

مقاله علمی-پژوهشی

## مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop

محسن احمدی<sup>۱\*</sup>، مرادعلی قنبرپوری<sup>۲</sup> و اصلاان اگدرنژاد<sup>۳</sup>

### چکیده

استفاده از مدل گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی و تعیین عمق مناسب آبیاری گیاهان زراعی مختلف در بین محققان متداول است. لیکن توجه به تحلیل حساسیت این مدل گیاهی و ارزیابی دقیق‌تر مدل AquaCrop سبب دستیابی به نتایج دقیق‌تر می‌گردد. در تحقیق حاضر سعی شد از روش جدیدی موسوم به باون برای تحلیل حساسیت مدل AquaCrop استفاده گردد. در این روش به جای افزایش یا کاهش مقادیر پارامترها، برای تحلیل حساسیت از بازه‌ای از مقادیر پارامترهای ورودی استفاده می‌شود. بدین منظور از داده‌های برداشت‌شده در طی دو سال زراعی از یک طرح تحقیقاتی در بروجرد استفاده شد. در این طرح، چهار مقدار تبخیر از تست تبخیر کلاس A به میزان ۴۰ (E40)، ۷۰ (E70)، ۱۰۰ (E100) و ۱۲۰ (E120) میلی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که ضریب رشد پوشش گیاهی و بهره‌وری آب نرمال شده بیشترین حساسیت را نسبت به سایر پارامترهای ورودی داشتند. ارزیابی مدل AquaCrop در مرحله صحت‌سنجی نشان داد که این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد (MBE = 7/6) و بهره‌وری آب (MBE = 4/4) دچار خطای کم‌برآوردی شد. در حالی که برای شبیه‌سازی زیست‌توده دچار خطای بیش‌برآوردی گردید (MBE = -3/3). خطای شبیه‌سازی عملکرد گندم در مقادیر تنش آبی شدید افزایش یافت لیکن دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی هر سه پارامتر عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب مطلوب بود (NRMSE < 10٪). با کاهش مقدار آب آبیاری تا ۱۵۰ میلی‌متر، عملکرد و زیست‌توده به ترتیب تا ۱/۹ و ۷/۴ تن در هکتار کاهش یافتند. با این‌وجود بهره‌وری آب تا ۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش یافت. با افزایش مقدار آب آبیاری تا ۶۰۰ میلی‌متر، عملکرد و زیست‌توده روندی صعودی داشتند به طوری که به ترتیب تا ۷/۲ و ۱۳/۹ تن در هکتار افزایش یافتند. با این‌وجود بهره‌وری آب فقط در دو عمق ۲۶۴ و ۵۰۰ میلی‌متر به میزان ۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب رسید. برای دستیابی به بیشترین عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب، کاربرد ۵۰۰ میلی‌متر آب آبیاری پیشنهاد می‌شود. در شرایط کمبود آب آبیاری، پیشنهاد می‌شود از دو مقدار ۱۵۰ و ۲۶۴ میلی‌متر استفاده شود.

### واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، تنش آبی، روش باون

مردم را تأمین می‌کند. با توجه به کشت گسترده آن در ایران، بخش اعظمی از منابع آب برای زراعت گندم مصرف می‌شود. با این‌وجود بهره‌وری آب آن بسیار پایین است به طوری که مقدار آن بین ۰/۳ تا ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب تخمین زده می‌شود (Farahani and Oweis., 2008; Tavakoli et al., 2008).

این مشکل به دلیل عدم اطلاع دقیق از عمق آب مصرفی گندم در مناطق مختلف کشور است. به همین دلیل لازم است عمق مناسب آبیاری برای گندم در هر منطقه تعیین شود. تعیین مقدار آب آبیاری مناسب در مزرعه مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار است (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۷). به همین دلیل پیشنهاد شده است تا از مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی شرایط

### مقدمه

گیاه گندم یکی از منابع مهم غذایی به شمار می‌رود به طوری که حدود ۴۵ درصد کالری و ۷۰ درصد پروتئین مصرفی

<sup>۱</sup> و <sup>۲</sup> دکتری آبیاری و زهکشی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

(\*) نویسنده مسئول: m.ahmadee@ymail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۱۴

رشد استفاده شود (Geerts and Raes., 2009).

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد است که به دلیل سادگی، نیاز به داده‌های کمتر، کاربردی بودن و دقت قابل قبول نسبت به سایر مدل‌های رشد گیاهی برتری دارد (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷). این مدل گیاهی تاکنون برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی مختلف مانند جو، ذرت و چغندر قند مورد استفاده قرار گرفته است (Katerji et al., 2013; Masanganise et al., 2013; Hsiao et al., 2009; Heng et al., 2009). در این تحقیقات گزارش شد که دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی مطلوب بود. در تحقیقی که توسط گارسیا ویلا و فرس برای مدیریت آبیاری در مزارع جنوب اسپانیا انجام شد، سناریوهای مختلفی با استفاده از مدل AquaCrop برای کاهش سطوح کشت بر اساس تغییرات مقدار آب در دسترس ارائه گردید (Garcia-Vila and Fereres, 2012).

در تحقیقات متعددی از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گندم استفاده شده است. مخا بلا و بولاک از این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در غرب کانادا استفاده کردند. نتایج به دست آمده از تحقیق ایشان نشان داد که ضریب تبیین 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 قابل قبول بود (Mkhabela and Bullock, 2012). سالمی و همکاران از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی اثر کم آبیاری و آبیاری کامل بر عملکرد گندم استفاده کردند. این محققان نیز نشان دادند که این مدل دقت بالایی برای شبیه‌سازی عملکرد این گیاه زراعی داشت (Salemi et al., 2011). شمس نیا و پیرمردیان 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 بر اساس آماره‌های آماری مطلوب بود (Shamsnia and Pirmoradian., 2013).

تمامی این محققان برای استفاده از مدل AquaCrop ابتدا آن را واسنجی کرده و سپس از نتایج صحت‌سنجی برای ارزیابی مدل استفاده کرده‌اند. با توجه به ماهیت مدل AquaCrop،

داده‌های مورد استفاده در آن به دودسته ثابت و غیر ثابت تقسیم می‌شوند. داده‌های ثابت، مانند بهره‌وری آب نرمال شده، در این مدل توسط بسط دهندگان آن تعیین و پیشنهاد شده که برای شبیه‌سازی تغییر نکنند. داده‌های غیر ثابت، مانند تراکم کاشت، در هر شبیه‌سازی باید به وسیله واسنجی برآورد شوند (Geerts and Raes, 2009). باین وجود تحقیقات اخیر نشان داده است که کلیه داده‌ها در این مدل برای شرایط محیطی مختلف ثابت نیستند (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹)؛ بنابراین پیشنهاد شده است تا پیش از واسنجی، اطلاع دقیقی از میزان حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات پارامترهای ورودی کسب شود سپس ارزیابی مدل مدنظر قرار گیرد (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۹۹). این روش به حدی ارزشمند است که بسیاری از محققان قبل از واسنجی مدل AquaCrop از آن استفاده کرده‌اند. نتایج ابراهیمی پاک و همکاران (۱۳۹۸)، محمدی و همکاران (۱۳۹۴) و سالمی و همکاران (Salemi et al., 2011) نشان داده است که ضریب گیاهی برای تعرق بیشترین حساسیت را نسبت به پارامترهای ورودی مدل AquaCrop دارد. در حالی که ابراهیمی پاک و همکاران (۱۳۹۷) با ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی زعفران گزارش کردند که تغییرات ضریب رشد پوشش گیاهی بیشترین حساسیت را داشت. ژو و همکاران نشان دادند که پارامترهای ضریب گیاهی برای تعرق، ضریب رشد پوشش گیاهی، ضریب کاهش پوشش گیاهی و حداکثر پوشش گیاهی بیشترین اثر را بر دقت خروجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی ذرت داشتند (Guo et al., 2019). جین و همکاران پوشش گیاهی و بهره‌وری آب نرمال شده را مؤثرترین پارامترهای ورودی برای مدل AquaCrop برشمردند (Jin et al., 2018). با توجه به مرور منابع، حساسیت مدل AquaCrop در شرایط مختلف متغیر است و لازم است در هر منطقه پارامترهای مؤثر بر نتایج خروجی مشخص گردند.

در تحقیق حاضر، با توجه به اهمیت تحلیل حساسیت، سعی شد در ابتدا اثر پارامترهای حساس بر نتایج مدل AquaCrop در شبیه‌سازی گندم بررسی شود. این موضوع که نوآوری تحقیق حاضر نیز به شمار می‌رود، پیش از واسنجی این مدل انجام شد.

تحقیق تأثیر چهار برنامه آبیاری پس از ۴۰ (E40)، ۷۰ (E70)، ۱۰۰ (E100) و ۱۲۰ (E120) میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر کلاس A بررسی شد. پس از تهیه بستر، کاشت بذر با تراکم ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در کرت‌هایی به ابعاد ۴×۵ متر روی خطوط کشت به فاصله ۲۰ سانتیمتر از همدیگر انجام شد. فاصله کرت‌ها از همدیگر ۱۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. کود اوره به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار در سه نوبت، کود فسفره به میزان ۱۴۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل و کود پتاسیم به میزان ۷۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سولفات پتاسیم همراه با کاشت بذر به‌طور یکنواخت به تمام کرت‌ها داده شد. آب آبیاری در کلاس C2S1 با متوسط شوری ۰/۴ دسی زیمنس بر متر و اسیدیته ۷/۸ بود. مشخصات خاک مزرعه در جدول (۱) نشان داده شده است.

سپس با استفاده از این نتایج، به ارزیابی مدل AquaCrop شبیه‌سازی گندم پرداخته شد. در ادامه نیز با تکیه بر کلیه نتایج، عمق مناسب آبیاری گندم تعیین شد.

## مواد و روش‌ها

### عملیات زراعی

پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های برداشت‌شده طی دو سال زراعی از یک طرح تحقیقاتی در مرکز تحقیقات کشاورزی بروجرد واقع در استان لرستان انجام شد. متوسط ارتفاع اراضی این منطقه ۱۶۰۰ متر بالاتر از سطح دریا و میانگین بلندمدت باران و تبخیر به ترتیب ۴۵۰ و ۱۶۰۰ میلی‌متر در سال است. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن دارای زمستان‌های سرد و مرطوب و تابستان‌های نسبتاً معتدل و خشک است. در این

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

عمق (سانتی‌متر)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	pH	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	بافت خاک	ظرفیت زراعی (درصد)	حد پژمردگی دائم (درصد)
۰-۳۰	۰/۹۶	۸/۰	۱/۴	سیلتی لوم	۲۶/۲	۱۳/۷
۳۰-۶۰	۰/۷۴	۸/۱	۱/۵	سیلتی لوم	۲۴/۳	۱۱/۰
۶۰-۹۰	۰/۷۹	۸/۱	۱/۷	سیلتی لوم	۱۹/۶	۸/۶

$$B = WP^* \left[ \frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (2)$$

$$Y = B \times HI \quad (3)$$

در این روابط، Tr مقدار کل تعرق روزانه (میلی‌متر) در طول فصل زراعی (رابطه ۴)، WP بهره‌وری آب (گرم بر مترمربع)، ET<sub>0</sub> تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر)، Y و B به ترتیب عملکرد (گرم بر مترمربع) و زیست‌توده خشک (گرم بر مترمربع) و HI شاخص برداشت (-) است.

$$Tr = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (4)$$

### مدل AquaCrop

معادله اصلی و حاکم بر مدل AquaCrop در رابطه (۱) معرفی شده است (Geerts and Raes, 2009).

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

در این رابطه، Y<sub>x</sub> و Y<sub>a</sub> به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ET<sub>x</sub> و ET<sub>a</sub> به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه و Ky ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق است. این مدل برای تعیین عملکرد و زیست‌توده کل نیز به ترتیب از روابط (۲) و (۳) استفاده می‌کند.

پوشش تاج (عکس روز) و  $t$  زمان (روز) است. در این مدل، شدت تنش آبی ( $K_s$ ) مؤثر بر توسعه پوشش تاج ( $CC$ )، هدایت روزانه‌ای (شدت تعرق در واحد  $CC$ )، پیری و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش یافته و به تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد. برخی پارامترهای ورودی مدل در جدول (۲) آورده شده است.

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

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (5)$$

که در این رابطه،  $CC$  پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)،  $CC_0$  پوشش تاج اولیه (درصد)،  $CGC$  ضریب رشد

جدول ۲- مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل AquaCrop

توضیح پارامتر	مقدار	واحد	توضیح
دمای پایه	صفر	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
دمای بالا	۲۶	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
عمق مؤثر ریشه	۰/۵	متر	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۵	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۱۵۵	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۷۰	روز	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۱۲	-	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۴۰	-	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن	۲/۵	-	پیش فرض
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۲/۷	-	واسنجی

در پژوهش حاضر، ابتدا حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامترها بررسی شد. مقدار اصلی هر کدام از پارامترها بر اساس نظر بسط دهندگان مدل است (Geerts and Raes, 2009). دامنه تغییرات و میزان نمو هر پارامتر بر اساس بازه پیشنهادی بسط دهندگان و مقادیر مجاز در مدل AquaCrop در نظر گرفته شد (جدول ۳).

## تحلیل حساسیت

با توجه به روابط حاکم بر مدل AquaCrop، پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده ( $WP^*$ )، حداکثر ضریب تعرق گیاهی ( $K_{CTrx}$ )، پوشش گیاهی اولیه ( $CC_0$ )، ضریب رشد پوشش گیاهی ( $CGC$ ) و ضریب کاهش پوشش گیاهی ( $CDC$ ) در شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی از اهمیت بسیاری برخوردار هستند؛ بنابراین،

جدول ۳- مقادیر اولیه و دامنه تغییرات پارامترهای مورد مطالعه

پارامتر	علامت	واحد	مقدار اصلی	حد پایین	حد بالا	نمو تغییرات
بهره‌وری آب نرمال	WP*	گرم بر مترمربع	۱۵	۱۴	۲۲	۱
حداکثر ضریب	K <sub>CTx</sub>	-	۱/۱	۰/۸۵	۱/۳	۰/۰۵
پوشش گیاهی اولیه	CC <sub>0</sub>	سانتی‌متر مربع	۶/۷	۳	۱۱	۱
ضریب رشد پوشش	CGC	درصد بر روز	۴/۹	۳/۹	۱۲/۹	۱
ضریب کاهش	CDC	درصد بر روز	۷/۲	۳	۱۱	۱

(R<sup>2</sup>) به بیشترین مقدار ممکن برسند. در مرحله صحت‌سنجی، از داده‌های برداشت‌شده در سال دوم کشت استفاده شد. در این مرحله، نتایج مدل بر اساس آماره‌های اشاره‌شده در بالا تعیین شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۷) تا (۱۲) نشان داده‌شده‌اند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\bar{O}_i}} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

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

به‌منظور تحلیل حساسیت از رابطه ارائه‌شده توسط باون استفاده شد (رابطه ۶) (Beven, 1979).

$$S_{pi} = \lim_{\Delta P_i \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta P_i}{P_i}} = \frac{\partial y}{\partial P_i} \times \frac{P_i}{y} \quad (6)$$

در این رابطه،  $S_{pi}$  ضریب حساسیت،  $P_i$  پارامتر موردبررسی و  $y$  مقدار زیست‌توده است. مقادیر  $S_{pi}$  برحسب نوع پارامتر می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش زیست‌توده با تغییر پارامتر موردنظر و مقادیر منفی نیز نشان‌دهنده کاهش زیست‌توده با تغییرات پارامتر موردنظر است. مقدار ضریب حساسیت با توجه به جدول (۴) در چهار گروه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار می‌گیرند (Lenhart et al., 2002).

جدول ۴- طبقه‌بندی ضریب حساسیت

گروه	دامنه تغییرات ضریب حساسیت	توضیحات
۱	$0 \leq  Sp  < 0.05$	کم
۲	$0.05 \leq  Sp  < 0.2$	متوسط
۳	$0.2 \leq  Sp  < 1$	زیاد
۴	$1 \leq  Sp $	بسیار زیاد

### ارزیابی مدل

ارزیابی مدل در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی انجام شد. در مرحله واسنجی، از داده‌های برداشت‌شده در سال اول کشت استفاده شد. در این مرحله، پارامترهای قابل‌تغییر در مدل 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 مقادیر آماره‌های کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین

## نتایج و بحث

تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی در جدول (۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حساسیت پارامترهای بهره‌وری آب نرمال شده ( $WP^*$ )، ضریب گیاهی برای تعرق (KCTrx) و ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) به شدت به تغییرات مقدار آب آبیاری وابسته است. درحالی‌که حساسیت پارامترهای پوشش گیاهی اولیه (CCo) و ضریب زوال پوشش گیاهی (CDC) چندان به تغییرات آب آبیاری وابسته نبود. با افزایش تنش آبی، حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات  $WP^*$  و KCTrx کاهش یافت ولی حساسیت این مدل به تغییرات CGC افزایش نشان داد. ضریب حساسیت برای پارامتر CDC مقداری منفی ( $-0.01$  تا  $-0.05$ ) داشت که بیانگر واکنش معکوس مقادیر مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر است. بیشترین حساسیت در دو تنش آبی E40 و E70 برای پارامتر  $WP^*$  مشاهده شد. این نتایج بیانگر این است که اهمیت این پارامتر از سایر پارامترهای ورودی مدل AquaCrop بیشتر است و بهتر است در تعیین آن دقت بیشتری مدنظر قرار گیرد. این نتایج با مشاهدات جین و همکاران (Jin et al., 2018) و رحیمی خوب و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت داشت. این محققان گزارش کردند که حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات پارامتر  $WP^*$  بسیار زیاد بود. در تنش‌های E100 و E120 بیشترین حساسیت به پارامتر CGC اختصاص داشت. مقایسه این نتایج با دو تنش E40 و E70 نشان داد که حساسیت مدل AquaCrop به مقدار تنش نیز وابسته است. باین وجود، بر اساس دسته‌بندی ارائه شده در جدول (۵)، حساسیت هیچ کدام از پارامترها در بازه خیلی زیاد قرار نداشت. این نتایج با مشاهدات حاجی‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) و کریمی آورگانی و همکاران (۱۳۹۸) مطابقت داشت. این محققان نیز حساسیت پارامتر  $WP^*$  را برای گیاهان جو و تریچه به ترتیب برابر با  $0.96$  و  $0.88$  گزارش کردند که در بازه زیاد قرار داشت.

عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های  $0.1-0.2$ ،  $0.3-0.2$  و بیشتر از  $0.3$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل رشد گیاهی مقدار عامل موردنظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد عامل موردنظر عدد کوچک‌تری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها است 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 است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵).

## برنامه‌ریزی آبیاری

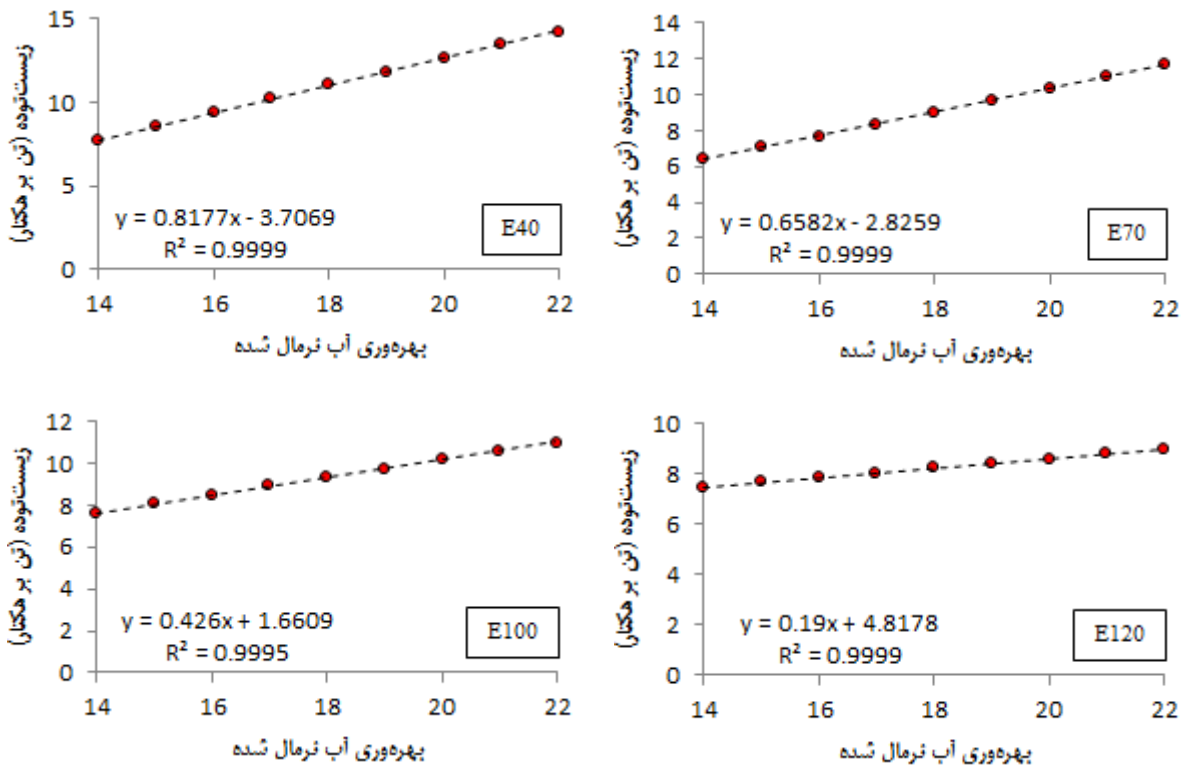
پس از ارزیابی، از مدل آماده شده برای شبیه‌سازی مقادیر مختلف آب آبیاری استفاده شد. با توجه به اینکه در شرایط آزمایش، مقادیر آب آبیاری بین ۲۱۱ تا ۴۶۷ میلی‌متر متغیر بود؛ مقادیر عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب بر اساس مقادیر آب آبیاری موجود به دست آمد. به منظور بررسی واکنش گندم به مقادیر آب آبیاری بیشتر و کمتر از شرایط فعلی، چهار مقدار آب آبیاری در نظر گرفته شد. این مقادیر شامل ۱۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر بود. با توجه به تجربیات نویسندگان، دامنه تغییرات ۵۰ میلی‌متر آب آبیاری برای مقایسه سناریوهای آب آبیاری با استفاده از مدل AquaCrop مناسب است. به همین دلیل، مقادیر ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر برای حد بالای آبیاری انتخاب شدند. مقدار ۱۵۰ میلی‌متر نیز برای حد پایین آبیاری تعیین شد. البته دامنه تغییرات آب آبیاری بین ۱۰۰ الی ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده بود لیکن مقادیر بیشتر از ۶۰۰ میلی‌متر سبب کاهش شدید بهره‌وری آب و مقادیر کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر سبب تنش آبی به گندم می‌شد. به همین دلیل مدل AquaCrop با استفاده از این مقادیر آب آبیاری اجرا و نتایج آن با مقادیر آب آبیاری در مزرعه مقایسه شد.

جدول ۵- ضرایب به‌دست‌آمده برای پارامترهای رشد گیاه گندم

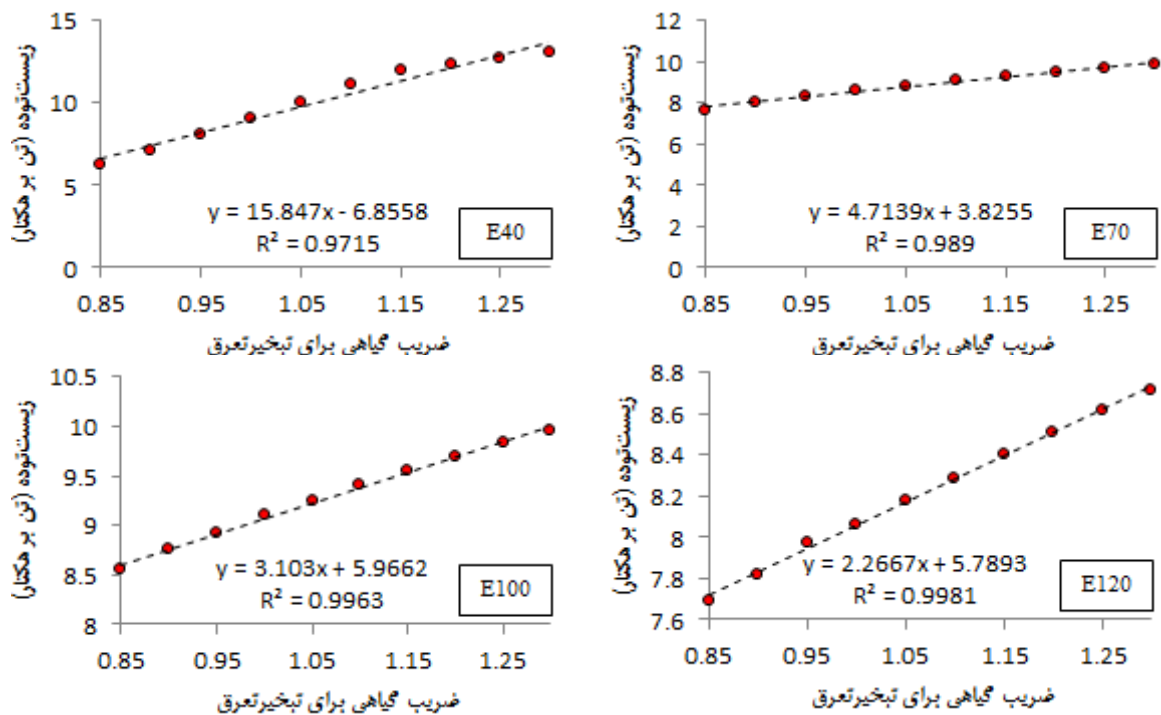
تیمار	WP*	KCTrx	CCo	CGC	CDC
E40	۰/۷۸	۰/۳۳	۰/۰۳	۰/۳۲	-۰/۰۱
E70	۰/۵۵	۰/۲۰	۰/۰۳	۰/۴۵	-۰/۰۲
E100	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۶۵	-۰/۰۲
E120	۰/۲۱	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۹۶	-۰/۰۵
انحراف معیار	۰/۲۶	۰/۱۱	۰/۰۰	۰/۲۷	۰/۰۱

می‌شود (رحیمی‌خوب و همکاران، ۱۳۹۹)؛ بنابراین لازم است واسنجی این پارامتر نیز در تنش‌های آبی کمتر و یا آبیاری کامل انجام شود. شیب معادله خطوط برای پوشش گیاهی اولیه (CCo) در همه تیمارهای مورد مطالعه تقریباً یکسان بود (شکل ۳). این نتایج با جدول (۵) نیز مطابقت دارد. با توجه به جدول (۳) ضریب حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پوشش گیاهی اولیه ثابت و در طبقه کم قرار داشت؛ بنابراین در مرحله واسنجی، الزامی به تغییر این پارامتر وجود ندارد. تغییرات زیست‌توده نسبت به مقادیر مختلف ضریب رشد پوشش گیاهی در شکل (۴) مشاهده می‌شود. دامنه تغییرات زیست‌توده در تیمارهای E40، E70، E100 و E120 به ترتیب بین ۱۴/۴-۹/۶، ۱۲/۴-۸/۲، ۱۲/۸-۸/۶ و ۱۱/۰-۷/۹ تن در هکتار بود؛ بنابراین در تنش آبی شدیدتر، دامنه تغییرات زیست‌توده کاهش یافت. به همین دلیل شیب معادله خط نشان داد شده در شکل (۴) با افزایش تنش آبی اندکی کمتر شد. لیکن تغییرات زیست‌توده برای شرایط تنش آبی E100 و E120 در مقادیر ۸ < CGC شدت بیشتری داشت. این نتایج سبب شد تا ضریب حساسیت برای این پارامتر در شرایط تنش آبی افزایش یابد (جدول ۵).

در شکل (۱) تغییرات زیست‌توده را نسبت به مقادیر مختلف بهره‌وری آب نرمال شده (WP\*) نشان می‌دهد. تغییرات زیست‌توده با افزایش بهره‌وری آب نرمال شده افزایش یافت. این نتایج نشان داد که در زمان واسنجی، اگر مقادیر به‌دست‌آمده برای زیست‌توده (و عملکرد) بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شد، می‌بایست مقادیر بهره‌وری آب نرمال شده را کاهش داد. در شرایط کم بودن زیست‌توده (و عملکرد) شبیه‌سازی شده باید مقدار بهره‌وری آب نرمال شده را افزایش داد. مقایسه معادلات به‌دست‌آمده در شکل (۱) نشان داد که با افزایش تنش آبی (از E40 به E120) مقدار شیب تغییرات نیز کاهش یافت. این نتایج نشان داد که حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات این پارامتر در شرایط تنش شدیدتر آبی به‌شدت کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌بایست پارامتر مذکور در شرایط بدون تنش و یا تنش آبی کمتر مورد واسنجی قرار گیرد. در شکل (۲) تغییرات زیست‌توده نسبت به تغییرات ضریب گیاهی برای تبخیر تعرق (KCTrx) نشان داده شده است. شدت حساسیت مدل AquaCrop برای این پارامتر با افزایش تنش آبی کاهش یافت. چون در تنش‌های آبی شدید، مقدار آب در دسترس برای عمل تبخیر تعرق کمتر است، بنابراین فرایند تشکیل زیست‌توده و عملکرد نیز با تغییرات کمتری انجام

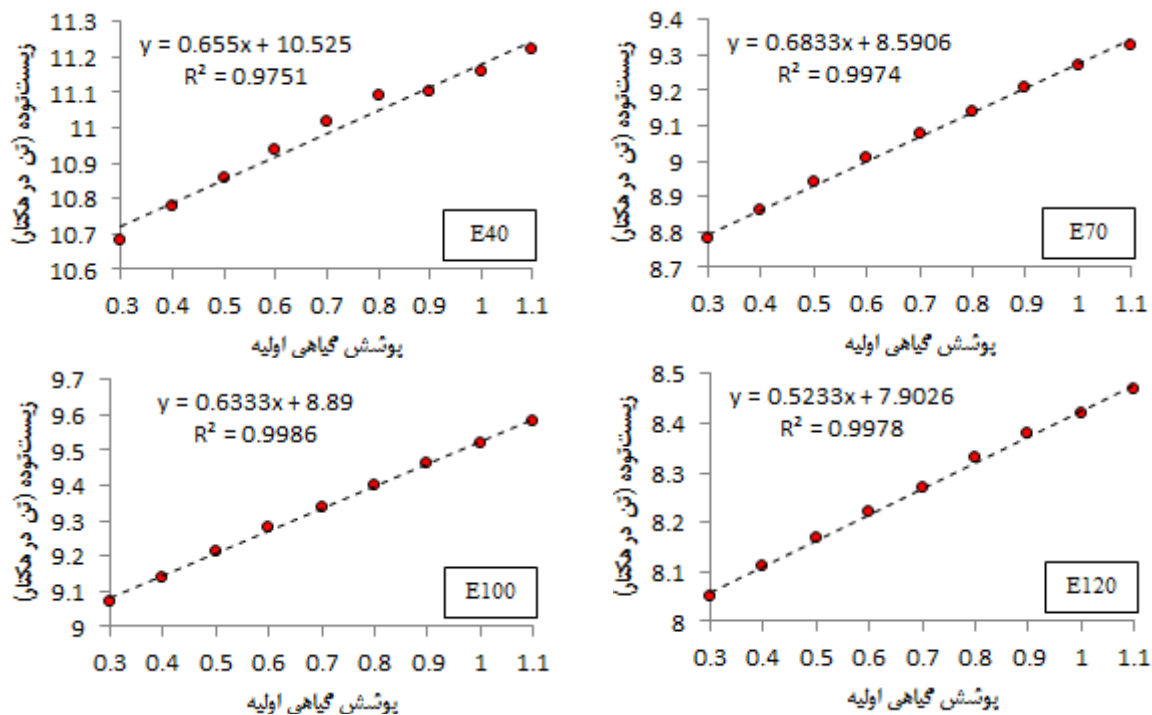


شکل ۱- اثر تغییر پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (کیلوگرم بر متر مکعب) بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده (تن بر هکتار) گیاه گندم تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری

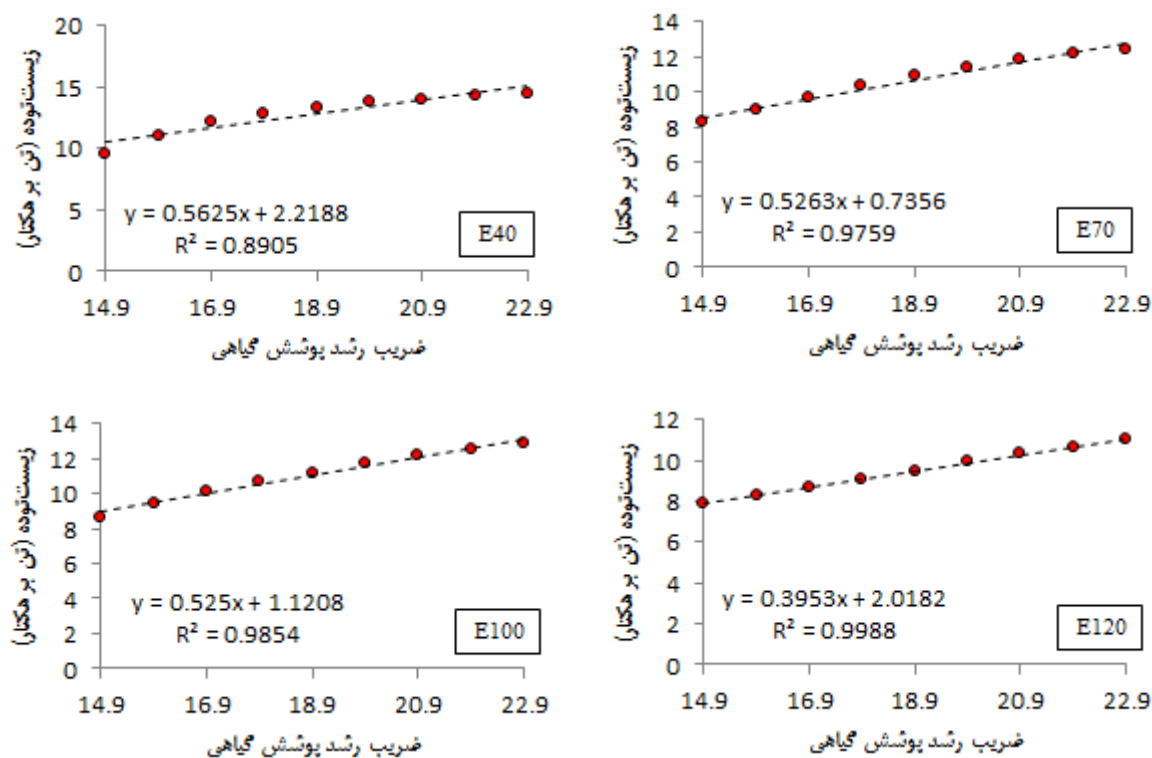


شکل ۲- اثر تغییر پارامتر حداکثر ضریب تعرق گیاهی بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده گیاه گندم تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری





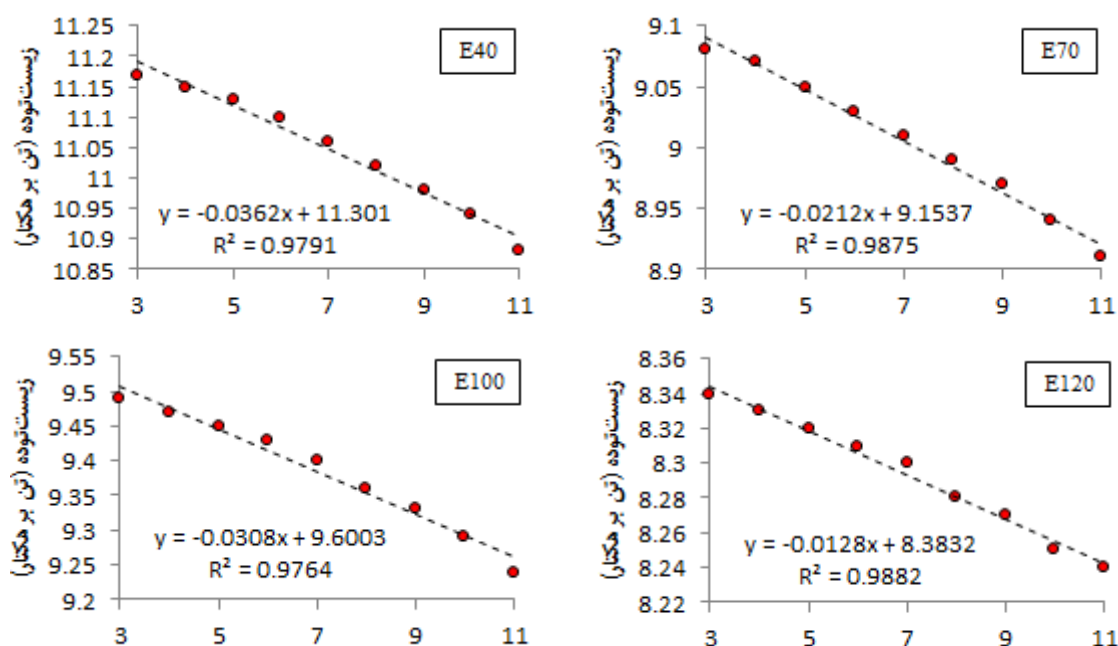
شکل ۳- اثر تغییر پارامتر پوشش گیاهی اولیه بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده گیاه گندم تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری



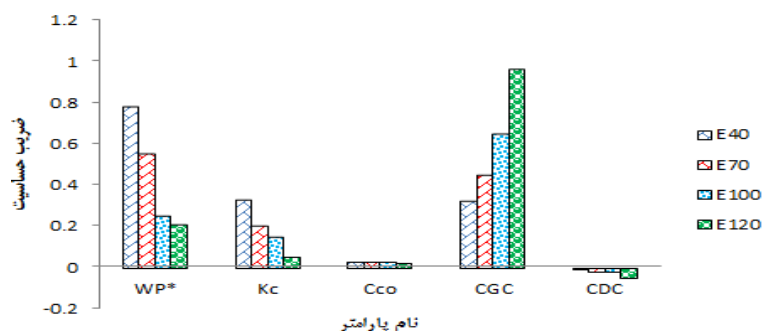
شکل ۴- اثر تغییر پارامتر ضریب رشد پوشش گیاهی بر نتایج شبیه‌سازی زیست‌توده گیاه گندم تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری

داد که در حالت کلی مدل AquaCrop نسبت به تغییرات پارامتر CGC بیشترین حساسیت را داشت. این نتایج با مطالعات ابراهیمی پاک و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت داشت. البته مدل AquaCrop به تغییرات دو پارامتر WP\* و KCTrx نیز حساسیت متوسطی داشت که با نتایج ژو و همکاران (Guo et al., 2019) و رحیمی خوب و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت داشت؛ بنابراین حساسیت این مدل در هر شرایطی متغیر است.

میزان تغییرات زیست توده بر اساس مقادیر مختلف ضریب کاهش پوشش گیاهی در شکل (۵) نشان داده شده است. رابطه معکوسی بین مقادیر زیست توده و ضریب کاهش پوشش گیاهی مشاهده شد. البته با توجه به ضریب حساسیت پایین مدل AquaCrop نسبت به تغییرات این پارامتر، واسنجی آن در اولویت کمتری نسبت به پارامترهای WP\* و CGC دارد (جدول ۴). مقایسه کلیه ضرایب حساسیت در شکل (۶) نشان



شکل ۵- اثر تغییر پارامتر ضریب کاهش پوشش گیاهی بر نتایج شبیه‌سازی عملکرد زیست‌توده گیاه گندم تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری



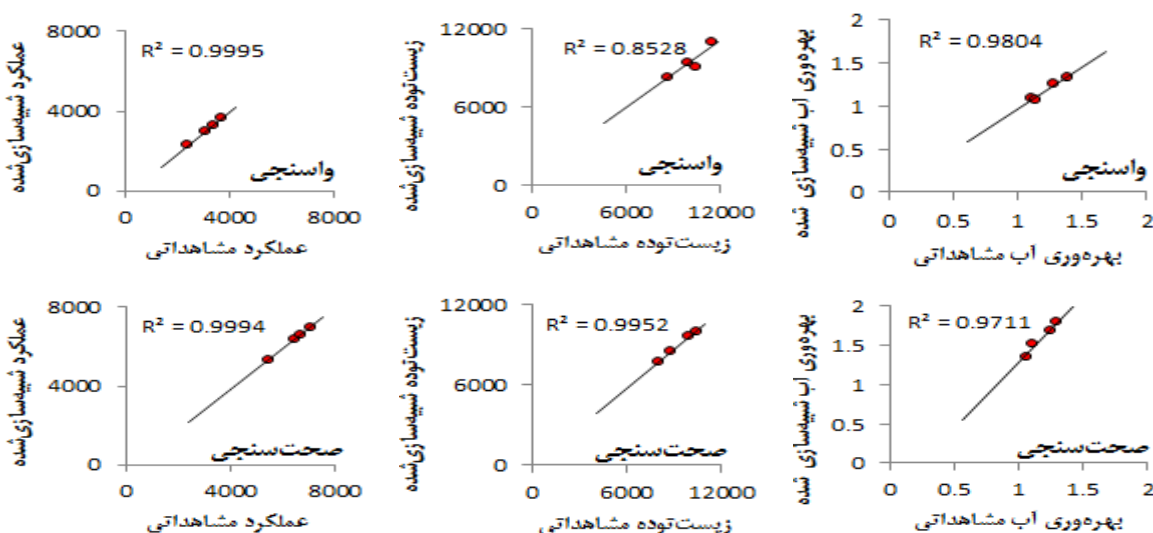
شکل ۶- مقایسه ضرایب حساسیت پارامترهای رشد گیاه گندم تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری (WP\* : بهره‌وری آب نرمال‌شده، KCTrx : ضریب گیاهی برای تعرق، CGC: ضریب رشد پوشش گیاهی، CCo: ضریب پوشش گیاهی اولیه و CDC: ضریب زوال پوشش گیاهی)

AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گندم دچار خطای بیش‌برآوردی شد. خطای مدل AquaCrop قابل‌قبول و دقت آن نیز در محدوده عالی قرار داشت. کارایی این مدل نیز مطلوب بود. نتایج به‌دست‌آمده برای پارامتر زیست‌توده نشان داد که مدل AquaCrop در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی دچار خطای کم‌برآوردی شد. خطای آن کم، دقت آن عالی و کارایی آن نیز مطلوب بود. این نتایج برای آماره بهره‌وری آب نیز مشاهده شد. همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده گندم در شکل (۷) مشاهده می‌شود. بر اساس این نتایج، مدل AquaCrop در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی قابلیت بالایی در پیروی از تغییرات عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب داشت.

نتایج آماری مقایسه عملکرد شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول (۶) نشان داده شده است. در مرحله واسنجی، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم دچار خطای کم‌برآوردی شد. خطای مدل AquaCrop بر اساس آماره RMSE برابر با ۰/۰۸ تن در هکتار و قابل‌قبول بود. بر اساس این نتایج مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد، به‌طور متوسط دچار ۸ درصد خطا شد. این نتایج با مشاهدات هنگ و همکاران و اندرزیان و همکاران (Heng et al., 2009; Andarzian et al., 2011) دقت این مدل بر اساس آماره NRMSE در محدوده عالی قرار داشت. کارایی این مدل نیز با توجه به مقادیر دو آماره EF و d مطلوب بود. در مرحله صحت‌سنجی، مدل

جدول ۶- نتایج آماره‌های مختلف برای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در مرحله‌های واسنجی و صحت‌سنجی

مرحله از شبیه‌سازی	پارامتر	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
واسنجی	عملکرد (تن بر هکتار)	-۰/۰۸	۰/۰۸۸	۰/۰۲	۰/۹	۰/۹۹
	زیست‌توده (تن بر هکتار)	-۰/۰۶	۰/۷	۰/۰۷	۰/۴	۰/۹۹
	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	-۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۸	۰/۹۹
صحت‌سنجی	عملکرد (تن بر هکتار)	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۹	۰/۹۹
	زیست‌توده (تن بر هکتار)	-۰/۰۳	۰/۴	۰/۰۴	۰/۸	۰/۹۹
	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۸	۰/۹۹



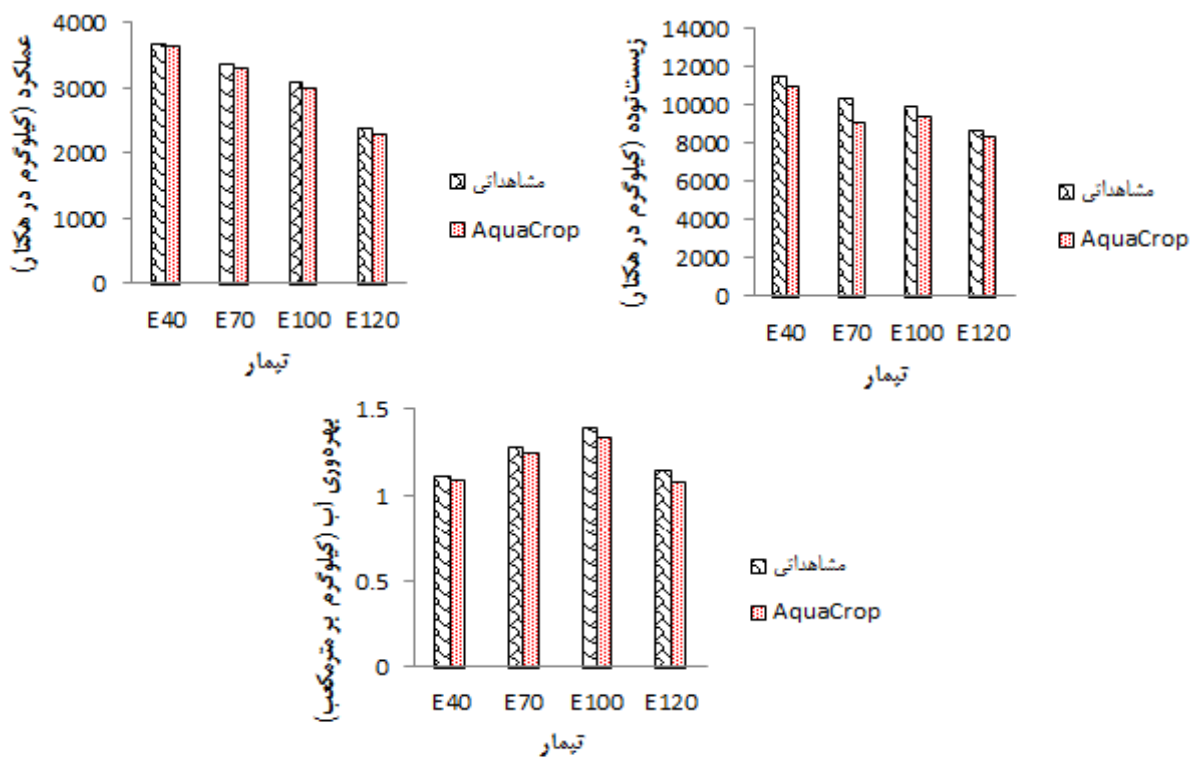
شکل ۷- همبستگی عملکرد (تن بر هکتار)، زیست‌توده (تن بر هکتار) و بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای گندم در مراحل واسنجی (بالا) و صحت‌سنجی (پایین)

آبیاری شبیه‌سازی شدند (شکل ۱۰). نتایج نشان داد که عملکرد گندم در شرایط کاهش مصرف آب نسبت به وضعیت فعلی، بسیار کاهش خواهد یافت. به طوری که با کاهش ۶۱ میلی‌متر آب آبیاری نسبت به تیمار E40، عملکرد به میزان یک تن کاهش خواهد یافت. با افزایش آب آبیاری، عملکرد گندم نیز سیر صعودی داشت به طوری که در عمق آب آبیاری ۶۰۰ میلی‌متر، عملکرد گندم به ۷/۲ تن در هکتار رسید. لیکن میزان افزایش عملکرد نسبت به تغییرات عمق آب آبیاری در مقادیر بیشتر از ۵۰۰ میلی‌متر سیر نزولی داشت. این نتایج با مراجعه به بهره‌وری آب به راحتی تشخیص داده می‌شود. میزان زیست‌توده گندم نیز با افزایش آب آبیاری سیر صعودی داشت ولی در مقادیر بیشتر از ۵۵۰ میلی‌متر افزایش آن بسیار ناچیز بود؛ بنابراین می‌توان عمق ۵۰۰ میلی‌متر را به عنوان عمق مناسب برای دستیابی به حداکثر عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب برای گندم در این منطقه به حساب آورد.

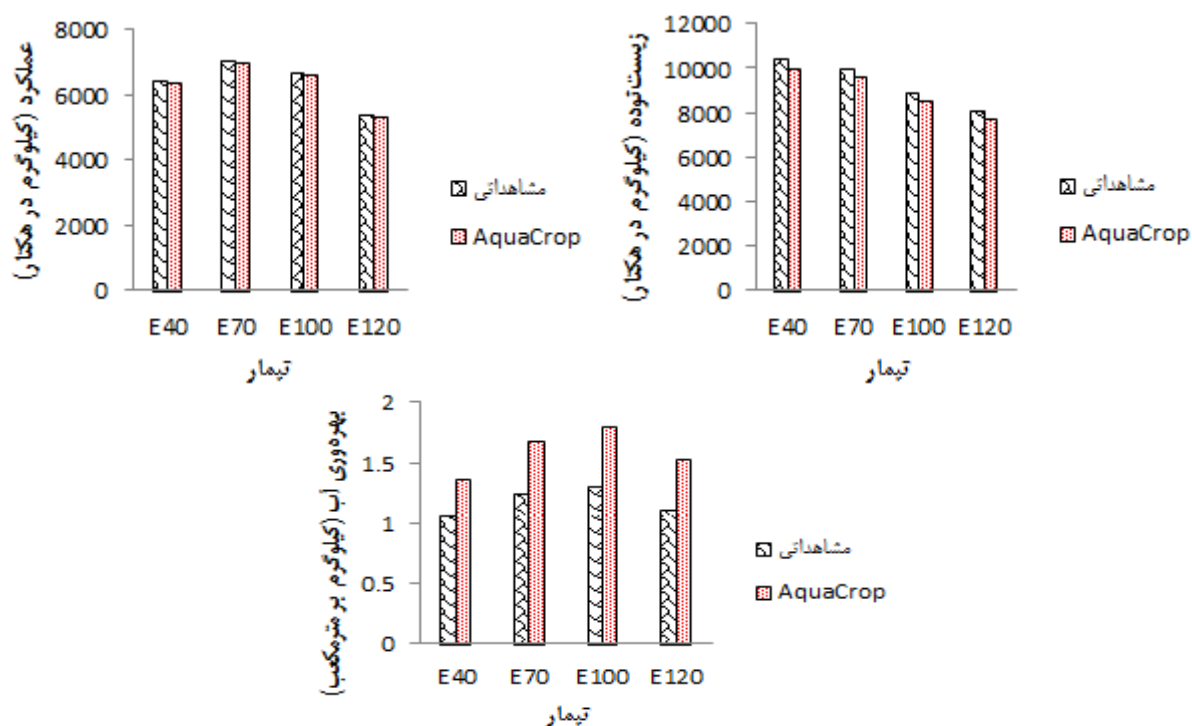
### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که روند تغییرات عملکرد و زیست‌توده گندم نسبت به مقدار آب آبیاری صعودی بود. به طوری که با افزایش عمق آب آبیاری، عملکرد و زیست‌توده گندم نیز افزایش یافتند. لیکن تغییرات آن‌ها در مقادیر بیشتر از ۵۰۰ میلی‌متر سرعت کمتری داشت. بهره‌وری آب در سه عمق ۱۵۰، ۲۶۴ و ۵۰۰ میلی‌متر برابر با ۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود و نسبت به سایر عمق‌های آبیاری اعمال شده بیشتر بود. لیکن به منظور دستیابی به بیشترین عملکرد و زیست‌توده پیشنهاد می‌شود در شرایط وجود آب آبیاری، مقدار ۵۰۰ میلی‌متر برای آبیاری گندم استفاده شود. در غیر این صورت دو مقدار ۲۶۴ و ۱۵۰ میلی‌متر نیز می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

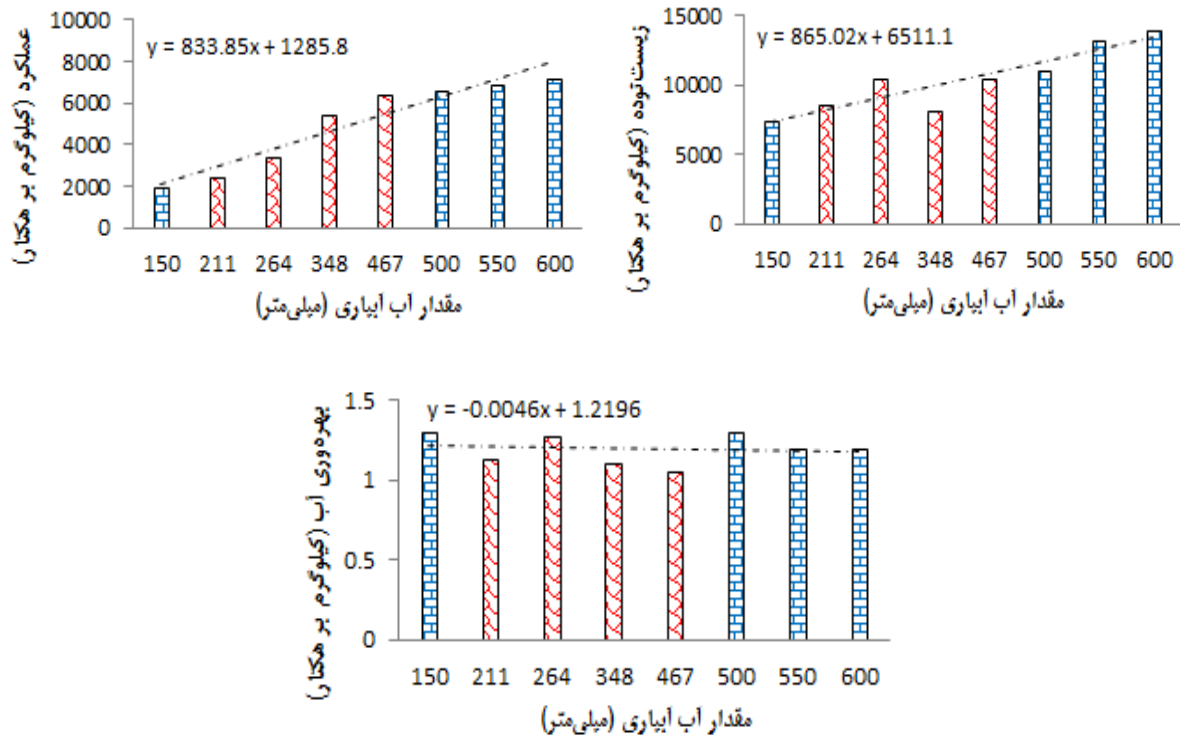
عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گندم در مرحله واسنجی در شکل (۸) نشان داده شده است. با افزایش تنش آبی، مقادیر عملکرد و زیست‌توده کاهش یافت ولی تغییرات بهره‌وری آب به صورت منظم نبود. بیشترین بهره‌وری آب در تیمار E100 (۱/۴ کیلوگرم بر مترمکعب) و کمترین بهره‌وری آب در تیمار E40 (۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب) به دست آمد. مقایسه این نتایج با عملکرد در تیمارهای متناظر نشان داد که میزان تغییرات عملکرد نسبت به مقدار آب آبیاری کمتر بود. میزان تغییرات عملکرد در این دو تیمار برابر با ۱۹ درصد (۶۰۴ کیلوگرم بر هکتار) و تغییرات آب آبیاری برابر با ۴۹ درصد (۱۱۰ میلی‌متر) بود. مقدار عملکرد و زیست‌توده در مرحله صحت‌سنجی بیشتر از مرحله واسنجی بود (شکل ۹). علت آن بالا بودن بارندگی در سال دوم کشت بود. مقدار بارندگی در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۷۹ و ۱۸۰ میلی‌متر بود. بهره‌وری آب در مرحله صحت‌سنجی، کمتر از تیمارهای متناظر در مرحله واسنجی بود. با این وجود بیشترین بهره‌وری آب در تیمار E100 (۱/۴ کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهده شد که مطابق با مرحله واسنجی است. اختلاف بین عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی نشان داد که با افزایش تنش آبی، دقت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی این پارامتر کاهش یافت. این نتایج با مشاهدات ابراهیمی پاک و همکاران (۱۳۹۷) و اگدرنژاد و همکاران (۱۳۹۷) مطابقت داشت. این محققان نیز افزایش خطای مدل AquaCrop را در شرایط تنش شدید آبی گزارش کردند. در مرحله صحت‌سنجی نیز خطای مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گندم در شرایط تنش شدید افزایش یافت. لیکن با توجه به نتایج جدول (۵)، این خطا قابل قبول است؛ بنابراین با اعتماد به نتایج مدل AquaCrop، عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب گندم برای سناریوهای مختلف آب



شکل ۸- مقایسه عملکرد، زیست توده و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای گندم در مرحله واسنجی



شکل ۹- مقایسه عملکرد، زیست توده و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای گندم در مرحله صحت‌سنجی



شکل ۱- مقادیر عملکرد، زیست‌توده و بهره‌وری آب در مقادیر مختلف تأمین آب آبیاری (نمودارهای قرمز نشان‌دهنده مقادیر آبیاری موجود در مزرعه و نمودارهای آبی نشان‌دهنده مقادیر آبیاری پیشنهادی است).

حاجی زاده، م.، رحیمی خوب، ع.، علی نیایی فرد، س. و وراوی پور، م. ۱۳۹۸. تعیین بهره‌وری آب نرمال‌شده و بررسی حساسیت مدل آکوکراپ برای گیاه تربچه. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۵): ۱۵۲۷-۱۵۳۷.

رحیمی‌خوب، ح.، سهرابی، ت و دلشاد، م. ۱۳۹۹. تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاه ریحان در مدل AquaCrop تحت تنش‌های مختلف کود نیتروژن. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱(۶): ۱۳۵۱-۱۳۴۱.

کریمی اورگانی، ح.، رحیمی‌خوب، ع. و نظری‌فر، م. ه. ۱۳۹۸. تحلیل حساسیت مدل آکوکراپ برای محصول جو در منطقه پاکدشت. مجله علوم آب و خاک. ۲۳(۳): ۵۳-۶۳.

محمدی، م.، داوری، ک.، قهرمان، ب.، انصاری، ح و حق‌وردی، ا. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت تنش هم‌زمان شوری و خشکی. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۹(۳): ۲۷۷-۲۹۵.

## منابع

ابراهیمی پاک، ن. ع.، احمدی، م.، آگدرنژاد، ا. و خاشعی‌سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف ژئولیت. حفاظت منابع آب و خاک. ۸(۱): ۱۳۱-۱۱۷.

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

احمدی، م.، خاشعی‌سیوکی، ع و سیاری، م. ح. ۱۳۹۵. بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (*Crocus sativus L.*) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. بوم‌شناسی کشاورزی. ۸(۴): ۵۲۰-۵۰۵.

آگدرنژاد، ا.، ابراهیمی پاک، ن. ع.، تافته، آ و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. مدیریت آب در کشاورزی. ۵(۲): ۶۴-۵۳.

- 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.
- Garcia-Vila. M. and Fereres, E. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*. 36(1): 21-31.
- Geerts, S. and Raes, D. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96: 1275-1284.
- Guo, D., Zhao, R., Xing, X., and Ma, X. 2019. Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1-19.
- Heng, L. k., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T. and 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.
- Jin, X., Li, Z., Nie, C., Xu, X., Feng, H., Guo, W. and Wang, J. 2018. Parameter sensitivity analysis of the AquaCrop model based on extended fourier amplitude sensitivity under different agro-meteorological conditions and application. *Field Crops Research*, 226: 1-15.
- 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.
- Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N. and Frede, H. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(9-10), 645-654.
- 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.
- 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. and 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 the Karkheh River Basin. Research Report no. 1: A Compendium of Review Papers. ICARDA, Aleppo, Syria. IV+103.

## Applied Irrigation Water of Wheat using Sensitivity Analysis and Evaluation of Aqua Crop

M. Ahmadee<sup>1\*</sup>, M. Ghanbarpouri<sup>2</sup> and A. Egdernezhad<sup>3</sup>

### Abstract

Use of the AquaCrop model to simulate and determine the appropriate irrigation depth is common among researchers. However, paying attention to the sensitivity analysis and evaluation of the AquaCrop model will lead to more accurate results. In the present study, a new method, called Beven, was used to analyze the sensitivity of AquaCrop. For this purpose, the data collected from a research project in Boroujerd, Iran, were used. In this method, instead of increasing or decreasing the parameter values, a range of input parameter values is used for sensitivity analysis. In addition, four evaporation values from evaporation pan at 40 (E40), 70 (E70), 100 (E100) and 120 (E120) mm were considered. The results showed that crop growth coefficient and normalized water productivity were the most sensitive parameters. Evaluation of AquaCrop in validation showed that this model had an under estimation error to simulate yield (MBE=6%) and water productivity (MBE=4%). While for biomass simulation it made an overestimation error (MBE= -3%). Wheat yield simulation error increased at high water stress values, but the accuracy of AquaCrop was acceptable for simulating yield, biomass and water productivity (NRMSE<10%). By reducing the amount of irrigation water to 150 mm, yield and biomass decreased to 1.9 and 7.4 tons per hectare, respectively. However, water productivity increased to 1.3 kg per cubic meter. With increasing the amount of irrigation water up to 600 mm, yield and biomass had an upward trend, so that they increased to 7.2 and 13.9 tons per hectare, respectively. However, water productivity reached 1.3 kg per cubic meter only at depths of 264 and 500 mm. Therefore, if sufficient water is available, applying 500 mm is recommended for higher yield and biomass. Otherwise, it is better to use 150 or 264 mm.

**Keywords:** Beven Method, Water Productivity, Water Stress

<sup>1, 2</sup> Ph.D of irrigation and drainage, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Khorramabad, Iran

(\* Corresponding Author Email: m.ahmadee@ymail.com )

<sup>3</sup> Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Received: 31 March. 2021

Accepted: 4 May 2021