نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۰ / شماره ۳ / ۱۳۹۵
DOI: http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2016.107156

ارزیابی عملکرد سویا با مدل AquaCrop تحت تاثیر مدیریت شوری و کم آبیاری

سیده طیبه حسینی، مجتبی خوش روش[۱] *، میرخالق ضیاتبار احمدی و علی قدمی فیروزآبادی

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.
tayyebeh.hosseini@gmail.com
استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.
khoshravesh_m24@yahoo.com
استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.
mzahmadi@yahoo.com
استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران.
aghadami@gmail.com

چکیده

مدل‌های گیاهی در شبیه‌سازی عملکرد محصول با سناریوهای مختلف کم آبیاری و شوری مناسب می‌باشند. در این پژوهش، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست توده گیاه سویا، تحت تاثیر سطوح مختلف شوری و کم آبیاری در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۰ در شهرستان گرگان مورد بررسی قرار گرفت. مدل با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۰ واسنجی و با داده‌های سال ۱۳۹۱ صحت‌سنجی شد. آزمایش شامل سه سطح آب آبیاری به میزان ۱۰۰٪، ۷۵٪ و ۵۵٪ نیاز گیاه و سه سطح شوری ۰/۷، ۵ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر بود. شاخص‌های آماری RMSE، E و d برای صحت‌سنجی مدل به ترتیب، برای عملکرد دانه برابر با ۰/۲۲۵ تن بر هکتار، ۰/۸۸ و ۰/۹۷ و برای زیست توده برابر با ۰/۷۱۸ تن بر هکتار، ۰/۷۷ و ۰/۹۵ به‌دست آمد. نتایج نشان داد که با کاهش مقدار آب آبیاری و افزایش سطح شوری، عملکرد گیاه سویا کاهش می‌یابد. آنالیز حساسیت نشان داد مدل AquaCrop نسبت به ضریب کاهش تاج پوشش گیاهی در زمان پیری و ماکزیمم پوشش گیاهی حساس‌تر از سایر پارامترها است.

واژه‌های کلیدی: آب شور، آنالیز حساسیت، شبیه‌سازی عملکرد، شاخص‌های آماری.

۱- آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.
*- دریافت: دی ۱۳۹٤ و پذیرش: شهریور ۱۳۹۵

مقدمه

کشور ایران در ناحیه آب و هوایی گرم و خشک واقع شده است و میزان بارندگی سالیانه آن کمتر از یک سوم متوسط بارندگی سالیانه جهان است. از طرف دیگر رشد روز افزون جمعیت در دهه‌های اخیر و همچنین نیاز به مواد غذایی سبب شده سطح زیر کشت افزایش یافته و منابع آب شیرین سطحی و زیرزمینی بیش از حد مصرف شده و در حالت بحرانی قرار گیرند (نوری و همکاران، ۱۳۸۷). با توجه به کمبود منابع آب در کشور، شناخت روش‌های مدیریتی و زراعی اصلاحی که بتوان از آب‌هایی با کیفیت پایین‌تر (شور و لب‌شور) استفاده نمود، ضرورت می‌یابد (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۳).

پیش از به‌کارگیری آب شور برای آبیاری، عواملی نظیر در دسترس بودن منابع آب آبیاری (هم شور و هم غیر شور)، خصوصیات منطقه مورد نظر، انتخاب گیاه و روش‌های مدیریتی را باید مد نظر قرار داد (نوری و همکاران، ۱۳۸۷). میزان تاثیر شوری بر گیاه به فاکتورهای متعددی از جمله نوع گونه و ژنوتیپ، مرحله رشد گیاه، ترکیب نمک و عوامل محیطی بستگی دارد (گرینوی و مانس، ۱۹۸۰).

محققان در چند دهه اخیر مدل‌های مختلفی را به‌منظور شبیه‌سازی رشد گیاه، حرکت و انتقال آب و املاح در خاک معرفی کرده‌اند (خرسند و همکاران، ۱۳۹۳). دقت این مدل‌ها تا حد زیادی به‌دقت داده‌های مورد نیاز ورودی بستگی دارد. در صورتی‌که این مدل‌ها به‌درستی واسنجی و صحت‌یابی شوند، بدون محدودیت‌های زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای و صرف هزینه و زمان زیاد، می‌توانند جهت برآورد عملکرد مورد انتظار محصول، برنامه‌ریزی آبیاری و ارزیابی سناریوهای مدیریت آبیاری به‌کار گرفته شوند (اکبری و همکاران، ۱۳۸۹). یکی از مدل‌های تخمین عملکرد محصول، مدل AquaCrop است. نسخه اولیه این مدل در سال ۲۰۰۷ برای شبیه‌سازی عملکرد محصول و حرکت آب در خاک معرفی شد که در آن تاثیر تنش شوری، بر عملکرد محصول در نظر گرفته نشده بود. در نسخه ٤ که در سال ۲۰۱۲ معرفی شد، مدل اصلاح و تاثیر تنش شوری و شبیه‌سازی انتقال املاح در نیمرخ خاک نیز مد نظر قرار گرفت (راس و همکاران، ۲۰۱۲). مدل مذکور ضمن استفاده از تعداد نسبتا اندکی از پارامترهای معین که مستقیما قابل اندازه‌گیری هستند، دارای توانایی بالا در شبیه‌سازی است (استدوتو و همکاران، ۲۰۰۹؛ راس و همکاران،۲۰۰۹). مدل AquaCrop برای محدوده وسیعی از محصولات زراعی شامل علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه‌ای، روغنی و غده‌ای به‌کار می‌رود (افشار و همکاران، ۱۳۹۰).

تشریح مدل AquaCrop

استدوتو و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که مدل AquaCrop از معادله پیشین دورنباس و همکاران (۱۹۷۹) (معادله ۱) با تفکیک نمودن ET_a به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تعرق (T_a) و مجزا نمودن عملکرد نهایی (Y) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت توسعه یافته است. جدا نمودن ET_a به E_s و T_a سبب می‌شود که بخش غیر موثر آب در تولید محصول (تبخیر) در نظر گرفته نشود. این موضوع به‌ویژه زمانی که هنوز پوشش گیاهی تکمیل نشده، حایز اهمیت است.

$$\left(\frac{Y_m - Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(\frac{ET_m - ET_a}{ET_m}\right) \qquad (۱)$$

که در آن:

Y_m و Y_a، به‌ترتیب عملکرد حداکثر و واقعی محصول، ET_m و ET_a به‌ترتیب تبخیر و تعرق حداکثر و واقعی گیاه و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی در تبخیر و تعرق است.

میزان عملکرد از ضرب کردن زیست توده در شاخص برداشت مرجع بدست می‌آید و مقادیر شاخص برداشت مرجع با توجه به میزان آب موجود وابسته به زمان، شدت و مدت تنش خشکی است (جونز ، ۲۰۰۰؛ سیاو و همکاران، ۲۰۰۹). برای محاسبه عملکرد از زیست

توده، مدل AquaCrop از رابطه زیر استفاده می‌کند (راس و همکاران، ۲۰۱۲):

$$Y = f_{HI} * HI_0 * B \quad (۲)$$

که در آن:

HIo ، شاخص برداشت مرجع (طی مرحله بلوغ فیزیولوژیک)، Y، عملکرد دانه و f_{HI}، ضریبی است که شاخص برداشت مرجع را تنظیم می‌کند.

داده‌های ورودی مدل به چهار دسته داده‌های اقلیمی، داده‌های گیاهی، داده‌های خاک و داده‌های مدیریتی شامل مدیریت آبیاری و مدیریت مزرعه تقسیم می‌شوند.کیانی و اسدی (۱۳۸۷) واکنش گندم را تحت مقادیر مختلف کمی و کیفی آب به مدت دو سال زراعی (۸۲-۱۳۸۰) در شمال گرگان مورد ارزیابی قرار داده و سپس به استناد داده‌های جمع آوری شده و اجرای مدل شبیه‌سازی SWAP به مدت ۱۰ سال روند تغییرات شوری در نیمرخ خاک مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش شامل چهار سطح آب آبیاری ۵۰ (W1)، ۷۵ (W2)، ۱۰۰ (W3) و ۱۲۵ (W4) درصد نیاز گیاه و چهار سطح شوری با میانگین ۱/۵ (S1)، ۸/۵ (S2)، ۱۱/۵ (S3) و ۱۴/۲ (S4) dS/m (دسی زیمنس بر متر) بود. نتایج نشان داد که عملکرد گندم با کاهش ۲۵ درصد از آب مورد نیاز گیاه، در حد نه درصد و با کاربرد آب شور (۱۴ دسی زیمنس بر متر) در حدود ۱۰ درصد کاهش دارد.

نوری و همکاران (۱۳۸۷) مطالعه‌ای با هدف بررسی اثرات آب‌های با شوری‌های متفاوت بر تعدادی از محصولات زراعی در کشور ایران انجام دادند. در استان مازندران تحقیقات برای محصول سویا در سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۷۸ صورت گرفته که بازه شوری بین ۰/۶ تا ۱۰ دسی زیمنس بر متر بود. بازه تغییرات عملکرد محصول سویا ۰ تا ۹۸۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار به‌دست آمد. نتایج نشان داد که در آبی با شوری ۱۰ دسی زیمنس بر متر بذر سویا قادر به جوانه زدن نبوده و همچنین با افزایش شوری مقدار محصول کاهش خواهد یافت.

خرسند و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد محصول گندم زمستانه (ارقام روشن و قدس)، رطوبت و شوری نیمرخ خاک، تحت تنش شوری با سه سطح S_1، S_2 و S_3، به‌ترتیب ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر و تنش آبی با چهار سطح I_1، I_2، I_3 و I_4، به‌ترتیب ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه با سه تکرار، طی سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ در منطقه بیرجند پرداختند. بر اساس نتایج، مدل AquaCrop عملکرد دانه را برای هر دو رقم با دقت زیاد شبیه‌سازی کرد. متوسط خطای نسبی تخمین عملکرد دانه در مرحله واسنجی، برای ارقام روشن و قدس به‌ترتیب ۲/۹۸، ۴/۸۲ درصد محاسبه شد.

محمدی و همکاران (۱۳۹۴) به‌منظور اعتبارسنجی مدل AquaCrop در منطقه بیرجند، آزمایشی در قالب طرح کرت‌های خردشده به‌صورت فاکتوریل انجام دادند که در آن شوری آب آبیاری در سه سطح (S_1، S_2 و S_3 به‌ترتیب معادل ۴/۱، ۵/۴ و ۶/۹ دسی زیمنس بر متر) به عنوان کرت‌های اصلی و دو رقم گندم (قدس و روشن) و مقدار آب آبیاری در چهار سطح (I_1، I_2، I_3 و I_4 به ترتیب معادل ۱۲۵، ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) به‌صورت فاکتوریل به‌عنوان کرت‌های فرعی اجرا گردید. عملکرد محصول، زیست توده و کارایی مصرف آب برای دو رقم گندم در شرایط شوری و کم آبی به خوبی شبیه-سازی شد به‌طوری که آماره‌های RMSE، ME، d، CRM و R^2 در شبیه‌سازی عملکرد محصول برای رقم روشن به ترتیب ۷/۰۹، ۱۵/۶۱، ۰/۹۷، ۰/۰۰۱ و ۰/۹ و برای رقم قدس به ترتیب ۸/۱۶، ۱۷/۴۶، ۰/۹۸، ۰/۰۰۴- و ۰/۸۷ به دست آمد.

حسن و همکاران (۲۰۰۵) آزمایشی به منظور مطالعه کاربرد آب شور زهکش‌ها برای آبیاری سویا در مصر انجام دادند. آب شور زهکش (شش تا هشت دسی زیمنس بر متر) و آب کانال(۰/۴ تا ۰/۷ دسی زیمنس بر متر) به‌صورت متناوب و مخلوط دو نوع آب (دو دسی زیمنس بر متر) استفاده شدند. آبیاری با آب شور زهکش

منجر به کاهش مصرف آب سویا گردید. عملکرد سویا در تیمارهایی که در تمام فصل از آب شور، متناوب از آب شور و آب کانال و مخلوط دو نوع آب استفاده شدند به‌ترتیب برابر ۵۰، ٦۹ و ۸۰ درصد تیمار کنترل بود. شوری محلول خاک در تیمارهای اشاره شده از ۰/۸ دسی زیمنس بر متر در زمان کاشت به ترتیب به ۱۳/۹، ۱۳/۳ و ۵/۸ برابر در زمان برداشت افزایش یافت.

استدوتو و همکاران (۲۰۰۹) به معرفی مفاهیم و اصول زیربنایی مدل AquaCrop و سپس به آزمایش مدل برای ذرت پرداختند. اساس کار در این طرح، اعمال استراتژی‌های کم آبیاری قبل از دوران گل‌دهی و آبیاری کامل بعد از دوران گل‌دهی بود که ماکزیمم خطای عملکرد محصول شبیه‌سازی‌شده نسبت به واقعی ۲٤ درصد برآورد شد. پاریدس و همکاران (۲۰۱٤) چندین آزمایش مزرعه‌ای ازجمله کم آبیاری و آبیاری کامل بر روی ذرت در منطقه ریباتجو[1] پرتغال انجام دادند و به بررسی اثرات تنش آب بر عملکرد با استفاده از مدل AquaCrop پرداختند. نتایج کلی نشان از قابلیت بالای مدل AquaCrop برای برآورد زیست‌توده و عملکرد ذرت در شرایط کم آبیاری می‌باشد.

کومار و همکاران (۲۰۱٤) به بررسی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری آب چهار رقم گندم، شامل سه رقم مقاوم به شوری (KRL-210, KRL-1-4, KRL-19) و یک نوع غیر مقاوم به شوری (HD-2894) برای رشد در سطوح شوری‌های مختلف در مزرعه تحقیقات کشاورزی هند در طول سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۹ و ۲۰۱۱-۲۰۱۰ پرداختند. مدل با استفاده از داده آزمایشی سال ۲۰۱۰-۲۰۰۹ واسنجی و با داده‌های سال ۲۰۱۱-۲۰۱۰ اعتبارسنجی شد. آبیاری با آب شور شامل ٤، ۸ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر و آب زیرزمینی (۱/۵ دسی زیمنس بر متر در سال ۲۰۱۰-۲۰۰۹ و ۱/۷ دسی زیمنس بر متر در سال ۲۰۱۱-۲۰۱۰) صورت گرفت. مقادیر بازده مدل (E)، شاخص توافق (d) و ضریب تعیین (R^2) به ترتیب، برای عملکرد دانه برابر ۰/۸۵، ۰/۹٦، ۰/۹٤ و برای زیست توده برابر ۰/۷، ۰/۹۵، ۰/۹۵، برای تمام انواع و سطوح شوری به‌دست آمد. مشاهده شد که مدل AquaCrop در پیش‌بینی مقادیر عملکرد دانه نسبت به زیست توده و بهره‌وری آب برای همه رقوم و سطوح شوری بهتر عمل کرده است.

سویا از جمله گیاهان روغنی حساس به شوری محسوب می‌شود و آبیاری با آب‌های شور پتانسیل بالای تولید آن را در معرض خطر قرار می‌دهد (قنبری مفتی کلایی و همکاران، ۱۳۸۹). پروتئین و لیپید قسمت اعظم ارزش تجاری سویا را شامل می‌شوند و حدود ٦۰ درصد دانه را تشکیل می‌دهند. مقدار پروتئین دانه به دلیل تغییرات آب و هوایی، تنش‌های محیطی از جمله شوری و اختلافات ژنتیکی متغیر است (اسپچ و همکاران، ۲۰۰۱). در خاک‌های شور ابتدا رشد رویشی گیاه و سپس توسعه برگ‌ها متاثر شده و اندازه گیاه کوچک می‌شود و در نهایت شوری خاک می‌تواند منجر به کاهش عملکرد در گیاهان گردد (قنبری مفتی کلایی و همکاران، ۱۳۹۱). هدف از انجام این پژوهش ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در شبیه‌سازی واکنش عملکرد دانه و زیست توده گیاه سویا تحت تنش‌های شوری و کم آبی در شهرستان گرگان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش مزرعه‌ای بر روی گیاه سویا، در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ به‌منظور بررسی تاثیر شوری و کم آبیاری بر عملکرد دانه و زیست توده محصول در ایستگاه تحقیقات کشاورزی شهرستان گرگان وابسته به مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان صورت گرفت. این منطقه از نظر اقلیمی (با توجه به مدل تعیین اقلیم دومارتن) جزو مناطق نیمه مرطوب کشور محسوب می‌شود. مشخصات ایستگاه مذکور شامل طول جغرافیایی ٥٤ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳٦ درجه

[1] Ribatejo

و ٤٥ دقیقه شمالی، ارتفاع ۵/۵ متر از سطح دریا می‌باشد. در این ایستگاه، متوسط میزان بارندگی سالانه ٥٢٧/٤ میلی‌متر و میانگین بیشترین و کمترین درجه حرارت روزانه به ترتیب ۳۲/۵ و ۱۳/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در این پژوهش، سه سطح آب آبیاری ۱۰۰٪ (I_1)، ۷۵٪ (I_2) و ۵۵٪ (I_3) آب موردنیاز گیاه و سه سطح شوری ۰/۷ (S_1)، ۵ (S_2) و ۱۰ (S_3) دسی‌زیمنس بر متر با سه تکرار مورد ارزیابی قرار گرفت. هر تیمار در یک کرت به ابعاد دو در سه متر کشت شد و آرایش کاشت ۱۲ در ۵۰ سانتی‌متر با تراکم ١٦٦٦٦٧ بوته در هکتار بود. مقدار نیاز آبیاری بر اساس بیلان وزنی آب صورت گرفت و بقیه تیمارهای کم آبیاری بر اساس درصدی از تیمار آبیاری کامل، آبیاری شدند.

در آبیاری کامل، مقدار نیاز آبیاری بر پایه رابطه زیر تعیین و بسته به نوع تیمار مورد بررسی هر بار درصدی از این مقدار اعمال شد.

$$D_n = \sum_{i=1}^{m}\left[\frac{(\theta_{Fci} - \theta_{1i}) \times Bd_i \times D_i}{Bd_w \times 100}\right] \quad (۳)$$

که در آن:

θ_{FCi} درصد مقدار رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی، θ_{1i} درصد میزان رطوبت وزنی در خاک پیش از آبیاری، D_i عمق خاک آبیاری شده به میلی‌متر و Bd_i و Bd_w چگالی خاک و آب بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

کشت در تاریخ‌های ۱۳۹۰/۳/۲۷ و ۱۳۹۱/۳/۱۲ تحت شرایط آبیاری یکسان و به مقدار ۳۷۳ میلی‌متر برای تیمار I_1، ۲۸۰ میلی‌متر برای تیمار I_2 و ۲۰۵ میلی‌متر برای تیمار I_3 صورت گرفت. مقدار بارندگی در سال ۱۳۹۰ برابر ۷۸/۲ میلی‌متر و در سال ۱۳۹۱ برابر ١٦٦/١ میلی‌متر بود.

داده‌های اقلیمی

متغیرهای ورودی هوا برای اجرای مدل عبارتند از: دمای حداکثر و حداقل روزانه، بارش روزانه، رطوبت نسبی حداکثر و حداقل، سرعت باد، ساعات آفتابی و میانگین سالانه غلظت CO_2 اتمسفر.

داده‌های دمای روزانه و مقدار بارندگی روزانه برای محاسبه ET_o از ایستگاه تحقیقات شهرستان گرگان که در نزدیکی مزرعه محل آزمایش قرار داشت، گرفته شد. برای محاسبه تبخیر و تعرق (ET_o) از نرم‌افزار $ET_oCalculator$ استفاده شد که روش فائو-پنمن-مانتیث، مبنای محاسبات این مدل می‌باشد. داده‌های ورودی نرم‌افزار $ET_oCalculator$ شامل ماکزیمم دمای هوا (T_{max})، مینیمم دمای هوا (T_{min})، رطوبت نسبی بیشینه (RH_{max})، رطوبت نسبی کمینه (RH_{min})، ساعت روشنایی در روز و سرعت باد می‌باشد. به‌منظور ایجاد فایل اقلیمی، داده‌های تبخیر و تعرق گیاه مرجع و همچنین دمای حداقل و حداکثر که خروجی‌های نرم‌افزار $ET_oCalculator$ است به مدل AquaCrop معرفی و آمار بارندگی نیز وارد مدل شد.

داده‌های گیاهی

داده‌های گیاهی ورودی به مدل شامل پارامترهای ثابت و داده‌های ویژه کاربر می‌باشند که مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت مانند بهره‌وری آب نرمال شده برای اکثر گیاهان زراعی (مانند گندم، جو، ذرت، پنبه و سویا) به‌صورت پیش‌فرض در مدل وجود دارد. این پارامترها با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند. این پارامترها با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده‌اند و در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند (گیرتز و همکاران، ۲۰۰۹). با این حال در مدل AquaCrop این پارامترها در شرایط تنش آبی و شوری از طریق تاثیر ضرایب حساسیت گیاه به کم آبی و شوری (Ks_{sen}، $Ks_{exp,w}$، Ks_{sto} و $Ks_{sto,salt}$) تعدیل می‌شوند. از طرف دیگر، پارامترهای گیاهی متغیر در شرایط مختلف مقادیری متفاوت داشته و مقادیر آن‌ها به مدیریت مزرعه بستگی دارند.

داده‌های خاک

مولفه خاک به دو گروه اصلی بافت خاک و سطح آب زیرزمینی طبقه‌بندی می‌شود. مدل همه کلاس-های بافت خاک موجود در مثلث بافت مربوط به وزارت کشاورزی آمریکا (USDA[1])را در نظر می‌گیرد. برای هر کلاس بافت خاک، مدل تعدادی از خصوصیات فیزیکی شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، رطوبت حجمی اشباع (θ_{Vsat})، رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (θ_{VFC}) و رطوبت حجمی نقطه پژمردگی (θ_{VPWP}) را دارد. خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است.

مدیریت آبیاری و مزرعه

مدیریت آبیاری و مزرعه دو مولفه مهم در مدل AquaCrop است. مدیریت آبیاری از اطلاعات مربوط به شوری (یعنی S_1، S_2 و S_3) آب آبیاری، زمان، مقدار و شیوه آبیاری تشکیل شده است. اجزای مدیریت مزرعه شامل سطوح باروری و خاکریزها برای از بین بردن رواناب سطحی است.

ارزیابی مدل AquaCrop

برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل در تخمین عملکرد محصول، رطوبت و شوری از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص توافق (d) (ویلموت، ۱۹۸۲) و ضریب راندمان (E) (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)^2} \qquad (٤)$$

که در آن:

S_i و M_i مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده و n تعداد مشاهدات است.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \qquad (٥)$$

که در آن:

$\bar{M}$ میانگین n مقدار اندازه‌گیری شده است. هر دو شاخص برای نقاط داده‌های جمع‌آوری شده در طی فصل برای هر تیمار است.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(M_i - \bar{M})^2} \qquad (٦)$$

نتایج و بحث

واسنجی مدل AquaCrop

در مرحله واسنجی، با استفاده از اطلاعات سال ۱۳۹۰ مزرعه مورد مطالعه، داده‌های ورودی مورد نیاز تهیه و واسنجی مدل AquaCrop مطابق مراحل زیر انجام شد. اجرای مدل و تعیین عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط مختلف مزرعه آزمایشی.مقایسه عملکرد واقعی حاصل از آزمایش مزرعه‌ای با عملکرد شبیه‌سازی شده برای همان شرایط.در صورت عدم تطابق عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد واقعی، با تغییر دادن ضرایب گیاهی، مراحل فوق-الذکر تکرار شد تا نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده با دقت قابل قبولی بر عملکرد واقعی منطبق شود. مقدار داده‌های ورودی مورد استفاده در واسنجی مدل AquaCrop، در جدول ۲ نشان داده شده است.

در جدول ۳ نتایج واسنجی مقادیر زیست توده و عملکرد دانه واقعی و شبیه‌سازی شده تحت تیمارهای مختلف شوری و کم آبیاری، ارایه شده است. در شرایط آبیاری یکسان با افزایش شوری آب آبیاری، فشار اسمزی نیز افزایش یافته و آب قابل جذب برای گیاه کاهش می-یابد. بنابراین تحت این شرایط، گیاه سریع‌تر تحت تنش آبی قرار می‌گیرد.

با مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده زیست توده و عملکرد دانه برای واسنجی مدل، ملاحظه می‌شود که درصد خطای پیش‌بینی مدل کم‌تر از ۲۰ درصد است. طبق نتایج، حداقل و حداکثر خطای پیش‌بینی عملکرد دانه در تیمارهای I_2S_2 و I_2S_3 و به-ترتیب برابر ۲/۲۱ و ۸/۹۵ درصد به‌دست آمد.

[1] United States Department of Agriculture

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک محل اجرای آزمایش

عمق	درصد ذرات خاک			بافت خاک	FC	PWP	ρ_b	K_{sat}
(سانتی‌متر)	رس	سیلت	شن		(درصد وزنی)		(گرم بر سانتی‌متر مکعب)	(میلی‌متر در روز)
۰-۲۰	۳۴/۲	۵۳/۲	۱۲/۶	لومی رسی سیلتی	۲۷	۱۴	۱/۳	۱۵۰
۲۰-۴۰	۲۲/۶	۶۳/۱	۱۴/۳	لومی سیلتی	۲۶	۱۵	۱/۳۵	۳۵۰
۴۰-۶۰	۲۳/۱	۶۲/۵	۱۴/۴	لومی سیلتی	۲۶	۱۵	۱/۴	۳۵۰
۶۰-۸۰	۲۳/۴	۶۴/۲	۱۲/۴	لومی سیلتی	۲۶	۱۵	۱/۳	۳۵۰
۸۰-۱۲۰	۲۴/۸	۶۱/۶	۱۳/۶	لومی سیلتی	۲۶	۱۵	۱/۳	۳۵۰

جدول ۲- پارامترهای واسنجی شده مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گیاه سویا

Description	Value	Units
Base temperature	۵	°C
Cut-off temperature	۳۵	°C
Canopy cover per seedling at 90% emergence (CC_0)	۰/۸۳	%
Canopy growth coefficient (CGC)	۱۸/۵	%/day
Maximum canopy cover (CC_x)	۹۶	%
Canopy decline coefficient (CDC) at senescence	۳	%/day
Leaf growth threshold (p_{upper})	۰/۱۵	-
Leaf growth threshold (p_{lower})	۰/۶	-
Leaf growth stress coefficient curve shape	۲/۵	-
Stomatal conductance threshold (p_{upper})	۰/۵۶	-
Stomata stress coefficient curve shape	۳	-
Senescence stress coefficient (p_{upper})	۰/۶۶	-
Senescence stress coefficient curve shape	۳	-
Normalized water productivity	۱۵	gr/m^2
Reference harvest index (HI_o)	۴۰	%

جدول ۳- نتایج واسنجی مقادیر زیست توده و عملکرد دانه واقعی و شبیه‌سازی شده تحت تیمارهای مختلف شوری و کم آبیاری

تیمارها	سطوح شوری	زیست توده (تن بر هکتار)			عملکرد (تن بر هکتار)		
		اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	خطا (٪)	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	خطا (٪)
٪۱۰۰	S_1	۹/۹۴۳	۱۰/۲۶۸	۳/۲۶	۴/۲۷۹	۴/۱۸۳	-۲/۲۴
	S_2	۹/۱۶۷	۹/۴۸۹	۳/۵۱	۳/۹۳۶	۳/۸۰۷	-۳/۲۷
	S_3	۷/۵۸۶	۸/۵۰۱	۱۲/۰۶	۳/۲۵۲	۳/۳۶۹	۳/۵۹
٪۷۵	S_1	۸/۰۹۸	۸/۴۹۳	۴/۸۷	۳/۳۰۸	۳/۳۸۹	۲/۴۴
	S_2	۷/۳۸۶	۷/۸۱۳	۵/۷۸	۳/۰۲۶	۳/۰۹۳	۲/۲۱
	S_3	۶/۰۶۲	۷/۰۵۹	۱۶/۴۴	۲/۴۹۱	۲/۷۱۴	۸/۹۵
٪۵۵	S_1	۶/۵۴۷	۷/۰۹۵	۸/۳۷	۲/۸۲۳	۲/۷۰۴	-۴/۲۱
	S_2	۵/۹۹۳	۶/۴۶۷	۷/۹۰	۲/۵۶۳	۲/۳۹۱	-۶/۷۱
	S_3	۴/۹۳۵	۵/۸۸۹	۱۹/۳۳	۲/۱۰۸	۲/۲۳۲	۵/۸۸

به‌طور مشابه، حداقل و حداکثر خطای پیش‌بینی برای زیست توده در تیمارهای I_1S_1 و I_3S_3 و به‌ترتیب برابر ۳/۲۶ و ۱۹/۳۳ درصد به‌دست آمد که با نتایج کومار و همکاران (۲۰۱۴) بر روی عملکرد گندم، همخوانی دارد.

آنالیز حساسیت مدل AquaCrop

جهت تحلیل حساسیت مدل در هر نوبت، یکی از پارامترهای ورودی به میزان ۵۰ درصد تغییر داده شد و مدل با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید. این عمل در دو جهت مثبت و منفی انجام و نتایج با شرایط مبنا مقایسه و پارامترهای حساس مدل که بیشترین تاثیر را بر داده‌های خروجی حاصل از شبیه‌سازی مدل داشت، تعیین شد (لین و فریر، ۱۹۹۰).

$$Sc = \frac{\frac{\Delta W}{\overline{W}}}{\frac{\Delta P}{\overline{P}}} \qquad (۷)$$

که در آن:

Sc ضریب حساسیت بدون بعد، ΔW اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، $\overline{W}$ متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، ΔP اختلاف مقادیر پارامتر ورودی و $\overline{P}$ متوسط مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل می‌باشد. برای استفاده از رابطه ٦ به‌منظور تعیین آنالیز حساسیت مدل، دامنه تغییرات ضریب حساسیت به سه کلاس حساسیت زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی شد. اگر پاسخ مدل به تغییر در پارامترها بیشتر از ۱/۵ باشد، دارای حساسیت زیاد است و اگر پاسخ مدل به تغییر در پارامترهای ورودی، بین ۰/۳ تا ۱/۵ و یا کمتر از ۰/۳ باشد، به‌ترتیب نشان‌دهنده حساسیت متوسط و کم می‌باشد (گیرتز و همکاران، ۲۰۰۹). مقادیر حساسیت محاسبه شده برای تعدادی از پارامترهای ورودی مدل AquaCrop در جدول ٤ ارایه شد.

جدول ۴- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

	پارامترهای ورودی مدل	مقدار S_c در حالت ۵۰+٪	مقدار S_c در حالت ۵۰-٪	درجه حساسیت
پارامترهای زراعی	ضریب افزایش سطح سایه‌انداز (CGC)	۰/۰۹	۰/۳	متوسط
	بهره‌وری آب نرمال شده (WP)	۰/۹۸	۱	متوسط
	عمق ریشه	۰/۲۴۳	۰/۳۸۲	متوسط
	فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد بالا)	۰/۳۱	۰/۰۵۹	متوسط
	فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد پایین)	۰/۰۳۵	۰/۰۱۱	کم
	منحنی شکل ضریب تنش برای توسعه برگ‌ها	۰/۰۱	۰/۰۳	کم
	شاخص برداشت مرجع (HI_0)	۱/۰۱	۱/۰۲	متوسط
	ضریب کاهش تاج پوشش گیاهی در زمان پیری (CDC)	۱/۶۱۷	۰/۶۷۱	زیاد
	ماکزیمم پوشش گیاهی (CC_x)	۱/۸۲۳	۰/۸۳۷	زیاد
	پوشش گیاهی اولیه (CC_0)	۰/۰۰۴	۰/۰۲	کم
	فاکتور تخلیه آب خاک برای کنترل میزان بسته شدن روزنه‌ها	۰/۱	۰/۱۵	کم
	منحنی شکل ضریب تنش میزان بسته شدن روزنه‌ها	۰/۰۱	۰/۰۱	کم
	ضریب تنش برای پیری پوشش گیاهی	۰/۳۲۵	۰/۱۰۱	متوسط
	منحنی شکل ضریب تنش برای پیری پوشش گیاهی	۰/۰۲۵	۰/۰۰۸	کم

حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات ضریب کاهش تاج پوشش گیاهی در زمان پیری و ماکزیمم پوشش گیاهی بیشتر از سایر پارامترها است. بنابراین بایستی این داده‌ها با دقت بیشتری اندازه‌گیری شوند، در غیر این صورت، خطای قابل توجهی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل به‌وجود می‌آید. سالمی و همکاران (۲۰۱۱) و محمدی و همکاران (۱۳۹٤) در شبیه-سازی عملکرد گندم زمستانه به نتایج مشابهی دست‌یافتند.

صحت‌سنجی مدل AquaCrop

به‌منظور صحت‌سنجی مدل، با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۹۱، عملکرد محصول در شرایط مختلف مدیریت آبیاری، شبیه‌سازی و با عملکرد واقعی مقایسه شد. در جدول ۵ نتایج صحت-سنجی مقادیر زیست توده و عملکرد دانه واقعی و شبیه-سازی شده تحت تیمارهای مختلف شوری و کم آبیاری، ارایه شده است.

جدول ۵- نتایج صحت‌سنجی مقادیر زیست توده و عملکرد دانه واقعی و شبیه‌سازی شده تحت تیمارهای مختلف شوری و کم آبیاری

تیمارها	سطوح شوری	زیست توده (تن بر هکتار)			عملکرد (تن بر هکتار)		
		اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	خطا (٪)	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	خطا (٪)
٪۱۰۰	S_1	۱۰/۰۳۲	۱۰/۵۸۹	۵/۵۵	۴/۳۲۱	۴/۲۰۹	-۲/۵۹
	S_2	۹/۲۹۰	۸/۹۳۸	-۳/۷۸	۳/۹۷۰	۳/۵۲۷	-۱۱/۱۵
	S_3	۷/۶۲۰	۷/۷۵۸	۱/۸۱	۳/۲۸۶	۳/۰۳۱	-۷/۷۶
٪۷۵	S_1	۸/۲۰۹	۹/۲۵۶	۱۲/۷۵	۳/۳۴۱	۳/۶۲۶	۸/۵۳
	S_2	۷/۵۰۳	۷/۷۱۲	۲/۷۸	۳/۰۶۲	۲/۹۵۹	-۳/۳۶
	S_3	۶/۱۳۳	۶/۶۵۸	۸/۵۶	۲/۵۲۵	۲/۶۰۳	۳/۰۸
٪۵۵	S_1	۶/۶۲۷	۸/۰۳۴	۲۱/۲۳	۲/۸۵۸	۳/۱۲۴	۹/۳۰
	S_2	۶/۰۸۷	۶/۶۱۹	۸/۷۳	۲/۵۹۱	۲/۵۰۱	-۳/۴۷
	S_3	۴/۹۹۲	۵/۷۰۵	۱۴/۲۸	۲/۱۳۳	۲/۲۲۵	۴/۳۱

نتایج مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده زیست توده و عملکرد دانه نشان داد که درصد خطای پیش‌بینی صحت‌سنجی مدل، کم‌تر از ۲۲ درصد است. طبق نتایج، حداقل و حداکثر خطای پیش‌بینی عملکرد دانه در تیمارهای I_1S_1 و I_1S_2 و به ترتیب برابر ۲/۵۹ و ۱۱/۱۵ درصد به‌دست آمد. به‌طور مشابه، حداقل و حداکثر خطای پیش‌بینی برای زیست توده در تیمارهای I_1S_3 و I_3S_1 و به ترتیب برابر ۱/۸۱ و ۲۱/۲۳ درصد به‌دست آمد.

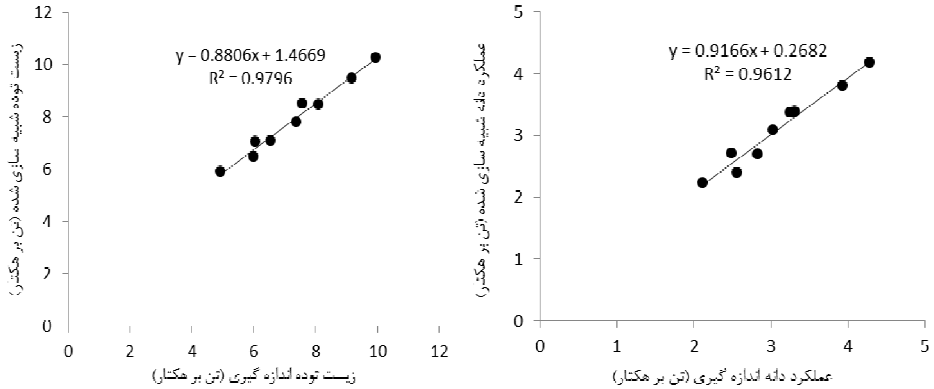
مقدار خطای پیش‌بینی شده زیست توده برای تیمار آبیاری کامل، کمتر از تیمارهای کم آبیاری به‌دست آمد. یعنی با کاهش مقدار آب آبیاری، درصد خطای مدل افزایش نشان داد و با نتایج پتل و همکاران (۲۰۰۸) در شبیه‌سازی محصول پنبه، علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) و خوش روش و دیوبند (۱۳۹۳) در شبیه‌سازی عملکرد گندم که بیان کردند، دقت مدل AquaCrop با افزایش تنش‌های آبی کاهش می‌یابد، همخوانی دارد.همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop نشان داد با کاهش مقدار آب آبیاری و افزایش سطح شوری، رشد گیاه کاهش یافته و در نتیجه مقدار زیست توده کاهش یافته و با نتایج ذوالفقاران و شهبازی (۱۳۸٦) در عملکرد چغندر قند و زمانی و همکاران (۱۳۸۷) در عملکرد گندم که بیان کردند با افزایش مقدار آب آبیاری، عملکرد افزایش ولی با افزایش شوری مقدار عملکرد کاهش می‌یابد همخوانی دارد.شاخص‌های آماری واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای تمام سطوح شوری و کم آبیاری در جدول ٦ ارایه شده است.

جدول ۶- شاخص‌های آماری واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop

پارامتر	۱۳۹۰			۱۳۹۱		
	RMSE(ton/ha)	E	D	RMSE(ton/ha)	E	d
عملکرد دانه	۰/۱۳۳	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۲۲۵	۰/۸۸	۰/۹۷
زیست توده	۰/۶۵۰	۰/۸۱	۰/۹۴	۰/۷۱۸	۰/۷۷	۰/۹۵

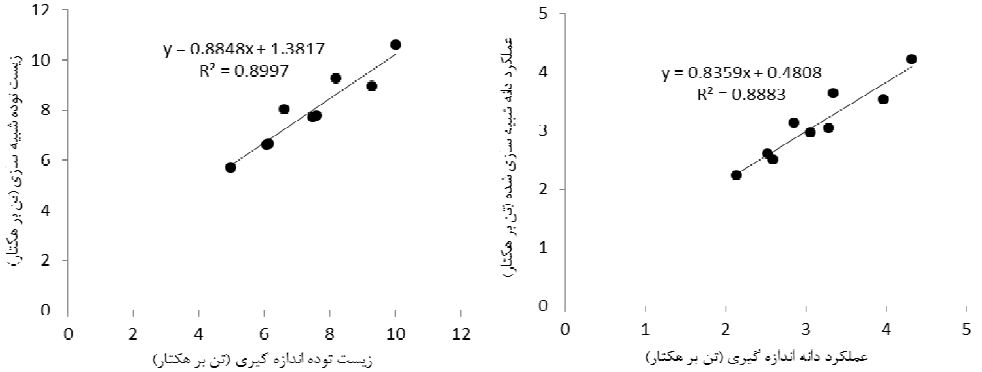
نتایج هر دو سال کشت نشان می‌دهد که مقدار RMSE برای عملکرد دانه، کمتر از زیست توده می‌باشد و هر چه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد، کارایی مدل بیشتر خواهد بود. مقدار شاخص سازگاری (d) بیشتر از ۹٤ درصد و مقدار بازده (E) نیز برای مزرعه مورد مطالعه بیشتر از ۷۷ درصد به‌دست آمد. همچنین مشاهده شد که مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه نسبت به زیست توده برای همه سطوح شوری و کم آبیاری بهتر عمل کرد که با نتایج خرسند و همکاران (۱۳۹۳) و کومار و همکاران (۲۰۱٤) برای گیاه گندم همخوانی دارد.مقادیر

واسنجی مدل به همراه پیش‌بینی خطای آماری R^2 برای عملکرد دانه و زیست توده برای تمام سطوح مختلف شوری و کم آبیاری در شکل ۱ ارایه شده است. مقدار ضریب همبستگی برای عملکرد دانه برابر ۰/۹۶ و برای زیست توده برابر ۰/۹۷ به‌دست آمد.



شکل ۱- نتایج واسنجی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست توده، تحت تیمارهای مختلف شوری و کم آبیاری

در شکل ۲ مقادیر صحت‌سنجی مدل به همراه پیش‌بینی خطای آماری R^2 برای عملکرد دانه و زیست توده برای تمام سطوح مختلف شوری و کم آبیاری ارایه شده است. مقدار ضریب همبستگی برای عملکرد دانه و زیست توده برابر ۰/۸۸ و ۰/۸۹ به‌دست آمد.



شکل ۲- نتایج صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست توده، تحت تیمارهای مختلف شوری و کم آبیاری

نتیجه‌گیری

مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های آزمایشی سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ برای عملکرد دانه و زیست توده تحت رژیم‌های مختلف شوری و کم آبیاری برای گیاه سویا، در شهرستان گرگان واسنجی و صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد، مقدار ضریب همبستگی برای عملکرد دانه و زیست توده به‌ترتیب برای واسنجی مدل برابر با ۰/۹۶ و ۰/۹۷ و برای صحت‌سنجی مدل برابر با ۰/۸۸ و ۰/۸۹ به دست آمد. همچنین با توجه به نتایج، مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه نسبت به زیست توده، برای تمام سطوح شوری و کم آبیاری بهتر عمل کرد. مزیت استفاده از مدل AquaCrop این است که به تعداد داده‌های ورودی کمتری در شبیه‌سازی رشد و عملکرد سویا تحت سناریوهای مختلف شوری و کم آبیاری، در مقایسه با دیگر مدل‌های گیاهی نیاز دارد.

فهرست منابع

۱. افشار، ع. نشاط، ع. افشار منش، غ. و عادلی، م. ۱۳۹۰. معرفی و کالیبره مدل AquaCrop برای منطقه جیرفت. یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۲. اکبری، م. صدرقاین، س. ح. و نخجوانی مقدم، م. ۱۳۸۹. ارزیابی مزرعه‌ای بیلان آب و عملکرد محصول گندم با استفاده از مدل شبیه‌سازی AquaCrop (مطالعه موردی در شبکه آبشار اصفهان). سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳. خرسند، ا.، و. رضاوردی نژاد، ع. شهیدی. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم، رطوبت و شوری نیمرخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم آبی. مدیریت آب و آبیاری، دوره ٤، شماره ۱، ۸۹-۱۰٤.

٤. دهقانی، م.، غ. شیر اسماعیلی، ف. پارسا دوست. ۱۳۹۳. بررسی تاثیر شوری آب آبیاری بر روی سه هیبرید تجارتی آفتابگردان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۱):۱۹۱-۱۹۹.

۵. ذوالفقاران، ا.، ح. شهبازی. ۱۳۸٦. برآورد عملکرد چغندرقند در مقادیر متفاوت آب و شوری. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه فردوسی مشهد، ۸ ص.

٦. زمانی، غ.، ع. شهیدی، ح. ع. کشکولی، س. م. حسینی. ۱۳۸۷. اثر بر هم کنش شوری و کم آبیاری بر عملکرد کمی و کیفی دو رقم گندم. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، سازمان آب و برق خوزستان، ۱ بهمن‌ماه، ۸ ص.

۷. قنبری مفتی کلایی، ه.، م. ع. بهمنیار، ح. دهقان منشادی. ۱۳۸۹. اثر سطوح مختلف شوری آب آبیاری و اصلاح کننده‌های آلی و معدنی بر جذب عناصر مغذی در برگ سویا. اولین همایش ملی کشاورزی پایدار و تولید محصول سالم، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، ۱۹-۲۰ آبان، ٤ ص.

۸. قنبری مفتی کلایی، ه.، م. ع. بهمنیار، س. سالک گیلانی، ف. رئیسی. ۱۳۹۱. اثر سطوح مختلف شوری آب آبیاری و برخی مواد اصلاح‌کننده بر تنفس میکروبی و فعالیت فسفاتازهای اسیدی و قلیایی خاک ریزوسفری طی رشد رویشی سویا. مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۹(۳): ٦۳-۷٦.

۹. کیانی، ع.، م. ا. اسدی. ۱۳۸۷. استفاده از آب شور برای تولید گندم و بررسی روند تجمع املاح در نیمرخ خاک. پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی، شماره ۸۰، ۱۱ ص.

۱۰. محمدی، م.، ب. قهرمان، ک. داوری، ح. انصاری، ع. شهیدی. ۱۳۹٤. اعتبار سنجی مدل AquaCropبه‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گندم زمستانه تحت شرایط همزمان تنش شوری و خشکی. ۲۹(۱): ٦۷-۸٤.

۱۱. نوری، ح.، ح. بانژاد، ح. نوری. ۱۳۸۷. بررسی استفاده از آب‌های شور در عملکرد و بهره‌وری مصرف آب برخی از گیاهان زراعی در ایران. اولین سمینار ملی: جایگاه آب‌های بازیافتی و پساب در مدیریت منابع آب- چالش‌ها و راهکارها، ۱ و ۲ خردادماه، مشهد مقدس، ۱٤ ص.

12. Doorenbos, J., A.H and Kassam. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage paper no.33. FAO, Rome.

13. Geerts, S., D. Raes, M. Garcia, R. Miranda, J.A. Cusicanqui, C. Taboada, J. Mendoza, R. Huanca, A. Mamani, O. Condori, J. Mamani, B. Morales, V. Osco, and P. Steduto. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) with FAO-AquaCrop. Agronomy Journal, 101, pp 499-508.
14. Greenway, H., and R. Munns. 1980. Mechanism of salt tolerance of nonhalophytes. Plant Physiology. 31:149-190.
15. Hassan, G., N. Persaud, and R.B.Jr. Reneau. 2005; Unity of HYDRUS-2D in modeling profile soil moisture and salinity dynamics under saline water irrigation of soybean. Soil Sci. 170(1):28-37.
16. Hsiao, C.T., L. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. Agronomy Journal, 101: 448-459.
17. Jones, R.N. 2000. Analyzing the risk of climate change using an irrigation demand model. Climate Research, 14: 89-100.
18. Kumar P., A. Sarangi, D.K. Singh, and S.S. Parihar. 2014. Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes.
19. Lane, J.W., and V.A. Ferrira. 1990. Sensitivity in CREAMS: A field scale model for chemical runoff and erosion from agricultural management systems. (Eds.), W. G. Knisel, A. model Documentation. USDA Conservation Res. Report No. 26. Washington D.C.
20. Paredes. P., J.P. de Melo-Abreu, I. Alves, and L.S. Pereira. 2014. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and defici tirrigation with focus on model parameterization. Agricultural Water Management, 114:81-97.
21. Raes, D., P. Steduto, TC. Hsiao, and E. Fereres .2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
22. Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agronomy Journal, 101, pp 438–447.
23. Salemi, H.R., M.A. Mohd Soom, T.S. Lee, S.F. Mousavi, A. Ganji, and M.K. Yusoff. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. African Journal of Agricultural Research. Academic Journals. 610:2204-2215.
24. Specht, J., K. Chase, M. Macrander, G. Graef, J. Chung, P. Markwell, M. Germann, H. Orf, and G. Lark. 2001. Soybean response to water. Crop Sci. 41: 493-509.
25. Steduto, P., T.C. Hsiao, and E. Fereres. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. Irrigation Science, 25, pp 189-207.
26. Steduto, P., T.C., Hsiao, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 101: 426-437.