

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند برای دوره‌های مختلف آبیاری*

حسن سیاحی^۱، اصلان آگدرنژاد^{۲*} و نیاز علی ابراهیمی پاک^۳

چکیده

با توجه به اهمیت چغندر قند در صنایع غذایی کشور، لازم است واکنش این گیاه زراعی نسبت به مقادیر مختلف آب آبیاری بررسی شود. با توجه به وقت‌گیر بودن و هزینه‌بر بودن انجام آزمایش‌های مختلف مزرعه‌ای، بهتر است یک مدل گیاهی مناسب بدین منظور انتخاب شود. برای دستیابی به این هدف، مدل‌های AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب چغندر قند تحت تیمارهای مختلف آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور داده‌های برداشت شده از ایستگاه تحقیقاتی فیض آباد قزوین برای چهار دور آبیاری مختلف (I1:6، I2: 9، I3: 12 و I4: 15 روز) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد دقت مدل AquaCrop بهتر از CropSyst بود. مدل AquaCrop به طور متوسط در برآورد عملکرد خطایی برابر با ۱/۷ تن در هکتار و مدل CropSyst خطایی برابر با ۴/۲ تن در هکتار داشتند. نتایج برای پارامتر کارایی مصرف آب برتری مدل AquaCrop بر CropSyst را نشان داد. کارایی هر دو مدل برای تعیین عملکرد و کارایی مصرف آب قابل قبول بود. خطای مدل AquaCrop در تعیین کارایی مصرف آب برابر با ۰/۲۱ کیلوگرم بر متر مکعب و خطای CropSyst برابر با ۰/۵ کیلوگرم بر متر مکعب بود. مقایسه آماره R2 بین مقادیر عملکرد و کارایی مصرف آب به دست آمده توسط دو مدل مورد نظر نشان داد که نتایج مدل AquaCrop همبستگی بیشتری با مقادیر مشاهداتی داشت. براساس کلیه نتایج، استفاده از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند پیشنهاد می‌شود.

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

مقدمه

بسیاری از مزارع تحت کشت چغندر قند است (ابراهیمی پاک، ۱۳۸۹). به دلیل کاهش آب در دسترس (Ahmaded et al., 2014; Albaji et al., 2016)، این وضعیت در سال‌های آتی تشدید خواهد شد (Albaji et al., 2015). به همین دلیل نیاز است روش‌های مختلف کم‌آبیاری در شرایط مختلف زراعی آزمایش شود. تغییر دور آبیاری از جمله رایج‌ترین روش‌های کم‌آبیاری محسوب می‌شود که در بین کشاورزان بسیار رایج است. گرچه کم‌آبیاری اثر منفی بر عملکرد این گیاه زراعی دارد (Ebrahimipak et al., 2006)؛ لیکن در برخی مواقع سبب افزایش کارایی مصرف آب می‌شود. این موضوع با در نظر گرفتن مقدار آب آبیاری در کشاورزی قابل ملاحظه است (Blum, 2009; Geerts & Raes, 2009; Farre & Faci, 2009).

چغندر قند یکی از گیاهان زراعی با ارزش است که سهم زیادی در صنایع غذایی دارد. با این وجود عملکرد این گیاه در کشور ما پایین‌تر از متوسط جهانی است و دلیل آن کمبود آب آبیاری در

^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 (* نویسنده مسئول: Email: a_eigder@ymail.com)

^۳ دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

* مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی -

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

تاریخ دریافت: ۹۹/۱/۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۳/۶

بهره‌وری آب گندم عملکرد دانه‌ی شبیه‌سازی شده سازگاری مطلوبی با مقادیر واقعی داشته به طوری که ریشه میانگین مربعات خطا در طول سه فصل رشد معادل ۰/۴۱، ۰/۳۳، ۰/۳۴ تن در هکتار به دست آمد (محسنی و همکاران، ۱۳۸۸).

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های آب-محور است که توسط سازمان خوار و بار کشاورزی (فائو) توسعه داده شده است. با توجه به قابلیت‌های این مدل از جمله دقت بالا و کاربرد پسند بودن آن، تاکنون توسط بسیاری از محققان برای مدل‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گیاهان زراعی استفاده شده است (Geert et al., 2009). از این مدل برای ارزیابی عملکرد گیاهان زراعی ذرت (Heng et al., 2009)، پنبه (Farahani et al., 2009)، آفتابگردان (Todorovic et al., 2009) و کینوا (Geerts et al., 2009) 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 چغندر قند انجام شده است که از جمله آن‌های می‌توان به گزارش استریتویچ و همکاران (Stricevic et al., 2011) 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 که برای تولید این محصول حتی می‌توان آبیاری را در شمال صربستان حذف کرد. در تحقیقی دیگر، مالک و همکاران (Malik et al., 2017) 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 کم آبیاری ملایم دقت قابل قبولی داشت.

مطالعات متعددی روی دو مدل گیاهی AquaCrop و CropSyst انجام شده است ولی مقایسه آن‌ها در شرایط مختلف دور آبیاری گیاه چغندر قند تاکنون انجام نشده است؛ بنابراین، تحقیق حاضر به منظور دستیابی به این هدف انجام شد.

برای انجام آزمایش‌های متعدد جهت تعیین مقدار مناسب دور آبیاری در سطح مزارع چغندر قند در کشور، نیاز است آزمایش‌های متعدد انجام شود. اجرای این پایلوت‌ها بسیار هزینه‌بر بوده و مستلزم صرف وقت بسیاری است. از طرفی در زمان ثابت نمی‌توان سناریوهای مختلف دور آبیاری را در شرایط مختلف زراعی بررسی کرد. برای رفع این مشکلات، مدل‌های گیاهی مختلفی ارائه شده است که قابلیت شبیه‌سازی واکنش گیاهان مختلف زراعی را دارند (Geerts et al., 2009; Boogaard et al., 1986). 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 CropSyst یکی از مدل‌های گیاهی است که توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل به عنوان یکی از مدل‌های تابش محور مطرح در شبیه‌سازی گیاهان زراعی است که توسط استوکل و نلسون ارائه گردیده است (Stockle & Nelson, 1996). مدل CropSyst برای شبیه‌سازی برخی محصولات کشاورزی مانند گندم (Moriondo et al., 2007) و یونجه (Confalonieri et al., 2009) مورد استفاده قرار گرفته است و دقت و کارایی آن گزارش شده است. Pala et al., (1996) در تحقیقی جهت تشخیص کارایی مدل CropSyst، به شبیه‌سازی عملکرد گندم تحت شرایط مختلف تأمین آب و نیتروژن پرداختند و نشان دادند که این مدل دقت خوبی برای شبیه‌سازی عملکرد گندم داشت. در تحقیقی دیگر که توسط سینگ و همکاران (Singh et al., 1999) برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم با استفاده از مدل CropSyst انجام شد، دقت بالا و کارایی مناسب این مدل تأیید شد. در تحقیقات انجام شده در منطقه کرخه توسط نظری‌فر و مومنی (۱۳۹۰) برای پهنه‌بندی بهره‌وری مصرف آب گندم با استفاده از مدل رشد گیاهی CropSyst در دوره‌های آبی متفاوت، عملکرد دانه شبیه‌سازی شده سازگاری مطلوبی با مقادیر واقعی داشته به طوری که ریشه میانگین مربعات خطای آن ۰/۳۹ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. در تحقیقی دیگر برای شبیه‌سازی اثر آب و نیتروژن بر عملکرد و

مواد و روش‌ها

کیلوگرم در هکتار سولفات پتاسیم، ۳۴۵ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل قبل از کاشت مورد استفاده قرار گرفت. همچنین ۱۵۵ کیلوگرم در هکتار ازت خالص برای این آزمایش در نظر گرفت شد که نیمی از آن هنگام کاشت و مقدار باقیمانده در زمان شش تا هشت برگی شدن و بعد از تنک مردن مورد استفاده قرار گرفت. براساس دور آبیاری مرسوم برای مزارع چغندر قند در قزوین، چهار دور آبیاری I1: ۶، I2: ۹، I3: ۱۲ و I4: ۱۵ روز در این آزمایش در نظر گرفته شد (ابراهیمی‌پاک و مستشاری، ۱۳۹۱ ب). میزان آب آبیاری با سنجش رطوبت در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم تعیین شد (رابطه ۱).

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

که در این رابطه، dn مقدار آب مورد نیاز گیاه بر حسب میلی‌متر، FC ظرفیت زراعی مزرعه بر حسب درصد وزنی، a 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 (ابراهیمی‌پاک و مستشاری، ۱۳۹۱ الف). پس از محاسبه dn، میزان آب آبیاری توسط کنتور 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 (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۸۷).

جهت انجام این پژوهش از داده‌های برداشت شده سه ساله (Y1 سال اول؛ Y2: سال دوم و Y3: سال سوم) در ایستگاه تحقیقاتی فیض آباد قزوین واقع در عرض جغرافیایی ۳۶° ۸' شمالی و طول جغرافیایی ۵۰° ۵' شرقی و ارتفاع ۱۲۴۰ متر از سطح دریا استفاده شد (ابراهیمی‌پاک و مستشاری، ۱۳۹۱ الف؛ ابراهیمی‌پاک و تافته، ۱۳۹۶). در این پژوهش، آماده‌سازی زمین و نمونه‌برداری از خاک مزرعه جهت انجام آزمایش خاک در اردیبهشت ماه هر سال انجام شد. بدین منظور نمونه خاک از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر برداشت 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 (ابراهیمی‌پاک و مستشاری، ۱۳۹۱ الف). 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 در حالت گل اشباع توسط دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد. نتایج آنالیز خاک در جدول (۱) نشان داده شده است. کرت‌های زراعی مورد آزمایش در ابعاد ۱۰ متر مربع (۲/۵×۴) تهیه گردید. سپس بذر چغندر قند با تراکم ۹۵ هزار بوته در هکتار در عمق ۵ تا ۸ سانتی‌متری عمق خاک کاشته شد. براساس آنالیز خاک، ۲۲۵

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

| عمق | پتاسیم | فسفر | ازت کل | کربن آلی | درصد اشباع | EC | pH | رطوبت در | رطوبت در | جرم |
|-------|--------|------|--------|----------|------------|------|------|-------------------|-------------------|-------------|
| | | | | | | | | ظرفیت زراعی | ظرفیت زراعی | |
| ۰-۳۰ | ۳۸۴ | ۸/۱۵ | ۷۰ | ۰/۵۵ | ۴۵ | ۰/۳۵ | ۸/۰۷ | ظرفیت زراعی | ظرفیت زراعی | مخصوص ظاهری |
| ۳۰-۶۰ | ۲۹۳ | ۷/۷ | ۷۲ | ۰/۴۸ | ۵۲ | ۰/۳۲ | ۸/۰۷ | نقطه پژمردگی دائم | نقطه پژمردگی دائم | مخصوص ظاهری |

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (۴)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (۵)$$

در رابطه‌های بالا 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 (۶) محاسبه می‌شود.

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (۶)$$

که 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 (۷) برآورد می‌گردد.

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (۷)$$

که 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 (۸) محاسبه می‌شود.

$$Y = B \times HI \quad (۸)$$

که در این رابطه Y عملکرد ریشه، 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 صحت‌سنجی با AquaCrop و CropSyst ابتدا این مدل با استفاده از رابطه (۹) مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت (Geerts & Raes, 2009).

مدل گیاهی CropSyst یک مدل شبیه‌سازی سیستم‌های کشت چند ساله، چند محصوله و با گام زمانی روزانه است که به عنوان ابزاری جهت تحلیل اثر اقلیم، خاک و مدیریت در بهره‌وری سیستم‌های کشت و محیط توسعه یافته‌است (Stockle & Nelson, 1996). در این مدل، رشد روزانه گیاه براساس دو روش تعیین می‌شود. روش اول براساس ارتباط افزایش ماده خشک و تشعشع است که در این روش ماده خشک تولید شده روزانه بوسیله رابطه (۲) شبیه‌سازی می‌شود.

$$G_R = 0.5 \times e \times f \times S_t \quad (۲)$$

که در این رابطه G_R ماده خشک تولیدی روزانه (کیلوگرم بر متر مربع در روز)، e بازده تبدیل ماده خشک برای تابش خورشیدی^۲ (گرم بر مگاژول مربع)، f جزء تابش جذب شده توسط پوشش گیاهی و S_t تابش خورشیدی روزانه (مگاژول بر متر مربع در روز) هستند. بازده تبدیل تابش خورشیدی (e)، به عنوان پارامتر مشخص کننده تولید ماده خشک به ازای هر واحد تابش جذب شده برای هر گیاه یا متغیر، جزء ورودی‌های مدل است. روش دوم ارتباط بین رشد ماده خشک و تعرق براساس نخمین تعرق پتانسیل گیاه است که در این روش ماده خشک تولید شده به وسیله معادله زیر شبیه‌سازی می‌شود.

$$AGB_{PT} = \frac{K_{BT} T_P}{VPD} \quad (۳)$$

که در این رابطه AGB_{PT} رشد وابسته به تعرق (کیلوگرم بر متر در روز)، T_P تعرق واقعی گیاه (کیلوگرم بر متر مربع در روز)، k_{BT} نسبت ماده خشک-تعرق (کیلو پاسکال) و VPD میانگین روزانه کمبود فشار بخار (کیلو پاسکال) هستند.

مدل AquaCrop برای تعیین عملکرد، از تبخیر-تعرق (ET) محاسبه شده (رابطه ۴) 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 ۵).

^۲ Biomass conversion efficiency for solar radiation

$$R^2 = \frac{(\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

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 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 مدل است. هم چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ 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 بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که مدل CropSyst نسبت به تغییرات اکثر پارامترهای ورودی حساسیت متوسط داشت (جدول ۲). البته برخی پارامترها مانند حداکثر عمق ریشه در حالتی که مقدار آن افزایش پیدا کرد حساسیتی بر نتایج مدل نداشت. کاهش اندازه ریشه حساسیت متوسطی بر خروجی این مدل داشت. به همین دلیل این موضوع در واسنجی مدل CropSyst مورد توجه قرار گرفت و مقادیر کاهشی برای ریشه جهت واسنجی مدل در نظر گرفته شد. براساس این روند، طول ریشه از مقدار پیش‌فرض مدل (۲ متر) به ۱/۵ متر کاهش یافت. این نتایج در جدول (۳) قابل مشاهده است. سایر پارامترهای ورودی مدل CropSyst نیز در این جدول نشان داده شده است. تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل AquaCrop پیش از واسنجی انجام شد و برخی نتایج آن در جدول

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (9)$$

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 مقدار آن افزایش و کاهش یافت. سپس مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت بالا، $15 > Sc > 5$ ضریب حساسیت متوسط، $Sc < 5$ حساسیت پایین اندازه‌گیری شد (Geerts et al., 2009).

با استفاده از داده‌های سال زراعی اول واسنجی انجام شد. در مرحله واسنجی، پارامترهای با حساسیت متوسط و بالا آنقدر تغییر داده شدند تا مقادیر آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) به کمترین مقدار و کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) به بیشترین مقدار ممکن رسیدند. سپس صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های زراعی سال‌های دوم و سوم انجام شد و آماره‌های اشاره شده انجام شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۱۰) تا (۱۵) نشان داده شده‌اند.

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

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad (11)$$

$$MBE = \frac{\sum_i (P_i - O_i)}{n} \quad (12)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (14)$$

واسنجی مقدار این پارامتر برابر با پیش فرض در نظر گرفته شد. پارامترهایی که دارای حساسیت متوسط بودند تحت واسنجی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

۲ نشان داده شده است. نتایج به دست 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

جدول ۲- ضریب حساسیت برخی عوامل ورودی مدل های رشد گیاهی AquaCrop و CropSyst برای شبیه سازی عملکرد چغندر قند

| پارامتر | مقدار Sc در حالت +۲۵٪ | مقدار Sc در حالت -۲۵٪ | درجه حساسیت |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| AquaCrop مدل | | | |
| ضریب گیاهی برای تعرق | ۱/۴ | ۱/۱ | کم |
| عمق مؤثر ریشه | ۷/۷ | ۲/۵ | متوسط |
| مدت زمان کاشت تا جوانه زنی | 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 |
| CropSyst مدل | | | |
| ضریب تبخیر تعرق گیاهی | ۵/۲ | ۳/۳ | متوسط |
| ضریب خاموشی نور | ۷/۵ | ۲/۱ | متوسط |
| دمای پایه | ۳/۱ | ۶/۷ | متوسط |
| ضریب جذب نیتروژن | ۱/۶ | ۴/۸ | متوسط |
| حداکثر عمق ریشه | ۱/۱ | ۲/۴ | کم-متوسط |

جدول ۳- مقادیر عوامل گیاهی مورد استفاده در مدل های رشد گیاهی AquaCrop و CropSyst

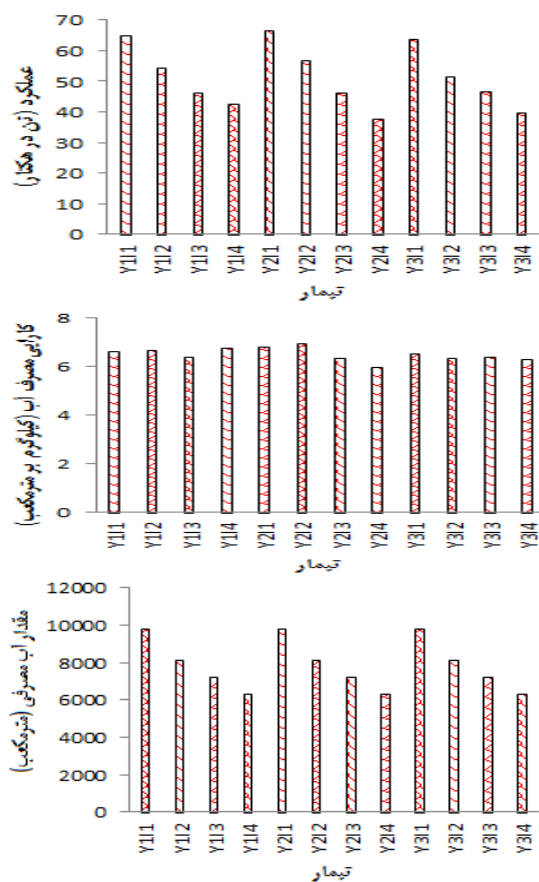
| توضیح عامل | مقدار | واحد | توضیح |
|--|-------|----------------------|-------------|
| AquaCrop مدل | | | |
| تراکم کشت | ۹۵۰۰۰ | گیاه در هکتار | اندازه گیری |
| ضریب رشد کانوپی | ۱۳/۶ | درصد روز | پیش فرض |
| پوشش گیاهی هر گیاهچه هنگام جوانه زنی | ۵ | سانتی متر مربع | پیش فرض |
| مدت زمان کاشت تا جوانه زنی | 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 |
| بهره وری آب نرمال شده | ۱۶/۵ | گرم بر متر مربع | واسنجی |
| پوشش گیاهی اولیه | ۰/۱ | درصد | واسنجی |
| بیشینه رشد کانوپی | ۹۸ | درصد | واسنجی |
| CropSyst مدل | | | |
| ضریب تبدیل زیست توده-تعرق | ۷ | KP.g.m ⁻² | پیش فرض |
| نرخ تبدیل نور به زیست توده | ۳/۵ | Kg.MJ ⁻¹ | پیش فرض |
| نسبت تبخیر تعرق واقعی به پتانسیل که رشد شاخص سطح برگ را محدود می کند | ۰/۹۰ | - | واسنجی |
| نسبت تبخیر تعرق واقعی به پتانسیل که رشد ریش را محدود می کند | ۰/۵۵ | - | واسنجی |
| حداکثر جذب آب | ۸ | mm.d ⁻¹ | واسنجی |
| ضریب تبخیر تعرق گیاهی | ۱/۰۵ | - | واسنجی |
| ضریب خاموشی نور | ۰/۵ | - | پیش فرض |
| دمای پایه | ۱ | °C | پیش فرض |
| حداکثر دما | ۲۵ | °C | پیش فرض |
| ضریب جذب نیتروژن | ۱/۳ | - | واسنجی |
| حداکثر عمق ریشه | ۱/۵ | M | واسنجی |

شده در دوره‌های آبیاری I1, I2, I3 و I4 به ترتیب برابر با ۱/۹۲، ۲/۱۱، ۱/۱۵ و ۰/۵۸ تن در هکتار بود.

نتایج مقایسه عملکرد چغندرقد تحت شرایط مختلف دور آبیاری و مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل CropSyst در شکل (۲) نشان داده شده است. براساس این نتایج، حداقل و حداکثر اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۵/۹۸ و ۱/۱۲ تن بر هکتار بود. این نتایج به ترتیب برای تیمارهای Y2I1 و Y2I4 مشاهده شد. تفکیک نتایج برای هر کدام از دوره‌های آبیاری I1, I2, I3 و I4 نشان داد که متوسط اختلاف عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای چغندرقد به ترتیب برابر با ۵/۸، ۴/۵، ۳/۲ و ۲/۱ تن بر هکتار بود. این نتایج نشان داد که با افزایش تنش آبی، دقت مدل CropSyst افزایش یافت. این نتایج براساس ماهیت تشعشع-محور بودن این مدل قابل توجیه است. بر خلاف مدل‌های گیاهی دیگر، مدل CropSyst عملکرد را براساس نور دریافتی شبیه‌سازی می‌کند. البته در دور آبیاری I1، مقدار عملکرد برداشت شده در مزرعه به طور متوسط برابر با ۶۵/۱ تن در هکتار بود. در حالی که این مقدار برای دور آبیاری I4 برابر با ۳۸/۶ تن بر هکتار بود. با توجه به اینکه در دوره‌های آبیاری بالا مقدار عملکرد گیاه زراعی نیز به شدت کاهش می‌یابد؛ اختلاف بین مقدار شبیه‌سازی شده و مشاهداتی کمتر از زمانی است که آبیاری با دور زمانی کمتر صورت می‌گیرد. با این وجود، دقت این مدل برای دور آبیاری بالا از سایر مدل‌های زراعی آب-محور مانند AquaCrop بهتر بود. اکثر محققان مانند هنگ و همکاران (Heng et al., 2009) و اندرزیان و همکاران (Andarzian et al., 2011) کاهش دقت این گونه مدل‌ها را در شرایط کم‌آبیاری و یا افزایش دور آبیاری گزارش کرده‌اند.

نتایج مقایسه کارایی مصرف آب در دو حالت شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای هر دو مدل گیاهی در شکل (۳) نشان داده شده است. براساس این نتایج، بیشترین و کمترین مقدار این پارامتر به ترتیب برابر با ۶/۹ و ۵/۹ کیلوگرم بر مترمکعب بود. متوسط اختلاف نتایج مشاهداتی و شبیه‌سازی کارایی مصرف آب با مدل CropSyst برابر با ۰/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. براساس نتایج شبیه‌سازی شده با مدل CropSyst، بیشترین و کمترین مقدار کارایی مصرف آب به ترتیب برابر با ۷/۱ و ۵/۸ کیلوگرم بر متر مکعب بود. این نتایج برای مدل AquaCrop به ترتیب برابر با ۷/۱ و ۵/۹ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین

مقادیر عملکرد، کارایی مصرف آب مشاهداتی و مقدار آب مصرفی در هر چهار تیمار آبیاری (I1: ۶، I2: ۹، I3: ۱۲ و I4: ۱۵ روز) و سه سال زراعی (Y1: سال اول، Y2: سال دوم و Y3: سال سوم) در شکل (۱) نشان داده شده است. مقایسه مقادیر عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با AquaCrop در شکل (۱) نشان داده شده است.

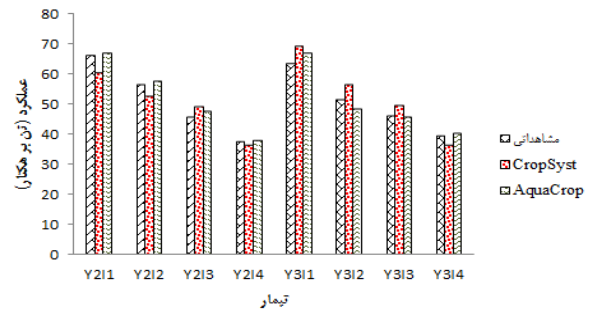


شکل ۱- نتایج عملکرد و کارایی مصرف آب مشاهداتی و مقدار آب مصرفی چغندر برای تیمارهای مختلف (I1: 6، I2: 9، I3: 12، I4: 15 روز برای دور آبیاری و Y1: سال اول، Y2: سال دوم و Y3: سال سوم کاشت می‌باشد).

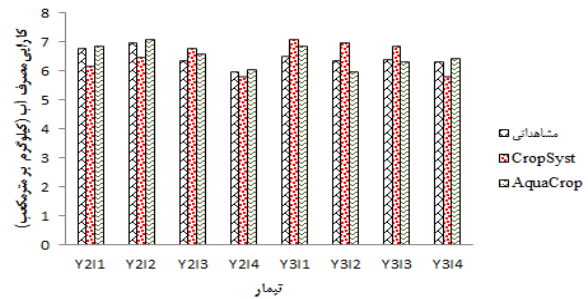
براساس این نتایج، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر با ۰/۳۷ و ۳/۱۸ تن در هکتار بود. متوسط اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نیز برابر با ۱/۴۴ تن در هکتار بود. گرچه روند منظمی بین افزایش تنش آبی و مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده توسط این مدل مشاهده نشد لیکن در سال اول با افزایش دور آبیاری، خطای برآورد عملکرد در دو تیمار I2 و I3 افزایش یافت. متوسط اختلاف بین عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی

مقادیر آماره MBE برای پارامتر عملکرد در مدل های AquaCrop و CropSyst نشان داد که هر دو مدل دچار خطای کم برآوردی شدند. مقایسه آماره RMSE برای هر دو مدل مورد استفاده شده نشان داد که دقت مدل AquaCrop بهتر از CropSyst بود. این نتایج با مقایسه آماره NRMSE برای این دو مدل نیز مشاهده شد. گرچه مقادیر NRMSE برای این دو مدل کمتر از ۰/۱ بود و نشان داد که دقت هر دو مدل در برآورد عملکرد چغندر قند عالی بود. کارایی هر دو مدل مورد استفاده نیز برای تعیین عملکرد چغندر قند عالی بود. نتایج به دست آمده برای کارایی مصرف آب نشان داد که هر دو مدل در تعیین کارایی مصرف آب نشان داد که دقت مدل AquaCrop بهتر از CropSyst بود. کارایی دو مدل گیاهی مورد استفاده برای شبیه سازی کارایی مصرف آب عالی بود (جدول ۴). مقایسه آماره R2 برای عملکرد شبیه سازی شده توسط دو مدل AquaCrop و CropSyst نشان داد که همبستگی بین نتایج به دست آمده از مدل AquaCrop با مقادیر مشاهداتی بیشتر بود (شکل ۴). نتایج این آماره برای پارامتر کارایی مصرف آب شبیه سازی شده با مدل CropSyst بسیار ضعیف بود در حالی که همبستگی بین مقادیر شبیه سازی شده مصرف آب توسط مدل AquaCrop و مقادیر مشاهداتی قابل قبول بود.

شد. متوسط اختلاف بین کارایی مصرف آب شبیه سازی شده با AquaCrop و مقادیر مشاهداتی نیز برابر با ۰/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد.



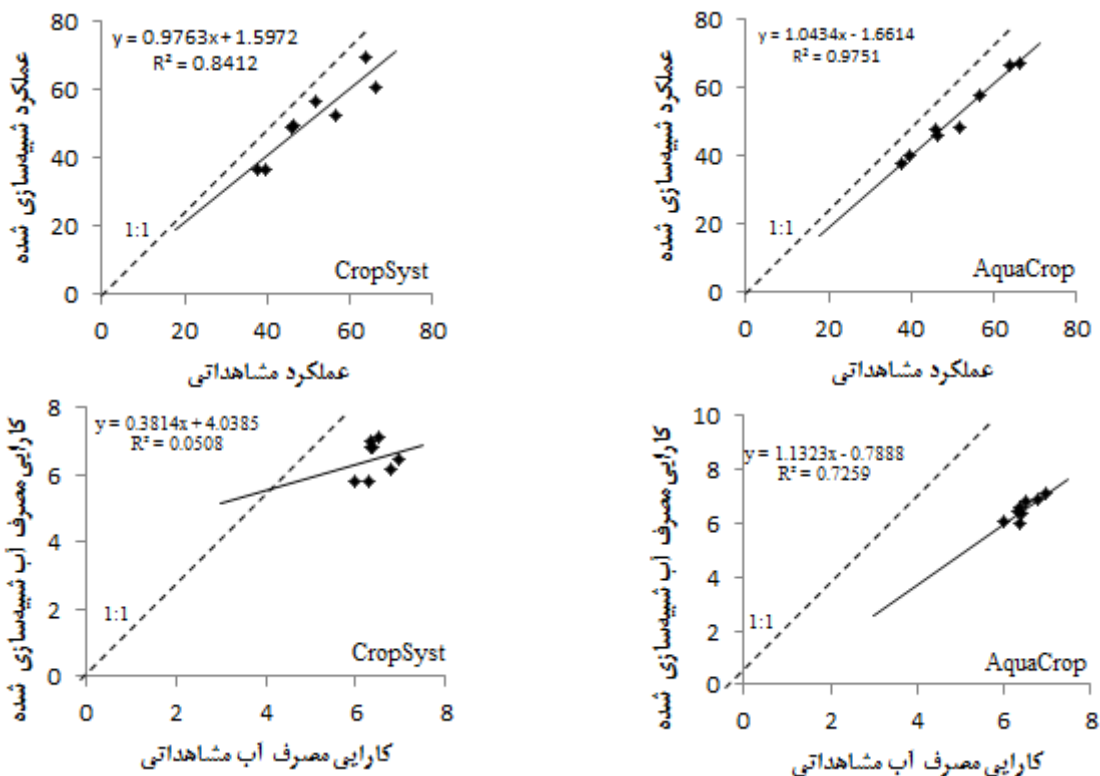
شکل ۲- نتایج عملکرد مشاهداتی چغندر نسبت به مقادیر شبیه سازی شده با مدل های AquaCrop و CropSyst برای تیمارهای مختلف (I1، I2، I3، I4: ۱۲ و ۱۵ روز برای دور آبیاری و Y2: سال دوم و Y3: سال سوم کاشت می باشد).



شکل ۳- نتایج کارایی مصرف آب مشاهداتی چغندر نسبت به مقادیر شبیه سازی شده با مدل CropSyst برای تیمارهای مختلف (I1، I2، I3، I4: ۱۲ و ۱۵ روز برای دور آبیاری و Y2: سال دوم و Y3: سال سوم کشت می باشد).

جدول ۴- مقادیر آماره های به دست آمده بین مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده با مدل های رشد گیاهی AquaCrop و CropSyst

| d | EF | NRMSE | RMSE | MBE | پارامتر | نام مدل گیاهی |
|------|------|-------|------|-------|-------------------------------------|---------------|
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۳ | ۱/۷۹ | -۰/۵۵ | عملکرد (تن در هکتار) | AquaCrop |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۳ | ۰/۲۱ | -۰/۰۶ | کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) | AquaCrop |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۸ | ۴/۲۳ | -۰/۳۸ | عملکرد (تن در هکتار) | CropSyst |
| ۰/۹۹ | ۰/۹۹ | ۰/۰۷ | ۰/۵۰ | -۰/۰۴ | کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) | CropSyst |



شکل ۴- نتایج همبستگی بین مقادیر عملکرد (تن بر هکتار) و کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل‌های گیاهی AquaCrop (سمت راست) و CropSyst (سمت چپ)

مترمکعب بود. مقایسه آماره R^2 بین مقادیر عملکرد و کارایی مصرف به دست آمده توسط دو مدل مورد نظر نشان داد که نتایج مدل AquaCrop همبستگی بیشتری با مقادیر مشاهداتی داشت. براساس کلیه نتایج، استفاده از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- ابراهیمی‌پاک، ن. ع. ۱۳۸۹. تعیین واکنش عملکرد چغندر قند (Ky) به کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد. چغندر قند. ۲۶(۱): ۶۷-۷۹.
- ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، تافته، آ. ۱۳۹۶. تعیین تابع تولید محصول- آب مصرفی چغندر قند در قزوین، چغندر قند، ۳۳(۱): ۶۳-۴۷.
- ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، مستشاری، م. ۱۳۹۱. الف، ارزیابی مدیریت مصرف آب آبیاری و کود بور در جهت افزایش کارایی مصرف آب چغندر قند، مدیریت آب و آبیاری، ۲(۲): ۶۷-۵۳.
- ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، مستشاری، م. ۱۳۹۱. ب، برهمکنش تنش آبی و کودهای محتوی روی، منگنز و بور بر عملکرد و

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده برای عملکرد و کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده توسط دو مدل AquaCrop و CropSyst در دوره‌های آبیاری متفاوت در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در اکثر تیمارها دقت بهتری برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب داشت. مقایسه نتایج آماره‌های MBE، RMSE و NRMSE برای این دو مدل نشان داد که گرچه این دو مدل دچار خطای کم‌برآوردی شدند لیکن دقت مدل AquaCrop بهتر از CropSyst بود. به طوری که مدل AquaCrop به طور متوسط در برآورد عملکرد خطایی برابر با ۱/۷ تن در هکتار و مدل CropSyst خطایی برابر با ۴/۲ تن در هکتار داشتند. این نتایج برای پارامتر کارایی مصرف آب نیز به دست آمد و برتری مدل AquaCrop بر CropSyst را نشان داد. کارایی هر دو مدل برای تعیین عملکرد و کارایی مصرف آب قابل قبول بود. خطای مدل AquaCrop در تعیین کارایی مصرف آب برابر با ۰/۲۱ کیلوگرم بر متر مکعب و خطای CropSyst برابر با ۰/۵ کیلوگرم بر

- AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy*. 101: 469-476.
- Farre, F., & Faci, J. M., 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*. 96: 384-394.
- Geerts S., Raes D., Garcia, M., Miranda, R. & Cusicanqui, J. A. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with FAO-AquaCrop. *Agronomy*. 101: 499-508.
- Geerts, S., & Raes, D. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96: 1275-1284.
- Heng, L. k., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T. & Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize. *Agronomy*. 101(3): 488-498.
- 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.
- Moriondo, M., Maselli, F. & Bindi, M. 2007. A Simple Model of Regional Wheat Yield Based on NDVI data. *European Journal of Agronomy*. 26: 266-274.
- Pala, M., Stockle, C. O. & Harris, H. C. 1996. Simulation of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum) growth under different water and nitrogen regimes in a Mediterranean environment using CropSyst. *Agricultural Systems*. 51(2): 147-163.
- Singh, A. K., Tripathy, R. & Chopra, U. K. 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*. 95(7): 776-786.
- Stockle, C. O. & Nelson, R. L. 1996. Cropsyst User's manual (Version 2.0). Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA, USA.
- 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.
- کارایی مصرف آب چغندر قند، پژوهش آب در کشاورزی، ۲۶(۳): ۲۸۹-۳۰۲.
- محسنی، م.، منتظر، ع. ا.، رحیمی خوب، ع. ۱۳۸۸. ارزیابی مدل گیاهی CropSyst در شبیه سازی اثر توامان آب و نیتروژن بر عملکرد و بهره‌وری آب گندم. آبیاری و زهکشی. ۳(۱): ۱۲۵-۱۱۳.
- نظری فر، م. ه.، مومنی، ر. ۱۳۹۰. اعتباریابی و ارزیابی مدل رشد گیاهی CropSyst در تعیین الگوی کشت مناسب در شرایط کم آبیاری-مطالعه موردی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۵(۵۶): ۴۹-۶۱.
- Ahmadee, M., Khashei Siuki, A., and Hashemi, S. R., 2014. The effect of magnetic water and calcific and potasic zeolite on the yield of *Lepidium Sativum* L, *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(6): 2051-2060.
- Albaji, M., Boroomand Nasab, S., Golabi, M., Ahmadee, M. 2015. Application Possibilities of Different Irrigation Methods in Hofel Plain, 25(1): 13-23.
- Albaji, M., Golabi, M., Hooshmand, A. R., Ahmadee, M. 2016. Investigation of surface, sprinkler and drip irrigation methods using GIS, *Jordan Journal of Agricultural Science*, 12(1): 211-222.
- 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.
- Andarziana B., Bannayanb M., Stedutoc P., Mazraeha H., Barati M. E., Barati, M. A. & Rahnama A. 2011. Validation, and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*. 100:1-8.
- 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. & 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.
- Confalonieri, R., Acutis, M., Bellocchic, G. & Donatelli, M. 2009. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. *Ecological Modeling*. 220: 1395-1410.
- Farahani H. J., Izzi G., Steduto P. and Oweis T Y 2009. Parameterization and evaluation of

Simulation of Sugar Beet Yield and Water Use Efficiency under Different Irrigation Period

H. Sayyahi¹, A. Egdernezhad^{2*} and N.A. Ebrahimipak³

Abstract

Due to importance of sugar beet in food industry in Iran, it is necessary to study the reply of the crop to different irrigation water. Since applying farm studies need time and costs, it is important to use cropping model. To achieve the aim, AquaCrop and CropSyst models were evaluated for simulation of sugar beet yield under different irrigation scenarios. To do this end, data collected from Feiz Abad agricultural research station in Qazvin from four irrigation periods (I1: 6, I2: 9, I3: 12 and I4: 1 day) were used. Results showed that AquaCrop accuracy was better than CropSyst. In average, AquaCrop and CropSyst error for simulation of sugarbeet yield were 1.7 ton.ha⁻¹ and 4.2 kg.ha⁻¹, respectively. Results for water use efficiency showed the superiority of AquaCrop. Efficiencies of both crop models for yield and water use efficiency were acceptable. AquaCrop and Cropsyst error for simulation of water use efficiency were 0.21 kg.m⁻³ and 0.50 kg.m⁻³, respectively. Comparison of R² for both models revealed that AquaCrop results had better correlation with observed data compared to CropSyst ones. According to all results, it is proposed to use AquaCrop for simulation of sugarbeet.

Keywords: Crop Modeling, Deficit Irrigation, Radiation-driven Model, Water-driven Model.

¹ M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

² Assistant professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
(*Corresponding Author Email: a_eigder@ymail.com)

³ Associated professor, Department of irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

Received: 22 March 2020

Accepted: 26 May 2020

