



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۶

صفحه‌های ۳۳۱-۳۱۹

ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند تحت تنش‌های آبی در شهرکرد

نیازعلی ابراهیمی پاک^{۱*}، اصلان اگدرنژاد^۲

۱. دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۹

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴

چکیده

پژوهش حاضر به منظور ارزیابی دقت مدل AquaCrop برای تعیین عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند انجام شد. در پژوهش حاضر از داده‌های دو فصل زراعی کشت چغندر قند استفاده شد که در مرکز تحقیقات کشاورزی شهرکرد انجام شده بود. تیمارهای استفاده شده در پژوهش حاضر شامل کم‌آبیاری (در پنج سطح؛ E0: ۱۰۰ درصد، E1: ۸۵ درصد، E2: ۷۰ درصد، E3: ۵۵ درصد و E4: ۳۰ درصد) در دوره‌های مختلف رشد (T1: ابتدای دوره رشد؛ T2: دوره میانی و T3: انتهای دوره رشد) بود. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد این مدل به پارامترهای رطوبت در نقطه پژمردگی و کمترین دما، حساسیت کم و به تغییرات ضریب گیاهی برای تعرق، حساسیت زیاد داشت. نتایج آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات نرمال شده برای عملکرد چغندر قند به ترتیب برابر با ۰/۵۷ و ۰/۱۱ تن در هکتار به دست آمد. نتایج آماره‌های کارایی مدل و شاخص توافق برای عملکرد چغندر قند به ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۰/۹۹ به دست آمدند. مقایسه آماری نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop و داده‌های مزرعه‌ای نشان داد مدل یادشده دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی هر دو عامل عملکرد و کارایی مصرف آب دارد.

کلیدواژه‌ها: عملکرد محصول، کارایی مصرف آب، کم‌آبیاری، مدل گیاهی، مدیریت مصرف آب.

مقدمه

چغندر قند به عنوان یکی از محصولات استراتژیک ایران محسوب می‌شود و کشت آن به دلیل تولید قند و شکر، خوراک دام، ملاس (برای تولید الکل و دارو) اهمیت زیادی دارد (۴ و ۵). بنابراین، توجه به عملکرد این گیاه اهمیت خاصی دارد. با این وجود، شرایط اقلیمی ایران و محدودیت منابع آب (۲ و ۳) سبب شده است، تا همانند سایر محصولات کشاورزی، کم‌آبایی برای تولید این محصول در بسیاری از مناطق کشور در نظر گرفته شود. گرچه به نظر می‌رسد کم‌آبایی با کاهش عملکرد (۱) ممکن است سبب زیان اقتصادی شود، با در نظر گرفتن مزایای آن در بالا بردن سطح بهره‌وری مصرف آب می‌توان آن را روشی مناسب در شرایط فعلی منابع آب به شمار آورد (۱۱، ۱۴ و ۱۷). به همین دلیل، نیاز است تا کم‌آبایی به صورتی اعمال شود که بیشترین عملکرد را در پی داشته باشد. دستیابی به این هدف به انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای بسیاری نیاز دارد که علاوه بر زمان‌بر بودن، سبب صرف هزینه‌های زیادی نیز می‌شود. برای رفع این مشکلات، مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی واکنش گیاهان به شرایط مختلف مزرعه‌ای پیشنهاد شده‌اند (۱۲، ۱۶ و ۱۷).

استفاده از مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات سابقه نسبتاً طولانی دارد. تقریباً، از اواخر دهه شصت میلادی مدل‌سازی گیاهی با برنامه‌های رایانه‌ای تلفیق شد (۹). مدل‌های ایجاد شده ابتدا کارایی قابل قبولی نداشتند. از جمله نخستین اقدامات انجام شده برای ارائه یک مدل قابل قبول می‌توان به نتایج تحقیقات گریک و همکارانش (۱۸) اشاره کرد. محققان یاد شده مدلی به نام SORKAM برای شبیه‌سازی دینامیکی رشد سورگوم در دوره‌های مختلف رشد بسط دادند. از جمله مدل‌های دیگر می‌توان به WOFOST، SWAP و MARS اشاره کرد (۱۲ و ۳۰). به رغم مزیت‌ها و محدودیت‌ها کلیه مدل‌های

یاد شده، سازمان خواروبار کشاورزی (فائو) مدل AquaCrop را به منظور نزدیکی قابل قبول شرایط مدل‌سازی با مدیریت مزرعه در شرایط واقعی ارائه داد. مدل یاد شده به دلیل سادگی، داده‌های ورودی کم، کاربرپسند بودن و دقت زیاد (۱۹، ۲۶ و ۲۹) مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. با توجه به اینکه مطالعات فائو برای بهبود دقت مدل یاد شده همچنان ادامه دارد؛ محققان بسیاری به ارزیابی مدل AquaCrop پرداخته‌اند. پس از ارائه مدل یاد شده، از آن برای ارزیابی عملکرد گیاهان ذرت (۱۹ و ۲۰)، پنبه (۱۳ و ۱۵)، آفتابگردان (۲۹) و کینوا (۱۶) استفاده شد و نتایج ارائه شده توسط کلیه تحقیقات یاد شده رضایت‌بخش بود. در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی و ارزیابی مدل AquaCrop در تعیین عملکرد چغندر قند نیز توسط برخی محققان مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور مثال، استریسویچ و همکارانش (۲۸) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی چغندر قند استفاده کردند. محققان یاد شده دقت مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد محصول یاد شده قابل قبول دانستند و حتی با شبیه‌سازی واکنش آن به مقادیر بارش و شبیه‌سازی عملکرد آن تحت سناریوی دیم نشان دادند برای تولید این محصول حتی می‌توان آبیاری را حذف کرد. کونز و همکارانش (۲۳) از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند استفاده کردند و نشان دادند مدل یاد شده می‌تواند برای برنامه‌ریزی مصرف آب در کشاورزی برای حوضه‌های تحت تنش آبی در آفریقای جنوبی استفاده شود. علی‌شیری و همکارانش (۹) در مطالعات خود از داده‌های جمع‌آوری شده از استان مرکزی برای ارزیابی مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی چغندر قند استفاده کردند. محققان یاد شده گزارش کردند که خطای قابل قبول مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند نشان‌دهنده دقت آن بود. مالک و همکارانش

مدیریت آب و آبیاری

تهیه شد. فاصله بین هر دو کرت نیز برابر با ۲/۵ متر در نظر گرفته شده بود. به منظور اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی گیاه از لایسیمتر زهکش‌دار در شرایط مشابه مزرعه (از نظر بافت، ساختمان خاک و گیاه کاشته‌شده) استفاده شد. آبیاری نیز براساس مقدار رطوبت خاک لایسیمتر و تعیین تبخیر-تعرق واقعی گیاه چغندر قند انجام شد. مقدار آب واردشده برای هر کرت نیز با استفاده از کنتور اندازه‌گیری و در اختیار گیاه قرار داده می‌شد. برداشت نهایی نیز با حذف اثر حاشیه‌ای و در سطحی معادل ۴/۵ متر مربع انجام شد.

در مدل AquaCrop از تبخیر-تعرق (ET) محاسبه شده (رابطه ۱) با فرض تفکیک آن استفاده می‌شود. تفکیک این مؤلفه به دو جزء تبخیر (E) و تعرق (Tr) سبب می‌شود تا مصرف غیر تولیدی آب از معادلات حذف شود (رابطه ۲).

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

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲، Y_a و Y_x به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ET_a و ET_x به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه، و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود (۲۶).

$$CC = CC_0 \times e^{CGC \cdot t} \quad (3)$$

در رابطه ۳، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) است. با تعیین تعرق و تبخیر-تعرق، بیوماس خشک نیز طبق رابطه ۴ برآورد می‌شود:

(۲۴) نیز از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند تحت سناریوهای مختلف آبیاری و استفاده از مالچ در پاکستان استفاده کردند و گزارش دادند که مدل یادشده در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری ملایم دقت قابل قبولی داشت.

با توجه به تحقیقات انجام‌شده، لزوم توجه به ارائه سناریوهای مختلف کم‌آبیاری برای کشت چغندر قند دیده می‌شود. از طرفی، مطالعات انجام‌شده در کشور با استفاده از مدل AquaCrop برای محصول چغندر قند بسیار محدود است. در مطالعات محققان سایر کشورها نیز کمتر به ارزیابی این مدل تحت تنش آبی در مراحل مختلف رشد چغندر قند پرداخته شده است. به همین دلیل، تحقیق حاضر با هدف ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل AquaCrop به اثر سناریوهای مختلف تأمین نیاز آبیاری در دوره‌های مختلف کشت چغندر قند بر عملکرد آن انجام شد.

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی مدل AquaCrop از داده‌های برداشت‌شده دو فصل زراعی کشت چغندر قند در مرکز تحقیقات کشاورزی شهرکرد واقع در طول جغرافیایی $56^{\circ} 50'$ شرقی و عرض جغرافیایی $18^{\circ} 32'$ شمالی و ارتفاع ۲۰۶۶ متر بالاتر از سطح دریا استفاده شد. مشخصات داده‌های هواشناسی منطقه در جدول ۱ نشان داده شده است. تیمارهای استفاده‌شده در پژوهش حاضر شامل تأمین نیاز آبیاری (در پنج سطح؛ E0: ۱۰۰ درصد، E1: ۸۵ درصد؛ E2: ۷۰ درصد؛ E3: ۵۵ درصد و E4: ۳۰ درصد) در دوره‌های مختلف رشد (T1: ابتدای دوره رشد؛ T2: دوره میانی و T3: انتهای دوره رشد) بود. عملیات زراعی برای تهیه زمین شامل دیسک و ماله‌کشی پیش از آماده‌سازی کرت‌های آزمایشی انجام شد. هر کرت با ابعاد 3×5 متر

مدیریت آب و آبیاری

جدول ۱. میانگین داده‌های هواشناسی منطقه (متوسط روزانه) مطالعه‌شده

ماه	ساعات آفتابی		سرعت باد		بارش	رطوبت هوا		کمترین دما	بیشترین دما
	-	-	در دو متری	m.s ⁻¹		%	mm		
فروردین	۸/۸	۱/۲	۱/۲	۵۲/۵	۲	۱/۵	۱۵/۶	۲۲/۴	
اردیبهشت	۱۰	۱/۳	۰/۶	۴۷/۹	۰/۶	۶/۳	۲۲/۴	۲۸/۷	
خرداد	۱۰/۹	۱/۱	۰/۱	۳۸/۲	۰	۹/۵	۲۸/۷	۳۲/۴	
تیر	۱۰/۴	۱/۲۵	۰	۳۱/۴	۰	۱۳/۸	۳۲/۴	۳۲/۵	
مرداد	۱۱/۵	۱/۳	۰	۳۲/۱	۰	۱۳/۶	۳۲/۵	۳۰/۵	
شهریور	۱۰/۳	۰/۶	۰	۲۹/۵	۰	۹/۹	۳۰/۵	۲۴/۴	
مهر	۱۰/۲	۱/۴	۰/۲	۳۶/۷	۰/۲	۵/۵	۲۴/۴	۱۷/۵	
آبان	۹/۵	۰/۷	۰/۴	۴۸/۴	۰/۴	۰/۷	۱۷/۵	۱۲/۳	
آذر	۷/۳	۰/۵	۱/۳	۵۹/۱	۱/۳	-۲/۲	۱۲/۳	۷/۸	
دی	۷/۵	۰/۹	۱/۳	۶۳/۸	۱/۳	-۶/۳	۷/۸	۶/۵	
بهمن	۶/۴	۱/۱	۱/۸	۶۳/۶	۱/۸	-۶/۳	۶/۵	۱۰/۲	
اسفند	۶/۹	۱/۳	۱/۶	۵۴/۸	۱/۶	-۳/۱	۱۰/۲		

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایش شده

عمق	پتانسیم	فسفر	ازت کل	کربن آلی	درصد	درصد	EC	pH	رطوبت در ظرفیت		جرم مخصوص ظاهری	باقات خاک
									درصد	ذرات		
۳۰-۰	۳۸۴	۸/۱۵	۷۰	۰/۵۵	۴۵	۰/۳۵	۸/۰۷	۰/۲۲	۰/۱۲	۱/۳۴	سیلی رسی	
۶۰-۳۰	۲۹۳	۷/۷	۷۲	۰/۴۸	۵۲	۰/۳۲	۸/۰۷	۰/۲۳	۰/۱۳	۱/۵۷	سیلی لومی	

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۶

جدول ۳. مقادیر عوامل گیاهی استفاده‌شده در مدل AquaCrop

توضیح عامل	مقدار	واحد	توضیح
دمای پایه	۵	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای زیاد	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
تراکم کشت	۱۰۰۰۰۰	گیاه در هکتار	اندازه‌گیری
ضریب رشد کانوپی	۱۳/۶	درصد روز	پیش‌فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۵	سانتی‌متر مربع	پیش‌فرض
مدت کاشت تا جوانه‌زنی	۶	روز	واسنجی
مدت کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۷۰	روز	واسنجی
مدت کاشت تا دوره پیری	۱۴۵	روز	واسنجی
مدت کاشت تا برداشت محصول	۱۱۳	روز	واسنجی
عمق مؤثر ریشه	۱/۵	متر	واسنجی
بهره‌وری آب نرمال‌شده	۱۴/۳	گرم بر مترمربع	واسنجی
پوشش گیاهی اولیه	۳/۲	درصد	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۸۲	درصد	واسنجی
حد بالای ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۱۵	-	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۵۵	-	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۱۲/۰	درصد روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۵/۳	درصد روز	واسنجی
بیشترین ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۱	درصد بر روز	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای بسته‌شدن روزنه‌ها	۵	-	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای توسعه پوشش تاجی گیاه	۰/۶	-	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۰/۶	-	واسنجی

استفاده از ماده خشک تولیدشده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$Y = B \times HI \quad (5)$$

در رابطه ۵، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (4)$$

در رابطه ۴، Tr مقدار کل تعرق روزانه طی فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد (Y) نیز با

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۶

اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط ۷-۱۲ نشان داده شده‌اند.

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

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

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

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

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

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

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌هاست. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده دقت عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۱ - ۰/۲، ۰/۲ - ۰/۳ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان می‌دهد که مدل رشد گیاهی AquaCrop مقدار عامل مد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیان می‌کند که مدل در برآورد عامل مد نظر عدد کوچک‌تری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها است و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین

خشک است. داده‌های استفاده‌شده در این مدل در چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه دسته‌بندی می‌شوند. هر گروه از داده‌ها براساس آزمایش‌های مزرعه‌ای یا داده‌های موجود به مدل معرفی شدند. پیش از انجام واسنجی و مدل‌سازی با AquaCrop ابتدا پارامترهای رطوبت در ظرفیت زراعی، رطوبت در نقطه پژمردگی، رطوبت اشباع، کمترین دما، بیشترین دما، بارندگی، ضریب گیاهی برای تعرق، عمق مؤثر ریشه، مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی، مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی، مدت زمان کاشت تا برداشت محصول، مدت زمان کاشت تا دوره پیری و حد آستانه بالای دما با استفاده از رابطه ۶ تحلیل حساسیت شد (۱۶):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (6)$$

در رابطه ۶، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآوردشده عامل مد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد عامل مد نظر براساس داده ورودی پایه است. به منظور تحلیل حساسیت هر عامل بر مقدار خروجی، آن عامل به میزان ۲۵ درصد مقدارش افزایش و کاهش می‌یافت. سپس، مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت زیاد، $2 < Sc < 15$ حساسیت متوسط، $Sc < 2$ حساسیت کم اندازه‌گیری شد (۱۶). سپس، واسنجی مدل برای داده‌های برداشت شده در فصل اول کشت و برای کلیه تیمارها براساس توصیه بسط‌دهندگان مدل (۲۶) انجام شد. مقادیر واسنجی شده و برخی مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌فرض در جدول ۳ نشان داده شده است.

پس از آن شبیه‌سازی انجام شد و نتایج آن با داده‌های برداشت شده از مزرعه آزمایشی مقایسه شد. به این منظور، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای

مدیریت آب و آبیاری

محققان یادشده نیز نشان دادند این مدل نسبت به تغییرات کمترین دما حساسیت کمی داشت. حساسیت مدل یادشده به افزایش عامل ضریب گیاهی برای تعرق زیاد بود. نتایج تحقیقات محمدی و همکارانش (۶) و سالمی و همکارانش (۲۷) نیز نشان داد مدل AquaCrop نسبت به تغییرات عامل یادشده بسیار حساس است. به همین دلیل، در واسنجی عامل یادشده (جدول ۳) دقت لازم در نظر گرفته شد. حساسیت مدل AquaCrop به تغییرات سایر عوامل متوسط بود.

حالت تا یک در زمان برآزش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده برآزش بهتر داده‌هاست.

نتایج و بحث

در جدول ۴ ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، عوامل رطوبت در نقطه پژمردگی و کمترین دما حساسیت نسبتاً کمی با کاهش مقدار عامل ورودی نشان دادند. این نتایج با نتایج پژوهش محمدی و همکارانش (۶) مطابقت داشت.

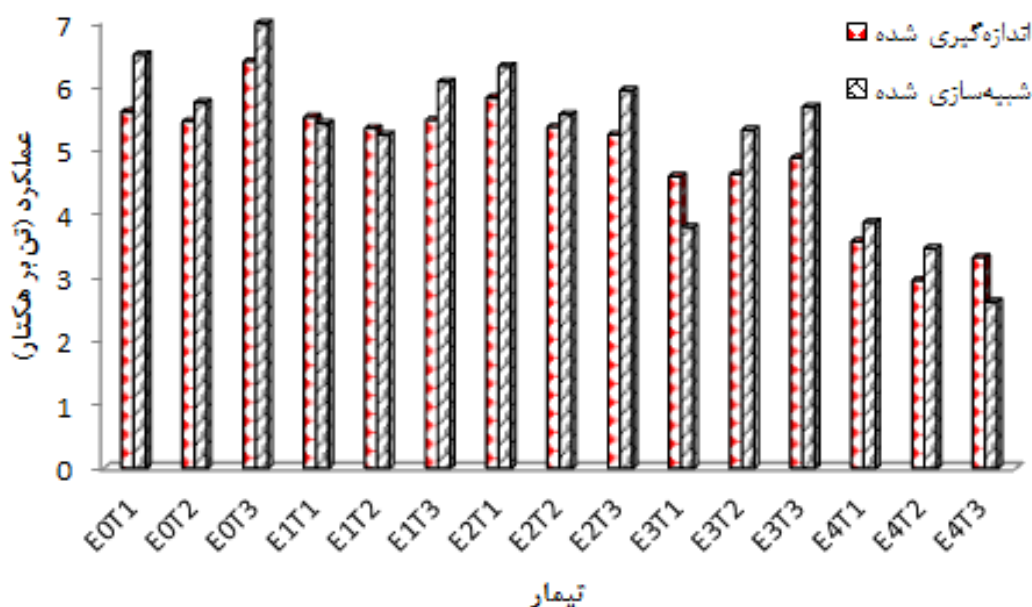
جدول ۴. ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل رشد گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند

عامل	مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
رطوبت در ظرفیت زراعی	۱۴/۷	۹/۶	متوسط
رطوبت در نقطه پژمردگی	۵/۰	۱/۳	متوسط-کم
رطوبت اشباع	۲/۵	۸/۱	متوسط
کمترین دما	۱۲	۰/۹	متوسط-کم
بیشترین دما	۷/۴	۶/۹	متوسط
بازندگی	۷/۱	۱۰/۷	متوسط
ضریب گیاهی برای تعرق	۱۹/۴	۱۳/۹	زیاد-متوسط
عمق مؤثر ریشه	۵/۱	۱۱/۰	متوسط
مدت کاشت تا جوانه‌زنی	۱۰/۱	۷/۳	متوسط
مدت کاشت تا پیشینه رشد کانویی	۸/۶	۲/۵	متوسط
مدت کاشت تا برداشت محصول	۴/۲	۹/۷	متوسط
مدت کاشت تا دوره پیری	۱۶/۲	۱۴/۴	متوسط
حد آستانه بالای دما	۵/۹	۱۲/۶	متوسط

حاضر، به طور متوسط می‌توان گفت که مدل AquaCrop خطایی برابر با ۰/۴ تن در هکتار برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند داشت. نتایج تحقیق علی‌شیری و همکارانش (۹) نیز دامنه تغییرات مشابهی را تعیین کرده بود.

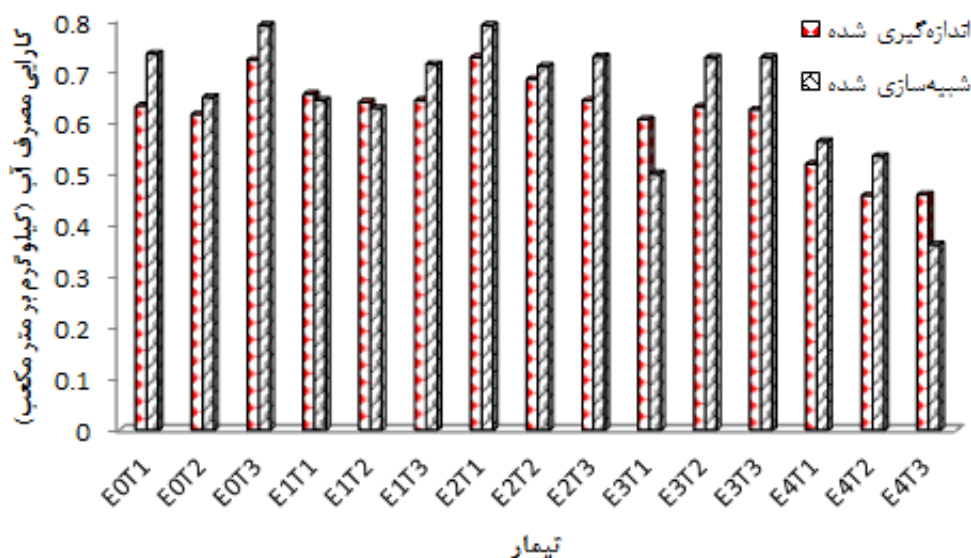
نتایج شبیه‌سازی کارایی مصرف آب در شکل ۲ نشان داده شده است. بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۰/۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب و در تیمارهای E1T1 و E2T2 مشاهده شد. تغییرات منظمی در اختلاف مقادیر کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بین تیمارهای مختلف مشاهده نشد. بیشترین اختلاف (متوسط ۰/۱ کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمارهای حاوی تنش آبی E2 و کمترین اختلاف (متوسط ۰/۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب) نیز در تیمارهای شامل EI به دست آمد.

نتایج شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند با استفاده از مدل AquaCrop نشان داد بیشترین و کمترین اختلاف با مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب در تیمارهای E0T1 و E1T1 بود (شکل ۱). مقادیر این اختلاف به ترتیب برابر با ۰/۹- و ۰/۱ تن بر هکتار بود که با توجه به نتایج پژوهش سایر محققان (۹، ۲۴ و ۲۸) مقادیر قابل قبولی است. با افزایش میزان تنش آبی، خطای مدل AquaCrop نیز افزایش یافت به طوری که در برآورد عملکرد تیمارهای کم‌آبی E3 و E4 به ترتیب ۰/۷ و ۰/۵ تن در هکتار خطا داشت. نتایج پژوهش بسیاری محققان از جمله وطن‌خواه و همکارانش (۷)، محمدی و همکارانش (۶)، علیزاده و همکارانش (۸)، هنگ و همکارانش (۱۹) و اندرزیان و همکارانش (۱۰) نیز نشان داده است که مدل یادشده در شرایط تنش شدید دچار خطای بیشتری می‌شود. با توجه به نتایج تحقیق



شکل ۱. مقایسه نتایج عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده چغندر قند با استفاده از مدل AquaCrop

ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند تحت تنش‌های آبی در شهرکرد



شکل ۲. مقایسه نتایج کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده چغندر قند با استفاده از مدل AquaCrop

جدول ۵. مقایسه آماری نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند

عامل	RMSE	NRMSE	MBE	EF	d	R ²
عملکرد چغندر قند (تن در هکتار)	۰/۵۷	۰/۱۱	۰/۲۹	۰/۶۲	۰/۹۹	۰/۵۹
کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۳۹	۰/۹۹	۰/۶۲

برابر با ۰/۰۷ - ۱/۱۷ تن در هکتار گزارش کردند. نتایج به‌دست آمده از آماره MBE نیز نشان داد مدل یادشده دچار خطای بیش‌برآوردی شده است. البته، با توجه به نتایج به‌دست آمده در شکل ۱ نیز می‌توان دریافت که مدل یادشده در ۱۱ تیمار مقادیر عملکرد را بیش از مقدار اندازه‌گیری شده تعیین کرده است. نتایج پژوهش بسیاری از محققان نیز نشان داده است که مدل یادشده در شبیه‌سازی عملکرد محصولات مختلف دچار خطای بیش‌برآوردی است (۱۹، ۲۲، ۲۵ و ۳۱). گرچه آماره R² مقدار کمی برای برازش مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده نشان داد، با توجه به دو آماره EF و d می‌توان کارایی مدل یادشده را در شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند قابل قبول

مقایسه آماری نتایج به‌دست آمده برای عملکرد و کارایی مصرف آب در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج به‌دست آمده از آماره‌های RMSE و NRMSE، می‌توان نتایج به‌دست آمده از مدل AquaCrop را قابل قبول دانست. براساس آماره RMSE، بیشترین خطای مدل AquaCrop برابر با ۰/۵۷ تن در هکتار و براساس آماره NRMSE حداکثر برابر با ۰/۱۱ تن در هکتار است. استریسویج و همکارانش (۲۸) مقدار ۰/۲ تن در هکتار را برای آماره RMSE گزارش کردند. علی‌شیری و همکارانش (۹) نیز دامنه ۰/۱۵ - ۰/۶۴ تن در هکتار را برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند توسط مدل AquaCrop بیان کردند. در حالی که مالک و همکارانش (۲۴) دامنه تغییراتی

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۷ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۶

هکتار و برای کارایی مصرف آب به ترتیب برابر با ۰/۰۶ و ۰/۰۹ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی هر دو عامل بررسی شده، با توجه به آماره MBE، نشان داد مدل AquaCrop دچار خطای بیش‌برآوردی است. با این وجود، آماره‌های EF و d برای عملکرد چغندر قند به ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۰/۹۹ و برای کارایی مصرف آب به ترتیب برابر با ۰/۳۹ و ۰/۹۹ به دست آمدند. نتایج یادشده نشان دادند مدل AquaCrop کارایی مناسبی برای شبیه‌سازی هر دو عامل داشت.

منابع

۱. ابراهیمی پاک ن.، پذیرا ا.، کاوه ف.، عابدی م. ج. و صباغ‌فرشی م. ج.، (۱۳۸۷)، «تأثیر کم‌آبیاری طی مراحل مختلف رشد چغندر قند بر عملکرد کمی و کیفی آن». پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی. ۷۸: ۶۳-۷۳.
۲. ضیایی غ.، بابازاده ح.، عباسی ح. و کاوه ف.، (۱۳۹۳)، «بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت». تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۵(۴): ۴۳۵-۴۴۵.
۳. کاراندیش ف.، میرلطفی س. م.، شاه‌نظری ع.، عباسی ف. و قیصری م.، (۱۳۹۲)، «بررسی تأثیر آبیاری ناقص ریشه و کم‌آبیاری معمولی بر بهره‌روی آب و عملکرد و اجزای عملکرد گیاه ذرت». تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۴(۱): ۳۳-۴۴.
۴. پاکروان م و مهربانی بشرآبادی ح.، (۱۳۸۹)، «تعیین ارزش اقتصادی و تابع تقاضای آب در تولید چغندر قند استان کرمان». پژوهش آب ایران. ۴(۶): ۸۳-۹۰.

دانست. استریس‌ویج و همکارانش (۲۸) و مالک و همکارانش (۲۴) نیز مقدار ۰/۹ را برای آماره d گزارش کردند که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

نتایج مشابه برای کارایی مصرف آب، در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس این نتایج و با توجه به آماره RMSE، مدل یادشده خطای کمی داشت. مقدار این آماره برابر با ۰/۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد که با توجه به نتایج گزارش شده برای این مدل قابل قبول است (۲۸). مقدار آماره NRMSE نیز برابر با ۰/۰۹ به دست آمد و بیان‌کننده دقت مناسب مدل AquaCrop در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب بود. براساس آماره MBE، مدل یادشده دچار خطای بیش‌برآوردی بود. مقدار R^2 برای این عامل نسبتاً مناسب بود و با توجه به مقادیر به دست آمده برای دو آماره EF (۰/۳۹) و d (۰/۹۹) می‌توان کارایی مدل AquaCrop را مطلوب ارزیابی کرد. مقایسه دو آماره EF برای عوامل کارایی مصرف آب و عملکرد چغندر قند نشان داد کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد بیشتر از کارایی مصرف آب بود. به طوری که مقدار این آماره برای عملکرد چغندر قند حدود دو برابر کارایی مصرف آب به دست آمد. این نتایج با مشاهدات محمدی و همکارانش (۶) و حسین و همکارانش (۲۱) مطابقت داشت. محققان یادشده نیز دقت مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد بیشتر از کارایی مصرف آب بیان کردند.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی مدل AquaCrop در تعیین عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند انجام شد. نتایج به دست آمده از آماره‌های RMSE و NRMSE نشان داد مدل AquaCrop دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی هر دو عامل عملکرد و کارایی مصرف آب داشت. مقادیر این دو آماره برای عملکرد به ترتیب برابر با ۰/۵۷ و ۰/۱۱ تن در

مدیریت آب و آبیاری

- 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 (No. 52). SC-DLO.
13. Farahani H. J., Izzi G., Steduto P. and Oweis T Y (2009) Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy*. 101: 469-476.
14. Farre F and Faci J M (2009) Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 96: 384-394.
15. Garcia-Vila M., Fereres E., Mateos L., Orgaz F and Steduto P (2009) Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy*. 101: 477-487.
16. Geerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R and Cusicanqui J A (2009) Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with FAO-AquaCrop. *Agronomy*. 101: 499-508.
17. 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.
18. Gerik T J., Rosenthal W D and Duncan R R (1988) Simulating grain yield and plant development of ratoon grain sorghum over diverse environments. *Field Crop Research*. 19(1): 63-74.
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.
20. Hsiao T C., Heng L K., Steduto P., Raes D and Fereres E (2009) AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy*. 101: 448-459.
۵. موسوی س. ن. ا.، قرقانی ف.، طاهری ف. و محمدی ح.، (۱۳۸۷)، «بررسی عوامل مؤثر بر عرضه چغندر قند در استان فارس». چغندر قند. ۲۴(۱): ۱۰۷-۱۱۹.
۶. 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.
۷. وطن‌خواه ا و ابراهیمیان ح.، (۱۳۹۵)، «ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در طول جویچه». تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۷(۳): ۴۹۵-۵۰۴.
۸. عزیزاده ح.، نظری ب.، پارسی‌نژاد م.، رضوانی‌اعتدالی ه. و جانباز ح.، (۱۳۸۹)، «ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج». آبیاری و زهکشی ایران. ۴: ۲۷۳-۲۸۳.
9. Alishiri R., Paknejad F. and Aghayari F (2014) Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop. *Bioscience*. 4(4): 1-9.
10. Andarziana B., Bannayanb M., Steduto P., Mazraeha 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. *Agricultural Water Management*. 100:1-8.
11. 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.
12. Boogaard H. L., Van Diepen C. A., Rotter R. P., Cabrera J. M. C. A. and Van Laar H H (1998) WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST

21. Hussein F., Janat M and Yakoub A (2011) Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Agricultural Research*. 9(4):1319-1330.
22. 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.
23. Kunz R., Schulze R., Mabhaudhi T and Mokonoto O (2014) Modeling the potential impacts of climate change on yield and water use of sugarcane and sugar beet: preliminary results based on the AquaCrop model. *South African Sugar Association*. 87: 285-289.
24. Malik A., Shakir A. S., Ajmal M., Jamal Khan M and Ali Kan T (2017) Canopy cover, biomass and root yield under different irrigation and field management practices in semi-arid regions of Pakistan. *Water Resources Management*. 31: 4275-4292.
25. Mousavizadeh S. F., Honar T and Ahmadi S H (2016) Assessment of the AquaCrop model for simulating canola under different irrigation management in a semiarid area. *Plant Production*. 10(4): 1735-6814.
26. Raes D., Steduto P., Hsiao T C and Freres E (2012) Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
27. Salemi H., Mohd Soom M. A., Lee T. S., Mousavi S. F., Ganji A and Kamil Yusoff M (2011) Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. *Agricultural Research*. 610: 2204-2215.
28. Stricevic R., Cosic M., Djurovic N., Pejic B and Maksimovic L (2011) Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98: 1615-1621.
29. Todorovic M., Albrizio R., Zivotic L., Abisaab M and Stwckle C (2009) Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy*. 101: 509-521.
30. Van Dam J. C., Huygen J., Wesseling J. G., Feddes R. A., Kabat P., Van Walsum P. E. V., Groenendijk P and Van Diepen C A (1997) Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department Water Resources. Wageningen Agricultural University. 167 pp.
31. Zeleke K., Luckett D and Cowley R (2011) Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agronomy*. 103, 1610-1618.



Water and Irrigation Management

(Scientific Journal of Agriculture)
(College of Abouraihan – University of Tehran)

Vol. 7 ■ No. 2 ■ Autumn & Winter 2017-18

Evaluation and sensitivity analysis of AquaCrop to simulate sugar beet yield under water stress in Shahrekord

Niaz Ali Ebrahimipak^{1}, Aslan Egdernezhad²*

1. Associated Professor, Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
2. Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Received: November 25, 2017

Accepted: January 08, 2018

Abstract

This research was conducted to evaluate AquaCrop model to simulate sugar beet yield and water use efficiency (WUE). In this research, data from two sugar beet cultivars were used at Shahrekord Agricultural Research Center. Treatments were consisted of water deficit (in five levels: E0: 100%, E1: 85%, E2: 70%, E3: 55%, and E4: 30%) in different growth stages (T1: initial, T2: T2: mid-season, and T3: late season). AquaCrop had a low sensitivity to change in PWP moisture and minimum temperature values and high sensitivity to change in crop coefficient for transpiration values. The yield results of RMSE and NRMSE were 0.57 and 0.11 ton.ha⁻¹, respectively. The yield results for two statistics criteria (EF and d) were 0.62 and 0.99, respectively. Evaluation of AquaCrop revealed that this model had good accuracy for simulation of sugar beet yield and WUE.

Keywords: crop yield, plant modeling, water deficit, water management, water use efficiency.