

Evaluation of AquaCrop and WOFOST for Simulation of Sugar Beet Yield and Water Productivity under Different Irrigation Intervals and Fertilizer Stress

HASSAN SAYYAH¹, ASLAN EGDERNEZHAD^{1*}, NIAZ ALI EBRAHIMIPAK²

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

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

(Received: Apr. 22, 2020- Revised: July. 14, 2020- Accepted: July. 29, 2020)

ABSTRACT

Irrigation interval and fertilizer amount have an important effect on sugar beet yield. This study was conducted to evaluate AquaCrop and WOFOST models in terms of simulation of sugar beet yield and water productivity at Qazvin agricultural research station during three years. For this purpose, two treatments were considered; irrigation water management in four levels (6, 9, 12; and 15 days) and Boron fertilizer amount in three levels (21, 30 and 39 kg ha⁻¹; as low, medium and proper amounts, respectively). RMSE values for yield simulated by WOFOST and AquaCrop models were 0.29 and 1.07 ton.ha⁻¹, respectively. RMSE values for water productivity simulated by the proposed methods were 0.61 and 0.14 kg.m⁻³, respectively. RMSE values for yield simulated by WOFOST and AquaCrop for irrigation treatments were in the range of 2.78-3.50 and 1.91-2.26 ton.ha⁻¹, respectively, and for fertilizer treatments were in the range of 2.34-4.51 and 1.14-2.94 26 ton.ha⁻¹, respectively. The amount of error for water productivity simulated by WOFOST and AquaCrop models for irrigation treatments were in the range of 0.34-0.48 and 0.16-0.38 kg.m⁻³, respectively, and for fertilizer were in the range of 0.30-0.56 and 0.15-0.41 kg.m⁻³, respectively. Thus, AquaCrop model had better accuracy compared to WOFOST model for separated treatments. In general, WOFOST accuracy was good. According to the results, it is recommended by caution to use WOFOST model to simulate sugar beet in the simulation of irrigation treatments with fertilizer.

Keywords: Water Productivity, Fertilizer Stress, Crop Modeling.

ارزیابی مدل‌های گیاهی AquaCrop و WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب چغندر قند تحت دوره‌های مختلف آبیاری و تنش کودی

حسن سیاحی^۱، اصلان اگدرنژاد^{۱*}، نیاز علی ابراهیمی پاک^۲

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

۲. بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۲/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۴/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۵/۸)

چکیده

دور آبیاری و مقدار کود مصرفی از جمله عوامل مهمی هستند که اثر زیادی بر عملکرد چغندر قند دارند. این تحقیق به منظور ارزیابی دو مدل WOFOST و AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب چغندر قند در ایستگاه تحقیقاتی فیض آباد شهرستان قزوین در سه سال زراعی انجام شد. بدین منظور، مدیریت آبیاری در چهار دور (۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ روز) و سطوح کود بر در سه سطح (۲۱، ۳۰ و ۳۹ کیلوگرم در هکتار) به ترتیب نشان دهنده سطوح کم، متوسط و مناسب) به کار برده شدند. نتایج آماره RMSE به منظور ارزیابی نتایج عملکرد مدل گیاهی WOFOST و AquaCrop نسبت به داده‌های واقعی به ترتیب برابر با ۰/۲۹ و ۱/۰۷ تن در هکتار بود. نتایج آماره RMSE برای بهره‌وری آب توسط دو مدل WOFOST و AquaCrop به ترتیب برابر با ۰/۶۱ و ۰/۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب بود. خطای شبیه‌سازی عملکرد توسط مدل‌های WOFOST و AquaCrop برای تیمارهای آبیاری به ترتیب بین ۲/۸۷-۳/۵۰ و ۱/۹۱-۲/۲۶ تن بر هکتار و برای تیمارهای کودی به ترتیب بین ۲/۳۴-۴/۵۱ و ۱/۱۴-۲/۹۴ تن در هکتار متغیر بود. خطای این دو مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب برای تیمارهای آبیاری به ترتیب بین ۰/۳۴-۰/۴۸ و ۰/۱۶-۰/۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب و برای تیمارهای کودی بین ۰/۵۶-۰/۳۰ و ۰/۱۵-۰/۴۱ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. بنابراین در شرایط تفکیک تیمارهای آبیاری، مدل AquaCrop دقت بهتری نسبت به WOFOST داشت. در حالت کلی دقت مدل WOFOST خوب بود، لیکن براساس نتایج به دست آمده، با احتیاط پیشنهاد می‌شود از مدل WOFOST برای شبیه‌سازی چغندر قند در شرایط شبیه‌سازی تیمارهای آبیاری به همراه کود مصرفی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: تنش کودی، بهره‌وری آب، مدل‌سازی گیاهی.

مقدمه

گیاه سبب بهبود اثرات تنش می‌گردد. به خصوص کود ریزمغذی مانند بر که بر عملکرد و رشد این گیاه زراعی بسیار مؤثر است. این کار علاوه بر کاهش مصرف آب در زراعت چغندر، سبب افزایش بهره‌وری آب نیز می‌شود (Blum 2009; Farre and Faci 2009; Geerts et al., 2009). در روش‌های کم‌آبیاری چغندر قند، اعمال دوره‌های مختلف آبیاری برای کشاورزان بسیار ملموس‌تر است و به راحتی در مزارع قابل اجرا است. براساس سند ملی تحقیقات راهبردی چغندر قند (Sadegh Zadeh Hemayati et al., 2010)، بسیاری از کشاورزان با کاربرد کودهای اصلی (N-P-K)، آشنایی دارند ولی اثر ریزمغذی‌هایی مانند بر کمتر مورد توجه آن‌ها قرار می‌گیرد. ارزیابی اثرات این ریزمغذی به همراه کم‌آبیاری در سطح مزارع چغندر قند کشور نیازمند صرف زمان زیادی است که هزینه‌های بسیاری نیز در پی خواهد داشت. گرچه اجرای پایلوت‌های مرتبط با این موضوع ضروری به

کمبود منابع آب و عدم توجه به نیاز کودی در زراعت بسیاری از محصولات کشاورزی در کشور ما سبب شده است که عملکرد بسیاری از گیاهان زراعی پایین‌تر از میانگین جهانی شود (FAO, 2013). به عنوان مثال عملکرد چغندر قند، به عنوان یکی از گیاهان با نیاز آبی بالا، تقریباً نصف میانگین عملکرد جهانی است (FAO, 2013). این در حالی است که این گیاه زراعی کاربرد بسیاری در صنعت و تأمین نیاز غذایی دارد (Mousavi 2008; Ebrahimipak and Tafteh 2017). با این وجود نیاز آبی بالای این گیاه سبب شده است تا نظرات متناقضی در خصوص ادامه کشت آن مطرح شود.

اعمال روش‌های کم‌آبیاری به همراه تغذیه مناسب در مزارع تحت کشت چغندر قند امری ضروری است (Ziaii et al. 2015; Ebrahimipak and Tafteh, 2017). کاربرد کود در کم‌آبیاری این

(Farahani et al. 2009; Garcia-Villa et al. 2009)، آفتابگردان (Todorovic et al. 2009) و کینوا (Geerts et al. 2009) اشاره کرد. این مدل در ابتدا تنها قادر به شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری بر روی گیاهان بود لیکن در سال‌های اخیر قابلیت شبیه‌سازی تنش کودی نیز به این مدل افزوده شده است. این مدل با استفاده از یک الگوریتم خودکار قادر به شبیه‌سازی تنش کودی پس از واسنجی مدل است (Van Gaelen et al. 2014). محققان مختلف از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی چغندر قند استفاده کردند و نشان دادند که دقت این مدل برای شبیه‌سازی این گیاه زراعی قابل قبول است (Stricevic et al., 2011; Kunz et al., 2014; Malik et al., 2017).

بر اساس پیشینه تحقیق، دو مدل WOFOST و AquaCrop قابلیت خوبی برای شبیه‌سازی چغندر قند دارند لیکن در شرایط همزمان تنش کودی و دوره‌های مختلف آبیاری مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند. از طرف دیگر، تاکنون دقت این دو مدل گیاهی برای شبیه‌سازی چغندر قند با یکدیگر مقایسه نشده است. بنابراین نوآوری تحقیق شامل ارزیابی همزمان این دو مدل در شرایط همزمان تنش کودی و دور آبیاری است. هدف این تحقیق تعیین دقت دو مدل WOFOST و AquaCrop و معرفی مدل برتر برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند برای مدیران و کارشناسان کشاورزی است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های برداشت شده از موسسه تحقیقات آب و خاک واقع در ایستگاه تحقیقاتی فیض آباد قزوین واقع در عرض جغرافیایی ۸° ۳۶' شمالی و طول جغرافیایی ۵۰° ۵۰' شرقی و ارتفاع ۱۲۴۰ متر از سطح دریا در طی سه سال زراعی (Y1 سال اول؛ Y2: سال دوم و Y3: سال سوم) انجام شد (Ebrahimipak et al., 2010). پیش از آزمایش و در اوایل اردیبهشت، نمونه‌برداری خاک از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌های منتقل شده به آزمایشگاه بعد از خشک کردن و خرد کردن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و سپس توزیع اندازه ذرات با استفاده از روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از رینگ‌های فلزی به قطر شش و ارتفاع چهار سانتی‌متر و جرم مخصوص حقیقی با استفاده از پیکنومتر انجام شد (Ebrahimipak and Mostashari, 2012). برای تعیین آب قابل استفاده، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم به ترتیب در مکش ۰/۳ و ۱۵ بار توسط دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری گردید. هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع به وسیله دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی و pH

نظر می‌رسد ولی شرایط حاکم بر مراکز تحقیقاتی کشور اجازه اجرای این کار را نمی‌دهد. بنابراین نیاز است از روش‌های غیرمستقیم برای بررسی اثرات عوامل مذکور بر عملکرد این گیاه زراعی استفاده کرد (Egdernezhad et al., 2019). برای نیل به این هدف، مدل‌های گیاهی مختلفی در جهان بسط داده شده است (Shahidi and Ahmadee, 2014; Geerts et al. 2009). این مدل‌ها از دهه شصت میلادی ارائه شدند (Alishiri et al., 2014) و به مرور مورد توجه محققان قرار گرفتند. گرچه مدل‌های اولیه قابلیت کمتری نسبت به مدل‌های فعلی داشتند؛ لیکن در حال حاضر این مدل‌ها توانایی‌های قابل ملاحظه‌ای دارند.

مدل WOFOST یکی از مدل‌های گیاهی است (Boogaard et al., 1998) که توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته است. مدل WOFOST از جمله مدل‌های کربن-محور است که توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی با همکاری دانشگاه واگنینگن هلند و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک تولید شد (Bouman et al. 1996). این مدل پایه بسیاری از مدل‌های گیاهی از جمله SWAP محسوب می‌شود (Van Dam et al. 1997) و به منظور شبیه‌سازی واکنش گیاهان مختلف زراعی از جمله چغندر قند بسط داده شده است (Sanjani et al., 2012). مدل WOFOST توانایی شبیه‌سازی گیاهان زراعی تحت شرایط مختلف آبیاری و تنش کودی را دارد. به همین دلیل بسیاری از محققان از این مدل برای تحقیقات خود استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال می‌توان به مطالعات انجام شده روی گیاهان گندم، جو، ذرت و برنج اشاره کرد (Eitzinger et al., 2017; Yang et al., 2004; Canfaloni and Cocchi, 2008; Marleto et al., 2007; Song et al., 2006). در تحقیقات مشابه، برخی محققان با استفاده از مدل WOFOST به شبیه‌سازی عملکرد کلزا پرداختند و نشان دادند که این مدل دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد این گیاه زراعی دارد (Gilardia et al., 2016; Ebrahimipak et al., 2019). در تحقیقی که با استفاده از مدل WOFOST روی چغندر قند انجام شد؛ مقدار آماره RMSE و NRMSE برای این مدل به ترتیب برابر با ۰/۶۸ تن در هکتار و ۰/۱۳ به دست آمد (Ebrahimipak and Egdernezhad, 2019).

مدل AquaCrop نیز یکی دیگر از مدل‌های گیاهی است که به دلیل قابلیت‌هایی از جمله نیاز به داده‌های کم، کاربرپسند بودن و دقت بالا در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان بوده است (Heng et al. 2009; Todorovic et al. 2009; Raes et al. 2012). از جمله گیاهان زراعی که با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شده‌اند می‌توان به زعفران (Ebrahimipak et al., 2018)، ذرت (Heng et al. 2009; Hsiao et al. 2009)، پنبه

رطوبت قبل از آبیاری بر حسب درصد وزنی، D عمق لایه خاک بر حسب میلی‌متر، ρ_b جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و n تعداد لایه‌های خاک است (Ebrahimipak and Mostashari, 2012 and 2013). پس از محاسبه dn ، میزان آب آبیاری توسط کنترلر با دقت بالا اندازه‌گیری شد. با توجه به مسدود بودن انتهای هر کرت، آب مورد نیاز کرت آزمایشی به وسیله لوله پلی‌اتیلن در ابتدای هر کرت بین ردیف‌های کاشت تقسیم شد تا به طور یکنواخت در اختیار گیاه قرار گیرد (Ebrahimipak et al., 2008). میزان آب آبیاری برای هر تیمار در شکل (۱) نشان داده شده است. در انتهای فصل زراعی، با حذف اثر حاشیه‌ای، برداشت از هر کرت انجام شد. برای سنجش عملکرد هر تیمار، ابتدا هر نمونه با استفاده از ترازو سنجیده شد تا وزن تر آن تعیین شود. سپس نمونه‌های برداشت شده در آون با دمای 60°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند (Ebrahimipak and Mostashari, 2012) تا وزن خشک آن‌ها سنجیده شود. بهره‌وری آب نیز با استفاده از رابطه (۲) تعیین شد:

$$WUE = \frac{Y}{W} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در این رابطه، WUE بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y عملکرد چغندر قند (کیلوگرم) و W مقدار آب مصرفی (مترمکعب) است.

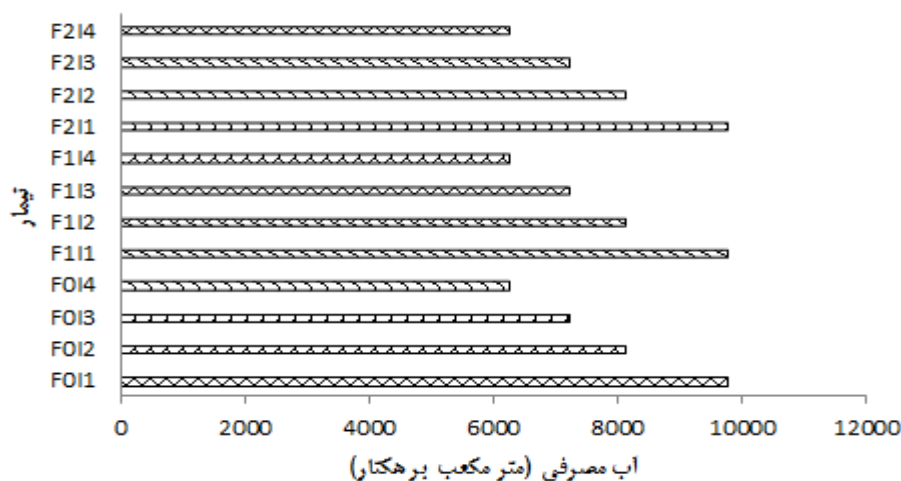
در حالت گل اشباع توسط دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد. نتایج آنالیز خاک در جدول (۱) نشان داده شده است. سپس آماده‌سازی زمین انجام شد. بدین منظور کرت‌هایی با ابعاد 10×10 متر مربع ($4 \times 5/2$) تهیه شد. براساس آنالیز خاک، 225 کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم، 345 کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل قبل از کاشت مورد استفاده قرار گرفت. همچنین 155 کیلوگرم در هکتار ازت خالص برای این آزمایش در نظر گرفته شد که نیمی از آن هنگام کاشت و مقدار باقیمانده در زمان شش تا هشت برگی شدن و بعد از تنک کردن مورد استفاده قرار گرفت. سپس کود بر از منبع اسید بوریک در سه سطح ($F0: 21$ ، $F1: 30$ و $F2: 39$ کیلوگرم در هکتار؛ به ترتیب نشان دهنده سطوح کم، متوسط و مناسب) در نظر گرفته شد. بذر منوژرم تکنیکی رقم 7232 با تراکم 95 هزار بوته در هکتار در عمق 5 تا 8 سانتی‌متری عمق خاک به کار برده شد. با توجه به مقادیر مختلف دور آبیاری در مزارع چغندر قند در کشور، چهار دور آبیاری $I1: 6$ ، $I2: 13.9$ ، $I3: 12$ و $I4: 15$ روز نیز در این آزمایش در نظر گرفته شد (Ebrahimipak and Mostashari, 2012; Ebrahimipak and Taftah, 2017). میزان آب آبیاری با سنجش رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم تعیین شد (رابطه ۱).

$$dn = \sum_{i=1}^n (FC - a_i) \times D \times \rho_b \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در این رابطه، dn مقدار آب مورد نیاز گیاه بر حسب میلی‌متر، FC ظرفیت زراعی مزرعه بر حسب درصد وزنی، a

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

عمق	پتاسیم	فسفر	ازت کل	کربن آلی	درصد اشباع	EC	pH	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی دائم	جرم مخصوص ظاهری	بافت خاک
cm	ppm	درصد	درصد	-	dS.m^{-1}	-	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	g.cm^{-3}			
۰-۳۰	۳۸۴	۸/۱۵	۷۰	۰/۵۵	۴۵	۰/۳۵	۸/۰۷	۰/۲۹	۰/۱۶	۱/۳۴	سیلتی‌رسی
۳۰-۶۰	۲۹۲	۷/۷	۷۲	۰/۴۸	۵۲	۰/۳۲	۸/۰۷	۰/۴۲	۰/۲۳	۱/۷۸	لومی‌شنی



شکل ۱- میزان آب مصرفی برای هر کدام از تیمارهای مورد مطالعه

در این رابطه، CC0 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 (۸) برآورد می‌گردد:

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی (میلی‌متر)، WP بهره‌وری آب (گرم بر متر مربع)، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر) و B عملکرد بیوماس خشک (تن در هکتار) است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از ماده‌ی خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$Y = B \times HI \quad (\text{رابطه ۹})$$

در این رابطه، Y عملکرد (تن در هکتار)، HI شاخص برداشت (-) و B بیوماس خشک (تن در هکتار) است.

تحلیل حساسیت براساس بسط دهندگان این دو مدل مورد استفاده انجام شد (Boogaard et al. 1998; Geerts et al. 2009). براساس نظر این محققان، پیش از واسنجی نیاز است حتماً تحلیل حساسیت انجام شود. تحلیل حساسیت به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا بتوانند نظر بهتری در خصوص واسنجی پارامترهای مورد نظر داشته باشند. مدل‌های مورد استفاده با استفاده از رابطه (۱۰) مورد تحلیل حساسیت قرار گرفتند (Geerts et al. 2009):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، Pm مقدار برآورد شده عامل مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و Pb مقدار برآورد عامل مورد 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 بالا، $2 < Sc < 15$ حساسیت متوسط، $Sc < 2$ حساسیت پایین اندازه‌گیری شد (Geerts et al. 2009). برای پارامترهایی که حساسیت متوسط و زیاد داشتند، واسنجی انجام شد. برای پارامترهایی که حساسیت مدل به آن‌ها کم بود ($Sc < 2$) واسنجی انجام نشد زیرا اثری روی خروجی مدل نداشتند و مقادیر پیش‌فرض برای آن‌ها در نظر گرفته شد.

برای واسنجی مدل‌های AquaCrop و WOFOST، داده‌های دو سال زراعی اول و دوم مورد استفاده قرار گرفتند. سپس صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های زراعی سال سوم انجام شد. به منظور مقایسه بهتر مقادیر عملکرد هر دو مدل گیاهی

مدل WOFOST یک مدل شبیه‌ساز رشد گیاه بر مبنای چرخه کربن و دارای ساختار پیچیده است. این مدل، رشد گیاه را در سه وضعیت عدم وجود عامل محدود کننده، محدودیت آب و محدودیت مواد غذایی شبیه‌سازی می‌کند. در مدل WOFOST رشد محصولات براساس فرآیندهای اکوفیزیولوژیکی شبیه‌سازی می‌شود. فرآیندهای اصلی شامل توسعه فنولوژیکی، جذب دی‌اکسید کربن، تعرق، تنفس، تجزیه و توزیع میزان ماده خشک بین اندام‌های مختلف براساس مرحله نمو صورت می‌گیرد. رشد در حالت پتانسیل و محدودیت آبی به صورت دینامیکی با گام زمانی یک روزه شبیه‌سازی می‌شود (Boogaard et al., 1998). مدل WOFOST میزان رشد محصولات را با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آورد:

$$\Delta W = C_e \times (A - R_m) \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این رابطه، ΔW میزان رشد (کیلوگرم بر هکتار بر روز)، A میزان ناخالص جذب (کیلوگرم بر هکتار بر روز)، R_m میزان تعرق نگهداری (کیلوگرم بر هکتار بر روز) و C_e راندمان تبدیل جذب به زیست‌توده (-) است. این مدل از معادله ساده‌شده در رابطه (۴) برای تعیین میزان جذب و رشد گیاه در شرایط کم‌آبیاری استفاده می‌کند:

$$A = \frac{T_a}{T_p} \times A_p \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه، A جذب واقعی (کیلوگرم بر هکتار بر روز)، A_p جذب پتانسیل (کیلوگرم بر هکتار بر روز)، T_a تعرق واقعی (میلی‌متر بر روز) و T_p تعرق پتانسیل (میلی‌متر بر روز) است. به منظور شبیه‌سازی اثر دور آبیاری و کود مصرفی از مدل AquaCrop استفاده شد. این مدل از تبخیر-تعرق (ET) محاسبه شده (رابطه ۵) با فرض تفکیک آن استفاده می‌کند. تفکیک این مولفه به دو جزء تبخیر (E) و تعرق (Tr) سبب می‌شود تا مصرف غیر تولیدی آب از معادلات حذف شود (رابطه ۶).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$Tr = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این روابط، Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول (تن در هکتار)، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه (میلی‌متر)، و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق (-)، که در آن، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که توسط رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t}$$

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 شود نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها است (Ahmadede et al., 2015).

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت تغییرات پارامترهای مختلف بر خروجی مدل‌های مورد استفاده پیش از واسنجی انجام شد و نتایج آن نشان داد که تغییرات اکثر پارامترها بر شبیه‌سازی این دو مدل حساسیت متوسط داشت. برخی از نتایج این مرحله در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به اینکه اکثر پارامترهای ورودی این مدل حساسیت کمتر از ۲ نداشتند؛ اکثر پارامترهای ورودی این مدل‌ها مورد واسنجی قرار گرفتند. البته پارامترها به سه دسته تقسیم شدند. برخی پارامترها در مزرعه اندازه‌گیری شد. برخی پارامترها نیز به نوع گیاه وابسته بود و به صورت پیش‌فرض در نظر گرفته شد. سایر پارامترها مطابق جدول (۳) واسنجی شدند. این پارامترها به منظور نزدیک شدن عملکرد به مقادیر به دست آمده آن واسنجی شدند. این پارامترها اینقدر تغییر داده شدند تا آماره‌های نشان داده شده در روابط (۹) تا (۱۴) به مقادیر قابل قبولی برسند و پارامتر عملکرد به مقدار واقعی نزدیک شود.

نتایج صحت‌سنجی عملکرد چغندر قند در شکل (۲) نشان داده شده است. براساس این نتایج، حداقل و حداکثر اختلاف بین مقادیر عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST به ترتیب برابر با ۱/۹ و ۱۰/۰ درصد بود. این مقادیر به ترتیب در تیمارهای FII3 و FII4 مشاهده شدند. متوسط اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای همه تیمارها نیز برابر با ۰/۰۶ درصد بود که نسبتاً مقدار قابل توجهی است. با تفکیک تیمارهای مورد بررسی به دور آبیاری، متوسط اختلاف عملکرد بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST برای تیمارهای II تا I4 محاسبه شد. مقادیر متناظر این تیمارها به ترتیب برابر با ۴/۰۴، ۴/۷۱، ۳/۳۹ و ۴/۸۹ تن بر هکتار بود. براساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف به ترتیب در تیمارهای I4 و II به دست آمد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در دوره‌های آبیاری بالا، خطای شبیه‌سازی عملکرد توسط این مدل گیاهی افزایش یافت ولی روند منظمی در این خصوص مشاهده نشد. علت این را می‌توان به ماهیت مدل WOFOST نسبت داد. زیرا این مدل کربن-محور است و به تغییرات دور آبیاری واکنش منظمی نشان نمی‌دهد. با این وجود افزایش مقدار دور آبیاری به بالاترین سطح، سبب ایجاد خطا در شبیه‌سازی این مدل شد. این نتایج توسط سایر محققان نیز گزار شده است

مورد استفاده، نتایج شبیه‌سازی عملکرد آن‌ها در مرحله صحت‌سنجی به وزن تر تبدیل شد. بنابراین، عملکرد نشان داده شده در بخش نتایج شامل مقادیر وزن تر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. برای تعیین دقت مدل‌های گیاهی مورد استفاده، آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) مورد استفاده قرار گرفتند. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۱۱) تا (۱۶) نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{(رابطه ۱۱)}$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad \text{(رابطه ۱۲)}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad \text{(رابطه ۱۳)}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{(رابطه ۱۴)}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad \text{(رابطه ۱۵)}$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{(رابطه ۱۶)}$$

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 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 نشان دهنده دقت عالی مدل‌های مورد استفاده است. هم چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۳، ۰/۱-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان دهنده 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

بین دو تیمار F1 و F2 زیاد نبود؛ لیکن تیمار F1 بیشترین مقدار خطا (اختلاف بین عملکرد شبیه‌سازی شده و مقدار واقعی) را نسبت به دو تیمار کودی داشت.

(Ebrahimipak and Egdernezhad, 2019). متوسط اختلاف بین مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی با تفکیک تیمارها به مقادیر کود مصرفی به ترتیب برابر با ۳/۷۶، ۴/۶۰ و ۴/۴۰ تن بر هکتار برای تیمارهای F0، F1 و F2 به دست آمد. گرچه اختلاف

جدول ۲- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل‌های رشد گیاهی WOFOST و AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند

پارامتر	مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
WOFOST			
ضریب خاموشی نور جذب شده	۴/۲	۶/۳	متوسط
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۲/۵	۵/۹	متوسط
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۳/۲	۲/۶	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۴/۷	۲/۰	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ریشه	۲/۵	۵/۶	متوسط
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۳/۱	۳/۸	متوسط
سطح ویژه برگ به عنوان تابعی از مرحله رشد	۱۱/۲	۹/۶	متوسط
AquaCrop			
ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۴	۱/۱	کم
عمق مؤثر ریشه	۷/۷	۲/۵	متوسط
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۲/۱	۴/۶	متوسط
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۴/۷	۳/۹	متوسط
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۶/۸	۱/۴	متوسط
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۳/۳	۱/۷	متوسط-کم
حد آستانه بالای دما	۲/۹	۵/۵	متوسط
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۴/۲	۱۲/۴	متوسط
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۸/۳	۴/۹	متوسط
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۹/۱	۹/۶	متوسط
ضریب رشد پوشش	۵/۴	۳/۳	متوسط
ضریب کاهش پوشش	۳/۷	۷/۶	متوسط
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۹/۲	۱۴/۵	متوسط
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۱۲/۳	۱۰/۶	متوسط
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۱۳/۹	۸/۴	متوسط

جدول ۳- مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل‌های AquaCrop و WOFOST

توضیح عامل	مقدار	واحد	توضیح
WOFOST			
حد آستانه پایین دما برای جوانه‌زنی	۳	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
حد آستانه بالای دما برای جوانه‌زنی	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
مجموع دمای مورد نیاز از کاشت تا جوانه‌زنی	۹۰	درجه سانتی‌گراد روز	پیش فرض
شاخص سطح برگ در جوانه‌زنی	۰/۰۰۰۹	هکتار بر هکتار	واسنجی
بیشترین مقدار افزایش در شاخص سطح برگ	۰/۰۱۵۰	هکتار بر هکتار بر روز	واسنجی
ضریب خاموشی نور جذب شده	۰-۰، ۰-۶۰	-	واسنجی
کارایی مصرف نور برای یک برگ	۰-۰، ۰-۴۵	کیلوگرم بر هکتار ساعت ژول مربع	واسنجی
کارایی تبدیل ماده جذب شده به برگ	۰/۷۰	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ارگان ذخیره‌ای	۰/۸۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ریشه	۰/۷۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
کارایی ماده جذب شده به ساقه	۰/۶۵	کیلوگرم بر کیلوگرم	واسنجی
سرعت جذب دی‌اکسید کربن در برگ	۰-۰، ۰-۶۰	کیلوگرم بر هکتار ساعت	واسنجی
فاکتور تصحیح میزان تعرق	۱/۰	-	واسنجی
مقدار ریشه در ابتدای رشد	۱۰	سانتی‌متر	پیش فرض
افزایش روزانه ریشه	۱/۲	سانتی‌متر بر روز	پیش فرض
بیشینه رشد ریشه	۱۲۰	سانتی‌متر	پیش فرض

ادامه جدول ۳- مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل‌های AquaCrop و WOFOST

AquaCrop	
دمای پایه	۵
درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۳۰
تراکم کشت	۹۵۰۰۰
ضریب رشد کانوبی	۱۳/۶
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۵
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۶
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی	۷۰
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۱۴۵
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۱۳
عمق مؤثر ریشه	۱/۴
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۶/۵
پوشش گیاهی اولیه	۰/۱
بیشینه رشد کانوبی	۹۸
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۲۰
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۶۵
ضریب رشد پوشش	۱۳/۰
ضریب کاهش پوشش	۵/۵
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۱
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۰/۵
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۰/۷
ضریب کاهش توسعه پوشش*	۵۰
ضریب حداکثر پوشش*	۲۴
ضریب متوسط کاهش*	۰/۳
ضریب درصد کاهش بهره‌وری آب نرمال شده*	۲۰

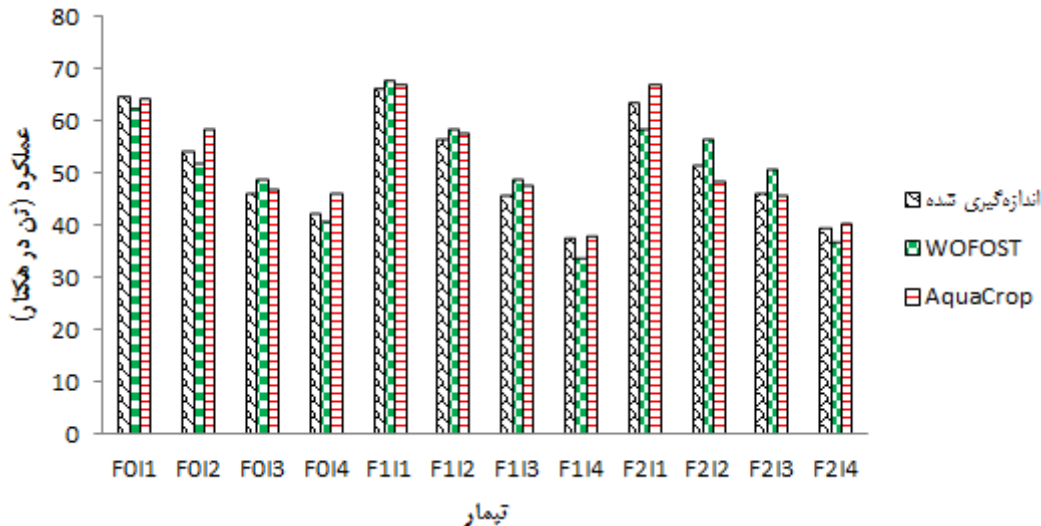
I2 داشت. این نتایج نشان داد که روند منظمی بین نتایج به دست آمده در تیمارهای مختلف وجود نداشت و علت آن نیز به اختلافات بین مقادیر مشاهداتی در سال‌های قبل بر می‌گردد. با این وجود افزایش تنش سبب افزایش اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی شد و این مدل در خصوص تنش آبی به خوبی عمل نکرده است. این نتایج به دلیل آب-محور بودن این مدل است. بسیاری از محققان از جمله Heng *et al.* (2009) و Andarzian *et al.* (2011) نیز نشان داده است که این مدل در شرایط تنش شدید دچار خطای بیشتری می‌شود.

نتایج بهره‌وری آب چغندر قند با استفاده از دو مدل مورد استفاده در شکل (۳) نشان داده شده است. براساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل WOFOST برای این پارامتر به ترتیب برابر با ۱/۰ و ۱۵/۲ درصد بود. این مقادیر به ترتیب برای تیمارهای F2I2 و F1I1 به دست آمد. متوسط اختلاف مقادیر این پارامتر برابر با ۷/۷ درصد بود. براساس این نتایج، خطای بهره‌وری آب در حد قابل قبولی بود. با تفکیک نتایج براساس تیمارهای دور آبیاری، متوسط اختلاف برای تیمارهای I1، I2، I3 و I4 به ترتیب برابر با ۰/۳۷، ۰/۶۲، ۰/۳۶ و ۰/۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود. تفکیک نتایج

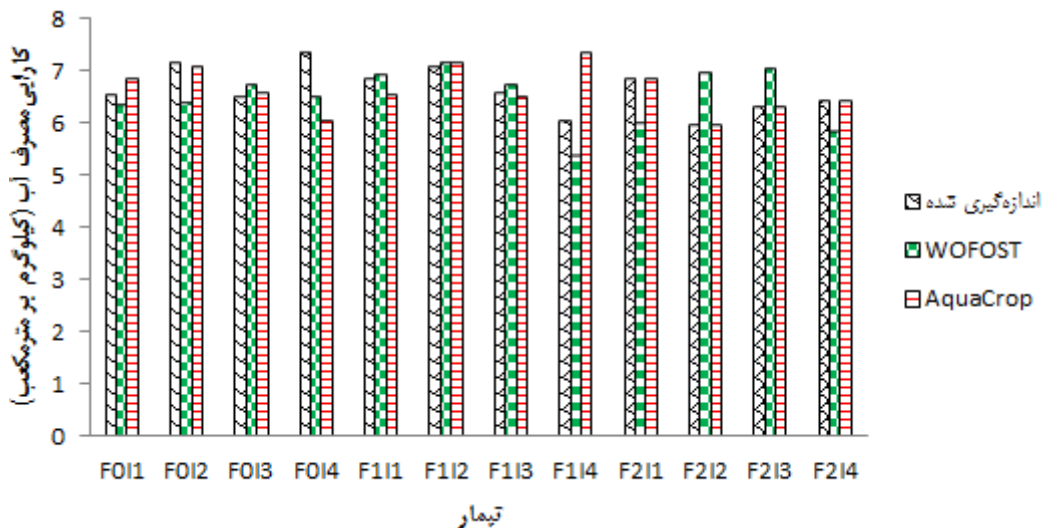
اختلاف عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop بسیار متفاوت بود به طوری که در تیمار F0I4 حداقل اختلاف (۰/۹ درصد) و در تیمار F2I2 حداکثر اختلاف (۱۷/۰ درصد) مشاهده شد. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در این مدل نیز برابر با ۵/۴ درصد بود. مقایسه نتایج دو مدل AquaCrop و WOFOST نشان داد که دقت مدل WOFOST بهتر بود و متوسط خطای این مدل به میزان ۴/۸ درصد از AquaCrop بهتر بود. گرچه خطای مدل AquaCrop نیز قابل چشم‌پوشی است و سایر محققان میزان خطای این مدل برای چغندر قند را تا ۱۸ درصد قابل قبول گزارش کردند (Stricevic *et al.*, 2011; Alishiri *et al.*, 2014). براساس این نتایج، در تیمار کودی F1 اختلاف بیشتری نسبت به دو تیمار F2 و F0 مشاهده شد به طوری که اختلاف عملکرد تیمار F1 نسبت به دو تیمار F0 و F2 به ترتیب ۰/۱۴ و ۳/۱ درصد بیشتر بود. متوسط اختلاف عملکرد چغندر قند بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای هر کدام از تیمارهای آبیاری نیز نشان داد که افزایش دور آبیاری سبب کاهش اختلاف عملکرد شد. بیشترین اختلاف عملکرد در تیمار I2 و کمترین عملکرد نیز برای تیمار و کمترین اختلاف در تیمار I3 مشاهده شد. تیمار I4 نیز مقدار مشابه تیمار

دست آمد. متوسط اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بهره‌وری آب برای تیمارهای آبیاری I1، I2، I3 و I4 به ترتیب برابر با ۰/۱۵، ۰/۳۵، ۰/۱۴ و ۰/۲۶ کیلوگرم بر متر مکعب بود. این مقادیر برای تیمارهای کودی F0، F1 و F2 به ترتیب برابر با ۰/۱۳، ۰/۳۳ و ۰/۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد.

براساس تیمارهای کودی F1، F2 و F3 نیز منجر به تعیین این اختلاف به صورت ۰/۵۳، ۰/۲۳ و ۰/۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب شد. نتایج مشابه برای مدل AquaCrop نشان داد که بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برابر با ۹/۸ و ۲/۱ درصد بود. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop نیز برابر با ۶/۰ درصد به



شکل ۲- نتایج عملکرد مشاهداتی چغندر نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop و WOFOST



شکل ۳- نتایج بهره‌وری آب مشاهداتی چغندر نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل‌های AquaCrop و WOFOST

عالی بودند. براساس آماره RMSE، دقت مدل WOFOST بهتر از AquaCrop بود. براساس این نتایج، مدل WOFOST به طور متوسط دچار خطایی برابر با ۰/۲۹ تن در هکتار شد. در حالی که مدل AquaCrop به طور متوسط دچار خطایی برابر با ۰/۲۴ تن در هکتار شد. برخی محققان مقدار این آماره را برای مدل WOFOST بیشتر از نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر گزارش

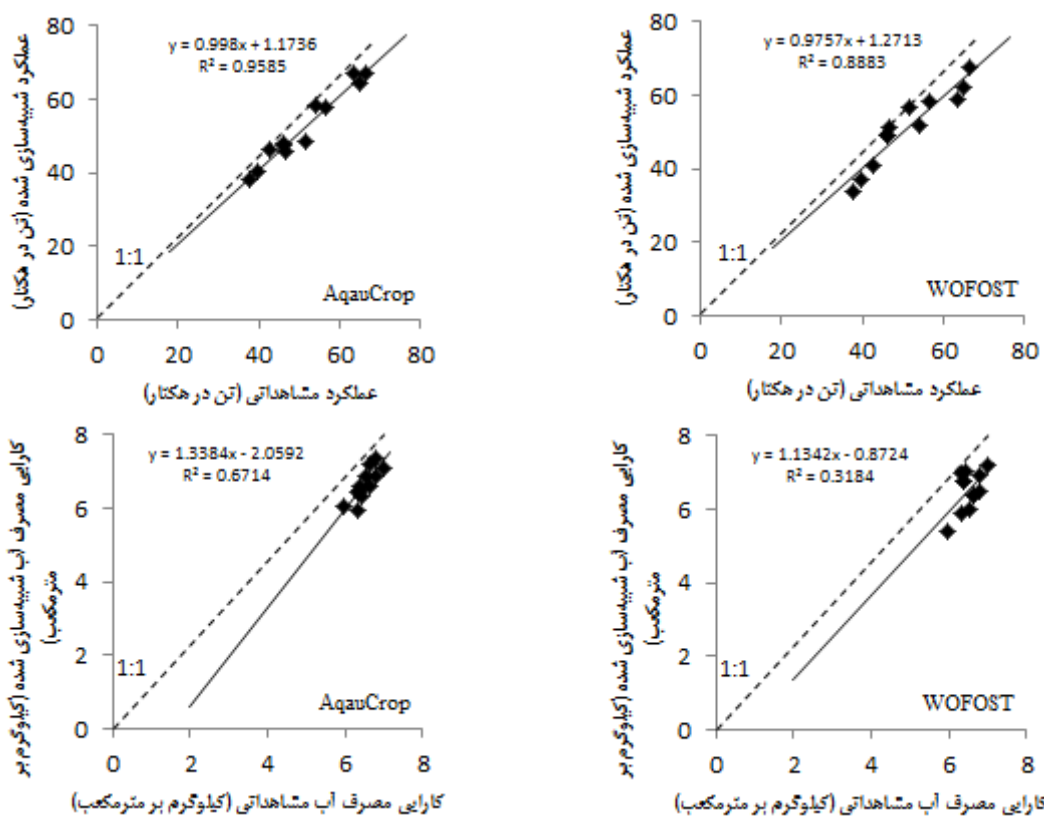
نتایج آماری به دست آمده برای هر دو مدل در جدول (۴) نشان داده شده است. براساس این نتایج، مدل WOFOST در برآورد عملکرد خطای کمتری نسبت به مدل AquaCrop داشت لیکن هر دو مدل دچار خطای بیش برآوردی شدند. این نتایج با مشاهدات سایر محققان مطابقت داشت (Malik et al., 2017). با توجه به آماره NRMSE هر دو مدل در تعیین عملکرد دارای دقت

بیش برآوردی شد. دقت مدل WOFOST در تعیین این پارامتر کمتر از مدل AquaCrop بود. چون مقدار هر دو پارامتر کمتر از ۰/۱ بود، این اختلاف قابل چشم‌پوشی است. کارایی هر دو مدل نیز برای تعیین بهره‌وری آب قابل قبول بود. مقادیر همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط دو مدل WOFOST و AquaCrop در شکل (۴) نشان داده شده است. براساس این نتایج، هر دو مدل مورد استفاده در برآورد عملکرد ضریب تبیین بالاتری نسبت به بهره‌وری آب داشتند.

کرده‌اند (Ebrahimipak and Egdernezhad, 2019). ولی اکثر محققان برای مدل AquaCrop دقت بهتری نسبت به نتایج این تحقیق گزارش کرده‌اند (Stricevic et al., 2011; Alishiri et al., 2014; Malik et al., 2017). علت این نتایج افزایش خطا در مدل AquaCrop در شرایط کاهش آب مصرفی است (Ebrahimipak and Egdernezhad, 2019). کارایی این دو مدل نیز برای تعیین عملکرد قابل قبول بود. مدل WOFOST در تعیین بهره‌وری آب دچار خطای کم‌برآوردی و مدل AquaCrop دچار خطای

جدول ۴- نتایج آماره‌های مورد استفاده برای عملکرد و بهره‌وری آب چغندر قند

پارامتر	نام مدل	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
عملکرد (تن در هکتار)	WOFOST	۰/۱۴	۰/۲۹	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹
	AquaCrop	۱/۰۷	۲/۲۴	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹
بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	WOFOST	-۰/۱۴	۰/۶۱	۰/۰۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	AquaCrop	۰/۱۴	۰/۲۹	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹



شکل ۴- همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد و بهره‌وری آب چغندر قند توسط مدل‌های AquaCrop و WOFOST

چشمگیری نداشت. براساس آماره MBE، هر دو مدل در برخی شرایط دچار خطای بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی شدند و نظم خاصی در این خصوص بین شرایط مورد نظر و مدل مورد استفاده مشاهده نشد. برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب، دقت هر دو مدل مشابه بود و در دسته عالی قرار داشت. کارایی هر دو مدل نیز مطلوب بود.

نتایج مقایسه آماری هر دو مدل مورد مطالعه به تفکیک آماره‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است. براساس آماره NRMSE، دقت هر دو مدل در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب برای تیمارهای آبیاری و کود عالی بود. این نتایج در جدول (۴) نیز قابل مشاهده است. بنابراین مقدار کود و میزان آب آبیاری بر دقت هیچکدام از این دو مدل اثر

جدول ۵- نتایج آماره‌های مورد استفاده برای عملکرد و بهره‌وری آب چغندر قند به تفکیک تیمارهای مورد استفاده

پارامتر	نام مدل	نام پارامتر	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d		
عملکرد (تن در هکتار)	WOFOST	I1	-۲/۱۲	۳/۳۹	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹		
		I2	۱/۵۶	۳/۳۸	۰/۰۶	۰/۹۹	۰/۹۹		
		I3	۳/۳۹	۳/۵۰	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۹۹		
		I4	۲/۷۴	۲/۸۷	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۹۹		
	AquaCrop	I1	۱/۰۶	۱/۹۱	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۹		
		I2	-۰/۸۷	۱/۹۴	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۹		
		I3	۰/۷۶	۱/۲۱	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۹		
		I4	۱/۶۶	۲/۲۶	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹		
	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	WOFOST	F0	۰/۹۲	۲/۳۴	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹	
			F1	-۰/۵۰	۲/۵۷	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹	
			F2	-۰/۴۸	۴/۵۲	۰/۰۸	۰/۹۹	۰/۹۹	
			F0	۲/۱۰	۲/۹۴	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹	
AquaCrop		F1	-۱/۰۰	۱/۱۴	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۹		
		F2	-۰/۱۰	۲/۲۶	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹		
		نتیجه‌گیری	WOFOST	I1	-۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹
				I2	-۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹
I3	۰/۴۶			۰/۴۸	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۹۹		
I4	۰/۴۳			۰/۴۵	۰/۰۷	۰/۹۹	۰/۹۹		
AquaCrop	I1		۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۹		
	I2		۰/۰۹	۰/۳۸	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹		
	I3		-۰/۱۰	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۹		
	I4		۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹		
نتیجه‌گیری	WOFOST	F0	-۰/۱۰	۰/۳۰	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹		
		F1	۰/۰۳	۰/۳۷	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹		
		F2	۰/۰۷	۰/۵۶	۰/۰۸	۰/۹۹	۰/۹۹		
	AquaCrop	F0	۰/۳۰	۰/۴۱	۰/۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹		
		F1	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۹		
		F2	۰/۰۱	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۹۹	۰/۹۹		

نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور شبیه‌سازی اثر دور آبیاری و مقدار کود مصرفی بر عملکرد چغندر قند با استفاده از دو مدل گیاهی WOFOST و AquaCrop انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که مقدار آب آبیاری و کود مصرفی اثری بر دقت و کارایی هیچکدام از این دو مدل نداشت و دقت و کارایی هر دو مدل برای همه تیمارها قابل قبول بود. لیکن مدل AquaCrop دقت بهتری نسبت به WOFOST در تیمارهای آبیاری و کود مصرفی داشت.

در حالت کلی و با در نظر گرفتن همه تیمارها، دقت مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد بهتر از مدل AquaCrop بود. به دلیل نزدیکی نتایج هر دو مدل، با احتیاط می‌توان مدل WOFOST را مدل بهتری برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند در حالت کلی معرفی کرد. به همین دلیل به کارشناسان، مدیران و محققان توصیه می‌شود برای شبیه‌سازی اثرات آبیاری و کود روی چغندر قند از این مدل استفاده کنند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Ahmadee M, Khashei Siuki A, Sayyari MH. (2015). Comparison of Efficiency of Different Equations to Estimate the Water Requirement in Saffron (*Crocus sativus* L.) (Case Study: Birjand Plain,

Iran). *Agroecology*. 8(4): 505-520.

Alishiri R, Paknejad F, Aghayari F. (2014). Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop. *Bioscience*.

- 4(4): 1-9.
- Blum FA. (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.
- Boogaard HL, Van Diepen CA, Rotter RP, Cabrera JMCA, Van Laar HH. (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.
- Bouman BAM, Van Keulen, H, Van Laar HH, Rabbinge R. (1996). The "School of de Wit", crop growth simulation models: pedigree and historical overview. *Agric. Sys*. 52: 171-198.
- Ebrahimipak N, Tafteh A, (2017). Determination of yield –water use function for sugar beets in Qazvin. *Journal of Sugar Beet*. 2017; 33(1): 47-63.
- Ebrahimipak N. A., Egdernezhad A. (2019). Assessment of AquaCrop, WOFOST and CropSyst models for Estimating Sugar Beet Yield under Water Deficit Conditions. *Water and Soil Science*. 23(1): 199-207. (in Farsi).
- Ebrahimipak, N. A., Pazera, E., Kaveh, F., Abedi, M. J., Farshi, A. A. (2008). The effect of deficit irrigation in different growth stages on quantity and quality on yield sugar beet and water use efficiency, *Pazhouhesh & Sazandegi*, 78: 67-73. (in Farsi).
- Ebrahimipak, N A., (2010). Determination of yield response factor (Ky) of sugar beet to deficit irrigation at different growth stages, *Sugar Beet*, 26(1): 67-79. (in Farsi).
- Ebrahimipak, N. A., Mostashari, M. (2012). Interaction of Water Stress and Different Amounts of Zinc, Manganese, and Boron Fertilizers on Yield and Water Use of Sugar Beet, *Water Research in Agriculture*, 26.3(3): 251-355. (in Farsi).
- Ebrahimipak, N. A., Mostashari, M. (2013). Evaluation of irrigation water management and boron fertilizer to increase water use efficiency of sugar beet, *Journal of Water and Irrigation Management*, 2(2): 53-67. (in Farsi).
- Ebrahimipak, N., Ahmadee, M., Egdernezhad, A., Khashei Siuki, A. (2018). Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (*crocus sativus* L.) yield under different water management scenarios and zeolite amount, *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(1): 117-132. (in Farsi).
- Ebrahimipak, N., Egdernezhad, A., Tafteh, A., and Ahmadee, M. (2019). Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to Simulate Rapeseed Yield. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(3-75): 715-726. (in Farsi).
- Egdernezhad, A., Ebrahimipak, N., Tafteh, A., Ahmadee, M. (2019). Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain, *Water Management in Agriculture*, 5(2): 53-64. (in Farsi).
- Eitzinger J, Trnka M, Hosch J, Zalud Z, Dubrovsk M. (2017). Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecol. Model*. 171: 223-246.
- Farahani HJ, Izzi G, Steduto P, Oweis TY. (2009). Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy*. 101: 469-476.
- Farre F, Faci JM. (2009). Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 96: 384-394.
- Sadegh Zadeh Hemayati S, Fathollah Taleghani D, Fasahat P. (2017). Environmental Stresses in Crop Science. 10(3): 363-375.
- Garcia-Vila M, Fereres E, Mateos L, Orgaz F, Steduto P, (2009). Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy*. 2009; 101: 477-487.
- Geerts S, Raes D, Garcia M, Miranda R, Cusicanqui JA. (2009). Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with FAO-AquaCrop. *Agronomy*. 101: 499-508.
- 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 TC, Heng LK, Steduto P, Raes D, Fereres E. (2009). AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy*. 101: 448-459.
- Kunz R, Schulze R, Mabhaudhi T, 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.
- Malik A, Shakir AS, Ajmal M, Jamal Khan M, 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.
- Mousavi SN. (2008). Factors effective on sugar beet supply in Fars province. *Journal of Sugar Beet*. 24(1): 107-119.
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Freres E. (2012). Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
- Sanjani S. (2012). Agroecological zoning and study of yield gap of wheat, sugar beet and corn in Khorasan province. PhD. Thesis. Ferdowsi university of Mashhad.
- Shahidi, A., and Ahmadee, M. (2014). A manual for learning SWAP. Kelk Zarrin Publication. Tehran. 168 pp. <http://kzp.ir>. (in Farsi).
- Song YI, Chen DL, Dong WJ. (2006). Influence of climate on winter wheat productivity in different climate regions of China, 1961–2000. *Clim. Res*. 32: 219–227.
- Stricevic R, Cosic M, Djurovic N, Pejic B, 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.
- Todorovic M, Albrizio R, Zivotic L, Abisaab M, Stwckle C. (2009). Assessment of AquaCrop. www.aquacrop.ir

CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy*. 101: 509-521.

- Van Dam JC, Huygen J, Wesseling JG, Feddes RA, Kabat P, Van Walsum PEV, Groenendijk P, Van Diepen CA. (1997). Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department Water Resources. Wageningen Agricultural University. 167 pp.
- Van Gaelen H, Tsegay A, Delbecque N, Shrestha N, Garcia M, Fajardo H, Miranda R, Vanuytrecht E, Abrha B, Diels J, Raes D. (2014). Asemi-quantitative approach for modelling crop response

to soil fertility: evaluation of the Aqua crop procedure. *Journal of Agricultural Science*. 1-16.

- Yang HS, Dobermann A, Lindquist JL, Wolters DT, Arkebauer TJ, Cassman, KG. (2004). Hybrid-maize—A maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Res*. 87: 131-154.
- Ziaii Gh, Babazadeh H, Abbasi F, Kaveh F. (2015). 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.