

تأثیر شرایط تغییر آب و هوا بر شاخص‌های اقلیمی - زراعی رشد گندم در یک منطقه خشک، مطالعه موردی استان اصفهان، ایران

مرضیه معتمدی^۱، حمیدرضا عشقی‌زاده^۱، افسانه نعمت‌پور^۱، سید علیرضا گوهری^۲ و بابک صفا^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۵)

چکیده

در سطح جهانی تغییرات آب و هوایی، موضوع پذیرفته شده بسیار مهمی است ولی تأثیرات منفی آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک مثل ایران بسیار شدید خواهد بود. لذا در این مطالعه، به بررسی دو سناریوی اقلیمی شامل RCP-۸/۵ (سناریوی بحرانی) و RCP-۴/۵ (سناریوی متوسط) در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ و تأثیر آن بر تغییرات دما در دوره رشد گندم در ۵ شهرستان استان اصفهان شامل: اصفهان، نجف‌آباد، چادگان، برخوار و میمه پرداخته شد. بررسی تغییرات دما در طول دوره رشد گندم طی دهه‌های آتی نشان داد که شهرستان‌های برخوار، اصفهان، نجف‌آباد، چادگان و میمه به ترتیب تعداد روز بیشتری با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس را در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ نسبت به میانگین دو سال اخیر (۱۸-۲۰۱۷) تجربه خواهند کرد. همچنین در مقایسه با شرایط کنونی بیشترین درصد تغییرات از نظر تعداد روزهای با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در شرایط اقلیمی آینده (۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰)، به ترتیب در شهرهای برخوار، میمه، چادگان، نجف‌آباد و اصفهان مشاهده شد. دامنه درصد تغییرات تعداد روزهای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در شرایط اقلیمی آینده نسبت به شرایط کنونی، بین ۵ درصد (اصفهان) تا ۹۷ درصد (برخوار) متغیر بود. درصد تغییرات در تمام شهرهای مطالعه شده در RCP-۸/۵ بیشتر از RCP-۴/۵ بود. در طول دوره رشد گندم، تعداد روزهای با دماهای کمتر از صفر درجه سلسیوس در شهرستان‌های اصفهان، برخوار و میمه کمتر و در شهرستان‌های نجف‌آباد و چادگان بیشتر خواهد بود. مقدار تبخیر - تعرق در طول دوره رشد گندم نیز در دهه‌های آتی افزایش خواهد یافت. بنابراین تدوین و کاربرد استراتژی‌های سازگاری برای هر شهرستان به‌منظور تضمین تولید گندم در منطقه حائز اهمیت است.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، تغییر اقلیم، گرمایش جهانی، گندم.

- ۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
 - ۲- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
 - ۳- مؤسسه آب برای تأمین غذای جهان، دانشگاه نبراسکا لینکلن
- *: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hr.eshghizadeh@iut.ac.ir

مقدمه

تغییر اقلیم در سطح جهانی، موضوع پذیرفته شده بسیار مهمی است که غلظت گازهای گلخانه‌ای به شدت روی این تغییر، تأثیرگذار خواهد بود. بر اساس گزارش‌های جهانی، غلظت گازهای گلخانه‌ای شامل دی‌اکسیدکربن (CO_2) متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O)، در طی ۸۰۰۰۰۰ سال گذشته، افزایش یافته است (۱۵) که این افزایش سطح گازهای گلخانه‌ای می‌تواند منجر به گرم شدن بیشتر زمین شود (۳۱). علت این تغییرات آب و هوایی، به شدت با عوامل طبیعی و انسانی مرتبط است (۱۶)، شواهد نشان می‌دهد که در هر دهه، دمای هوا ۰/۱ درجه سلسیوس گرم‌تر خواهد شد که در ۵۰ سال گذشته می‌توان این امر را به فعالیت‌های انسانی (۲۹) از قبیل سوزاندن سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی و... ارتباط داد (۱۵) و (۲۳). در صورتی که راهکارهایی به منظور کنترل میزان گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر به کار گرفته نشود، میانگین دمای جهان به احتمال زیاد از ۳/۷ در شرایط فعلی به ۸/۴ درجه سلسیوس تا سال ۲۱۰۰ افزایش خواهد یافت (۱۷). از سویی دیگر پیش بینی شده است که دمای کره زمین در بازه زمانی ۲۱۰۰-۱۹۹۰ در کمترین غلظت گازهای گلخانه‌ای به میزان ۳-۱/۴ درجه سلسیوس و در بالاترین غلظت گازهای گلخانه‌ای حدود ۵/۸-۲/۵ درجه سلسیوس افزایش یابد. اگر چه این احتمال وجود دارد که در بعضی از مناطق مانند شمال اروپا، تا حدودی این تغییرات آب و هوایی در کوتاه‌مدت و به‌طور متوسط به روش‌های مختلف از جمله افزایش رشد جنگل‌ها و... سودمند باشد (۱۷)، اما تأثیرات منفی تغییرات آب و هوایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مثل ایران بسیار شدید خواهد بود (۲۸).

ایران در عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی واقع شده (۱) و از اقلیم ناهمگن برخوردار است به‌گونه‌ای که ۳۵/۵ درصد آن بسیار خشک، ۲۹/۳ درصد آن خشک، ۲۰/۲ درصد نیمه‌خشک، ۵ درصد مدیترانه‌ای و ۱۰ درصد آن مرطوب است (۴). بنابراین حدود ۸۵ درصد از قلمرو ایران خشک و نیمه‌خشک بوده و با کمبود شدید آب مواجه

است. این درحالی است که کشور ایران وابستگی شدیدی به بخش کشاورزی دارد و با توجه به حساسیت کشاورزی به اقلیم‌های خشک و کم آب، ایران کشوری بسیار آسیب‌پذیر نسبت به تغییرات اقلیمی شناخته شده است (۱، ۴ و ۱۰). انتظار می‌رود تغییرات آب و هوایی بر الگوهای بارندگی و دما در مناطق مختلف و به تبع آن بر توزیع فضایی و زمانی مؤلفه‌های مختلف منابع آب، اثر متفاوتی داشته باشد (۲۲ و ۲۷). با این حال تخمین زده می‌شود که اگر مقدار CO_2 در سال ۲۱۰۰ دو برابر شود، دمای متوسط در ایران به میزان ۴/۵-۱/۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. این مسئله تغییرات قابل توجهی در منابع آب، کشاورزی، تولید مواد غذایی و بخش‌های جنگلی ایجاد کرده و چالش‌های زیست‌محیطی را تشدید می‌کند (۴). انتظار می‌رود که تغییرات آب و هوایی از طریق تغییرات دما، بارندگی، میزان دی‌اکسیدکربن و رواناب سطحی، به شدت بر شیوه‌های کشاورزی تأثیرگذار باشد. برای دستیابی و اطمینان از پایداری کشاورزی، مطالعه تغییرات آب و هوایی، بسیار مفید خواهد بود (۶، ۲۰ و ۲۵).

گندم یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی در دنیا است که نزدیک به یک چهارم عملکرد گیاهان دانه‌ای جهان را به‌خود اختصاص می‌دهد. این مسئله نشان‌دهنده جایگاه ویژه گندم در تأمین امنیت غذایی مردم جهان است (۷ و ۲۴). از سویی دیگر نتایج نشان داده است که گندم قوت غالب مردم ایران بوده و بخش عمده‌ای از امنیت غذایی مردم در ایران، توسط این گیاه زراعی تأمین می‌شود. آمار به‌دست آمده از میزان مصرف گندم در کشور ایران نشان می‌دهد که به‌طور روزانه، حدود ۴۷ درصد از کالری مصرف سرانه کشور را گندم تشکیل می‌دهد (۱۳). از طرف دیگر نتایج آماری موجود، این حقیقت را متذکر می‌شود که تا سال ۱۴۰۰، میزان نیاز مردم ایران به گندم، از مرز ۲۰ میلیون تن هم عبور خواهد کرد (۳۴). تغییر اقلیم در چند دهه گذشته، به شدت تولید گندم را تحت تأثیر قرار داده است (۴). مدل‌هایی که عملکرد گندم را نسبت به شرایط آب و هوایی بررسی می‌کنند نشان داده‌اند که عملکرد این گیاه از سال

حداکثر عملکرد کمی و کیفی، مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

معرفی مناطق مورد مطالعه

استان اصفهان به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین استان‌های تولید کننده گندم در ایران شناخته شده است که بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، میانگین تولید گندم آبی در این استان در سال ۲۰۱۷-۲۰۱۶ معادل ۴۱۶۶ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است. در این میان، سهم عمده تولید به شهرستان‌های اصفهان (عرض جغرافیایی ۳۲/۶۵ و طول جغرافیایی ۵۱/۶۶)، نجف‌آباد (عرض جغرافیایی ۳۲/۶۳ و طول جغرافیایی ۵۱/۳۶)، چادگان (عرض جغرافیایی ۳۲/۷۶ و طول جغرافیایی ۵۰/۶۲)، برخوار (عرض جغرافیایی ۳۲/۸۱ و طول جغرافیایی ۵۱/۷۳) و میمه (عرض جغرافیایی ۳۳/۴۴ و طول جغرافیایی ۵۱/۱۷) تعلق دارد. جدول ۱ سطح زیر کشت، تولید و عملکرد گندم آبی را در هر کدام از این مناطق در سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۱ نشان می‌دهد. اصفهان با اقلیم نیمه‌خشک، بادی و گرم، نجف‌آباد، برخوار و میمه با اقلیم نیمه‌خشک و سرد و چادگان به‌عنوان منطقه‌ای با اقلیم نیمه‌مرطوب و سرد شناخته شده‌اند (شکل ۱ و ۲).

استخراج سناریوهای تغییر اقلیم

با هدف بررسی تأثیر گازهای گلخانه‌ای بر تغییر دمای شهرستان‌های اصفهان، نجف‌آباد، برخوار، میمه و چادگان در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ و در نتیجه تأثیر تغییر دما بر شرایط کشت گندم در این مناطق، داده‌های مربوط به پیش‌بینی روند تغییرات دما از سایت مارکسیم برای بازه زمانی مذکور، بر اساس میانگینی از ۱۷ مدل گردش عمومی جو شامل BCC-CSM1-1-M، BCC-CSM1-1-R، CSIRO-Mk3-6-0، GFDL-ESM2M، GFDL-ESM2G، GFDL-CM3، FIO-ESM، IPSL-CM5A-LR، HadGEM2-ES، GISS-E2-R، GISS-E2-H

۲۰۰۸-۱۹۸۰ تقریباً ۵/۵ درصد کاهش یافته است (۱۹). آسن و همکاران (۵) تخمین زده‌اند که به‌ازای هر درجه سلسیوس افزایش دما در دوره رشد گندم، عملکرد این گیاه به میزان ۶ درصد دچار افت خواهد شد. همچنین نتایج به‌دست آمده توسط گروهی دیگر از پژوهشگران حاکی از آن است که افزایش دما به میزان یک درجه سلسیوس در دوره رشد گندم می‌تواند تولید را در حدود ۱۰-۳ درصد کاهش دهد (۳۷). افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر، یکی از اصلی‌ترین دلایل افزایش دما تا پایان قرن ۲۱ است که نه تنها تأثیرات زیست محیطی خطرناکی داشته بلکه تولید گندم را بسیار تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳۰). افزایش میزان دی‌اکسیدکربن جو و به‌دنبال آن افزایش دما، دو عامل کلیدی بر رشد، نمو و عملکرد گیاهان زراعی از جمله گندم هستند (۷). اگر چه بالا رفتن غلظت این گاز گلخانه‌ای به‌عنوان ماده اصلی فتوسنتز، باعث افزایش عملکرد در گیاهان سه کربنه خواهد شد اما باید به این نکته نیز توجه داشت که هر چه میزان دی‌اکسیدکربن محیط بیشتر شود، دما نسبت به قبل گرم‌تر شده و بنابراین تأثیر این گاز بر عملکرد گندم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان سه کربنه، متناسب با نوع اقلیم متفاوت خواهد بود (۱۱). محمدی و همکاران (۲۴) دریافته‌اند که افزایش دما در سطوح ۰، ۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کود نیتروژن در کیلوگرم خاک به‌ترتیب وزن خشک اندام هوایی هر بوته را به مقدار ۱/۱۶ گرم یا ۵۰ درصد، ۰/۴۷ گرم یا ۲۱ درصد، ۰/۴۵ یا ۱۶ درصد و ۰/۸۱ یا ۲۶ درصد کاهش داد (۲۴). با توجه به مطالب بیان شده و از آنجایی که گندم سهم زیادی در اقتصاد کشور ایران دارد، بررسی‌های اقلیمی به‌منظور تطابق کشت گندم با شرایط آب و هوایی موجود با هدف کسب بیشترین و بهترین عملکرد، یک امر ضروری است. بنابراین پروژه حاضر با هدف بررسی روند تغییرات دمایی در طول دوره کشت گندم در ۵ شهرستان از استان اصفهان شامل اصفهان، نجف‌آباد، برخوار، میمه و چادگان صورت گرفته است. امید است که نتایج حاصل بتواند در راستای بهترین تطابق بین کشت گندم و شرایط اقلیمی با هدف کسب

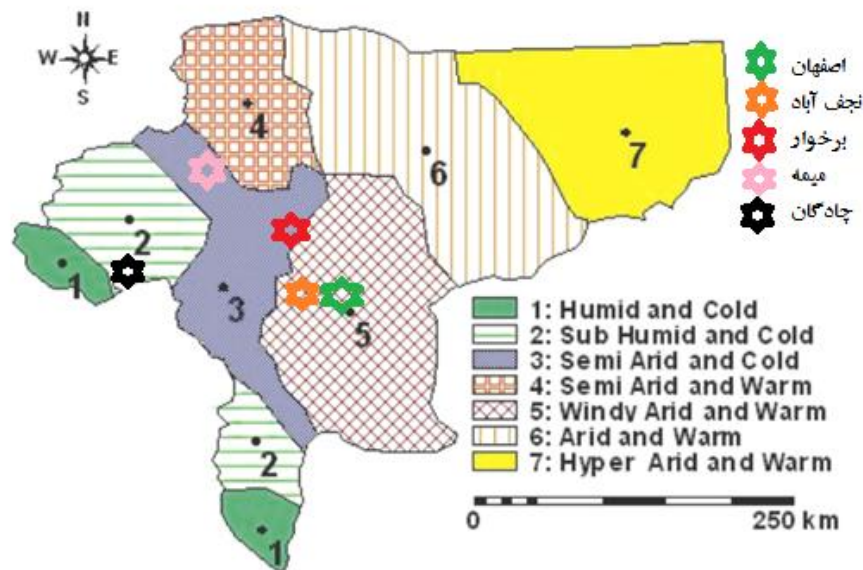
جدول ۱. میزان سطح زیر کشت، عملکرد در واحد سطح و میزان تولید گندم در شهرستان‌های اصفهان، نجف‌آباد، برخوار، میمه و چادگان در دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۷

سال	متغیر	شهرستان					جمع کل
		اصفهان	نجف‌آباد	برخوار	میمه	چادگان	
۲۰۱۱-۱۲	سطح زیر کشت (ha)	۲۸۰۰۰	۸۰۰	۵۰۰۰	۵۲۳۰	۲۸۰۰	۴۱۸۳۰
	عملکرد (kg ha ⁻¹)	۴۶۰۰	۴۰۰۰	۴۴۰۰	۴۴۰۰	۴۲۰۰	-
	مقدار تولید (ton)	۱۲۸۸۰۰	۳۲۰۰	۲۲۰۰	۲۳۰۱۲	۱۱۷۶۰	۱۶۸۹۷۲
۲۰۱۲-۱۳	سطح زیر کشت (ha)	۱۰۰۰۰	۶۸۰	۴۳۵۰	۴۵۵۰	۳۰۰۰	۲۲۵۸۰
	عملکرد (kg ha ⁻¹)	۵۵۵۵	۴۲۰۰۰	۴۶۸۹	۴۵۰۰	۴۲۴۳	-
	مقدار تولید (ton)	۵۵۵۵۰	۲۸۵۶۰	۲۰۴۰۰	۲۰۴۷۵	۱۲۷۳۰	۱۳۷۷۱۵
۲۰۱۳-۱۴	سطح زیر کشت (ha)	۱۰۰۰۰	۴۵۰	۳۷۵۰	۳۵۷۵	۲۸۰۰	۲۰۵۷۵
	عملکرد (kg ha ⁻¹)	۵۰۰۰	۴۲۰۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰	-
	مقدار تولید (ton)	۵۰۰۰۰	۱۸۹۰	۱۵۰۰۰	۱۴۳۰۰	۱۱۲۰۰	۹۲۳۹۰
۲۰۱۴-۱۵	سطح زیر کشت (ha)	۲۴۰۰۰	۵۵۰	۲۱۷۰	۳۰۵۰	۲۵۰۰	۳۲۲۷۰
	عملکرد (kg ha ⁻¹)	۵۰۰۰	۴۰۰۰	۵۸۴۳	۴۰۰۰	۲۵۰۰	-
	مقدار تولید (ton)	۱۲۰۰۰۰	۲۲۰۰	۱۲۶۸۰	۱۲۲۰۰	۶۲۵۰	۱۵۳۳۳۰
۲۰۱۵-۱۶	سطح زیر کشت (ha)	۲۸۰۰۰	۷۴۰	۳۲۹۰	۳۱۰۰	۲۵۰۰	۳۷۶۳۰
	عملکرد (kg ha ⁻¹)	۵۵۰۰	۴۲۰۰	۴۵۰۰	۴۵۰۰	۳۴۰۰	-
	مقدار تولید (ton)	۱۵۴۰۰۰	۳۱۰۸	۱۴۸۰۵	۱۳۹۵۰	۸۵۰۰	۱۹۴۳۶۳
۲۰۱۶-۱۷	سطح زیر کشت (ha)	۲۷۲۵۰	۴۲۰	۳۵۲۸	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۳۶۶۹۸
	عملکرد (kg ha ⁻¹)	۴۵۰۰	۴۲۰۰	۴۲۰۰	۴۲۰۰	۴۰۰۰	-
	مقدار تولید (ton)	۱۲۲۶۲۵	۱۷۶۴	۱۴۸۱۸	۱۲۶۰۰	۱۰۰۰۰	۱۶۱۸۰۷



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان اصفهان در ایران

Bioclimatic Zonation Map of Isfahan Provinc by Multivariate Method



شکل ۲. پهنه‌بندی اقلیمی شهرستان‌های استان اصفهان بر اساس روش چندمتغیره (۳۲)

گرفته شد.

در سایت مارکسیم پس از انتخاب هر منطقه، استخراج داده‌ها یک‌بار برای RCP-۸/۵ و یک‌بار برای RCP-۴/۵ به صورت مجزا در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ و با پنج تکرار برای هر دوره کشت، انجام گرفت. با توجه به اینکه صفر فیزیولوژیک گندم برابر صفر درجه سلسیوس و حداکثر دمای قابل تحمل برای آن، ۳۰ درجه سلسیوس است (۲۹)، لذا هدف ما در این مطالعه، بررسی تعداد روزهایی از دوره کشت است که دما زیر صفر درجه سلسیوس و بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس باشد. پس از استخراج داده‌ها، مقایسه میانگین مناطق برای شاخص‌های دمایی در سه سال مورد بررسی، نسبت به سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ (کنترل) بر اساس طرح کاملاً تصادفی با شاهد خاص و با کمک نرم‌افزار SAS انجام گرفت. جدول ۲ نتیجه مقایسه میانگین را برای دو مقدار RCP-۴/۵ و RCP-۸/۵ نشان می‌دهد.

محاسبه تبخیر و تعرق

با استفاده از داده‌های به دست آمده از سایت مارکسیم شامل دمای بیشینه، دمای کمینه و میزان تابش در دوره کشت گندم و به کمک روش هارگریوز (۹)، مقدار تبخیر و تعرق در

MIROC-ESM-، MIROC-ESM، JPSL-CM5A-MR، NorESM1-M و MRI-CGCM3، MIROC5، CHEM (Representative) RCP معیار (Concentration Pathway)، میزان افزایش دی‌اکسیدکربن جو را در سال‌های مدنظر پیش‌بینی می‌کند که به صورت پیش فرض، ۴ مقدار برای آن تعریف شده است. کمترین مقدار RCP معادل ۲/۶ و بیشترین مقدار آن ۸/۵ است. این تحقیق بر اساس حداکثر میزان RCP (RCP-۸/۵=۵۷۲ $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{CO}_2$) و مقدار متوسط آن (RCP-۴/۵=۴۹۸ $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{CO}_2$) انجام گرفت (۱۲).

در استان اصفهان گندم پاییزه در مهرماه کشت شده و در تیرماه سال بعد برداشت می‌شود. اما به طور قطع تفاوت شرایط آب و هوایی در شهرستان‌های مختلف استان اصفهان، منجر به تغییرات جزئی در تاریخ کشت گندم و در پی آن تاریخ برداشت آن در هر کدام از شهرستان‌ها می‌شود. در این مطالعه حداکثر بازه زمانی کاشت تا برداشت گندم در اصفهان مورد بررسی قرار گرفت تا دوره کاشت تمامی مناطق مورد بررسی را تحت پوشش قرار دهد. بنابراین تاریخ شروع دوره رشدی گندم، اول مهرماه و زمان برداشت آن ۳۱ تیرماه در نظر

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس شاخص های اقلیمی - زراعی در شهرستان های اصفهان، نجف آباد و چادگان

منبع تغییرات	درجه آزادی	دمای بیشینه $30^{\circ}\text{C} <$	دمای کمینه $30^{\circ}\text{C} <$	میانگین دما $30^{\circ}\text{C} <$	تعداد روز $30^{\circ}\text{C} <$	دمای بیشینه $^{\circ}\text{C} >$	دمای کمینه $^{\circ}\text{C} >$	میانگین دما $^{\circ}\text{C} >$	تعداد روز $^{\circ}\text{C} >$	تبخیر عمیق
شهرستان اصفهان										
سال	۳	۱/۵۶ns	۰/۰۳*	۰/۸۲**	۲۲۹/۵۹*	۰/۰۴*	۱/۲۷*	۰/۵۳*	۲۷۴/۸۲*	۶۴۸۰/۵۸*
RCP	۱	۰/۱۷*	۰/۰۴*	۰/۰۳*	۹/۶۳*	۰/۰۴*	۰/۰۸*	۰/۰۰۳*	۳۸/۵۳*	۱۱۷۲/۱۸*
RCP	۲	۰/۱۱	۰/۰۰۰۳*	۰/۰۲*	۰/۰۳*	۰/۰۱**	۰/۰۶*	۰/۰۰۰۴*	۱۰/۸۳*	۳۸۷/۸۴*
خطای آزمایش	۳۲	۰/۹۳	۱/۴۸	۵/۱۵	۷۸/۸۲	۰/۰۰۹	۷/۷۴	۰/۵۲	۶۴/۸۵	۲۰۹۷/۸۸
%ضریب تغییرات		۴/۱۴	۴/۰۱	۶/۴	۱۰/۳۶	۴۳/۴۴	۱۷/۳۸	۱۴/۳۰	۱۰/۱۴	۲/۵۸
شهرستان نجف آباد										
سال	۳	۱/۲۵*	۰/۰۰۲*	۰/۵۳**	۲۲۸/۰۶*	۰/۰۴*	۵/۵۵*	۰/۲۷*	۱۷۲/۴۵*	۲۶۰۳/۴۶*
RCP	۱	۰/۵۳*	۰/۰۰۰۳*	۰/۰۷*	۰/۱۳**	۰/۰۳ ns	۰/۰۶*	۰/۱۴*	۶۱/۶۳*	۶۱/۱۲*
RCP	۲	۰/۰۳	۰/۰۰۰۲*	۰/۰۱*	۱۳/۶۳*	۰/۰۰۰۳*	۰/۱۳*	۰/۰۰۰۳*	۶/۹۳*	۷۰۵/۹۴*
خطای آزمایش	۳۲	۰/۹۰	۰/۷۰	۴/۳۲	۵۳/۴۹	۰/۰۰۶	۶/۸۴	۰/۴۸	۶۲/۹	۴۴۰/۴۷۲
%ضریب تغییرات		۲/۲۶	۲/۸۸	۵/۹۹	۹/۶۲	۴۱/۷۴	۱۸/۲۲	۱۶/۲۵	۱۲/۲۴	۲/۸۱
شهرستان چادگان										
سال	۳	۱/۸۰*	۰/۲۱*	۱/۰۷*	۱۱۲/۱۸**	۰/۰۰۴*	۱/۳۹*	۰/۱۳*	۲۳۰/۳۲*	۳۳۱۴/۵۹*
RCP	۱	۰/۶۴*	۰/۰۰۱*	۰/۱۳ ns	۲/۷۰*	۰/۰۲*	۰/۳۲*	۰/۰۵*	۳۸/۵۳*	۱۶۸۲/۰۷*
RCP	۲	۰/۲۱	۰/۰۱*	۰/۰۳*	۲/۱۰*	۰/۰۰۴*	۰/۰۶*	۰/۰۲*	۰/۶۳**	۵۳۵/۴۳**
خطای آزمایش	۳۲	۱/۰۸	۲/۸۲	۵/۱۵	۱۵/۶۶	۰/۰۰۷	۷/۱۰	۰/۵۶	۱۵۵/۹۲	۱۲۰۴/۲۳
%ضریب تغییرات		۲/۷۰	۵/۶۲	۶/۸۷	۷/۷۵	۵۱/۴۴	۱۴/۵۵	۱۳/۷۴	۱۲/۲۵	۴/۲۹

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های اقلیمی- زراعی در شهرستان‌های برخوار و میمه

منبع تغییرات	درجه آزادی	دمای بیشینه	دمای کمینه	میانگین دما	تعداد روز	دمای بیشینه	دمای کمینه	میانگین دما	تعداد روز	تبخیر
		$30^{\circ}\text{C} <$	$30^{\circ}\text{C} <$	$30^{\circ}\text{C} <$	$30^{\circ}\text{C} <$	$30^{\circ}\text{C} <$	$30^{\circ}\text{C} <$	$30^{\circ}\text{C} <$	$30^{\circ}\text{C} <$	تغرق
شهرستان برخوار										
سال	۳	۱/۷۷ *	۰/۰۰۸ ns	۱/۰۹ *	۲۰۷/۱۲ *	۰/۰۳ **	۳/۳۶ *	۰/۱۲ *	۱۹۹/۳۰ *	۲۹۲۰/۸۹ *
RCP	۱	۰/۲۸ **	۰/۰۰۱ *	۰/۱۰ *	۲۲/۵۳ *	۰/۰۰۵ *	۰/۱۳ ns	۰/۰۱ *	۲۸/۰۳ *	۱۴۳۴/۵۹ *
RCP * سال	۲	۰/۰۶ *	۰/۰۰۴ *	۰/۰۰۳ *	۸/۲۳ *	۰/۰۱ *	۰/۰۵ *	۰/۰۱ *	۵/۸۳ *	۱۲۱/۸۵ *
خطای آزمایش	۳۲	۰/۸۱	۰/۹۱	۵/۸۵	۷۵/۴۸	۰/۰۰۴	۶/۸۳	۰/۴۳	۵۴/۳۶	۱۰۹۲/۰۲
%ضرب تغییرات		۲/۱۸	۳/۱۶	۶/۸۸	۱۱/۸۵	۳۵/۳۰	۱۷/۴۰	۱۴/۰۵	۷/۳۷	۲/۳۷
شهرستان میمه										
سال	۳	۱/۰۱ **	۰/۰۰۰۸ *	۰/۷۳ ns	۲۱۸/۴۵ **	۰/۰۴ **	۴/۹۴ *	۰/۰۴ *	۲۴۲/۴۳ *	۲۵۹۶/۰۹ *
RCP	۱	۰/۰۰۱ *	۰/۰۰۱ *	۰/۰۲ *	۴/۸ *	۰/۰۰۱ *	۱/۵۴ *	۰/۰۱ ns	۳۰ *	۷۰۰/۶۸ *
RCP * سال	۲	۰/۷۱ *	۰/۰۰۹ *	۰/۰۶ **	۲/۱ *	۰/۰۰۹ *	۰/۵ *	۰/۰۳ *	۴/۸ *	۱۴۲/۲۳ *
خطای آزمایش	۳۲	۰/۹۱	۱/۰۴	۵/۵۶	۲۴/۶۸	۰/۰۰۳	۷/۸۸	۰/۶۰	۱۴۵/۱۱	۹۱۱/۹۵
%ضرب تغییرات		۲/۴۰	۳/۴۰	۶/۹۳	۴/۴۱	۳۴/۵۸	۱۵/۴۹	۱۳/۷۱	۱۲/۱۵	۲/۳۳

** و * به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و ns غیر معنی دار

شرایط اقلیمی آینده با استفاده از روابط زیر محاسبه شد:

$$ET_0 = 0.0023(T_{\text{Mean}} + 17.8)(T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}})^{0.5} R_a$$

$$R_s = K_{RS}(T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}})^{0.5} R_a$$

R_a تابش فرازمینی در محل مورد نظر (مگاژول بر متر مربع بر روز)

R_s تابش خورشیدی در محل مورد نظر (مگاژول بر متر مربع بر روز)

T_{max} حداکثر دما (درجه سلسیوس)

T_{min} حداقل دما (درجه سلسیوس)

T_{mean} دمای میانگین (درجه سلسیوس)

K_{RS} ضریب اصلاحی مساوی با ۰/۱۶ در مناطق غیر ساحلی و ۰/۱۹ در مناطق ساحلی (درجه سلسیوس به توان -۰/۵)

ET_0 میزان تبخیر و تعرق مرجع (میلی متر بر روز)

در نهایت با استفاده از رابطه زیر و برآورد ضرایب تجربی

به کمک رگرسیون، میزان تبخیر تعرق هر دوره کشت گندم برای هر کدام از مناطق در سال‌های مدنظر محاسبه شد. مقادیر ضرایب a و b برای شهرستان اصفهان ۲۲/۰ و ۵۰/۳؛ برخوار ۱۹/۵ و ۴۲/۲؛ چادگان ۱۴/۴ و ۲۳/۹؛ میمه ۱۸/۲ و ۳۹/۳ و نجف‌آباد ۱۴/۱ و ۲۰/۱ در نظر گرفته شد.

$$ET = a + bET_0$$

نتایج

بر اساس نتایج مندرج در جدول‌های ۲ و ۳، تغییرات دما در هر کدام از مناطق مورد مطالعه بررسی و به تفکیک منطقه ارائه شدند:

شهر اصفهان (اقلیم نیمه‌خشک و گرم)

به‌طور میانگین تعداد روزهای با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهر اصفهان تحت

این شاخص تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۹ و ۲۴ میلی‌متر بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود ولی در سال ۲۰۳۰ تفاوت بارزی بین آنها مشاهده نشد (جدول ۴).

نجف‌آباد (اقلیم نیمه‌خشک و سرد)

به‌طور میانگین تعداد روزهای با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهرستان نجف‌آباد در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ تحت RCP-۴/۵ به ترتیب ۵/۹، ۹/۷ و ۱۱/۵ روز و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۸/۵، ۱۰/۳ و ۱۳/۷ روز بیشتر از میانگین دو سال شاهد (۶۸/۵ روز) خواهد بود (جدول ۴). لذا به‌طور میانگین مقادیر این شاخص تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۴۴/۰۶، ۶/۱۸ و ۱۹/۱۳ درصد بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود (جدول ۴). همچنین پیش‌بینی بیشینه دمایی نشان می‌دهد که در این منطقه دما تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱/۸۲، ۲/۱۸ و ۲/۵۸ درجه سلسیوس و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۲/۰۴، ۲/۳۶ و ۲/۹۸ درجه سلسیوس نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۴۰/۱ درجه سلسیوس) گرم‌تر خواهد شد (جدول ۴).

نتایج به‌دست آمده نشان داد که به‌طور میانگین تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهرستان نجف‌آباد تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۲۰/۵، ۱۷/۱ و ۱۵/۷ روز و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱۶/۳، ۱۶/۱ و ۱۲/۳ روز نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۵۲/۵ روز) بیشتر خواهد بود (جدول ۴). به‌طور متوسط تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۲۰/۴۸، ۵/۸۴ و ۲۱/۶۵ درصد کمتر از RCP-۴/۵ خواهد بود (جدول ۴). همچنین میانگین دمای کمینه در دوره رشد تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱/۸۸، ۱/۷۳ و ۱/۶

RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۳/۷، ۵/۳ و ۷/۷ روز و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۴/۳، ۵/۷ و ۱۰/۱ روز نسبت به میانگین دو سال اخیر (۲۰۱۷-۱۸) با مقدار ۷۵/۵ روز بیشتر خواهد بود (جدول ۴). بنابراین به‌طور متوسط مقادیر این شاخص تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۶، ۷/۵ و ۳۱ درصد بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود (جدول ۴). همچنین بیشینه دمای ثبت شده تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱/۸، ۲/۲ و ۲/۵۸ درجه سلسیوس و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱/۸۶، ۲/۲ و ۲/۹۸ درجه سلسیوس نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۴۰/۴ درجه سلسیوس) گرم‌تر خواهد بود (جدول ۴).

به‌طور میانگین تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهر اصفهان تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۰/۰، ۲۱/۲ و ۲۳/۴ روز و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۲۰/۶، ۲۱/۸ و ۲۸/۰ روز نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۸۹ روز) کمتر خواهد بود (جدول ۴) بنابراین به‌طور متوسط تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۰/۶، ۲/۸ و ۱۹ درصد کمتر از RCP-۴/۵ خواهد بود (جدول ۴). همچنین میانگین دمای کمینه تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱/۱۸، ۱/۳۵ و ۱/۴۹ درجه سلسیوس و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱/۱۸، ۱/۳۸ و ۱/۵۸ درجه سلسیوس نسبت به میانگین دو سال‌های شاهد (۵/۷۸ درجه سلسیوس) گرم‌تر خواهد بود (جدول ۴).

به‌طور میانگین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در طول دوره رشد گندم در شهر اصفهان تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۲۴۵، ۲۶۴ و ۲۸۶ میلی‌متر و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۲۵۴، ۲۶۵ و ۳۱۰ میلی‌متر نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۱۳۲۴ میلی‌متر) بیشتر خواهد بود (جدول ۴). بنابراین به‌طور متوسط مقادیر

جدول ۴. مقایسه میانگین شاخص‌های اقلیمی- زراعی در سال‌های مورد مطالعه در مناطق اصفهان و نجف‌آباد

RCP = ۸/۵			RCP = ۴/۵			شاهد		شاخص‌های اقلیمی- زراعی
۲۰۴۰	۲۰۳۰	۲۰۲۰	۲۰۴۰	۲۰۳۰	۲۰۲۰	۲۰۱۸	۲۰۱۷	
اصفهان (۳۲/۶۵, ۵۱/۶۶)								
>۳۰°C								
۴۳/۳۸ ^a	۴۲/۶ ^{ab}	۴۲/۲۶ ^{ab}	۴۲/۹۸ ^{ab}	۴۲/۶ ^{ab}	۴۲/۲ ^{ab}	۴۰/۴ ^c	۴۰/۴ ^c	دمای بیشینه
۳۰/۱۶ ^{ab}	۳۰/۱۶ ^{ab}	۳۰/۰۴ ^{ab}	۳۰/۱۲ ^{ab}	۳۰/۱۴ ^{ab}	۳۰/۰۲ ^{ab}	۳۰/۲ ^a	۳۰/۲ ^a	دمای کمینه
۳۶/۰۶ ^a	۳۵/۶۲ ^{bc}	۳۵/۳۷ ^{cd}	۳۵/۸۹ ^{ab}	۳۵/۶۳ ^{bc}	۳۵/۳۶ ^{cd}	۳۵/۲۷ ^d	۳۵/۶۴ ^{bc}	میانگین دما
۸۵/۶ ^a	۸۱/۲ ^a	۷۹/۸ ^a	۸۳/۲ ^a	۸۰/۸ ^a	۷۹/۲ ^a	۸۳ ^a	۶۸ ^b	تعداد روز
<۰°C								
-۰/۲ ^{ab}	-۰/۲ ^{ab}	-۰/۲۴ ^b	-۰/۱ ^a	-۰/۲ ^{ab}	-۰/۱۲ ^{ab}	-۰/۴ ^c	-۰/۴ ^c	دمای بیشینه
-۱۴/۸۸ ^a	-۱۵/۵ ^a	-۱۵/۸۶ ^a	-۱۵/۱۶ ^a	-۱۵/۵ ^a	-۱۵/۹ ^a	-۱۳/۴ ^a	-۱۳/۴ ^a	دمای کمینه
-۴/۲۷ ^a	-۴/۴۰ ^a	-۴/۶۰ ^a	-۴/۲۹ ^a	-۴/۴۳ ^a	-۴/۶۰ ^a	-۵/۷۸ ^{ab}	-۵/۷۸ ^b	میانگین دما
۶۱ ^c	۶۷/۳ ^c	۶۸/۴ ^c	۶۵/۶ ^c	۶۷/۸ ^c	۷۰ ^c	۸۹ ^a	۸۹ ^a	تعداد روز
۱۶۳۵/۰۲ ^a	۱۵۹۰/۱۱ ^{ab}	۱۵۷۸/۱۹ ^b	۱۶۱۰/۶۲ ^{ab}	۱۵۸۸/۴۲ ^{ab}	۱۵۶۹/۳۱ ^b	۱۳۰۱/۸۸ ^c	۱۳۴۶/۴۴ ^c	تبخیر تعرق
نجف‌آباد (۳۲/۶۳, ۵۱/۳۶)								
>۳۰°C								
۴۳/۰۸ ^a	۴۲/۴۶ ^a	۴۲/۱۴ ^a	۴۲/۶۸ ^a	۴۲/۲۸ ^a	۴۱/۹۲ ^a	۴۰/۲ ^b	۴۰ ^b	دمای بیشینه
۳۰/۰۶ ^b	۳۰/۰۶ ^b	۳۰/۰۴ ^b	۳۰/۰۸ ^b	۳۰/۰۲ ^b	۳۰/۰۴ ^b	۳۰/۲ ^a	۳۰/۲ ^a	دمای کمینه
۳۵/۸۴ ^a	۳۵/۴۶ ^{bc}	۳۵/۲۱ ^c	۳۵/۶۷ ^{ab}	۳۵/۳۷ ^c	۳۵/۱۸ ^c	۳۵/۱۰ ^d	۳۵/۰۸ ^d	میانگین دما
۸۲/۲ ^a	۷۸/۸ ^{ab}	۷۷ ^{ab}	۸۰ ^{ab}	۷۸/۲ ^{ab}	۷۴/۴ ^{abc}	۶۵ ^c	۷۲ ^b	تعداد روز
<۰°C								
-۰/۱ ^a	-۰/۱۶ ^{ab}	-۰/۱۲ ^a	-۰/۱۶ ^{ab}	-۰/۲ ^{ab}	-۰/۱۸ ^{ab}	-۰/۴ ^c	-۰/۲۴ ^b	دمای بیشینه
-۱۵/۷ ^b	-۱۶/۲ ^b	-۱۶/۸۸ ^b	-۱۶ ^b	-۱۶/۳۲ ^b	-۱۶/۷۲ ^b	-۷/۴ ^a	-۹/۶ ^a	دمای کمینه
-۴/۴۵ ^b	-۴/۶۴ ^b	-۴/۷۷ ^b	-۴/۵۸ ^b	-۴/۷۱ ^b	-۴/۸۶ ^b	-۳/۱۹ ^a	-۲/۷۸ ^a	میانگین دما
۶۴/۸ ^{ab}	۶۸/۶ ^{ab}	۶۸/۸ ^{ab}	۶۸/۲ ^{ab}	۶۹/۶ ^a	۷۳ ^a	۴۶ ^c	۵۹ ^b	تعداد روز
۸۰۶/۸۷ ^a	۷۹۲/۹۱ ^{ab}	۷۵۶/۴۶ ^c	۷۹۷/۷۲ ^{ab}	۷۷۸/۵۶ ^{ab}	۷۷۸/۵۲ ^{bc}	۶۰۸/۶۱ ^d	۶۳۳/۳۲ ^d	تبخیر تعرق

در هر ردیف برای هر شاخص اقلیمی- زراعی اعدادی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند.

درجه سلسیوس و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱/۷۹، ۱/۶۶ و ۱/۴۷ درجه سلسیوس نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۲/۹۸ درجه سلسیوس) سردتر خواهد بود (جدول ۴). البته همان‌گونه که آنالیز داده‌ها نشان می‌دهد، در سال ۲۰۴۰ به دلیل گرم شدن اقلیم و افزایش دی‌اکسید کربن اتمسفر، سرمای هوا کمتر از سال‌های قبل خواهد بود.

نتایج حاکی از آن است که به‌طور میانگین تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهرستان چادگان تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۵، ۳/۶، ۱ روز و تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۳۰ به ترتیب ۵/۸ و ۱/۸ روز نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۱۰۰ روز) بیشتر خواهد شد اما در سال ۲۰۴۰ تحت RCP-۸/۵، تعداد روز با دمای زیر صفر درجه سلسیوس به اندازه ۱/۸ روز افت می‌کند. این کاهش تعداد روز، ناشی از افزایش گرمایش جهانی در RCP-۸/۵ است (جدول ۵) بنابراین به‌طور متوسط تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس تحت RCP-۸/۵ در سال ۲۰۲۰، ۱۶ درصد بیشتر از RCP-۴/۵- و برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۵۰ و ۲۸ درصد کمتر خواهد شد (جدول ۵). همچنین میانگین دمای کمینه در دوره رشد تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱/۳، ۱/۲۴ و ۱/۱۲ درجه سلسیوس و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱/۳۱، ۱/۱۷ و ۰/۹۴ درجه سلسیوس نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۴/۵۷ درجه سلسیوس) سردتر خواهد بود (جدول ۵).

به‌طور میانگین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در طول دوره رشد گندم در شهرستان چادگان تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۲۹۲/۶۱، ۳۳۲/۲۷ و ۳۴۱/۲۳ میلی‌متر و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۳۲۴/۱۵، ۳۳۶/۰۷ و ۳۵۰/۸۲ میلی‌متر نسبت به میانگین سال‌های شاهد (میلی‌متر) بیشتر خواهد بود (جدول ۵). بنابراین به‌طور متوسط مقادیر این شاخص تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۳۱/۵۴، ۳/۸ و ۹/۵۹ میلی‌متر بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود.

به‌طور میانگین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در طول دوره رشد گندم در شهرستان نجف‌آباد تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۵۷/۵۶، ۱۶۶/۶ و ۱۷۶/۷۶ میلی‌متر و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱۳۵/۵، ۱۷۱/۹۵ و ۱۸۵/۹۱ میلی‌متر نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۶۲۰/۹۶ میلی‌متر) بیشتر خواهد بود (جدول ۴). بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که به‌طور متوسط مقادیر این شاخص تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۵/۳۵ و ۹/۱۵ میلی‌متر بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود ولی در سال ۲۰۲۰ تفاوت بارزی بین آنها مشاهده نشد (جدول ۴).

چادگان (اقلیم نیمه‌مرطوب و سرد)

به‌طور میانگین تعداد روزهای با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهرستان چادگان تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۲/۵، ۱۴/۵ و ۱۸/۱ روز و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱۲/۱، ۱۵/۳ و ۱۹/۵ روز بیشتر از میانگین سال‌های شاهد (۳۹/۵ روز) خواهد بود (جدول ۵). مشخص است که به‌طور میانگین مقادیر این شاخص تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۵/۵۱ و ۷/۷۳ درصد بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود اما در سال ۲۰۲۰ تعداد روز در RCP-۸/۵ به اندازه ۳/۲ افت می‌کند که البته این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نیست (جدول ۵). بر اساس داده‌های بیشینه دمایی، در این منطقه دما تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۴/۴۴، ۴/۸۴ و

جدول ۵. مقایسه میانگین شاخص‌های اقلیمی- زراعی در سال‌های مورد مطالعه در شهرستان‌های چادگان و برخوار

RCP - ۱/۵		RCP - ۴/۵				شاهد		شاخص‌های اقلیمی- زراعی
۲۰۴۰	۲۰۳۰	۲۰۲۰	۲۰۴۰	۲۰۳۰	۲۰۲۰	۲۰۱۸	۲۰۱۷	
								>۳۰°C
۴۰/۶۲ ^a	۳۹/۸۴ ^{ab}	۳۹/۳ ^{ab}	۴۰ ^{ab}	۳۹/۶۴ ^{ab}	۳۹/۲۴ ^b	۳۴/۸ ^c	۳۴/۸ ^c	دمای بیشینه
۳۰/۱۴ ^a	۳۰/۱۶ ^a	۳۰/۲ ^a	۳۰/۱۲ ^a	۳۰/۲۶ ^a	۳۰/۱۲ ^a	۳۰/۱۲ ^a	۳۰/۰۸ ^a	دمای کمینه
۳۴/۲۴ ^a	۳۳/۸۸ ^b	۳۳/۵۵ ^{cd}	۳۳/۹۷ ^{ab}	۳۳/۸ ^{bc}	۳۳/۵ ^d	۳۲/۶ ^e	۳۱/۸۱ ^f	میانگین دما
۵۹ ^a	۵۴/۸ ^{ab}	۵۱/۶ ^b	۵۷/۶ ^a	۵۴ ^{ab}	۵۲ ^b	۳۶ ^d	۴۳ ^c	تعداد روز
								۰°C
-۰/۱۲ ^a	-۰/۱۶ ^a	-۰/۱۴ ^a	-۰/۲ ^a	-۰/۲۲ ^a	-۰/۱۴ ^a	-۰/۲ ^a	-۰/۲ ^a	دمای بیشینه
-۱۹/۲ ^b	-۱۹/۷۴ ^b	-۲۰/۲۲ ^b	-۱۹/۵۸ ^b	-۱۹/۹ ^b	-۲۰/۳ ^b	-۱۳/۶ ^a	-۱۴ ^a	دمای کمینه
-۵/۵۱ ^{bc}	-۵/۷۴ ^c	-۵/۸۸ ^c	-۵/۶۹ ^c	-۵/۸۱ ^c	-۵/۸۷ ^c	-۴/۵۴ ^a	-۴/۶ ^{ab}	میانگین دما
۹۸/۲ ^a	۱۰۱/۸ ^a	۱۰۵/۸ ^a	۱۰۱ ^a	۱۰۳/۶ ^a	۱۰۵ ^a	۹۲ ^a	۱۰۸ ^a	تعداد روز
۹۱۱/۶۰ ^a	۸۹۶/۸۵ ^{ab}	۸۸۴/۹۳ ^{ab}	۹۰۲/۰۱ ^a	۸۹۳/۰۹ ^{ab}	۸۵۳/۳۹ ^b	۵۴۴/۸۷ ^c	۵۷۶/۷۰ ^c	تبخیر تعرق
								>۳۰°C
۴۳/۶ ^a	۴۳/۰۴ ^a	۴۲/۵ ^a	۴۳/۲۴ ^a	۴۲/۸۶ ^a	۴۲/۴۶ ^a	۳۶ ^b	۳۶/۶ ^b	دمای بیشینه
۳۰/۱۲ ^a	۳۰/۰۸ ^a	۳۰/۱۴ ^a	۳۰/۱۸ ^a	۳۰/۰۸ ^a	۳۰/۱۲ ^a	۳۰/۲ ^a	۳۰/۲ ^a	دمای کمینه
۳۶/۱۹ ^a	۳۵/۹۱ ^{ab}	۳۵/۶۰ ^{cd}	۳۶/۱۰ ^{ab}	۳۵/۸۲ ^{bc}	۳۵/۴۳ ^d	۳۳/۵۸ ^e	۳۲/۸۷ ^f	میانگین دما
۸۸ ^a	۸۳/۲ ^a	۸۰ ^a	۸۴/۲ ^a	۸۲/۲ ^a	۷۹/۶ ^a	۳۸ ^c	۵۱ ^b	تعداد روز
								۰°C
-۰/۱۴ ^{ab}	-۰/۱۲ ^a	-۰/۱۶ ^{ab}	-۰/۱۴ ^{ab}	-۰/۲ ^{ab}	-۰/۱۴ ^{ab}	-۰/۲۲ ^b	-۰/۴ ^c	دمای بیشینه
-۱۴/۷۲ ^a	-۱۵/۲۶ ^a	-۱۵/۷۲ ^a	-۱۵/۰۲ ^a	-۱۵/۳۴ ^a	-۱۵/۷۴ ^a	-۱۳/۴ ^a	-۱۵ ^a	دمای کمینه
-۴/۲ ^a	-۴/۳۳ ^a	-۴/۵۲ ^a	-۴/۲۷ ^a	-۴/۴ ^a	-۴/۴۸ ^a	-۵/۵۷ ^b	-۵/۶۷ ^b	میانگین دما
۶۱ ^c	۶۵/۴ ^c	۶۸/۴ ^c	۶۴/۶ ^c	۶۷ ^c	۶۹ ^c	۱۰۵ ^b	۱۱۸ ^a	تعداد روز
۱۴۹۸ ^a	۱۴۷۵/۳۱ ^{ab}	۱۴۵۲/۹۲ ^b	۱۴۷۷/۴۶ ^{ab}	۱۴۶۰/۹۷ ^{ab}	۱۱۴۶/۳۱ ^b	۱۱۵۶/۶۶ ^c	۱۱۱۸/۱۲ ^c	تبخیر تعرق

برخوار (اقلیم نیمه‌خشک و سرد)

بر اساس میانگین تعداد روزهای با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهرستان برخوار مشخص شد که این شهرستان تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۳۴/۳۷، ۴۰/۲۱ و ۴۴/۷۱ روز و تحت RCP-۱/۵ به ترتیب ۳۵/۲۷، ۴۲/۴۶ و ۵۳/۲۵ روز

بیشتر نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۴۴/۵ روز) را تجربه خواهد کرد (جدول ۵). در نتیجه به‌طور میانگین مقادیر این شاخص تحت RCP-۱/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۲/۹، ۵/۵۹ و ۱۹/۱۰ درصد بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود (جدول ۵). همچنین نتایج به دست آمده از پیش‌بینی بیشینه دمایی نشان می‌دهد که در این منطقه دما تحت RCP-۴/۵

میمه (اقلیم نیمه خشک و سرد)

به طور میانگین تعداد روزهای با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهر میمه تحت ۴/۵- RCP در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۵/۹، ۱۹/۱ و ۲۳/۹ روز و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱۵/۵، ۱۹/۱ و ۲۳/۹ روز نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۴۴/۵ روز) بیشتر خواهد بود (جدول ۶). بنابراین به طور متوسط مقادیر این شاخص تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۳/۷۷ و ۵/۳۸ درصد بیشتر از RCP-۴/۵ بود و در سال ۲۰۳۰ تفاوتی مشاهده نشد (جدول ۶). همچنین بیشینه دمای ثبت شده تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۴/۷، ۴/۴۲ و ۴/۸۲ درجه سلسیوس و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۴/۰۸، ۴/۶۲ و ۵/۲ درجه سلسیوس نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۳۶/۳ درجه سلسیوس) گرم‌تر خواهد بود (جدول ۶).

به طور میانگین تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهر میمه تحت ۴/۵- RCP در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۲/۵، ۱۴/۹ و ۱۹/۱ روز و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱۲/۹، ۱۷/۷ و ۲۱/۹ روز نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۱۱۱/۵ روز) کمتر خواهد بود (جدول ۶). بنابراین به طور متوسط تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۳/۲، ۱۸/۷۹ و ۱۴/۶۵ درصد کمتر از RCP-۴/۵ خواهد بود (جدول ۶). همچنین میانگین دمای کمینه در دوره رشد، تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۰/۱۳، ۰/۱۱ و ۰/۰۹ درجه سلسیوس و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۰/۱۹، ۰/۰۹ و ۰/۰۶ درجه سلسیوس نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۵/۶۲ درجه سلسیوس) سردتر خواهد بود (جدول ۶).

به طور میانگین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در طول دوره رشد گندم در شهر میمه تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۴۵/۱۲، ۱۶۷/۱۹ و ۱۷۷/۷۵ میلی‌متر

RCP در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۶/۱۶، ۶/۵۶ و ۶/۹۴ درجه سلسیوس و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۶/۷۴ و ۷/۳ درجه سلسیوس نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۳۶/۳ درجه سلسیوس) گرم‌تر خواهد شد (جدول ۵).

مطابق داده‌های موجود، به طور میانگین تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم در شهرستان برخوار تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۴۶/۵، ۴۴/۵ و ۴۴/۵ روز و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۴۳/۱، ۴۶/۱ و ۵۰/۵ روز نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۱۱۱/۵ روز) کمتر خواهد بود (جدول ۵). بنابراین به طور متوسط تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۷/۳، ۳/۵۹ و ۸/۶ درصد کمتر از RCP-۴/۵ خواهد بود (جدول ۵). همچنین میانگین دمای کمینه در دوره رشد تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱/۱۴، ۱/۲۲ و ۱/۳۵ درجه سلسیوس و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱/۱، ۱/۲۹ و ۱/۴۲ درجه سلسیوس نسبت به (۵/۶۲ درجه سلسیوس) گرم‌تر خواهد بود (جدول ۵). همانگونه که مشخص است، در سال ۲۰۴۰ در هر دو RCP همزمان با افزایش دی‌اکسید کربن اتمسفر و در نتیجه گرمایش جهانی، سرمای هوا کمتر از سال‌های قبل خواهد بود. به طور میانگین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل در طول دوره رشد گندم در شهرستان برخوار تحت RCP-۴/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۲۲۷/۴۲، ۲۹۲/۰۸ و ۳۰۸/۵۷ میلی‌متر و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۲۸۴/۰۳، ۳۰۶/۴۲ و ۳۲۹/۱۱ میلی‌متر نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۱۱۶۸/۸۹ میلی‌متر) بیشتر خواهد بود (جدول ۵). بنابراین مشخص است که به طور متوسط مقادیر این شاخص تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۵۶/۶۱، ۱۴/۳۴ و ۲۰/۵۴ میلی‌متر بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود (جدول ۵).

جدول ۶. مقایسه میانگین شاخص‌های اقلیمی- زراعی در سال‌های مورد مطالعه در شهرستان میمه

شاخص‌های اقلیمی- زراعی	RCP = ۸/۵			RCP = ۴/۵			شاهد	
	۲۰۴۰	۲۰۳۰	۲۰۲۰	۲۰۴۰	۲۰۳۰	۲۰۲۰	۲۰۱۸	۲۰۱۷
	میمه (۳۲/۷۶, ۵۰/۶۲)							
	$>3^{\circ}\text{C}$							
دمای بیشینه	۴۱/۵ ^a	۴۰/۹۲ ^a	۴۰/۳۸ ^a	۴۱/۱۲ ^a	۴۰/۷۲ ^a	۴۱ ^a	۳۶ ^b	۳۶/۶ ^b
دمای کمینه	۳۰/۱۲ ^{ab}	۳۰/۰۸ ^{ab}	۳۰/۰۴ ^{ab}	۳۰/۰۴ ^{ab}	۳۰/۰۸ ^{ab}	۳۰/۰۸ ^{ab}	۳۰/۲۰ ^a	۳۰/۲۰ ^a
میانگین دما	۳۴/۷۸ ^a	۳۴/۴۷ ^{bc}	۳۴/۱۹ ^c	۳۴/۵۶ ^{ab}	۳۴/۴۲ ^{bc}	۳۴/۳۰ ^{bc}	۳۲/۵۸ ^d	۳۲/۸۷ ^e
تعداد روز	۶۸/۴ ^a	۶۳/۶ ^{ab}	۶۱ ^b	۶۶/۶ ^{ab}	۶۳/۶ ^{ab}	۶۰/۴ ^b	۳۸ ^c	۵۱ ^c
	$>5^{\circ}\text{C}$							
دمای بیشینه	-۰/۱ ^a	-۰/۱۲ ^{ab}	-۰/۱۸ ^{ab}	-۰/۱۸ ^{ab}	-۰/۱۲ ^{ab}	-۰/۱۴ ^{ab}	-۰/۲ ^b	-۰/۲ ^b
دمای کمینه	-۱۸/۷۲ ^b	-۱۹/۲۲ ^b	-۱۹/۶۶ ^b	-۱۹/۰۲ ^b	-۱۹/۳۲ ^b	-۲۰/۶۲ ^b	-۱۳/۴ ^a	-۱۵ ^a
میانگین دما	-۵/۵۶ ^a	-۵/۷۱ ^a	-۵/۸۱ ^a	-۵/۷۱ ^a	-۵/۷۳ ^a	-۵/۵۷ ^a	-۵/۵۷ ^a	-۵/۶۷ ^a
تعداد روز	۸۹/۶ ^b	۹۳/۸ ^b	۹۸/۶ ^b	۹۲/۴ ^b	۹۶/۶ ^b	۹۹ ^b	۱۰۵ ^{ab}	۱۱۸ ^a
تبخیر تعرق	۱۳۶۳/۱۸ ^a	۱۳۳۷/۶۸ ^{ab}	۱۳۲۴/۸۷ ^{ab}	۱۳۴۶/۶۴ ^{ab}	۱۳۳۶/۰۸ ^{ab}	۱۳۱۴/۰۱ ^b	۱۱۵۶/۶۶ ^c	۱۱۸۱/۱۲ ^c

در هر ردیف برای هر شاخص اقلیمی- زراعی اعدادی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند. دمای بیشینه: به ترتیب دمای حداکثر در میان روزهای با دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس و دمای حداکثر در میان روزهای با دماهای زیر صفر درجه سلسیوس. دمای کمینه: به ترتیب دمای حداقل در میان روزهای با دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس و دمای حداقل در میان روزهای با دماهای زیر صفر درجه سلسیوس. میانگین دمایی: به ترتیب میانگین دما در میان روزهای با دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس و میانگین دما در میان روزهای با دماهای زیر صفر درجه سلسیوس. تعداد روز: تعداد روزها با دمای بالای ۳۰ درجه سلسیوس و تعداد روزها با دمای زیر صفر درجه سلسیوس. تبخیر تعرق: میزان تبخیر تعرق در دوره رشد گندم

آن است که این غلظت تا سال ۲۱۰۰ به ۱۰۰۰-۴۵۰ میکرومول خواهد رسید (۱۷). همین مسئله منجر به گرمای جهانی می‌شود. دمای متوسط کره زمین، از سال ۱۸۸۰ حدود ۰/۸ درجه سلسیوس افزایش یافته و اگر روند فعلی افزایش دی‌اکسیدکربن ادامه‌دار باشد، پیش‌بینی می‌شود دمای متوسط کره زمین تا پایان قرن ۲۱ از ۱/۸ تا ۵/۸ درجه سلسیوس بیشتر شود (۱۶). این مسئله بر نیاز انسان به غذا، آب و سلامت او تأثیر خواهد گذاشت.

پژوهش‌ها نشان داده است که گرمایش جهانی بر تولید گندم تأثیر می‌گذارد به گونه‌ای که آنالیز عملکرد گندم نشان می‌

و تحت RCP-۸/۵ به ترتیب ۱۶۸/۷۹، ۱۵۵/۹۸ و ۱۹۴/۲۹ میلی متر نسبت به میانگین سال‌های شاهد (۱۱۶۸/۸۹ میلی متر) بیشتر خواهد بود (جدول ۶). بنابراین به‌طور متوسط مقادیر این شاخص تحت RCP-۸/۵ در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ به ترتیب ۱۰/۸۶، ۱/۶ و ۱۶/۵۴ میلی متر بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود (جدول ۶).

بحث

غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر در ۵۶ سال گذشته، از ۳۱۵ به ۴۰۰ میکرومول بر مول رسیده است (۷) و پژوهش‌ها حاکی از

دقت داشت تا در زمان پر شدن دانه، به گرمای شدید در هوای گرم برخورد نکند.

افزایش دما همواره بر همه گیاهان تأثیر گذاشته و شدت تأثیر آن بسته به نوع گیاه زارعی و منطقه متفاوت است. برای مثال یو و همکاران (۳۴) پیش‌بینی کرده‌اند اگر در دوره رشد گندم، دما یک درجه سلسیوس افزایش یابد، عملکرد بین ۱۰-۳ درصد افت می‌کند. همچنین آزدگن و همکاران (۲۸) بیان کرده‌اند که هر چه هوا در دوره رشد گندم زمستانه گرم‌تر و اقلیم خشک‌تر شود، افت عملکرد بین ۳۵-۵ درصد متغیر خواهد بود. بررسی تأثیرات تغییر اقلیم در حوزه زاینده‌رود نشان می‌دهد که در آینده‌ای با اقلیم گرم و خشک، تولید گندم به میزان ۲۰/۷-۲/۵ درصد کاهش یابد (۱۰). یکی از دلایل این اتفاق، ساختار فیزیولوژی گیاه گندم است که در گروه گیاهان سه کربنه قرار دارد. گندم به‌عنوان یک گیاه سه کربنه، به دمای بالا حساس بوده و در نتیجه چرخه فتوسنتزی آسیب خواهد دید (۲ و ۳۷). دلیل دیگر افت عملکرد گندم همگام با افزایش دما، کاهش دوره رشد گیاه زارعی است. عملکرد گیاه گندم بر اساس دو فاکتور تعداد دانه در سنبله و اندازه دانه تعریف می‌شود. با گرم شدن اقلیم، دوره رشد گندم و در نتیجه مدت زمان پر شدن دانه کوتاه می‌شود. در چنین شرایطی دانه‌های کوچک و با کیفیت کم حاصل می‌شود. اثر دیگر دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس، تأثیر منفی روی فتوسنتز است. گروهی دیگر از پژوهشگران نیز ثابت کرده‌اند، گرم شدن هوا منجر به کوتاه شدن دوره رشد گندم و در نتیجه از دست رفتن فرصت زمان کافی برای فتوسنتز می‌شود که در نهایت بر عملکرد دانه و کیفیت نهایی آن تأثیر می‌گذارد (۲، ۱۲، ۲۹ و ۳۲). هانتینگ‌فرد و همکاران ثابت کرده‌اند که اگر در دوره رشد غلات، میانگین دما بیشتر از ۳۳ درجه سلسیوس باشد، خسارت فیزیولوژی عمده‌ای را متحمل خواهند شد (۱۵). بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که در تمامی شهرهای مورد مطالعه، عملکرد گندم در نتیجه تغییرات اقلیمی کاهش خواهد یافت زیرا در تمامی مناطق میانگین دمایی در بازه‌ای از رشد گیاه بیشتر از ۳۳ درجه

دهد از سال ۱۹۸۰ عملکرد جهانی این محصول به میزان ۵/۵ درصد به دلیل گرم شدن هوا، کاهش یافته است (۱۹). همچنان که بررسی تغییرات دما در طول دوره رشد گندم در دهه‌های آتی در استان اصفهان نشان داد که شهرستان‌های برخوار، اصفهان، نجف‌آباد، چادگان و میمه به ترتیب تعداد روز بیشتری با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس را در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ نسبت به میانگین دو سال اخیر (۱۸-۲۰۱۷) تجربه خواهند کرد. همچنین در مقایسه با شرایط کنونی (میانگین سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸)، بیشترین درصد تغییرات از نظر تعداد روزهای با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در شرایط اقلیمی آینده (۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰)، به ترتیب در شهرهای برخوار، میمه، چادگان، نجف‌آباد و اصفهان مشاهده شد. دامنه درصد تغییرات تعداد روزهای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در شرایط اقلیمی آینده نسبت به شرایط کنونی، بین ۵ درصد (اصفهان) تا ۹۷ درصد (برخوار) متغیر بود. درصد تغییرات در تمام شهرهای مورد مطالعه در RCP-۸/۵ بیشتر از RCP-۴/۵ بود که گویای تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر افزایش دما است. با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن هوا و افزایش دما، گیاه گندم گرمای بیشتری را در دوره رشد خود تجربه می‌کند. بر طبق داده‌های مندرج در جدول ۱، در میان مناطق مورد بررسی، در ابتدا اصفهان و سپس برخوار بیشترین سطح زیر کشت و تولید را در سال‌های ۱۷-۲۰۱۱ به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۱). همچنین نتایج نشان داد که برخوار و اصفهان، تعداد روز بیشتری با دمای بالاتر از ۳۰ درجه را تجربه خواهند کرد لذا می‌توان نتیجه گرفت که بحث تغییر اقلیم در این مناطق و تأثیر آن بر کشت و کار گندم، باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد چرا که در این شرایط، گندم دمای بیشتری را در دوره رشد خود متحمل می‌شود. این موضوع از دو منظر باید مورد بررسی قرار گیرد. از یک‌سو افزایش دما، منجر به افزایش سرعت نمو و کوتاه شدن دوره رشد خواهد شد. لذا باید از ارقامی استفاده کرد که سرعت بیشتری در رشد و تولید عملکرد داشته باشند. همچنین باید در تاریخ کاشت

کنونی افزایش خواهد یافت (جدول‌های ۴، ۵ و ۶). نتایج بیانگر اثر تغییر اقلیم بر تمامی شهرستان‌های مورد مطالعه با اقلیم متفاوت است.

علاوه بر این، پیش‌بینی‌های اقلیمی در این مطالعه برای سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ نشان می‌دهد که شهرستان‌های اصفهان، برخوار، میمه، چادگان و نجف‌آباد به ترتیب بیشترین مقدار تبخیر- تعرق در شرایط اقلیمی آینده را خواهند داشت، اما بیشترین درصد در مقدار تبخیر- تعرق در شرایط اقلیمی آینده نسبت به شرایط کنونی به ترتیب در شهرستان‌های چادگان، نجف‌آباد، برخوار، اصفهان و میمه مشاهده شد. در تمام شهرستان‌های مورد مطالعه درصد تغییرات در RCP-۸/۵ بیشتر از RCP-۴/۵ بود. همچنین بیشترین درصد تغییرات به ترتیب در سال‌های ۲۰۴۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۲۰ مشاهده شد. داده‌های موجود نشان‌دهنده افزایش نیاز آبی گندم در دهه‌های آتی به دلیل افزایش دما در طول دوره رشد گندم است. به‌طور کلی پیش‌بینی می‌شود با تغییر اقلیم و افزایش دما، متوسط نیاز آبی جهان به اندازه ۲۰-۵ درصد افزایش یابد (۸ و ۲۶). اما از آنجایی که بخش قابل توجهی از منابع آبی جهان در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، لازم است تأثیر افزایش دما بر این بخش با جدیت مورد بررسی قرار گیرد. کوچکی و همکاران (۱۸) بیان کرده‌اند که افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در آینده، از طریق افزایش دما منجر به افزایش میزان تبخیر و تعرق و تغییر در طول دوره رشدی گیاه خواهد شد. لذا دما به‌طور مستقیم بر نیاز آبی گیاه تأثیر خواهد گذاشت. حسینی و همکاران (۱۴) در بررسی تأثیر اقلیم بر عملکرد بخش کشاورزی دریافتند که تا اواسط قرن ۲۱ میلادی، تغییر اقلیم باعث افزایش دما و کاهش میزان بارندگی خواهد شد. نتیجه مستقیم چنین اتفاقی، کاهش منابع آب سطحی به میزان ۳/۴ درصد تا سال ۲۰۱۴ و ۸/۱ تا سال ۲۰۷۱ خواهد بود. پیش‌بینی می‌شود که تأثیر تغییر اقلیم در آینده به‌صورت یک فاصله زیاد بین نیاز آبی و موجودی منابع آب نمایان شود که با افزایش دما، این فاصله وسیع‌تر خواهد شد در چنین شرایطی، تغییر اقلیم

سلسیوس خواهد بود. از این نظر شهرستان برخوار به ترتیب با تعداد روزهای ۷۹/۶، ۸۵/۲ و ۸۴/۲ روز در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ در RCP-۴/۵ و تعداد روزهای ۸۰، ۸۳/۲ و ۸۸ روز با دمای بالاتر از ۳۰ درجه در RCP-۸/۵ بیشترین درصد تغییرات را از نظر عملکرد گندم در شرایط اقلیمی آینده شاهد خواهد بود (جدول‌های ۴، ۵ و ۶). علیجانی و همکاران (۳) در بررسی تأثیر بارندگی و دما بر عملکرد گندم آبی در ایران ثابت کردند که بارندگی تأثیر مثبت و دما تأثیر منفی بر عملکرد گندم دارد که سهم رشد بارندگی و دما بر تولید گندم، به ترتیب ۷/۱۱ و ۱/۳۱ درصد است. همچنین کوچکی و همکاران (۱۸) در مطالعه تأثیر اقلیم بر عملکرد گندم آبی کشور با استفاده از مدل شبیه‌سازی رشد و بر اساس سناریوهای مختلف تغییر اقلیم ثابت کردند که افزایش دی‌اکسید کربن در آینده بدون در نظر گرفتن دما، منجر به افزایش عملکرد گندم آبی خواهد شد ولی با توجه به اینکه افزایش غلظت این گاز منجر به افزایش دما می‌شود لذا اگر دمای روزانه به میزان ۳ درجه سلسیوس یا بیشتر افزایش یابد، عملکرد گندم به میزان چشمگیری کاهش خواهد یافت. در تحقیق دیگری مبنی بر بررسی تأثیر اقلیم بر عملکرد گندم و برنج، مشخص شد که در صورت افزایش دما، عملکرد این دو محصول به حدی افت می‌کند که تأثیر مثبت دی‌اکسید کربن بر تولید را خنثی خواهد کرد.

از طرف دیگر می‌توان بیان کرد که شهرستان‌های مورد مطالعه تعداد روزهای کمتری را با دمای زیر صفر درجه سلسیوس در طول دوره رشد گندم تجربه خواهند کرد. همچنان که نتایج جدول‌ها (۴، ۵ و ۶) نشان می‌دهد شهرستان‌های برخوار، اصفهان و میمه به ترتیب بیشترین درصد کاهش در تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر درجه را نسبت به میانگین دو سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ نشان دادند. به‌عبارت دیگر شهرستان‌های نام برده تعداد روزهای کمتری را با دمای کمتر از صفر درجه در مقایسه با میانگین دو سال اخیر، در دوره رشد گندم تجربه خواهند کرد. در حالی که، شهرستان‌های نجف‌آباد و چادگان تعداد روزهای با دمای کمتر از صفر نسبت به میانگین

بین شهرستان‌ها تفاوت قابل توجهی از نظر تعداد روزهای با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس مشاهده شد و به ترتیب اصفهان و برخوار با ۵ و ۹۷ درصد افزایش کمترین و بیشترین تغییرات را خواهند داشت. همچنین مقدار افزایش دما تحت RCP-۸/۵ بیشتر از RCP-۴/۵ خواهد بود. در ارتباط با دماهای کمتر از صفر درجه سلسیوس شهرستان‌های مختلف وضعیت متفاوتی خواهند داشت. تعداد این روزها در شهرستان‌های اصفهان، برخوار و میمه کمتر و در شهرستان‌های نجف‌آباد و چادگان بیشتر خواهد بود. علاوه بر این مقدار تبخیر-تعرق و یا به عبارت دیگر نیاز آبی گندم در دهه‌های پیش رو در شهرستان‌های مورد مطالعه افزایش خواهد یافت. با توجه به نتایج به دست آمده و روند رو به افزایش دما در گذر زمان، بررسی استراتژی‌های لازم برای مقابله با چنین شرایطی مانند تنظیم تاریخ کشت با هدف کشت زود هنگام و کاشت ارقام با دوره رشد کوتاه‌تر، بسیار مهم و ضروری خواهد بود.

منجر به تشدید عوامل مؤثر بر خشکی خواهد شد. برای مثال زمانی که هوا گرم‌تر می‌شود، میزان تبخیر و تعرق گیاه افزایش یافته و در نتیجه میزان هدرروی آب از این طریق بیشتر خواهد شد. هر چه دما بالاتر برود، نیاز آبیاری در هر هکتار و در نتیجه تعداد دفعات آبیاری افزایش خواهد یافت (۳۸). در نتیجه با کشت ارقام زودرس یا ارقامی که دوره رشد کوتاه‌تری دارند و تنظیم تاریخ کاشت، می‌توان دوره رشد گندم را به گونه‌ای تنظیم کرد که مرحله حساس رشد گندم به گرمای زیاد برخورد نکند و خسارت ناشی از افزایش دما و در نتیجه کاهش عملکرد به دلیل افزایش تبخیر و تعرق را کاهش داد یا جبران کرد.

نتیجه‌گیری

به طور کلی در شهرستان‌های مورد مطالعه، گندم گرمای بیشتری را در دوره رشد خود در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ نسبت به میانگین دو سال اخیر (۱۸-۲۰۱۷) تجربه خواهد کرد. ولی

منابع مورد استفاده

- 1- Abbaspour, A. C., M. Faramarzi, S. Seyed Ghasemi and S. H. Yang. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research* 45: W10434.
- 2- Al-Khatib, K. and G. M. Paulsen. 1999. High-temperature effects on photosynthetic processes in temperate and tropical cereals. *Crop Science* 39: 119-125.
- 3- Alijani, F., A. Karbasi and M. Mozaffari Mosnen. 2011. Survey of the effects of climate change on yield of irrigated wheat in Iran. *Agricultural Economics and Development* 19(76): 143-166. (In Farsi).
- 4- Amiri, M. J. and S. S. Eslamian. 2010. Investigation of climate change in Iran. *Journal of Environmental Science and Technology* 3: 208-216.
- 5- Asseng, S., F. Ewert, P. Martre and P. R. Reimund. 2014. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change* 5(2): 143-147.
- 6- Challinor, A. J., J. Watson, D. B. Lobell, S. M. Howden, and N. Chhetri. 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change* 4: 287-291.
- 7- Eshghizadeh, H. R., M. Zahedi and S. Mohammadi. 2018. Differential growth responses of wheat seedlings to elevated CO₂. *Notulae Scientia Biologicae* 10(3): 400-409.
- 8- Fischer, G., F. N. Tubiello, H. van Velthuisen and D. A. Wiberg. 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. *Technological Forecasting & Social Change* 74: 1083-1107.
- 9- Ghamarnia, H. and M. Lorestani. 2018. Evaluation of the efficiency of experimental methods for estimating reference evapotranspiration (based on heat insertion) in different climates (Iran case study). *Journal of Water and Irrigation Management* 8(2): 303-319.
- 10- Gohari, A., S. Eslamian, J. Abedi-Koupaei, A. Massah Bavani, D. Wang and K. Madani. 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment* 442: 405-419.
- 11- Grant, R. F., M. M. Conley, J. W. White and B. A. Kimball. 2011. Controlled warming effects on wheat growth and yield: Field measurements and modeling. *Agronomy Journal* 103(6): 1742.
- 12- Hatfield, J. L., K. J. Boote, B. A. Kimball, L. H. Ziska, R. C. Izaurralde, D. Ort, A. M. Thomson and D. Wolfe. 2011. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agronomy Journal* 103: 351-370.

- 13-Hernandez- Ochoa, I. M., S. Asseng, B. T. Kassie, W. Xionga, R. Robertsons, D. N. Luz Pequeno, K. Sonder, M. Reynolds, D. Ali Babar, A. Molero Milan and G. Hoogenboom. 2018. Climate change impact on Mexico wheat production. *Agricultural and Forest Meteorology* 263: 373-387.
- 14-Hosaini, M. T., A. Siosemarde, P. Fathi and M. Siosemarde. 2007. Application of artificial neural network (ANN) and multiple regression for estimating assessing the performance of dry farming wheat yield in Ghorveh region, Kurdistan Province. *Agricultural Research* 7(1): 41-54. (In Farsi).
- 15-Huntingford, C., F. Lambert, J. Gash, C. Taylor and A. Challinor. 2005. Aspects of climate change prediction relevant to crop productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360: 1999-2009.
- 16-IPCC. 2014. Summary for Policymakers. PP. 1-30. In: Edenhofer O, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, J. C. Minx (Eds.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 17-IPCC. 2014. *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- 18-Koocheki, A., M. Nassiri, H. R. Sharifi, A. Soltani, G. A. Kamali and P. Rezvani Moghaddam. 2003. Simulation of changes in climatic parameters of Iran under doubled CO₂ concentration using general circulation models. *Desert* 8(2): 178-191. (In Farsi).
- 19-Lal, M., K. K. Singh, L. Rathore, G. Srinivasan and S. A. Saseendran. 1998. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. *Agricultural and Forest Meteorology* 89: 101-114.
- 20-Lobell, D. B., W. Schlenker and W. J. Costa-Roberts. 2011. Climate trends and global cropproduction since 1980. *Science* 333(6042): 616-620.
- 21-Mall, R. K., A. Gupta, R. Singh, R. S. Singh and L. S. Rathore. 2006. Water resources and climate change: an Indian perspective. *Current Science* 90(12): 1610-1626.
- 22-Massah Bavani, A. and S. Morid. 2005. The impact of climate change on water resources and agriculture production: A case study of Zayandeh-Rud basin. *Research on Water Resources of Iran* 1: 40-47. (In Farsi).
- 23-Mo, X., S. Liu, Z. Lin and R. Guo. 2009. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 134: 67-78.
- 24-Mohammadi, N., H. R. Eshghizadeh, P. Ehsanzadeh, H. Shariatmadari and S. Bardehji. 2019. The impact of atmospheric temperature and soil nitrogen on some physiological traits and dry matter accumulation of wheat (*Triticum aestivum* cv. Bahar). *Journal of Plant Process and Function* 8(29): 205-217. (In Farsi).
- 25-Nassiri, M., A. Koocheki, G. A. Kamali and H. Shahandeh. 2006. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. *Archeves of Agronomy and Soil Sciences* 52: 113-124.
- 26-Nelson, G., M. Rosegrant, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi, A. Palazzo, M. Batka, M. Magalhaes, R. Valmonte-Santos, M. Ewing and Le D. 2009. *Climate Change Impact on Agriculture and Costs of Adaptation*. International Food Policy Research Institute Washington, D.C. Updated October 2009.
- 27-Ojima, D., L. Garcia, E. Elgaali, K. Miller, T. G. F. Kittel and J. Lackett. 1999. Potential climate change impacts on water resources in the Great Plains. *Journal of the American Water Resources Association* 35(6):1443-1454.
- 28-Ozdogan, M. 2011. Modeling the impacts of climate change on wheat yields in northwestern Turkey. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141: 1-12.
- 29-Porter, J. R. and M. Gawith. 1999. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy* 10: 23-36.
- 30-Tan, K., G. Zhou, L. Xiaomin, J. Guo and S. Ren. 2018. Combined effects of elevated temperature and CO₂ enhance threat from low temperature hazard to winter wheat growth in North China. *Scientific Reports* 8: 4336.
- 31-Tao, F. and Z. Zhang. 2013. Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: a new super-ensemble based probabilistic projection. *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 146-165.
- 32-Wheeler. 1997. Effects of CO₂ and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over four seasons. *European Journal of Agronomy* 25: 43-52.
- 33-Yaghmaei, L., S. Soltani and Khodaghali. 2009. Bioclimatic classification of Isfahan province using multivariate statistical methods. *International Journal of Climatology* 29: 1850-1861.
- 34-You, L., M. W. Rosegrant, S. Wood and D. Sun. 2009. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 1009-1014.
- 35-Zarea, A., A. Koocheki and M. Nassiri. 2006. Trend analysis of yield, production and cultivated area of cereal in Iran during the last 50 years and prediction of future situation. *Iranian Journal of Field Crops Research* 4(1): 49-69. (In Farsi).

- 36-Zhang, Y., X. Chen, C. Zhang, G. Pan and X. Zhang. 2015. Availability of soil nitrogen and phosphorus under elevated CO₂ and temperature in the Taihu Lake region. *China Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177: 343-348.
- 37-Zhao, H., T. Dai, Q. Jing, D. Jiang and W. Cao. 2007. Leaf senescence and grain filling affected by post-anthesis high temperatures in two different wheat cultivars. *Plant Growth Regulation* 51: 149-158.
- 38-Zhou, Y., F. Zwahlen, Y. Wang and Y. Li. 2010. Impact of climate change on irrigation requirements in terms of groundwater resources. *Hydrogeology Journal* 18(7): 1571-1582.

Climate Change Impacts on Climate-Agronomic Indicators of Wheat Growth in an Arid Region: A case study of Isfahan Province, Iran

M. Motamedi¹, H. R. Eshghizadeh^{1*}, A. Nematpour¹, A. Gohari² and B. Safa³

(Received: February 23-2020 ; Accepted: November 25-2020)

Abstract

World climate change is an accepted important subject but its negative effects are severe in arid and semi-arid areas of Iran. So, in the present study, two climate scenarios including RCP 8.5 (critical scenario) and RCP 4.5 (moderate scenario) during 2020, 2030, and 2040 decades and their effects on temperature changes in the wheat growth period in five cities of Isfahan province including Isfahan, Najaf Abad, Chadegan, Burkhar, and Meimeh have been investigated. The survey of temperature changes during wheat growth in the next decades showed that Burkhar, Isfahan, Najaf Abad, Chadegan, and Meimeh, respectively will experience more days with a temperature higher than 30°C in 2020, 2030, and 2040 decades than the mean of two recent years (2017-2018). Furthermore, in comparison with present conditions, the most changes in the number of days with a temperature higher than 30°C in next decades climates (2020, 2030, and 2040 decades) will be in Burkhar, Meimeh, Chadegan, Najaf Abad, and Isfahan, respectively. The range of changes percent in the number of days higher than 30°C in next climate conditions rather than present condition will be varied between 5 percent (Isfahan) till 97 percent (Burkhar). The changes percent in all studied cities were more in RCP 8.5 than RCP 4.5. During wheat growth, the number of days less than zero°C will be less in Isfahan, Burkhar, and Meimeh while will be more in Najaf Abad and Chadegan. The evaporation- transpiration will be increased in the next decades during wheat growth. As a result, planning and using compatibility strategies for each city is important to guarantee wheat production.

Keywords: Food security, Climate change, Global warming, Wheat

1. Department of Plant Production and Genetics, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3. Water for Food Global Institute, University of Nebraska at Lincoln NU.

Corresponding author, Email: hr.eshghizadeh@iut.ac.ir