



Evaluation of temporal patterns of heat stress on forage maize in Iran under future climate scenarios

Ramezani Etedali, H.¹  | Koohi, S.² 

1. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. PhD, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Corresponding Author E-mail: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

(Received: 25 Aug 2025, Revised: 22 Dec 2025, Accepted: 24 Dec 2025, Published online: 24 Dec 2025)

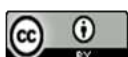
Abstract

In recent years, climate change has led to an increase in the occurrence of heat stress, threatening the sustainability of agricultural systems. Given the high sensitivity of forage maize, as one of the key livestock feed inputs, to maximum temperatures, the temporal patterns of heat stress (including frequency, intensity, and duration) can be strongly affected by global warming. Therefore, the present study was conducted to investigate the changes in temporal patterns of heat stress on forage maize under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios from the Sixth Assessment Report of the IPCC. Results in the base period indicated that the climate model outputs had acceptable accuracy in simulating maximum temperature, with the NRMSE limited to 0.13 °C. Moreover, monitoring future heat stress conditions under climate scenarios revealed an increasing trend at a 90% confidence level in maximum temperature, particularly under the SSP5-8.5 scenario. Overall, the findings showed that the southern and southeastern provinces of Iran (such as Khuzestan, Hormozgan, and Sistan and Baluchestan) are the most vulnerable to increases in heat stress frequency (up to 65%), intensity (above 55 °C), and duration (up to 9 months). Therefore, considering the occurrence of global warming in recent years and the increasing frequency of heat stress on crops, urgent attention, planning, and action are required to adopt effective adaptation strategies. The findings of this study can contribute to sustainable agricultural management under the impacts of global warming.

Keywords: Heat stress, Global warming, Trend analysis, Emission scenarios.

Cite this article: Ramezani Etedali, H. and Koohi, S. (2025). Evaluation of Temporal Patterns of Heat Stress on Forage Maize in Iran Under Future Climate Scenarios. (e237104). Nivar, (), e237104 doi: 10.30467/nivar.2025.543264.1352

E-mail: (1) (2) sakine.koohi3731@gmail.com



ارزیابی تغییرات الگوهای زمانی تنش گرمایی بر ذرت علوفه‌ای در ایران تحت سناریوهای اقلیمی آینده

هادی رضانی اعتدالی^۱ | سکینه کوهی^۲

۱. استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
۲. دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳)

چکیده

در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی منجر به افزایش وقوع تنش‌های گرمایی و تهدید پایداری سیستم‌های کشاورزی شده است. با توجه به حساسیت بالای ذرت علوفه‌ای به عنوان یکی از نهاده‌های کلیدی دامی نسبت به دماهای بیشینه، بنابراین الگوهای زمانی تنش گرمایی (شامل فراوانی، شدت و مدت) می‌تواند به شدت تحت تأثیر گرمایش جهانی قرار گیرد. لذا پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات الگوهای زمانی تنش گرمایی وارد بر ذرت علوفه‌ای تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از گزارش ششم تغییر اقلیم به انجام رسیده است. نتایج در دوره پایه نشان داد که خروجی اقلیمی از دقت مناسبی برای شبیه‌سازی دمای بیشینه برخوردار می‌باشد، به طوری که مقدار شاخص خطای NRMSE به 0.13 درجه سلسیوس محدود شده است. علاوه بر این، پیش بینی شرایط تنش گرمایی تحت سناریوهای اقلیمی در دوره‌های آتی حاکی از وجود روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۰ درصد در دمای بیشینه و تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 است. به طور کلی، براساس نتایج مشخص شد که استان‌های جنوبی و جنوب شرقی کشور (مانند خوزستان، هرمزگان و سیستان و بلوچستان) از بیشترین آسیب‌پذیری نسبت به افزایش فراوانی (تا ۶۵ درصد)، شدت (بیش از ۵۵ درجه سلسیوس) و تداوم (تا ۹ ماه) تنش گرمایی برخوردار می‌باشند. بنابراین با توجه به وقوع گرمایش جهانی در سال‌های اخیر و افزایش فراوانی در بروز تنش‌های گرمایی وارد بر محصولات زراعی، ضرورت توجه به این ریسک اقلیمی و برنامه‌ریزی برای اتخاذ راهکارهای سازگاری بیش از پیش احساس می‌شود. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند در راستای برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار کشاورزی تحت تأثیر گرمایش جهانی مفید واقع شود.

کلیدواژه‌ها: تنش گرمایی، گرمایش جهانی، آزمون روند، سناریوهای انتشار.

۱. مقدمه

وقوع امواج گرما مواجه بوده‌اند (لی و همکاران، ۲۰۲۲). افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حدی همچون تنش‌های گرمایی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و پایداری سیستم‌های کشاورزی در سراسر جهان، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران

در سال‌های اخیر تغییرات اقلیمی منجر به افزایش وقوع رویدادهای اقلیمی شدید و افزایش بی‌سابقه دما در سطح جهانی شده است. مطابق گزارش‌های جهانی، میانگین دمای سطح زمین طی دوره ۱۸۵۰ تا ۲۰۲۰ بیش از 1.09 درجه سلسیوس افزایش یافته و بسیاری از مناطق جهان با افزایش

استناد: رضانی اعتدالی، هادی و کوهی، سکینه. (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات الگوهای زمانی تنش گرمایی بر ذرت علوفه‌ای در ایران تحت سناریوهای اقلیمی آینده. (e237104).

نیوار، ()، 237104 doi: 10.30467/nivar.2025.543264.1352

رایانامه: (۲) sakine.koohi3731@gmail.com



درصد می‌باشد. همچنین براساس نتایج کاهش شدت تنش گرما، با افزایش عملکرد دانه همراه بوده است. رحیمی مقدم و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی ریسک ناشی از تنش گرما بر ذرت دانه‌ای در استان خوزستان و با استفاده از شبیه‌سازی اقلیم آینده (مدل APSIM و سناریوهای RCP) نشان دادند که با در نظر گرفتن متوسط تمام تاریخ‌های کشت، مناطق و دوره‌های آبی، فراوانی وقوع عملکرد اقتصادی، غیر اقتصادی و عملکرد صفر به ترتیب ۴۵/۴، ۱۳/۵ و ۴۱/۲ درصد می‌باشد. همچنین مشخص شد که کاشت زود هنگام در اکثر مناطق به عنوان راهکار سازگارتری برای کاهش آسیب ناشی از افزایش تنش‌های گرمایی شناخته می‌شود. مدحج (۲۰۲۱) در یک مرور فیزیولوژیکی گزارش کرده است که افزایش دما به واسطه تغییرات اقلیمی می‌تواند عملکرد گندم را در سطح جهان حدود ۵/۵ درصد کاهش دهد و تنش گرما فرآیندهای فتوسنتز، تنفس و مبادلات روزنه‌ای را مختل می‌کند که همگی به کاهش عملکرد زیستی و دانه‌ی گیاه می‌انجامند. همچنین وانگ و همکاران (۲۰۲۲) در یک مرور جامع، کاهش عملکرد ذرت تحت تنش گرمایی در مراحل مختلف رشد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مرحله گلدهی حساس‌ترین مرحله به تنش گرمایی است و دماهای بالا در این مرحله می‌تواند منجر به کاهش تعداد دانه و در نتیجه کاهش عملکرد شود. این مطالعه همچنین نشان داد که تنش گرمایی در مرحله پر شدن دانه نیز می‌تواند وزن دانه را کاهش دهد، که برای ذرت علوفه‌ای نیز به دلیل تأثیر بر زیست‌توده حائز اهمیت می‌باشد. گاوایا و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای مبتنی بر آزمایشی چندساله در روسیه نشان دادند وقوع تنش گرما همراه با خشکی در اواخر فصل گل‌دهی و تشکیل دانه‌ی ذرت علوفه‌ای، به طور چشمگیری محصول سیلو شده را کاهش خواهد داد. براساس نتایج مشخص شد که با کاهش بارش در تیر و مرداد و رخداد دماهای بالا، عملکرد ذرت به مقدار معناداری افت نموده است. کامکار و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل‌سازی یکپارچه و روش

محسوب می‌شود (ریچموند و همکاران، ۲۰۲۲؛ IPCC، ۲۰۲۱). تنش گرمایی به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین پیامدهای تغییرات اقلیمی، تأثیرات منفی قابل‌توجهی بر فیزیولوژی گیاهان، مراحل حیاتی رشد و نمو (به‌خصوص گرده‌افشانی و پر شدن دانه)، و نهایتاً عملکرد نهایی محصولات زراعی خواهد داشت (لوبل و همکاران، ۲۰۱۱؛ هتفیلد و پروگر، ۲۰۱۵؛ عزیزی و رحیمی مقدم، ۲۰۲۰). ذرت علوفه‌ای به دلیل نوع گیاه چهارکربنه، اثرات مثبت محدودی از افزایش CO₂ دریافت می‌کند. اما افزایش دماهای بیش از حد و تکرار امواج گرمایی همچنان از عوامل اصلی محدودکننده عملکرد در این محصول به‌شمار می‌آید (فیاضی و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به اهمیت حیاتی ذرت علوفه‌ای به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نهاده‌های دامی در کشور برای تأمین خوراک دام و طیور و حساسیت بالا نسبت به دماهای زیاد به‌ویژه در دوره‌های بحرانی رشد، بنابراین این محصول در معرض ریسک‌های ناشی از وقایع حدی اقلیمی همچون تنش‌های گرمایی قرار دارد (بنایان و همکاران، ۲۰۱۶؛ کوگو و همکاران، ۲۰۱۹).

مطالعات متعددی در سطح جهان و ایران در زمینه ارزیابی آستانه تنش گرمایی و تأثیر آن بر عملکرد غلات به انجام رسیده است. به عنوان مثال، احمدی و میرحاجی (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای با بررسی اثرات وقوع امواج گرمایی وارد بر ذرت در استان قزوین طی دوره ۲۵ ساله منتهی به سال ۲۰۰۷ نشان دادند که در ماه تیر بیشترین تنش گرمایی بر ذرت وارد می‌شود که باعث کاهش کیفیت محصول و یا از بین رفتن گیاه شده است. عزیزی و رحیمی مقدم (۲۰۲۰) در پژوهشی به ارزیابی اثر مخاطرات تنش گرمایی شامل فراوانی و شدت گرما بر عملکرد ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و تعیین دامنه‌ی مخاطرات گرما برای این محصول پرداختند. نتایج نشان داد که دامنه‌ی مخاطرات در منطقه مورد مطالعه به طور میانگین ۹۴/۴ روز، شدت تنش ۳۷/۱ درجه سلسیوس و فراوانی وقوع تنش در طول دوره گلدهی ۶۳/۵

بیشینه روزانه از ایستگاه‌های سینوپتیک مستقر در مراکز استان‌های کشور برای دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ مورد استفاده قرار گرفته است. تنوع اقلیمی و جغرافیایی استان‌ها، امکان تحلیل تغییرات زمانی تنش گرمایی را فراهم نموده و به شناسایی مناطقی با بیشترین آسیب‌پذیری نسبت به افزایش دما کمک خواهد نمود. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲. داده‌های اقلیمی

برای تحلیل دماهای بیشینه روزانه و ارزیابی تغییرات تنش‌های گرمایی، از داده‌های اقلیمی ریزمقیاس‌شده در چارچوب پروژه^۱ NEX-GDDP استفاده شد. این مجموعه داده که توسط ناسا و با هدف حمایت از ارزیابی‌های اقلیمی منطقه‌ای توسعه یافته است، خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) گزارش ششم اقلیمی را با استفاده از روش اصلاح سوگیری و تجزیه مکانی (BCSD^۲) به تفکیک زمانی روزانه و مکانی ۰/۲۵ درجه ریزمقیاس نموده است (تراشر و همکاران، ۲۰۱۲). مدل‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش شامل پنج مدل معتبر از CMIP6 می‌باشد، این مدل‌ها عبارتند از: CanESM5، CNRM-CM6-1، GFDL-ESM4، HadGEM3-GC31-LL و MIROC6. شبیه‌سازی‌های آتی این مدل‌ها تحت دو سناریوی اجتماعی-اقتصادی مختلف یعنی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استخراج شده است. سناریوی SSP2-4.5 بیانگر آینده‌ای با سیاست‌های تعدیل‌یافته در زمینه کاهش گازهای گلخانه‌ای و روند توسعه پایدار است، درحالی‌که SSP5-8.5 نمایانگر آینده‌ای با اتکای بالا بر سوخت‌های فسیلی و عدم اتخاذ سیاست‌های اقلیمی مؤثر می‌باشد (آنیل و همکاران، ۲۰۱۷). به‌منظور به حداقل رساندن عدم قطعیت ناشی از تفاوت‌های ساختاری بین مدل‌های GCM و بهبود تطابق با داده‌های مشاهده شده، از روش میانگین‌گیری وزنی مدل‌ها استفاده شد. در این رویکرد، وزن هر مدل بر اساس توانایی آن در بازتولید داده‌های مشاهداتی دمای بیشینه در دوره پایه

GIS، تأثیر تنش گرمایی در زمان گرده‌افشانی بر تشکیل دانه ذرت تابستانه را در استان گلستان بررسی نمودند. این محققین با تهیه نقشه فراوانی وقوع دماهای بالاتر از آستانه تنش گرمایی در دوره گرده‌افشانی، به کشاورزان در تصمیم‌گیری برای کشت ذرت کمک نمودند. این مطالعه نشان داد که تنش گرمایی می‌تواند به مقدار قابل‌توجهی عملکرد دانه را کاهش دهد.

به‌طور کلی بررسی مطالعات انجام شده تاکنون حاکی از آن است که علی‌رغم دخیل بودن عوامل متنوع (مانند تغذیه خاک، تنظیم آبیاری و زمان کاشت)، تنش گرمایی یکی از اصلی‌ترین محدودکننده‌ها برای عملکرد غلات به‌شمار می‌رود. با توجه به کاهش کمیت و کیفیت زیست توده در ذرت و تحت تأثیر تنش گرمایی، در نتیجه وقوع تنش‌های گرمایی اثرات منفی برای امنیت غذایی در صنعت دامداری نیز در پی خواهد داشت. بنابراین، آگاهی از الگوهای زمانی تنش گرمایی - از جمله فراوانی رخدادها (تعداد روزهای دارای دمای ماکزیمم بالا)، شدت و طول مدت دوره گرما (تعداد روزهای پیاپی گرم) - برای تعیین خطر گرمایی امری ضروری است. در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی روزانه گزارش ششم و تحت دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 (متوسط) و SSP5-8.5 (بدبینانه)، تغییرات الگوهای زمانی تنش گرمایی (شامل: فراوانی، شدت و مدت) وارد بر ذرت علوفه‌ای در سه بازه زمانی آینده نزدیک، میانی و دور نسبت به دوره پایه در سطح کشور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در مقیاس ملی و با تمرکز بر استان‌های مختلف کشور ایران انجام گرفته است. به‌منظور بررسی الگوی زمانی و مکانی وقوع تنش‌های گرمایی، داده‌های مربوط به دمای

^۲ Bias-Correction and Spatial Disaggregation

^۱ NASA Earth Exchange – Global Daily Downscaled Projections

سوگیری‌های ساختاری شده و از سوی بسیاری از مطالعات اقلیمی نیز توصیه شده است (میراکبری و همکاران، ۲۰۱۸؛ موهان و بشکاران، ۲۰۱۹؛ رضانی اعتدالی و همکاران، ۲۰۲۳).

(۱۹۹۷-۲۰۱۴) تعیین گردید. معیار ارزیابی مدل‌ها شاخص ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) نسبت به داده‌های ایستگاهی بود و فرآیند بهینه‌سازی ضرایب وزنی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و ابزار Solver در محیط Excel انجام شده است (موهان و بشکاران، ۲۰۱۹). به‌کارگیری رویکرد تلفیق مدل‌ها به‌جای اتکا بر یک مدل منفرد، باعث افزایش اطمینان‌پذیری نتایج و کاهش



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

رشد اندام زایشی و تشکیل نشاسته با اختلال مواجه می‌شود که منجر به کاهش توانایی گیاه در تشکیل دانه‌های سالم خواهد شد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۷). در یک بررسی انجام شده در مناطق ذرت‌خیز ایران، مشخص شد که هر روز قرارگیری ذرت در معرض دمای بالاتر از ۳۵ درجه سلسیوس در دوره‌گردافشانی می‌تواند عملکرد این گیاه را تا ۶ تا ۷ درصد کاهش دهد (میان‌آبادی و همکاران، ۲۰۰۹).

در اقلیم خشک و نیمه‌خشک همچون بخش قابل توجهی از ایران، افزایش دمای هوا در فصل تابستان که هم‌زمان با دوره رشد ذرت است، منجر به بروز تنش‌های گرمایی پی‌درپی شده که این امر مستقیماً کاهش عملکرد محصول را در پی دارد. مطالعات صورت‌گرفته در کشور نشان می‌دهد که دماهای بالاتر از ۳۵ درجه سلسیوس در مراحل بحرانی رشد ذرت موجب اختلال در فرآیند‌گردافشانی، کاهش نرخ تلقیح، و در نهایت کاهش وزن دانه و عملکرد کل می‌شود

۲-۳. تنش گرمایی

ذرت یکی از محصولات استراتژیک کشاورزی در ایران است که در تأمین خوراک دام، طیور و همچنین صنایع غذایی نقش کلیدی دارد. بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی، سطح زیر کشت ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای در استان‌های مختلف کشور به‌ویژه در استان‌هایی نظیر فارس، تهران، اصفهان، قزوین، خوزستان و خراسان رضوی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است (رضانی اعتدالی و کوهی، ۲۰۲۵). در سال‌های اخیر، توسعه کشت ذرت با هدف تأمین علوفه دامی و کاهش وابستگی به واردات، مورد توجه سیاست‌گذاران بخش کشاورزی قرار گرفته است. با این حال، ذرت از جمله گیاهان زراعی بسیار حساس به دمای بالا به‌ویژه در مراحل‌گردافشانی و تشکیل دانه است. از منظر فیزیولوژیکی، در دماهای بالاتر از آستانه بحرانی، کارکردهای زیستی گیاه نظیر تعادل تفرق-جذب، فتوسنتز،

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

که در آن، n تعداد مشاهدات سری، X_j و X_k به ترتیب داده-های j ام و k ام سری، $\text{sgn}(x_j - x_k)$ تابع علامت، m بیانگر تعداد سری‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد و t معرف فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله می‌باشند.

۲-۵. شاخص‌های ارزیابی دقت خروجی اقلیمی

برای ارزیابی دقت عملکرد خروجی اقلیمی در بازتولید الگوهای دمای بیشینه در دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۱۴) نسبت به مقادیر مشاهداتی در ایستگاه‌های سینوپتیک از سه شاخص آماری معتبر شامل میانگین خطای اریبی (MBE^2) (استانسی و همکاران، ۱۹۸۹)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده ($NRMSE^3$) (هیندمن و کوهلر، ۲۰۰۶) و ضریب همبستگی پیرسون (CC^4) (پیرسون، ۱۸۹۶) استفاده شده است. میانگین خطای اریبی میزان تمایل مدل به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد مقادیر را نشان می‌دهد. مقدار مثبت MBE بیانگر بیش‌برآورد مدل نسبت به داده‌های واقعی، و مقدار منفی آن بیانگر کم‌برآورد می‌باشد. شاخص $NRMSE$ میزان پراکندگی و دقت کلی مدل را نسبت به مقادیر واقعی بیان می‌کند. مقدار کمتر برای $NRMSE$ نشان‌دهنده دقت بالاتر خروجی اقلیمی می‌باشد. ضریب همبستگی پیرسون برای

(بنیان و همکاران، ۲۰۰۵؛ صفری و همکاران، ۲۰۲۵). با توجه به توضیحات فوق آستانه دمایی ۳۵ درجه سلسیوس به عنوان مرز آغاز تنش گرمایی در ذرت، مبنای ارزیابی وقوع، شدت و مدت‌زمان تنش در این پژوهش قرار گرفته است. در این چارچوب، وقوع دماهای بیشینه روزانه بالاتر از این آستانه در طول دوره رشد، به منزله تنش گرمایی تلقی گردیده و شاخص‌هایی نظیر فراوانی، شدت و تداوم این تنش‌ها برای استان‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفته است.

۲-۴. آزمون روند من‌کندال

برای شناسایی روند تغییرات بلندمدت در سری‌های زمانی دمای بیشینه از آزمون غیرپارامتری من-کندال^۱ استفاده شد. این آزمون یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای تحلیل روند داده‌های اقلیمی است و به دلیل عدم نیاز به نرمال بودن داده‌ها و مقاومت در برابر داده‌های پرت، بر سایر روش‌های پارامتری ترجیح داده می‌شود (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۵). آزمون من-کندال بر اساس مقایسه جفتی مقادیر سری زمانی عمل نموده و آماره S از مجموع مقایسه‌های مثبت و منفی بین داده‌ها محاسبه می‌شود. در هر مرحله، مقدار آماره آزمون Z براساس مقدار واریانس محاسبه می‌شود (روابط ۱ تا ۵). در صورتی که مقدار آماره استاندارد شده Z بزرگ‌تر از مقدار بحرانی در سطح اطمینان مشخص باشد (مثلاً در سطح ۹۰ درصد، $|Z| < 1/64$)، فرض صفر مبنی بر عدم وجود روند رد شده و وجود روند صعودی یا نزولی در داده‌ها پذیرفته می‌شود. روند مثبت بیانگر افزایش معنی‌دار متغیر در طول زمان و روند منفی بیانگر کاهش معنی‌دار آن است.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

⁴ Correlation Coefficient

¹ Mann-Kendall

² Mean Bias Error

³ Normal Root Mean Square Error

سطح ایستگاه‌ها برابر با ۰/۲۰- درجه سلسیوس تخمین زده شده است و در حدود ۶۵ درصد ایستگاه‌ها، قدرمطلق خطای اریبی کمتر از ۱ درجه سلسیوس گزارش شده است که حاکی از دقت قابل قبولی خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی دمای بیشینه می‌باشد. با توجه به نتایج بیشترین میزان کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی به ترتیب در ایستگاه‌های همدان و خوزستان می‌باشد که برابر است با ۱۵/۷۵- و ۷/۵۵.

ارزیابی عملکرد خروجی اقلیمی براساس شاخص CC حاکی از آن است که خروجی اقلیمی گزارش ششم توانایی مناسبی در بازتولید روند زمانی و نوسانات دمای بیشینه داشته است. محدوده تغییرات این شاخص در سطح ایستگاه‌ها از ۰/۶۴ تا ۰/۹۹ متغیر است و مقدار متوسط آن برابر با ۰/۹۶ برآورد شده است. در بیش از ۸۵ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه، ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۹۰ گزارش شده است که نشان‌دهنده سازگاری بالا میان خروجی اقلیمی و داده‌های مشاهداتی در طول دوره پایه می‌باشد. براساس نتایج فقط در ایستگاه اصفهان عملکرد مدل نسبتاً ضعیف‌تر می‌باشد. نتایج شاخص NRMSE نیز حاکی از آن است که بازه تغییرات این شاخص در سطح ایستگاه‌ها بین ۰/۰۶ تا ۰/۵۲ در نوسان بوده و مقدار متوسط آن برابر با ۰/۱۳ برآورد شده است. با توجه به نتایج مشخص است که در حدود ۷۵ درصد از ایستگاه‌های مورد بررسی، مقدار شاخص خطای NRMSE کمتر از ۰/۱۵ محاسبه شده است که حاکی از عملکرد مناسب خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی دمای بیشینه می‌باشد. با این حال، مقادیر بالای خطا در ایستگاه‌هایی نظیر خوزستان، همدان و اصفهان ممکن است ناشی از ضعف مدل‌های اقلیمی در بازنمایی فرایندهای فیزیکی سطح-جو و نقش پدیده‌های محلی نظیر تبخیر-تعرق شدید یا اثرات کوهستانی باشد. به‌طور کلی، براساس نتایج به‌دست آمده در دوره پایه، می‌توان چنین عنوان نمود که علی‌رغم عملکرد نسبتاً ضعیف‌تر خروجی اقلیمی حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو گزارش ششم در برخی از ایستگاه‌های مطالعاتی ولی این پایگاه از عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی دمای بیشینه در سطح اغلب ایستگاه‌های مطالعاتی برخوردار بوده است. بنابراین

سنجش شدت و جهت رابطه بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی استفاده می‌شود. مقدار این شاخص بین ۰ و ۱ قرار دارد؛ هر چه مقدار CC به ۱ نزدیک‌تر باشد، خروجی اقلیمی از تطابق بهتری با داده‌های واقعی برخوردار می‌باشد. معادلات مورد استفاده برای هر یک از شاخص‌های فوق، محدوده تغییرات و مقدار بهینه آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در این پژوهش

مقدار بهینه	معادله	شاخص
۱	$\frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(R_i - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}}$	CC
صفر	$\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_i - R_i)^2}}{\bar{R}_i}$	NRMSE
صفر	$\frac{\sum_{i=1}^N G_i - R_i}{N}$	MBE

که در آن، G_i : مقادیر داده‌های اقلیمی، R_i : مقادیر مشاهداتی، N : تعداد داده‌ها، \bar{G} : متوسط داده‌های اقلیمی، \bar{R} : متوسط مقادیر مشاهداتی است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. بررسی عملکرد خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی دمای بیشینه

در این بخش، به منظور ارزیابی دقت عملکرد خروجی اقلیمی گزارش ششم در شبیه‌سازی دمای بیشینه روزانه، سه شاخص آماری شامل MBE، NRMSE و CC بین خروجی مدل و داده‌های مشاهداتی طی دوره پایه در سطح ۳۱ ایستگاه سینوپتیک محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۲، تغییرات مقدار این شاخص‌ها به تفکیک هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه شده است.

براساس نتایج به‌دست آمده، در شبیه‌سازی دمای بیشینه روزانه، مقدار شاخص MBE در سطح ایستگاه‌ها از ۱۵/۷۵- درجه سلسیوس (ایستگاه همدان) تا ۷/۵۵ درجه سلسیوس (ایستگاه خوزستان) متغیر می‌باشد. مقدار متوسط MBE در

سلامت عمومی، نیاز آبی و عملکرد محصولات کشاورزی در این نواحی به همراه داشته باشد.

به طور کلی، نتایج حاصل از آزمون ناپارامتری من-کندال نشان می‌دهد که تحت سناریوی SSP5-8.5 در مقایسه با SSP2-4.5، بروز روند افزایشی در دمای بیشینه در ایستگاه‌های مطالعاتی معنادارتر بوده و شدت آن نیز به‌ویژه در دوره‌های میانی و دور آینده تشدید خواهد شد. این روند در ایستگاه‌های واقع در نواحی جنوبی، جنوب شرقی، و غرب کشور از شدت بیشتری برخوردار است. کاظم‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) نیز در پژوهشی با بررسی روند تغییرات در دمای حداقل، میانگین و حداکثر نشان دادند که وجود روند افزایشی در تغییرات دماهای حداکثر در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد، در حالی که وجود روند افزایشی در دماهای میانگین و حداقل عمدتاً در اقلیم‌های مرطوب مشاهده شده است. بنابراین، توصیه می‌شود که اقدامات لازم در زمینه مدیریت انرژی، برنامه‌ریزی شهری و تاب‌آوری کشاورزی در برابر گرمایش آینده به‌طور جدی مورد توجه سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران قرار گیرد. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که تحت سناریوی SSP2-4.5، روند افزایش دمای بیشینه تدریجی و در اکثر موارد فاقد معناداری آماری قوی می‌باشد. اما در صورت تحقق سناریوی SSP5-8.5، تغییرات اقلیمی از شدت و گستره بیشتری برخوردار خواهد بود و در بلندمدت به بروز گرمایش معنادار در سطح گسترده‌ای از کشور منجر خواهد شد. بر این اساس، لزوم اتخاذ تدابیر سازگاری، مدیریت منابع آبی، و اصلاح الگوی کشت در استان‌هایی با روند افزایشی شدید دما، بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد.

Z به حدود ۰/۹۹ رسیده که نسبت به دیگر ایستگاه‌ها روند چشمگیرتری را نشان می‌دهد، ولی هنوز در سطح آماری معنادار نمی‌باشد.

در سناریوی SSP5-8.5، که به عنوان سناریوی بدبینانه‌تر اقلیمی در نظر گرفته می‌شود، نتایج قابل‌توجه‌تری مشاهده می‌شود. در دوره آینده نزدیک، وضعیت حادث‌تر شده و مقدار Z در بسیاری از ایستگاه‌ها از مرز ۱/۶۴ عبور کرده یا به آن بسیار نزدیک شده است. برای مثال، ایستگاه‌های قم ($Z=1.69$)، هرمزگان ($Z=1.74$)، سیستان و بلوچستان ($Z=1.45$)، خراسان جنوبی ($Z=1.45$) و فارس ($Z=1.25$) دارای روند افزایشی معناداری در دمای بیشینه می‌باشند. این روند افزایشی بیانگر افزایش قابل توجه دمای بیشینه در این مناطق و بروز پتانسیل وقوع موج‌های گرمایی در آینده است. در آینده میانی و تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5، روند افزایش دمای بیشینه واضح‌تر شده است. تقریباً در تمامی استان‌ها مقادیر Z از ۱ فراتر رفته و در برخی استان‌ها نظیر خراسان جنوبی، فارس، هرمزگان و قم به آستانه معناداری ۹۵ درصد نزدیک شده است. این وضعیت حاکی از شتاب‌گیری افزایش دما در نیمه دوم قرن می‌باشد. در دوره دور آینده (۲۰۷۵-۲۰۹۹) نیز این روند افزایشی با شدت بیشتری ادامه دارد، به گونه‌ای که در ایستگاه‌های مورد مطالعه مقدار Z در بازه ۱/۳۷ تا ۲/۷۷ قرار گرفته است. با توجه به نتایج بسیاری از استان‌ها شاهد روند افزایشی شدید و معنادار در دمای بیشینه می‌باشند. بیشترین مقدار Z در ایستگاه هرمزگان ($Z=2.77$)، سیستان و بلوچستان ($Z=2.35$)، بوشهر ($Z=2.41$) و خراسان جنوبی ($Z=2.15$) مشاهده شده است که نشان‌دهنده روند بسیار قوی و معنادار افزایش دمای بیشینه در این مناطق می‌باشد. این وضعیت می‌تواند خطرات قابل‌توجهی برای

سناریو-دوره	یزد	همدان	هرمزگان	مرکزی	مازندران	لرستان	گیلان	گلستان	کهگیلویه و بویراحمد	کرمانشاه	کرمان	کردستان	قم	قزوین	فارس	سیستان و بلوچستان	سمنان	زنجان	خوزستان	خراسان شمالی	خراسان رضوی	خراسان جنوبی	چهارمحال و بختیاری	تهران	بوشهر	اصفهان	البرز	اردبیل	ایلام	آذربایجان شرقی	آذربایجان غربی		
Historical																																	
2025-2049_SSP2																																	
2050-2074_SSP2																																	
2075-2099_SSP2																																	
2025-2049_SSP5																																	
2050-2074_SSP5																																	
2075-2099_SSP5																																	



شکل ۳. نمودار ماتریسی مقدار آماره آزمون ناپارامتری من کندال برای بررسی روند تغییرات دمای بیشینه در آینده در سطح اطمینان ۹۰ درصد

در حدود ۱۷/۰، ۲۴/۳ و ۳۲/۰ درصد گزارش شده است. این روند افزایشی در بسیاری از استان‌ها نیز تکرار شده است. به‌عنوان مثال، در استان فارس، فراوانی وقوع تنش حرارتی از مقدار ۳۰/۶ درصد در دوره پایه، به ترتیب در دوره‌های آینده نزدیک تا دور در سناریوی SSP2-4.5 برابر با ۳۵/۰، ۳۹/۰ و ۴۱/۰ درصد و تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 معادل ۳۸/۷، ۴۲/۳ و ۴۹/۷ درصد بوده است. به‌طور مشابه، در استان خراسان رضوی نیز این مقادیر در دوره پایه ۶/۰ درصد می‌باشد و در دوره‌های آینده به ترتیب به ۲۵/۷، ۳۰/۳ و ۳۳/۰ درصد در SSP2-4.5 و به ۲۶/۷، ۳۳/۳ و ۳۹/۳ درصد در SSP5-8.5 افزایش یافته است.

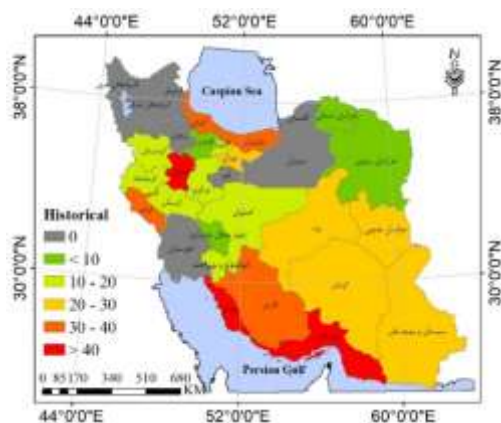
بررسی فراوانی وقوع تنش گرمایی در استان‌های جنوبی و گرم‌سیری کشور از جمله سیستان و بلوچستان، خوزستان، بوشهر و هرمزگان نیز نشان می‌دهد که این مناطق در تمامی دوره‌ها دارای بیشترین میزان تنش بوده‌اند. برای مثال، فراوانی وقوع تنش گرمایی وارد بر ذرت در استان سیستان و بلوچستان در دوره پایه برابر با ۲۵/۰ درصد بوده که در دوره‌های آینده تحت سناریوی SSP5-8.5 به ترتیب معادل ۵۶/۷، ۵۸/۳ و ۶۵/۷ درصد گزارش شده است. در حالی که همین مقادیر تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 برابر با ۵۵/۳، ۵۷/۷ و ۵۸/۳ درصد می‌باشند. این موضوع نشان می‌دهد که در این مناطق، حتی تحت وقوع سناریوی اقلیمی پایدارتر SSP2-4.5 نیز فراوانی وقوع تنش گرمایی بالا خواهد بود. همچنین استان خوزستان که در دوره پایه فاقد وقوع تنش بوده است،

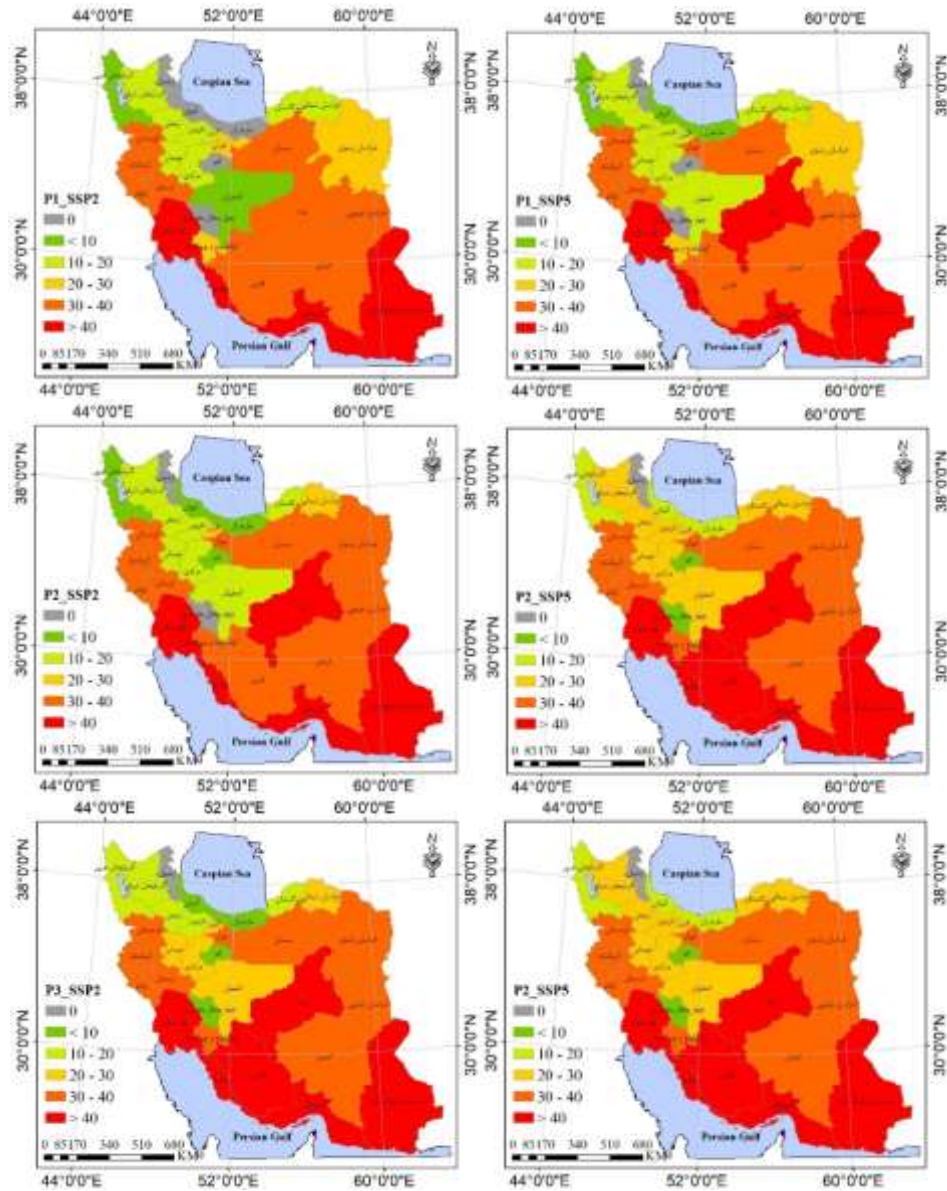
۳-۴. بررسی الگوهای زمانی تنش گرمایی تحت سناریوهای اقلیمی

در این مطالعه به منظور بررسی الگوهای زمانی تنش گرمایی، ابتدا به ارزیابی فراوانی وقوع تنش گرمایی وارد بر ذرت پرداخته شده و نقشه تغییرات مکانی درصد فراوانی وقوع تنش گرمایی به تفکیک استان‌های مورد مطالعه برای دوره پایه و سه دوره آتی تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که فراوانی وقوع تنش‌های گرمایی در اغلب استان‌های کشور از روند افزایشی برخوردار است و این افزایش در دوره‌های میانی و به‌ویژه پایانی قرن جاری، تحت سناریوی پراشتتار SSP5-8.5، با شدت بیشتری بروز خواهد یافت. با توجه به نتایج مشخص است که در دوره پایه، اغلب استان‌ها در طبقات پایین فراوانی قرار داشته‌اند و تعداد زیادی از استان‌ها از جمله آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان، قم، سمنان، گلستان و خوزستان فاقد وقوع تنش گرمایی بوده‌اند. اما با ورود به دوره‌های آینده، وضعیت به‌طور محسوسی تغییر کرده است. برای مثال، فراوانی وقوع تنش گرمایی در استان قزوین که در دوره پایه برابر با ۱/۹ درصد بوده است، در حالی که در دوره‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۹، ۲۰۲۵-۲۰۷۴ و ۲۰۵۰-۲۰۷۴ و ۲۰۷۵-۲۰۹۹ و تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 فراوانی وقوع تنش گرمایی در این استان به ترتیب به ۱۶/۳، ۱۸/۳ و ۲۰/۰ درصد افزایش یافته و تحت سناریوی SSP5-8.5

نکته قابل توجه آن است که تفاوت بین دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره نخست (۲۰۲۵-۲۰۴۹) نسبتاً محدود و در حد چند درصد بوده، اما با گذشت زمان، این تفاوت افزایش یافته و در دوره پایانی به شدت نمایان می‌شود. به‌عنوان مثال، در استان مرکزی فراوانی وقوع تنش در دوره سوم برابر با ۲۰/۷ درصد در SSP2-4.5 و معادل ۳۲/۳ درصد در SSP5-8.5 است که اختلافی معادل ۱۱/۶ درصد را نشان می‌دهد. این مسئله بیانگر آن است که اثرات تجمعی سناریوهای پراشتار مانند SSP5-8.5 در بلندمدت منجر به شرایط اقلیمی بسیار بحرانی‌تری نسبت به مسیرهای توسعه پایدار خواهد شد. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت تداوم روندهای فعلی و عدم کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای، وقوع تنش‌های حرارتی بر ذرت به‌ویژه در استان‌های گرم‌سیر و نیمه‌خشک کشور افزایش قابل توجهی خواهد داشت. این امر نه تنها تولید ذرت بلکه امنیت غذایی کشور را با تهدید جدی مواجه می‌سازد. بنابراین، اتخاذ راهکارهایی نظیر اصلاح الگوی کشت، توسعه ارقام مقاوم به گرما، تغییر تقویم زراعی و افزایش بهره‌وری آب، به‌ویژه در مناطق با فراوانی بالای وقوع تنش، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

در دوره‌های آینده و تحت سناریوی SSP5-8.5 به‌ترتیب در ۵۲/۰، ۵۶/۷ و ۶۴/۰ درصد از مواقع با تنش گرمایی مواجه است، که افزایش بسیار قابل توجهی را نشان می‌دهد. این نتایج با یافته‌های سایر پژوهش‌ها نیز همخوانی دارد که نشان داده‌اند فراوانی دوره‌های خشک و گرم تحت سناریوهای اقلیمی در آینده افزایش خواهد یافت و اثرات گرمایش جهانی در بلندمدت می‌تواند موجب افزایش شدت و فراوانی تنش‌های حرارتی در سطح ملی شود (Ababaei & Ramezani Etedali, 2019; Hosseinabadi et al., 2020; Mirgol et al., 2021). از سوی دیگر، بررسی نتایج حاکی از آن است که در برخی استان‌ها مانند چهارمحال و بختیاری که در دوره پایه فراوانی تنش در حدود ۶/۹ درصد بوده است، در دوره آینده دور و تحت سناریوی SSP5-8.5 به مقدار قابل توجهی معادل ۱۸/۷ درصد رسیده است، که بیانگر گسترش مکانی مناطق تحت تأثیر تنش‌های حرارتی در آینده می‌باشد. به همین ترتیب، در استان‌هایی نظیر یزد، گلستان، لرستان و کرمان نیز افزایش معناداری در فراوانی وقوع مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال، در استان یزد، فراوانی تنش از ۲۴/۱ درصد در دوره پایه به ۳۹/۷، ۴۰/۷ و ۴۲/۳ درصد تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و به‌ترتیب به ۴۱/۳، ۴۶/۳ و ۵۲/۰ درصد در SSP5-8.5 افزایش یافته است.





شکل ۴. تغییرات مکانی فراوانی وقوع تنش گرمایی وارد بر ذرت تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5

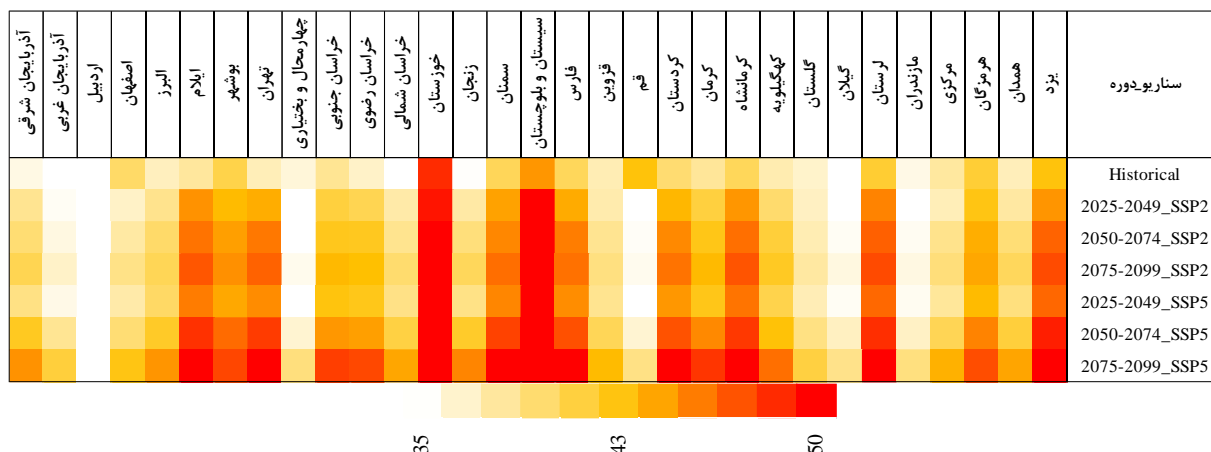
استان‌های جنوبی، جنوب‌غربی، و بخش‌هایی از مرکز ایران، شدت تنش گرمایی تا پایان قرن بیست‌ویکم (۲۰۷۵-۲۰۹۹) تحت سناریوی SSP5-8.5 به صورت قابل توجهی افزایش یافته و به بالای ۵۰ یا حتی ۵۵ درجه سلسیوس رسیده است. برای مثال، در استان‌هایی مانند خوزستان، کرمانشاه، تهران، لرستان، و سیستان و بلوچستان، مقادیر شدت تنش گرمایی در دوره‌ی پایانی در سناریوی SSP5-8.5 به ترتیب به حدود ۵۵/۸، ۵۱/۶، ۵۱/۷، ۵۱/۷ و ۵۷/۵ درجه سلسیوس رسیده است که نشان‌دهنده افزایش بسیار شدید نسبت به دوره پایه می‌باشد. الگوی افزایش فراوانی و شدت تنش گرمایی در

علاوه بر فراوانی وقوع تنش‌های گرمایی، شدت تنش نیز در هر دوره و تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به صورت نمودار ماتریسی در شکل ۵ نشان داده شده است. بررسی نتایج حاکی از آن است که در اغلب استان‌های کشور، شدت تنش گرمایی در هر سه دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی تاریخی افزایش یافته است. این افزایش، هم در سناریوی متوسط و هم در سناریوی بدبینانه اقلیمی مشاهده می‌شود، اما میزان آن در سناریوی SSP5-8.5 به مراتب بیشتر و چشمگیرتر است. نکته حائز اهمیت آن است که در بسیاری از استان‌ها، به ویژه

جنوب و جنوب غرب کشور (به‌ویژه در استان‌های خوزستان، فارس و سیستان و بلوچستان) با یافته‌های پژوهش‌های منطقه‌ای مشابه در جنوب غرب آسیا هم‌خوانی دارد. مطالعات علی‌مزروعی و همکاران (۲۰۲۱) و سعید و همکاران (۲۰۲۳) نیز افزایش قابل توجه روزهای با دمای بیش از ۳۵ درجه سانتی‌گراد و طولانی‌تر شدن دوره‌های موج گرما را در نیمه دوم قرن حاضر گزارش کرده‌اند. این امر نشان‌دهنده آن است که در صورت تداوم الگوی کنونی انتشار گازهای گلخانه‌ای، کشاورزی این مناطق به‌ویژه در زمینه کشت ذرت در معرض تهدید جدی قرار خواهد گرفت. در مقابل، استان‌های واقع در نواحی شمالی و غربی کشور، از جمله اردبیل، گیلان، مازندران، چهارمحال و بختیاری و آذربایجان غربی، مقادیر پایین‌تری از شدت تنش گرمایی را در هر دو سناریو تجربه نموده‌اند. این اختلاف را می‌توان به عوامل اقلیمی نظیر عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، و تأثیرات جغرافیای محلی نسبت داد. به‌عنوان نمونه، در استان اردبیل، شدت تنش گرمایی از مقدار ۳۰/۶ در دوره پایه به حدود ۳۴/۲ درجه سلسیوس در دوره پایانی تحت سناریوی SSP-5 8.5 افزایش یافته که نشان‌دهنده یک افزایش نسبی اما محدود در مقایسه با سایر نقاط کشور می‌باشد.

براساس نتایج در بسیاری از استان‌ها، شدت تنش گرمایی در هر سه دوره‌ی آینده نسبت به قبل افزایش نشان داده و این افزایش در دوره‌ی سوم (۲۰۷۵-۲۰۹۹) به اوج خود رسیده است. در بعضی استان‌ها مانند تهران، ایلام، یزد و قم، جهش نسبتاً شدیدی از دوره دوم به سوم دیده می‌شود که می‌تواند بیانگر ورود به دوره‌ای از تشدید تأثیرات تغییر اقلیم باشد. به‌عنوان مثال، در استان قزوین که مقدار شدت تنش گرمایی در دوره پایه برابر با ۳۷/۳ درجه سلسیوس می‌باشد در دوره آینده دور و تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5 8.5 به ترتیب به ۳۹/۰ و ۴۳/۲ درجه سلسیوس افزایش یافته است. بدین ترتیب، در سناریوی بدبینانه، استان قزوین با

افزایش حدود ۶ درجه‌ای مواجه خواهد بود که این افزایش تدریجی و پیوسته به‌ویژه در دوره‌های دوم و سوم نشانگر قرار گرفتن این استان در محدوده‌ی خطر متوسط تنش گرمایی در آینده می‌باشد. در مجموع مشخص است که روندی فزاینده و نگران‌کننده در شدت تنش گرمایی در سراسر کشور، به‌ویژه در نیمه جنوبی و مرکزی وجود دارد. در همین راستا، دیهیمی‌فرد و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی با ارزیابی خطر تنش گرمایی وارد بر ذرت در ۱۶ استان از کشور تحت سناریوهای گزارش پنجم تغییر اقلیم نشان دادند که خطر تنش گرمایی در مناطق گرم کشور در آب و هوای آینده در حدود ۱۰۰ درصد خواهد بود و به‌دلیل افزایش تنش‌های گرمایی، کاهش عملکردی در حدود ۰/۸۳ تن در هکتار در ذرت دور از انتظار نمی‌باشد. همچنین رحیمی‌مقدم و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی در سطح استان خوزستان تأکید نمودند که تنش گرمایی به‌عنوان محدودکننده تولید ذرت خواهد بود که با یافته‌های این پژوهش در خصوص استان‌های جنوبی هم‌خوانی دارد. تفاوت‌های مشاهده‌شده بین شمال و جنوب کشور را می‌توان به تفاوت در آلیدوی سطحی، پوشش گیاهی و انتقال توده‌های هوای گرما از نواحی جنوبی (مانند شبه‌جزیره عربستان) نسبت داد. زیتیس و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود به این مورد اشاره داشته‌اند که تغییرات کاربری و توسعه شهری با کاهش پوشش گیاهی و افزایش سطح حرارتی موجب تشدید جزایر حرارتی می‌شوند و انتقال هوای گرم نقشی مهم در پراکنش توزیع گرما دارند. این روند به‌طور خاص در سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 که معرف تداوم الگوهای توسعه ناپایدار و افزایش شدید گازهای گلخانه‌ای است، مشهودتر بوده و می‌تواند پیامدهای نامطلوبی برای پایداری تولید محصولات کشاورزی، به‌ویژه ذرت، به‌همراه داشته باشد. از این رو، ضرورت دارد تا با اتخاذ سیاست‌های سازگاری و کاهش انتشار، مخاطرات آتی تا حد امکان کنترل و مدیریت شوند.



شکل ۵. تغییرات شدت تنش گرمایی وارد بر ذرت تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5

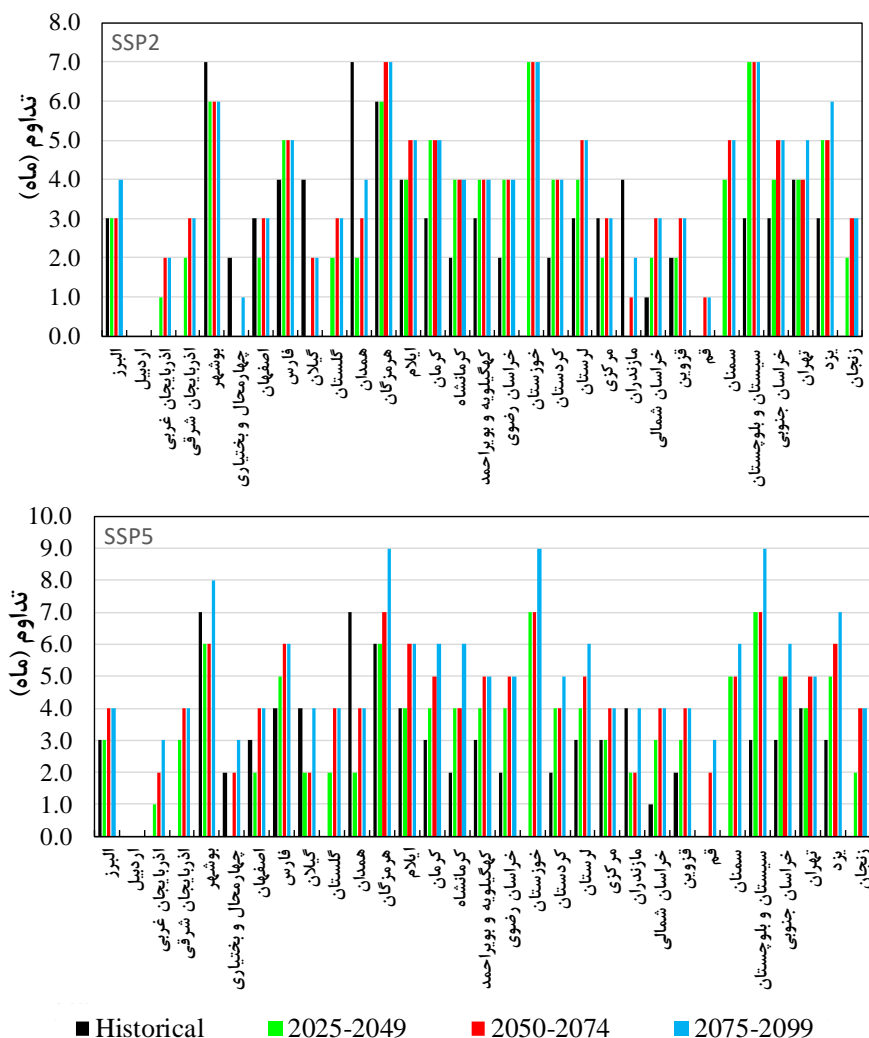
همچون آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، گلستان، سمنان و زنجان، که در دوره پایه با مقدار "صفر" مواجه بودند، در آینده نزدیک و تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 برابر با ۱، ۲، ۲، ۷، ۴ و ۲ ماه رسیده است. این تغییر بیانگر گسترش دامنه‌ی مکانی تأثیرات اقلیم گرم‌شونده است که حتی استان‌های سردسیر شمال غرب و سواحل خزری نیز از آن بی‌نصیب نمانده‌اند.

در دوره‌ی آینده میانی (۲۰۵۰-۲۰۷۴)، روند شدت‌گیری تنش گرمایی ادامه یافته و حتی تشدید شده است. برای مثال، تداوم تنش گرمایی در استان قم که در دوره پایه با تنش گرمایی مواجه نبوده است، در دوره آینده میانی برابر با ۲ ماه می‌باشد. همچنین استان‌هایی چون آذربایجان غربی، کرمان، کرمانشاه، کردستان، خراسان شمالی و یزد با افزایش ۲ تا ۳ ماه در تداوم تنش گرمایی نسبت به دوره پایه مواجه می‌باشند که گواهی بر پیوستگی روند افزایش مخاطرات اقلیمی می‌باشد. از سوی دیگر، در استان‌های جنوبی همچون هرمزگان و سیستان و بلوچستان، تداوم تنش گرمایی همچنان در حد ۷ ماه باقی مانده، که می‌تواند نشانه‌ای از رسیدن به آستانه‌های تحمل بیولوژیکی گیاه ذرت باشد. در دوره‌ی آینده دور، به‌ویژه تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5، اوج این بحران قابل مشاهده است. برای مثال، در استان هرمزگان، تداوم در وقوع تنش گرمایی از ۶ در دوره پایه، به ۹ ماه در دوره سوم رسیده است. همچنین در استان‌های بوشهر و خوزستان، این عدد به ترتیب به ۸ و ۹ ماه رسیده که بیانگر تنش شدید و پیوسته‌ی اقلیمی بر محصول ذرت می‌باشد.

علاوه بر فراوانی وقوع و شدت، تداوم تنش گرمایی وارد بر ذرت نیز به تفکیک سناریوهای اقلیمی بررسی و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است. با بررسی تداوم تنش گرمایی وارد بر ذرت در استان‌های مختلف کشور طی سه دوره‌ی آینده و مقایسه با دوره پایه تحت دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5، می‌توان الگوی قابل توجهی از شدت گرفتن مخاطرات اقلیمی در حوزه‌ی کشاورزی، به‌ویژه برای محصول استراتژیک ذرت مشاهده نمود. با توجه به نتایج در دوره‌ی آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۹)، نسبت به دوره پایه، افزایش معناداری در تعداد ماه‌هایی که ذرت در معرض تنش گرمایی قرار دارد در بیشتر استان‌های کشور رخ داده است. به‌عنوان مثال، در استان‌هایی مانند خوزستان، هرمزگان، بوشهر، و سیستان و بلوچستان، تعداد ماه‌های تحت تنش گرمایی در دوره پایه به ترتیب برابر با ۰، ۶، ۷ و ۳ ماه بوده، در حالی که در آینده نزدیک و تحت سناریوی SSP5-8.5، تداوم تنش در استان‌های مذکور به ترتیب ۷، ۶، ۶ و ۷ ماه می‌باشد. این افزایش در مناطق جنوبی و جنوب شرقی کشور بیانگر آن است که ممکن است ذرت در این مناطق تقریباً در تمام طول فصل رشد با تنش گرمایی مواجه باشد که می‌تواند اثرات مخربی بر رشد، عملکرد و کیفیت این محصول داشته باشد. نکته قابل توجه این است که استان‌هایی که در دوره‌ی تاریخی اساساً هیچ ماهی از تنش گرمایی را تجربه نمی‌کردند، با آغاز دوره‌های آینده، وارد محدوده‌ی آسیب‌پذیری شده‌اند. به‌عنوان مثال، تداوم تنش گرمایی در استان‌هایی

گرمایی افزوده شده است، تداوم و گسترش ماه‌های تحت تنش، زنگ خطری جدی برای امنیت غذایی، پایداری معیشت کشاورزان و ظرفیت تولید ذرت کشور به‌شمار می‌رود.

بنابراین، الگوی تغییر در تداوم تنش گرمایی از یک افزایش تدریجی ولی پایدار پیروی نموده است. به‌عبارت دیگر از دوره اول تا سوم، در بیشتر استان‌ها، به‌ویژه در سناریوی SSP5-8.5، به‌طور پیوسته بر تعداد ماه‌های تحت تنش



شکل ۶. تغییرات تداوم تنش گرمایی وارد بر ذرت تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5

آسیب‌پذیر و اتخاذ راهکارهای سازگاری در برابر تنش‌های گرمایی آینده حائز اهمیت است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات الگوهای زمانی تنش گرمایی (شامل فراوانی، شدت و مدت) وارد بر ذرت علوفه‌ای تحت سناریوهای اقلیمی SSP5-8.5 و SSP2-4.5 گزارش ششم تغییر اقلیم در سطح استان‌های کشور ایران به انجام رسیده است. برای بررسی روند تغییرات دمای پیشینه در دوره‌های آتی از آزمون ناپارامتری من‌کنندال استفاده شده است. بررسی عملکرد خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی دمای پیشینه در دوره پایه

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش تغییرات اقلیمی و تأثیرات مخرب آن بر پایداری سیستم‌های کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، ارزیابی الگوهای زمانی تنش گرمایی بر محصولات استراتژیک همچون ذرت علوفه‌ای به عنوان یک ضرورت برای امنیت غذایی و مدیریت ریسک‌های اقلیمی مطرح می‌باشد. با توجه به حساسیت بالای ذرت علوفه‌ای نسبت به دماهای پیشینه و وقوع امواج گرمایی، بنابراین نیاز به برنامه‌ریزی مداوم برای شناسایی مناطق

از عدم قطعیت ذاتی مدل‌های اقلیمی و بازخوردهای سطح زمین می‌باشد که لازم است در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرد.

منابع

1. Ababaei, B., and Ramezani Etedali, H., 2019. Investigating climate change over 1957–2016 in an arid environment with three drought indexes. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3–4), pp.2977–2992. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02793-0>
2. Ahmadi, M., and Mirhaji, H., 2012. Evaluation of Thermal Stress Effects on Corn (Case Study: Qazvin Province). *Environmental Sciences*, 9(3). (In Persian).
3. Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, S., Saeed, F., and Ismail, M. 2021. Future changes in temperature and precipitation over the Arabian Peninsula based on CMIP6 multimodel simulations. *Earth Systems and Environment*, 5(2), pp.421–439.
4. Azizi, K., and Rahimi-Moghaddam, S. 2020. Simulating the risk of heat stress on grain maize production under arid and semi-arid conditions. *Environmental Sciences*, 18(3), pp.85–105. (In Persian).
5. Bannayan, M., Hoogenboon, G., and Crout, N. M. J., 2004. Photo thermal impact on maize performance: assimilation approach. *Ecological Modelling*, 180(2–3), pp.277–290.
6. Bannayan, M., Paymard, P., and Ashraf, B., 2016. Vulnerability of maize production under future climate change: possible adaptation strategies. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(13), pp.4465–4474. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7659>
7. Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Azizi, K., and Haghghat, M. 2022. Increased heat stress risk for maize in arid-based climates as affected by climate change: threats and solutions. *International journal of biometeorology*, 66(7), pp.1365–1378. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02282-6>
8. Fayazi, H., Zeinali, E., Soltani, A., and Torabi, B., 2022. The Effect of Climate Change on Yield Potential and Water

حاکمی از دقت قابل قبول در اغلب ایستگاه‌های مطالعاتی می‌باشد (مقدار متوسط شاخص MBE برابر با ۰/۲۰- درجه سلسیوس، NRMSE برابر با ۰/۱۳ و CC برابر با ۰/۹۶ برآورد شده است). همچنین، ارزیابی روند تغییرات دمای پیشینه نشان داد که تحت سناریوی SSP5-8.5، روند افزایشی معنادار در دمای پیشینه (با آماره Z بیش از ۱/۶۴ در بسیاری از ایستگاه‌ها) به‌ویژه در دوره‌های میانی و دور آینده و در نواحی جنوبی و جنوب‌شرقی کشور مشهود است، درحالی‌که تحت سناریوی SSP2-4.5 این روند تدریجی و اغلب فاقد معناداری آماری قوی می‌باشد. یافته‌های پژوهش در رابطه با تغییرات فراوانی وقوع تنش گرمایی حاکمی از افزایش قابل توجه آن در اغلب استان‌ها، به‌ویژه در مناطق جنوبی مانند سیستان و بلوچستان (از ۲۵/۰ درصد در پایه به ۶۵/۷ درصد در دوره آینده دور تحت SSP5-8.5) و خوزستان (از ۰ به ۶۴/۰ درصد) می‌باشد. همچنین، شدت تنش گرمایی در آینده افزایش یافته و در استان‌هایی نظیر خوزستان و سیستان و بلوچستان به بیش از ۵۵ درجه سلسیوس در دوره آینده دور تحت SSP5-8.5 رسیده است. بررسی تداوم تنش نیز بیانگر گسترش ماه‌های تحت تأثیر (تا ۹ ماه در استان‌های جنوبی) و ورود استان‌های شمالی به محدوده آسیب‌پذیری می‌باشد. بررسی تغییرات مکانی الگوهای تنش گرمایی بیانگر آن است که استان‌های جنوبی، جنوب‌شرقی و مرکزی کشور (مانند هرمزگان، بوشهر و خوزستان) از آسیب‌پذیری بالاتری نسبت به نواحی شمالی و غربی برخوردارند. نتایج به‌دست آمده حاکمی از افزایش ریسک تنش گرمایی بر ذرت علوفه‌ای تحت تأثیر تغییرات اقلیمی می‌باشد؛ همچنین لزوم توجه هر چه بیشتر برنامه‌ریزان و مسئولان برای مدیریت منابع، اصلاح الگوی کشت، توسعه ارقام مقاوم و اتخاذ سیاست‌های سازگاری به‌منظور حفظ پایداری تولید علوفه و امنیت غذایی کشور را پررنگ است. ذکر این نکته لازم است که هم‌سویی نتایج این پژوهش با مطالعات معتبر ملی و منطقه‌ای، اعتبار نتایج حاصل از میانگین‌گیری مدل‌های اقلیمی را تقویت می‌کند. با این حال، دامنه تغییرات برآورد شده همچنان تابعی

- tle/rank-correlation-methods/oclc/3827024
17. Kogo, B., Kumar, L., Koech, R., and Langat, P., 2019. Modelling Impacts of Climate Change on Maize (*Zea mays* L.) Growth and Productivity: A Review of Models, Outputs and Limitations. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7, pp.76–95. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.78006>
 18. Li, K., Pan, J., Xiong, W., Xie, W., and Ali, T., 2022. The impact of 1.5 °C and 2.0 °C global warming on global maize production and trade. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22228-7>
 19. Lobell, D. B., Bänziger, M., Magorokosho, C., and Vivek, B., 2011. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nature Climate Change*, 1(1), pp.42–45. <https://doi.org/10.1038/nclimate1043>
 20. Madhaj, A., 2021. Physiology of heat stress in wheat. *Crop Physiology Journal*, 13(51), pp.176–201. (In Persian).
 21. Mann, H. B., 1945. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), pp.245–259. <https://doi.org/doi.org/10.2307/1907187>
 22. Mianabadi, A., Mousavi-Baygi, M., Sanaeinejad, H., and Nezami, A., 2009. Studying and mapping of heat stress affecting on crops in Khorasan Razavi using GIS-In Persian. *Journal of Water and Soil*, 23(2), pp.104–114.
 23. Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., MohseniSaravi, M., Khosravi, H., and MortezaieFarizhendi, G., 2018. Performance of Series Model CMIP5 in Simulation and Projection of Climatic Variables of Rainfall, Temperature and Wind Speed (Case Study: Yazd). *Physical Geography Research Quarterly*, 50(3), pp.593–609. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2018.248177.1007156>. (In Persian).
 24. Mirgol, B., Nazari, M., Etedali, H. R., and Zamanian, K., 2021. Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi-arid Urmia Lake Basin under a changing climate. *Meteorological Applications*, 28(4), pp.1–19. <https://doi.org/10.1002/met.2009>
 25. Mohan, S., and Bhaskaran, P. K., 2019. Evaluation of CMIP5 climate model Productivity of Forage Maize in Iran. *Journal of Crops Improvement*, 24(4), pp.1247–1263. <https://doi.org/10.22059/jci.2022.334981.2648>. (In Persian).
 9. Gaevaya, E., Ilyinskaya, I., Bezuglova, O., Klimenko, A., Taradin, S., Nezhinskaya, E., Mishchenko, A., and Gorovtsov, A., 2023. Influence of Heat Stress and Water Availability on Productivity of Silage Maize (*Zea mays* L.) under Different Tillage and Fertilizer Management Practices in Rostov Region of Russia. *Agronomy*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy13020320>
 10. Hatfield, J. L., and Prueger, J. H., 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, pp.4–10.
 11. Hosseinabadi, S., Yaghoobzadeh, M., Amirabadizadeh, M., and Foroozanmehr, M., 2020. Meteorological Drought Assessment in Future Periods by Using of the Data of the Fifth Report of Climate Change (Case Study: Zabol and Shiraz Cities). *Journal of Arid Regions Geographics Studies*, 10(40), pp.78–87. (In Persian).
 12. Hyndman, R. J., and Koehler, A. B. 2006. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), pp.679–688.
 13. IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
 14. Kamkar, B., Feyzbakhsh, M. T., Mokhtarpour, H., Barbir, J., Grahić, J., Tabor, S., and Azadi, H., 2023. Effect of heat stress during anthesis on the Summer Maize grain formation: Using integrated modelling and multi-criteria GIS-based method. *Ecological Modelling*, 481. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110318>
 15. Kazemzadeh, M., Noori, Z., Jamali, S. and Abdi, A. M.. 2022. Forty years of air temperature change over Iran reveals linear and nonlinear warming. *Journal of Meteorological Research*, 36, pp.462–477. <https://doi.org/10.1007/s13351-022-1184-5>
 16. Kendall, M. G., 1975. *Rank Correlation Methods* (4th Editio). London : Griffin. <https://doi.org/https://www.worldcat.org/ti>

- <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03885-6>
32. Saeed, F., Almazroui, M., Islam, M. N., and Ismail, M. 2023. Projected changes in extreme temperature events over Southwest Asia using CMIP6 models. *Climate Dynamics*, 60(3), pp.975–990.
 33. Safari, F., Etedali, H. R., Kaviani, A., and Khosravi, L., 2025. Investigating the Trend of Temperature Changes and Evaluating the Relationship Between Temperature with Yield and Biomass (Case Study: Forage Maize in Qazvin). *Journal of Water and Soil Science*, 28(4). (In Persian).
 34. Stanski, H. R., Wilson, L. J., and Burrows, W. R., 1989. *Survey of Common Verification Methods in Meteorology* (2nd ed.). World Meteorological Organization.
 35. Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., and Duffy, P. B., 2012. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), pp.3309–3314. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3309-2012>
 36. Wang, N., Liu, Q., Ming, B., Shang, W., Zhao, X., Wang, X., Wang, J., Zhang, J., Luo, Z., and Liao, Y., 2022. Impacts of Heat Stress around Flowering on Growth and Development Dynamic of Maize (*Zea mays* L.) Ear and Yield Formation. *Plants*, 11(24). <https://doi.org/10.3390/plants11243515>
 37. Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., and Asseng, S., 2017. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(35), pp.9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>
 38. Zittis, G., Almazroui, M., Alpert, P., Ciais, P., and Cramer, W. et al., 2022. Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Reviews of Geophysics*, 60(3). <https://doi.org/10.1029/2021RG000762>
 - projections for surface wind speed over the Indian Ocean region. *Climate Dynamics*, 53(9–10), pp.5415–5435. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04874-2>
 26. O’Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., and Solecki, W., 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, pp.169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
 27. Pearson, K., 1896. *Mathematical Contributions to the Theory of Evolution.—On a Form of Spurious Correlation Which May Arise When Indices Are Used in the Measurement of Organs.* *Proceedings of the Royal Society of London*, 60, pp.489–498.
 28. Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., and Deihimfard, R., 2018. Risk assessment of heat stress to grain maize in Khuzestan province under climate change. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 11(3), pp.749–764. <https://doi.org/10.22077/escs.2017.801.1158>
 29. Ramezani Etedali, H., and Koochi, S., 2025. Assessing the Production of Cereals Exposed to Drought Due to Climate Change in Iran. *Journal of Water and Soil Science*, 29(1). (In Persian).
 30. Ramezani Etedali, H., Koochi, S., and Partovi, Z., 2023. Evaluation of Ensemble Climate Model development methods based on CMIP5 to investigate the potential of water harvesting from air humidity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), pp.1609–1625. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.364087.669553>. (In Persian).
 31. Richmond, J. D., Shulski, M. D., Yang, H., and Elmore, R. W., 2022. Evaluation of long-term degree-days estimated with several methods for corn in Nebraska, USA. *Theoretical and Applied Climatology*, 147, pp.1635–1648.