

ارزیابی مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst در برآورد

عملکرد چغندر قند تحت شرایط کم‌آبیاری

نیازعلی ابراهیمی پاک^{۱*} و اصلان آگدرنژاد^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۱۵)

چکیده

چغندر قند یکی از محصولات مهم زراعی است و عملکرد آن به میزان آب مصرفی وابسته است. به دلیل عدم امکان ارزیابی کلیه گزینه‌های آبیاری بر عملکرد این محصول، می‌بایست از مدل‌های گیاهی استفاده کرد. به همین دلیل مدل‌های گیاهی CropSyst، WOFOST و AquaCrop به منظور تعیین عملکرد چغندر قند مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای ارزیابی مدل‌ها از داده‌های ایستگاه تحقیقاتی شهرکرد استفاده شد. تیمارهای آب مصرفی در این پژوهش شامل مقدار آب آبیاری (در پنج سطح: E0: ۱۰۰ درصد، E1: ۸۵ درصد، E2: ۷۰ درصد، E3: ۵۵ درصد و E4: ۳۰ درصد) بر اساس تبخیر- تعرق گیاه چغندر قند در دوره‌های مختلف رشد (T1: دوره رشد ابتدایی؛ T2: دوره رشد میانی و T3: دوره رشد انتهایی) بود. نتایج آماره‌ی RMSE برای عملکرد مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst به ترتیب برابر با ۰/۵۷، ۰/۶۸ و ۰/۲۶ تن بر هکتار به دست آمد. نتایج آماره NRMSE نیز برای این سه مدل به ترتیب برابر با ۰/۱۱، ۰/۱۳ و ۰/۰۵ تن بر هکتار بود. آماره‌ی EF نیز نشان داد که مدل CropSyst (۰/۹۱) کارایی بهتری نسبت به دو مدل AquaCrop (۰/۶۲) و WOFOST (۰/۴۷) در تعیین عملکرد داشت. بر اساس این نتایج، مدل CropSyst، دقت بیشتری نسبت به دو مدل دیگر دارد.

واژه‌های کلیدی: مدل آب محور، مدل تابش محور، مدل‌سازی گیاهی

۱. بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: nebrahimipak@yahoo.com

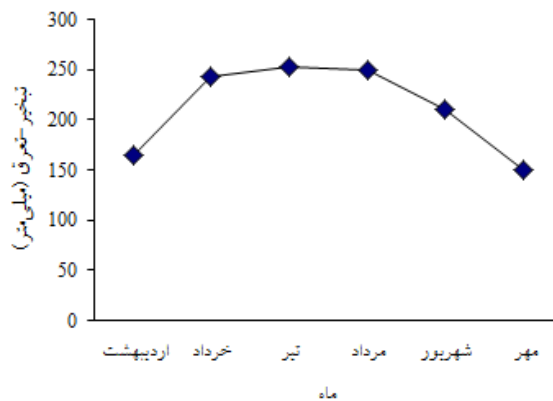
مقدمه

چغندر قند به دلیل تولید قند و شکر، خوراک دام، ملاس اهمیت زیادی در بین محصولات مهم کشور دارد (۲۷). از طرفی محدودیت منابع آب (۳۸) سبب شده است تا کم آبیاری برای تولید محصولات کشاورزی، از جمله چغندر قند، به عنوان یکی از روش های ضروری محسوب شود (۱۰). به منظور بررسی تأثیر کم آبیاری در گزینه های مختلف بر عملکرد این گیاه نیاز است تا آزمایش های مزرعه ای متعددی انجام شود. لیکن این عمل مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار است. بدین منظور، مدل های گیاهی مختلف برای شبیه سازی گیاهان متفاوت در شرایط آبیاری گوناگون بسط داده شده است (۶، ۱۶ و ۲۵). از جمله این مدل ها می توان به AquaCrop، WOFOST و CropSyst اشاره کرد، هر کدام از این مدل ها به دلیل مزیت های خود مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته اند. مدل های گیاهی برای شبیه سازی عملکرد گیاهان از رویه های متفاوتی استفاده می کنند. به صورت کلی این رویه ها برای تبدیل یک منبع مانند دی اکسید کربن، تابش خورشیدی یا آب به ماده خشک در معادلات حاکم هر کدام از این مدل ها در نظر گرفته شده است. به همین دلیل مدل های گیاهی به سه دسته کربن محور، آب محور و تابش محور تقسیم می شوند. مدل WOFOST از جمله مدل های کربن محور است که در چارچوب مطالعات جهانی امنیت غذا و پتانسیل جهانی تولید غذا، توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی با همکاری دانشگاه واگنینگن و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک تولید شد (۷). مدل AquaCrop از جمله مدل های آب محور است که توسط سازمان خوار و بار کشاورزی (فائو) ارائه شد. مدل CropSyst جز هر دو دسته آب محور و تابش محور محسوب می شود و توسط استوکول و نلسون (۳۲) ارائه شد. سعادت و همکاران (۲۹) از مدل WOFOST برای شبیه سازی عملکرد دو رقم برنج تحت رژیم های مختلف آبیاری استفاده کردند و عملکرد آن را مطلوب گزارش کردند، از مدل WOFOST برای شبیه سازی عملکرد گیاهان، ایتزینگر و همکاران (۱۱) بر گندم و جو، امیری و همکاران (۲) بر گیاه برنج، یانگ و

همکاران (۳۶) بر ذرت، سانگ و همکاران (۳۱) بر گندم، مارلتو و همکاران (۲۴) بر گندم و کانفالونیری و همکاران (۹) بر برنج استفاده کرده اند. تحقیقات انجام شده روی مدل CropSyst می توان مطالعات بلوچی و همکاران (۴) روی گیاه ذرت، موربوندو و همکاران (۲۵) روی گیاه گندم و کلفالونیری و بچینی (۸) بر گیاه یونجه را نام برد. مدل AquaCrop به دلیل سادگی، داده های ورودی کم، کاربرپسند بودن و دقت بالای این مدل (۱۸، ۲۸ و ۳۴) بیشتر از سایر مدل های گیاهی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از جمله این تحقیقات می توان به بررسی کارایی مدل AquaCrop بر عملکرد گیاهان ذرت (۱۸) و (۱۹)، پنبه (۱۲ و ۱۴)، آفتابگردان (۳۴) و کینوا (۱۵) اشاره کرد. بررسی عملکرد گیاه چغندر قند توسط مدل های WOFOST و CropSyst تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات محدودی نیز با استفاده از مدل AquaCrop انجام گرفته است که به عنوان نمونه می توان مطالعات استریسویچ و همکاران (۳۳) اشاره کرد. این پژوهشگران گزارش کردند که این مدل برای شبیه سازی عملکرد چغندر قند بسیار مناسب است و از دقت قابل قبولی برخوردار است. همچنین از گزینه های دیم برای ارزیابی این مدل استفاده کردند و نتایج آنها نشان داد که حتی می توان آبیاری را در مراحل رشد این گیاه حذف کرد و آبیاری تنها با بارش انجام داد. در تحقیقی دیگر، کونز و همکاران (۲۲) از مدل AquaCrop در شبیه سازی واکنش چغندر قند به آب مصرفی استفاده کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که این مدل کارایی مطلوبی برای برنامه ریزی مصرف آب در کشاورزی در شرایط تحت تنش آبی در آفریقای جنوبی داشت. علیشیری و همکاران (۱) با استفاده از داده های جمع آوری شده از استان مرکزی به ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد چغندر قند پرداختند. نتایج نشان داد که این مدل دقت خوبی برای شبیه سازی این محصول دارد. مالک و همکاران (۲۳) گزینه های مختلف آبیاری به همراه مالچ در پاکستان را برای شبیه سازی عملکرد چغندر قند با استفاده از مدل AquaCrop به کار برد. نتایج نشان داد که مدل در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

عمق (cm)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)	رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (cm ³ cm ⁻³)	رطوبت در ظرفیت زراعی (cm ³ cm ⁻³)	pH	EC (dS m ⁻¹)	درصد اشباع	کربن آلی (%)	ازت کل (%)	فسفر ppm	پتاسیم ppm
۰-۳۰	سیلتی رسی	۱/۳۴	۰/۱۲	۰/۲۲	۸/۰۷	۰/۳۵	۴۵	۰/۵۵	۷۰	۸/۱۵	۳۸۴
۳۰-۶۰	لومی شنی	۱/۷۸	۰/۱۳	۰/۲۴	۸/۰۷	۰/۳۲	۵۲	۰/۴۸	۷۲	۷/۷	۲۹۳



شکل ۱. نتایج لایسی متری تبخیر-تعرق گیاه چغندر قند

درصد، E1: ۸۵ درصد؛ E2: ۷۰ درصد؛ E3: ۵۵ درصد و E4: ۳۰ درصد) تبخیر-تعرق گیاه چغندر قند و در دوره‌های مختلف رشد (T1: دوره رشد ابتدایی؛ T2: دوره رشد میانی و T3: انتهای دوره رشد انتهایی) بود. آماده‌سازی مزارع آزمایشی با اعمال دیسک و ماله‌کشی انجام شد. سپس کرت‌های آزمایشی با ابعاد ۳×۵ متر و با فواصل ۲/۵ متر آماده شدند. مشخصات خاک مزرعه در جدول (۱) نشان داده شده است. مقدار آب آبیاری با توجه به میزان تبخیر-تعرق واقعی گیاه چغندر قند تعیین و توسط کنتور اندازه‌گیری می‌شد. تبخیر-تعرق گیاه نیز با ایجاد یک لایسیمتر زهکش‌دار در کنار کرت‌های آزمایشی مشخص می‌شد. نتایج به‌دست آمده از تبخیر-تعرق در شکل (۱) نشان داده شده است. در انتهای فصل رشد نیز برداشت با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای انجام شد.

مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه رابطه (۱) از بیوماس شبیه‌سازی شده رابطه (۲) استفاده می‌کند. در این مدل تبخیر-تعرق به‌عنوان مؤلفه اصلی تولید ماده خشک محسوب شده

ملازم از دقت بالایی برخوردار بود.

مروری بر تحقیقات پژوهشگران نشان می‌دهد که مطالعات همزمانی محدودی برای ارزیابی مدل‌های WOFOST، CropSyst و AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند انجام شده است. به همین دلیل، تحقیق حاضر به منظور ارزیابی این سه مدل در شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند در شرایط کم‌آبایی انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش سه مدل AquaCrop، WOFOST و CropSyst به منظور شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور داده‌های دو فصل کشت برداشت شده ایستگاه تحقیقات کشاورزی شهرکرد واقع در طول جغرافیایی ۵۶° ۵۰ شرقی و عرض جغرافیایی ۱۸° ۳۲ شمالی و ارتفاع ۲۰۶۶ متر بالاتر از سطح مورد استفاده قرار گرفت. تیمارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل مقدار آب آبیاری (در پنج سطح؛ E0: ۱۰۰

که در این رابطه، ΔW میزان رشد، A میزان ناخالص جذب، R_m میزان تعرق نگهداری و C_e راندمان تبدیل جذب به بیوماس است. این مدل از معادله ساده نشان داده شده در رابطه (۸) برای تعیین میزان جذب و رشد گیاه در شرایط کم آبیاری استفاده می‌کند:

$$A = \frac{T_a}{T_p} \times A_p \quad (8)$$

که در این رابطه، A جذب واقعی، A_p جذب پتانسیل، T_a تعرق واقعی و T_p تعرق پتانسیل است. پیش از شبیه‌سازی، واسنجی مدل‌های مورد نظر با استفاده از داده‌های برداشت شده در فصل اول کشت انجام شد. سپس نتایج شبیه‌سازی هر سه مدل نیز با داده‌های برداشت شده فصل دوم کشت مقایسه شدند. بدین منظور از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اربب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۹) تا (۱۴) نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{O_i} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (11)$$

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

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (13)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

و توسط رابطه (۳) از تفکیک دو جز تبخیر و تعرق محاسبه می‌شود.

$$Y = B \times HI \quad (1)$$

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

$$Tr_i = K_s \times CC \times K_c \times ET_e \quad (3)$$

که در این روابط، Y عملکرد، HI شاخص برداشت، B بیوماس خشک، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_e تبخیر-تعرق گیاه مرجع (که توسط روش FAO56 محاسبه شد)، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که توسط رابطه (۴) محاسبه می‌شود (۲۸).

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (4)$$

در این رابطه: CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) است.

مدل CropSyst از یکی از دو رابطه (۵) یا (۶) برای شبیه‌سازی تولید بیوماس استفاده می‌کند. این دو رابطه بر اساس دو رویه اساسی است که در مدل CropSyst برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان مختلف در نظر گرفته شده است. در رابطه (۵) میزان عملکرد بر اساس تابش جذب شده توسط گیاه و در رابطه (۶) مقدار عملکرد بر اساس تعرق شبیه‌سازی می‌شود.

$$AGB_{IPAR} = RUE \times IPAR \times T_{lim} \quad (5)$$

$$AGB_T = T_{act} \times \frac{BTR}{VPD} \quad (6)$$

در این رابطه، AGB_{IPAR} و AGB_T بیوماس گیاه، RUE فاکتور تبدیل نور به بیوماس، $IPAR$ تابش جذب شده، T_{lim} فاکتور محدوده‌کننده دمایی، T_{act} تعرق واقعی و BTR ضریب تعرق-بیوماس است. بدین ترتیب در این مدل، میزان تولید ماده خشک بر اساس جذب نور یا آب شبیه‌سازی می‌شود و این عمل به محدودیت یکی از این دو فاکتور بستگی دارد.

مدل WOFOST میزان رشد محصولات را با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آورد:

$$\Delta W = C_e \times (A - R_m) \quad (7)$$

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 داده‌ها است. 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 بیشتر مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده 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 است و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها است.

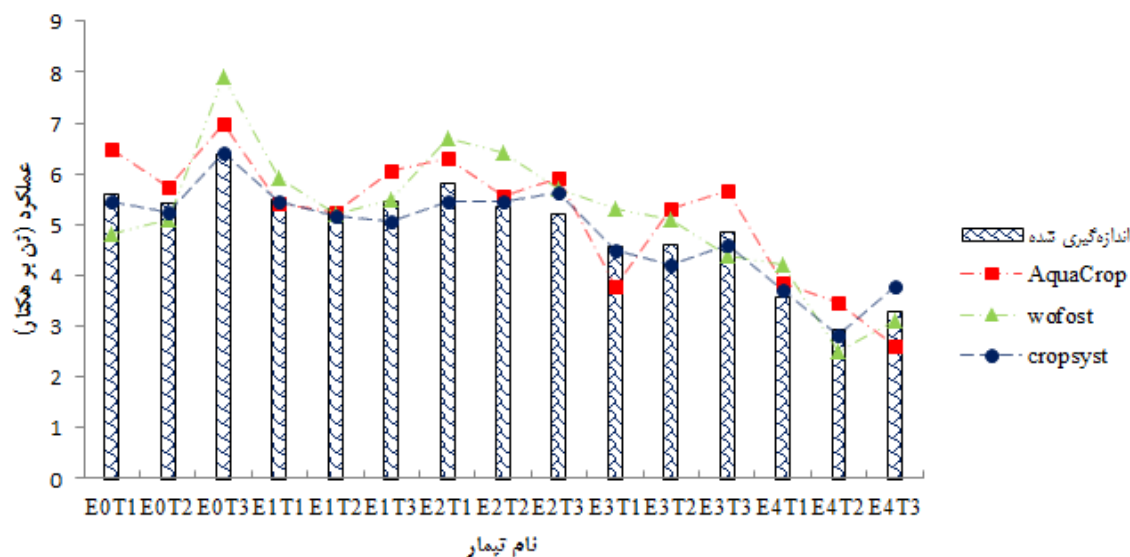
نتایج و بحث

پارامترهای گیاهی مورد استفاده در هر سه مدل مورد استفاده واسنجی شد. نتایج واسنجی برخی از این پارامترها در جدول (۲) نشان داده شده است. مقایسه نتایج هر کدام از مدل‌های مورد مطالعه در شکل (۲) نمایش داده شد. نتایج نشان داد که در مدل AquaCrop، بیشترین و کمترین اختلاف با مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب در تیمارهای E0T1 و E1T1 بود. مقادیر این اختلاف به ترتیب برابر با ۰/۹- و ۰/۱ تن بر هکتار است که در مطابقت با نتایج سایر پژوهشگران (۱، ۲۳ و ۳۳) مقادیر قابل قبولی است، بیشترین و کمترین اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از مدل CropSyst نیز به ترتیب در تیمارهای E4T3 و E0T3 برآورد شد. این مقادیر برای مدل WOFOST نیز به ترتیب در تیمارهای E1T2 و E0T3 مشاهده شد. متوسط اختلاف نتایج مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. بر اساس این نتایج، می‌توان دقت مدل CropSyst را بیشتر از دو مدل دیگر برشمرد. دقت مدل AquaCrop در کلیه تنش‌های آبی تقریباً مشابه و در محدوده ۰/۰۵ کیلوگرم بر

CropSyst و WOFOST با مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۲ و ۰/۶ تن در هکتار بود. نتایج مدل AquaCrop برای ۱۰ تیمار اختلافی بیشتر از ۰/۵ تن بر هکتار با مقادیر واقعی داشت و این نتایج برای مدل WOFOST برابر با شش تیمار بود. با این وجود نتایج مدل CropSyst برای کلیه تیمارها اختلافی کمتر از ۰/۵ تن بر هکتار با مقادیر واقعی داشت. نتایج علی‌شیری و همکاران (۱) با کاربرد مدل AquaCrop با نتایج به دست آمده در این تحقیق مطابقت داشت. اعمال تنش آبی در دوره رشد انتهایی سبب شد تا خطای برآوردی مدل AquaCrop افزایش یابد. همچنین اعمال تنش آبی سبب شد دقت این مدل در شبیه‌سازی کاهش یابد. خطای این مدل برای تیمارهای E3 و E4 به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۵ تن در هکتار بود و در مدل WOFOST تغییرات منظمی در خطای مدل نسبت به اعمال تنش آبی مشاهده نشد در حالی که مدل CropSyst رفتاری مشابه AquaCrop داشت. این مدل نیز با افزایش تنش آبی دچار خطای بیشتری در تعیین عملکرد شد. علت این نتایج احتمالاً به نوع روابط حاکم در هر مدل وابسته است. به طوری که دقت مدل WOFOST که مدلی کربن محور است؛ تحت تأثیر تنش آبی قرار نگرفته است. نتایج کارایی مصرف برای هر سه مدل در شکل (۳) نمایش داده شده، بیشترین و کمترین اختلاف نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۰/۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب و در تیمارهای E1T1 و E2T2 به دست آمد و نتایج مشابه برای مدل WOFOST به ترتیب برابر با ۰/۱۷ و ۰/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب و به ترتیب در تیمارهای E0T3 و E1T3 تعیین شد همچنین نتایج برای مدل CropSyst به ترتیب برابر با ۰/۰۶ و ۰/۰۱ و در تیمارهای E4T3 و E0T3 مشاهده شد. متوسط اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst به ترتیب برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. بر اساس این نتایج، می‌توان دقت مدل CropSyst را بیشتر از دو مدل دیگر برشمرد. دقت مدل AquaCrop در کلیه تنش‌های آبی تقریباً مشابه و در محدوده ۰/۰۵ کیلوگرم بر

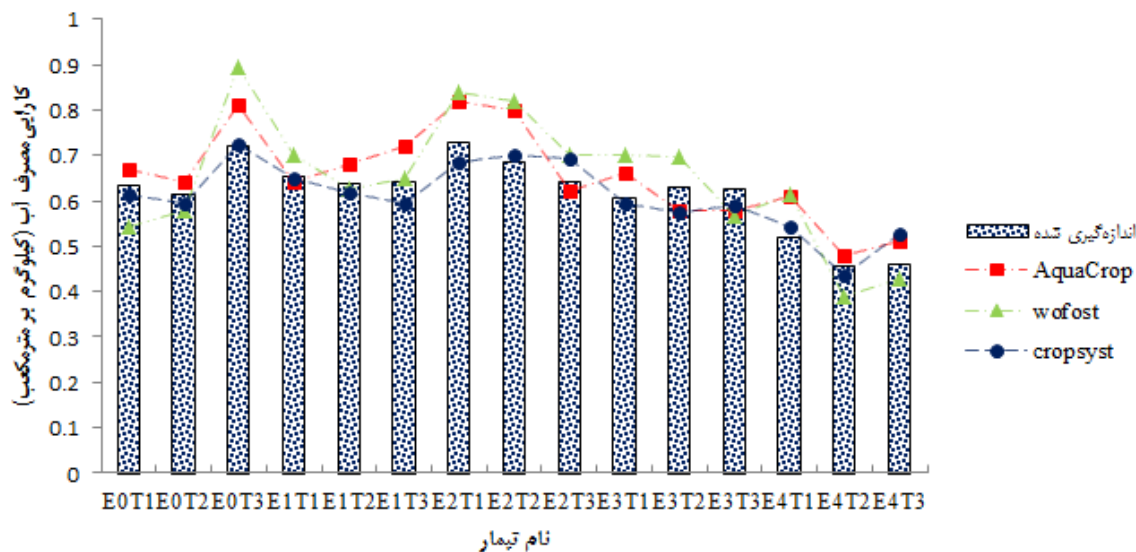
جدول ۲. مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل‌های مورد استفاده

توضیح عامل	مقدار	واحد	توضیح
مدل AquaCrop			
دمای پایه	۵	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
دمای بالا	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
تراکم کشت	۱۰۰۰۰۰	گیاه در هکتار	اندازه‌گیری
ضریب رشد کانوپی	۱۳/۶	درصد روز	پیش فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۵	سانتی‌متر مربع	پیش فرض
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۴/۳	گرم بر متر مربع	واسنجی
پوشش گیاهی اولیه	۳/۲	درصد	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۸۲	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۱۵	-	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۵۵	-	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۱۲/۰	درصد روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۵/۳	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۱	درصد بر روز	واسنجی
مدل WOFOST			
دمای پایین برای جوانه‌زنی	۳	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
ضریب خاموشی نور جذب شده	۰-۰، ۵-۵۴	-	واسنجی
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۰-۰، ۵-۴۸	کیلوگرم بر هکتار ساعت ژول مربع	واسنجی
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۰/۷۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۰/۸۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ریشه	۰/۷۲	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۰/۵۷	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
فاکتور تصحیح میزان تعرق	۱/۲	-	واسنجی
مدل CropSyst			
ضریب تبخیر تعرق گیاهی	۱/۰۱	-	واسنجی
ضریب خاموشی نور	۰/۴	-	واسنجی
دمای پایه	۵	درجه سانتی‌گراد	واسنجی
ضریب جذب نیتروژن	۱/۲۵	-	واسنجی
حداکثر عمق ریشه	۱/۲	متر	واسنجی



شکل ۲. مقایسه نتایج عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌سازی شده چغندر قند با استفاده از مدل‌های

WOFOST و CropSyst، AquaCrop



شکل ۳. مقایسه نتایج کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌سازی شده چغندر قند با استفاده از مدل‌های

WOFOST و CropSyst، AquaCrop

مقایسه آماری نتایج سه مدل مورد استفاده در جدول (۳) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، مدل CropSyst کمترین خطا را داشت. میزان RMSE برای سه مدل AquaCrop، CropSyst و WOFOST به ترتیب برابر با ۰/۵۷، ۰/۲۶ و ۰/۶۸

مترمکعب به‌دست آمد و تنها در تیمارهای تنش E2 خطای بیشتری نشان داد، مدل CropSyst با افزایش تنش آبی دارای خطای بیشتری شد ولی تغییرات ایجاد شده برای مدل WOFOST با افزایش تنش آبی روند منظمی نداشت.

جدول ۳. مقایسه نتایج آماری نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند

عامل	نام مدل	RMSE	NRMSE	MBE	EF	d	R ²
عملکرد	AquaCrop	۰/۵۷	۰/۱۱	۰/۲۹	۰/۶۲	۰/۹۹	۰/۵۹
	CropSyst	۰/۲۶	۰/۰۵	-۰/۰۶	۰/۹۱	۰/۹۹	۰/۷۵
	WOFOST	۰/۶۸	۰/۱۳	۰/۲۵	۰/۴۷	۰/۹۹	۰/۷۰
کارایی مصرف آب	AquaCrop	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۳۹	۰/۹۹	۰/۶۲
	CropSyst	۰/۰۳	۰/۰۵	-۰/۰۱	۰/۸۰	۰/۹۹	۰/۶۲
	WOFOST	۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۰۳	-۰/۱۶	۰/۹۹	۰/۶۲

گندم و کانفالونیری و همکاران (۹) برای برنج کارایی مدل WOFOST را بالاتر از ۰/۹ بیان کردند.

نتایج مقایسه آماری برای کارایی مصرف آب نیز نشان داد که دقت مدل CropSyst از دو مدل دیگر بیشتر بود. گرچه با توجه به آماره‌های RMSE و NRMSE دقت هر سه مدل برای تعیین کارایی مصرف آب بسیار کم بود. این نتایج با توجه به مقادیر گزارش شده برای مدل AquaCrop قابل قبول است (۳۳). نتایج آماره EF نشان داد که دقت مدل‌های CropSyst و AquaCrop بسیار مناسب بود ولی مدل WOFOST کارایی قابل قبولی برای تعیین کارایی مصرف آب نداشت. آماره R² برای هر سه مدل در شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند نسبتاً قابل قبول بود. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، ضریب تبیین برای مدل CropSyst بیشتر از دو مدل دیگر بود.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در ارزیابی مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst در شبیه‌سازی چغندر قند با توجه به آماره‌های RMSE و NRMSE هر سه مدل دقت قابل قبولی داشتند. لیکن نتایج شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب نشان داد که دقت مدل CropSyst از مدل‌های دیگر بیشتر بود. آماره‌های RMSE و NRMSE برای عملکرد این مدل به ترتیب برابر با ۰/۲۶ و ۰/۰۵ تن بر هکتار بود. این آماره‌ها برای مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۰/۵۷ و ۰/۱۱ تن بر هکتار و برای مدل WOFOST به ترتیب برابر با ۰/۶۸ و ۰/۱۳ تن بر هکتار به دست آمد. کارایی

تن بر هکتار بود. مقدار NRMSE برای این سه مدل به ترتیب برابر با ۰/۱۱، ۰/۰۵ و ۰/۱۳ به دست آمد که بر اساس این نتایج نیز می‌توان خطای مدل CropSyst را کمتر از سایر مدل‌ها دانست. با توجه به تحقیقات انجام شده با استفاده از مدل AquaCrop برای تعیین عملکرد چغندر قند، می‌توان مقادیر به دست آمده را قابل قبول دانست. بر اساس نتایج منتشر شده توسط استریسویچ و همکاران (۳۳)، مقدار ۰/۲ تن در هکتار برای آماره RMSE مناسب است. علی‌شیری و همکاران (۱) نیز دامنه ۰/۶۴-۰/۱۵ تن در هکتار را برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند توسط مدل AquaCrop بیان کردند. در حالی که مالک و همکاران (۲۳) دامنه تغییراتی برابر با ۰/۱۷-۰/۰۷ تن در هکتار گزارش کردند.

با توجه به مقدار آماره MBE، دو مدل AquaCrop و WOFOST دارای خطای بیش‌برآوردی و مدل CropSyst دارای خطای کم‌برآوردی شدند. با این وجود میزان انحراف مدل CropSyst از مقادیر واقعی نسبت به دو مدل دیگر کمتر بود. نتایج بسیاری از پژوهشگران نشان داده است که مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصولات مختلف دچار خطای بیش‌برآوردی است (۱۸، ۲۱، ۲۶ و ۳۷). گرچه هر سه مدل از کارایی قابل قبولی برای تعیین عملکرد چغندر قند برخوردار بودند لیکن بر اساس نتایج به دست آمده برای آماره EF، کارایی مدل CropSyst بهتر از دو مدل دیگر بود. کارایی مدل WOFOST نیز از دو مدل دیگر پایین‌تر بود. یانگ و همکاران (۳۶) برای ذرت، سانگ و همکاران (۳۱) برای گندم، مارلتو و همکاران (۲۴) برای

کارایی مصرف آب با کاربرد مدل WOFOST به‌ترتیب برابر با ۰/۰۸ و ۰/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب و با کاربرد مدل AquaCrop به‌ترتیب برابر با ۰/۰۶ و ۰/۰۹ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. بر اساس کلیه نتایج، مدل‌های CropSyst و AquaCrop به‌دلیل ساختار آب محور بودن دقت بهتری نسبت به مدل کربن محور WOFOST داشتند.

هر سه مدل برای شبیه‌سازی عملکرد نیز در حد قابل قبولی بود و مقدار آماره EF برای مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst به‌ترتیب برابر با ۰/۶۲، ۰/۴۷ و ۰/۹۱ به‌دست آمد. دقت مدل CropSyst در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب با توجه به آماره‌های RMSE و NRMSE به‌ترتیب برابر با ۰/۰۳ و ۰/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. نتایج این آماره‌های برای

منابع مورد استفاده

1. Alishiri, R., F. Paknejad and F. Aghayari. 2014. Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop. *Bioscience* 4(4): 1-9.
2. Amiri, A., M. Kavooosi and F. Kaveh. 2009. Evaluation of crop growth models ORYZA2000, SWAP and WOFOST under different types of irrigation management, *Food Engineering Research* 10(3): 13-28. (In Farsi).
3. Andarziana, B., M. Bannayanb, P. Steduto, H. Mazraeha, M. E. Barati, M. A. Barati and A. Rahnama. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management* 100: 1-8.
4. Bellocchi, G., N. Silvestri, M. Mazzoncini and S. Menini. 2002. Using the CropSyst model in continuous rainfed maize (*Zea mays L.*) under alternative management option. *Italian Journal of Agronomy* 6:43-56.
5. 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.
6. Boogaard, H. L., C. A. Van Diepen, R. P. Rotter, J. M. C. A. Cabrera and H. H. Van Laar. 1998. WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 (No. 52). SC-DLO.
7. Bouman, B. A. M., H. Van Keulen, H. H. Van Laar and R. Rabbinge. 1996. The "School of de Wit", crop growth simulation models: pedigree and historical overview. *Agricultural System* 52: 171-198.
8. Confalonieri, R., M. Acutis, G. Bellocchi and M. Donatelli. 2009. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. *Ecological Model* 220: 1395-1410.
9. Confalonieri, R. and S. Bocchi. 2005. Evaluation of CropSyst for simulation the yield of flooded rice in northern Italy. *European Journal of Agronomy* 23:315-326.
10. Ebrahimipak, N., Pazira, A., Kaveh, F., Abedi, M. J., Sabah Farashi, M. J., 2008, Effect of irrigation during different stages of sugar beet growth on its quantitative and qualitative yield. *Research and Development* 78: 63-73. (In Farsi).
11. Eitzinger, J., M. Trnka, J. Hosch, Z. Zalud and M. Dubrovsk. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Model* 171: 223-246.
12. Farahani, H. J., G. Izzi, P. Steduto and T. Y. Oweis. 2009. Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy* 101: 469-476.
13. Farre, F. and J. M. Faci. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agriculture Water Management* 96: 384-394.
14. Garcia-Vila, M., E. Fereres, L. Mateos, F. Orgaz and P. Steduto. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy* 101: 477-487.
15. Geerts, S. and D. Raes. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management* 96: 1275-1284.
16. Geerts, S., D. Raes, M. Garcia, R. Miranda and J. A. Cusicanqui. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) with FAO-AquaCrop. *Agronomy* 101: 499-508.
17. Gerik, T. J., W. D. Rosenthal and R. R. Duncan. 1988. Simulating grain yield and plant development of ratoon grain sorghum over diverse environments. *Field Crops Research* 19(1): 63-74.
18. Heng, L. K., T. C. Hsiao, S. Evett, T. Howell and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy* 101(3): 488-498.
19. Hsiao, T. C., L. K. Heng, P. Steduto, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy* 101: 448-459.

20. Hussein, F., M. Janat and A. Yakoub. 2011. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9(4): 1319-1330.
21. Katerji, N., P. Campi and M. Mastrorilli. 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.
22. Kunz, R., R. Schulze, T. Mabhaudhi and O. Mokonoto. 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.
23. Malik, A., A. S. Shakir, M. Ajmal, M. Jamal Khan and T. Ali Kan. 2017. Canopy cover, biomass and root yield under different irrigation and field management practices in semi-arid regions of Pakistan. *Water Resource Management* 31: 4275-4292.
24. Marletto, V., F. Ventura, G. Fontana and F. Tomei. 2007. Wheat growth simulation and yield prediction with seasonal forecasts and a numerical model. *Agricultural Meteorology* 147: 71-79.
25. Moriondo, M., F. Maselli and M. Bindi. 2007. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy* 26: 266-274.
26. Mousavizadeh, S. F., T. Honar and S. H. Ahmadi. 2016. Assessment of the AquaCrop model for simulating canola under different irrigation management in a semiarid area. *International Journal of Plant Production* 10(4): 1735-6814.
27. Pakravan, M. and H. Mehrabi Boshrahadi. 2010. Estimating the eEconomic value of water in wheat production in Gorgan County. *Water Research in Agriculture* 4(6): 83-90. (In Farsi).
28. Raes, D., P. Steduto, T. C. Hsiao and E. Freres. 2012. Reference Manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
29. Saadati, Z., N. Pirmoradian, A. Amiri and M. Rezaie. 2012. Evaluation of WOFOST model in simulating the performance of two varieties of rice under different irrigation regimes. *Water Research in Agriculture* 26(3): 323-337. (In Farsi).
30. Salemi, H., M. A. Mohd Soom, T. S. Lee, S. F. Mousavi, A. Ganji and M. Kamil Yusoff. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. *Spanish Journal of Agricultural Research SJAR* 610: 2204-2215.
31. Song, Y. I., D. L. Chen and W. J. Dong. 2006. Influence of climate on winter wheat productivity in different climate regions of China. *Climate. Research* 32: 219-227.
32. Stockle, C. O. and R. L. Nelson. 1996. Cropsyst User's manual (Version 2.0). Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, USA.
33. Stricevic, R., M. Cosic, N. Djurovic, B. Pejic and L. Maksimovic. 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.
34. Todorovic, M., R. Albrizio, L. Zivotic, M. Abisaab and C. Stwckle. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy* 101: 509-521.
35. Van Dam, J. C., J. Huygen, J. G. Wesseling, R. A. Feddes, P. Kabat, P. E. V. Van Walsum, P. Groenendijk and C. A. Van Diepen. 1997. Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department Water Resources. Wageningen Agricultural University.
36. Yang, H. S., A. Dobermann, J. L. Lindquist, D. T. Wolters, T. J. Arkebauer and K. G. Cassman. 2004. Hybrid-maize—A maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research* 87: 131-154.
37. Zeleke, K., D. Lockett and R. Cowley. 2011. Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agronomy* 103: 1610-1618.
38. Ziaie, GH., H. Babazadeh, H. Abbasi and F. Kaveh. 2014. Evaluation of the AquaCrop and CERES-Maize models in assessment of soil water balance and maize yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 45(4): 435-445. (In Farsi).

Assessment of AquaCrop, WOFOST and CropSyst models for Estimating Sugar Beet Yield under Water Deficit Conditions

N. A. Ebrahimipak^{1*} and A. Egdernezhad²

(Received: December 17-2017 ; Accepted: May 5-2018)

Abstract

Sugar beet is one of the most important agricultural crops and its yield depends on irrigation water. Due to the impossibility of assessing the effect of all water amount strategies on sugar beet yield, it is necessary to use crop models such as WOFOST, AquaCrop and Cropsyst. In order to achieve this goal, a set of data collected from Shahrekord's Agricultural Research Station were used. Treatments consisted of irrigation water amount (in five levels: E0: 100%, E1: 85%, E2: 70%, E3: 55%, and E4: 30%) based on crop evapotranspiration in different growth stages (T1: initial, T2: T2: mid-season, and T3: late season). The values of RMSE statistical criteria for the results of AquaCrop, WOFOST and CropSyst simulation were equal to 0.57, 0.68, and 0.26 ton.ha⁻¹, respectively. NRMSE results were also obtained to be 0.11, 0.13, and 0.05 ton.ha⁻¹ for the mentioned crop models, respectively. The results of the EF criteria revealed that CropSyst (0.91) had better efficiency, as compared to AquaCrop (0.62) and WOFOST (0.47). Regarding the results, it is suggested to use CropSyst to simulate sugar beet yield in similar conditions.

Keywords: Cropping Model, Radiation-Driven Model, Water-Driven Model

1. Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

2. Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: nebrahimipak@yahoo.com