



تحقیقات غلات

دوره هفتم / شماره چهارم / زمستان ۱۳۹۶ (۵۷۸-۵۶۳)

شبیه‌سازی تاثیر تغییر اقلیم بر رشد ذرت و بررسی امکان تخفیف اثر منفی آن با تغییر تاریخ کاشت در مغان

محمد رضا شیری^{۱*}

تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۳

چکیده

برنامه‌ریزی مناسب و تعیین راه کارهای افزایش سازگاری گیاهان زراعی به تغییر احتمالی اقلیم، نیازمند شناخت دقیق روند رفتار عوامل اقلیمی و نحوه پاسخ گیاهان زراعی به این تغییرات است. بدین منظور، مطالعه حاضر با هدف شبیه‌سازی آثار تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیک و عملکرد دانه ذرت هیبرید سینگل کراس ۶۴۷ و بررسی امکان تعدیل آثار منفی تغییر اقلیم بر تولید ذرت با تغییر تاریخ کاشت به‌عنوان یک راه کار مدیریتی در منطقه مغان انجام گرفت. برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی و ایجاد فصل رشد احتمالی برای سه دوره زمانی ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ تحت دو مدل گردش عمومی HadCM3 و IPCM4 با سه سناریوی A1B، B1 و A2 از مدل مولد اقلیم LARS-WG و برای شبیه‌سازی رشد ذرت از مدل AquaCrop استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل LARS-WG نشان داد که این مدل پارامترهای اقلیمی و فصل رشد احتمالی را به‌طور مناسب شبیه‌سازی کرد. نتایج شبیه‌سازی رشد ذرت با مدل AquaCrop نیز مشخص کرد که طول دوره کاشت تا سبزشدن و گل‌دهی، طول دوره پرشدن دانه و طول دوره رسیدگی فیزیولوژیک ذرت تحت تاثیر تغییر اقلیم در بیشتر سناریوهای مورد استفاده کاهش یافت. همچنین عملکرد ذرت تحت تاثیر تغییر اقلیم طی سه دوره آینده، از ۴/۴ تا ۳۰ درصد نسبت به شرایط کنونی کاهش می‌یابد. به‌منظور کاهش اثر منفی تغییر اقلیم از استراتژی تغییر کاشت استفاده و نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در سال ۲۰۲۵، کاشت ذرت در حوالی ۲۶ فروردین (زودتر از تاریخ کاشت کنونی یعنی دهه سوم اردیبهشت) باعث تولید عملکرد بالاتری نسبت به سایر تاریخ‌های کاشت (۱۱ فروردین و ۱۰ اردیبهشت) و در سال‌های ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ تاریخ‌های کاشت ۱۱ و ۲۶ فروردین در شرایط تغییر اقلیم مناسب‌تر خواهند بود. بر اساس نتایج این تحقیق، به‌نظر می‌رسد که بتوان از استراتژی مدیریت تاریخ کاشت به‌عنوان یک راه کار مناسب برای تعدیل آثار منفی تغییر اقلیم بر عملکرد ذرت استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: سناریوهای اقلیمی، مدل AquaCrop، مدل LARS-WG

۱- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

* نویسنده مسئول: mohammadrezashiri52@gmail.com

مقدمه

تغییر اقلیم، فقر و عدم امنیت غذایی سه چالش معین و به هم مرتبط هستند که جوامع بشری در قرن ۲۱ با آنها رو به رو است. به طوری که تولیدات کشاورزی جهان طی سه تا چهار دهه آینده به دلیل افزایش جمعیت و تغییر عادات غذایی باید به سه برابر (افزایش ۷۰ درصدی تا سال ۲۰۵۰) افزایش یابد تا تقاضای فزاینده مصرف را تامین کند (Abumhadi *et al.*, 2012). این در حالی است که با وجود کاهش کمیت و کیفیت منابع طبیعی ضروری مانند خاک و آب، پیش‌بینی شده است که گرمایش جهانی کره زمین باعث ایجاد تغییراتی در دما و الگوهای بارش نیز خواهد شد. افزایش غلظت سالیانه دی اکسید کربن اتمسفر با سرعتی معادل ۲/۴ درصد باعث شده است که غلظت این گاز از حدود ۲۸۰ میکرو مول بر مول در قبل از انقلاب صنعتی به ۳۷۹ میکرو مول بر مول در حال حاضر افزایش یابد (IPCC, 2007). افزایش غلظت CO₂ و نیز سایر گازهای گلخانه‌ای باعث ایجاد تغییرات اقلیمی مانند افزایش دما و تغییر الگوی بارندگی و تابش خورشیدی می‌شود. بر اساس آخرین گزارش مجمع بین دولتهای تغییر اقلیم، میانگین دما در جهان تا ۵۰ سال آینده ۰/۶ تا ۲/۵ درجه سلسیوس و تا پایان قرن حاضر ۱/۱ تا ۶/۴ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد و دامنه این افزایش دما در مقیاس منطقه‌ای بسیار زیاد خواهد بود (IPCC, 2007). در مناطق گرم و خشک، علاوه بر افزایش دما و کاهش بارندگی، فراوانی و شدت وقوع پدیده‌های نادر اقلیمی نظیر خشک‌سالی، گرما، سرما و سیل نیز تشدید خواهد شد (IPCC, 2007). تحقیقات و پژوهش‌های علمی مربوط به تغییر اقلیم که طی سال‌های اخیر در ایران انجام شده است، همگی موید بروز این پدیده در کشور بودند. کوچکی و همکاران (Koocheki *et al.*, 2006) با ارزیابی شاخص‌های اقلیمی کشاورزی ایران نشان دادند که طی ۲۰ سال آینده متوسط دما تقریباً در تمامی مناطق کشور افزایش خواهد یافت و در عرض‌های جغرافیایی میانه به ازاء هر درجه سلسیوس افزایش متوسط دمای سالیانه، تبخیر به میزان ۵ درصد افزایش خواهد یافت (Koocheki and Kamali, 2010).

بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیک گیاهان زراعی تحت تاثیر تغییرات اقلیمی قرار خواهند گرفت. افزایش غلظت CO₂ با تحریک فتوسنتز، تغییر هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب، عملکرد بیش‌تر را برای اغلب گیاهان زراعی به همراه خواهد داشت (Leemans and Solomon, 1993).

افزایش دما نیز با افزایش سرعت نمو محصولات زراعی بر تولید آنها موثر خواهد بود. با این وجود، به نظر می‌رسد که افزایش دمای ناشی از گرمایش جهانی و کاهش میزان بارش نه تنها آثار سودمند افزایش CO₂ را خنثی خواهد کرد، بلکه موجب کاهش قابل توجه در عملکرد نیز خواهند شد (Leemans and Solomon, 1993).

اثر تغییر اقلیم بر محصولات زراعی معمولاً به دو صورت، بررسی تاثیر افزایش دما و غلظت CO₂ بر جنبه‌های فیزیولوژیک رشد و نمو گیاهان زراعی نظیر فتوسنتز، تنفس، مقاومت روزنه‌ای در محیط‌های کنترل شده و یا بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تولید محصولات زراعی در مقیاس منطقه‌ای انجام می‌پذیرد (Leemans and Solomon, 1993). روش اول پر هزینه و نیازمند تجهیزات ویژه آزمایشگاهی است، ولی روش دوم که در حال حاضر بیش‌تر مورد توجه محققین قرار گرفته است، بسیار مناسب و کم‌هزینه است. به‌طور کلی، اساس مطالعه آثار منطقه‌ای تغییر اقلیم بر تولید محصولات زراعی شامل، تعیین شاخص‌های اقلیمی کشاورزی در شرایط کنونی، پیش‌بینی این شاخص‌ها برای شرایط اقلیمی آینده بر اساس سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و مقایسه آنها با شرایط کنونی و در نهایت ارزیابی تاثیر شرایط اقلیمی آینده بر رشد و تولید گیاهان می‌باشد. مدل‌های گردش عمومی (GCM) ابزار مناسب و در عین حال دقیقی برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی در آینده است و داده‌های لازم برای اجرای مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو محصولات زراعی تحت شرایط اقلیم را فراهم می‌سازد (Leemans and Solomon, 1993). بنابراین با در اختیار داشتن اطلاعات خروجی از مدل‌های GCM و استفاده از آنها در مدل‌های رشد گیاهان می‌توان فرآیندهای مرتبط با تغییر اقلیم را با سرعت زیاد و هزینه کم پیش‌بینی کرد.

مقابله با تغییر اقلیم مستلزم ارزیابی راه‌کارهایی برای سازگاری با شرایط آینده است. در همین راستا، برای کاهش آثار منفی تغییر اقلیم، دو استراتژی تخفیف و سازگاری پیشنهاد شده است. تاکید استراتژی‌های تخفیف به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است، اما در استراتژی‌های سازگاری سعی می‌شود رشد و نمو گیاه طوری تنظیم شود که کم‌تر در معرض تغییرات اقلیمی به وقوع پیوسته قرار گیرد (Rosenzweig and Tubiello, 2007). راه‌کارهای سازگاری بسته به سیستم کشاورزی، منطقه و سناریوهای تغییر اقلیمی متفاوت است و از آنها می‌توان به تغییر تاریخ

نیمه‌بیابانی خفیف بوده و با متوسط تبخیر سالانه ۱۴۸۶/۵ میلی‌متر، دارای زمستان‌های ملایم و تابستان‌های گرم است. تیر و مرداد گرم‌ترین و دی و بهمن سردترین ماه‌های سال هستند. طبق آمار هواشناسی ۳۰ ساله، پارس‌آباد دارای متوسط بارندگی سالانه ۲۷۱/۲ میلی‌متر است که بیش‌ترین میزان دریافت بارندگی آن از فروردین تا آخر خرداد می‌باشد.

مدل اقلیمی و جمع‌آوری اطلاعات

به‌منظور تهیه پارامترهای اقلیمی به‌صورت روزانه برای شبیه‌سازی فصل رشد احتمالی آبی از مدل LARS-WG استفاده شد. این مدل در کنار مدل WGEN بیش از سایر مدل‌های مولد اقلیم مورد استفاده قرار می‌گیرد و دقت نتایج حاصل از آن مشابه مدل WGEN و سایر مولدهای اقلیمی معتبر می‌باشد (Semenov *et al.*, 1998). بنابراین جهت پیش‌بینی شرایط زراعی آینده با مدل LARS-WG برای چهار دوره زمانی (۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴) (سال مبنا)، ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵) در منطقه مغان، داده‌های اقلیمی روزانه شامل دمای کمینه و بیشینه، بارش و ساعات آفتابی مربوط به ایستگاه سینوپتیک مغان در طول دوره ۱۹۸۵ (۱۳۶۳) تا ۲۰۱۴ (۱۳۹۴) جمع‌آوری شد. ابتدا دقت خروجی‌های مدل LARS-WG برای سال‌های مشاهده شده با استفاده از رفتار آب و هوای منطقه و سری زمانی تست و هم‌چنین با استفاده از آماره مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) اعتبارسنجی شد. سپس با مدل LARS-WG داده‌های اقلیمی برای یک سال نمونه (۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵) از سه دوره زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰، ۲۰۴۱ تا ۲۰۷۰ و ۲۰۷۱ تا ۲۱۰۰ برای ایستگاه مغان با استفاده از دو مدل گردش عمومی HadCM3 (Mitchell *et al.*, 1995) (United Kingdom Met Office Hadley Center) و IPCM4 (Semenov and Stratonovitch, 2010) (Pierre Simon Laplace) تحت سه سناریوی استاندارد SRES-A2، SRES-B1 و SRES-A1B برآورد شد. در حال حاضر بهترین ابزار تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های جفت‌شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو است (Ruiz-Ramos and Miguez, 2010). بر اساس سناریوی بدبینانه SRES-A2، غلظت CO₂ سالیانه حدود ۳۰ گیگاتن افزایش و دما بین ۲ تا ۵/۴ درجه سلسیوس تا پایان قرن حاضر افزایش خواهد یافت (Prudhomme *et al.*, 2010). بر مبنای سناریوی خوش‌بینانه SRES-B1

و تراکم کاشت (Trnka *et al.*, 2004)، استفاده از ارقام مقاوم به شرایط گرم‌تر، تغییر در تناوب کاشت، مدیریت آبیاری و غیره اشاره کرد (Smit and Skinner, 2002). ذرت گیاهی از خانواده گرامینه و از غلات مهم مناطق گرمسیری و معتدل جهان است و در دنیا از نظر تولید رتبه اول و از نظر سطح زیر کشت بعد از گندم رتبه دوم را به خود اختصاص داده است (FAOSTAT, 2014) و با توجه به روند تغییرات اقلیمی اخیر و گرم شدن هوا (Koocheki *et al.*, 2006)، به‌نظر می‌رسد کشت و کار این گیاه به عنوان یک گونه با مسیر فتوسنتزی C4 اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد. حساس‌ترین مرحله رشد ذرت به دمای بالا، مرحله گل‌دهی آن است و افزایش دما، طول این دوره را کاهش می‌دهد. بنابراین، اگر استراتژی‌های سازگاری مناسب در نظر گرفته نشود، به‌دلیل کاهش دوره گل‌دهی و نیز طول دوره رشد ذرت تحت تاثیر تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین، ممکن است عملکرد دانه ذرت در این شرایط کاهش یابد (Trnka *et al.*, 2004). بنابراین، تحقیق حاضر با هدف ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در تاریخ‌های مختلف کاشت، شبیه‌سازی آثار تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیک و عملکرد دانه ذرت و بررسی امکان کاهش آثار منفی تغییر اقلیم بر تولید ذرت از طریق مدیریت تاریخ کاشت در منطقه مغان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های اقلیمی منطقه مغان

استان اردبیل با مجموع اراضی کشاورزی حدود ۷۱۸۶۱۴ هکتار، یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور است. دشت مغان به‌عنوان مهم‌ترین پهنه کشاورزی این استان، با وسعت ۹۰ هزار هکتار در شمالی‌ترین نقطه آن قرار گرفته است و در این دشت، بیش از ۲۵ گیاه زراعی مانند گندم، ذرت، یونجه، برنج و غیره مورد کشت و کار قرار می‌گیرد. هم‌چنین این دشت به‌عنوان مرکز اصلی و مهم تولید بذر هیبرید ذرت، حدود ۷۵ تا ۸۰ درصد از بذر هیبرید ذرت مورد نیاز کشور را تولید می‌کند. این دشت با عرض جغرافیایی ۳۹ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۴۵ تا ۵۰ متر از سطح دریا، به علت شرایط توپوگرافی خاص، اصولاً آب و هوای متفاوت با سایر مناطق آذربایجان و حتی نواحی جنوبی آن دارد. بر اساس آمار آب و هوایی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک پارس‌آباد، این منطقه جزء اقلیم

کاربر طبقه‌بندی و توسط کاربر به مدل معرفی می‌شوند. صفات گیاهی نظیر تراکم کاشت، تعداد روز تا سبز شدن، تعداد روز لازم تا شروع گل‌دهی، طول دوره گل‌دهی، تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیک، تعداد روز تا شروع پیری برگ، حداکثر عمق ریشه در این گروه قرار می‌گیرند. اغلب این پارامترها روی عملکرد محصول تاثیرگذار هستند (Raes *et al.*, 2011).

واسنجی مدل عبارت از کاهش اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده توسط مدل می‌باشد. متداول‌ترین روشی که محققان برای واسنجی مدل‌ها پیشنهاد کرده‌اند، استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده محصول است (Singh *et al.*, 2008). در این بررسی، برای واسنجی مدل رشد از داده‌های آزمایشی که در فصل زراعی ۱۳۸۴ در مزرعه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان) اجرا شده بود، استفاده شد. این آزمایش به صورت کرت‌های خردشده- فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. تاریخ کاشت در سه سطح شامل ۲۸ فروردین، ۱۷ اردیبهشت (تاریخ کاشت مناسب منطقه) و ۷ خرداد در کرت‌های اصلی و دو عامل هیبرید (سینگل کراس ۶۴۷ و ۷۰۰) و تراکم بوته (۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ هزار بوته در هکتار) به صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار داده شدند.

اعتبارسنجی مدل رشد

اعتبارسنجی یا صحت‌سنجی مدل، اثبات کارایی مدل به‌منظور استفاده در آینده است. جهت اعتبارسنجی مدل از داده‌های آزمایش‌های مختلفی که طی سنوات گذشته توسط نویسنده با هیبرید سینگل کراس ۶۴۷ در منطقه مغان انجام گرفته بود، استفاده شد. صفات عملکرد دانه، تعداد روز تا گل‌دهی، طول دوره پر شدن دانه و تعداد روز تا رسیدگی فیزیولوژیک برای اعتبارسنجی مدل رشد در نظر گرفته شدند.

جهت ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی رشد گیاه ذرت در منطقه مغان، از آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، خطای نسبی (Pe)، میانگین خطای نسبی (RE) و شاخص توافق (شاخص ویلموت یا آماره d) استفاده شد (Singh *et al.*, 2008). علاوه بر معیارهای بالا از معادله رگرسیون برازش داده شده

شرایط جهانی هم‌گرا است، غلظت CO₂ تغییر چندانی نخواهد کرد و دما بین ۱/۱ تا ۲/۹ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت (Wetterhall *et al.*, 2009). بر اساس سناریوی SRES-A1B، غلظت CO₂ حدود ۱۵ گیگاتن افزایش و دما بین ۱/۷ تا ۴/۴ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت (Olesen *et al.*, 2011).

واسنجی مدل رشد

شبیه‌سازی پارامترهای مختلف رشدی ذرت با استفاده از مدل AquaCrop فائو انجام گرفت. این مدل برای اجرا نیاز به داده‌های هواشناسی، گیاه، خاک، مدیریت مزرعه و آبیاری دارد. داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل AquaCrop مقادیر بیشینه و کمینه دمای هوا، تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) و بارش هستند. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از داده‌های اقلیمی (دمای بیشینه و کمینه هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و میزان ساعات آفتابی) به روش پنمن مانیتث فائو با برنامه ET₀ calculator محاسبه و به صورت فایل مجزا وارد مدل AquaCrop شد. یک سری پارامترهای گیاهی در مدل AquaCrop استفاده می‌شود که مقادیر آن‌ها برای ارقام مختلف هر گیاه تقریباً ثابت است و به‌عنوان پیش‌فرض در مدل توسط کارشناسان فائو ارائه شده است. هر چند مقادیر این پارامترها با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر محسوسی نمی‌کنند، با این حال توصیه شده است جهت افزایش دقت و کارایی شبیه‌سازی و نیز به دلیل تفاوت‌های جزئی بین ارقام مختلف یک گونه گیاهی، بهتر است مقادیر این پارامترها طی آزمایش‌های میدانی به‌طور دقیق تعیین و در صورت لزوم، مقادیر آن‌ها به صورت جزئی (Fine Tuning) اصلاح شود. پارامترهایی نظیر ضریب افزایش سطح سایه‌انداز در هر روز، ضریب کاهش سطح سایه‌انداز در هر روز، حد بالای عامل تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها، حد پایین عامل تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها، عامل تخلیه آب خاک برای تنظیم میزان بسته شدن روزنه‌ها، عامل تخلیه آب خاک برای تنظیم زمان شروع پیری پوشش گیاهی، درصد شاخص بهره‌وری آب در طول تشکیل محصول، شاخص بهره‌وری تعدیل شده و شاخص برداشت مرجع در این گروه قرار می‌گیرند. علاوه بر پارامترهای گیاهی ثابت، پارامترهای گیاهی دیگری نیز وجود دارند که مقادیرشان بستگی به ژنوتیپ‌های گیاه دارد و باید برای هر ژنوتیپ و منطقه واسنجی شوند. این پارامترها، تحت عنوان پارامترهای ویژه

بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده همراه با خط ۱:۱ و ضریب تبیین مدل (R^2) استفاده شد. همچنین فرض تساوی (فرض صفر) و عدم تساوی (فرض مقابل) داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده از طریق روش آماری t استیودنت نیز مورد آزمون گرفت.

نتایج و بحث

روند تغییرات درازمدت دما و بارندگی در منطقه مغان

بررسی روند تغییرات درازمدت میانگین دمای کمینه و بیشینه برای منطقه مغان طی دوره زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ نشان داد که با گذشت زمان میانگین دمای کمینه و بیشینه روند افزایشی داشته است، به طوری که هر سال به دمای بیشینه حدود ۰/۰۴ درجه و به دمای کمینه حدود ۰/۰۵ درجه سلسیوس افزوده شده است. علاوه بر این، هر سال میانگین دما به میزان ۰/۰۴ درجه سلسیوس افزایش یافته است. در دوره زمانی مورد مطالعه، بالاترین دمای بیشینه با ۲۲/۲۸ درجه سلسیوس در سال ۱۹۹۹ و بالاترین دمای کمینه با ۱۱/۰۹ درجه سلسیوس در سال ۲۰۱۰ مشاهده شد. همچنین از سال ۱۹۹۵ تا کنون میانگین دمای بیشینه در همه سال‌ها به جز سال ۲۰۰۳ بیش از ۲۰ درجه سلسیوس بوده است. بارندگی منطقه مغان تقریباً روند کلی ثابتی داشت و به طور متوسط هر سال کم‌تر از یک میلی‌متر (در حدود ۰/۸۹ میلی‌متر) به میزان بارندگی سالانه مغان اضافه شده است. برخلاف روند کلی تقریباً ثابت بارندگی منطقه، تغییرات میزان بارندگی سالانه طی سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ بسیار زیاد بوده است. به طوری که بین حداقل (۱۵۲/۴۸ میلی‌متر در سال ۱۹۹۶) و حداکثر بارندگی (۴۰۷/۵ میلی‌متر در سال ۲۰۰۳)، اختلاف زیادی (به میزان ۲۵۵/۰۲ میلی‌متر) وجود داشت (شکل ۱). بنابراین، با توجه به این نتایج می‌توان ادعا کرد که اقلیم منطقه مغان در حال تغییر است.

اعتباردهی پارامترهای اقلیمی شبیه‌سازی شده با

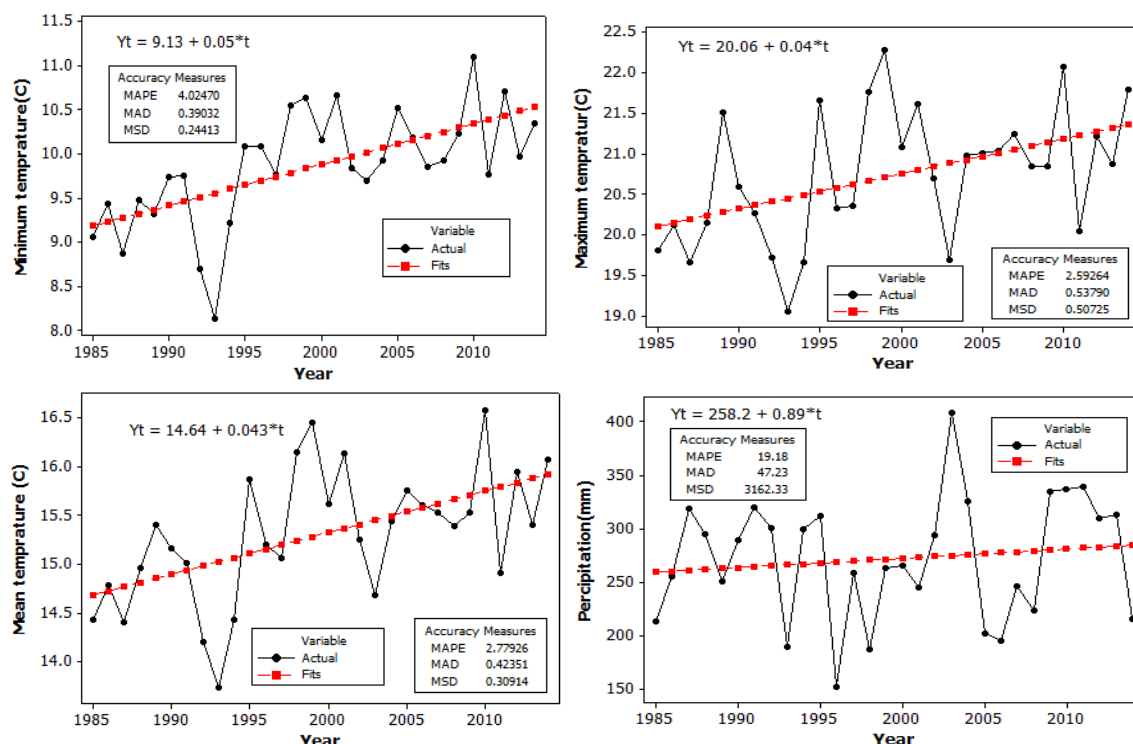
مدل LARS-WG

نتایج اعتباردهی داده‌های حاصل از مدل LARS-WG نشان داد که این مدل دقت بیش‌تری در شبیه‌سازی دمای

بیشینه در مقایسه با دمای کمینه و بارش داشت (شکل ۲). به طوری که اختلاف میانگین دمای بیشینه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به طور متوسط ۰/۳۶ درجه سانتی‌گراد بود. این نتیجه مشخص کرد که این مدل در شبیه‌سازی دمای بیشینه از کارآمدی بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. مرادی و همکاران (Moradi et al., 2014) در تحقیقی که در منطقه مشهد انجام دادند به نتیجه مشابهی رسیدند و اعلام کردند مدل LARS-WG توانایی شبیه‌سازی بسیار مناسب دمای بیشینه را داشته و به طور متوسط اختلاف بین میانگین دمای بیشینه و کمینه در مطالعه آن‌ها برابر با ۱/۷ درجه سانتی‌گراد بود. مدل LARS-WG میانگین دمای کمینه را با متوسط دقت ۰/۳۷ درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی کرد (شکل ۲). در صورتی که دقت شبیه‌سازی برای دمای کمینه در مطالعه مرادی و همکاران در مشهد پایین‌تر از مطالعه حاضر بود و متوسط اختلاف مشاهده بین دمای کمینه مشاهده شده و شبیه‌سازی در مطالعه آن‌ها در حدود ۱/۹ درجه سانتی‌گراد بود. مدل LARS-WG بارندگی منطقه مغان را با متوسط اختلاف ۲/۷۸ میلی‌متر شبیه‌سازی نمود (شکل ۲). در مطالعه مرادی و همکاران در مشهد بارندگی با اختلاف ۱۱ میلی‌متر شبیه‌سازی گردید. به طور کلی نتایج اعتبار سنجی نشان داد مدل LARS-WG قابلیت خوبی در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی (بارندگی، دمای بیشینه و کمینه) داشته و می‌توان از این داده‌های اقلیمی برای شبیه‌سازی فصل رشد احتمالی در شرایط آینده تغییر اقلیم و مطالعات مربوط به تاثیر این عوامل اقلیمی بر رشد نمو گیاهان زراعی استفاده کرد.

اعتباردهی مدل رشد با AquaCrop

نتایج ارزیابی مدل رشد با آماره‌های RMSE، NRMSE، RE و d در جدول ۱ ارائه شده است. صفات عملکرد دانه، تعداد روز تا گل‌دهی، طول دوره پر شدن دانه و تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیک به ترتیب با متوسط خطای ۰/۵۹ (تن در هکتار)، ۱/۷۶ (روز)، ۱/۶ (روز) و ۳/۶۴ (روز) شبیه‌سازی شدند (جدول ۱). همچنین میزان آماره NRMSE برای صفات فوق کم‌تر از ۱۰ بود. به عبارت دیگر، مدل AquaCrop توانسته است شبیه‌سازی این صفات را به صورت ایده‌آل انجام دهد.



شکل ۱- روند تغییرات درازمدت میانگین دمای کمینه و بیشینه و میانگین دما و بارندگی سالیانه در دوره زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ در منطقه مغان، اردبیل، ایران

Figure 1. Long-term trends in average minimum and maximum temperature, mean annual temperature and annual precipitation during the period 1985 to 2014 in Moghan region, Ardabil Iran

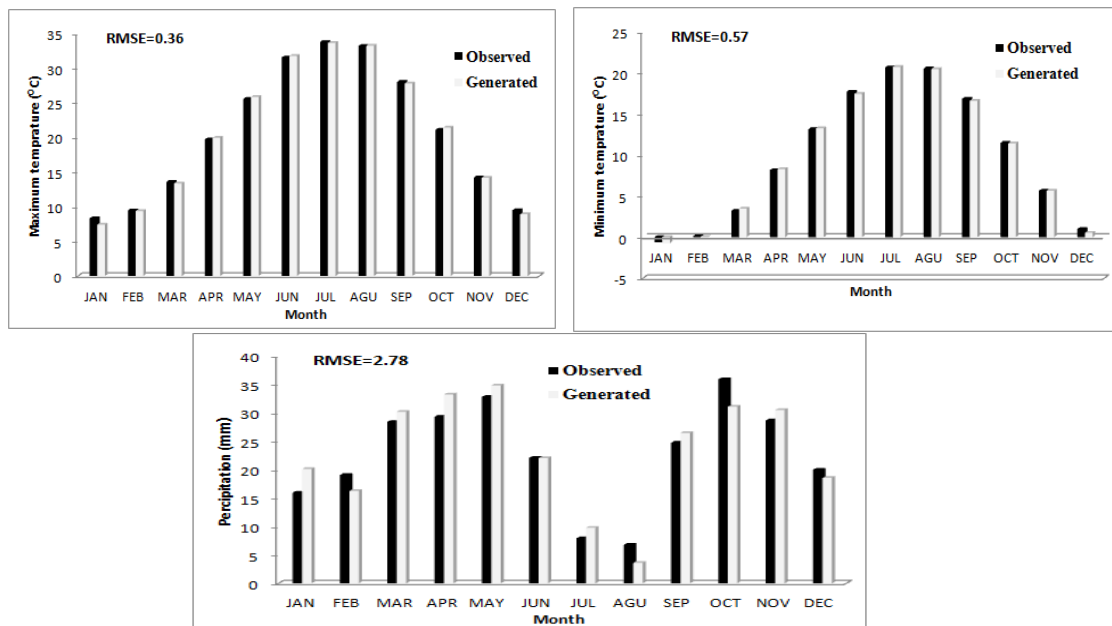
نزدیک به یک بود. بالاترین مقادیر آماره‌های R^2 و d بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مربوط به تعداد روز تا گل‌دهی و طول دوره پر شدن دانه و پایین‌ترین مقادیر مربوط به صفت تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیک بود (جدول ۱). نتیجه آزمون t - استیودنت برای تمام صفات نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وجود نداشت (جدول ۱). هم‌چنین بین دو مقدار شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده انطباق قابل قبولی بر اساس معادله خط ۱:۱ مشاهده شد (شکل ۳). بنابراین می‌توان بیان کرد که مدل AquaCrop تمام صفات مورد مطالعه را با دقت بالایی شبیه‌سازی کرده است. در مطالعه ضیایی و همکاران (Ziaee et al., 2015) در کرج و رحیمی‌خوب و همکاران (Rahimikhoob et al., 2014) در قزوین نیز مدل AquaCrop کارایی مناسبی در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس داشت.

علاوه بر این، میزان متوسط خطای نسبی (RE) برای عملکرد دانه و طول پر شدن دانه مثبت و به‌ترتیب برابر با ۴/۹ و ۱/۰۲ درصد بود. این نشان می‌دهد که مدل در مورد این دو صفت تخمین را به‌طور تقریبی پنج و یک درصد بالاتر انجام داده است، در صورتی که صفات تعداد روز تا گل‌دهی، طول دوره پر شدن دانه و تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیک را به‌ترتیب ۰/۶۵ و ۲/۱۶ درصد پایین‌تر از مقادیر مشاهده شده، برآورد کرده است. بررسی خطای نسبی شبیه‌سازی مدل برای عملکرد دانه در تاریخ‌های کاشت و تراکم‌های مختلف نشان داد که بیش‌ترین خطای نسبی در تاریخ‌های کاشت مختلف، مربوط به تراکم کاشت ۱۰۰ هزار بوته در هکتار (۱۱/۷۷، ۱۳/۱۳ و ۱۱/۶۵ درصد) بود (جدول ۱). تراکم کاشت مناسب برای ارقام متوسط‌ترس ذرت بین ۷۰ تا ۷۵ هزار بوته در هکتار است. چون در تراکم‌های کاشت توصیه نشده، شبیه‌سازی عملکرد توسط مدل به‌خوبی صورت نمی‌گیرد، بنابراین بهتر است بکارگیری مدل در شبیه‌سازی تراکم‌های نامتعارف همراه با احتیاط صورت پذیرد. هم‌چنین مقادیر آماره ضریب تبیین (R^2) (شکل ۳) و آماره d (جدول ۱) برای هر چهار صفت

سناریوها، دوره رشد رویشی با ۸ روز کاهش روبرو خواهد بود. در سال ۲۰۸۵ حداقل کاهش در تعداد روز تا گل‌دهی (با ۵ روز) در صورت وقوع سناریوی B1 در مدل گردش عمومی IPCM4 مشاهده خواهد شد. به‌طور متوسط تعداد روز تا گل‌دهی در سال ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ به ترتیب برابر با ۵۳/۸، ۵۰/۷ و ۴۸/۵ روز خواهد بود. به عبارت دیگر، تعداد ۲/۲، ۵/۳ و ۷/۵ روز از طول دوره رشد رویشی ذرت به ترتیب در این سال‌ها کاسته خواهد شد. همچنین در صورت تحقق مدل گردش عمومی IPCM4 تغییر کم‌تری در طول دوره رشد رویشی ذرت در مقایسه با تحقق مدل گردش عمومی HadCM3 مشاهده خواهد شد. بنابراین می‌توان بیان کرد که بر اساس پیش‌بینی انجام شده، تعداد روز تا گل‌دهی ذرت در هر دو مدل گردش عمومی در کلیه سناریوها، با افزایش زمان، کاهش خواهد یافت. مشابه تعداد روز تا گل‌دهی، شبیه‌سازی طول دوره پرشدن دانه در منطقه مغان نیز نشان داد که تحت تاثیر تغییرات اقلیمی پیش‌رو نسبت به وضعیت کنونی در تمام مدل‌های گردش عمومی با کاهش روبرو خواهد شد.

شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر صفات فنولوژیک و عملکرد دانه ذرت

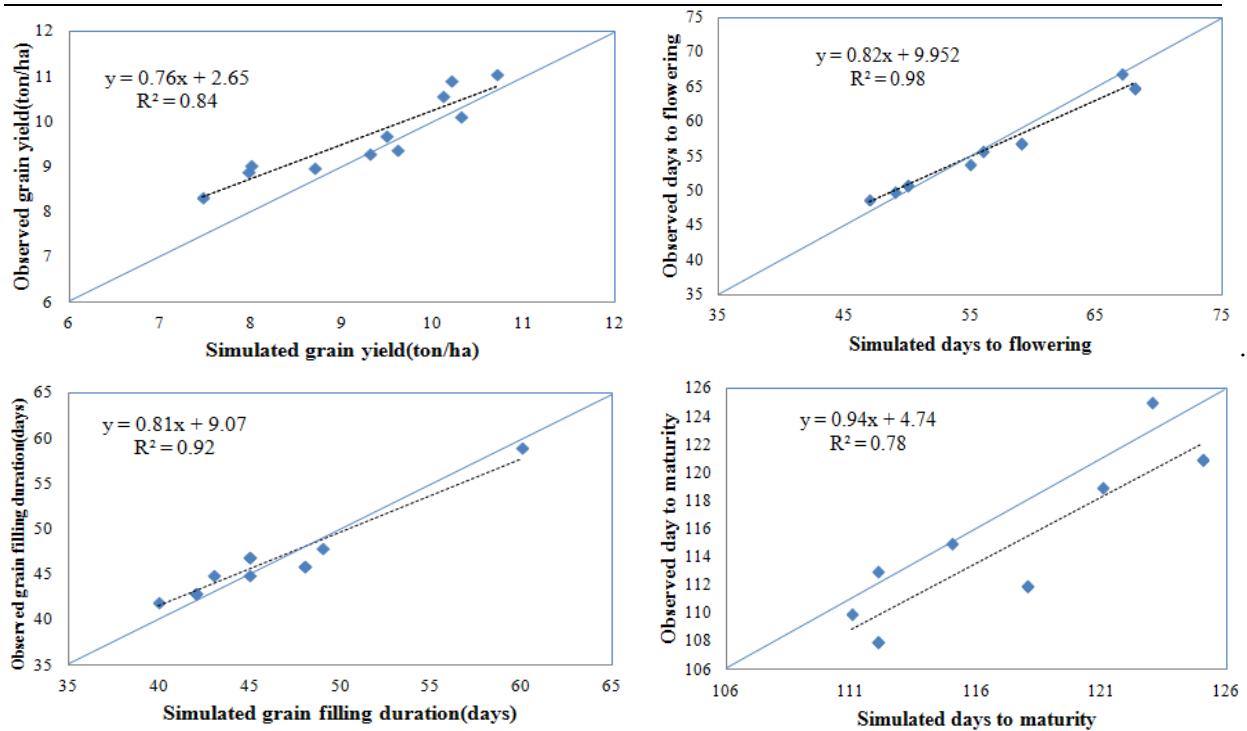
نتایج شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی ذرت نشان داد تعداد روز از کاشت تا گل‌دهی ذرت در منطقه مغان تحت تاثیر تغییرات اقلیمی پیش‌رو نسبت به وضعیت کنونی در هر دو مدل گردش عمومی تحت سناریوهای مختلف کاهش خواهد یافت (جدول ۲). براساس نتایج شبیه‌سازی، سال ۲۰۸۵ در کلیه سناریوها و مدل‌های گردش عمومی تعداد روز تا گل‌دهی کم‌تری نسبت به سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۵ خواهد داشت. به طوری که سناریوی A2 در سال ۲۰۸۵ برای مدل گردش عمومی HadCM3 با ۴۶ روز دارای کم‌ترین تعداد روز تا گل‌دهی خواهد بود. بنابراین در صورت وقوع این سناریو تعداد روز تا گل‌دهی و دوره رشد رویشی در ذرت ۱۰ روز کوتاه‌تر خواهد شد (جدول ۲). سناریوهای بعدی از نظر ایجاد بیش‌ترین تاثیر کاهش، سناریوی A1B در هر دو مدل گردش عمومی و سناریوی A2 مدل گردش عمومی IPCM4 با ۴۸ روز بودند که در صورت وقوع یکی از این



شکل ۲- مقایسه داده‌های اقلیمی (دمای کمینه، دمای بیشینه و بارندگی) مشاهده شده و پیش‌بینی شده با LARS-WG
Figure 2. Comparison of the observed and LARS-WG predicted climatic data (minimum and maximum temperature and precipitation)

جدول ۱- برآورد آماره‌های تعیین اعتبار مدل بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده صفات زراعی برای هیبرید سینگل کراس ۶۴۷ در تاریخ‌ها و تراکم‌های کاشت مختلف در منطقه مغان، اردبیل، ایران
 Table 1. Estimating statistics of model validation based on the measured and simulated values of the agronomic traits for hybrid SC647 in different planting dates and densities for Moghan region, Ardabil, Iran

تاریخ کاشت Planting date	تراکم بوته Density (plant/ha)	عملکرد دانه (تن در هکتار) Grain yield (ton/ha)			روز تا گل‌دهی Days to flowering			طول دوره پر شدن دانه (روز) Grain filling period (days)			روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Days to maturity			
		مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	خطای نسبی مدل Relative error	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	خطای نسبی مدل Relative error	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	خطای نسبی مدل Relative error	مشاهده شده Observed	شبیه‌سازی شده Simulated	خطای نسبی مدل Relative error	
2002.5.1	۱۳۸۱/۲/۱۱	74,000	10.20	10.92	7.05	67	67	0.00	40	42	5.00	123	125	1.63
2003.5.20	۱۳۸۲/۲/۳۰	74,000	10.70	11.06	3.36	56	56	0.00	45	45	0.00	115	115	0.00
2004.5.24	۱۳۸۳/۳/۴	74,000	10.10	10.60	4.95	55	54	-1.82	43	45	4.65	112	113	0.89
2005.4.17	۱۳۸۴/۱/۲۸	70,000	10.30	10.13	-1.65	68	65	-4.41	42	43	2.38	125	121	-3.20
2005.4.6	۱۳۸۴/۱/۱۷	70,000	9.60	9.39	-2.20	59	57	-3.39	45	47	4.44	118	112	-5.08
2005.5.28	۱۳۸۴/۳/۷	70,000	9.30	9.32	0.18	50	51	2.00	48	46	-4.17	112	108	-3.57
2005.4.17	۱۳۸۴/۱/۲۸	100,000	7.97	8.91	11.77	68	65	-4.41	42	43	2.38	125	121	-3.20
2005.4.6	۱۳۸۴/۱/۱۷	100,000	8.00	9.05	13.13	59	57	-3.39	45	47	4.44	118	112	-5.08
2005.5.28	۱۳۸۴/۳/۷	100,000	7.47	8.34	11.65	50	51	2.00	48	46	-4.17	112	108	-3.57
2008.6.9	۱۳۸۷/۳/۲۰	74,000	9.49	9.71	2.32	49	50	2.04	49	48	-2.04	111	110	-0.90
2008.6.24	۱۳۸۷/۴/۴	74,000	8.70	8.99	3.31	47	49	4.26	60	59	-1.67	121	119	-1.65
RMSE				0.59				1.76			1.60			3.64
NRMSE				6.38				3.08			3.46			3.10
RE				4.90				-0.65			1.02			-2.16
d				0.90				0.98			0.97			0.89
t-value				0.987				0.178			0.170			1.066
Significant level				0.335				0.861			0.867			0.299



شکل ۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده صفات زراعی برای هیبرید سینگل کراس ۶۴۷ در تراکم‌ها و سال‌های مختلف با استفاده از معادله خط رگرسیون همراه با خط ۱:۱ در منطقه مغان، اردبیل، ایران

Figure 3. Comparison of the measured and simulated values of the agronomic traits for hybrid SC647 in different sowing dates and densities using the linear regression equation with a 1:1 line in Moghan region, Ardabil, Iran

و ۱۵/۳ روز زودتر پیر خواهد شد و خواهد رسید. به نظر می‌رسد که دلیل اصلی این امر افزایش دمای هوا بین یک تا پنج درجه سلسیوس (IPCC, 2007) بر اساس این سناریوهای باشد. سوتوورد و همکاران (Southworth *et al.*, 2000) گزارش کردند که افزایش دما به طور غیرمستقیم و از طریق تاثیر بر طول مراحل فنولوژیک و نیز مراحل حساس رشد ذرت مثل تولید تاسل و ابریشم منجر به کاهش عملکرد ذرت می‌شود. مزا و همکاران (Meza *et al.*, 2008) نیز با بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد و مراحل فنولوژیک ذرت گزارش کردند که افزایش دما باعث تسریع مراحل فنولوژیک این گیاه می‌شود، به طوری که در محدوده بین ۱۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس افزایش دما منجر به تسریع در سرعت نمو ذرت می‌شود، ولی در دمای بالای ۴۱ درجه سلسیوس ارقام ذرت به شدت تاثیر پذیرفته و باعث کاهش در سرعت نمو و به عبارتی اختلال در رشد ذرت می‌شود. همچنین آن‌ها با شبیه‌سازی تغییر اقلیم در کلیه سناریوهای مورد بررسی، مشاهده کردند که تعداد درجه روز رشد (GDD) مورد نیاز برای تکمیل رشد ذرت در زمان کوتاه‌تری تامین می‌شود.

به طور کلی در سال ۲۰۸۵، سناریوی A2 در مدل گردش عمومی HadCM3 با ۴۱ روز و سناریوی A1B در هر دو مدل گردش عمومی و سناریوی A2 مدل گردش عمومی IPCM4 با ۴۲ روز دارای کم‌ترین طول دوره پرشدن بودند که در صورت وقوع یکی از این سناریوها، طول دوره پرشدن دانه با ۸ و ۷ روز کاهش مواجه خواهد شد. به طور متوسط طول دوره پرشدن دانه در سال ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ به ترتیب برابر با ۴۷، ۴۴/۳ و ۴۲/۲ روز خواهد بود، به عبارت دیگر به ترتیب ۲، ۴/۷ و ۶/۸ روز از طول دوره پرشدن دانه ذرت کاسته خواهد شد. بنابراین می‌توان بیان کرد که طول دوره پرشدن دانه ذرت نیز با افزایش زمان کاهش خواهد یافت. روند تغییر تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ذرت نیز مشابه روند تغییرات مشاهده شده در تعداد روز تا گل‌دهی و طول دوره پرشدن دانه خواهد بود. (جدول ۲). بر اساس مدل و سناریوهای مختلف، تعداد روز تا رسیدن بین ۹۶ تا ۱۱۲ متغیر خواهد بود و به طور متوسط طول دور رشد ذرت در سال ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ به ترتیب برابر با ۱۱۰/۸، ۱۰۴/۵ و ۹۹/۷ روز خواهند بود و به ترتیب در این سال‌ها گیاه ذرت ۴/۲، ۱۰/۵

جدول ۲- تاثیر تغییرات اقلیمی شبیه‌سازی شده تحت دو مدل گردش عمومی تحت تاثیر سناریوهای مختلف و در دوره‌های زمانی متفاوت بر عملکرد و صفات فنولوژیک ذرت نسبت به شرایط کنونی (۲۰۱۵) در تاریخ کاشت ۲۵ اردیبهشت در منطقه مغان، اردبیل، ایران
Table 2. The impact of simulated climate changes under two general circulation model with different scenarios and in different time periods on yield and phenological traits of maize compared to the current situation (in 2015) in planting date of May 15 in Moghan region, Ardabil, Iran

سناریو Scenario	دوره Period	عملکرد دانه (تن در هکتار) Grain yield (t/ha)	روز تا سبز شدن Days to emergence	روز تا گل‌دهی Days to flowering	طول دوره گل‌دهی Flowering duration	طول دوره پر شدن دانه Grain filling period	روز تا رسیدن فیزیولوژیک Days to maturity	درصد کاهش عملکرد Grain yield reduction (%)
	2015	10.145	6	56	10	49	115	-
مدل گردش عمومی جو HadCM3								
A1B	2025	9.548	6	54	10	47	111	-5.9
	2055	7.588	5	49	9	44	102	-25.2
	2085	7.846	5	48	9	42	99	-22.7
A2	2025	9.335	6	54	10	46	110	-8.0
	2055	7.717	6	50	9	44	103	-23.9
	2085	7.359	5	46	9	41	96	-27.5
B1	2025	9.278	6	53	10	47	110	-8.5
	2055	7.856	6	50	9	45	104	-22.6
	2085	7.731	5	50	9	42	101	-23.8
مدل گردش عمومی جو IPCM4								
A1B	2025	9.697	6	54	10	48	112	-4.4
	2055	7.772	5	50	9	44	104	-23.4
	2085	8.337	5	48	9	43	100	-17.8
A2	2025	9.604	6	54	10	47	111	-5.3
	2055	8.845	6	51	10	44	105	-12.8
	2085	7.094	5	48	9	42	99	-30.1
B1	2025	9.556	6	54	10	47	111	-5.8
	2055	8.864	6	54	10	45	109	-12.6
	2085	7.597	5	51	9	43	103	-25.1

دانه ذرت، کم‌ترین اختلاف را با شرایط کنونی (۱۰/۱۴۵ تن در هکتار) خواهد داشت (جدول ۳) که میزان کاهش عملکرد در این سناریو نسبت به شرایط کنونی فقط ۴/۴ درصد خواهد بود. بر اساس سناریوهای A2 و B1 با مدل IPCM4 و A1B، A2 و B1 با مدل HadCM3 به ترتیب با میزان کاهش ۵/۳۳، ۵/۸۰، ۵/۸۸، ۷/۹۸ و ۸/۵۴ درصد، حداقل کاهش عملکرد دانه مشاهده خواهد شد. بیش‌ترین کاهش عملکرد دانه به ترتیب با ۳۰/۱ و ۲۷/۵ در سناریوی A2 مدل گردش عمومی IPCM4 و HadCM3 به‌وقوع می‌پیوندد و به عبارت دیگر در صورت عدم مدیریت تغییر اقلیم تا سال ۲۰۸۵ عملکرد دانه ذرت می‌تواند به میزان ۷/۱ تن در هکتار نیز در شرایط ایده‌آل مزرعه تحقیقاتی کاهش پیدا کند.

نتایج شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه ذرت نشان داد که با گذشت زمان میزان عملکرد دانه در منطقه مغان تحت تاثیر تغییرات اقلیمی پیش رو نسبت به وضعیت کنونی در تمام مدل‌های گردش عمومی کاهش خواهد یافت و اختلاف بیش‌تری با میزان عملکرد دانه کنونی پیدا خواهد کرد (جدول ۳). به‌طور متوسط عملکرد دانه در سال ۲۰۲۵، ۲۰۵۵ و ۲۰۸۵ به ترتیب به حدود ۹/۵، ۸/۱ و ۷/۷ تن در هکتار خواهد رسید، به عبارت دیگر، گذشت زمان از میزان عملکرد دانه به ترتیب ۶/۳، ۲۰/۱ و ۲۴/۵ درصد می‌کاهد. هم‌چنین بر اساس شبیه‌سازی انجام شده در تمام سناریوها در هر دو مدل گردش عمومی، حداقل کاهش عملکرد دانه در سال ۲۰۲۵ نسبت به دو دوره دیگر به‌وقوع می‌پیوندد، به‌طوری که سال ۲۰۲۵ در سناریوی A1B تحت تاثیر مدل گردش عمومی IPCM4 با ۹/۶۷۹ تن در هکتار عملکرد

فتوستنتز ذرت تاثیر منفی گذاشت و از این طریق منجر به کاهش ۴/۴ تا ۳۰/۱ عملکرد ذرت شد (Alexandrov and Hoogenboom, 2000). علی‌رغم تاثیر مثبت افزایش غلظت CO₂ بر میزان فتوستنتز و عملکرد، اثر منفی افزایش دما به مراتب بیش‌تر از اثر مثبت دی اکسید کربن بوده و منجر به کاهش عملکرد شده است. از طرف دیگر، گیاهان C4 مانند ذرت که دارای آناتومی کرانز هستند، در شرایط کنونی نیز با کمبود CO₂ مواجه نیستند و به همین دلیل افزایش غلظت این عنصر تاثیر معنی‌داری بر عملکرد این گیاه نخواهد گذاشت (Southworth et al., 2000).

شبیه‌سازی تاثیر تغییر تاریخ کاشت بر رشد ذرت به منظور تعیین میزان تخفیف تاثیر منفی تغییر اقلیم

به دلیل این که تاریخ کاشت دیر هنگام (تاریخ‌های کاشت بعد از ۲۵ اردیبهشت) منجر به بهبود عملکرد دانه نشدند. از طرف دیگر، هیبرید ۶۴۷ از ارقام متوسط‌سرس ذرت است که کاشت خیلی دیرتر آن، علاوه بر برخورد با سرمای پاییزه زودرس، مشکلاتی برای کاشت زراعت بعدی نیز ایجاد خواهد کرد. بنابراین، تاثیر سه تاریخ کاشت، ۱۰ اردیبهشت (۳۰ آوریل)، ۲۶ فروردین (۱۵ آوریل) و ۱۱ فروردین (۳۱ مارس)، که تاریخ‌های کاشت زودتر از تاریخ کاشت متداول و رایج (دهه سوم اردیبهشت) بودند، شبیه‌سازی و نتایج آن در جدول‌های ۳ تا ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که تغییر تاریخ کاشت باعث تغییر صفات فنولوژیک می‌شود، به طوری که تغییر تاریخ کاشت می‌تواند تعداد روز لازم برای سبز شدن به میزان ۱- تا ۸ روز (با دامنه تغییرات ۵ تا ۱۴ روز تا سبز شدن) تحت مدل و سناریوهای مختلف نسبت به زمان کنونی (با ۶ روز تا سبز شدن) تغییر دهد. به طور کلی با کاشت زودتر ذرت، طول روز لازم برای سبز شدن نیز زیاد می‌شود. اگرچه این تغییر احتمالاً باعث بهبود عملکرد ذرت می‌شود، ولی به احتمال زیاد منجر به افزایش فعالیت آفات خاک‌زی ذرت نیز خواهد شد و این می‌تواند مشکلاتی را برای سبز شدن ذرت ایجاد کند. تغییر تاریخ کاشت، تعداد روز تا گل‌دهی را بین ۶- تا ۲۳ روز (با دامنه تغییرات ۵۰ تا ۷۹ روز) نسبت به شرایط کنونی (با ۵۶ روز) تغییر می‌دهد. میزان تغییر در طول دوره پرشدن دانه ۲- تا ۲۱ روز (با دامنه تغییرات ۴۷ تا ۷۰ روز) نسبت به زمان کنونی (با ۴۵ روز) و برای تعداد روز تا رسیدن فیزیولوژیک بین ۱۵- تا ۲۱ روز (با دامنه تغییرات ۱۰۰ تا ۱۳۶ روز) نسبت به زمان کنونی (با ۱۱۵ روز) خواهد بود. این در حالی است که

مرادی و همکاران (Moradi et al., 2014) نیز اثر تغییرات اقلیمی را بر عملکرد ذرت در منطقه مشهد برای دوره ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۸۰۰ شبیه‌سازی و گزارش کردند که عملکرد در دوره ۲۰۸۰ نسبت به دو دوره دیگر کم‌تر خواهد بود، به طوری که حداکثر عملکرد شبیه‌سازی شده در سه دوره را به ترتیب حدود ۴/۹۴، ۴/۷۶ و ۴/۵۸ تن در هکتار گزارش کردند، در حالی که عملکرد فعلی مشهد ۵/۱۱ تن در هکتار است. لی و همکاران (Li et al., 2011) با بررسی تغییرات اقلیمی تا سال ۲۰۳۰ بر عملکرد ذرت در چین و آمریکا گزارش کردند که افزایش دما تا سال ۲۰۳۰ منجر به کاهش عملکرد ذرت در آمریکا و چین به ترتیب حدود ۸ و ۲۳ درصد خواهد شد. همچنین سوتورد و همکاران (Southworth et al., 2000) بیان کردند که افزایش دما در مناطق میانی آمریکا منجر به تغییر عملکرد ذرت در این منطقه بین ۵- تا ۵۰- درصد تا ۵۰ سال آینده خواهد شد، در حالی که در نواحی شمالی آمریکا منجر به بهبود عملکرد ذرت تا ۲۰ درصد خواهد شد. مرا و همکاران (Mera et al., 2006) تایید کردند که افزایش دما بیش‌ترین تاثیر را بر مرحله گل‌دهی ذرت گذاشت و با کاهش درصد و دوره تلقیح گل، منجر به کاهش عملکرد ذرت شد. همچنین اشاره کردند که افزایش ۲ درجه سلسیوس دما باعث کاهش دوره گل‌دهی ذرت از ۱۰ به ۸ روز شد که خود تاثیر بسزایی در کاهش تعداد دانه تشکیل شده و عملکرد ذرت داشت. از طرفی مرا و همکاران (Meza et al., 2008) تاکید کردند که تغییرات اقلیمی بیش‌ترین تاثیر را بر میزان فتوستنتز گیاهان زراعی داشت و از این طریق بر عملکرد تاثیر گذاشت. الکساندر و هوگبوم (Alexandrov and Hoogenboom, 2000) نیز با بررسی افزایش دما در شرایط آینده گزارش کردند که تحت این شرایط، عملکرد دانه ذرت حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که دلیل این تغییر را کاهش طول دوره رشد ذرت بیان کردند. نتایج مشابهی نیز توسط کولینو و همکاران (Cuculeanu et al., 1999) برای کشور رومانی و کاپاتانکی و روسنزوینگ (Kapetanaki and Rosenzweig, 1997) برای مصر گزارش شد.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی با سه سناریوی مورد استفاده در تحقیق حاضر نیز به نظر می‌رسد با گذشت زمان، دما افزایش خواهد یافت و دمای بالاتر با افزایش سرعت نمو (Mera et al., 2006) و نیز کوتاه کردن مراحل فنولوژیک ذرت و به تبع آن کاهش دریافت تشعشع فتوستنتزی بر

تغییر اقلیم به میزان ۱/۱ تا ۴/۳ درصد خواهد شد. این تاریخ کاشت بر اساس مدل و سناریوهای مختلف، عملکرد دانه با میانگین ۹/۷۲ تن در هکتار و دامنه تغییرات ۹/۸۹ تا ۹/۶۶ خواهد داشت. در حالی که در شرایط کنونی میانگین عملکرد دانه هیبرید سینگل کراس ۶۴۷، ۱۰/۱۲ تن در هکتار است و در صورت عدم تغییر کاشت تحت مدل و سناریوهای مختلف، میانگین عملکرد دانه ۹/۵۰ تن در هکتار و دامنه تغییرات بین ۹/۲۸ تا ۹/۷۰ خواهد داشت. در سال ۲۰۲۵ تاریخ کاشت ۱۰ اردیبهشت نه تنها موجب بهبود عملکرد دانه نخواهد شد، بلکه باعث کاهش عملکرد دانه نیز می‌شود.

افزایش طول دوره رشد می‌تواند منجر به افزایش هزینه تولید، به دلیل افزایش هزینه‌های ناشی از بکارگیری نیروی انسانی بیشتر، مبارزه با علف‌های هرز، میزان آب آبیاری، مبارزه با آفات و بیماری‌های احتمالی و غیره نیز شود. تغییر تاریخ کاشت و کشت زودتر از ۲۵ اردیبهشت در بیشتر مدل‌ها و سناریوها موجب بهبود عملکرد دانه شد، به طوری که با گذشت زمان میزان بهبود عملکرد دانه با تغییر تاریخ کاشت نیز افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۲۵ تاریخ کاشت ۲۶ فرودین ماه از دو تاریخ کاشت ۱۰ اردیبهشت و ۱۱ فرودین ماه مناسب‌تر خواهد بود. به طوری که این تاریخ کاشت در مدل و سناریوهای مختلف باعث بهبود اثر منفی

جدول ۳- شبیه‌سازی صفات فنولوژیک و عملکرد دانه ذرت و میزان کاهش اثر منفی تغییر احتمالی اقلیم آینده با تغییر تاریخ کاشت برای سال ۲۰۲۵

Table 4. Simulation of phenological traits and grain yield of maize and reducing the negative effect of the probable future climate change by changing the planting date for 2025

مدل گردش عمومی جو General circulation model	سناریو Scenario	تاریخ کاشت Planting date	طول دوره		پر شدن دانه (روز) Grain filling period	روز تا رسیدن فیزیولوژیک Days to maturity	عملکرد دانه Grain yield (t/ha)	درصد کاهش عملکرد نسبت به زمان جاری Grain yield reduction compared to current time (%)	کاهش اثر منفی تغییر تاریخ کاشت Reducing the negative impact of climate change by Changing planting date
			روز تا سبز شدن Days to emergence	روز تا گل‌دهی Days to flowering					
HadCM3	A1B	April 30	8	61	46	8	9.393	-7.2	-1.6
HadCM3	A1B	April 15	8	68	47	8	9.693	-4.3	1.5
HadCM3	A1B	March 31	14	78	46	14	9.594	-5.2	0.5
IPCM4	A1B	April 30	8	61	47	8	9.445	-6.7	-2.6
IPCM4	A1B	April 15	7	68	46	7	9.886	-2.4	1.9
IPCM4	A1B	March 31	13	79	46	13	9.84	-2.8	1.5
HadCM3	A2	April 30	8	61	46	8	9.294	-8.2	-0.4
HadCM3	A2	April 15	8	68	46	8	9.663	-4.6	3.5
HadCM3	A2	March 31	14	78	46	14	9.55	-5.7	2.3
IPCM4	A2	April 30	8	61	47	8	9.401	-7.1	-2.1
IPCM4	A2	April 15	8	68	46	8	9.73	-3.9	1.3
IPCM4	A2	March 31	14	79	46	14	9.612	-5.1	0.1
HadCM3	B1	April 30	8	61	46	8	9.252	-8.6	-0.3
HadCM3	B1	April 15	7	67	47	7	9.679	-4.4	4.3
HadCM3	B1	March 31	13	78	46	13	9.634	-4.8	3.8
IPCM4	B1	April 30	8	61	47	8	9.368	-7.5	-2.0
IPCM4	B1	April 15	8	68	46	8	9.663	-4.6	1.1
IPCM4	B1	March 31	14	79	46	14	9.546	-5.7	-0.1

بهبود اثر منفی تغییر اقلیم به میزان ۹/۹ تا ۲۶/۴ درصد خواهد شد. این تاریخ کاشت بر اساس مدل و سناریوهای مختلف، عملکرد دانه با دامنه تغییرات ۱۰/۰۹ تا ۹/۵۸ با میانگین ۹/۷۴ تن در هکتار خواهد داشت.

در سال ۲۰۵۵ به جز سناریوی A2 مدل گردش عمومی IPCC4، تاریخ کاشت ۱۱ فرودین از دو تاریخ کاشت ۱۰ اردیبهشت و ۲۶ فرودین مناسب‌تر خواهد بود و این تاریخ کاشت در مدل‌ها و سناریوهای مختلف باعث

جدول ۴- شبیه‌سازی صفات فنولوژیک و عملکرد دانه ذرت و میزان کاهش اثر منفی تغییر احتمالی اقلیم آینده با تغییر تاریخ کاشت برای سال ۲۰۵۵

Table 4. Simulation of phonological traits and grain yield of maize and reducing the negative effect of the probable future climate change by changing the planting date for 2055

مدل گردش عمومی جو General circulation model	سناریو Scenario	تاریخ کاشت Planting date	طول دوره		عملکرد دانه Grain yield (t/ha)	روز تا رسیدن فیزیولوژیک Days to maturity	درصد کاهش عملکرد نسبت به زمان جاری Grain yield reduction compared to current time (%)	کاهش اثر منفی تغییر اقلیم با تغییر تاریخ کاشت Reducing the negative impact of climate change by Changing planting date	
			روز تا سبز شدن Days to emergence	روز تا گل‌دهی Days to flowering					
HadCM3	A1B	April 30	6	54	44	108	8.736	-13.7	15.1
HadCM3	A1B	April 15	8	60	44	114	9.3939	-7.2	23.8
HadCM3	A1B	March 31	12	69	45	124	9.589	-5.3	26.4
IPCM4	A1B	April 30	6	55	44	109	8.939	-11.7	15.0
IPCM4	A1B	April 15	8	60	45	115	9.569	-5.5	23.1
IPCM4	A1B	March 31	12	70	46	126	9.722	-4.0	25.1
HadCM3	A2	April 30	6	55	43	108	8.805	-13.0	14.1
HadCM3	A2	April 15	8	60	45	115	9.47	-6.5	22.7
HadCM3	A2	March 31	12	71	44	125	9.624	-4.9	24.7
IPCM4	A2	April 30	7	56	45	111	9.187	-9.3	3.9
IPCM4	A2	April 15	8	62	44	117	9.741	-3.8	10.1
IPCM4	A2	March 31	14	72	45	128	9.725	-3.9	9.9
HadCM3	B1	April 30	6	55	44	109	8.91	-12.0	13.4
HadCM3	B1	April 15	8	61	44	116	9.454	-6.6	20.3
HadCM3	B1	March 31	12	71	44	126	9.689	-4.3	23.3
IPCM4	B1	April 30	7	59	46	115	9.637	-4.8	8.7
IPCM4	B1	April 15	9	66	46	122	9.967	-1.6	12.4
IPCM4	B1	March 31	12	75	46	132	10.09	-0.3	13.8

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی، نتایج این تحقیق خوشبختانه نشان داد که با تغییر زمان کاشت امکان تعدیل و تخفیف اثر منفی تغییر اقلیم بر عملکرد دانه ذرت وجود دارد. اما آن‌چه که مایه نگرانی اسن، این است که در تاریخ‌های کاشت زودتر، طول روز لازم برای سبز شدن نیز زیاد می‌شود. هرچند این تغییر باعث بهبود عملکرد شد، ولی به احتمال فراوان با افزایش فعالیت آفات خاک‌زی، موجب سبز شدن نامناسب مزرعه ذرت نیز خواهد شد. هم‌چنین افزایش طول دوره رشد با افزایش هزینه مبارزه با علف‌های هرز، میزان آب آبیاری، مبارزه با آفات و بیماری‌های احتمالی و غیره، هزینه تولید در واحد سطح را افزایش خواهد داد و در نتیجه سود حاصل از آن کاهش خواهد یافت. بنابراین بایستی با بهبود تکنولوژی تولید ذرت در جهت کاهش هزینه تولید و مشکلات احتمالی آبی تمهیدات لازم اندیشیده شود.

در سال ۲۰۸۵ نیز تاریخ کاشت ۱۱ فرودین از دو تاریخ کاشت ۱۰ اردیبهشت و ۲۶ فرودین در مدل و سناریوهای مختلف مناسب‌تر خواهد بود و این تاریخ کاشت در مدل و سناریوهای مختلف باعث بهبود اثر منفی تغییر اقلیم به میزان ۲۳/۱ تا ۳۷/۲ درصد خواهد شد. این تاریخ کاشت بر اساس مدل و سناریوهای مختلف، عملکرد دانه با میانگین ۸/۹۵ تن در هکتار و دامنه تغییرات ۸/۰۵ تا ۹/۵۳ خواهد داشت. در سال ۲۰۸۵ هر تاریخ کاشت زودتر از دهه سوم اردیبهشت منجر به بهبود عملکرد دانه خواهد شد. مرادی و همکاران (Moradi et al., 2014) نیز از مدیریت تغییر کاشت جهت تقلیل اثر منفی تغییر اقلیم آبی در منطقه مشهد استفاده و گزارش کردند که کاشت زودتر از تاریخ کاشت زمان کنونی باعث کاهش اثر منفی تغییر اقلیم بر عملکرد دانه ذرت می‌شود.

جدول ۵- شبیه‌سازی صفات فنولوژیک و عملکرد دانه ذرت و میزان کاهش اثر منفی تغییر احتمالی اقلیم آینده با تغییر تاریخ کاشت برای سال ۲۰۸۵

Table 5. Simulation of phonological traits and grain yield of maize and reducing the negative effect of the probable future climate change by changing the planting date for 2085

مدل گردش عمومی جو General circulation model	سناریو Scenario	تاریخ کاشت Planting date	طول دوره				عملکرد دانه Grain yield (t/ha)	درصد کاهش عملکرد نسبت به زمان جاری Grain yield reduction compared to current time (%)	کاهش اثر منفی تغییر اقلیم با تغییر تاریخ کاشت Reducing the negative impact of climate change by Changing planting date
			روز تا سبز شدن Days to emergence	روز تا گل‌دهی Days to flowering	روز تا پر شدن دانه (روز) Grain filling period	روز تا رسیدن فیزیولوژیک Days to maturity			
HadCM3	A1B	April 30	6	52	42	103	8.96	-11.5	14.2
HadCM3	A1B	April 15	8	58	42	110	9.294	-8.2	18.5
HadCM3	A1B	March 31	8	66	43	119	9.806	-3.1	25.0
IPCM4	A1B	April 30	6	52	42	104	9.015	-11.0	8.1
IPCM4	A1B	April 15	7	57	43	110	9.533	-5.8	14.3
IPCM4	A1B	March 31	10	64	44	119	9.757	-3.6	17.0
HadCM3	A2	April 30	5	50	41	100	8.527	-15.8	15.9
HadCM3	A2	April 15	7	56	40	106	9.156	-9.6	24.4
HadCM3	A2	March 31	8	63	42	115	9.568	-5.5	30.0
IPCM4	A2	April 30	6	52	41	103	8.079	-20.2	13.9
IPCM4	A2	April 15	7	58	43	110	9.361	-7.5	32.0
IPCM4	A2	March 31	9	67	43	120	9.73	-3.9	37.2
HadCM3	B1	April 30	6	53	43	106	8.046	-20.5	4.1
HadCM3	B1	April 15	8	61	43	113	9.173	-9.4	18.7
HadCM3	B1	March 31	10	69	44	123	9.514	-6.0	23.1
IPCM4	B1	April 30	6	55	43	108	8.243	-18.6	8.5
IPCM4	B1	April 15	9	63	43	116	9.207	-9.1	21.2
IPCM4	B1	March 31	12	72	44	126	9.535	-5.8	25.5

References

- Abumhadi, N., Todorovska, E., Assenov B., Tsonev, S., Vulcheva, D., Vulchev, D., Atanasova, L., Savova, S. and Atanassov A. 2012. Agricultural Research in 21st century: Challenges facing the food security under the impacts of climate change. **Bulgarian Journal of Agricultural Science** 18: 801-818.
- Alexandrov, V. A. and Hoogenboom, G. 2000. The impact of climate variability and change crop yield in Bulgaria. **Agriculture and Forest Meteorology** 104: 315-327.
- Cuculeanu, V., Marica, A. and Simota, C. 1999. Climate change impact on agricultural crops and adaptation options in Romania. **Climate Research** 12: 153-160.
- FAOSTAT. 2014. Food and Agriculture Organization Statistics. Available at: <http://www.FAO.org>. Accessed in June 2015.
- IPCC, 2007. Summary for policy makers. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kapetanaki, G. and Rosenzweig, C. 1997. Impact of climate change on maize yield in central and northern Greece: A simulation study with Ceres-maize. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change** 1: 251-271.
- Koocheki, A. and Kamali, G. H. 2010. Climate change and rainfed wheat production in Iran. **Iranian Journal of Field Crops Research** 8: 508-520. (In Persian with English Abstract).

- Koocheki, A., Nassiri, M. G., Kamali, A. and Shahandeh, H. 2006.** Potential impacts of climate change on agro-meteorological indicators in Iran. **Arid Land Research and Management** 20: 245-259.
- Leemans, R. and Solomon, A. M. 1993.** Modeling the potential change in yield and distribution of the earth's crops under a warmed climate. **Climate Research** 3: 79-96.
- Li, X., Takahashi, T., Suzuki, N. and Kaiser, H. M. 2011.** The impact of climate change on maize yields in the United States and China. **Agricultural Systems** 104: 348-353.
- Mera, R. J., Niyogi, D., Buol, G. S., Wilkerson, G. G. and Semazzi, F. H. M. 2006.** Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C3) and maize (C4) crops: An agrotechnology model based study. **Global and Planetary Change** 54: 163-182.
- Meza, F. J., Silva, D. and Vigil, H. 2008.** Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. **Agricultural Systems** 98: 21-30.
- Mitchell, J. F. B., John, T. C., Gregory, J. M. and Tett, S. 1995.** Climate response to increasing levels of greenhouse gases as sulphate aerosols. **Nature** 376: 501-504.
- Moradi, R., Koochaki, A. and Mahallati, M. N. 2014.** Effect of climate change on maize production and shifting of planting date as adaptation strategy in mashhad. **Journal of Sustainable Agriculture and Production Science** 23 (4): 111-130. (In Persian with English Abstract).
- Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvag, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J. and Micale, F. 2011.** Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. **European Journal of Agronomy** 34: 96-112.
- Prudhomme, C., Wilby, R. L., Crooks, S., Kay, A. L. and Reynard, N. S. 2010.** Scenario-neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk. **Journal of Hydrology** 390: 198-209.
- Raes, D., Steduto P., Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2012.** Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Rahimikhoob, H., Sotoodehnia, A. and Massahbavani, A. R. 2014.** Calibration and evaluation of aquacrop for maize in Qazvin region. **Iranian Journal of Irrigation and Drainage** 8: 108-115. (In Persian with English Abstract).
- Rosenzweig, C. and Tubiello, F. N. 2007.** Adaptation and mitigation strategies in agriculture: An analysis of potential synergies. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change** 12: 855-873.
- Ruiz-Ramos, M. and Minguez, M. I. 2010.** Evaluating uncertainty in climate change impacts on crop productivity in the Iberian Peninsula. **Climate Research** 44: 69-82.
- Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barro, E. M. and Richardson, C. W. 1998.** Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in divers climates. **Climate Research** 10: 95-107.
- Semenov, M. K. and Stratonovitch, A. 2010.** Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. **Climate Research** 41: 1-14.
- Singh, A. K., Tripathy, R. and Chopra, U. K. 2008.** Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. **Agricultural Water Management** 95: 776-786.
- Smit, B. and Skinner, M. W. 2002.** Adaptation options in agriculture to climate change: A typology. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change** 7: 85-114.
- Southworth, J., Randolph, J. C., Habeck, M., Doering, O. C., Pfeifer, R. A., Rao, D. G. and Johnston, J. J. 2000.** Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the midwestern United States. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 82: 139-158.
- Trnka, M., Dubrovsky, M. and Ekzalud, Z. 2004.** Climate change impacts and adaptation strategies in spring barley production in the Czech Republic. **Climatic Change** 64: 227-255.
- Wetterhall, F., Bardossy, A., Chen, D., Halldin, S. and Ch, X. U. 2009.** Statistical downscaling of daily precipitation over Sweden using GCM output. **Theoretical and Applied Climatology** 96: 95-103.
- Ziaee, Gh., Babazadeh, H., Abbasi, F. and Kaveh, F. 2015.** Evaluation of the AquaCrop and CERES-Maize models in assessment of soil water balance and maize yield. **Iranian Journal of Soil and Water Research** 45: 435-445. (In Persian with English Abstract).



University of Guilan
Faculty of Agricultural
Sciences

Cereal Research
Vol. 7, No. 4, Winter 2018 (563-578)

The mitigation of climate change effect on maize grain yield by changing of planting date in Moghan

Mohammadreza Shiri^{1*}

Received: August 24, 2016

Accepted: July 11, 2017

Abstract

Appropriate planning and making strategies to increase crop adaptation to possible future climate change requires a good understanding of the trend of climate factors and response of the crops to climate changes. Therefore, this study was conducted to simulate the climate change effects on phenological stages and grain yield of maize hybrid SC 647 and to explore the possibility of employing planting dates as mitigating options to decrease the climate change impacts on maize production in Moghan region, Ardabil, Iran. LARS-WG model was used to simulate the climatic parameters as one stochastic growing season under two types of General Circulation Models ((United Kingdom Met. Office Hadley Center: HadCM3) and (Institute Pierre Simon Laplace: IPCM4)) and three scenarios (A1B, A2 and B1) for three periods including 2025, 2055 and 2085. Aqua crop model was used to simulate maize growth. The results of model evaluation showed that LARS-WG had appropriate prediction for climatic parameters and simulation of stochastic growing season in future climate change conditions. The simulation of phenological stages by AquaCrop model showed that the period from planting to emergence and flowering, grain filling period and maturity were reduced in majority of scenarios under climate change. The results indicated that the grain yield of maize may be reduced 4.4% to 30% as affected by climate change based on common planting date in baseline. In order to reduce the negative impact of climate change, the strategy of changing planting date was used. The results of simulation showed that earlier planting date near 15 April (earlier than the current planting date, the second ten days of May) caused higher yield compared with other planting dates (30 April and 31 March) in 2025. In 2055 and 2085, However, the planting date of 31 March and 15 April in terms of climate change will be more appropriate. It seems that management of planting dates can be regarded as appropriate approach to reduce adverse effects of climate change on the grain yield of maize.

Keywords: Climate scenarios, AquaCrop Model, LARS-WG Model

1. Research Assist. Prof., Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

* Corresponding author: mohammadrezashiri52@gmail.com