

بررسی رخدادهای تغییر اقلیم و تأثیر آن بر فنولوژی و عملکرد گندم در منطقه غرب و شمال غرب ایران

الهام محمدی^{۱*}، سعید موحدی^۲، رضا محمدی^۳ صابر گلگاری^۴

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه اصفهان

۲- دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه اصفهان

۳- معاونت سرارود، سازمان تحقیقات-آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران

۴- موسسه تحقیقات گندم -آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران

چکیده

در این مطالعه اثر تغییر اقلیم بر فنولوژی (مرحله گل‌دهی) و عملکرد گندم در غرب و شمال غرب کشور بررسی شده است. ابتدا رخدادهای تغییر اقلیم برای دوره پایه (۱۹۸۸-۲۰۱۸) در منطقه با استفاده از دو آزمون من-کندال و *sen's Estimator slop* ارزیابی شد. نتایج نشان داد که در غرب و شمال غرب کشور متوسط دمای سالانه دارای روند افزایشی به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد، و همچنین متوسط بارندگی‌ها سالانه دارای روند کاهشی به میزان ۳۸ درصد می‌باشد. در ادامه هم با کوچک مقیاس سازی آماری داده‌های خروجی مدل *CCSM4* به وسیله نرم افزار *LARS WG*، پارامترهای اقلیمی پیشینه دما، کمینه دما و بارندگی منطقه تحت سناریوی *RCP4.5* در افق سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۳۹ شبیه سازی شد. سپس پیش‌بینی طول مرحله گل‌دهی و میزان عملکرد با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه خطی بدست آمد. انتخاب مدل براساس شاخص *R-Square* بود که شاخص (*R-Square*) یا ضریب تبیین مدل برای پیش‌بینی عملکرد ۸۳٪ بوده و ضریب تبیین (*R-Square*) مدل برای پیش‌بینی فنولوژی ۹۴٪ بود. یافته‌ها نشان داد که در غرب و شمال غرب کشور دوره آبی، متوسط درجه‌حرارت در تمامی ماه‌های سال افزایشی بین ۲/۵ تا ۳/۵ درجه سانتیگراد تا پایان سال ۲۰۳۹ خواهد داشت. همچنین تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده طول مرحله گل‌دهی ۱۸ روز کوتاه‌تر خواهد شد و عملکرد دانه گندم ۳۵ درصد افزایش خواهد یافت.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، رگرسیون چندگانه خطی، فنولوژی، عملکرد، گندم.

مقدمه

امروزه با اوج‌گیری فعالیت‌های انسانی، غلظت گازهای گلخانه‌ای افزایش یافته و باعث گرم شدن کره زمین و در نهایت، منجر به تغییراتی گسترده در آب و هوای جهان خواهد شد. این تغییرات ممکن است با توجه به هر منطقه اثرات مثبت، خنثی و حتی منفی نیز داشته باشد (Janjua, 2014). از جمله مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای، دی‌اکسیدکربن، اکسیدنیترژن، متان و بخار آب می‌باشد که فعالیت‌های انسانی باعث تغییر در ترکیب و افزایش غلظت این گازها شده و در نهایت منجر به افزایش دمای زمین و پدیده تغییر اقلیم می‌شود (Motha & Baier, 2005). روی هم رفته، اقلیم، شرایط متوسط آب و هوایی برای محدوده‌ای ویژه و یک دوره خاص است. افزایش جمعیت کره زمین که باعث تغییر کاربری زمین، تخریب جنگل‌ها، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و دامداری و تولید ضایعات جامد و مایع شده، پیامدهای گوناگونی به همراه داشته است که پدیده تغییر اقلیم یکی از آنها است. تغییر اقلیم، عبارت است از تغییر برگشت‌ناپذیر در متوسط شرایط آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است (IPCC, 2007).

تغییر اقلیم همه بخش‌های اقتصادی را تا اندازه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما بخش کشاورزی شاید حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین بخش باشد، چراکه محصولات کشاورزی وابستگی زیادی به منابع اقلیمی دارند، و با توجه به شواهد علمی، تغییر اقلیم آینده، به ویژه اثرات ترکیبی افزایش دما و بالا رفتن غلظت CO₂ جو افزایش احتمال وقوع حوادث حدی (خشکسالی، سیلاب، یخبندان) اثرات قابل ملاحظه‌ای بر روی محصولات کشاورزی داشته باشد (Chiottioud, 1995). آثار کلی تغییر اقلیم بر رشد و نمو تولید محصولات زراعی بسته به نوع گیاه و منطقه مورد مطالعه متغیر بوده (Rawlins, 1991) و اظهار نظر در مورد پاسخ گونه‌های مختلف به تغییر اقلیم مستلزم انجام مطالعات موردی می‌باشد. گندم از عمده‌ترین محصولات کشاورزی ایران و تأمین کننده بیشترین نیاز غذایی کشور می‌باشد و تأمین کننده حدود ۴۷ درصد از کالری مصرفی سرانه کشور می‌باشد. در ارتباط با

اثر تغییر اقلیم بر تولیدات محصولات کشاورزی و مراحل فنولوژی آن مطالعاتی انجام شده است. از جمله حیدری‌بنی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژیکی کلزا در استان چهارمحال بختیاری پرداختند. نتایج بررسی آنان نشان داد که تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده مدت زمان مراحل گل‌دهی و غلاف‌بندی کاهش می‌یابد و میانگین عملکرد کلزا ۱۸/۶ درصد افزایش می‌یابد. قلی‌پور و سلطانی (۱۳۸۴) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات رشدی و عملکرد گندم زمستانی در شرایط دیم و فاریاب با استفاده از دو مدل گردش عمومی (GISS و GFDL) در تبریز پرداختند نتایج نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم تاریخ‌های گلدهی و رسیدگی در گندم جلو می‌افتد و در نتیجه زمینه برای کشت دوم فراهم‌تر می‌گردد. همچنین عملکرد بیولوژیک گندم برای شرایط دیم و برای وضعیت فاریاب افزایش خواهد یافت. علت افزایش عملکرد گندم در شرایط فاریاب بیشتر شدن مقادیر کارایی مصرف نور، و در شرایط دیم بالا رفتن مقادیر کارایی تعلق بوده است. برزگر و سلطانی (۱۳۸۶) افزایش ۲۶/۱۷ درصدی در متوسط عملکرد نخود دیم را در شمال غرب ایران به دلیل کاهش دوره رشد گیاه و زودرس تر شدن آن و در نتیجه انطباق بهتر رشد گیاه در شرایط دیم با ذخیره آبی خاک و کاهش تنش انتهایی فصل رشد گزارش کردند. مومنی و زیبایی (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای به برآورد اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر کشاورزی استان فارس پرداختند. نتایج آنها نشان داد که درجه حرارت و بارندگی اثر معنی‌دار و نایک‌نواخت بر عملکرد محصولات بر جای می‌گذارد. چانچوا و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای با عنوان تغییر اقلیم و تولید گندم در پاکستان به بررسی اثرات متغیرهای اقلیم بر تولید گندم پرداختند. نتایج نشان دادند که تغییر اقلیم، تولید گندم در پاکستان را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. کوچکی و نصیری (۱۳۸۷) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم همراه با افزایش غلظت CO₂ بر عملکرد گندم در ایران پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اگر چه غلظت CO₂ تأثیر منفی افزایش درجه حرارت را تا حدودی تعدیل می‌کند، ولی در شرایط اقلیمی سال هدف، عملکرد گندم آبی در مناطق گوناگون تولید در محدوده‌های بین ۱۴ تا ۲۱ درصد کاهش خواهد یافت. زرعیانی و همکاران (۱۳۹۳) در مقاله‌ای به بررسی اثر تغییر

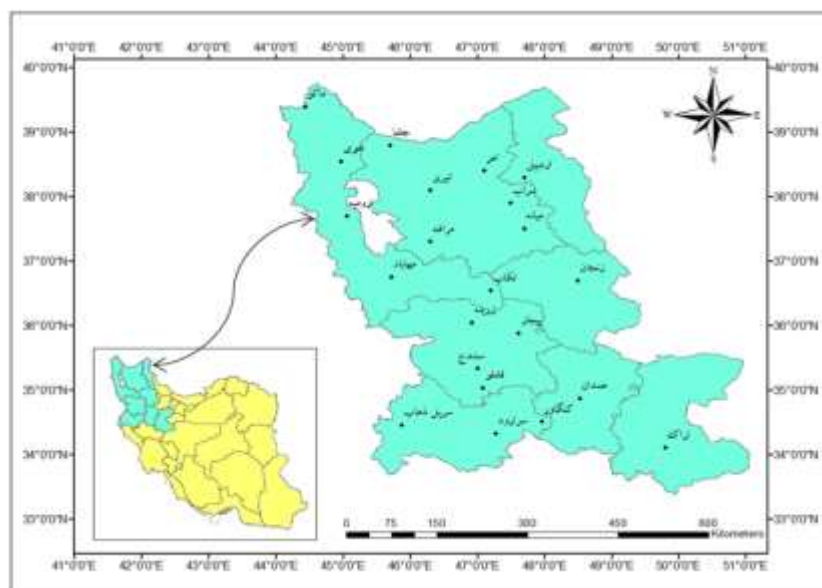
CO₂ باعث افزایش ریشه و ساقه شده، اما این اثر مثبت هنگامی که گیاهان در درجه‌حرارت بالا رشد داده شوند، کاهش خواهد یافت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل غرب و شمال‌غرب کشور است که موقعیت جغرافیایی آن و همچنین ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است. پارامترهای مورد مطالعه شامل میانگین دما و بارش به صورت سالیانه در طول دوره آماری بلندمدت (۲۰۱۸-۱۹۸۸) از ۲۳ ایستگاه سینوپتیک می‌باشد. در ایستگاه‌های مورد مطالعه ایستگاه زرینه آب‌تو با ارتفاع ۲۱۴۲ متر و ایستگاه سرپل‌ذهاب با ارتفاع ۵۴۵ متر از سطح دریا دارای بیشترین و کمترین ارتفاع از سطح دریا در سطح منطقه مورد مطالعه را دارا می‌باشند.

اقلیم بر اقتصاد گندم دیم در استان خراسان شمالی پرداختند. نتایج آنها نشان دادند که تغییر اقلیم در ۳۰ سال گذشته در این استان رخ داده و رابطه‌ای معنی‌دار بین لگاریتم پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه و بارندگی سالانه با عملکرد گندم دیم مشاهده شد. تاتاری و همکاران (۱۳۸۸) به پیش‌بینی عملکرد گندم دیم در استان خراسان با استفاده از داده‌های بارندگی و خاک با به کارگیری انواع مدل‌های رگرسیونی پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت نیاز، می‌توان عملکرد گندم دیم تنها بر اساس مقادیر بارندگی در ماه‌های فروردین و آبان با دقت قابل قبولی تخمین زد. نیکلاس (۱۹۹۷) به بررسی تغییرات آب و هوا روی عملکرد گندم در استرالیا پرداخت و نتیجه گرفت که با افزایش یک درجه‌حرارت، عملکرد گندم به اندازه ۵-۳ درصد افزایش می‌یابد. بنلاچ گونزالس (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای به بررسی اثر افزایش CO₂ به همراه افزایش دما بر رشد سیستم ریشه دو رقم گندم بهاره پرداختند. نتایج نشان دادند که افزایش غلظت



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در غرب و شمال‌غرب کشور

روند تغییرات بارندگی و درجه‌حرارت به منظور آشکارسازی پدیده تغییر اقلیم در منطقه بررسی شد. آزمون ناپارامتری من-کندال با در نظر گرفتن دو فرض H₀ و H₁، برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (عدم وجود روند) در مقابل وجود روند در سری زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی استفاده می‌شود.

آشکارسازی تغییر اقلیم در دوره‌های گذشته

داده‌های اقلیمی حداکثر درجه‌حرارت، حداقل درجه‌حرارت، بارندگی تاریخی ۳۰ ساله (۲۰۰۸-۱۹۸۸) از ۲۳ ایستگاه واقع در غرب و شمال‌غرب کشور تهیه گردید و با استفاده از دو آزمون ناپارامتری من-کندال و sen's Estimator slop

فرض صفر رد و سری زمانی در سطح اطمینان مورد آزمون روند معنادار دارد.

تولید سناریوهای اقلیمی در دوره های آتی

به منظور ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده در غرب و شمال غرب کشور از مدل گردش عمومی CCSM4^۱ تحت سناریو RCP4.5^۲ از مجموع سناریوهای جدید انتشار RCP است که هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود (AR5^۳) به عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای نام برده‌اند استفاده شده است سناریوی RCP4.5 حاکی از این است که واداشت تابشی به دلیل استفاده از فناوری‌های جدید و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای بعد از سال ۲۱۰۰ ثابت می‌ماند (جدول ۱). مدل CCSM4 مدل تدوین شده در مرکز تحقیقات هواشناسی آمریکا می‌باشد این مدل از پنج مدل جداگانه اتمسفری، اقیانوسی، زمینی، یخ و دریا-یخ به اضافه یک مؤلفه ترکیبی مرکزی تشکیل شده است. که هر کدام از این مدل‌های از چهار قسمت عمده تشکیل شده است: الف) مؤلفه فعال^۴: مؤلفه فعال مدل بخش پویای مدل و در جهت پیش‌آگاهی‌ها و تجزیه و تحلیل استفاده می‌شود در واقع در این بخش مدل، اجرای مدل، تست مدل، پارامتریک کردن مدل و همچنین چرخش مدل صورت می‌گیرد. ب) مؤلفه داده^۵: کار این مؤلفه گرفتن داده است ج) مؤلفه غیرفعال^۶: این مؤلفه تنها برای تست‌های فنی سیستم بکار می‌رود در واقع این مؤلفه بخش غیرفعال مدل است که با بخش مؤلفه فعال مدل هیچ وقت ترکیب نمی‌شود د) مؤلفه رابط^۷: این مؤلفه نقش رابط دارد و فقط زمانی که نیازی به پیکربندی مدل نداریم از آن استفاده می‌کنیم مثل زمانی که فقط داده‌های مدل اتمسفری نیاز باشد و سایر مدل‌ها نیاز نباشد از این مؤلفه استفاده می‌شود. تفکیک مکانی این مدل ۱۹×۱۹ طول و عرض جغرافیایی می‌باشد.

شود. آماره این آزمون (Z) می‌باشد که دارای توزیع نرمال است. این آزمون، دو طرفه است، بنابراین در صورتی که $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ باشد در سطح اطمینان α ، فرض صفر پذیرفته می‌شود و در غیر این صورت، فرض صفر رد خواهد شد. در حالت رد فرض صفر (وجود روند)، در صورتی که $Z > 0$ باشد، سری زمانی دارای روند منفی (نزولی) خواهد بود. مقادیر این آماره در سطح اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪ به ترتیب برابر با ۱/۹۶ و ۲/۵۸ است.

در روش Sens برای هر جفت یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده بدست می‌آید که از محاسبه میانه، (Q_{med})، این سری زمانی شیب خط روند، حاصل می‌شود. مقدار مثبت میانه، صعودی بودن و مقدار منفی آن نزولی بودن روند را نشان می‌دهد. در مرحله بعد باید پارامتر Ca در سطح اطمینان مورد نظر توسعه معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$c_{\alpha} = z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{var}(s)} \quad (1)$$

که در آن، (Z) آماره توزیع نرمال استاندارد است. $\text{Var}(s)$ واریانس S بوده که از معادله ۲ بدست می‌آید:

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (2)$$

که در آن m: تعداد گره‌ها و t: تعداد داده‌ها در هر گره می‌باشد. منظور از این گره این است از یک مقدار داده، بیشتر از یکی وجود داشته باشد، این مقادیر، مساوی، تشکیل یک گره را می‌دهند و تعداد این مقادیر مساوی در گره m ام برابر t است.

حال باید حدود اعتماد بالا و پایین M_1 و M_2 با معادله ۳ برابر شود.

$$M_1 = \frac{N' + c_{\alpha}}{2} \quad \text{۳- الف)}$$

$$M_2 = \frac{N' - c_{\alpha}}{2} \quad \text{۴- ب)}$$

که در آنها N تعداد شیب‌های محاسبه شده است. حال اگر مقادیر M_1 امین و $M_2 + 1$ امین شیب (Q_2, Q_1) به گونه‌ای باشد که عدد صفر بین آنها قرار گیرد، به عبارت دیگر یکی مثبت و دیگری منفی باشد، فرض صفر پذیرفته شده و سری زمانی هیچ گونه روندی نخواهد داشت در غیر این صورت

جدول ۱- معرفی سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و فرض‌های بکار رفته و کشور و موسسه‌های طراح آن (IPCC, 2001)

سناریو	کشور و موسسه طراح	فرض‌های کلیدی
RCP8.5	تیم مدل‌سازی MESSAGE و موسسه (IIASA) بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی اتریش	بدون اتخاذ هیچ گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر انتشار پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌گردد. در این هنگام غلظت دی-اکسیدکربن به ۱۰۰۰ ppm رسیده و همچنان روند افزایش خواهد داشت.
RCP6	گروه مدل‌سازی AIM در موسسه ملی مطالعات محیطی ژاپن	واداشت تابشی بعد از سال ۲۱۰۰ به دلیل استفاده از فناوری‌های جدید و سیاست‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای ثابت می‌ماند.
RCP4.5	گروه مدل‌سازی MiniCAM و موسسه (JGCRI) در شمال غرب اقیانوس آرام	واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند.
RCP3	تیم مدل‌سازی IMAGE از موسسه ارزیابی‌های محیطی هلند	واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد. برای رسیدن به این سطح واداشت تابشی بایستی گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش یابند.

خشک، تر، بارش روزانه و سری‌های تابش دارای توزیع نیمه‌تجربی می‌باشد. سری‌های فوریه، درجه‌حرارت را تخمین می‌زنند. دمای کمینه و بیشینه به صورت فرآیندهای تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز مورد نظر هستند، مدل‌سازی می‌شوند. سری فوریه مرتبه سوم برای شبیه‌سازی میانگین و انحراف معیار دمای فصلی به کار می‌رود و مقادیر باقیمانده-ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار دیده‌بانی شده بدست می‌آیند، در تحلیل خود همبستگی زمانی داده‌های کمینه و بیشینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. تولید داده توسط مدل در سه مرحله انجام می‌شود که عبارتند از: کالیبره کردن، ارزیابی و ایجاد داده‌های هواشناسی (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹)

مدل پیش‌بینی فنولوژی و عملکرد گندم

داده‌های عملکرد و فنولوژی برای سه سال (۹۳-۹۰) به همراه ۴۰ پارامترهای اقلیمی (جدول ۲) از هفت ایستگاه (زنجان، اراک، سرارود، مراغه، قاملو، اردبیل و ارومیه) که دارای داده‌های عملکرد و فنولوژی بودند تهیه گردید سپس با استفاده از این داده‌ها میزان عملکرد و فنولوژی در دوره پایه و آینده از طریق رگرسیون ساده خطی، رگرسیون چندگانه پیش‌بینی شد (معادله ۱). نتایج حاصل شامل ۲۰

خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی برای بکارگیری در برآورد مدل‌های منطقه‌ای بزرگ مقیاس می‌باشند. دقت مکانی افقی مدل‌ها در سطح خشکی‌های ۱۲۵ تا ۲۵۰ کیلومتر و قدرت تفکیک عمودی آنها برابر ۲۰۰ تا ۴۰۰ می‌باشد (عساکره، ۱۳۸۶) اما در مطالعه منطقه‌ای نیاز به داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر وجود دارد. روش‌های مختلفی برای ایجاد سناریوهای منطقه‌ای ایجاد شده است که به این روش ریزمقیاس‌نمایی گفته می‌شود (Alfsen, et al, 2007). دو روش اصلی به منظور ریز مقیاس نمودن داده‌های مدل‌های گردش عمومی وجود دارد. که عبارتند از: روش آماری و روش دینامیکی. این روش‌ها در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته و توانایی زیاد آنها در ایجاد سناریوهای تغییر اقلیم آینده با قدرت تفکیک بالا اثبات شده است (Giorgi & Mearns, 1999; Wilby, et al, 2004)، در این پژوهش برای ریز مقیاس نمودن مکانی داده‌ها از مدل LARS WG که جز روش‌های آماری می‌باشد استفاده شده است مدل LARS WG یکی از معروف‌ترین مدل‌های داده‌های تصادفی وضع هواست که برای تولید مقادیر بارش، تابش، دمای بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه با اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود. اولین نسخه آن در سال ۱۹۹۰ در بوداست مجارستان به عنوان ابزاری برای ریزمقیاس‌نمایی آماری ابداع بنابراین این مدل برای مدل‌سازی طول دوره‌های

همانطور که ذکر شد برای پیش‌بینی فنولوژی و عملکرد از رگرسیون ساده خطی، رگرسیون چندگانه استفاده شد. و ارزیابی و مقایسه مدل‌ها، بر اساس ضریب تبیین (R^2) با استفاده از جذر مجموع مربعات خطا (RMSE) انجام گرفت.

$$Y = \beta_0 + \beta_{X1}(X_1) + \beta_{X2}(X_2) + \beta_{XN}(X_N) \quad (۱)$$

که در آن Y ، عملکرد، X_1 تا X_N متغیرهای مدل و β_{X1} تا β_{XN} ضرایب رگرسیونی می‌باشند. مدل نهایی پیش‌بینی فنولوژی و عملکرد پس از حذف متغیرها به روش گام به گام انتخاب گردید.

ارزیابی و مقایسه مدل‌ها، بر اساس ضریب تبیین (R^2) با استفاده از جذر مجموع مربعات خطا (RMSE) انجام گرفت. این شاخص را می‌توان از معادله ۲ محاسبه کرد.

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} - \frac{100}{\bar{o}} \quad (۲)$$

در این معادله p_i و o_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده و $\bar{o}$ میانگین مقادیر مشاهده شده می‌باشد. RMSE به صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود و بر اساس تعریف، قدرت پیش‌بینی مدل در صورتی مقدار RMSE کمتر از ۱۰٪ باشد، عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰٪ درصد باشد، خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰٪ درصد باشد، متوسط و اگر بالاتر از ۳۰٪ درصد باشد، ضعیف برآورد می‌شود (ریندی و همکاران، ۲۰۰۳).

مدل رگرسیون بود که از میان این مدل‌ها بهترین مدل انتخاب شد انتخاب مدل براساس شاخص R-squared و تعداد متغیرها بود (معادله ۲) که ضریب تبیین (R-Square) مدل برای پیش‌بینی عملکرد ۸۳٪ بوده که تغییرات متغیر وابسته (عملکرد گندم) توسط متغیرهای مستقل وارد شده در مدل رگرسیونی توضیح داده می‌شوند و ۱۷٪ از تغییرات عملکرد گندم به پارامترهای دیگر وابسته می‌باشد. (مدل ۱) همچنین ضریب تبیین (R-Square) مدل برای پیش‌بینی فنولوژی ۹۴٪ بوده که تغییرات متغیر وابسته (فنولوژی گندم) توسط متغیرهای مستقل وارد شده در مدل رگرسیونی توضیح داده می‌شوند و ۶٪ از تغییرات فنولوژی گندم به پارامترهای دیگر وابسته می‌باشد مدل مذکور برای هر دو پارامتر عملکرد (مدل ۱) و فنولوژی (مدل ۲) جداگانه بصورت زیر می‌باشد:

مدل ۱

$$Y_1 = a + \beta_1 X_{16} - \beta_2 X_{30} - \beta_3 X_{18} + \beta_4 X_{17} - \beta_5 X_{15} + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_{24} + \beta_8 X_{26} + \beta_9 X_8$$

مدل ۲

$$Y_2 = a + \beta_1 X^{13} - \beta_2 X^3 - \beta_3 X^{18} - \beta_4 X^5 - \beta_5 X^{33} + \beta_6 X^{12} - \beta_7 X^{17}$$

y_1 = متغیر وابسته (عملکرد گندم)

y_2 = متغیر وابسته (فنولوژی گندم)

a = عرض از مبدأ

β = پارامترهایی که تغییر متغیر وابسته را به ازای یک واحد تغییر در متغیرهای مستقل نشان می‌دهند (با فرض ثابت بودن سایر متغیرها)

جدول ۲- علائم مربوط به پارامترهای اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش

نام متغیر	علامت متغیر	نام متغیر	علامت متغیر	نام متغیر	علامت متغیر	نام متغیر	علامت متغیر
میانگین بارش اکتبر	X_1	میانگین کمینه دمای اکتبر	X_{11}	میانگین بیشینه دمای اکتبر	X_{31}	میانگین بارش اکتبر	X_{31}
میانگین بارش نوامبر	X_2	میانگین کمینه دمای نوامبر	X_{12}	میانگین بیشینه دمای نوامبر	X_{32}	میانگین بارش نوامبر	X_{32}
میانگین بارش دسامبر	X_3	میانگین کمینه دمای دسامبر	X_{13}	میانگین بیشینه دمای دسامبر	X_{33}	میانگین بارش دسامبر	X_{33}
میانگین بارش ژانویه	X_4	میانگین کمینه دمای ژانویه	X_{14}	میانگین بیشینه دمای ژانویه	X_{34}	میانگین بارش ژانویه	X_{34}
میانگین بارش فوریه	X_5	میانگین کمینه دمای فوریه	X_{15}	میانگین بیشینه دمای فوریه	X_{35}	میانگین بارش فوریه	X_{35}
میانگین بارش مارس	X_6	میانگین کمینه دمای مارس	X_{16}	میانگین بیشینه دمای مارس	X_{36}	میانگین بارش مارس	X_{36}
میانگین بارش آوریل	X_7	میانگین کمینه دمای آوریل	X_{17}	میانگین بیشینه دمای آوریل	X_{37}	میانگین بارش آوریل	X_{37}
میانگین بارش می	X_8	میانگین کمینه دمای می	X_{18}	میانگین بیشینه دمای می	X_{38}	میانگین بارش می	X_{38}
میانگین بارش ژوئن	X_9	میانگین کمینه دمای ژوئن	X_{19}	میانگین بیشینه دمای ژوئن	X_{39}	میانگین بارش ژوئن	X_{39}
میانگین بارش سالانه	X_{10}	میانگین کمینه دمای سالانه	X_{20}	میانگین بیشینه دمای سالانه	X_{40}	میانگین بارش سالانه	X_{40}

نتایج و بحث

نتایج حاصل از دو آزمون‌های ناپارامتری تحلیل روند من-کندال و شیب خط متغیرهای دما، بارش برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ آمده است. میانگین حداکثر دما در ماه‌های فوریه، مارس، ژوئن، جولای، اکتبر و سالانه در سطح اطمینان ۹۹ درصد، در ماه‌های ژانویه، می و سپتامبر در سطح اطمینان ۹۵ درصد روند معنی‌دار و افزایشی دارد. میانگین حداقل دما در ماه ژانویه و سالانه در سطح اطمینان ۹۹ درصد و در ماه‌های مارس، می، جولای و آگوست در

سطح اطمینان ۹۵ درصد روند معنی‌دار و افزایشی دارد. میانگین دما در ماه‌های فوریه، مارس، سپتامبر و سالانه در سطح اطمینان ۹۹ درصد، در ماه‌های ژانویه، ژوئن، جولای و آگوست در سطح اطمینان ۹۵ درصد روند معنی‌دار و افزایشی دارد. و همچنین مجموع بارندگی دارای هر دو روند کاهشی و افزایشی می‌باشد که تنها ماه‌های ژانویه و مارس در سطح اطمینان ۹۵ درصد روند معنی‌دار و کاهشی دارد.

جدول ۳- آماره‌های بدست آمده از آزمون من کندال و $\text{sen's Estimator slop}$ متغیرهای مورد مطالعه در دوره پایه

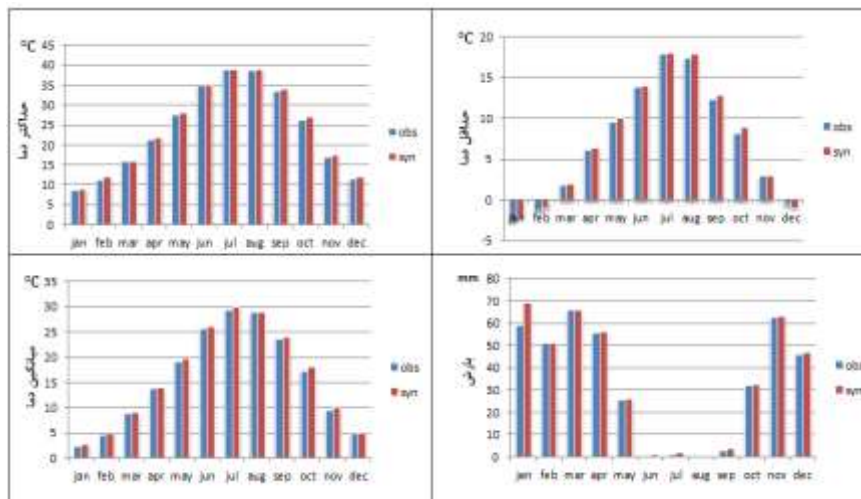
ماه	آزمون	میانگین حداقل دما	میانگین حداکثر دما	میانگین دما	بارندگی
ژانویه	Z	۱/۰۹	*۲/۵۵	*۲/۱۱	*-۲/۰۱
	Qmed	۰/۱۰۲	۰/۱۵۷	۰/۱۲	-۰/۳۹۲
فوریه	Z	۱/۹۲	**۳/۵۷	**۲/۸۹	-۱/۰۲
	Qmed	۰/۱۵۴	۰/۱۹۸	۰/۴۸	-۰/۲۸۸
مارس	Z	۲/۵۰*	**۳/۰۴	**۲/۵۸	*-۲/۲۸
	Qmed	۰/۱۱۸	۰/۱۰۳	۰/۱۱۶	-۰/۷۱۴
آوریل	Z	-۰/۱۰	۱/۱۹	۰/۵۱	۰/۰۰
	Qmed	-۰/۰۰۳	۰/۰۴۵	۰/۰۲۰	-۰/۰۰۲
می	Z	۴۰/۸*	*۲/۱۲	۱/۳۳	۰/۶۵
	Qmed	۰/۱۰۹	۰/۰۶۷	۰/۰۳۱	۰/۲۱۰
ژوئن	Z	۲/۸۹**	**۳/۴	*۲/۰۷	-۰/۱۰
	Qmed	۰/۰۵۹	۰/۰۸	۰/۰۵۷	۰-/۱۴
جولای	Z	۳/۲۶*	**۲/۸۲	*۲/۳۱	-۰/۲۴
	Qmed	۰/۰۶۵	۰/۰۸۸	۰/۰۵۴	-۰/۰۳۵
آگوست	Z	۲/۷۹*	**۲/۷۵	*۲/۲۴	۰/۳۵
	Qmed	۰/۰۶۷	۰/۰۷۵	۰/۰۵۳	۰/۰۴۳
سپتامبر	Z	۱/۷۵	*۱/۹۷	**۲/۷۰	۰/۵۴
	Qmed	۰/۰۵۵	۰/۰۵۶	۰/۰۴۴	۰/۰۳۶
اکتبر	Z	۰/۴۸	**۲/۷۹	۰/۲۴	۰/۶۱
	Qmed	۰/۰۱۹	۰/۰۸۲	۰/۰۰۳	۰/۱۹
نوامبر	Z	۱/۱۶	-۰/۳۷	-۰/۵۴	۱/۳۹
	Qmed	۰/۰۶۵	۰/۰۲۰	-۰/۰۱۲	۰/۶۰
دسامبر	Z	۱/۲۹	۰/۶۵	۰/۱۰۷	-۰/۳۴
	Qmed	۰/۰۹۶	۰/۰۴۶	۰/۰۰۳	-۰/۱۷
سالانه	Z	۳/۰۳**	**۴/۸۳	**۳/۵۷	-۰/۵۱
	Qmed	۰/۰۶۳	۰/۰۷۷	۰/۰۴۲	-۰/۰۳۷

* در سطح ۵ درصد ** در سطح ۱ درصد

تغییرات دما و بارندگی در دوره آبی

درجه حرارت و بارش شبیه سازی شده در دوره آینده با استفاده از کوچک مقیاس سازی اطلاعات مدل CCSM4 با مقادیر مشاهداتی ایستگاههای مورد مطالعه با یکدیگر مقایسه گردیدند. که در اینجا با تحلیل آماری نتایج مدل

سازی یکی از ایستگاهها (ایستگاه سرارود) بعنوان نمونه ملاحظه گردید که بین دمای بیشینه و کمینه و همچنین بارندگی تطابق بسیار خوبی وجود دارد در شکل ۲ مقادیر دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش حاصل از مدل LARS با WG مقادیر دیده بانی آورده شده است.

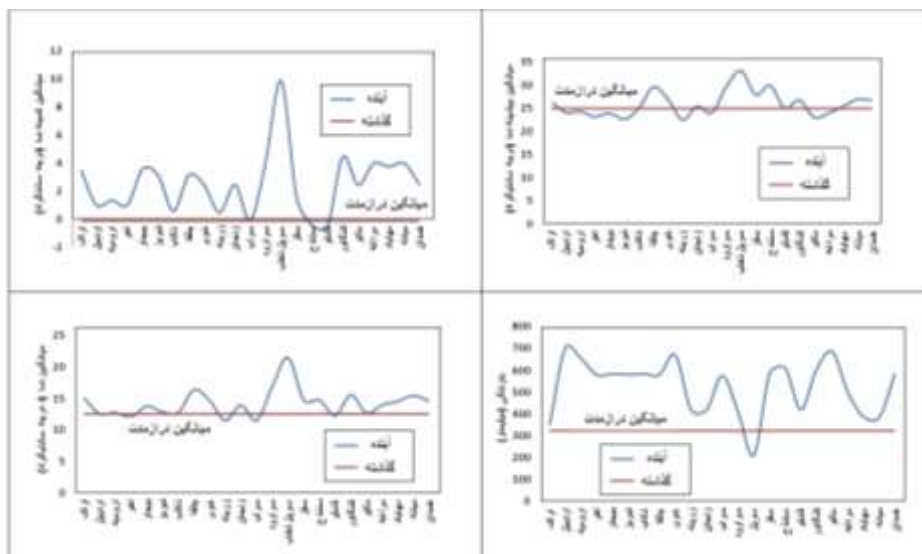


شکل ۲- مقایسه دمای کمینه، بیشینه میانگین دیدبانی شده و تولید شده توسط مدل در دوره آماری ایستگاه سرارود (۱۹۸۸-۲۰۱۸)

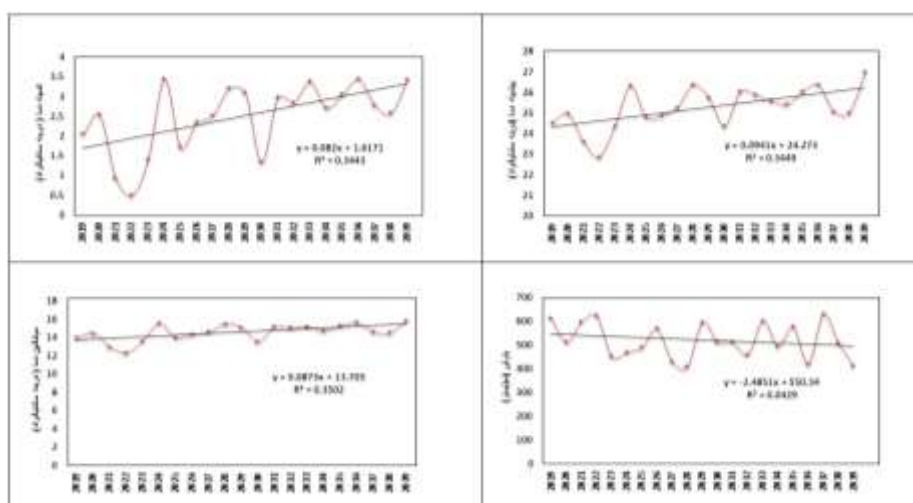
تأثیر تغییر اقلیم بر فنولوژی

شکل ۵ طول دوره گل دهی براساس مدل رگرسیون در طی سالهای آینده (۲۰۱۸-۲۰۳۹) در ایستگاههای مورد مطالعه را نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود مرحله گلدهی از ۱۴۰ روز در ایستگاه زرینه تا ۹۵ روز در ایستگاه سرپل ذهاب در منطقه مورد مطالعه طول می کشد. برای بررسی تغییرات طول مرحله گل دهی در دوره های آینده به مقایسه میانگین بلنمدت طول مرحله گل دهی گندم در اقلیم پایه با طول مرحله گل دهی در هر یک از ایستگاههای مورد مطالعه در دوره آینده پرداخته شده است (شکل ۵). نتایج نشان داد که طول مرحله گل دهی گندم در اقلیم آینده نسبت به اقلیم گذشته کوتاه تر می شود به طوری که طول مرحله گل دهی در همه ایستگاههای مورد بررسی به استثنای ایستگاه زرینه در دوره آینده (۲۰۱۸-۲۰۳۹) از میانگین بلنمدت طول مرحله گل دهی گندم کوتاه تر است.

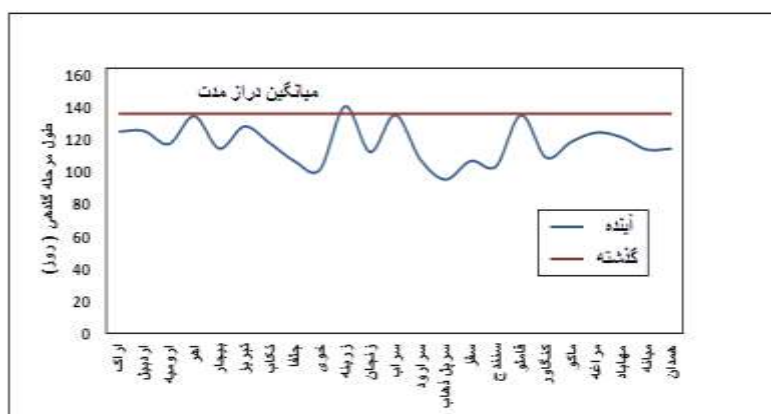
شکل ۳ نتایج ارزیابی تغییر اقلیم در هریک از ایستگاههای مورد بررسی در اقلیم آینده نمایش می دهد که در آن رفتار اقلیم دوره پایه با دوره آینده مقایسه شده است همانطورکه مشاهده می شود میانگین بیشینه دما در اقلیم آینده در ۱۴ ایستگاه نسبت به اقلیم گذشته افزایش یافته است و در بقیه ایستگاهها کاهش یافته است میانگین کمینه دما در اقلیم آینده در همه ایستگاهها به استثنای ایستگاه قاملو و سنندج در نسبت به اقلیم گذشته افزایش یافته است. میانگین دما هم در همه ایستگاهها به استثنای ایستگاههای اهر، زرینه، سراب و قاملو در همه ایستگاهها نسبت به اقلیم گذشته افزایش یافته است میانگین مجموع بارش در همه ایستگاهها به استثنای ایستگاه سرپل ذهاب در اقلیم آینده نسبت به اقلیم گذشته افزایش می یابد همچنین شکل ۴ نتایج روند هریک از این پارامترها را در کل ایستگاههای مورد مطالعه را در افق سالهای ۲۰۱۹ تا ۲۰۳۹ را نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود متغیرهای دمایی دارای روند افزایشی هستند و بارندگی دارای روند کاهشی می باشد.



شکل ۳- مقایسه میانگین بلندمدت حداقل دما، حداکثر دما، میانگین دما، مجموع بارندگی، دوره گذشته (۱۳۹۰-۱۳۵۰) با دوره آتی (۲۰۳۹-۲۰۱۰) در ایستگاه‌های مورد مطالعه



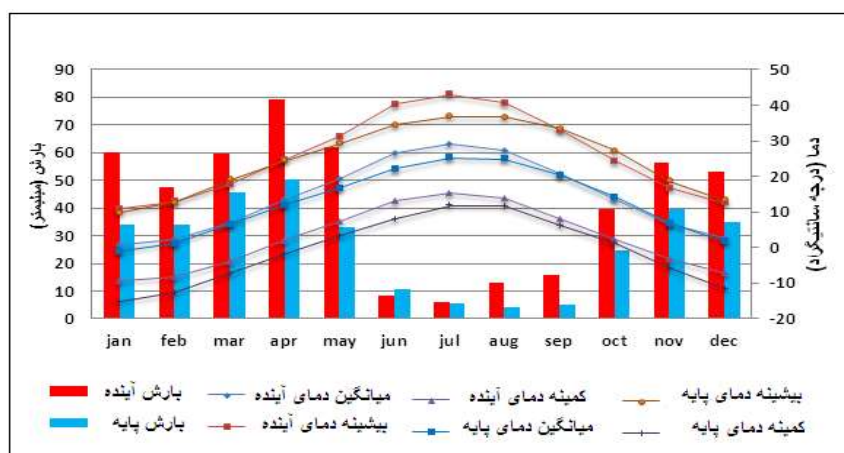
شکل ۴- روند حداقل دما، حداکثر دما، میانگین دما و بارندگی در دوره آتی (۲۰۳۹-۲۰۱۹)



شکل ۵- مقایسه بلندمدت طول مرحله گل‌دهی در دوره پایه (۲۰۱۸-۱۹۸۸) با طول مرحله گل‌دهی در سال‌های آینده (۲۰۳۹-۲۰۱۹) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

کاهش طول مرحله گل‌دهی گندم در اقلیم آتی در منطقه مورد مطالعه افزایش میانگین بارش در ماه‌های دسامبر و فوریه می‌باشد بطوری که میانگین بارش در ماه دسامبر اقلیم پایه ۳۴/۷ میلی‌متر می‌باشد اما در اقلیم آتی ۵۳/۲ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۶). نتایج حاصل از اجرای این مطالعه در خصوص پیش‌بینی مرحله فنولوژی در اثر تغییر اقلیم با سایر مطالعات انجام شده در سایر نقاط دنیا هم‌خوانی دارد. مثلاً، افزایش ۱/۷ درجه سانتی‌گراد دما کاهش ۱۱ روز گل‌دهی گندم را در پی داشته است (Asseng, et al, 2004).

میانگین طول مرحله گل‌دهی در اقلیم پایه ۱۳۶ روز است؛ در حالی که طول مرحله گل‌دهی گندم در اقلیم آتی ۱۱۸ روز می‌باشد یعنی به‌طور میانگین طول مرحله گل‌دهی در اقلیم آتی در منطقه مورد مطالعه ۱۸ روز کوتاه‌تر می‌شود علت کوتاه شدن طول مرحله گل‌دهی در اقلیم آینده افزایش میانگین دما در ماه‌های می و آوریل و میانگین حداکثر دما در ماه دسامبر می‌باشد. به‌طوری که میانگین دما در ماه می در اقلیم آینده ۱۹/۲ درجه سانتی‌گراد و در اقلیم آتی ۱۶/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین یکی دیگر از دلایل



شکل (۶) مقایسه حداقل دما، حداکثر دما، میانگین دما و بارندگی به تفکیک ماه در سال‌های پایه (۱۹۸۸-۲۰۱۸) با سال‌های آینده (۲۰۱۹-۲۰۳۹) در کل ایستگاه‌های مورد مطالعه

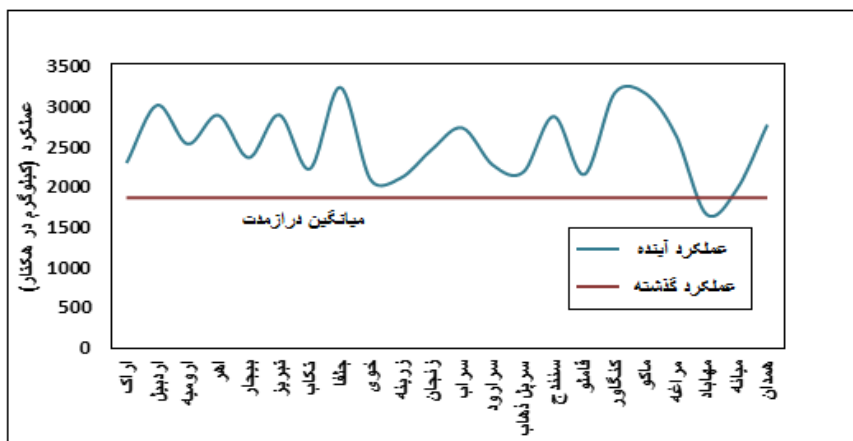
۶۶۶/۶ کیلوگرم در هکتار در آینده افزایش می‌یابد یعنی عملکرد گندم ۳۵ درصد افزایش می‌یابد که دلیل این امر وضعیت مناسب اقلیمی آینده در منطقه می‌باشد. براساس مدل رگرسیون مورد استفاده پارامترهای اقلیمی میانگین دمای ماه‌های مارس، آوریل و میانگین حداقل دمای ماه‌های ژانویه و مارس و همچنین میانگین بارش ماه‌های مارس و می که اثر مثبت بر میزان عملکرد داشتند در دوره گذشته با دوره آینده مقایسه شد (شکل ۶). نتایج نشان داد که میانگین دمای ماه‌های مارس و آوریل به ترتیب ۱/۳ و ۰/۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین حداقل دمای ژانویه و مارس به ترتیب ۷/۷ و ۵/۲ سانتی‌گراد و همچنین میانگین بارش فوریه و مارس به ترتیب ۱۳ و ۱۴ میلی‌متر افزایش یافتند. هر دو متغیر دما و بارندگی از عوامل کلیدی موثر بر رشد و نمو گیاهان هستند. دمای بالا به تنهایی و یا همراه با افزایش دی-

تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد

برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم ابتدا میزان عملکرد برای دوره‌های گذشته و آینده برای مناطق مختلف غرب و شمال‌غرب بر اساس مدل رگرسیون تعیین شد برای بررسی میزان تغییر عملکرد دانه گندم در دوره آینده به مقایسه میانگین بلندمدت میزان عملکرد در اقلیم پایه با عملکرد گندم در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده پرداختیم (شکل ۷). نتایج نشان داد که عملکرد دانه گندم در اقلیم آینده نسبت به گذشته افزایش می‌یابد به‌طوری که در همه ایستگاه‌ها به استثنای ایستگاه مهاباد عملکرد دانه گندم از میانگین بلندمدت در گذشته بیشتر است. میانگین عملکرد گندم در اقلیم گذشته ۱۸۶۳/۳ کیلوگرم در هکتار بوده است اما در اقلیم آینده ۲۵۲۹/۹ کیلوگرم در هکتار خواهد بود بنابراین به‌طور میانگین عملکرد دانه گندم در اقلیم آینده

تحقیق خود در شمال‌شرق ایران نشان دادند که تحت شرایط تغییر اقلیم بین عملکرد دانه گندم دیم و بارندگی ارتباط مثبت و با افزایش بارندگی عملکرد دانه گندم افزایش می‌یابد. در این مطالعه هم افزایش دما و بویژه افزایش بارش باعث افزایش ۳۵ درصدی عملکرد دانه گندم در افق سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۳۹ در مناطق مختلف غرب و شمال-غرب کشور شده است.

اکسیدکربن 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. کوچکی و نصیری (۱۳۸۷) در یک بررسی نشان دادند که افزایش دما و غلظت‌های مختلف دی‌اکسیدکربن به تنهایی عملکرد گندم در شرایط پتانسیل (بدون محدودیت آب و عناصر غذایی) را افزایش می‌دهد همچنین عیشی رضایی و بنایان (۲۰۱۲) در



شکل ۷- مقایسه بلندمدت عملکرد گندم (کیلوگرم در هکتار) در دوره پایه (۱۹۸۸-۲۰۱۸) با عملکرد گندم (کیلوگرم در هکتار) در سال‌های آینده (۲۰۱۹-۲۰۳۹) در ایستگاه‌های مورد مطالعه

عملکرد دانه گندم در آینده ۳۵ درصد افزایش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان افزایش میانگین دمای ماه‌های مارس و آوریل و میانگین حداقل دمای ماه‌های ژانویه و مارس و همچنین افزایش میانگین بارش ماه‌های فوریه و مارس میلیمتر در دوره آتی نسبت به دوره گذشته دانست. بنابراین پیش‌بینی افزایش عملکرد در غرب و شمال‌غرب کشور بیانگر آن است که این منطقه تا افق ۲۰۳۹ از پتانسیل مطلوبی در کشت و توسعه این محصول برخوردار خواهد بود که البته علاوه بر مساعد بودن شرایط اقلیمی، بهبود مدیریت و نهاده‌های کشاورزی نیز می‌تواند باعث افزایش بیشتر عملکرد محصول استراتژیک گندم در طی سال‌های آتی گردد.

منابع

۱. برزگر، امیربهزاد، سلطانی، افشین (۱۳۸۶) اثر تغییر اقلیم آینده بر عملکرد نخود در شرایط دیم شمال‌غرب ایران، دومین همایش ملی کشاورزی بوم‌شناختی ایران، گرگان.

نتیجه‌گیری

مطالعه انجام شده نشان می‌دهد که در منطقه غرب و شمال غرب کشور بارندگی در دوره‌های گذشته دارای روند کاهشی است و دما هم در اکثر ماه‌های سال روند افزایشی دارد. همچنین در دوره آتی دما در همه ماه‌های سال تا پایان ۲۰۳۹، افزایشی بین ۲/۵ تا ۳/۵ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد همچنین طول دوره گل‌دهی برای دوره گذشته ۱۳۶ روز می‌باشد اما برای دوره آینده ۱۱۸ روز می‌باشد علت کوتاه شدن طول مرحله گل‌دهی گیاه گندم افزایش میانگین دما در ماه‌های می و آوریل و میانگین حداکثر دمای دسامبر و همچنین افزایش بارش در ماه‌های دسامبر و فوریه می‌باشد همچنین اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی در مناطق سرد کشور قرار دارند و چون گل‌دهی گندم که از مراحل حساس فنولوژی گندم می‌باشد در دوره آینده زودتر صورت می‌گیرد می‌تواند از خطر سرمازدگی در امان بماند و این امر هم می‌تواند باعث افزایش عملکرد دانه گندم می‌شود. نتایج مقایسه عملکرد دانه گندم دوره آتی و گذشته نشان داد که

- impact and adaptation assessment. Version. 2. PP.66. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment. IPCCTGICIA
11. Benlloch-Gonzalez. M. Bochicchio. R. Berger. J. 2014. High temperature reduces the positive effect of elevated CO₂ on wheat root system growth. *Field Crops Research*. No: 165. pp. 71-79.
 12. Chiotti. Q. p. Johnston. T. 1995. Extending the boundaries of climate change research: A discussion on agriculture. *Journal of Rural studies* No. 11. pp. 335-350.
 13. Eyshi Rezaei. E. Bannayan Aval. M. 2012. Rainfed wheat yields under climate change in northeastern Iran. *Meteorological Applications*. Volume. 19. No. 3. pp. 346-354.
 14. Giorgi. F. and L. O. Mearns. 1999. Introduction to special section. Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research*. No. 104. Pp. 6335-6352.
 15. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Summary for Policymakers, Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC working Group 3, ISBN. 92-9169-113-5.
 16. Janjua. P.Z. Samad. G. Khan. N. 2014. Climate Change and Wheat Production in Pakistan. Autoregressive distributed lag approach, *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*. No. 68. pp. 13-19.
 17. Motha. R. Baier. W. 2005. Impact of Present and Future Climate Change and Climate Variability on Agriculture in the Temperate Regions: North America. *Climate Change*. No. 70. pp. 137-164.
 18. Nicholls. N. 1997. Increased Australian wheat yield due to recent climate trend. *Journal of Nature*. No: 387. pp. 484-485.
 19. Rawlins. S.L. 1991. Global environmental change and agriculture. *Journal of Production Agriculture*. No. 4. pp. 291-239.
 20. Rinaldy. M. N. Losavio. Z. Flagella. 2003. Evaluation of OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. *Agricultural systems*. No. 78. pp. 17-30.
 21. Wilby. R. L. Charles. S. P. Zorita. E. Timbal. B. Whetton. P. Mearns. L.O. 2004. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, available from the DDC of IPCC TGICIA. 27 pp.
 ۲. تاتاری، مریم کوچکی، علیرضا، نصیری محلاتی، مهدی (۱۳۸۸) پیش‌بینی عملکرد گندم در استان خراسان با استفاده از داده‌های بارندگی و خاک با به کارگیری انواع مدل‌های رگرسیونی، *مجله پژوهش‌های زراعی ایران*، جلد ۷، شماره ۲، ص ۳۶۵-۳۵۷.
 ۳. حیدری‌بنی، مهران، یزدان‌پناه، حجت‌الله، محنت‌کش، عبدالمحمد، (۱۳۹۷) بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژیکی کلزا (مطالعه موردی: استان چهارمحال بختیاری)، *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، دوره ۵۰، شماره ۲، ص ۳۸۹-۳۷۳.
 ۴. زرعیانی، فاطمه، کمالی، غلام‌علی، چیدری (۱۳۹۳) اثر تغییر اقلیم بر اقتصاد گندم (مطالعه موردی خراسان شمالی)، *نشریه بوم‌شناسی کشاورزی*، جلد ۶، شماره ۲، ص ۳۱۰-۳۰۱.
 ۵. عباسی، فاطمه، ملبوسی، شراره، باباییان، ایمان، اثمیری، مرتضی، برهانی، رضا. (۱۳۸۹) پیش‌بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری خروجی مدل G-ECHO، *مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، دوره ۲۴، شماره ۲، ص ۲۳۳-۲۱۸.
 ۶. عساکره، حسین. (۱۳۸۶). تغییر اقلیم، زنجان: انتشارات دانشگاه زنجان.
 ۷. قلی‌پور، منوچهر، سلطانی، افشین (۱۳۸۴) بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات رشدی و عملکرد دانه گندم زمستانی در شرایط دیم و فاریاب تبریز با استفاده از شبیه‌سازی، *مجله دانش کشاورزی* جلد ۱۵، شماره ۲، ص ۱۷۶-۱۶۳.
 ۸. کوچکی، علیرضا، نصیری، مهدی (۱۳۸۷) تأثیر تغییر اقلیم همراه با افزایش غلظت CO₂ بر عملکرد گندم در ایران و ارزیابی راهکارهای سازگاری، *مجله پژوهش‌های زراعی ایران*، جلد ۶، شماره ۱، ص ۱۵۳-۱۳۹.
 9. Asseng, S. Jamieson P.D. Kimball. B. Pinter. P. Sayre, K. Bowden. J.W. and Howden S.M. 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Res.* No. 85. pp. 85-102.
 10. Alfsen. K. et al. 2007. General guidelines on the use of scenario data for climate