



پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم آبی استان فارس با استفاده از مدل APSIM

حامد عینی نرگسه^۱، *رضا دهبیم فرد^۲، سعید صوفی زاده^۱

مسعود حقیقت^۳ و امید نوری^۲

^۱ دانشجوی سابق رشته کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی و دانشجوی دکتری زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ^۲ استادیار گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، ^۳ مربی گروه هواشناسی کشاورزی، سازمان هواشناسی کشور
تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۲۲

چکیده

سابقه و هدف: مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر تولید محصولات زراعی در مقیاس منطقه‌ای به برآورد وضعیت اقلیمی آینده بستگی خواهد داشت. این برآوردها توسط مدل‌های اقلیمی و بیش از همه به‌وسیله مدل‌های گردش عمومی (GCMs) انجام می‌گیرد. هدف از این مطالعه پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم آینده بر عملکرد گندم در شش شهرستان استان فارس شامل آباده، داراب، اقلید، فسا، لار و شیراز است.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق دو مدل گردش عمومی HadCM3 و IPCM4 تحت سه سناریوی انتشار B1، A1B و A2 در سه دوره (۲۰۱۱-۳۰، ۲۰۴۶-۶۵ و ۲۰۸۰-۹۹) برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده مورد بررسی قرار گرفت. برای تولید پارامترهای اقلیمی روزانه برای هر منطقه برنامه LARS-WG مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های اقلیمی روزانه به‌دست‌آمده از خروجی LARS-WG به‌عنوان ورودی برای مدل APSIM (مدل شبیه‌سازی محصول زراعی) به‌منظور شبیه‌سازی رشد و نمو گندم تحت اقلیم آینده استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که LARS-WG به‌خوبی تابش، دمای کمینه و بیشینه را شبیه‌سازی کرد. با این وجود، کارایی مدل در شبیه‌سازی بارش در این استان ضعیف‌تر از سایر متغیرها عمل کرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در آینده دمای کمینه و بیشینه در استان فارس روند افزایشی خواهد داشت. همان‌گونه که شبیه‌سازی نشان داد، بیشترین افزایش دما نسبت به دوره پایه در شهرستان آباده و کمترین افزایش دما در مقایسه

*مسئول مکاتبه: deihim@sbu.ac.ir

با دوره پایه در شهرستان لار خواهد بود. در مطالعه حاضر بیشترین عملکرد دانه در دوره پایه در شهرستان‌های شیراز و فسا (۷۷۵۳/۹۵ و ۷۸۳۰/۷۹ کیلوگرم در هکتار) و کمترین عملکرد دانه در شهرستان لار (۶۸۱۰/۶۲ کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد. بیشترین عملکرد دانه گندم در شهرستان اقلید و آباده (۱۰۷۶۱/۱۷ و ۱۰۸۶۹/۳۳ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با دوره پایه (۷۵۲۹/۸۳ و ۷۴۰۲/۷۹ کیلوگرم در هکتار) در دوره ۹۹-۲۰۸۰ تحت سناریوی A2 به دست آمد. بیشترین درصد تغییرات عملکرد دانه گندم در مقایسه با دوره پایه تحت همه سناریوها، مدل‌های اقلیمی و دوره‌ها در شهرستان‌های اقلید (۱۲+ تا ۴۳+ درصد) و آباده (۱۳+ تا ۴۷+ درصد) به دست آمد. از طرفی، کمترین تغییرات عملکرد در مقایسه با دوره پایه در شهرستان‌های داراب (۱۱+ تا ۱۸+ درصد) و لار (۱۱+ تا ۲۰+ درصد) خواهد بود. همچنین نتایج آزمون t نشان داد که اختلاف قابل توجهی بین مدل‌های اقلیمی با در نظر گرفتن صفات مورد بررسی وجود ندارد. تغییر اقلیم عملکرد دانه را افزایش و طول فصل رشد گندم را کاهش داد. نتایج این مطالعه نشان داد که دلیل اصلی افزایش عملکرد دانه گندم در آینده استان فارس افزایش غلظت دی‌اکسید کربن است. به‌طور کلی بیشترین تأثیر بر رشد و نمو گندم در دوره ۹۹-۲۰۸۰ تحت سناریوی A2 و کمترین تأثیر در دوره ۳۰-۲۰۱۱ تحت سناریوی B1 به دست خواهد آمد.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که تحت شرایط تغییر اقلیم آینده در استان فارس، عملکرد دانه گندم در شرایط پتانسیل روند افزایشی خواهد داشت (از ۱۲ تا ۲۴ درصد). این افزایش عملکرد برآیند دو عامل افزایش دما و دی‌اکسید کربن خواهد بود. به‌طوری‌که در برخی مناطق مورد مطالعه اثرات مثبت افزایش غلظت دی‌اکسید کربن توسط افزایش دمای بیش‌ازحد مطلوب برای رشد و نمو گندم، خنثی شد.

واژه‌های کلیدی: افزایش دما، مدل‌های گردش عمومی، مدل‌سازی، LARS-WG.

مقدمه

طبق آخرین گزارش هیات بین دولتی تغییر اقلیم^۱، عامل اصلی گرمایش جهانی و تغییر اقلیم از اواسط قرن بیستم به بعد افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای (به ویژه دی‌اکسید کربن، متان و اکسید نیتروژن) در اثر فعالیت‌های انسان بوده است (۱۳). کشاورزی به‌علت ارتباط بسیار نزدیک با شرایط آب و هوایی نسبت به تغییر اقلیم آسیب پذیر است زیرا رشد و عملکرد بهینه گیاهان زراعی در دامنه خاصی از متغیرهای آب و هوایی امکان پذیر است و تغییر اقلیم می‌تواند دامنه بهینه در رابطه با دمای مورد نیاز برای رشد گیاه را دستخوش تغییر کند (۲۶). چنانچه غلظت گازهای گلخانه‌ای اتمسفر با سرعت فعلی افزایش یابد، پیش‌بینی اغلب مدل‌های اقلیمی موجود حاکی از آن است که میانگین دمای جهان در سال ۲۱۰۰ نسبت به سال ۱۹۹۰ میلادی حداقل دو درجه افزایش خواهد یافت. باوجود اینکه دامنه‌ی عدم قطعیت پیش‌بینی دما برای سال ۲۱۰۰ بین ۱ تا ۳/۵ درجه سانتی‌گراد است ولی باید توجه داشت که حتی یک درجه افزایش در طی ۱۰ سال گذشته نیز اثرات قابل‌توجهی را در پی داشته است (۲۷). فرآیندهای تغییر اقلیم شامل افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری، دما و نیز نوسان بارندگی است، که به‌طور مستقیم رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳). اگرچه تغییرات اقلیمی در برخی از مناطق جهان، به‌ویژه در مناطق واقع در عرض شمالی بالاتر از ۵۵ درجه سانتی‌گراد، اثرات مثبتی بر تولید محصولات کشاورزی دارد، اما اثرات منفی این تغییرات در مناطق گرم و خشک شدید خواهد بود (۹)، به‌طوری‌که در کشورهای درحال توسعه افزایش در دما و کاهش بارندگی شدیدتر می‌شود، و علاوه بر این فراوانی و شدت وقوع پدیده‌های آب‌وهوایی نادر (خشکسالی، گرما، سرما و سیل) نیز تشدید می‌شود (۱۲).

با توجه به اهمیت تغییر اقلیم ابزارهای متنوعی برای اندازه‌گیری این اثرات توسعه یافته‌اند. یکی از راه‌های کم‌هزینه و سریع استفاده از رهیافت مدل‌سازی است. آزمایش‌های انجام‌شده در محیط‌های کنترل‌شده، بسیاری از اطلاعات در مورد اثرات افزایش دما و غلظت دی‌اکسیدکربن بر رشد و نمو گیاهان را فراهم آورده است. این مطالعات بسیار پرهزینه بوده و اجرای آن‌ها به ابزار دقیق بستگی دارد (۱۹) اما استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به زمان و هزینه خیلی کمتری نیاز دارند. مدل‌های شبیه‌سازی، رشد نمو و عملکرد گیاهان زراعی را پیش‌بینی می‌کنند و با استفاده از آن‌ها می‌توان اثرات تغییر اقلیم

بر کشاورزی را از طریق گزینه‌های کاهش اثرات منفی^۱ مانند تنظیم تاریخ‌های کشت، تغییر الگوهای کشت، کشت ارقام مقاوم به گرما و ترویج گیاهان زراعی جدید (گیاهان فراموش شده و کمتر استفاده شده) کاهش داد (۳۰).

کشور ایران متعلق به مناطق خشک و نیمه‌خشک است که با توجه به ساختارهای محیط زیستی خاص خود نسبت به تغییرات محیطی آسیب‌پذیر است. بنابراین به نظر می‌رسد که وقوع احتمالی تغییرات اقلیمی در این مناطق تأثیر قابل توجهی در سیستم‌های تولید محصولات کشاورزی داشته باشد (۸). این در حالی است که مطالعات انجام شده در این زمینه در کشورهای در حال توسعه اندک می‌باشد. برای مثال کوچکی و نصیری (۲۰۰۸) در یک بررسی تأثیر تغییرات اقلیم بر عملکرد گندم آبی کشور را با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی رشد و بر اساس سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که به‌طور متوسط عملکرد گندم در کشور بین ۱۴ تا ۲۱ درصد تا سال ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد (۱۷). عیشی رضایی و بنایان (۲۰۱۲) در تحقیق خود در شمال شرق ایران نشان دادند که تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از دو مدل اقلیمی CGCM2 و HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 بین عملکرد دانه گندم دیم و بارندگی ارتباط مثبت و قابل توجهی وجود دارد و با افزایش بارندگی عملکرد دانه گندم افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که با افزایش بارندگی طول فصل رشد گندم دیم افزایش می‌یابد (۸). به همین دلیل به‌دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر در مورد پدیده تغییر اقلیم در ایران نیاز به مطالعات بیشتر در مقیاس منطقه‌ای و پیش‌بینی پاسخ سیستم‌های تولید محصولات کشاورزی به این تغییرات در هر منطقه دارد.

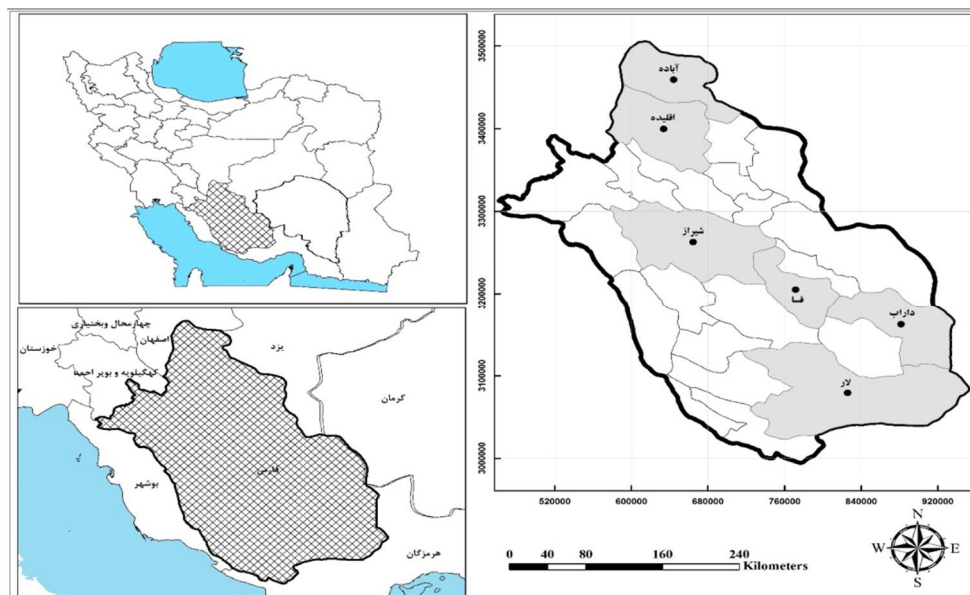
با توجه به اینکه روند تغییر اقلیم در دنیا و از جمله کشور ایران در حال وقوع است و تحقیقات اندکی تاکنون در رابطه با تأثیر تغییر اقلیم بر محصولات کشاورزی در کشور صورت گرفته است، این تحقیق در راستای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تولید گندم آبی استان فارس در کشور انجام شد.

1. Mitigation

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری داده‌ها: این تحقیق در ۶ شهرستان از استان فارس به انجام خواهد رسید (شکل ۱). انتخاب شهرستان‌ها بر اساس سطح زیر کشت گندم در آن‌ها بود که بیشترین مقدار را در استان فارس دارا می‌باشند.

داده‌های بلندمدت اقلیمی مورد استفاده در این تحقیق شامل دمای کمینه و بیشینه (درجه سانتی‌گراد)، بارندگی (میلی‌متر) و تعداد ساعات آفتابی بودند که از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شدند. این داده‌ها به‌عنوان ورودی مدل اقلیمی و مدل شبیه‌سازی رشد گیاه زراعی مورد استفاده قرار گرفتند. به دلیل این‌که در ایستگاه‌های هواشناسی در بعضی از ماه‌های سال داده هواشناسی ثبت نشده و در برخی موارد داده‌های پرت وجود دارد لذا ابتدا با استفاده از برنامه 'WeatherMan' (۱۰) داده‌های پرت و گم‌شده ایستگاه‌های مختلف اصلاح و بازسازی شدند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محل انجام تحقیق.

Figure 1. The geographical position of study locations.

1. Weather Data Manager

سناریوها، دوره‌ها و مدل‌های اقلیمی: در حال حاضر مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر تولید محصولات زراعی در مقیاس منطقه‌ای به برآورد وضعیت اقلیمی آینده بستگی دارد. این برآوردها توسط مدل‌های اقلیمی و بیش از همه به وسیله مدل‌های گردش عمومی^۱ (GCM) انجام می‌گیرد. در تحقیق حاضر از دو مدل گردش عمومی^۲ HadCM3 و^۳ IPCM4 استفاده شد. برای استفاده از این مدل‌های گردش عمومی، از مولد آب‌وهوایی مبتنی بر احتمال^۴ LARS-WG در این تحقیق استفاده شد که برای تولید بارندگی، تابش، دماهای کمینه و بیشینه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده در مقیاس زمانی روزانه به کار می‌رود (۲۸).

به دلیل این‌که روند آینده انتشار گازهای گلخانه‌ای از قطعیت کافی برخوردار نیست، به منظور انجام مطالعات تغییر اقلیم از سناریوهای مختلف، معمولاً برای دوره‌هایی با طول ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال یا بیشتر، استفاده می‌شود (۱). در این بررسی سه سناریوی انتشار B1، A1B و A2 در سه دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰، ۲۰۴۶-۲۰۶۵ و ۲۰۸۰-۲۰۹۹ مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۱ غلظت CO₂ در دوره‌های مختلف تحت سناریوهای مذکور نشان داده شده است.

جدول ۱- غلظت CO₂ (پی‌پی‌ام) در دوره‌ها و سناریوهای مختلف (۲۴).

Table 1. CO₂ concentration (ppm) in different periods and scenarios (24).

سناریوها	۲۰۱۱-۳۰	۲۰۴۶-۶۵	۲۰۸۰-۹۹
Scenarios	2011-30	2046-65	2080-99
B1	410	492	538
A2	414	545	754
A1B	418	541	674

اعتبار سنجی مدل اقلیمی: در این تحقیق از سه شاخص برای ارزیابی تفاوت داده‌های مشاهده شده (دمای کمینه و بیشینه، بارندگی و تابش) و شبیه‌سازی شده استفاده شد. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE^۵) که اختلاف نسبی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. شاخص جذر میانگین انحرافات (RMD^۶) برای ارزیابی خطای سیستماتیک مدل محاسبه می‌شود و همچنین کارایی

1. General Circulation Models
2. United Kingdom Met Office Hadley Centre
3. Institute Pierre Simon Laplace
4. Long Ashton Research Station Weather Generator
5. Root Mean Squared Error
6. Root Mean Deviation

مدل‌سازی (EF¹) که برای ارزیابی کارایی مدل در ارتباط با میانگین داده‌های مشاهده شده مورد محاسبه قرار گرفت (۱۱):

$$RMSE = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$RMD = \frac{100}{\bar{O}} \sum_{i=1}^n \frac{P_i - O_i}{n} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O} - O_i)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این معادله‌ها P_i و O_i به ترتیب داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده \bar{O} میانگین داده‌های مشاهده شده و n تعداد مشاهده‌ها است. هر چقدر مقدار عددی RMSE کمتر باشد، نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب مدل و خطای کمتر است (۱۴). مقادیر RMD نزدیک به صفر نشان‌دهنده عدم خطا در مدل است. EF نیز کارایی مدل‌سازی را نشان می‌دهد و می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده واریانس کمتر در نتایج شبیه‌سازی نسبت به مشاهدات است و مقادیر منفی واریانس بیشتر را نشان می‌دهد (۴).

مدل شبیه‌سازی رشد و نمو گندم در شرایط اقلیمی آینده: در این تحقیق پس از ارزیابی داده‌های آب و هوایی تولید شده به‌منظور شبیه‌سازی رشد و نمو گندم در شرایط تغییر اقلیم و بررسی اثرات بالقوه‌ی آن از مدل APSIM-Wheat در شرایط پتانسیل استفاده شد. این مدل پیش‌تر برای رقم چمران که یکی از ارقام رایج استان فارس می‌باشد و اسنچی و اعتبارسنجی شده است (۷). مدل APSIM توسط محققین استرالیایی طراحی شده است و از قدرت بالایی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی برخوردار است. ماژول گندم در این مدل رشد و نمو گندم را به‌صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند و به عوامل مختلف از جمله آب و هوا (دما، بارندگی، تابش)، خاک (آب خاک و نیتروژن خاک)، ضرایب ژنتیکی و اطلاعات مدیریتی محصول زراعی پاسخ نشان می‌دهد. خروجی برنامه LARS-WG که شامل پارامترهای اقلیمی روزانه تحت سناریوهای مختلف انتشار و نیز مدل‌های GCM برای چهار دوره‌ی اقلیمی بود پس از آماده‌سازی به‌عنوان ورودی در مدل APSIM^۲ مورد

1. Model Efficiency

2. Agriculture Production Systems sIMulator

استفاده قرار گرفت. افزون بر این، ورودی‌های دیگر مورد نیاز برای اجرای مدل مانند اطلاعات گیاهی و مدیریتی، نیز استفاده شد. این ورودی‌ها شامل ضرایب ژنتیکی رقم چمران، تراکم رقم مذکور با ۳۵۰ بوته در مترمربع، فاصله ردیف ۲۵ سانتی‌متر و تاریخ کشت ۱۵ آبان بود. پس از اجرای مدل، خروجی‌های مورد نظر تحت شرایط اقلیم آینده و دوره پایه در شهرستان‌های استان فارس تجزیه و تحلیل شدند.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل اقلیمی: نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل LARS-WG مقادیر دمای کمینه و بیشینه و همچنین تابش را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند اما در شبیه‌سازی بارندگی ضعیف‌تر از سایر متغیرهای اقلیمی بود. نتایج ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده و واقعی با استفاده از شاخص‌های مذکور (رابطه‌های ۱، ۲ و ۳) در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر RMSE به‌دست‌آمده برای تابش، دمای بیشینه و کمینه به‌ترتیب برابر با ۰/۶۳، ۰/۵۷ و ۱/۳۵ بود که نشان‌دهنده شبیه‌سازی بسیار عالی این متغیرها توسط مدل LARS-WG بود. اما مدل LARS-WG در شبیه‌سازی متغیر بارش ضعیف‌تر از سه متغیر دیگر عمل کرد به‌طوری که مقدار شاخص RMSE برابر ۱۷/۷۱ به‌دست آمد. در همین زمینه خلیلی اقدم و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی ارزیابی توانایی مدل LARS-WG در پیش‌بینی برخی از متغیرهای جوی سنندج نشان دادند که این مدل با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی متغیرهای دمای کمینه، بیشینه و تابش می‌باشد اما در شبیه‌سازی بارش نسبت به دیگر متغیرها خطای بیشتری نشان می‌دهد (۱۶).

مقادیر به‌دست‌آمده شاخص RMD برای متغیرهای دمای کمینه، تابش و دمای بیشینه به‌ترتیب ۰/۰۳، ۰/۰۲ و ۰/۰۱- بود که نشان‌دهنده خطای کم در مدل LARS-WG بود ولی مقدار این شاخص برای متغیر بارندگی ۰/۲۳ بود که نشان‌دهنده ضعف و وجود خطا در این مدل برای شبیه‌سازی بارش بود. شاخص کارایی مدل (EF) نیز نشان‌دهنده واریانس کم در شبیه‌سازی متغیرهای تابش، دمای بیشینه و کمینه بود به‌طوری که مقدار آن‌ها برای این متغیرها ۰/۹۹ ولی برای بارش ۰/۹۴ بود که نشان‌دهنده واریانس بیشتر در شبیه‌سازی بارش نسبت به سه متغیر دیگر بود.

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل اقلیمی برای بارش، تابش، دمای کمینه و بیشینه.

Table 2. Results of climate model evaluation for rainfall, radiation, maximum and minimum temperatures.

شاخص Parameter	دمای بیشینه Max temperature	دمای کمینه Min temperature	تابش Radiation	بارش Precipitation
RMSE	0.57	1.35	0.63	17.71
RMD	-0.01	0.03	0.02	0.23
EF	0.99	0.99	0.99	0.94

به طور کلی نتایج بررسی‌ها نشان داد که میانگین دما در شهرستان‌های مورد بررسی استان فارس تحت سناریوهای مختلف در آینده روند افزایشی خواهد داشت. تحت همه سناریوها به طور متوسط در دوره ۳۰-۲۰۱۱ میانگین دمای استان فارس در مقایسه با دوره پایه (۱۸/۳۸) سه درصد تغییر می‌کند و به ۱۸/۹۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در دوره ۶۵-۲۰۴۶ میانگین دمای استان در مقایسه با دوره پایه ۱۰ درصد تغییر می‌کند و به ۲۰/۲۷ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در دوره ۹۹-۲۰۸۰ میانگین دمای استان نسبت به دوره پایه با ۱۸ درصد تغییر به ۲۱/۷۵ خواهد رسید. به طور متوسط بیشترین تغییرات میانگین دما در شهرستان آباده و کمترین تغییرات در شهرستان لار مشاهده شد.

عملکرد دانه گندم در دوره پایه در استان فارس: نتایج شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل APSIM در شهرستان‌های مورد بررسی استان فارس در دوره پایه نشان داد که بین شهرستان‌ها از نظر عملکرد دانه گندم در شرایط پتانسیل (عدم وجود تنش‌های زنده و غیرزنده) اختلاف معنی‌دار وجود دارد (جدول ۳).

بیشترین عملکرد شبیه‌سازی شده دوره پایه در شرایط پتانسیل مربوط به شهرستان فسا و شیراز است. پتانسیل عملکرد دانه در شهرستان شیراز ۷۷۵۳/۹۵ کیلوگرم در هکتار و در شهرستان فسا ۷۸۳۰/۷۹ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. طول فصل رشد در این شهرستان‌ها به ترتیب ۱۹۱/۸۱ و ۱۸۰/۹۷ روز و میانگین دمای فصل رشد ۱۱/۱۲ و ۱۲/۱۰ درجه سانتی‌گراد است. کمترین عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط عدم وجود هر نوع تنش غیرزنده و زنده هم مربوط به شهرستان لار با ۶۸۱۰/۶۲ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. بالا بودن عملکرد دانه گندم در شهرستان‌های شیراز و فسا نشان‌دهنده مناسب بودن شرایط اقلیمی مانند میانگین دما و طول فصل رشد (جدول ۳) برای رشد گندم و رسیدن به عملکرد بالاتر است. به همین دلیل نیز این دو شهرستان بیشترین سطح زیر کشت گندم را در بین ایستگاه‌های مورد بررسی دارا هستند. با توجه به عملکرد بالای گندم در شهرستان‌های شیراز و فسا و سایر مناطق مورد مطالعه، دلیل عملکرد پایین در شهرستان لار کوتاه بودن طول فصل رشد و بالا بودن میانگین دمای طول فصل رشد (جدول ۳) در مقایسه با دیگر شهرستان‌هایی است که عملکرد بالایی دارند. شهرستان لار، در مقایسه با شیراز و فسا که بیشترین عملکرد و سطح زیر کشت

را در استان فارس دارند به ترتیب ۳۶/۴۶ و ۲۵/۶۲ روز طول فصل رشد کمتری دارد. همچنین میانگین دمای طول فصل رشد نیز در این شهرستان نسبت به شیراز و فسا به ترتیب ۳/۹۵ و ۲/۹۷ درجه سانتی گراد بیشتر است.

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات مختلف رشدی گندم در دوره پایه بین مناطق مورد بررسی با استفاده از آزمون دانکن.

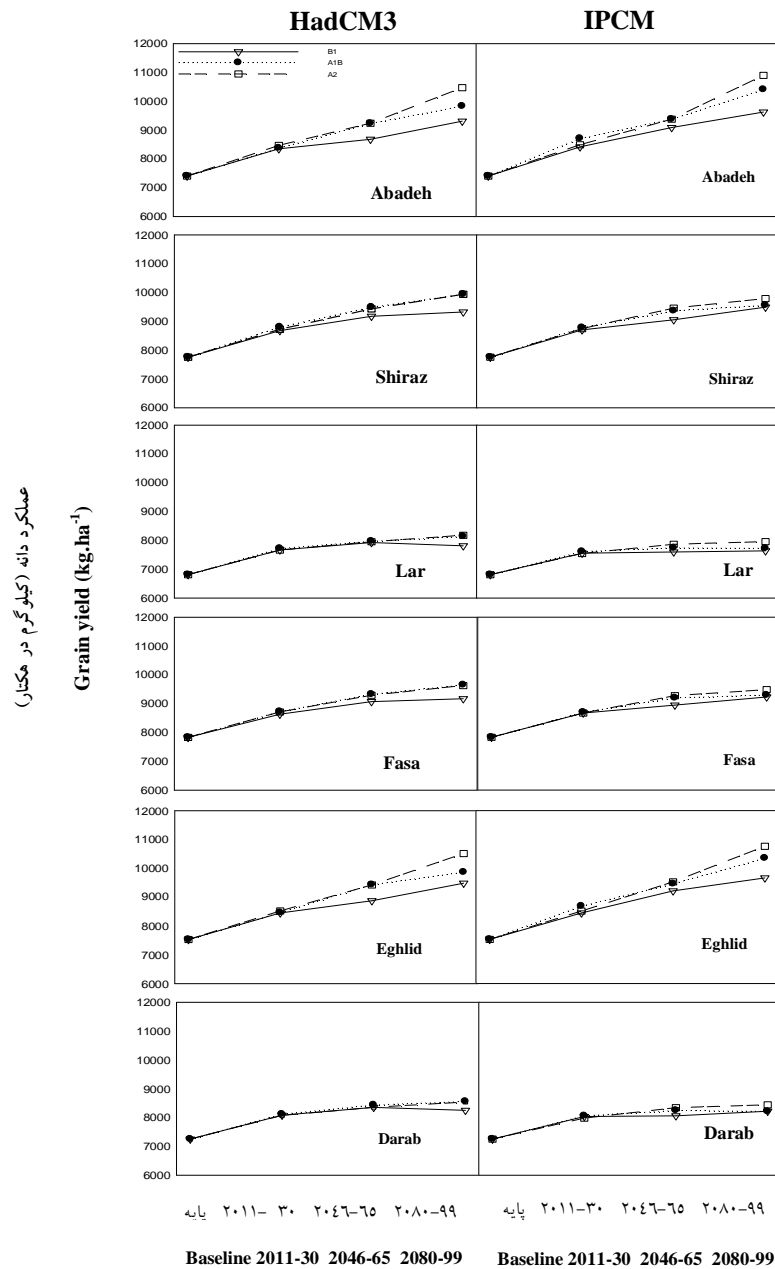
Table 3. Mean comparison of different growth characteristics of wheat in baseline period using Duncan's Multiple Range Test.

منطقه Location	صفت Trait					
	زمان حرارتی (درجه روز رشد) Thermal time (degree day)	طول فصل رشد (روز) Length of growth season (day)	حداکثر شاخص سطح برگ Maximum LAI	میانگین دمای فصل رشد (درجه سانتی گراد) Average temperature (°C)	زیست توده (کیلوگرم در هکتار) Biomass (kg.ha ⁻¹)	عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain yield (kg.ha ⁻¹)
شیراز Shiraz	2177.43d	191.81c	5.62c	11.12d	20755.35a	7753.95a
فسا Fasa	2212.81c	180.97d	5.92b	12.10c	21073.83a	7830.79a
لار Lar	2334.75a	155.35f	5.92b	15.05a	18684.78c	6810.62d
اقلید Eghlid	2067.98f	224.76a	4.66d	8.59f	19848.51b	7529.83b
داراب Darab	2276.2b	164.2e	6.23a	13.88b	19788.94b	7250.14c
آباده Abadeh	2108.99e	214.27b	4.35e	9.24e	19797.09b	7402.79b

* مقادیر دارای حروف مشترک در هر ستون فاقد تفاوت معنی دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون آماری دانکن می باشند.

*Values in each column followed by similar letters are not significantly different at 5% probability level, using Duncan's Multiple Range Test.

تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه گندم در استان فارس: همان طور که نتایج حاصل از شبیه سازی در دوره پایه نشان داد بیشترین عملکرد دانه در شهرستان های شیراز و فسا و کمترین مقدار در شهرستان های لار و داراب مشاهده شد. شکل ۲ مقادیر شبیه سازی شده عملکرد دانه را در سه دوره آینده (۲۰۱۱-۳۰، ۲۰۴۶-۶۵ و ۲۰۸۰-۹۹) تحت سه سناریوی انتشار (A2 و A1B، B1) و دو مدل اقلیمی (HadCM3 و IPCM4) نشان می دهد.



عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)

Grain yield (kg.ha⁻¹)

شکل ۲- عملکرد دانه گندم در شهرستان‌های مختلف استان فارس با استفاده از مدل‌ها و سناریوهای مختلف در آینده.

Figure 2. Grain yield in different locations of the Fars province in different climate models under future scenarios.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم آینده تحت سناریوهای مختلف انتشار دی‌اکسیدکربن عملکرد دانه گندم در استان فارس روند افزایشی را در دوره‌های مختلف نسبت به دوره پایه خواهد داشت. بیشترین عملکرد شبیه‌سازی‌شده در شهرستان‌های اقلید و آباد به دست خواهد آمد. در شهرستان اقلید در بین سناریوها و مدل‌های اقلیمی مختلف در آینده عملکرد دانه در مقایسه با دوره پایه (۷۵۲۹/۸۳ کیلوگرم در هکتار) از ۸۴۴۹/۲۷ کیلوگرم در هکتار در دوره ۲۰۱۱-۳۰ تحت سناریو B1 و مدل اقلیمی IPCM4 تا ۱۰۷۶۱/۱۷ کیلوگرم در هکتار در دوره ۲۰۸۰-۹۹ تحت سناریوی A2 و مدل اقلیمی IPCM4 تغییر خواهد کرد. در شهرستان آباد نیز در بین سناریوها و مدل‌های اقلیمی مختلف در آینده عملکرد دانه در مقایسه با دوره پایه (۷۴۰۲/۷۹ کیلوگرم در هکتار) از ۸۳۴۶/۸۷ کیلوگرم در هکتار در دوره ۲۰۱۱-۳۰ تحت سناریوی B1 و مدل اقلیمی HadCM3 تا ۱۰۸۹۶/۳۳ کیلوگرم در هکتار در دوره ۲۰۸۰-۹۹ تحت سناریوی A2 و مدل اقلیمی IPCM4 تغییر خواهد کرد.

نتایج شبیه‌سازی همچنین نشان داد که کمترین عملکرد دانه در شرایط تغییر اقلیم آینده در مقایسه با دوره پایه (۶۸۱۰/۶۲ کیلوگرم در هکتار) در شهرستان لار به دست خواهد آمد. در این منطقه در بین سناریوها و مدل‌های اقلیمی مختلف عملکرد دانه از ۷۵۵۷/۸۰ کیلوگرم در هکتار در دوره ۲۰۱۱-۳۰ تحت سناریوی B1 و مدل اقلیمی IPCM4 تا ۸۱۷۶/۳۷ کیلوگرم در هکتار در دوره ۲۰۸۰-۹۹ تحت سناریوی A2 و مدل اقلیمی HadCM3 در مقایسه با دوره پایه تغییر خواهد کرد.

در مطالعه حاضر کمترین افزایش در عملکرد دانه گندم تحت سناریوی B1 در دوره ۲۰۱۱-۳۰ با استفاده از مدل HadCM3 در شهرستان فسا به دست آمد که نسبت به عملکرد دانه دوره پایه ۱۰ درصد افزایش نشان داد. در این شهرستان بیشترین افزایش عملکرد دانه گندم تحت سناریوی A2 در دوره ۲۰۸۰-۹۹ با استفاده از مدل HadCM3 به دست آمد که نسبت به دوره پایه ۲۳ درصد افزایش نشان داد. نتایج همچنین نشان داد که بیشترین افزایش عملکرد نیز در شهرستان آباد به دست خواهد آمد. در این شهرستان عملکرد دانه تحت سناریوی B1 در دوره ۲۰۱۱-۳۰ با استفاده از مدل HadCM3 به میزان ۱۴ درصد و تحت سناریوی A2 در دوره ۲۰۸۰-۹۹ با استفاده از مدل IPCM4 به میزان ۴۷ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. به‌طور کلی عملکرد دانه گندم تحت شرایط تغییر اقلیم در همه شهرستان‌های مورد بررسی روند صعودی داشت ولی در شهرستان‌های داراب و لار نسبت به دیگر ایستگاه‌ها عملکرد دانه به مقدار کمتری افزایش یافت. از آنجایی که غلظت دی‌اکسید کربن تحت هر سناریو و مدل اقلیمی بین مناطق مختلف در آینده یکسان است این اختلاف در افزایش عملکرد

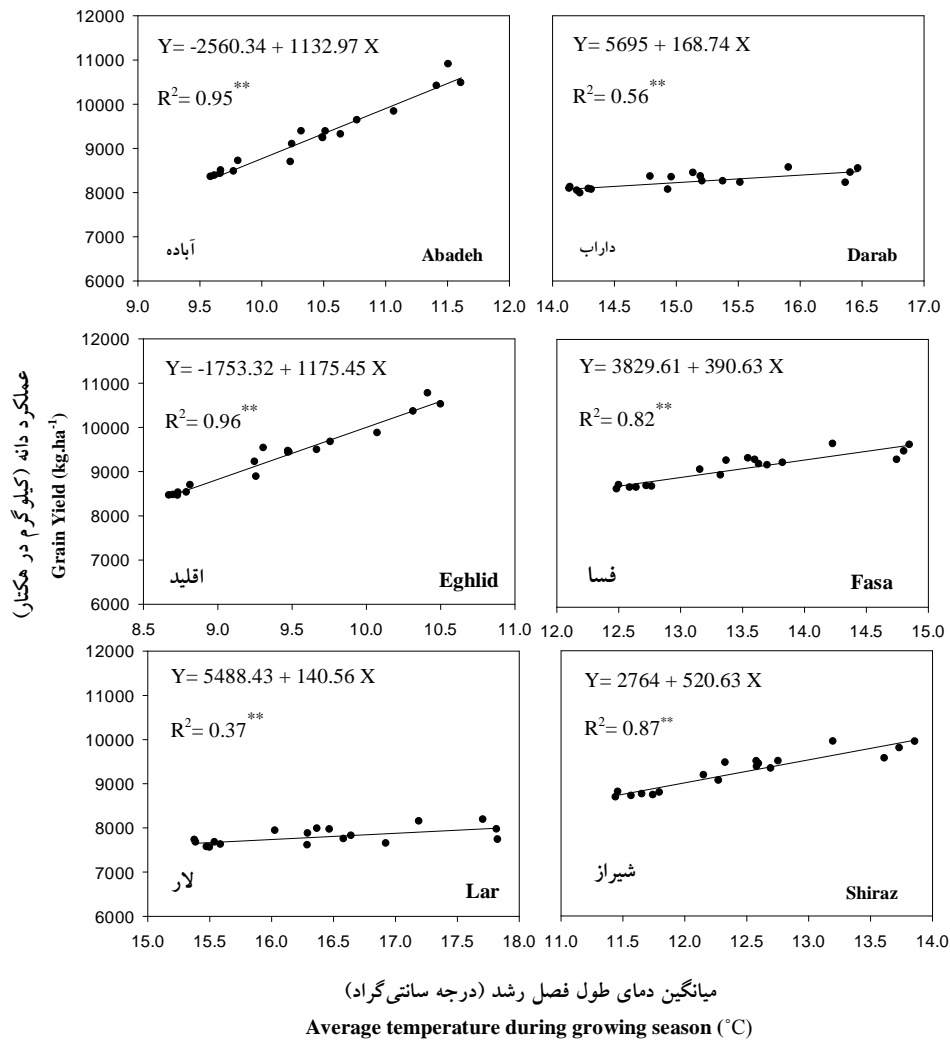
بین شهرستان‌ها به دلیل میانگین دمای طول فصل رشد بالاتر در این دو شهرستان و اثر متقابل با دی‌اکسید کربن است که اثرات مثبت افزایش دی‌اکسید کربن را خنثی کرده است. در سایر مناطق با توجه به اقلیم و میانگین دمای طول فصل رشد مناسب برای رشد و نمو گندم، افزایش دی‌اکسید کربن اثرات مثبت بیشتری را بر عملکرد دانه داشته است. در شهرستان‌های اقلید و آبادیه نیز که میانگین دمای فصل رشد پایین است (جدول ۳) تحت شرایط تغییر اقلیم آینده و افزایش غلظت دی‌اکسید کربن و میانگین دمای طول فصل رشد، سرعت رشد گیاه افزایش خواهد یافت و در نتیجه عملکرد دانه در این شهرستان‌ها نسبت به دیگر مناطق مورد بررسی افزایش بیشتری نشان می‌دهد. در شهرستان‌های لار و داراب نیز همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود عملکرد دانه نسبت به دیگر مناطق مورد بررسی افزایش چندانی نداشته است. دلیل این موضوع میانگین دمای بالای فصل رشد (جدول ۳) و اثر متقابل با دی‌اکسید کربن است که اثرات مثبت افزایش دی‌اکسید کربن را خنثی کرده است.

اثرات متقابل بین دما و دی‌اکسید کربن در مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر تولید کشاورزی مهم هستند زیرا غلظت دی‌اکسید کربن و دما در همه نقاط دنیا تقریباً به‌طور هم‌زمان افزایش می‌یابند (۲۲). در یک مطالعه در استرالیا مشخص شد که افزایش دما مسئول ۳۰ تا ۵۰ درصد از عملکرد تولیدی گندم بوده است، زیرا روند افزایشی دما از طریق بالا بردن دمای کمینه و کاهش تعداد وقوع یخبندان بر عملکرد تأثیر مثبت داشته است (۲۵). نتایج بررسی سمونوف (۲۰۰۹) نیز نشان داد که اثرات تغییر اقلیم بر گندم متفاوت است و شدت این اثرات وابستگی زیادی به خصوصیات رقم و الگوهای مکانی و زمانی تغییر اقلیم دارد (۲۹).

ارتباط بین عملکرد دانه گندم و میانگین دمای فصل رشد در آینده: بررسی رابطه بین عملکرد دانه گندم و میانگین دمای فصل رشد در مناطق مختلف نشان داد که بین این دو صفت در همه شهرستان‌ها ارتباط معنی‌داری وجود دارد (شکل ۳). بیشترین واکنش عملکرد دانه نسبت به افزایش میانگین دمای طول فصل رشد در شهرستان‌های اقلید و آبادیه مشاهده می‌شود. در این مناطق به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش در میانگین دمای طول فصل رشد عملکرد دانه گندم به ترتیب به میزان ۱۱۷۵/۴۵ و ۱۱۳۲/۹۷ کیلوگرم در هکتار تحت همه سناریوها و مدل‌های اقلیمی مختلف در آینده افزایش نشان خواهند داد. شهرستان‌های لار و داراب نیز به ترتیب با افزایش ۱۴۰/۵۶ و ۱۶۸/۷۴ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه به ازای هر درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای طول فصل رشد کمترین واکنش را در آینده نشان خواهند داد. البته باید توجه داشت که تنوع قابل ملاحظه‌ای در این رابطه در شهرستان‌های

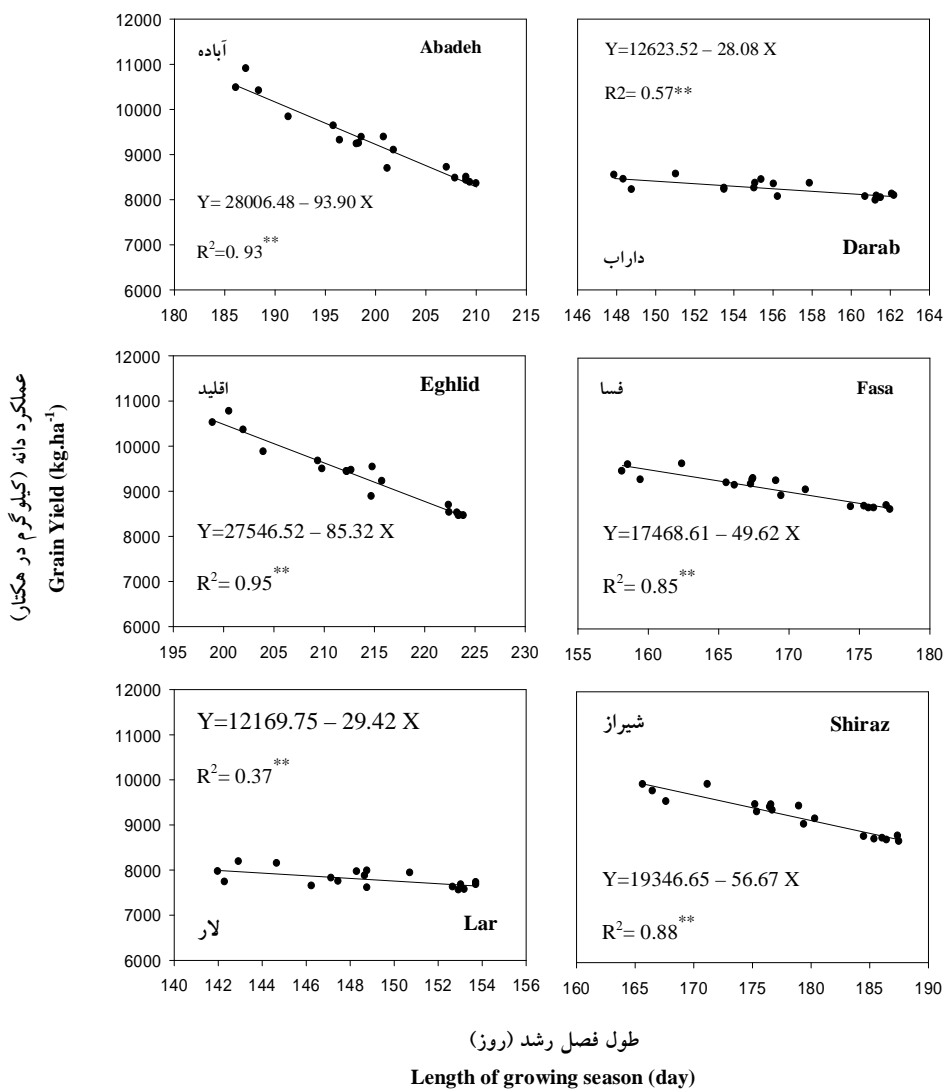
لار و داراب دیده می‌شود. شهرستان اقلید با توجه به اقلیم سرد و میانگین دمای فصل رشد پایین در دوره پایه (جدول ۳) در مقایسه با سایر مناطق مورد بررسی نسبت به افزایش دما و مطلوب شدن شرایط برای رشد و نمو گندم در آینده بیشترین واکنش را به افزایش میانگین دمای طول فصل رشد نشان می‌دهد. شهرستان آبادیه نیز که در دوره پایه میانگین دمای فصل رشد پایینی دارد (جدول ۳) در مقایسه با مناطق دیگر نسبت به افزایش دما و مطلوب شدن اقلیم برای رشد و نمو گندم تحت تغییر اقلیم آینده واکنشی مشابه اقلید نسبت به افزایش میانگین دمای طول فصل رشد نشان می‌دهد. شهرستان لار به دلیل بالا بودن میانگین دمای منطقه در دوره پایه (جدول ۳) در مقایسه با دیگر شهرستان‌ها، کمترین واکنش را به افزایش میانگین دمای طول فصل رشد تحت تغییر اقلیم آینده نشان می‌دهد. در همین زمینه در یک بررسی برزگر و سلطانی (۲۰۰۷) مشاهده کردند که عملکرد نخود در شرایط دیم شمال غرب ایران تحت تغییر اقلیم آینده با افزایش دما کاهش می‌یابد به طوری که افزایش شش درجه سانتی‌گراد دما سبب کاهش ۱۸/۳ درصدی در عملکرد دانه نخود می‌شود (۶). نتایج لوو و همکاران (۲۰۰۵) در جنوب استرالیا نشان داد که تحت شرایط تغییر اقلیم (۸۰ سناریوی تغییر اقلیم) عملکرد گندم در مناطق مورد بررسی با افزایش دما کاهش می‌یابد. در این مطالعه به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما، عملکرد گندم ۱۵/۰۷ کیلوگرم در هکتار کاهش می‌یابد. البته در این رابطه تنوع قابل ملاحظه‌ای دیده شد (۲۳).

ارتباط بین عملکرد دانه گندم و طول فصل رشد در آینده: نتایج شبیه‌سازی‌ها تحت همه سناریوها و مدل‌های اقلیمی و بررسی رابطه بین عملکرد دانه گندم و طول فصل رشد در مناطق مختلف نشان داد که بین این دو صفت در همه شهرستان‌ها نیز ارتباط معنی‌داری وجود دارد (شکل ۴). البته باید توجه داشت که تنوع قابل ملاحظه‌ای در این رابطه در شهرستان‌های لار و داراب دیده می‌شود. بیشترین واکنش عملکرد دانه نسبت به افزایش طول فصل رشد در شهرستان‌های آبادیه و اقلید مشاهده شد که به ازای هر روز افزایش در طول فصل رشد به‌طور میانگین عملکرد دانه گندم به ترتیب به میزان ۹۳/۹۰ و ۸۵/۳۲ کیلوگرم در هکتار تحت همه سناریوها و مدل‌های اقلیمی مختلف در آینده کاهش نشان دادند. شهرستان‌های داراب و لار نیز به ترتیب با کاهش ۲۸/۰۸ و ۲۹/۴۲ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه به ازای هر روز افزایش در طول فصل رشد کمترین واکنش را در آینده نشان خواهند داد.



شکل ۳- ارتباط بین میانگین دمای طول فصل رشد و عملکرد دانه گندم در آینده.

Figure 3. The relationship between average temperature over growing season and grain yield under future climate.



شکل ۴- ارتباط بین طول فصل رشد و عملکرد دانه گندم در آینده.

Figure 4. The relationship between the length of growing season and grain yield in future

دلیل این کاهش عملکرد در مناطق مذکور می‌تواند احتمالا همزمانی دوره پر شدن دانه با گرمای انتهای فصل رشد باشد. در این شهرستان‌ها در سال‌هایی که طول فصل رشد در آینده کمتر است عملکرد دانه بیشتری به‌دست آمده و در سال‌هایی که طول فصل رشد بیشتر شده، عملکرد دانه کمتری به‌دست آمده است و می‌توان نتیجه گرفت که در سال‌هایی که میانگین دما در فصل رشد بالا است دوره پر شدن دانه با گرمای انتهای فصل برخورد نداشته و عملکرد بالاتری به‌دست می‌آید و در سال‌هایی که میانگین دما در فصل رشد کمتر است طول فصل رشد افزایش خواهد یافت و دوره پر شدن دانه با گرمای انتهای فصل برخورد داشته و عملکرد دانه کمتری به‌دست می‌آید. کوچکی و همکاران (۲۰۰۶) در یک بررسی در تبریز مشاهده کردند که تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از دو مدل اقلیمی GISS و GFDL عملکرد نخود آبی و طول فصل رشد در دوره ۲۰۸۰ در مقایسه با دوره پایه کاهش می‌یابد درحالی‌که عملکرد آفتابگردان در شرایط مذکور افزایش می‌یابد ولی طول فصل رشد کاهش خواهد یافت. آن‌ها همچنین نشان دادند که عملکرد نخود دیم تحت شرایط مذکور افزایش می‌یابد درحالی‌که طول فصل رشد در آن کاهش خواهد یافت. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند عملکرد آفتابگردان دیم تحت شرایط مذکور با استفاده از مدل اقلیمی GISS کاهش و با استفاده از مدل اقلیمی GFDL افزایش می‌یابد درحالی‌که در هر دو مدل اقلیمی طول فصل رشد کاهش می‌یابد (۲۰). مقایسه مدل‌های گردش عمومی: در مطالعه حاضر برای مقایسه بین دو مدل اقلیمی از آزمون t-test استفاده شد. نتایج نشان داد بین مدل‌های HadCM3 و IPCM4 با احتمال ۹۵ درصد در شبیه‌سازی اقلیم آینده و تأثیر اقلیم بر عملکرد دانه، بیوماس، درجه روز رشد (GDD)، طول فصل رشد و میانگین دما در طول فصل رشد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم در استان فارس می‌توان تنها از یکی از مدل‌ها استفاده کرد (جدول ۴).

جدول ۴. مقایسه دو مدل اقلیمی (IPCM4 و HadCM3) در صفت عملکرد دانه و دیگر خصوصیات رشدی.

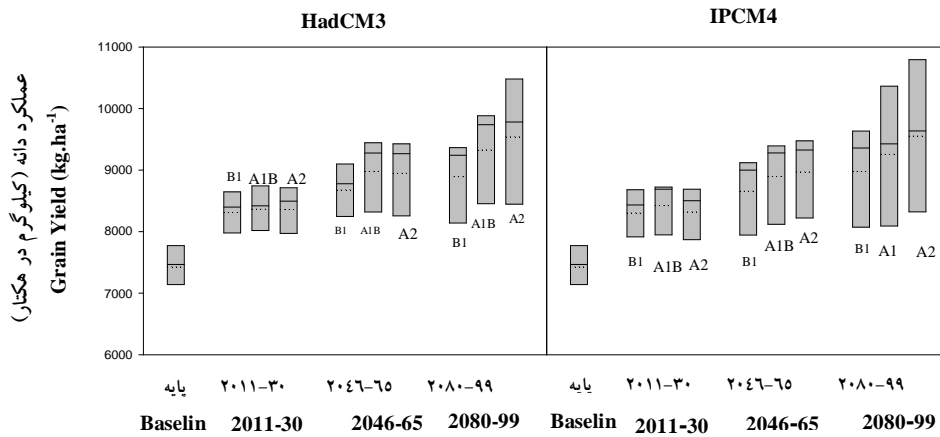
Table 4. Comparison of two climate models (IPCM4 and HadCM3) in terms of grain yield and the other growth traits.

آزمون Test	میانگین دمای فصل رشد Average temperature during growing season	طول فصل رشد Length of growing season	درجه روز رشد GDD	بیوماس Biomass	عملکرد دانه Grain yield
t-test	0.47 ^{ns}	0.66 ^{ns}	0.41 ^{ns}	0.55 ^{ns}	0.91 ^{ns}

ns: به معنای عدم وجود تفاوت معنی‌دار در هر صفت بین دو مدل اقلیمی می‌باشد.

ns: means lack of significant difference between two climate models.

مقایسه عملکرد دانه تحت سناریوهای مختلف انتشار: شکل ۵ عملکرد دانه گندم را در بین همه مناطق مورد مطالعه تحت سناریوها و مدل‌های اقلیمی مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود میانگین عملکرد دانه گندم در تمام مناطق مورد بررسی تحت سناریوهای مختلف رو به افزایش است (در مقایسه با دوره پایه) و عملکرد دانه گندم در بین سناریوها متفاوت است. در دوره ۲۰۱۱-۳۰ که اختلاف چندانی بین غلظت دی‌اکسید کربن (جدول ۱) و دما در هر منطقه تحت سناریوهای مختلف انتشار وجود ندارد اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین سناریوها از نظر عملکرد دانه مشاهده نمی‌شود ولی در دوره‌های ۲۰۶۶-۶۵ و ۲۰۸۰-۹۹ که اختلاف غلظت دی‌اکسید کربن و دما در هر منطقه تحت سناریوهای مختلف انتشار بیشتر است و اثرات متقابل آن‌ها بارزتر می‌شود، اختلاف عملکرد بین سناریوها نیز مشهودتر است. این نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی در استان فارس عملکرد دانه در دوره ۲۰۱۱-۳۰ نسبت به دوره‌های ۲۰۴۵-۶۵ و ۲۰۸۰-۹۹ تغییرات کمتری را در مقایسه با دوره پایه نشان خواهد داد و بیشترین تغییر عملکرد دانه در مقایسه با دوره پایه در دوره ۲۰۸۰-۹۹ مشاهده می‌شود. دلیل اختلاف بین دوره‌ها و سناریوها اختلاف بین غلظت دی‌اکسید کربن (جدول ۱) و دما است که در سناریوی A2 و دوره ۲۰۸۰-۹۹ بیشترین افزایش در غلظت دی‌اکسید کربن و دما مشاهده می‌شود و در نتیجه بیشترین تأثیر را در بین سناریوها و دوره‌ها بر عملکرد دانه خواهد گذاشت. در سناریوی B1 و دوره ۲۰۱۱-۳۰ در مقایسه با دیگر سناریوها و دوره‌ها کمترین تغییرات در غلظت دی‌اکسید کربن (جدول ۱) و دما مشاهده می‌شود و در نتیجه کمترین تأثیر را در بین سناریوها و دوره‌ها بر عملکرد دانه خواهد داشت. همچنین در سناریوی A2 و دوره ۲۰۸۰-۹۹ در مقایسه با دیگر سناریوها و دوره‌ها بیشترین تغییرات در غلظت دی‌اکسید کربن (جدول ۱) و دما مشاهده می‌شود و در نتیجه بیشترین تأثیر را در بین سناریوها و دوره‌ها بر عملکرد دانه خواهد داشت.



شکل ۵. مقایسه بین سناریوهای مختلف انتشار و دوره‌های مورد مطالعه از نظر عملکرد دانه گندم.
Figure 5. Comparison between different emission scenarios and periods investigated in terms of grain yield of wheat.

هر دو متغیر دما و دی‌اکسید کربن از عوامل کلیدی مؤثر بر رشد و نمو گیاهان هستند. دمای بالا به تنهایی و یا همراه با افزایش دی‌اکسید کربن قادر است صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک متعددی را تحت تأثیر قرار دهد که آن‌ها نیز به نوبه خود قادرند رشد و عملکرد نهایی گیاه را متأثر سازند (۳). در تغییر اقلیم آینده تحت سناریوهای مختلف انتشار، دمای هوا نیز تحت تأثیر غلظت‌های متفاوت دی‌اکسید کربن این سناریوها قرار می‌گیرد که این تغییرات به نوبه خود عملکرد گندم را تحت تأثیر قرار می‌دهند. کوچکی و نصیری (۲۰۰۸) در یک بررسی نشان دادند که افزایش دما و غلظت‌های مختلف دی‌اکسید کربن به تنهایی عملکرد گندم آبی در شرایط پتانسیل (بدون محدودیت آب و عناصر غذایی) را افزایش می‌دهد. آن‌ها همچنین بیان کردند که افزایش عملکرد پیش‌بینی شده در صورت عدم تأمین آب و نیتروژن کافی تحقق نخواهد یافت (۱۷).

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که تحت تغییر اقلیم آینده و افزایش دما و غلظت دی‌اکسید کربن در استان فارس عملکرد دانه گندم در شرایط پتانسیل روند افزایشی خواهد داشت. به‌طور متوسط تحت

همه سناریوها در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ میانگین عملکرد دانه در مقایسه با دوره پایه ۱۲ درصد، در دوره ۲۰۴۶-۶۵، ۱۹ درصد و در دوره ۲۰۸۰-۹۹، ۲۴ درصد افزایش خواهد یافت. اثرات تغییر اقلیم آینده بر خصوصیات رشد و نمو گندم برآیند دو عامل افزایش دما و دی‌اکسید کربن خواهد بود. حاصل این برآیند در برخی مناطق مانند لار و داراب این طور است که اثرات مثبت افزایش غلظت دی‌اکسید کربن توسط افزایش دمای بیش‌ازحد مطلوب برای رشد و نمو گندم، رو به خنثی شدن می‌رود به طوری که در این مناطق افزایش عملکرد دانه در آینده نسبت به دیگر مناطق کمتر خواهد بود. در برخی مناطق دیگر مانند اقلید و آباده با توجه به افزایش میانگین دمای فصل رشد و مطلوب شدن شرایط برای رشد و نمو گندم افزایش غلظت دی‌اکسید کربن اثرات مثبتی را بر رشد و نمو گندم در مقایسه با دیگر مناطق داشت و عملکرد دانه به مقدار بیشتری افزایش یافت. شایان ذکر است که در این تحقیق اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد دانه گندم در شرایط پتانسیل انجام شد در صورتی که در شرایط واقعی و وجود تنش-های زنده و غیرزنده از جمله آب نتایج ممکن است متفاوت باشد. لذا پیشنهاد می‌شود با توجه به اینکه استان فارس یکی از قطب‌های اصلی تولید محصولات کشاورزی از جمله گندم است این مطالعه در شرایط واقعی به خصوص محدودیت آب و نیتروژن نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع

1. Aggarwal, P.K. 1994. Constraints in wheat productivity in India. pp. 1- 11, In: P.K. Aggarwal and N. Kalra (eds), *Simulating the Effect of Climatic Factors, Genotype and Management on Productivity of Wheat in India*. Agricultural Research Institute. New Dehli, India.
2. Babaeian, I., Najafi Nik, Z., Zabol Abasi, F., Habibi Nokhandan, M., Adab, H., and Malbousi, Sh. 2008. Assessment of climate change of country in 2010-2039 period using General Circulation Model data of ECHO-G. *Quar. Geog. Dev.* 16: 135-152. (In Persian).
3. Bannayan, M. 2009. Crop models efficiency and performance under elevated atmospheric CO₂. *J. Water and Soil.* 23(4): 115-126. (In Persian).
4. Bannayan, M., and Hoogenboom, G. 2008. Weather analogue: A tool for real-time prediction of daily weather data realizations based on a modified k-nearest neighbor approach. *Environ. Model. Soft.* 3: 703-713.
5. Bannayan, M., Lotfabadi, S., Sanjani, S., Mohammadian, A., and Aghalikhani, M. 2011. Effects of precipitation and temperature on cereal yield variability in northeast of Iran. *Int. J. Biometeorol.* 55: 387- 401.

6. Barzegar, A.B., and Soltani, A. 2007. Impact of future climate change on yield of rain fed Chickpea in the North West of Iran. Second national conference on ecological agriculture. 17-18 October. pp, 569-587. (In Persian).
7. Deihimfard, R. 2011. Yield gap analysis of wheat and sugar beet in Khorasan province using modeling approach. University of Ferdowsi Mashhad. Ph.D. Thesis. School of Agriculture of Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
8. Eyshi Rezaie, E., and Bannayan, M. 2012. Rainfed wheat yields under climate change in northeastern Iran. Meteorol. Appl. 19: 346– 354.
9. Gregory, P.J., Ingram, J.S.I., and Brklacich, M. 2005. Climate change and food security. Philos. T. Roy. Soc. 360: 2139-2148.
10. Hoogenboom, G., Jones, J.W., Porter, C.H., Wilkens, P.W., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., and Tsuji, G.Y. (Editors). 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Vol. 1: Overview. University of Hawaii, Honolulu, HI.
11. Huang, Y., Yu, Y., Zhang, W., Sun, W., Liu, S., Jiang, J., Wu, J., Yu, W., and Yang, Z. 2009. Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems. Agri. Forest. Meteorol. 149: 106-129.
12. IPCC, 2007. Summary for Policy Makers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge.
13. IPCC, 2013. Summary for policymakers. In: Climate Change 2013: Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
14. Jamieson, P.D., Porter, J.R., and Wilson, D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Res. 27: 337-350.
15. Jones, P.G., and Thornton, P.K. 2003. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. Global Environ.Chang. 13: 51-59.
16. Khaliliaqdam, N. Mosaedi, A. Soltani, A., and Kamkar, B. 2013. Evaluation of ability of LARS-WG model for simulation some weather parameters in Sanandaj. J. Water and Soil Conserv. 19(4):85-102. (In Persian).
17. Koocheki, A., and Nassiri, M. 2008. Impacts of climate change and CO₂ concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. Iran. J. Field Crops Res. 6(1): 139-153. (In Persian).
18. Koocheki, A., Nassiri, M., Alizadeh, A., and Ganjali, A. 2009. Modelling the impact of climate change on flowering behavior of Saffron (*Crocus sativus* L.). Iranian J. Field Crops Res. 7(2): 583-594.

19. Koocheki, A., Nassiri, M., Sharifi, H., and Zand, E. 2001. Simulation of growth, phenology and production of Wheat cultivars in effect of climate change under Mashhad conditions. *J. Int. Desert Res. Center.* 6(2): 117-127. (In Persian).
20. Koocheki, A., Nassiri, M., Soltani, A., Sharifi, H., and Ghorbani, R. 2006. Effects of climate change on growth criteria and yield of Sunflower and Chickpea crops in Iran. *Clim. Res.* 30: 247-253.
21. Lashkari, A., Alizadeh, A., Eyshi Rezaei, E., and Bannayan, M. 2012. Mitigation of climate change impacts on Maize productivity in northeast of Iran: a simulation study. *Mitig. Adapt. Strat. Global Chang.* 17: 1-16.
22. Ludwig, F., and Asseng, S. 2006. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agri. Syst.* 90: 159-179.
23. Luo, Q., Bellotti, W., Williams, M., and Bryan, B. 2005. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. *Agri. Forest. Meteorol.* 132: 273- 285.
24. Nakicenovic, N., and Swart, R. 2000. Emissions scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
25. Nicholls, N. 1997. Increased Australian wheat yields due to recent climate trends. *Nature.* 387: 484– 485.
26. Ranuzzi, A., and Srivastava, R. 2012. Impact of Climate Change on Agriculture and Food Security. ICRIER Policy Series, no. 16.
27. Saunders, M.A. 1999. Earth's future climate. *Philos. T. Roy. Soc.* 357: 3459-3480.
28. Semenov, M.A., and Barrow, E.M. 2002. LARS-WG: A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies, Version 3.0, User's Manual.
29. Semenov, M.A. 2009. Impacts of climate change on wheat in England and Wales. *Roy. Soc.* 6: 343-350.
30. Tingem, M., and Rivington, M. 2009. Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: Turning on the heat. *Mitig. Adapt. Strat. Global Chang.* 14: 153–168.
31. Wetterhall, F., Bardossy, A., Chen, D., Halldin, S., and XU, Ch. 2009. Statistical downscaling of daily precipitation over Sweden using GCM output. *Theor. Appl. Climatol.* 96: 95–103.
32. Wilby, R.L., and Wigley, T.M.L. 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progr. Physic. Geogr.* 21: 530– 48.