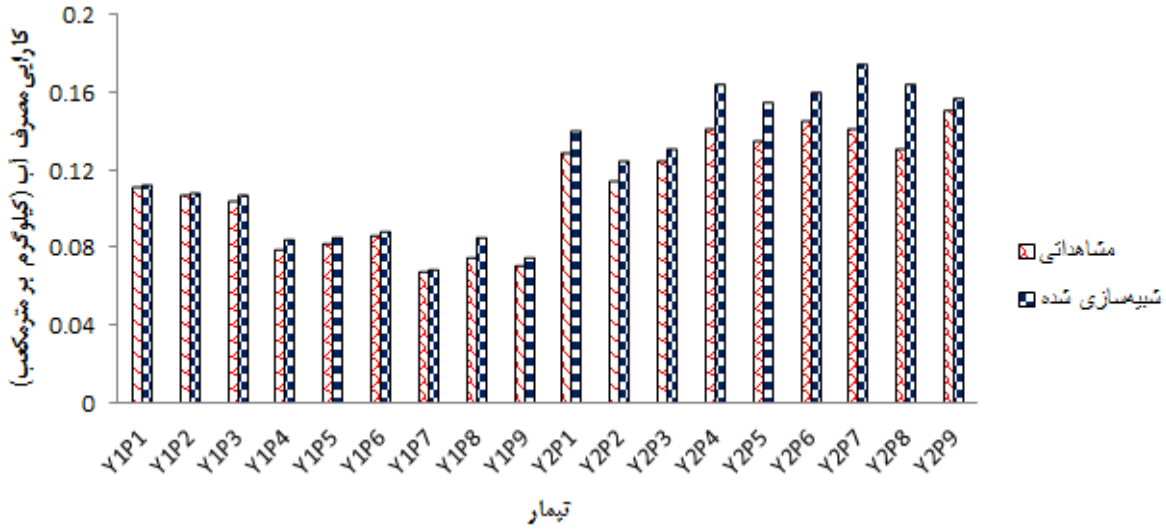
مرحله از شبیه‌سازی	پارامتر	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
واسنجی	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)	۹	۴۰	۰/۰۴	۰/۶۰	۰/۹۹
	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۹۹
صحت‌سنجی	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)	۱۵	۴۵	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۹۹
	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۱۰	۰/۹۸



شکل ۱-مقایسه عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل AquaCrop در صحت سنجی (P نشان‌دهنده شماره پایلوت و Y نشان‌دهنده سال برداشت است)

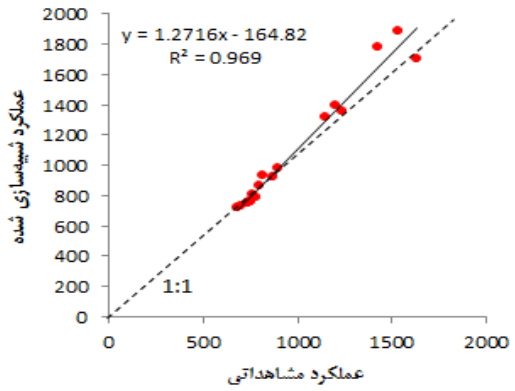


شکل ۲-همبستگی بین عملکرد مشاهداتی و مقدار آب مصرفی در سال دوم

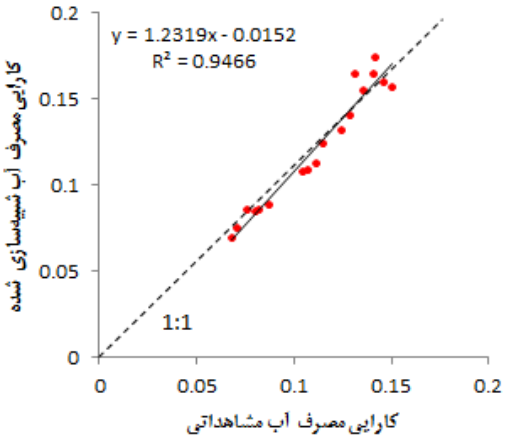


شکل ۳-مقایسه بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل AquaCrop در صحت سنجی (P نشان‌دهنده شماره پایلوت و Y نشان‌دهنده سال برداشت است)

آب گندم به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، مدل AquaCrop قابلیت بالایی برای پیروی از تغییرات عملکرد و بهره‌وری آب در پایلوت‌های موردمطالعه داشت. این نتایج نشان داد که اگر عملکرد گندم مشاهداتی کمتر از ۱۳۲ کیلوگرم در هکتار باشد، مدل AquaCrop دچار خطای کم‌برآوردی می‌شود. با توجه به اینکه در همه پایلوت‌ها عملکرد گندم بیشتر از این مقدار بود؛ این مدل همیشه خطای بیش‌برآوردی دارد. همچنین اگر بهره‌وری آب گندم کمتر از ۰/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب باشد، این مدل دچار خطای کم‌برآوردی می‌شود.



شکل ٤-همبستگی بین مقادیر عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در صحت سنجی

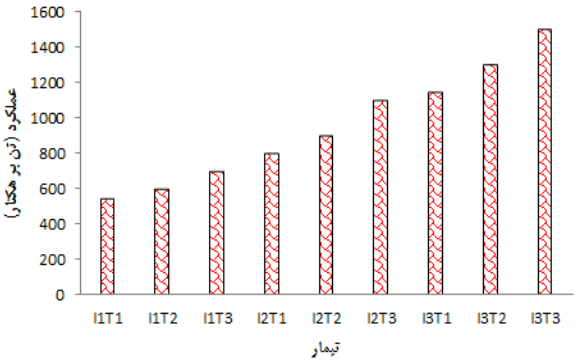


شکل ۵-همبستگی بین مقادیر بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در صحت سنجی

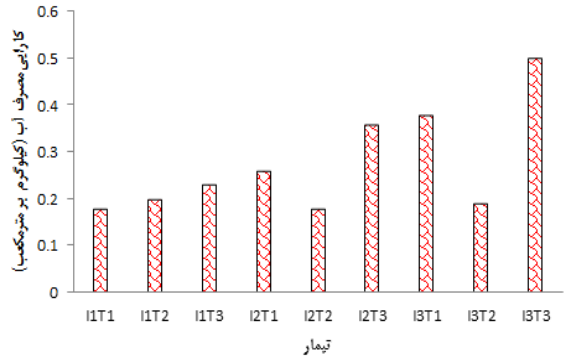
تیمارهای تغییر مقدار آب آبیاری و تاریخ کاشت با استفاده از این مدل بررسی شد (شکل‌های ۷ و ۸). براساس نتایج به‌دست‌آمده، با افزایش مقدار آب آبیاری، عملکرد گندم نیز افزایش یافت. به‌طوری‌که با تغییر مقدار آب آبیاری از I1 به I3، عملکرد گندم به‌طور متوسط ۴۰ درصد افزایش یافت.

با توجه به حساسیت گندم در دوره‌های ابتدایی کاشت و گلدهی به کم‌آبیاری (Tavakoli and Oweis, 2008)، میزان بارندگی در طول فصل رشد اهمیت بسیاری بر عملکرد آن دارد. با توجه به بالا بودن شوری آب آبیاری و خاک مزرعه در سه پایلوت موردمطالعه، به نظر می‌رسد بارندگی سهم بسزایی در افزایش رشد و عملکرد گندم داشت. این موضوع با توجه به شکل ۹ نیز قابل تفسیر است. بر اساس شکل ۹، مقدار بارش در ابتدای فصل رشد بسیار کمتر از سایر ماه‌های دوره رشد است. بیشترین بارش در ماه آذر و کمترین بارش در اسفند رخداده است. به همین دلیل، تغییر تاریخ کاشت گندم به دهه سوم آبان، در هر سه مقدار آب آبیاری، سبب افزایش عملکرد گندم شد.

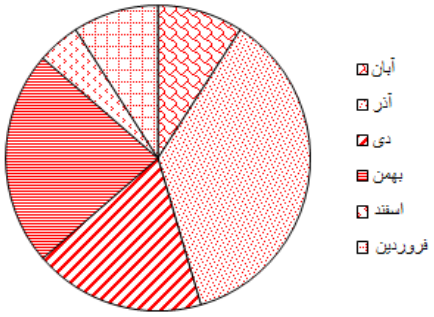
با توجه به اینکه مقادیر عملکرد مشاهده‌شده برای همه تیمارها بیشتر از ۱۳۲ کیلوگرم در هکتار بود؛ می‌بایست خطای بیش‌برآوردی مدل AquaCrop را پذیرفت. با فرض متوسط خطای ۴۵ کیلوگرم برای این مدل (جدول ۴)، در نظر گرفتن تیمار I3T3 سبب به دست آمدن ۱۴۵۵ کیلوگرم بر هکتار گندم می‌شود. با توجه به اینکه در اکثر مزارع تحت کشت در این منطقه، مقدار عملکرد گندم کمتر از یک تن در هکتار است؛ این مقدار از اکثر پایلوت‌های مورد مطالعه در دشت هندیجان بیشتر بود. میزان بهره‌وری آب برای این تیمار برابر با ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود که از کلیه پایلوت‌های موردمطالعه در این دشت بیشتر بود (شکل ۸). مقدار بهره‌وری آب برای دو تیمار I2T3 و I3T1 نیز بین ۰/۳ تا ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. درنتیجه با مقدار آب آبیاری برابر با I1، نمی‌توان انتظار دستیابی بهره‌وری آب در محدوده اشاره‌شده را داشت. گرچه عملکرد گندم در تیمار I3T2 بیشتر از I3T1 بود؛ لیکن به دلیل اثرگذاری هر دو عامل عملکرد و مقدار آب مصرفی بر بهره‌وری آب؛ تیمار I3T2 نتیجه قابل قبولی نداشت.



شکل ۷-عملکرد شبیه‌سازی‌شده برای تیمارهای مختلف (I1، I2 و I3 به ترتیب نشان‌دهنده مقدار ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر آب آبیاری و T1، T2 و T3 به ترتیب نشان‌دهنده تاریخ کاشت در دهه اول، دهه دوم و دهه سوم آبان است).



شکل ۸-بهره‌وری آب شبیه‌سازی‌شده برای تیمارهای مختلف (I1، I2 و I3 به ترتیب نشان‌دهنده مقدار ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر آب آبیاری و T1، T2 و T3 به ترتیب نشان‌دهنده تاریخ کاشت در دهه اول، دهه دوم و دهه سوم آبان است).



شکل ۹-میانگین بارش بیست‌ساله در منطقه مورد مطالعه (درصد)

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی عملکرد و بهره‌وری آب گندم در دشت هندیجان پرداخته شد. نتایج نشان داد که در این منطقه، عملکرد گندم عمدتاً کمتر از ۱ تن در هکتار و بهره‌وری آب کمتر از ۰/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. علت آن احتمالاً به دلیل شوری آب آبیاری و خاک مزارع و عدم کاربرد عمق مناسب آب آبیاری است؛ بنابراین، برای بهبود این دو پارامتر، از مدل واسنجی-صحت‌سنجی شده AquaCrop استفاده شد. بدین منظور، دو تیمار مقدار آب آبیاری (I1: ۳۰۰، I2: ۵۰۰، I3: ۷۰۰ میلی‌متر) و تاریخ کاشت (T1: ۵ آبان، T2: ۱۵ آبان و T3: ۲۵ آبان) در این منطقه مورد مطالعه قرار گرفتند. با اعتماد به نتایج مدل AquaCrop، شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گندم برای مقادیر آب آبیاری ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر تحت سه تاریخ کاشت دهه اول، دهه دوم و دهه سوم آبان انجام شد. نتایج نشان داد که با اعمال آب آبیاری ۷۰۰ میلی‌متر و کاشت گندم در دهه سوم آبان، عملکرد این گیاه زراعی به ۱/۵ تن در هکتار و بهره‌وری مصرف آن به ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب نزدیک می‌شود.

مراجع

ابراهیمی‌پاک، ن.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ.، احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین، آبیاری و زهکشی، ۱۳(۳-۷۵): ۷۲۶-۷۱۵.

Albaji, M., Golabi, M., Hooshmand, A. R., Ahmadee, M. 2016. Investigation of surface, sprinkler and drip irrigation methods using GIS, Jordan Journal of Agricultural Science, 12(1): 211-222.

Andarziana B., Bannayanb M., Stedutoc P., Mazraeha H., Barati M. E., Barati, M. A. & Rahnama A. 2011. Validation, and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. Agricultural Water Management. 100:1-8.

Blum, F. A. 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. Field Crops Research. 112: 119-123.

Farahani, H., and Oweis, T. 2008. Chapter I-Agricultural Water Productivity in Karkheh River Basin. In: Oweis, T., Farahani, H., Qadir, M., Anthofer, J., Siadat, H., Abbasi F., and Bruggeman A., (Eds). Improving On-farm Agricultural Water Productivity in the Karkheh River Basin. Research Report no. 1: A Compendium of Review Papers. ICARDA, Aleppo, Syria. IV+103 pp.

Farre, F., & Faci, J. M., 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. Agricultural Water Management. 96: 384-394.

Garcia-Vila. M., Fereres, E. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. European Jornal of Agronomy. 36(1): 21-31.

Geerts S., Raes D., Garcia, M., Miranda, R. & Cusicanqui, J. A. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (Chenopodium quinoaWilld.) with FAO-AquaCrop. Agronomy. 101: 499-508.

Geerts, S., & Raes, D. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. Agricultural Water Management. 96: 1275-1284.

Heng, L. k., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T. & Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize. Agronomy. 101(3): 488-498.

Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., and Fereres, E., (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. Agron.J. 101(3), 448-459.

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

Masanganise J., Basira, K., Chipindu, B., Mashonjowa, E., and Mhizha, T. 2013. Testing the utility of a crop growth simulation model in predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. International Journal of Agricultural and Food Science. 3(4): 157-163.

Mebane, V. J., Day, R. L., Hamlett, J. M., Watson, J. E., and Roth, G. W. 2013. Validating the FAO AquaCrop model for rainfed maize in Pennsylvania. Agronomy Journal, 105(2):419-427.

Mkhabela, M. S. and Bullock, P. R. 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. J. of Agric. Water Manag., 110: 16–24.

Salemi H., Mohd Soom M. A., Lee T. S., Mousavi S. F., Ganji A., and KamilYusoff, M. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. African Journal of Agricultural Research, 610: 2204-2215.

Shamsnia S. A., and Pirmoradian N. 2013. Simulation of rainfed wheat yield response to climatic fluctuations using AquaCrop model (case study: Shiraz region in southern of Iran). International Journal of Engineering Science Invention, 2(4):51-56.

Tavakoli, A. R., Liaghat, A., Ashrafi, Sh., Abbasi, F. 2008. Chapter II- Supplemental Irrigation in Iran. In: Oweis, T., H., Farahani, H., M. Qadir,M.,J. Anthofer, J.,H. Siadat, H., F. Abbasi F., and A. Bruggeman A., (Eds). Improving On-farm Agricultural Water Productivity in theKarkheh River Basin. Research Report no. 1: A Compendium of Review Papers. ICARDA, Aleppo, Syria. Iv+103

Water Management in Agriculture
Vol. 7, No. 1, Spring and Summer 2020, 53-64

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۷، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۹، ص. ۶۴-۵۳

Wheat Yield and Water Productivity Simulation in Hendijan Plain Using AquaCrop Model

M. A. Barzikar[1], A. Egdernezhad[2*], A. Tafteh[3] and N. A. Ebrahimipak[4]

Abstract

Due to the importance of the wheat crop, it is cultivated in many plains in Khuzestan province, Iran. However, cultivation conditions for this crop are not the same in all plains. Therefore, several researches are needed to determine the appropriate cultivation conditions. These researches cost a lot of time and money. For this reason, the use of crop models such as AquaCrop is essential to investigate different cultivation date scenarios. Based on this purpose, the present study was conducted to evaluate the AquaCrop model and simulate wheat yield and water productivity in Hindijan plain, Iran. To do that, the required data were collected from 9 farms during two years. The highest wheat yield in this plain was equal to 1626 $kg.ha^{-1}$ (with water consumption efficiency of 0.15 $kg.m^{-3}$). The validation results of AquaCrop model showed that this model had an overestimated error (MBE≥0) to simulate both yield and water productivity. The accuracy (NRME≤0.1) and efficiency (EF≥0) of AquaCrop were excellent for simulating both parameters. Therefore, this model was used to simulate the yield and water productivity for three irrigation water quantities (300, 500 and 700 mm) in the three cultivation dates (the first, second and third decades of November). The results showed that application of 700 mm irrigation water and cultivation date of the third decade of November resulted in achieving a yield about 1500 $kg.ha^{-1}$ and water consumption efficiency about 0.5 $kg.m^{-3}$.

Keywords: Crop Modeling, Cultivation Date, Water-driven Model

[1] M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
[2] Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.(*Corresponding author: Email: a_eigder@ymail.com)
[3] Assistant professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
[4] Associated professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
Received: 26 July 2020
Accepted: 16 September 2020