

شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد محصول سیب‌زمینی با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop

زهره ایزدی^۱، علی حیدر نصرالهی^۲، بیژن حقیقتی بروجنی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۵

مقاله برگرفته از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد

چکیده

این پژوهش با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصول سیب‌زمینی در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه تحت شرایط تغییر اقلیم در منطقه شهرکرد انجام شد. از داده‌های دو سال زراعی ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل رشد گیاهی AquaCrop استفاده گردید. برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد محصول، داده‌های خروجی مدل گردش عمومی HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B1 برای دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ توسط مدل آماری LARS-WG ریزمقیاس‌نمایی و به‌عنوان ورودی‌های مدل رشد به کار برده شد. براساس نتایج، شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی با مدل رشد گیاهی AquaCrop با دقت بالایی صورت گرفت به طوری که متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۶۸ تن بر هکتار بدست آمد. همچنین میانگین خطای مطلق (MAE) برای شبیه‌سازی دمای حداقل، دمای حداکثر، ساعات آفتابی و بارش با مدل LARS-WG به ترتیب ۰/۰۵، ۰/۰۳، ۰/۰۱ و ۰/۱۶ بدست آمد که بیانگر کارایی خوب مدل در تولید داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که عملکرد سیب‌زمینی برای دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ تحت سناریو A2 به ترتیب ۱۵/۸ و ۲۴/۵ درصد و تحت سناریو B1 به ترتیب ۱۱/۸ و ۲۲/۴ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین برای تیمارهای I₆₅ و I₈₀ مقدار عملکرد در هر دو دوره آبی و هر دو سناریوی اقلیمی نسبت به دوره پایه کاهش نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سناریوی اقلیمی، سیب‌زمینی، شهرکرد، مدل AquaCrop، مدل LARS-WG

^۱ کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، ۰۹۳۷۰۶۶۲۲۶۴، z.izadi2010@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، ۰۹۱۶۶۲۹۲۳۱۴، nasrolahi.a@lu.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۳ استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران، ۰۹۱۳۳۸۲۶۹۳۰، bhaghigati@yahoo.com

مقدمه

روزهای لازم برای رسیدگی فیزیولوژیکی نیز بین یک تا ۲۰ روز کاهش می‌یابد.

مقایسه خروجی‌های مدل‌های گیاهی برای دوره پایه و دوره-های آبی تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم یک روش مفید و مؤثر جهت بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصول بوده و مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است (سعادت و همکاران، ۱۳۹۵؛ دلقدنی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Ma et al., 2017 و ...). از این رو مدل‌های رشد گیاهان ابزار مناسبی جهت پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر تولید محصولات کشاورزی در مناطق مختلف می‌باشند. علاوه بر این با استفاده از این مدل‌ها می‌توان راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم را بررسی نمود و با اتخاذ تصمیم مدیریتی و زراعی مناسب از نتایج منفی آن بر عملکرد محصول کاست و چه بسا بتوان عملکرد محصول را نسبت به زمان فعلی افزایش داد. مدل AquaCrop یکی از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاه است که از سوی سازمان خواربار جهانی ارائه شده و از آنجایی که تعداد داده‌های ورودی آن نسبت به سایر مدل‌های مشابه کمتر است لذا سهولت کاربرد آن افزایش می‌یابد (Raes et al., 2009). کارایی مدل رشد گیاهی AquaCrop در مناطق مختلف جهان از جمله ایران مورد ارزیابی قرار گرفته و دقت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد تحت مدیریت‌های مختلف دارد. یکی از جنبه‌های مهم این مدل توانایی شبیه‌سازی عملکرد و رشد گیاهان مختلف تحت شرایط تغییر اقلیم است که در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. روستایی و همکاران (۱۳۹۰) در پاکدشت به بررسی میزان عملکرد ذرت با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop تحت سناریوی A2 برای دوره آبی ۲۰۳۹-۲۰۱۰ پرداختند. نتایج نشان داد شبیه‌سازی عملکرد برای سطوح ریسک ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد برای تیمار آبیاری کامل به ترتیب ۶/۸، ۷/۸، ۶/۲ درصد و برای تیمار کم‌آبیاری ۲۰/۷، ۱۸/۹، ۱۷/۸ درصد کاهش بهره‌وری آب را نشان می‌دهد که علت آن افزایش دما و تغییرپذیری بارندگی ذکر شد. اسمعیلی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گیاه سویا را تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 شبیه‌سازی نمودند. براساس نتایج مدل LARS-WG هر سه سناریو افزایش دمای هوا به میزان یک تا دو درجه را پیش‌بینی نموده و عملکرد سویا در شرایط آینده در

امنیت غذایی یکی از مهمترین دغدغه‌های جامعه بشری است و پیش‌بینی می‌شود با رشد جمعیت، برای تأمین مواد غذایی مورد نیاز جامعه جهانی در سال ۲۰۵۰، تولید مواد غذایی حدود ۷۰ درصد افزایش یابد (دلقدنی و همکاران، ۱۳۹۵). تغییرات پیش‌بینی شده اقلیمی به ویژه افزایش میزان دی اکسید کربن اتمسفر، درجه حرارت و نیز تغییر در میزان و الگوهای بارندگی اثرات شدیدی بر تولید محصولات کشاورزی و امنیت غذایی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک خواهد داشت. علی‌رغم تلاش‌های بسیار زیاد اقلیم‌شناسان، هنوز عدم قطعیت‌های قابل توجهی در مورد اثرات بالقوه تغییر اقلیم در بخش کشاورزی وجود دارد (Gouache et al., 2012). با این وجود، تغییر اقلیم با تغییر فنولوژی و فیزیولوژی گیاه، بیلان آب در خاک، تبخیر و تعرق و بارندگی مؤثر بر رشد، عملکرد و نیاز آبی گیاهان تأثیر دارد (درزی نفت چالی و کاراندیش، ۱۳۹۵). براساس تحقیقات صورت گرفته افزایش غلظت دی اکسید کربن اتمسفر سبب افزایش عملکرد گیاهان C3 مانند گندم، برنج و سویا شده و سبب افزایش عملکرد اندکی در گیاهان C4 مانند ذرت، سورگوم و نیسکر می‌شود (Fischer et al., 2007). Laux و همکاران (۲۰۱۰) اثر تغییر اقلیم بر محصول ذرت را تحت شرایط دیم و سناریوی انتشار A2 برای دوره‌های آبی بررسی کردند و نشان دادند که افزایش دما و کاهش بارندگی منطقه از جمله مهمترین تفاوت‌ها در دوره‌های آبی است و برخلاف اثر منفی افزایش دما و کاهش بارندگی، افزایش غلظت دی اکسید کربن باعث افزایش عملکرد محصول می‌گردد. نتایج مطالعات نه‌بندانی و سلطانی (۱۳۹۵) روی اثر تغییر اقلیم بر رشد و نمو سویا نشان داد که با افزایش دما نسبت به حالت پایه طول دوره رشد از ۱۳۰ روز به ۱۱۵ روز کاهش پیدا کرده و عملکرد محصول ابتدا افزایش و با بیشتر شدن درجه حرارت کاهش می‌یابد. درزی نفت چالی و کاراندیش (۱۳۹۵) به بررسی مدیریت کشت برنج در استان مازندران در شرایط تغییر اقلیم پرداختند و با تولید داده‌های هواشناسی دوره ۲۰۱۱ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف اقلیمی با استفاده از مدل ریزمقیاس‌ساز LARS-WG نشان دادند که در شرایط آبی کشت برنج می‌تواند ۲ تا ۲۳ روز زودتر انجام شده و تعداد

زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد گیاهان مختلف، اما در رابطه با بررسی واکنش عملکرد سیب‌زمینی به تنش آبی تحت سناریوهای اقلیمی هیچ تحقیقی گزارش نشده است. از این رو و با توجه به اینکه استان چهارمحال و بختیاری یکی از قطب‌های تولید سیب‌زمینی در کشور است و در سال‌های اخیر دستخوش تغییرات شدید پارامترهای هواشناسی از جمله بارندگی و درجه حرارت بوده، لذا هدف این تحقیق شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی تحت سطوح مختلف آبیاری در دوره‌های آبی اقلیمی برای اقلیم شهرکرد با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی رشد گیاه با مدل AquaCrop

آزمایشات مزرعه‌ای این پژوهش به مدت دو سال در ایستگاه تحقیقاتی چهارتخته شهرکرد واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری در ۵ کیلومتری شرق شهرکرد توسط حقیقتی بروجنی و همکاران (۱۳۹۴) انجام شد. منطقه مورد مطالعه در ۳۲ درجه و ۱۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی با ارتفاع ۲۰۹۰ متر از سطح دریا واقع شده است. اقلیم منطقه نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد است. میانگین ۳۰ ساله برخی پارامترهای هواشناسی منطقه در جدول (۱) آمده است. به‌منظور استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی تحت شرایط تغییر اقلیم، در ابتدا مدل با استفاده از اطلاعات مزرعه‌ای در طول دو سال متوالی، واسنجی و صحت‌سنجی شد. در هر دو سال از سیب‌زمینی رقم بورن به علت سازگاری بالا با شرایط منطقه استفاده شد.

منطقه کرمانشاه کاهش خواهد یافت. حسینی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop به شبیه‌سازی مقدار عملکرد دانه و زیست توده گیاه سویا تحت اقلیم آینده پرداختند. در این تحقیق تحت سناریوهای A2 و B1 برای دوره ۲۰۳۸-۲۰۱۱ نسبت به دوره پایه مقادیر زیست توده و عملکرد دانه به ترتیب بین ۵ تا ۱۱/۵ درصد و ۸/۳ تا ۱۳/۷ درصد کاهش و برای دوره ۲۰۶۶-۲۰۳۹ بین ۱۸/۶ تا ۲۴ درصد و ۱۶ تا ۲۴/۴ درصد افزایش نشان داد. سعیدی نیا و همکاران (۱۳۹۶) با شبیه‌سازی اثر شوری آب بر عملکرد ذرت تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop نشان دادند تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ اثر تغییر اقلیم روی عملکرد ناچیز بوده ولی در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ و در شرایط شوری نسبت به دوره مبنای حدود ۶۰ درصد کاهش عملکرد رخ خواهد داد. Voloudakisa و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر تغییر اقلیم روی عملکرد پنبه را در یونان با استفاده از هشت مدل اقلیمی و مدل رشد گیاهی AquaCrop بررسی کرده و راه کارهای مناسبی جهت برنامه‌ریزی آبیاری تحت شرایط اقلیمی آینده در مناطق مورد مطالعه ارائه دادند. Yang و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی واکنش عملکرد ذرت به تغییر اقلیم در پرتغال پرداختند. در این تحقیق از دو مدل رشد گیاهی AquaCrop و STICS استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین کاهش عملکرد، دوره رشد و بهره‌وری آب به ترتیب ۱۷، ۱۲ و ۱۹ درصد در سال ۲۰۸۰-۲۰۶۱ نسبت به دوره پایه اتفاق افتاد.

نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفر و تغییرات آب و هوایی همراه با آن بر گیاهان زراعی کاملاً به شرایط محیطی بستگی دارد و ممکن است از محلی به محل دیگر تفاوت کند. از طرف دیگر مدل‌های گیاهی از جمله مدل AquaCrop بدلیل سادگی و نیز دقت بالا در شبیه‌سازی ابزار مناسبی جهت پیش‌بینی عملکرد محصول در شرایط تغییر اقلیم است. با این حال علی‌رغم مطالعات متعدد در

جدول ۱- میانگین ۳۰ ساله (۱۳۶۱-۱۳۹۰) برخی پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک شهرکرد

پارامتر	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
دمای حداقل (°C)	۰/۷	۴/۴	۷/۱	۱۱/۶	۱۱/۳	۷/۴	۲/۷	-۰/۱	-۴/۸	-۹/۶	-۷	-۲/۹
دمای حداکثر (°C)	۱۶/۸	۲/۲۲	۲۹/۲	۳۳/۶	۳۳/۱	۳۰/۴	۲۵/۲	۱۶/۵	۹/۵	۵/۸	۷	۱۳
دمای متوسط (°C)	۸/۷	۱۳/۳	۱۸/۲	۲۲/۶	۲۲/۲	۱۸/۹	۱۴	۸/۲	۲/۳	-۱/۹	۰	۵/۱
میزان بارندگی (mm)	۶۴/۶	۱۶/۷	۲/۲	۰/۹	۰/۱	۰/۹	۰/۶	۴۷/۵	۶۰/۷	۴۸/۴	۶۰/۵	۳۷/۶
رطوبت نسبی (%)	۴۸	۴۴	۳۲	۲۹	۲۷	۳۰	۳۴	۵۱	۶۲	۶۴	۶۲	۴۷
ساعات آفتابی (h)	۷/۶	۸/۲	۱۰/۳	۱۰/۲	۹/۶	۹/۹	۸/۸	۷	۶/۱	۵/۵	۶/۴	۶/۶

تحلیلی برای مطالعه تأثیر اقلیم، خاک، آب و مدیریت زراعی روی رشد گیاه و بهره‌وری آب قابل استفاده می‌باشد. ورودی‌های مدل شامل چهار بخش داده‌های اقلیمی، اطلاعات گیاهی، اطلاعات مدیریتی و خاک است. مهمترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل عبارت از بیشینه و کمینه درجه حرارت روزانه، تبخیر و تعرق مرجع و بارندگی روزانه در طول دوره رشد می‌باشند که از ایستگاه هواشناسی مرکز تحقیقات تهیه گردید. لازم به ذکر است که با استفاده از پارامترهای هواشناسی، تبخیر و تعرق مرجع به روش فائو-پنمن-مانیت و با استفاده از نرم‌افزار ET₀ Calculator محاسبه شد. واسنجی به منظور تعدیل پارامترهای گیاه و خاک برای به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر شبیه-سازی و مشاهداتی عملکرد و زیست توده در طول دوره رشد که در پنج مرحله مختلف اندازه‌گیری شده بود صورت گرفت. جهت واسنجی مدل از نتایج سال ۱۳۹۲ استفاده شد. لازم به ذکر است که پارامترهای گیاهی مدل شامل دو دسته پارامترهای ثابت و پارامترهای مدیریتی است که واسنجی روی پارامترهای ثابت انجام شد. در ادامه صحت‌سنجی مدل رشد گیاهی که مرحله مهمی برای سنجش کارایی مدل است با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۳ انجام شد.

آزمایشات مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه سطح آبیاری شامل ۱۰۰ درصد نیاز آبی یا آبیاری کامل (FI)، ۸۰ درصد نیاز آبی (I₈₀) و ۶۵ درصد نیاز آبی (I₆₅) در سه تکرار و برای دو سال متوالی انجام شد. تیمارهای آزمایشی ۲۴ روز پس از کشت و از آبیاری دوم اعمال شدند. ابعاد کرت‌های آزمایشی ۴×۳۰ متر بود که داخل هر کرت چهار ردیف کشت با فاصله بین ردیف‌های ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بذرهای ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. روش آبیاری جویچه‌ای و برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک منطقه ریشه بود. رطوبت خاک توسط دستگاه رطوبت‌سنج مدل TRIME-FM و حجم آب مورد نیاز هر کرت نیز به‌وسیله کنتور حجم اندازه‌گیری شد. در جدول (۲) اطلاعات آبیاری طرح به‌طور مختصر برای هر دو سال کشت و در جدول (۳) برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه ارائه شده است. در این تحقیق از نسخه ۵ مدل رشد گیاهی AquaCrop که در اکتبر ۲۰۱۵ به روز شده است استفاده شد. AquaCrop یکی از کاراترین و جدیدترین مدل‌های گیاهی است که توسط سازمان جهانی کشاورزی و غذا (FAO) با تمرکز بر بهره‌وری مصرف آب، در سال ۲۰۰۷ توسعه داده شده و به عنوان یک ابزار

جدول ۲- اطلاعات آبیاری طرح در دو سال مختلف

سال	تعداد آبیاری	عمق آبیاری (میلی متر)		
		تیمار I ₆₅	تیمار I ₈₀	تیمار FI
۱۳۹۲	۱۴	۵۰۹	۵۹۷	۷۱۴
۱۳۹۳	۱۴	۵۳۱	۶۲۴	۷۴۷

جدول ۳- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

عمق نمونه خاک (cm)	بافت خاک	ρ _b (gr.cm ⁻³)	F.C (% Θ _m)	P.W.P (% Θ _m)	E.C (ds.m ⁻¹)	PH	O.C %
۰-۳۰	لوم	۱/۳۶	۲۴/۰۱	۹/۳	۰/۶۱۵	۷/۹۲	۰/۵۲۷
۳۰-۶۰	لوم سیلتی	۱/۴۱	۲۵/۲۰	۸/۳	۰/۹۳۳	۷/۷۶	۰/۴۰۷

مدل سازی تغییر اقلیم

حسینی و همکاران، (۱۳۹۴). مدل LARS-WG برای مدل سازی متغیرهای هواشناسی، توزیع های آماری پیچیده- ای را به کار می برد. مبنای این مدل برای مدل سازی طول دوره های خشک و تر، بارش روزانه و سری های ساعات آفتابی، توزیع نیمه تجربی می باشد. سری های فوریه، درجه حرارت را تخمین می زنند درجه حرارت های بیشینه و کمینه روزانه به صورت فرآیندهایی تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز مورد نظر هستند، مدل سازی می شوند. خروجی- های این مدل شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعات آفتابی می باشد. به طور کلی تولید داده توسط مدل LARS-WG در سه مرحله صورت می گیرد که عبارتند از: واسنجی داده ها، ارزیابی داده ها و تولید یا شبیه سازی داده- های هواشناسی برای دوره آتی. نیاز اساسی مدل در مرحله واسنجی، فایلی است که مشخص کننده رفتار اقلیم در دوره گذشته می باشد. بر این اساس برای اجرای مدل، ابتدا با در نظر گرفتن دوره ۲۵ ساله ۱۹۹۵-۱۹۷۱ به عنوان دوره پایه، داده های مورد نیاز مدل، شامل مقادیر روزانه دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعات آفتابی (ایستگاه هواشناسی شهرکرد)، در این دوره آماری پردازش و مرتب سازی شد و فایل های ورودی مدل برای دوره پایه تهیه شد و بدین ترتیب مرحله واسنجی به پایان رسید. در مرحله بعد با

در این تحقیق به منظور بررسی تغییر اقلیم در دوره های آتی از بین مدل های AOGCM معرفی شده در چهارمین گزارش هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC)؛ مدل HadCM3^۲ تحت سناریوهای A2 و B1 انتخاب شد. این مدل در اغلب مطالعات داخلی در زمینه تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته است (دلاور و همکاران، ۱۳۹۶؛ دوستی و همکاران، ۱۳۹۲ و اشرف و همکاران، ۱۳۹۰). در جدول (۴) مشخصات مربوط به مدل HadCM3 آورده شده است. قابل ذکر است که سناریو A2 بیانگر رشد سریع جمعیت جهان، اقتصاد ناهمگن و همسو با شرایط منطقه ای در سراسر جهان و سناریو B1 بیانگر همگرایی جمعیت در سطح جهان، تغییر در ساختار اقتصاد (کاهش مواد آلاینده و معرفی منابع فناوری پاک و مؤثر) می باشد (2007 IPCC). به دلیل بزرگ مقیاس بودن مکانی سلول های محاسباتی مدل های AOGCM، از روش های ریزمقیاس نمایی استفاده می شود (مجرد و همکاران، ۱۳۹۵). به همین منظور در این تحقیق از مدل ریزمقیاس نمایی آماری LARS-WG که توانایی و کارایی آن در تحقیقات قبلی به اثبات رسیده است برای تولید داده- های هواشناسی (بارش روزانه، ساعات آفتابی و بیشینه و کمینه درجه حرارت های روزانه) استفاده شد (سعیدی نیا و همکاران، ۱۳۹۶؛ درزی نفت چالی و کاراندیش، ۱۳۹۵ و

آبیاری سال ۱۳۹۳ در نظر گرفته شد. برای بررسی کارایی مدل‌ها در شبیه‌سازی از شاخص‌های ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد که روابط آنها در زیر آمده است.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{n} \quad (3)$$

که در آن‌ها؛ S_i مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)، n تعداد مقادیر شبیه‌سازی شده یا اندازه‌گیری شده و \bar{O} مقدار متوسط پارامتر اندازه‌گیری شده است.

استفاده از شاخص‌های آماری داده‌های تولید شده توسط مدل ارزیابی شد. پس از مرحله صحت‌سنجی مدل، شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی با استفاده از رفتار اقلیم در دوره پایه و ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 انجام و بدین ترتیب مقادیر روزانه پارامترهای مذکور تولید شد. در نهایت میانگین ماهانه پارامترهای اقلیمی براساس داده‌های روزانه خروجی مدل LARS-WG محاسبه شد. پس از تولید سناریوهای اقلیمی، تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد سیب‌زمینی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور عملکرد دوره پایه، میانگین عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل رشد گیاهی AquaCrop در سال‌های ۱۹۹۵-۱۹۷۱ در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی عملکرد در دوره‌های آتی، بجز داده‌های هواشناسی و غلظت اتمسفر سایر داده‌های ورودی مدل رشد گیاهی AquaCrop مشابه اطلاعات دوره پایه منظور گردید. غلظت CO_2 اتمسفر تحت سناریوهای A2 و B1 برای سال‌های آتی در بخش اقلیم مدل موجود است. علاوه بر این برنامه آبیاری برای همه دوره‌ها یکسان و همان برنامه

جدول ۴- ویژگی‌های مدل HadCM3

طراح مدل	قدرت تفکیک جوی	قدرت تفکیک	سناریوهای انتشار
مرکز تحقیقات و یشبینی اقلیمی هادلی- بریتانیا	عرض جغرافیایی ۲/۷۵ و طول جغرافیایی ۳/۷۵ درجه	عرض ۴۵ درجه : ۲۹۵ کیلومتر × ۲۸۷ کیلومتر	B1.A2

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل رشد گیاهی AquaCrop تحت شرایط مزرعه‌ای

بالا و نیز ضرایب شکل منحنی تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی، بسته شدن روزنه‌ها و پیری کانوپی مقادیر پیش فرض مدل در نظر گرفته شدند و سایر پارامترها به‌صورت مقادیر جدول تعدیل شدند.

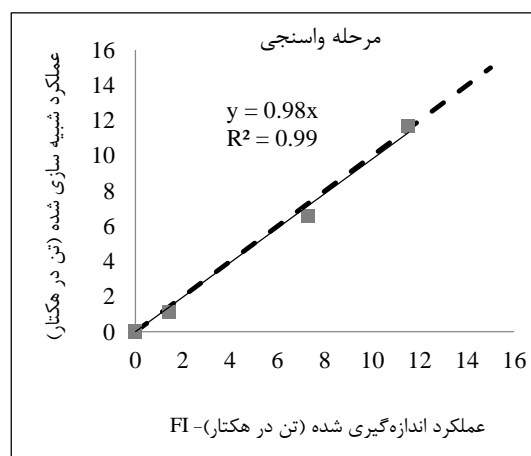
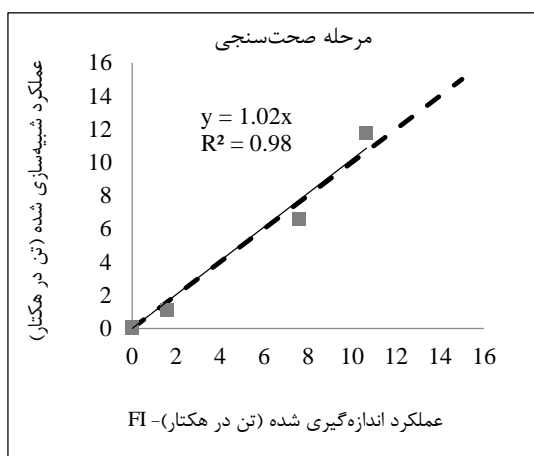
پارامترهای مختلف مدل رشد گیاهی AquaCrop که با هدف حداقل کردن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد غده و زیست توده سیب‌زمینی در تیمارهای مختلف در مرحله واسنجی نهایی شد در جدول (۵) آمده است. از بین این پارامترها دمای پایه رشد و دمای

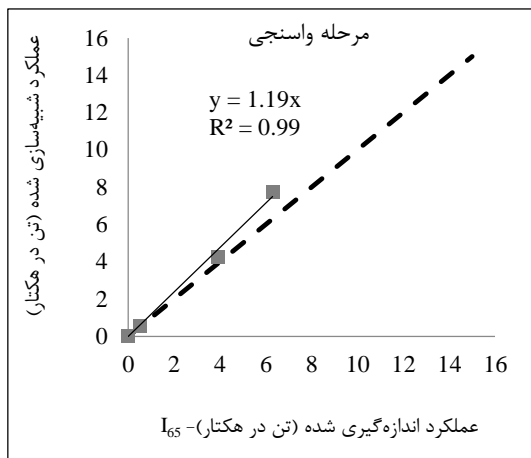
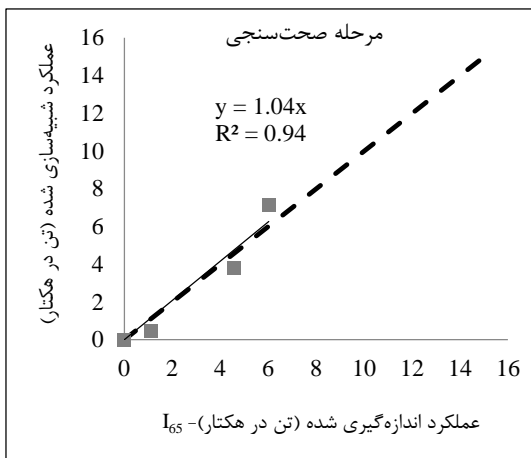
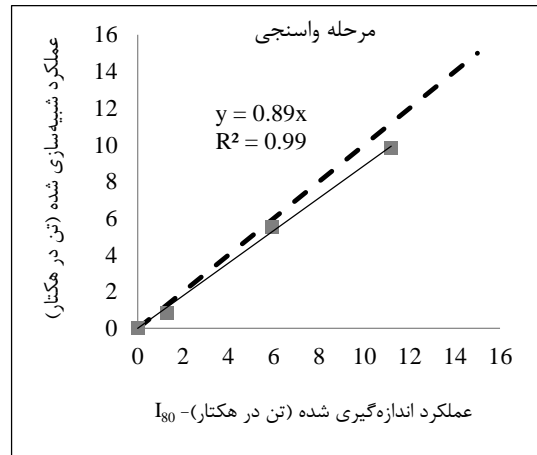
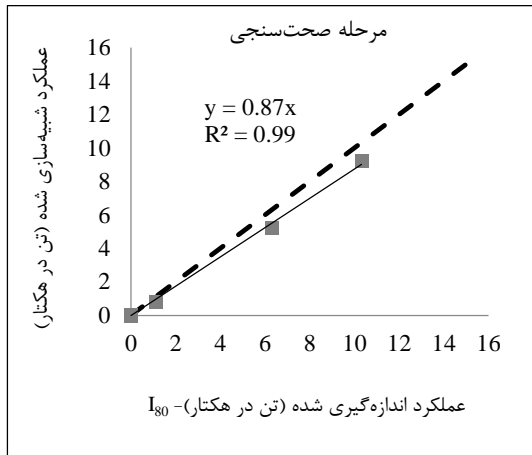
جدول ۵- پارامترهای مدل رشد گیاهی AquaCrop در مرحله واسنجی

مقدار	پارامتر
۲	دمای پایه رشد (درجه سانتی گراد)
۲۶	دمای بالا (درجه سانتی گراد)
۰/۳۳	پوشش کانوپی اولیه (درصد)
۲۰/۴	ضریب رشد کانوپی (درصد بر روز)
۵/۲	ضریب کاهش کانوپی (درصد بر روز)
۱/۰۵	ضریب تعرق گیاهی ($K_{C_{tr}}$)
۱۹/۵	بهره‌وری آب نرمال شده (گرم بر مترمربع)
۸۰	شاخص برداشت مرجع (درصد)
۰/۲۵	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی (-)
۰/۷	آستانه پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی (-)
۳	ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی (-)
۰/۶	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها (-)
۳	ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها (-)
۰/۸	آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری کانوپی (-)
۳	ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری کانوپی (-)

مدل در شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی است که در تحقیقات مختلفی نیز به اثبات رسیده است (خلیلی و همکاران، ۱۳۹۳ و امیری و همکاران، ۱۳۹۴). علاوه بر این کمترین مقدار ضریب تبیین در تیمار تنش شدید آبی (I_{65}) و در مرحله صحت‌سنجی بدست آمد. لازم به ذکر است که هر چه مقدار این ضریب به یک نزدیکتر باشد نسبت پراکندگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی کمتر بوده و لذا بیانگر برآورد بهتر مدل است.

مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده با مقادیر واقعی در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای سطوح مختلف آبیاری در شکل (۱) نشان داده شده است. از آنجایی که مدل برای هر تیمار با استفاده از عملکردهای به دست آمده در طول دوره رشد واسنجی و صحت‌سنجی شده بود لذا برای هر تیمار نمودارهای یک به یک و ضرایب تبیین جداگانه ارائه شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که مقدار ضریب R^2 محاسبه شده برای عملکرد در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بیش از ۰/۹۴ بود که نشان‌دهنده دقت بالای





شکل ۱- مقایسه عملکرد واقعی و شبیه‌سازی شده با مدل رشد گیاهی AquaCrop برای تیمارهای مختلف طی واسنجی و صحت‌سنجی

مدل

تیمار I65 معادل ۱/۰۲ و ۱/۰۵ تن در هکتار می‌باشد. از آنجایی که هر چه مقدار شاخص RMSE کمتر باشد بیانگر دقت بیشتر شبیه‌سازی است لذا برای شبیه‌سازی زیست توده و عملکرد سیب‌زمینی بهترین دقت مدل در تیمار آبیاری کامل (FI) است و با افزایش تنش آبی خطای پیش‌بینی عملکرد و زیست توده بیشتر می‌شود. حسینی و همکاران (۱۳۹۴) نیز گزارش کردند که با افزایش تنش آبی دقت شبیه‌سازی مدل رشد گیاهی AquaCrop کاهش می‌یابد. با این حال بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف آماری نشان‌دهنده دقت بالای مدل رشد گیاهی AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد غده و زیست توده سیب‌زمینی به‌خصوص در شرایط بدون تنش و تنش ملایم است.

جدول ۶- مقادیر شاخص RMSE برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست توده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل رشد گیاهی AquaCrop

مرحله	عملکرد		زیست توده	
	تیمار I80	تیمار I65	تیمار I80	تیمار I65
واسنجی	۰/۳۴	۰/۶۷	۰/۷۳	۰/۰۹
صحت‌سنجی	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۸۵	۰/۰۵

به‌منظور ارزیابی بهتر مدل رشد گیاهی AquaCrop ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز برای مقایسه عملکرد و زیست توده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی محاسبه شد (جدول ۶). با توجه به جدول مشاهده می‌شود که متوسط اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد در مرحله واسنجی برای تیمارهای FI، I80 و I65 به ترتیب ۰/۳۴، ۰/۶۷ و ۰/۶۶ تن بر هکتار و در مرحله صحت‌سنجی نیز ۰/۶۹، ۰/۷۱ و ۰/۶۶ تن بر هکتار بدست آمد. علاوه بر این برای شبیه‌سازی زیست توده نیز مقدار شاخص RMSE در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای تیمار FI معادل ۰/۷۳ و ۰/۸۵ تن در هکتار بدست آمد در حالی که مقدار این ضریب برای

تولید سناریوهای تغییر اقلیم در دوره‌های آتی

نتایج حاصل از ارزیابی داده‌های تولید شده با استفاده از مدل LARS-WG و داده‌های مشاهده شده در دوره پایه در جدول (۷) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب تبیین در همه موارد از مقدار قابل توجهی برخوردار است (بالای ۰/۹۹) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای شبیه‌سازی دمای حداقل، دمای حداکثر، ساعات آفتابی و بارش به ترتیب ۰/۰۵، ۰/۰۳، ۰/۰۱ و ۰/۱۶ بدست آمد که نشان می‌دهد خطای شبیه‌سازی بارش بیشتر از بقیه پارامترهاست. شاخص ریشه میانگین مربعات خطا در شبیه‌سازی بارش نیز نسبت به

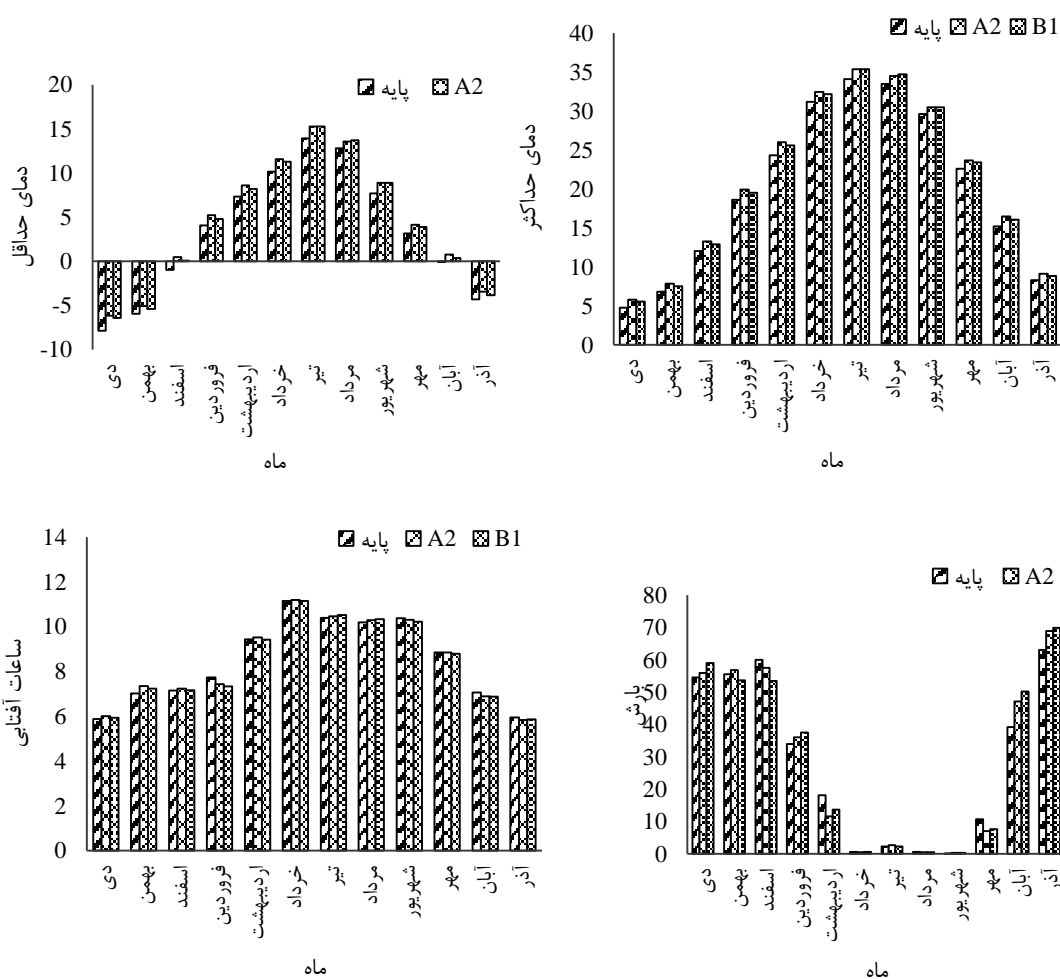
دیگر پارامترها به مراتب بیشتر بوده (۲/۰۲) و خطای بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین توانایی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی تأیید شده ولی با این حال مدل در شبیه‌سازی بارش دقت کمتری را نشان می‌دهد که با یافته‌های حسینی و همکاران (۱۳۹۴) و درزی نفت‌چالی و کاراندیش (۱۳۹۵) مطابقت دارد. در ادامه نتایج مربوط به میانگین ماهانه دما، بارش و ساعات آفتابی در دوره پایه و دو دوره آتی تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است.

جدول ۷- شاخص‌های آماری ارزیابی مدل LARS-WG

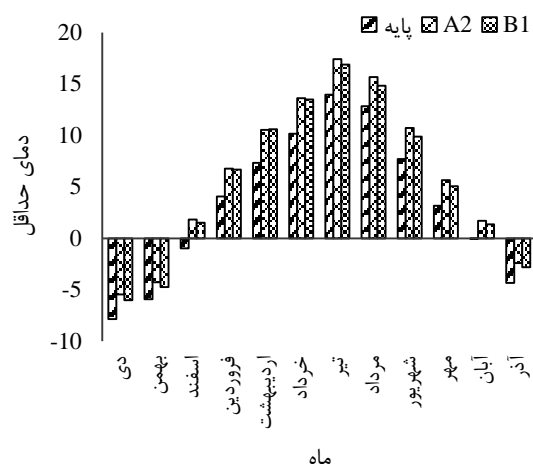
پارامتر	R ²	RMSE	MAE
دمای حداقل	۰/۹۹۸۷	۰/۲۸	۰/۰۵
دمای حداکثر	۰/۹۹۹۷	۰/۲۰	۰/۰۳
ساعات آفتابی	۰/۹۹۴۴	۰/۱۶	۰/۰۱
بارش	۰/۹۹۴۸	۲/۰۲	۰/۱۶

معادل ۱/۱۱ و تحت سناریو B1 معادل ۱/۰۳ درجه سانتی‌گراد است. علاوه بر این میانگین بارش شبیه‌سازی شده در دوره رشد سیب‌زمینی برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریو A2، ۰/۶۳ میلی‌متر و تحت سناریو B1، ۰/۵۷ میلی‌متر کاهش نشان می‌دهد. به همین ترتیب در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ نیز دمای حداقل شبیه‌سازی شده برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر تحت سناریو A2 و B1 به‌طور متوسط ۳/۰۵ و ۲/۴۸ درجه سانتی‌گراد افزایش نشان می‌دهد. نتایج پیش‌بینی‌های نشان می‌دهد که در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ دمای حداکثر برای ماه‌های مورد بررسی تحت سناریو A2 و B1 به‌طور متوسط ۲/۹۸ و ۲/۳۹ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. میزان بارندگی منطقه نیز به‌طور میانگین در طول فصل رشد سیب‌زمینی در دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶ تحت سناریو A2، ۰/۰۶ میلی‌متر و تحت سناریو B1، ۰/۲۴ میلی‌متر کاهش می‌یابد.

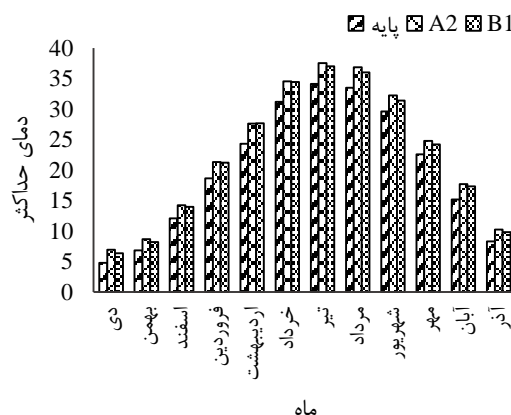
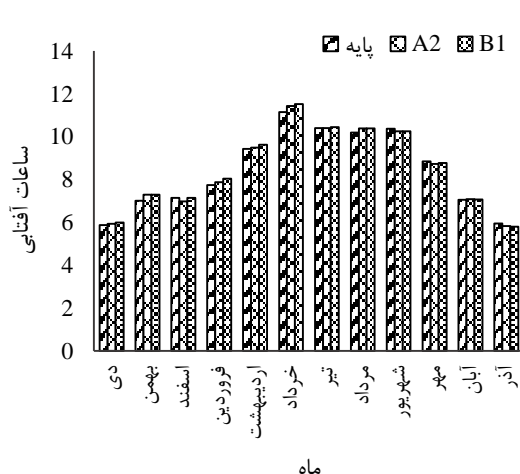
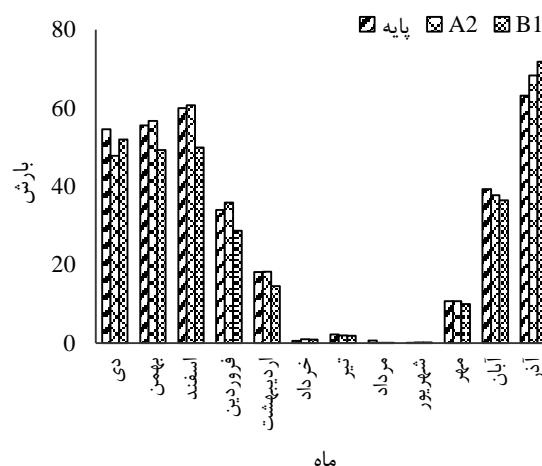
با توجه به شکل (۲) و (۳) دمای حداکثر و حداقل شبیه‌سازی شده برای دو دوره آبی تحت هر دو سناریو نسبت به دوره پایه برای تمام ماه‌ها افزایش نشان می‌دهد. میانگین ماهانه بارش نیز در دوره‌های آبی در همه ماه‌ها دچار تغییر شده است اما روند مشخصی در آن‌ها مشاهده نمی‌شود. همچنین تغییرات ساعات آفتابی نیز در هر دو دوره تحت هر دو سناریو به‌صورت جزئی و ناچیز می‌باشد که با نتایج کوچکی و نصیری محلاتی (۱۳۸۷) مطابقت داشته و در ادامه از بررسی بیشتر این پارامتر صرفه‌نظر می‌کنیم از آن جایی که هدف ما در این تحقیق ارزیابی این تغییرات در دوره رشد سیب‌زمینی در منطقه است بنابراین تغییرات پارامترهای هواشناسی در این بازه (خرداد تا مهر) طی دوره‌های آبی حائز اهمیت است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ دمای حداقل شبیه‌سازی شده برای بازه مورد بررسی تحت سناریو A2 و B1 به‌طور متوسط ۱/۱۴ و ۱/۰۶ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در این دوره متوسط افزایش دمای حداکثر برای ماه‌های ذکر شده تحت سناریو A2



شکل ۲- میانگین ماهانه دما، بارش و ساعات آفتابی در دوره پایه و دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریوهای A2 و B1



شکل ۳-

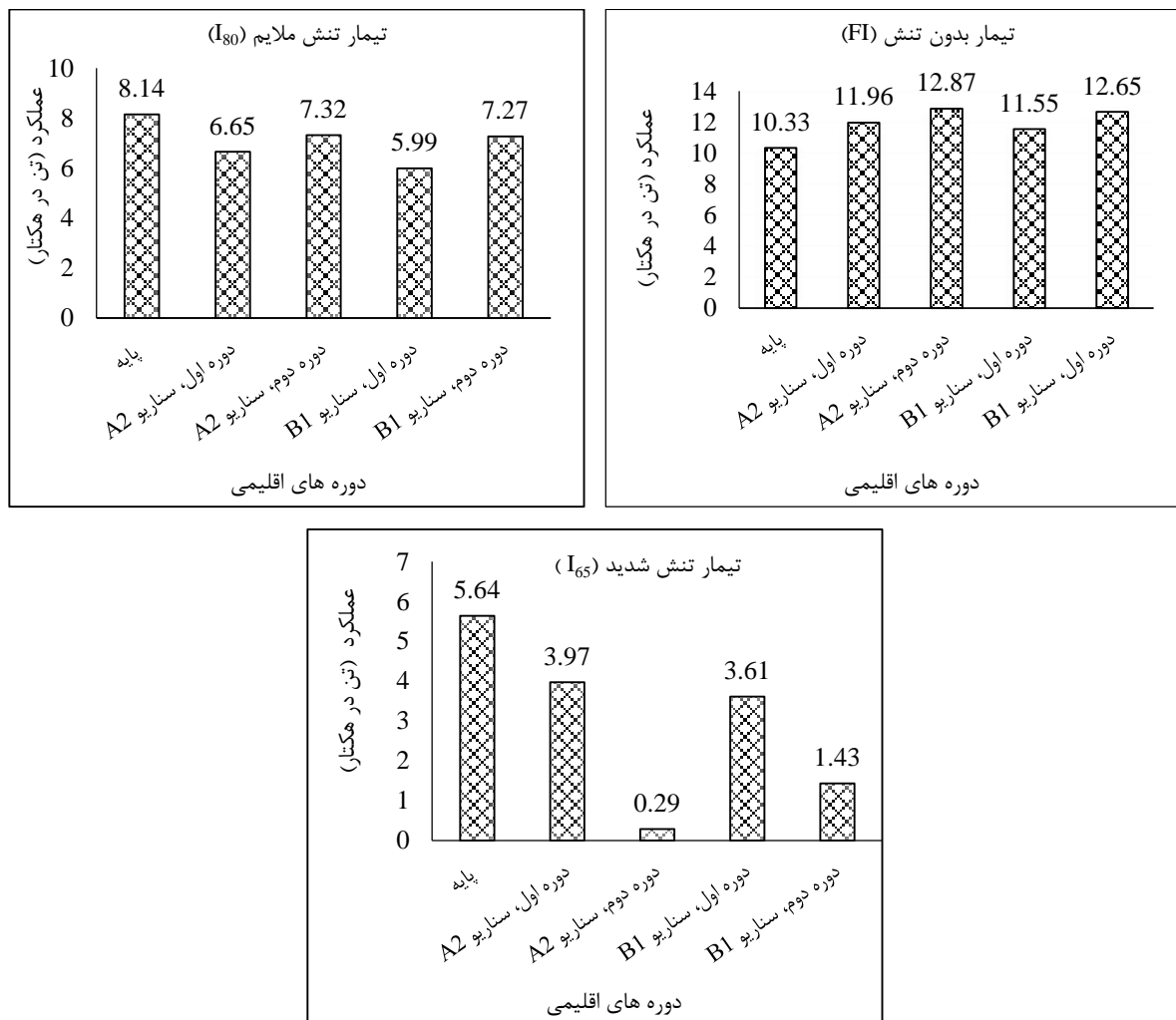


مقایسه میانگین ماهانه دما، بارش و ساعات آفتابی در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و دوره پایه تحت سناریوهای انتشار A2 و B1

این نتایج و نتایج مربوط به اطلاعات اقلیمی نشان می‌دهد که افزایش دما و میزان دی اکسیدکربن اتمسفر در اقلیم مورد نظر اثر مثبتی روی عملکرد محصول سیب‌زمینی دارد به گونه‌ای که در هر دو دوره میزان عملکرد افزایش یافته و این افزایش در سناریوی A2 بیشتر از سناریوی B1 است. این نتایج با نتایج Meza و همکاران (۲۰۰۸) و حسینی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. همچنین برای تیمارهای I₆₅ و I₈₀ مقدار عملکرد در هر دو دوره و هر دو سناریو نسبت به دوره پایه کاهش نشان می‌دهد. به طوری که عملکرد سیب‌زمینی در تیمار I₈₀ در دوره اول و دوم آبی تحت سناریوی A2 به ترتیب ۳/۱۸ و ۱/۱۰ درصد و تحت سناریوی B1 به ترتیب ۴۱/۲۶ و ۶۹/۱۰ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. برای تیمار I₆₅ نیز حدود ۲ تا ۵ تن در هکتار کاهش عملکرد نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود که دلیل

بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد سیب‌زمینی مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده برای دوره پایه با دوره‌های آبی تحت سناریوهای A2 و B1 در سه سطح آبیاری ۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۶۵٪ آب مورد نیاز گیاه در شکل (۴) نشان داده شده است. بر این اساس عملکرد سیب‌زمینی در تیمار بدون تنش از مقدار ۱۰/۳۳ تن در هکتار برای دوره پایه به ۱۱/۹۶ و ۱۱/۵۵ تن در هکتار در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریوهای A2 و B1 رسیده است. به عبارت دیگر برای دوره آبی اول تحت سناریوهای A2 و B1 به ترتیب ۱۵/۸ و ۱۱/۸ درصد افزایش عملکرد مشاهده می‌شود. برای دوره آبی دوم نیز عملکرد محصول تحت سناریوهای A2 و B1 به میزان ۲۴/۵ و ۲۲/۴ درصد افزایش یافته است. بررسی

آن می‌تواند کاهش بارندگی و همچنین افزایش دما در طول فصل رشد سیب‌زمینی در دوره‌های آبی باشد.



شکل ۴- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده برای دوره پایه و دوره‌های آبی تحت سناریوهای A2 و B1

نتیجه‌گیری

۱/۰۶ درجه سانتی‌گراد و برای دوره ۲۰۴۵-۲۰۴۶ نیز ۳/۰۵ و ۲/۴۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. در دوره اول و دوم متوسط افزایش دمای حداکثر برای ماه‌های ذکر شده تحت سناریو A2 معادل ۱/۱۱ و ۲/۹۸ درجه سانتی‌گراد و تحت سناریو B1 معادل ۱/۰۳ و ۲/۳۹ درجه سانتی‌گراد بدست آمد. علاوه بر این میانگین بارش شبیه‌سازی شده در طول رشد سیب‌زمینی برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۴۵-۲۰۴۶ بین ۰/۰۶ تا ۰/۶۳ میلی‌متر کاهش یافت. پس از تولید سناریوهای اقلیمی برای دوره‌های آبی، میزان عملکرد سیب‌زمینی برای شرایط اقلیمی آینده با استفاده از مدل رشد گیاهی

در این پژوهش با استفاده از مدل رشد گیاهی AquaCrop تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد سیب‌زمینی در سطوح مختلف آبیاری برای وضعیت اقلیمی شهرکرد در دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۴۵-۲۰۴۶ تحت سناریوهای اقلیمی A2 و B1 بررسی شد. برای تولید داده‌های هواشناسی دوره‌های آبی از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG استفاده شد. بر این اساس در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ دمای حداقل شبیه‌سازی شده برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر تحت سناریو A2 و B1 به‌طور متوسط ۱/۱۴ و

مجرد، ف.، ل. نادری، ب. فرهادی و م. حافظپرست. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات عملکرد ذرت تحت تأثیر تغییر اقلیم در استان کرمانشاه. فصلنامه مدرس علوم انسانی (برنامه ریزی و آمایش فضا)، دوره ۲۰، شماره ۴، ص ۲۵۵-۲۲۷.

نهبندانی، ع. ر. و ا. سلطانی. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر نمو، نیاز آبیاری و عملکرد سویا در گرگان. نشریه آب و خاک، دوره ۳۰، شماره ۱، ص ۷۷-۸۷.

Fischer, G., F.N. Tubelo, H. van Velthuisen and D.A. Wiberg. 2007. Climate change impact on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990–2080. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7):1083–1107.

Gouache, C.H., X.L. Bris, M. Bogard, O. Deudon, C.H. Pagé and P.H. Philippe. 2012. Evaluating agronomic adaptation options to increasing heat stress under climate change during wheat grain filling in France. *European Journal of Agronomy*, 39: 62-70.

IPCC, 2007. Summary for policy makers Climate change: The physical science basis, Contribution of working group I to the fourth assessment report, Cambridge University Press, 881.

Laux, P., G. Jackel, R.M. Tingem and H. Kunstmann. 2010. Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon—A method to improve attainable crop yields by planting date adaptations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 1258-1271.

Ma, L., L.R. Ahuja, A. Islam, T.J. Trout, S.A. Saseendran and R.W. Malone. 2017. Modeling yield and biomass responses of maize cultivars to climate change under full and deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 180: 88-98.

Meza, F.J., D. Silva and H. Vigil. 2008. Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural Systems*, 98: 21–30.

Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao and E. Fereres. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: Reference Manual Annexes.

Voloudakisa, D., Karamanosa, A., Economou, G., Kalivas, D., Vahamidisa, P., Kotoulasa, V., Kapsomenakisa, J and C. Zerefosc. 2015. Prediction of climate change impacts on cotton yields in Greece under eight climatic models using the AquaCrop crop simulation model and discriminant function analysis. *Agricultural Water Management*, 147: 116-128.

Yang, C., H. Fraga, W.V. Ieperen and J.A. Santos. 2017. Assessment of irrigated maize yield response to climate change scenarios in Portugal. *Agricultural Water Management*, 184: 178-190.

Simulation of climate change effects on potato crop yield using AquaCrop plant growth model

Zohre Izadi,^۱ Ali Heidar Nasrolahi,^۲ Bijan Haghighati Borujeni^۳

Abstract

This study was carried out using AquaCrop plant growth model to simulate potato crop yield in irrigation levels of 100, 80 and 65 percent of plant water requirement under climate change conditions in Shahrekord region. The data of two years of 2013 and 2014 were used to calibrate and validate the AquaCrop plant growth model. In order to investigate the effect of climate change on product yield, the output data of the HadCM3 general circulation model under two scenarios A2 and B1 for the periods 2011- 2030 and 2046-2065 are downscaled using LARS-WG model and used as inputs of the growth model. Based on the results, the simulation of potato yields with the AquaCrop plant growth model was carried out with high precision so that the average difference between observed and simulated values in calibration and validation stage was 0.56 and 0.68 ton/ha, respectively. Also, the mean absolute error (MAE) for simulating minimum temperature, maximum temperature, sunshine hours and precipitation with LARS-WG model was 0.05, 0.03, 0.01 and 0.16, respectively which reflects the good performance of the model in producing climate data for the future periods. Simulation results showed that the potato yield for the periods 2011-2030 and 2046-2065 under the A2 scenarios was 15.8 and 24.5 percent, respectively, and under B1 scenario, 11.8 and 22.4 percent increase compared to the base period. Also, for I₈₀ and I₆₅ treatments, the yield value decreases in both the future periods and the two scenarios compared to the base period.

Keywords: AquaCrop Model, Climate scenario, LARS-WG Model, Potato, Shahrekord

^۱ Master of science of Irrigation and drainage, Department of Water Engineering, Lorestan University, Iran, z.izadi2010@gmail.com

^۲ Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Lorestan, Iran, nasrolahi.a@lu.ac.ir (Corresponding Author)

^۳ Assistant professor, Soil and Water Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, shahrekord, Iran, bhaghighati@yahoo.com