

شبیه‌سازی اثر دور آبیاری و میزان کود بور بر عملکرد ریشه چغندر قند (*Beta vulgaris L.*) با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین

حسن سیاحی^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*}، نیازعلی ابراهیمی پاک^۳

تاریخ دریافت: ۹۸/۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
 ۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
 ۳- دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
 *مسئول مکاتبه: Email: a_eigder@ymail.com

چکیده

اهداف: کم‌آبی و عدم تغذیه کافی به عنوان عوامل اساسی در کاهش عملکرد ریشه چغندر قند در کشور ایران شناخته شده‌اند. با توجه به اینکه آبیاری و کود بور در زراعت چغندر قند اهمیت دارند؛ هدف از پژوهش حاضر شبیه‌سازی اثر این دو فاکتور بر عملکرد ریشه چغندر قند با استفاده از مدل AquaCrop بود.

مواد و روش‌ها: تیمارهای مورد استفاده در این تحقیق شامل مدیریت آبیاری در چهار دور (I1: ۶، I2: ۳، I3: ۹، I4: ۱۲ و I5: ۱۵ روز) و سطوح کود بور در سه سطح F0: ۲۱، F1: ۳۰ و F2: ۳۹ کیلوگرم در هکتار؛ به ترتیب نشان دهنده سطوح کم، متوسط و مناسب بود.

یافته‌ها: بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی عملکرد ریشه به ترتیب در تیمارهای F2I2 (۴/۳۳ تن در هکتار) و FOI4 (۰/۳۷ تن در هکتار) به دست آمد. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد ریشه چغندر قند برابر با ۱/۷۷ تن بر هکتار بود. نتایج آماره‌های NRMSE (۰/۰۴) و RMSE (۲/۲۴) نشان داد که این مدل از دقت قابل قبولی در تعیین عملکرد ریشه چغندر قند برخوردار بود. با این وجود براساس آماره MBE (۱/۰۷) این مدل دچار خطای بیش برآوردی شد. آماره‌های d و EF نیز برابر با ۰/۹۹ به دست آمدند که حاکی از کارایی بالای این مدل بود. مقادیر آماره‌های RMSE و NRMSE برای کارایی مصرف آب به ترتیب برابر با ۰/۲۹ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۰۴ تعیین شد. آماره MBE نیز برابر با ۰/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب برای کارایی مصرف آب به دست آمد.

نتیجه‌گیری: با توجه به اهمیت پیش‌بینی اثر عوامل حاکم بر عملکرد چغندر قند در تولید پایدار، استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی چغندر قند پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی گیاهی، چغندر قند، کارایی مصرف آب، کود بور، عملکرد

Simulation of Irrigation Period and Boron Fertilizer on Sugar Beet Yield (*Beta vulgaris* L.) using AquaCrop in Qazvin Plain

Hassan Sayyahi¹, Aslan Egdernezhad^{2*}, Niaz Ali Ebrahimipak³

Received: July 11, 2019 Accepted: January 2, 2020

1-MSc. Student of Irrigation and Drainage, Dept. of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2-Assist. Prof., Dept. of Water Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

3-Assoc. Prof., Dept. of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

*Corresponding Author Email: Email: a_eigder@ymail.com

Abstract

Background and Objective: Water and fertility stress are the most important factors for reducing sugar beet yield in Iran. Since irrigation and boron fertilizer have significant effects on sugar beet yield, simulating those factors on sugar beet yield were done using AquaCrop model.

Materials & Methods: Treatments were consisted of irrigation management in four periods (I1: 6, I2: 9, I3: 12, and I4: 15 day) and boron fertilizer amount in three levels (F0: 21 kg.ha⁻¹, F1: 30 kg.ha⁻¹ and F2: 39 kg.ha⁻¹; as low, medium and appropriate, respectively).

Results: Maximum and minimum difference between simulation and observation values for yield were shown in F2I2 (4.33 t.ha⁻¹) and F0I4 (0.37 t.ha⁻¹), respectively. Average difference between simulation and observation value for yield was 1.77 t.ha⁻¹. NRMSE (0.04) and RMSE (2.24) values showed that AquaCrop had good accuracy for simulating yield, however, MBE (1.07) result revealed the model had over estimate error. Criteria results for d and EF showed AquaCrop had good efficiency. RMSE and NRMSE values for water use efficiency were 0.29 kg.m⁻³ and 0.07, respectively. MBE value for mentioned parameter was 0.17 kg.m⁻³.

Conclusion: Regarding the importance of the effect of main factors on sugar beet yield in sustainable production, it is recommended to use AquaCrop for simulating Sugar beet Yield.

Keywords: Boron Fertilizer, Crop Simulation, Sugar Beet, Water Use Efficiency, Yield

اهمیت زیادی در کشور دارد. این اهمیت به دلیل تولید محصولات مانندی مانند قند و شکر، خوراک دام و ماس جایگاه ویژه‌ای در توسعه صنعت در کشور دارد (موسوی و

مقدمه
چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) یکی از محصولات مهم زراعی محسوب می‌شود که کشت آن

مزرعه‌ای پیشنهاد شده‌اند (بوگارد و همکاران ۱۹۸۶؛ گیوت و همکاران ۲۰۰۹).

مدل‌های گیاهی از اواخر دهه شصت میلادی ارائه شدند (علی‌شیری و همکاران ۲۰۱۴) و مورد علاقه محققان قرار گرفتند. البته مدل‌های گیاهی اولیه کارایی قابل قبولی نداشتند لیکن برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف ابزارهای قابل قبولی به شمار می‌رفتند. از جمله اولین مدل‌های ارائه شده می‌توان به SORKAM اشاره کرد (گریک و همکاران ۱۹۸۸). سایر مدل‌های گیاهی مانند WOFOST، SWAP و MARS در دهه‌های بعد ارائه شدند (وندم و همکاران ۱۹۹۷؛ بوگارد و همکاران ۱۹۹۸). با وجود مزیت‌های فراوان هر کدام از این مدل‌ها، محدودیت‌های متعددی داشتند. برای رفع این محدودیت‌ها، سازمان خوار و بار کشاورزی (فائو) مدل AquaCrop را در سال ۲۰۰۹ ارائه داد. این مدل با دارا بودن قابلیت‌هایی از جمله نیاز به داده‌های کم، کاربرپسند بودن و دقت بالا نسبت به سایر مدل‌ها مورد توجه قرار گرفت (هنگ و همکاران ۲۰۰۹؛ تودوریچ و همکاران ۲۰۰۹؛ رائس و همکاران ۲۰۱۲). این مدل تاکنون در تحقیقات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به ارزیابی عملکرد گیاهان زراعی ذرت (هنگ و همکاران ۲۰۰۹؛ هسیائو و همکاران ۲۰۰۹)، پنبه (فراهانی و همکاران ۲۰۰۹؛ گارسایویلا و همکاران ۲۰۰۹)، آفتابگردان (تودوریچ و همکاران ۲۰۰۹) و کینوآ (گیریترس و همکاران ۲۰۰۹) اشاره کرد. نتایج کلیه این تحقیقات نشان داده است که کارایی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گیاهان زراعی مورد اشاره قابل قبول بوده است. تحقیقات محدودی نیز با استفاده از این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی چغندرقدن انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به گزارش استریسویچ و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد. این محققان دقت این مدل را برای شبیه‌سازی عملکرد این محصول قابل قبول دانستند و حتی با شبیه‌سازی واکنش این محصول به مقادیر بارش و شبیه‌سازی عملکرد آن تحت سناریوی دیم نشان دادند

همکاران ۲۰۰۸). عملکرد این گیاه زراعی به طور متوسط در سطح جهان برابر با ۵۶/۲۵ تن در هکتار تخمین زده شده است که بسیار بیشتر از عملکرد آن در ایران (۳۶ تن) است (فائو ۲۰۱۳). کمبود آب آبیاری و عدم مصرف کود مناسب از جمله مهم‌ترین دلایل کاهش عملکرد این گیاه زراعی در ایران است (سند ملی تحقیقات راهبردی چغندرقدن ۲۰۱۰).

با توجه به کاهش مقدار آب آبیاری در دسترس در سال‌های اخیر، اعمال روش‌های کم‌آبیاری در سطح مزارع چغندرقدن امری اجتناب ناپذیر محسوب می‌شود (ضیایی و همکاران ۲۰۱۵). گرچه روش‌های ارائه شده برای کم‌آبیاری متنوع هستند لیکن تغییر دور آبیاری به صورت روشی رایج بین کشاورزان پذیرفته شده است. به نظر می‌رسد اثر مدیریت آبیاری بر کاهش عملکرد (ابراهیمی پاک و همکاران ۲۰۰۶) ممکن است سبب زیان اقتصادی شود؛ لیکن با در نظر گرفتن مزایای آن در بالا بردن بهره‌وری مصرف آب می‌توان آن را روشی مناسب در شرایط فعلی منابع آب به شمار آورد (بلوم ۲۰۰۹؛ فاره و فاسی ۲۰۰۹؛ گیوت و رائس ۲۰۰۹). از طرف دیگر، استفاده از کودهای شیمیایی نیز سبب رشد گیاهان زراعی و افزایش عملکرد آن‌ها می‌گردد. استفاده از کود شیمیایی به خصوص در شرایط افزایش دور آبیاری می‌تواند تا حدودی اثرات کاهش عملکرد را بهبود بخشد. با توجه به اینکه اکثر کشاورزان براساس توصیه‌های کودی، از کودهای اصلی (N-P-K) استفاده می‌کنند؛ نیاز است اثر ریزمغذی‌ها نیز بر عملکرد چغندرقدن در شرایط کم‌آبیایی سنجیده شود. کود بور یکی از ریزمغذی‌ها است که اثر شدیدی بر عملکرد چغندرقدن دارد. با این وجود تعیین واکنش گیاه چغندرقدن تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود مستلزم انجام طرح‌های متعدد آزمایشی است که علاوه بر زمان بر بودن سبب صرف هزینه‌های بالایی نیز می‌شود. برای رفع این مشکلات، مدل‌های گیاهی جهت شبیه‌سازی واکنش گیاهان به شرایط مختلف

قبولی در این خصوص ارائه شده است. آکوگاما و همکاران (۲۰۱۷) و رنجبر (۲۰۱۴) نیز برای کشت نرت تحت شرایط مختلف کودی از مدل AquaCrop استفاده کردند و دقت این مدل را مطلوب گزارش کردند.

با توجه به بیان مسأله، اهمیت شبیه‌سازی دور آبیاری و نیاز کودی چغندر قند برای تصمیم‌گیری در خصوص کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد در مزارع کشور بسیار با اهمیت است. از طرفی، AquaCrop تنها مدل گیاهی است که قابلیت شبیه‌سازی همزمان این دو فاکتور را دارد و تاکنون دقت آن در شرایط اعمال دور آبیاری و کاربرد کود بور چغندر قند بررسی نشده است. به همین دلیل، تحقیق حاضر برای دستیابی به اهداف اشاره شده انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با استفاده از داده‌های برداشت شده در موسسه تحقیقات آب و خاک واقع در ایستگاه تحقیقاتی فیض آباد قزوین در طی سه سال زراعی انجام شد. این منطقه در عرض جغرافیایی ۸۱ و ۳۶۰ شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ ۵۱ شرقی و ارتفاع ۱۲۴۰ متر از سطح دریا قرار دارد. در این طرح، خاک مزرعه آزمایشی از نظر فیزیکی و شیمیایی در دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر برداشت و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از تجزیه فیزیکوشیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

که برای تولید این محصول حتی می‌توان آبیاری را حذف کرد. در تحقیقی دیگر که توسط کونز و همکاران (۲۰۱۴) انجام شد؛ برنامه‌ریزی مصرف آب در کشاورزی برای حوضه‌های تحت تنش آبی در آفریقای جنوبی با استفاده از این مدل مورد بررسی قرار گرفت. این محققان با تکیه بر کارایی مناسب مدل AquaCrop پیشنهاد کردند که برای انجام تحقیقات مشابه در این زمینه از این مدل استفاده شود. علی‌شیری و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعات خود از داده‌های جمع‌آوری شده از استان مرکزی برای ارزیابی مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی چغندر قند استفاده کردند و دقت این مدل را قابل قبول ارزیابی کردند. مالک و همکاران (۲۰۱۷) نیز از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند تحت سناریوهای مختلف آبیاری و استفاده از مالچ در پاکستان استفاده کردند و گزارش کردند که این مدل در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری ملایم دقت قابل قبولی داشت.

در نسخه اخیر مدل AquaCrop، قابلیت شبیه‌سازی تنش کودی به این مدل افزوده شده است. البته این مدل قادر به تشخیص نوع کود نیست ولی براساس یک الگوریتم خودکار که در آن قرار داده شده است (فان گوئلن و همکاران ۲۰۱۴)؛ پس از واسنجی می‌تواند شرایط تنش کودی را نیز شبیه‌سازی کند. این مدل توسط فان گائون و همکاران (۲۰۱۴) برای شبیه‌سازی مقدار کود بور بر عملکرد گیاهان نرت، گندم، تف و کینوا مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج قابل

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

عمق	پتاسیم	فسفر	ازت کل	کربن آلی	درصد اشباع	EC	pH	رطوبت	رطوبت	جرم مخصوص	بافت خاک
								در	در نقطه		
cm	Ppm	%	%	%	-	dS.m ⁻¹	-	ظرفیت	ظرفیت	g.cm ⁻³	ظاهر
								زراعی	پژمردگی	cm ³ .cm ⁻³	ثابت
۰-۳۰	۲۸۴	۸/۱۵	۷۰	۰/۵۵	۴۵	۰/۳۵	۸/۰۷	۰/۲۲	۰/۱۲	۱/۳۴	سیلتی‌رسی
۳۰-۶۰	۲۹۳	۷/۷	۷۲	۰/۴۸	۵۲	۰/۳۲	۸/۰۷	۰/۲۴	۰/۱۳	۱/۷۸	لومی‌شنی

$$CC = CC_0 \times e^{CC_0 t} \quad (\text{رابطه ۳})$$

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

$$B = WP \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از ماده‌ی خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$Y = B \times HI \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این رابطه، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس خشک است. داده‌های مورد استفاده در این مدل در چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه دسته‌بندی می‌شوند. هر گروه از داده‌ها براساس آزمایش‌های مزرعه‌ای و یا داده‌های موجود به مدل معرفی شدند. پیش از انجام واسنجی و مدل‌سازی با AquaCrop ابتدا این مدل با استفاده از رابطه (۶) مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت (گیرت و رائس ۲۰۰۹):

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

در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد شده عامل مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد عامل مورد نظر براساس داده ورودی پایه می‌باشد. به منظور تحلیل حساسیت هر عامل بر مقدار خروجی، آن عامل به میزان ۲۵ درصد مقدارش افزایش و کاهش یافت. سپس مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت بالا، $15 > Sc > 2$ حساسیت متوسط، $Sc < 2$ حساسیت پایین اندازه‌گیری شد (گیرت و رائس ۲۰۰۹).

به منظور واسنجی این مدل، داده‌های دو سال اول مورد استفاده قرار گرفتند. بدین ترتیب ابتدا این مدل براساس داده‌های سال اول و در شرایط کمترین و

آماده‌سازی زمین در طول آزمایش در اوایل اردیبهشت ماه انجام شد. به منظور انجام این عملیات، کرت‌ها به ابعاد ۱۰ متر مربع قطعه‌بندی شدند. سپس براساس آزمایش خاک، کودهای اوره (در سه مرحله همزمان با کاشت و دو مرحله سرک)، پتاسیم (سولفات پتاسیم) و فسفر (سوپر فسفات تریپل) براساس آزمایش خاک و به ترتیب برابر با ۱۵۵، ۲۲۵ و ۲۴۵ کیلوگرم در هکتار محاسبه شده و در داخل هر کرت همزمان با کاشت گیاه به خاک افزوده شد. در ادامه به میزان ۳۰ کیلوگرم در هر هکتار بذر منوزرم تکنیکی رقم ۷۲۳۲ با تراکم ۹۵ هزار بوته در هکتار و در عمق ۵ تا ۸ سانتیمتر کشت شد. با توجه به اینکه مقدار آب آبیاری و کود بور تأثیر زیادی بر عملکرد چغندر دارد؛ این دو فاکتور در این تحقیق بررسی شدند. تیمارهای مورد استفاده در این تحقیق شامل مدیریت آبیاری در چهار دور (I1: ۶، I2: ۹، I3: ۱۲ و I4: ۱۵ روز) و سطوح کودی در سه سطح (F0: ۲۱، F1: ۳۰ و F2: ۳۹ کیلوگرم در هکتار؛ به ترتیب نشان دهنده سطوح کم، متوسط و مناسب) از منبع کود اسید بوریک در زمان کاشت بود.

به منظور شبیه‌سازی اثر دور آبیاری و کود مصرفی از مدل AquaCrop استفاده شد. این مدل از تبخیر-تعرق (ET) محاسبه شده (رابطه ۱) با فرض تفکیک آن استفاده می‌کند. تفکیک این مولفه به دو جز تبخیر (E) و تعرق (Tr) سبب می‌شود تا مصرف غیر تولیدی آب از معادلات حذف شود (رابطه ۲).

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

$$Tr = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این روابط، Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ET_x و ET_a 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.

شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از $0/1$ برای آماره NRMSE نشان دهنده‌ی دقت عالی مدل است. هم‌چنین مقادیر این آماره در بازه‌های $0/2-0/1$ ، $0/3-0/2$ و بیشتر از $0/3$ به ترتیب نشان دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل رشد گیاهی AquaCrop مقدار عامل مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد عامل مورد نظر عدد کوچکتری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل AquaCrop پیش از واسنجی انجام شد و برخی نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که این مدل نسبت به تغییرات اکثر پارامترهای ورودی حساسیت متوسط داشت. تغییرات برخی پارامترها نیز مانند ضریب گیاهی برای تعرق بر خروجی این مدل حساسیت چندانی نداشت به همین دلیل در جدول واسنجی مقدار این پارامتر برابر با پیش‌فرض در نظر گرفته شد. پارامترهایی که دارای حساسیت متوسط بودند تحت واسنجی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

بیشترین تنش کودی (F_0 و F_2) واسنجی شد. سپس به منظور واسنجی این مدل تحت شرایط مختلف تأمین نیاز کودی، نیاز بود تا ضرایب کاهش توسعه پوشش، حداکثر پوشش، متوسط کاهش و درصد کاهش بهره‌وری آب نرمال شده تعیین گردند. بدین منظور براساس دستورالعمل ارائه شده توسط فان‌گائلن و همکاران (۲۰۱۴) از مقادیر تنش کودی در سال دوم و در شرایط حداکثر (F_1) استفاده شد. پس از واسنجی، این مدل با استفاده از داده‌های سال سوم مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. بدین منظور از 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) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۷) تا (۱۲) نشان داده شده‌اند.

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

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\bar{O}_i n}} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad \text{(رابطه ۹)}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{(رابطه ۱۰)}$$

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

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

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی

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

عامل	مقدار Sc در حالت +۰.۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۰.۲۵٪	درجه حساسیت
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

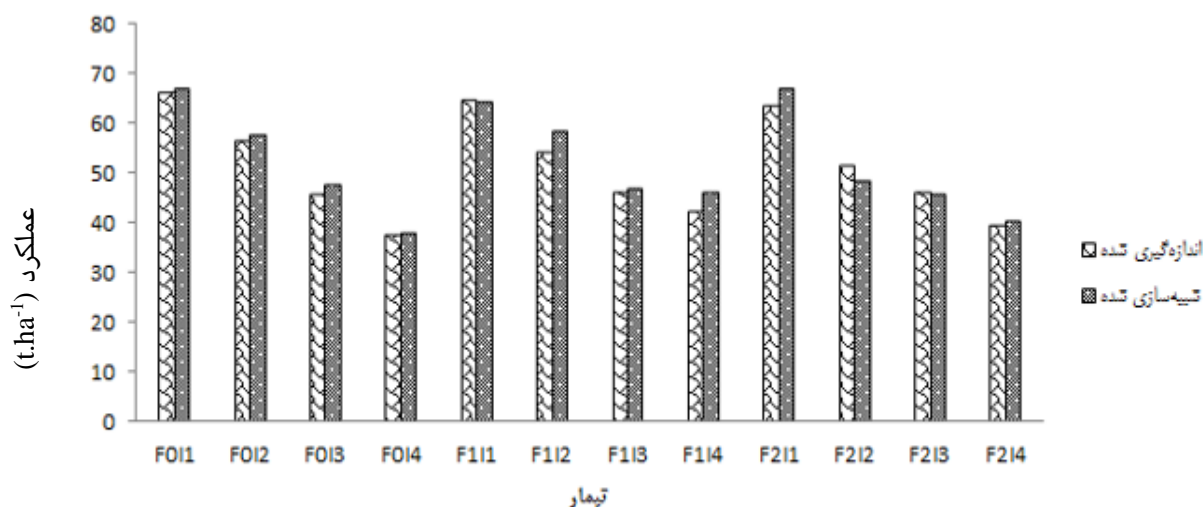
جدول ۳- مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل AquaCrop

توضیح عامل	مقدار	واحد	توضیح
دمای پایه	۵	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
دمای بالا	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش فرض
تراکم کشت	۹۵۰۰۰	گیاه در هکتار	اندازه‌گیری
ضریب رشد کانوپی	۱۳/۶	درصد روز	پیش فرض
پوشش گیاهی هر گیاهچه هنگام جوانه‌زنی	۵	سانتی‌متر مربع	پیش فرض
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۶	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۷۰	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۱۴۵	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۱۳	روز	واسنجی
عمق مؤثر ریشه	۱/۴	متر	واسنجی
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۶/۵	گرم بر متر مربع	واسنجی
پوشش گیاهی اولیه	۰/۱	درصد	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۹۸	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۲۰	-	واسنجی
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۶۵	-	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۱۳/۰	درصد روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۵/۵	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۱	درصد بر روز	پیش فرض
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۰/۵	-	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۰/۷	-	واسنجی
ضریب کاهش توسعه پوشش*	۵۰	درصد	واسنجی
ضریب حداکثر پوشش*	۲۴	درصد	واسنجی
ضریب متوسط کاهش*	۰/۳	درصد بر روز	واسنجی
ضریب درصد کاهش بهره‌وری آب نرمال شده*	۲۰	درصد	واسنجی

* این پارامترها با استفاده از مقادیر تنش کودی در بیشترین و کمترین حالت واسنجی شدند.

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 I2 داشت. این نتایج نشان داد که روند منظمی بین نتایج به دست آمده از 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. نتایج بسیاری از محققان از جمله هنگ و همکاران (۲۰۰۹) و اندرزیان و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان داده است که این مدل در شرایط تنش شدید دچار خطای بیشتری می‌شود.

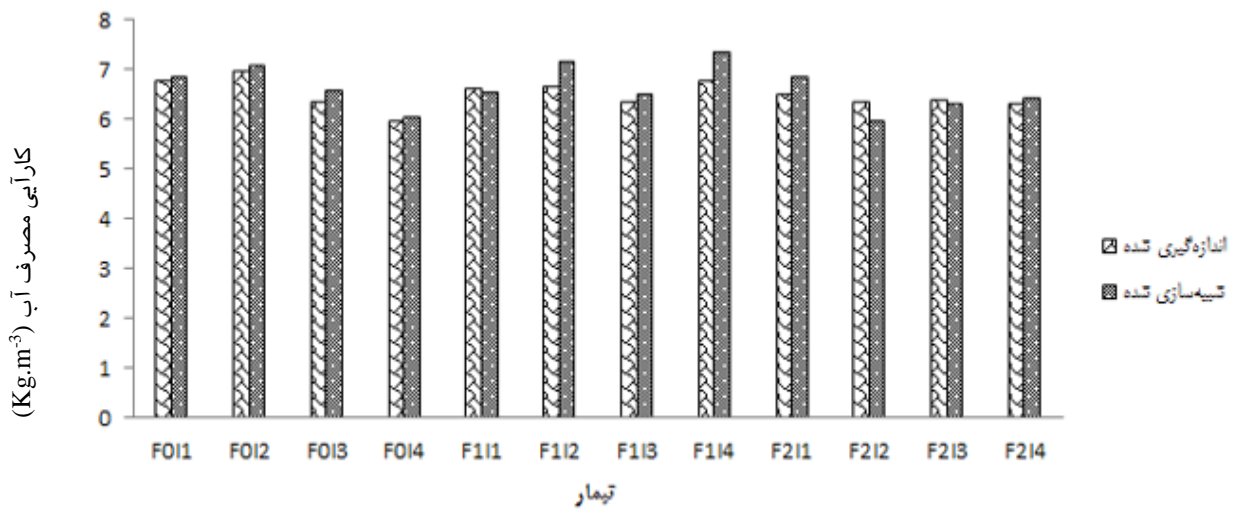
نتایج صحت‌سنجی نشان داد که اختلاف عملکرد شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی بسیار متفاوت بود به طوری که در تیمار F0I4 حداقل اختلاف (۰/۳۷ تن بر هکتار) و در تیمار F2I2 حداکثر اختلاف (۴/۳۳ تن بر هکتار) مشاهده شد. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برابر با ۱/۷۷ تن بر هکتار بود که نسبتاً قابل توجه است. نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی تیمارها به تفکیک در شکل ۱ نشان داده شده است. براساس این نتایج، تیمارکودی F1 اختلاف بیشتری نسبت به دو تیمار F0 و F2 مشاهده شد. اختلاف عملکرد تیمار F1 نسبت به دو تیمار F0 و F2 به ترتیب ۱/۳ و ۲/۴ برابر بیشتر بود. متوسط اختلاف عملکرد چغندر قند بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای



شکل ۱- نتایج عملکرد مشاهداتی چغندر نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop

متوسط اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده کارایی مصرف 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.

نتایج کارایی مصرف آب در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برابر با ۰/۶ و ۰/۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب بود. متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز برابر با ۰/۲۳ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد.



شکل ۲- نتایج کارایی مصرف آب مشاهداتی چغندر نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده با مدل AquaCrop

مشاهده می‌شود که خطای پژوهش حاضر بالاتر از مقادیر به دست آمده پژوهش‌های پیشین است. البته این محققان عملکرد چغندر قند را در شرایط بدون تنش کودی بررسی کردند. کارایی مدل AquaCrop نیز براساس دو آماره EF و d مقدار مطلوبی داشت. استریسویچ و همکاران (۲۰۱۱) و مالک و همکاران (۲۰۱۷) نیز مقدار ۰/۹ را برای آماره d گزارش کردند که با نتایج تحقیق حاضر هم خوانی دارد.

با در نظر گرفتن هر کدام از سناریوهای ۱، ۲ و ۳، مشاهده شد که این مدل براساس آماره NRMSE از دقت بالایی برخوردار بود. براساس آماره MBE، دقت این مدل در سناریو ۳ بهتر از دو سناریو دیگر بود. مقادیر مثبت این آماره برای همه سناریوها نشان داد که این مدل دچار خطای بیش‌برآوردی شد. نتایج بسیاری از محققان نیز نشان داده است که این مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصولات مختلف دچار خطای بیش‌برآوردی است (هنگ و همکاران ۲۰۰۹؛ کاترجی و همکاران ۲۰۱۳؛ زک و همکاران ۲۰۱۱).

به منظور مقایسه بهتر اثر تیمارهای آبیاری و کودی بر مقادیر شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند، نتایج به دست آمده با استفاده از آماره‌ها و در سناریوهای مختلف بررسی شد. نتایج این سناریوها در جدول ۴ نشان داده شده است. براساس این نتایج در شرایط کلی (سناری ۷)، مدل AquaCrop دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند داشت. این نتایج براساس آماره‌های RMSE، MBE و NRMSE قابل توجیه است. براساس آماره RMSE، مقدار خطای این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد برابر با ۲/۲۴ تن در هکتار بود. مالک و همکاران مقدار خطای این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر را در دامنه ۱/۱۷-۰/۰۷ تن در هکتار گزارش کردند. استریسویچ و همکاران (۲۰۱۱) مقدار ۰/۲ تن در هکتار را برای آماره RMSE گزارش کردند. علی‌شیری و همکاران (۲۰۱۴) نیز دامنه ۰/۶۴-۰/۱۵ تن در هکتار را برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند توسط مدل AquaCrop بیان کردند. با مقایسه نتایج این پژوهش با مقادیر گزارش شده توسط سایر محققان،

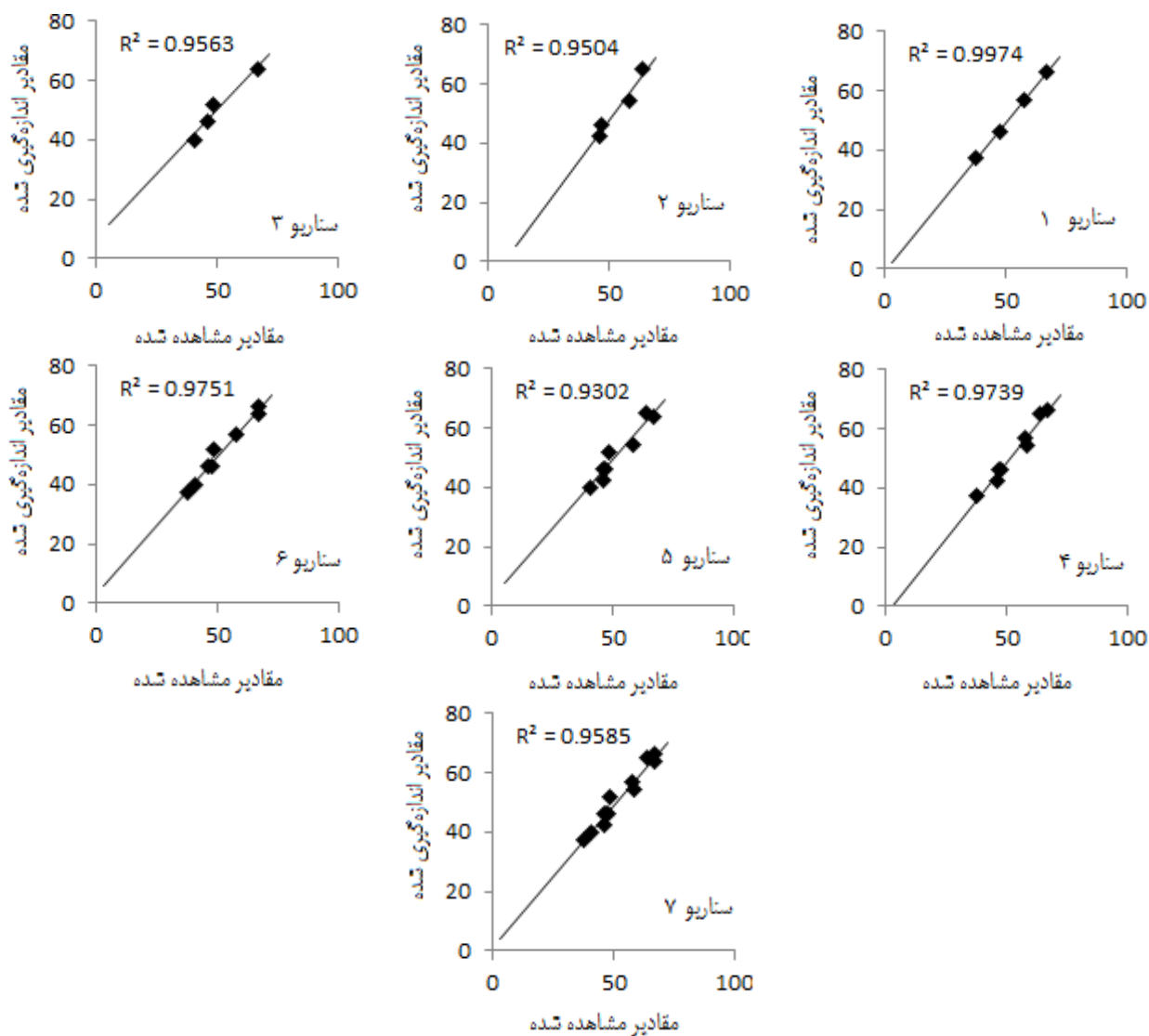
جدول ۴- نتایج آماره‌های مورد استفاده برای عملکرد ($t \cdot ha^{-1}$) و کارایی مصرف آب ($Kg \cdot m^{-3}$) چغندر قند

d	EF	NRMSE	RMSE	MBE	شماره سناریو	سناریو	پارامتر
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۱	۰/۶۵	۰/۳۰	۱	I1-I2-I3-I4 و F0	عملکرد (تن بر هکتار)
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۳	۱/۷	۰/۷	۲	I1-I2-I3-I4 و F1	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۲	۱/۳	۰/۰۳	۳	I1-I2-I3-I4 و F2	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۳	۱/۸	۱/۰۳	۴	I1-I2-I3-I4 و F0-F1	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۴	۲/۱۴	۰/۷۳	۵	I1-I2-I3-I4 و F1-F2	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۳	۱/۴۶	۰/۳۶	۶	I1-I2-I3-I4 و F0-F2	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۴	۲/۲۴	۱/۰۷	۷	I1-I2-I3-I4 و F0-F1-F2	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۴	۱	I1-I2-I3-I4 و F0	کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۳	۰/۲۳	۰/۱۰	۲	I1-I2-I3-I4 و F1	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۲	۰/۱۵	۰/۰۰	۳	I1-I2-I3-I4 و F2	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۴	۰/۲۵	۰/۱۴	۴	I1-I2-I3-I4 و F0-F1	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۴	۰/۲۸	۰/۱۰	۵	I1-I2-I3-I4 و F1-F2	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۳	۰/۱۷	۰/۰۴	۶	I1-I2-I3-I4 و F0-F2	
۰/۹۹	۰/۹۹	-/۰۴	۰/۲۹	۰/۱۴	۷	I1-I2-I3-I4 و F0-F1-F2	

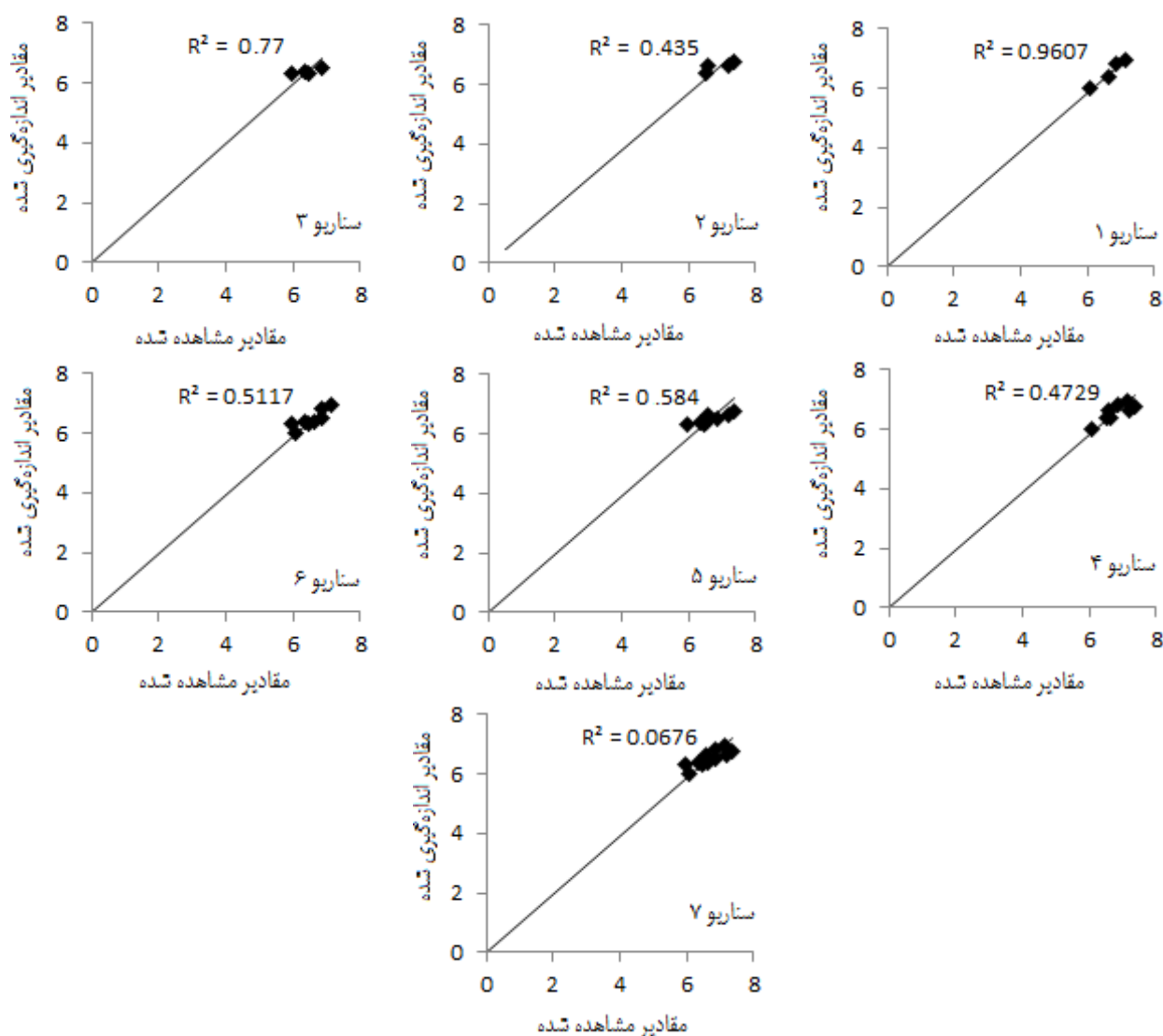
نتایج مشابه برای پارامتر کارایی مصرف آب نیز مشاهده شد. این نتایج برای سناریوهای ۱ تا ۷ در جدول ۴ نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده برای این پارامتر، دقت مدل AquaCrop قابل قبول بود.

همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد چغندر برای سناریوها ۱ تا ۷ در شکل ۳ نشان داده شده است. آماره R^2 برای کلیه سناریوها نشان داد که همبستگی مطلوبی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود داشت. با این وجود، مقادیر این آماره برای کارایی مصرف آب در برخی سناریوها (۲، ۴ و ۷) قابل قبول نبود. مقدار این آماره در بازه ۰/۰۶ تا ۰/۹۹ متغیر بود. البته این مقادیر با تغییر عرض از مبدا رگرسیون بهبود یافت و در بازه ۰/۶ تا ۰/۹۹ قرار گرفت.

با توجه به آماره RMSE، خطای به دست آمده برای دو تیمار کودی F0 و F2 در بازه گزارش شده توسط سایر محققان بود. نتایج سناریوهای ۴، ۵ و ۶ نشان داد که این سناریوها نسبت به سه سناریو قبلی دقت کمتری داشت. مقایسه کلیه این سناریوها براساس آماره NRMSE نشان داد که سناریو ۱ نسبت به سایر سناریوها دقت بهتری داشت و سناریوهای ۵ و ۷ از نظر دقت پایین‌تر از سایر سناریوها بودند. علت آن وجود خطای بیشتر در شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند در شرایط کودی F1 است. البته براساس این آماره، دقت کلیه سناریوها در دسته عالی قرار داشت. با توجه به واسنجی مدل AquaCrop برای شرایط دارای کمترین و بیشترین تنش کودی، این مدل دقت کمتری برای شبیه‌سازی عملکرد در تیمار با شرایط کودی متوسط (F1) داشت.



شکل ۳- نتایج همبستگی بین مقادیر عملکرد (تن بر هکتار) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای سناریوهای مختلف



شکل ۴- نتایج همبستگی بین مقادیر کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای سناریوهای مختلف

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که دقت مدل AquaCrop در تعیین عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند در سناریوهای ۱، ۳ و ۶ بهتر از سایر سناریوها بود. براساس این نتایج، با اعمال تیمار F1 و افزایش دور آبیاری دقت این مدل کاهش یافت. با توجه به اینکه این مدل با استفاده از تنش‌های کودی در شرایط حداقل و حداکثر واسنجی می‌شود؛ تیمارهای میان این دو تنش

دقت کمتری در مرحله صحت‌سنجی دارند. افزایش دور آبیاری نیز سبب کاهش دقت این مدل می‌شود و علت آن خصوصیات حاکم بر این مدل آب-محور است. براساس کلیه نتایج، مقادیر آماره‌های RMSE و NRMSE نشان داد که مدل AquaCrop دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد داشت. آماره MBE نشان داد که این مدل دچار خطای بیش‌برآوردی شد که با نتایج بسیاری از محققان مطابقت داشت. با توجه به نتایج به دست آمده، مدل

AquaCrop قابلیت شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند در شرایط مختلف تنش آبی و مقدار کود مصرفی داشت. لیکن در شرایط تنش شدید این مدل دقت کمتری نسبت به شرایط بدون تنش داشت.

منابع مورد استفاده

- Akumaga U, Tarhule A and Yusuf A.A. 2017. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232: 225–234.
- 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.
- Andarziana B, Bannayanb M, Steduto P, Mazraeha H, Barati M. E, Barati M A and Rahnema A. 2011. Validation, and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100:1-8.
- Blum F A. 2009. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, 112: 119-123.
- 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 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 (No. 52). SC-DLO.
- Ebrahimipak NA, and Mostashari M. 2012. Evaluation of irrigation water management and boron fertilizer to increase water use efficiency of sugar beet. *Water and Irrigation Management*, 2(2):53-67.
- Ebrahimipak NA, and Tafteh A. 2017. Determination of yield-water use function for sugar beet in Qazvin. *Journal of Sugarbeet*, 33(1): 47-63.
- Ebrahimipak NA, Pazera E, Kaveh F, Abedi MJ, and Farshi AA. 2006. The effect of deficit irrigation in different growth stages on quantity and quality on yield sugar beet and water use efficiency. *Pajouhesh and Sazandegi*, 78: 63-73. (In Persian).
- 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.
- Farre F, and Faci JM. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 96: 384-394.
- Garcia-Vila M, Fereres E, Mateos L, Orgaz F and Steduto P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy*, 101: 477-487.
- 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.
- Geerts S, and Raes D. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96: 1275-1284.
- 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.
- Heng LK, Hsiao TC, 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.
- HsiaoTC, Heng LK, Steduto P, Raes D and Fereres E. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy*, 101: 448-459.

- Katerji N, Campi P and Mastrorilli M. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130: 14-26.
- 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.
- 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.
- Mousavi S N. 2008. Factors effective on sugar beet supply in Fars province. *Journal of Sugar Beet*, 24(1): 107-119. (In Persian).
- Raes D, Steduto P, Hsiao T C and Freres E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
- Ranjbar A. 2014. Simulating water, nitrogen and yield for determining nitrogen uptake index during corn growth. Ph.D. Thesis. Tehran. (In Persian).
- 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.
- 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.
- Van Dam JC, Huygen J, Wesseling JG, Feddes RA, Kabat P, Van Walsum PEV, Groenendijk P and 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 and 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.
- Ziaii Gh, Babazadeh H, Abbasi F and 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. (In Persian).