

ارزیابی اثرات فرین‌های اقلیمی بر تولید گندم و جو در استان آذربایجان غربی

آزاد توحیدی سردشت^{۱*}، سعید جهانبخش اصل^۲، علی محمد خورشید دوست^۳، محمد دارند^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران.

۲ و ۳- استاد، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، ایران.

۴- استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه سنندج، ایران.

چکیده

در دهه‌های اخیر مطالعات متعددی نقش گرمایش زمین را بر عناصر بارش و دما در سراسر جهان نشان داده‌اند. با وجود این اگرچه این پژوهش‌ها نقش اقلیم‌های گوناگون بر تولیدات کشاورزی در مقیاس‌های مختلف را نشان می‌دهند ولی مطالعات اندکی به تاثیر تغییرات آب و هوایی بر عملکرد محصول پرداخته‌اند. مطالعه حاضر با هدف شناخت ارتباط بین روند تغییرات فرین‌های اقلیمی بارش و دما بر میزان عملکرد تولید گندم و جو در آذربایجان غربی انجام شده است. بدین منظور از شاخص‌های مختلف فرین‌های دمایی و بارشی استفاده شد و تأثیرات زمانی و مکانی تغییرات آب و هوایی بر تولید دو محصول گندم و جو در دوره آماری (۱۹۸۴-۲۰۲۱) تجزیه و تحلیل گردید. نتایج نشان دادند که افزایش غالب در میانگین حداکثر و حداقل دما در بیشتر ایستگاه‌های استان آذربایجان غربی در سه دهه گذشته با روند گرم شدن شبانه همراه بوده است. دماهای حدی و دامنه تغییرات دمای روزانه شاخص‌های محدود کننده محیطی هستند که بر تولید محصولات گندم و جو دیم در استان آذربایجان غربی تأثیر منفی می‌گذارند. شاخص‌های فرین رخداد بارش همبستگی مثبت و معنی‌دار و شاخص‌های فرین دما عملکرد منفی با عملکرد محصول دیم نشان دادند.

کلید واژه‌ها: آذربایجان غربی، فرین دما، فرین بارش، عملکرد گندم و جو.

مقدمه

خاورمیانه و شمال آفریقا افزایش شرایط خشکسالی و روند گرمایش منطقه‌ای مورد انتظار را به میزان ۰/۲ تا ۰/۵ درجه سلسیوس در هر ده سال نشان می‌دهد (Ahmadalipour and Moradkhani, 2018). با افزایش فراوانی شب‌ها و روزهای گرم، منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا از اواسط قرن بیستم، شب‌ها و روزهای سرد کمتر، مقادیر دمای فرین بالاتر و روند گرمایش قابل توجه و مداوم را تجربه کرده است (Driouech et al., 2020). پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده نشان می‌دهد که رویدادهای آب و هوایی فرین چالشی بزرگ‌تر از آنچه در حال حاضر برای تولیدکنندگان کشاورزی ایجاد می‌کند، خواهد بود (Shahzad et al., 2021). با توجه به افزایش رویدادهای فرین مرتبط با آب و هوا در سرتاسر جهان، پیش‌بینی و ارزیابی تأثیرات آن‌ها بر عملکرد محصول، موضوعی حیاتی برای امنیت غذایی است (Kogo et al., 2021). با توجه به ماهیت محلی آب و هوا، تعیین این اثرات در مقیاس محلی موثرتر است (Powell et al., 2016). پدیده‌های آب و هوایی شدید، مانند رویدادهای یخبندان ($C \leq 0^\circ$) و تنش گرمایی، به طور قابل توجهی بر عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد (Raza et al., 2019). این شرایط آب و هوایی خطرات قابل توجهی را برای بهره‌وری کشاورزی ایجاد می‌کند و نیاز به استراتژی‌های مدیریتی مؤثر برای تضمین تولید محصول پایدار و سودآور دارد (Habib-ur-Rahman et al., 2022). هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC, 2021) گزارش داد که تغییرات آب و هوایی عامل اصلی افزایش وقوع رویدادهای فرین آب و هوایی در بسیاری از مناطق در سراسر جهان است. در این راستا نی و همکاران (Nie et al., 2019) دریافتند که بارندگی و دما به طور مستقیم بر کیفیت، عملکرد و ارزش اقتصادی غلات تأثیر می‌گذارد. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC, 2018) خاطر نشان می‌کند که دما، بارش و روندهای زمانی در توسعه محصولات کشاورزی بسیار مهم هستند. تغییرات آب و هوایی می‌تواند در مقیاس جهانی و همچنین در سطح منطقه‌ای رخ دهد (IPCC, 2018). افزایش دما، فصل رشد محصولات را کوتاه می‌کند و نهایتاً بر فتوسنتز تأثیر می‌گذارد (Marklein et al., 2020). همچنین تغییرات آب و هوایی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محصول و شیوه‌های مدیریتی و همچنین اقتصاد ملی و محلی داشته باشد (Minoli et al., 2022). مطالعات نشان می‌دهد که پتانسیل تولید غلات ممکن است با افزایش مداوم دما و

پدیده‌های انسانی و طبیعی به طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی اخیر قرار گرفته اند (IPCC, 2021). این تغییرات می‌تواند تأثیر شدیدی بر شرایط زندگی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک در سراسر جهان داشته باشد (El-Rawy et al., Jake et al., 2020., 2020). به طوری که به دلیل تغییرات آب و هوایی، چرخه هیدرولوژیکی منجر به سیل، خشکسالی و سایر پدیده‌های مخرب زیاد شده است (IPCC, 2021). در طول سی سال گذشته، زمین به طور قابل توجهی در مقایسه با دهه‌های قبل گرم شده است و تغییرات آب و هوایی اکنون تهدیدی جدی برای جامعه است (Dahal et al., 2018; Dai et al., 2016). تغییر اقلیم با تغییر دمای هوا و میانگین بارندگی بر عوامل آب و هوایی دیگر مانند رطوبت، باد، فشار هوا و پوشش ابر تأثیر می‌گذارد (IPCC, 2021) و اثرات قابل توجهی بر سلامت عمومی، تولید برق آبی، گردشگری، صنایع نساجی، تامین آب و امنیت غذایی در سطح جهانی و محلی دارد (Adisa et al., 2018). همچنین تغییرات آب و هوایی به طور قابل توجهی بخش‌های مختلف جامعه به ویژه امنیت آب و غذایی را تحت تأثیر قرار داده است (Mirzabaei et al., 2023). کمبود آب و غذا از مسائل جهانی است که تأثیر شدیدی بر مناطق خشک و نیمه خشک دارد (Golla, 2021). علاوه بر این، پیش‌بینی می‌شود که رشد جمعیت پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۵۰ از ۹ میلیارد نفر فراتر رود، همراه با کاهش دسترسی به زمین‌های قابل کشت، که یک چالش مهم برای تضمین امنیت غذایی این جمعیت است (Lan et al., 2023). ارزیابی اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر کشاورزی و تامین آب یک نگرانی عمده برای سیاستگذاران و دانشمندان است (Roy et al., 2022). علاوه بر این، گرمایش جهانی به طور قابل توجهی الگوهای توزیع دما (Cheshmehzangi, 2020) و بارش (Liu & Allan, 2013) را تغییر می‌دهد. مکان‌هایی که محصولاتی مانند گندم و جو در آن تولید می‌شوند تحت تأثیر تغییرات این الگوها قرار خواهند گرفت. به عنوان مثال، انتظار می‌رود سطح تولید گندم در معرض خطر دمای بسیار بالا در طول مراحل رشد بحرانی تا سال ۲۰۳۰ دو برابر و تا سال ۲۰۵۰ سه برابر شود (Baek et al., 2022). بنابراین، تجزیه و تحلیل رویدادهای بارش فرین یک موضوع مهم در اقلیم‌شناسی است (Gimeno et al., 2022). تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده برای منطقه

از داده‌های بلندمدت چند ایستگاهی شامل دمای هوا و بارندگی روزانه و بررسی رابطه بین شاخص‌های فرین اقلیمی و نوسانات تولید محصول جو و گندم در شرایط دیم و آبی تحت سناریوهای مختلف در استان آذربایجان غربی است.

فرضیات تحقیق

- ۱- شاخص‌های فرین دما و بارش بر میزان عملکرد کشت گندم و جو در مناطق مورد مطالعه تاثیر گذار هستند.
- ۲- روند تغییرات در پارامترهای حدی دما و بارش منطقه معنی دار می باشد.
- ۳- عملکردهای هر دو کشت گندم و جو وابستگی یکسانی به فرین‌های اقلیمی نشان می دهند.

روش شناسی

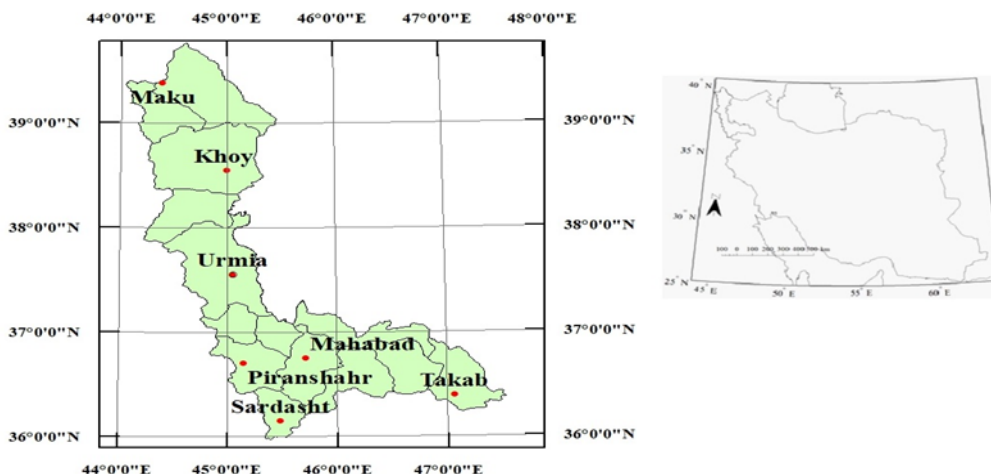
منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه پژوهش، استان آذربایجان غربی در شمال غرب کشور است که ۲/۶۵ درصد از کل مساحت ایران را تشکیل می‌دهد، این استان توپوگرافی متنوعی دارد به طوری که مناطق پست و دشت حدود ۲۱ درصد و ارتفاعات نزدیک به ۶۳ درصد از مساحت استان را تشکیل می‌دهند (Hoseinpour et al., 2024). آذربایجان غربی با میانگین بارندگی سالانه ۳۶۱.۱ میلی متر دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم است به طوریکه متوسط دمای دی ماه ۱.۷ - درجه سلسیوس و متوسط دمای مرداد ماه به ۲۴.۸ درجه سلسیوس می‌رسد (Shahhosein et al., 2017). بخش کشاورزی آذربایجان غربی تقریباً ۲۹.۶ درصد از اقتصاد استان را به خود اختصاص داده است (Ghaderi et al., 2024). با داشتن یک میلیون هکتار زمین مناسب برای کشت، حدود ۵.۶ درصد از تولیدات کشاورزی کشور را تشکیل می‌دهد (Ghaderi et al., 2024). در آذربایجان غربی ۳۸۰ هزار هکتار از اراضی زراعی برای تولید گندم استفاده می‌شود. از این میزان ۹۰ هزار هکتار آبیاری و ۲۹۰ هزار هکتار مابقی به روش دیم کشت می‌شود (Doratotaj et al., 2022). سطح زیرکشت جو در آذربایجان غربی در مجموع ۴۲ هزار و ۵۰۰ هکتار است. از این میزان ۱۳۵۰۰ هکتار آبی است و ۲۹۰۰۰ هکتار باقی مانده برای تامین آب متکی به بارندگی است (Fatemi et al., 2019). در این تحقیق مجموعه داده ای شامل داده‌های بارندگی و حداقل و حداکثر دما از هفت

میانگین دمای سالانه کاهش یابد (Högy et al., 2013). در سرتاسر جهان، تغییر پذیری بارش افزایش یافته است که منجر به افزایش بارندگی در بیشتر مناطق مرطوب شده است در حالی که مناطق خشک خشکی بیشتری را تجربه می‌کنند (Pendergrass et al., 2017). بنابراین، تأثیر تغییر اقلیم بر کشاورزی در مناطق مختلف به دلیل تفاوت در شدت و نوع آب و هوای محلی، و همچنین انعطاف پذیری متفاوت کشاورزان متفاوت است (Bai et al., 2022). افزایش آگاهی در مورد تأثیر شرایط آب و هوایی فرین بر تولید محصولات کشاورزی و ایجاد یک سیستم نظارت جامع برای ارزیابی این اثرات به فوریت مورد نیاز است (Zhao et al., 2023). بر اساس مجموعه‌ای از مدل‌های رشد محصول، هر یک درجه سلسیوس افزایش دمای جهانی عملکرد محصول جهانی گندم را تا ۶ درصد کاهش دهد (Lobell and Burke, 2023). توزیع جهانی و بهره‌وری دام و محصولات اغلب تحت تأثیر عوامل مختلف آب و هوایی از جمله نور خورشید، سرعت باد، دما، رطوبت و بارندگی است (IPCC, 2021). در نتیجه، تغییرات اقلیمی اثرات فوری و بلندمدت بر بخش کشاورزی دارد و پیش‌بینی می‌شود که تهدیدات مهمی برای امنیت غذایی در سطوح منطقه‌ای، محلی و جهانی ایجاد کند (Zhu et al., 2019). به نظر می‌رسد که چالش‌های مرتبط با تغییرات آب و هوایی که کشاورزی با آن مواجه است در آینده نزدیک بیشتر خواهد شد (Chenu et al., 2017). بسیاری از مطالعات تأثیر گرمایش زمین را بر دمای جهان و همچنین الگوهای بارندگی نشان داده‌اند. با این وجود، درک تأثیرات مکانی و زمانی تنوع آب و هوا بر عملکرد محصول در مقیاس‌های مختلف ضروری است (Challinor et al., 2014). ایران کشوری است که ۶۵ درصد آن خشک و ۲۵ درصد آن نیمه خشک است و با میانگین بارندگی سالانه ۲۵۰ میلی متر، به طور مداوم با کمبود آب مواجه بوده است (Solaymani and Badripour, 2018). بیشتر تولیدات کشاورزی ایران از مناطق خشک و نیمه خشک تامین می‌شود که تقریباً ۷۷ درصد از کل تولید را تشکیل می‌دهد (Mesgaran et al., 2017). تأثیر تغییر اقلیم بر محصولات کشاورزی در مناطق آسیب پذیر و تأثیر آن بر شرایط بازار، قیمت گذاری و واردات و صادرات این محصولات مشهود است (Ding et al., 2022). لذا با توجه به اهمیت موضوع، هدف اصلی این پژوهش بررسی روندهای منطقه‌ای، با تجزیه و تحلیل شاخص‌های فرین اقلیمی حاصل

کامل بودن مجموعه داده هنگام انتخاب داده‌ها برای تجزیه و تحلیل شاخص‌های فرین در نظر گرفته شده است. آمار عملکرد محلی گندم و جو آبی و دیم در همین مدت از اداره کل جهاد کشاورزی استان آذربایجان غربی دریافت شد.

ایستگاه هواشناسی آذربایجان غربی جمع‌آوری شد (شکل ۱). این مجموعه بیش از ۳۰ سال داده را از سال ۱۹۸۵ تا پایان سال ۲۰۲۱ در بر می‌گیرد (جدول ۱) که از سازمان هواشناسی کشور (<https://data.irimo.ir>) تهیه شده است. طول دوره و



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی

جدول ۱: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی در این پژوهش

ردیف	ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (m)
۱	ماکو	۴۴.۲۳	۳۹.۲۲	۱۴۱۱.۲
۲	خوی	۴۴.۵۹	۳۸.۳۳	۱۱۰۳.۴
۳	ارومیه	۴۵.۳	۳۷.۳۹	۱۳۲۸
۴	پیرانشهر	۴۵.۸	۳۶.۴۱	۱۴۴۳.۵
۵	مهاباد	۴۵.۴۲	۳۶.۴۵	۱۳۵۱.۸
۶	سردشت	۴۵.۱۷	۳۶.۵	۱۵۵۶.۸
۷	تکاب	۴۷.۵	۳۶.۲۳	۱۸۱۷.۲

(2022). بر اساس ویژگی‌های اقلیمی آذربایجان غربی، ۲۲ شاخص شامل ۱۱ شاخص دما و ۱۱ شاخص بارش برای تجزیه و تحلیل انتخاب شد (جدول ۲). هدف اصلی روش کنترل کیفی به کار گرفته شده توسط RCLimindex، تشخیص خطاهای محاسباتی، به ویژه آنهایی است که از ورود دستی داده‌ها ناشی می‌شوند. در ابتدا، کل مجموعه داده جمع‌آوری می‌گردد و سری داده‌های ایستگاه برای تجزیه و تحلیل فرین بر اساس کامل بودن داده‌ها و طول دوره آنها انتخاب می‌شوند. معیار کامل بودن اجازه می‌دهد تا چهار مورد داده از دست رفته در سال وجود داشته باشد (Frimpong et al., 2022). کد '۹۹.۹' برای جایگزینی مقادیر منفی در اختلاف دمای روزانه (بین حداکثر و حداقل)، و همچنین بارندگی منفی یا

کنترل کیفیت داده‌ها و تجزیه و تحلیل‌های آماری قبل از استفاده از برنامه RCLimindex برای تجزیه و تحلیل، از یک فرآیند کنترل کیفیت داده برای تأیید صحت داده‌ها استفاده شد (Ghanim et al., 2023). برنامه RCLimindex توسط بخش تحقیقات آب و هوای خدمات هواشناسی کانادا توسعه یافته است. این برنامه یک ابزار کاربرپسند برای محاسبه مجموعه‌ای جامع از ۲۷ شاخص کلیدی بارش فرین و دما، و همچنین شاخص‌های مبتنی بر آستانه دلخواه که توسط کاربران تنظیم شده است را ارائه می‌دهد (Frimpong et al., 2022). شاخص‌های RCLimindex به طور گسترده در سراسر جهان برای ارزیابی و تجزیه و تحلیل تغییرات در رویدادهای فرین آب و هوایی استفاده شده است (Frimpong et al.,

شد. برای ارزیابی معنی داری آماری از آزمون‌های دو طرفه با آستانه $p \leq 0.05$ استفاده شد (Moore and McCabe, 2006). رویز-آلوارز و همکاران (Ruiz-Alvarez et al., 2019) از روش درون‌یابی با وزن معکوس فاصله (IDW) برای تخمین توزیع فضایی فصلی روندها استفاده کردند. این روش فرض می‌کند که مقادیر مکان‌های نزدیک تأثیر بیشتری بر درونیابی نسبت به مقادیر مشاهدات دورتر دارند. بنابراین در این پژوهش نیز از این روش استفاده شد.

نتایج

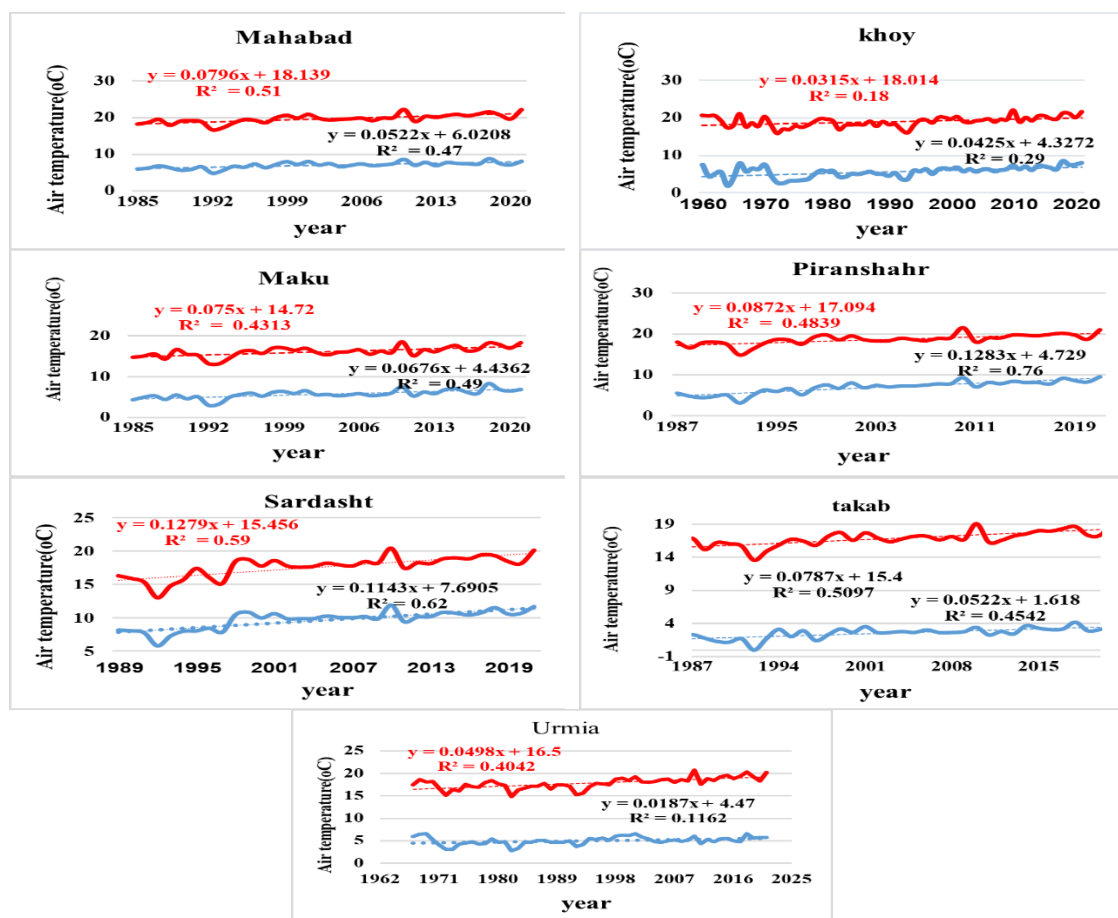
روندهای شاخص‌های فرین دما

شکل ۲ روند خطی و توزیع زمانی میانگین سالانه کمینه (به رنگ آبی) و بیشینه (قرمز) دمای هوا را برای ایستگاه‌های منتخب در استان آذربایجان غربی نشان می‌دهد. این ایستگاه‌ها براساس موقعیت جغرافیایی و کیفیت داده‌ها انتخاب شدند. تمامی ایستگاه‌ها روند مثبتی را در میانگین حداکثر دمای سالانه (TMAX) نشان دادند. بیشترین افزایش در ایستگاه سردشت (۰.۱۲۷۹ درجه سلسیوس در سال) و پس از آن ایستگاه پیرانشهر (۰.۰۸۷۲ درجه سلسیوس در سال) و ایستگاه خوی کمترین افزایش (۰.۰۳۱۵ درجه سلسیوس در سال) مشاهده شد. روند میانگین میانگین کمینه دمای سالانه TMIN در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه مثبت بود و بیشترین افزایش در ایستگاه پیرانشهر (۰/۱۲۸۳ درجه سلسیوس در سال) و ایستگاه سردشت (۰/۱۱۴۳ درجه سلسیوس در سال) مشاهده شد. کمترین افزایش در ایستگاه ارومیه با روند ۰.۰۱۸۷ درجه سلسیوس در سال به ثبت رسید. تجزیه و تحلیل هر هفت ایستگاه هواشناسی حاکی از روند صعودی ۱۰۰ درصدی میانگین TMAX و TMIN در تمامی ایستگاه‌ها است که نشان‌دهنده افزایش مداوم میانگین سالانه حداقل و حداکثر دما در آذربایجان غربی است.

داده‌های از دست رفته استفاده شده است (Klein Tank et al., 2009). علاوه بر این، تکنیک‌های کنترل کیفیت برای تشخیص نقاط پرت در دمای حداکثر و حداقل روزانه و همچنین در داده‌های بارندگی استفاده شده است. در این مطالعه، برای سری‌های دما، مقادیر پرت به عنوان مقادیر بیش از چهار انحراف معیار بالاتر یا پایین‌تر از میانگین برای هر ایستگاه تعریف شد (Ghanim et al., 2023). نقاط داده خارج از این محدوده به عنوان بالقوه اشتباه پرچم‌گذاری، به صورت دستی بررسی و به صورت موردی تنظیم شدند (Klein Tank et al., 2009). نقاط پرت بارندگی عمدتاً از انباشت مشاهدات گمشده در طول چند روز یا دوره‌های غیرمعمول طولانی بدون بارندگی ناشی می‌شود (Dos Santos et al., 2022). همانطور که توسط کلاین تانک و همکاران (Klein Tank et al., 2009) توصیف شده است، ایستگاه‌های نزدیک برای مقایسه نقاط پرت انتخاب شدند. در طول کنترل کیفیت داده‌ها، ارزیابی یکنواختی فضایی بسیار مهم است، زیرا سری‌های زمانی آب و هوایی اغلب جهش‌های مصنوعی را به دلیل تغییر در مکان ایستگاه، تجهیزات یا روش‌های مشاهده نشان می‌دهند (Liu et al., 2018). به این منظور، تاریخچه ابر داده ایستگاه برای زمانی که در دسترس بود، بررسی شد. پس از کنترل کیفی سری‌های شاخص‌های فرین برای هر ایستگاه، تحلیل‌های آماری برای شناسایی روندها و ارزیابی اهمیت آن‌ها در سطح ۵ درصد انجام شد ($p \leq 0.05$). آزمون روند ناپارامتری من - کندال یک روش موثر است زمانی که مقادیر گمشده در سری زمانی وجود داشته باشد، تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و به دلیل انعطاف‌پذیری و استحکام در برابر داده‌های گمشده در این مطالعه استفاده شده است (OUFRIGH et al., 2023). علاوه بر این، نرخ تغییر برای شاخص‌های آستانه با استفاده از تخمین‌گر روند Theil-Sen، یک روش ناپارامتری که برای کمی کردن شیب روند در سری‌های زمانی استفاده می‌شود، تعیین شد (Muia et al., 2024). این دو آزمون برای ارزیابی تغییرات اقلیمی و الگوهای آن در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Dai et al., 2016). همچنین از ضریب همبستگی پیرسون (r) برای ارزیابی روابط بین شاخص‌های بارش شدید و دما و عملکرد محصول (گندم و جو) استفاده

جدول ۲. شاخص‌های دما و بارش فرین مورد استفاده در این مطالعه

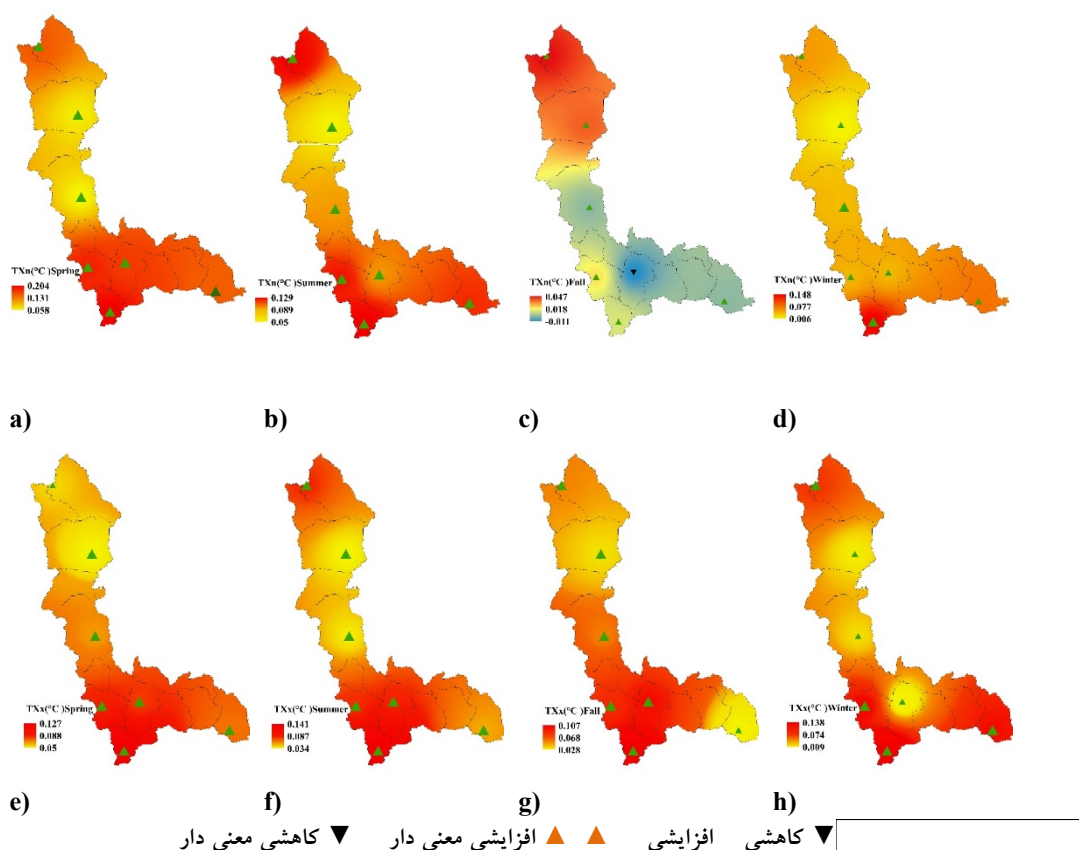
Indices	Name	Definition	Units
TMAXmean	Mean maximum	Monthly mean value of daily maximum temperature	°C
TMINmean	Mean minimum	Monthly mean value of daily minimum temperature	°C
SU25	Summer days	Annual count when daily max temperature > 25 °C	Days
ID0	Iced days	Annual count when daily max temperature < 0 °C	Days
TR20	Tropical nights	Annual count when daily min temperature > 20 °C	Days
FD0	Frost days	Annual count when daily minimum temperature < 0°C	Days
TXx	Max Tmax	Monthly maximum value of daily max temperature	°C
TNx	Max Tmin	Monthly maximum value of daily min temperature	°C
TXn	Min Tmax	Monthly minimum value of daily max temperature	°C
TNn	Min Tmin	Monthly minimum value of daily min temperature	°C
GSL	Growing season length	Annual (1st Jan to 31st Dec in NH, 1st July to 30th June in SH) count between first span of at least 6 days with TG > 5 °C and first span after July 1 (January 1 in SH) of 6 days with TG < 5 °C	Days
DTR	Diurnal temperature range	Monthly mean difference between daily max and min temperature	°C
RX1day	Max 1-day precipitation amount	Monthly maximum 1-day precipitation	mm
RX5day	Max 5-day precipitation amount	Monthly maximum consecutive 5-day precipitation	mm
SDII	Simple daily intensity index	The ratio of annual total precipitation to the number of wet days (≥ 1 mm)	mm
R10mm	Number of heavy precipitation days	Annual count when precipitation ≥ 10 mm	Days
R25mm	Number of heavy precipitation days	Annual count when precipitation ≥ 25 mm	Days
CDD	Consecutive dry days	Maximum number of consecutive days when precipitation < 1 mm	Days
CWD	Consecutive wet days	Maximum number of consecutive days when precipitation ≥ 1 mm	Days
R95p	Very wet days	Annual total precipitation from days > 95th percentile	Mm
R99p	Extremely wet days	Annual total precipitation from days > 99th percentile	Mm
PRCPTOT	Annual total wet-day precipitation	Annual total precipitation from days ≥ 1 mm	Mm



شکل ۲. توزیع زمانی میانگین سالانه حداکثر (TMAXmean) و حداقل (TMINmean) دمای هوا در ایستگاه‌های مورد مطالعه

در تمامی ایستگاه‌ها نشان داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که شمارش سالانه روزهای با حداکثر دمای روزانه بالای ۲۵ درجه سلسیوس در همه ایستگاه‌ها افزایش یافته است و ۱۰۰ درصد ایستگاه‌ها (جدول ۵) روند صعودی آماری معنی‌داری را نشان می‌دهند. شاخص روز یخبندان (ID_0) روند منفی معنی‌داری را در چهار مورد (۵۷٪) نشان داد، در حالی که شاخص شب گرمسیری (TR_{20}) در پنج مورد (۷۱٪) روند مثبت قوی را نشان داد (جدول ۳ و ۵ به ترتیب).

شکل ۳ توزیع فضایی فصلی مقادیر حداقل (TX_n) و حداکثر (TX_x) شاخص‌های حداکثر دمای روزانه را در تمام ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. شکل ۳ الف- ف روند افزایشی حداقل و حداکثر دما را در تمامی ایستگاه‌ها در تمام فصول سال نشان می‌دهد، به جز ایستگاه ارومیه در پاییز که روند نزولی از خود نشان داد. جدول ۳ روند سالانه شاخص‌های دمای شدید هوا را برای ایستگاه‌های مختلف آذربایجان غربی نشان می‌دهد. شاخص روزهای تابستان (SU_{25}) روندی مثبت و معنی‌دار آماری را در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p \leq 0.05$)



شکل ۳. a-h توزیع فضایی روندهای فصلی حداقل ماهانه حداکثر دمای روزانه (TX_n) و حداکثر ماهانه حداکثر دمای روزانه (TX_x) (درجه سلسیوس در سال) استان آذربایجان غربی

نشان می‌دهد (جدول ۳). برعکس، شاخص طول فصل رشد (GSL) روند مثبتی را در همه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد، در حالی که شاخص FD_0 به طور مداوم روند منفی را نشان می‌دهد (جدول ۳). همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است، همه ایستگاه‌ها روند صعودی بسیار معنی‌داری را در شاخص GSL نشان دادند. روند شاخص‌های TX_x و TX_n

تعداد سالانه روزهای با حداقل دمای روزانه بالای ۲۰ درجه سلسیوس در ۱۰۰ درصد ایستگاه‌ها افزایش دارد که نشان دهنده روند گرمایش شبانه در آذربایجان غربی است (جدول ۵). شاخص روزهای یخبندان (FD_0) که تعداد سالانه روزهایی را که دمای آنها کمتر از صفر درجه سلسیوس است را دنبال می‌کند، روند منفی معنی‌داری را در همه ایستگاه‌ها

TR20 افزایش دمای شبانه استان آذربایجان غربی را در سال‌های اخیر بیشتر تایید می‌کند. افزایش TNn به اثر گلخانه‌ای، از جمله سطوح بالاتر بخار آب در مناطق آبی و افزایش انتشار جهانی CO₂ و CH₄ نسبت داده می‌شود (Hartmann et al., 2013). محدوده دمایی روزانه (DTR) در دو ایستگاه خوی و پیرانشهر روند منفی معنی‌داری و در سه ایستگاه ارومیه، مهاباد و سردشت روند مثبت معنی‌داری را نشان داد (جدول ۳). به طور کلی، ۲۱ درصد (۲ ایستگاه) روند منفی و ۷۹ درصد (۵ ایستگاه) روند مثبت (از نظر آماری معنی‌دار یا بی‌معنی) را نشان دادند (جدول ۳ و ۵).

در جدول ۳ به تفصیل نشان داده شده است. TXx روند مثبت معنی‌داری را در تمامی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد (جدول ۳) که نشان دهنده افزایش حداکثر مطلق دما در آذربایجان غربی است. در همین حال، TXn در همه ایستگاه‌ها روند مثبتی را نشان داد که در دو ایستگاه (۲۹٪) روند صعودی معنی‌داری داشت و در پنج ایستگاه (۷۱٪) روند مثبت اما غیر معنی‌داری داشت (جدول ۳). جدول ۳ و شکل ۴ شاخص‌های مربوط به مقادیر حداقل دمای روزانه فرین، از جمله حداقل ماهانه (TNn) و حداکثر (TNx) را نشان می‌دهد. شاخص TNn روند مثبتی را در تمام ایستگاه‌ها نشان داد که نشان‌دهنده افزایش حداقل دما است (جدول ۳). در مقابل، شاخص

جدول ۳. روند سالانه شاخص‌های فرین دمای هوا در ایستگاه‌های استان آذربایجان غربی. مقادیر برجسته و قرمز نشان دهنده معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ است (p ≤ ۰.۰۵)

ایستگاه	SU25	ID0	TR20	FD0	GSL	TXx	TXn	TNx	TNn	DTR
ماکو	0.724	-0.795	0.333	-0.666	1	0.086	0.057	0.068	0.065	0.008
خوی	0.473	-0.147	0.125	-0.375	0.32	0.0388	0.013	0.055	0.001	-0.009
ارومیه	0.666	-0.205	0.001	-0.111	0.266	0.036	0.038	0.001	0.035	0.031
پیرانشهر	0.682	-0.188	0.307	-0.568	0.75	0.085	0.040	0.084	0.001	0.027
مهاباد	0.843	-0.277	0.703	-1.294	1.678	0.082	0.041	0.088	0.2	-0.040
سردشت	0.980	-0.959	1.47	-1.75	1.5	0.106	0.142	0.066	0.081	0.019
تکاب	0.8	-0.804	0.001	-0.531	0.623	0.05	0.078	0.049	0.148	0.025

روندهای مرطوب متوالی (CWD) روند منفی معنی‌داری را در دو ایستگاه نشان داد (جدول ۴). در ۵۷ درصد از ایستگاه‌ها (۴ ایستگاه) روند مثبت غیرمعنی‌دار برای شاخص CDD مشاهده شد، در حالی که ۴۳ درصد از ایستگاه‌ها (۳ ایستگاه) روند منفی آماری غیرمعنی‌داری را نشان دادند (جدول ۵). برای شاخص CWD، ۲۹ درصد از ایستگاه‌ها (۲ ایستگاه) روند منفی آماری معنی‌داری را نشان دادند، در حالی که ۷۱ درصد (۵ ایستگاه) روند منفی آماری غیرمعنی‌دار داشتند (جدول ۵). بر اساس جداول ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که آذربایجان غربی در دهه‌های اخیر شاهد افزایش چشمگیر شاخص‌های فرین از جمله Rx1day، SDII، R20mm، R95p، R99p و CDD بوده است. برعکس، کاهش قابل توجهی در شاخص‌های Rx5day، R10mm، CWD و PRCPTOT مشاهده شد.

روندهای شاخص‌های فرین بارش

جدول ۴ روند سالانه شاخص‌های فرین بارش را برای ایستگاه‌های مختلف استان آذربایجان غربی نشان می‌دهد. صرف نظر از نوع شاخص، تنها تعداد کمی از ایستگاه‌ها روندهای آماری معنی‌داری را نشان می‌دهند. این الگو به دلیل تغییرات مکانی-زمانی متنوع در بارش انتظار می‌رفت. تجزیه و تحلیل شاخص حداکثر بارش یک روزه (Rx1day) هیچ روند آماری معنی‌داری در هیچ ایستگاهی نشان نداد. شاخص حداکثر بارش ۵ روزه (Rx5day) تنها در یک ایستگاه روند منفی معناداری را نشان داد. در مقابل، نسبت کل بارندگی سالانه (PRCPTOT) به تعداد روزهای مرطوب (SDII) روند بسیار مثبتی را در دو ایستگاه نشان داد. شاخص روزهای خشک متوالی (CDD) روند آماری معنی‌داری را در هیچ یک از ایستگاه‌ها نشان نداد. با این حال، شاخص

جدول ۴. روند سالانه شاخص‌های فرین بارش در ایستگاه‌های آذربایجان غربی. مقادیر برجسته و قرمز نشان دهنده معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ است ($p \leq 0.05$)

ایستگاه	Rx1day	Rx5day	SDII	R10mm	R20mm	CDD	CWD	R95p	R99p	PRCPTOT
ماکو	0.160	0.221	0.023	0.039	0.011	-0.301	-0.001	0.924	0.013	1.042
خوی	0.0384	0.051	0.011	-0.001	0.002	0.025	-0.025	0.121	0.011	-1.130
ارومیه	-0.021	-0.131	0.007	-0.071	0.001	0.4	-0.001	0.14	0.011	-1.408
پیرانشهر	0.118	-0.220	0.007	-0.033	-0.001	0.461	-0.003	-0.341	0.002	-1.453
مهاباد	0.4	0.438	0.085	0.1	0.041	-0.333	-0.045	4.142	0.013	3.642
سردشت	0.145	-0.746	0.042	-0.002	0.013	-0.107	-0.013	1.306	0.001	-1.077
تکاب	-0.326	-0.637	-0.007	-0.081	-0.002	0.585	-0.037	-1.357	-0.001	-2.363

جدول ۵- درصد مکان‌هایی که روندهای معنی‌دار و غیر معنی‌دار را در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p \leq 0.05$) برای شاخص‌های دما و بارش برای آذربایجان غربی نشان می‌دهند

شاخص‌ها	(%) روند معنی‌دار مثبت	(%) روند مثبت	(%) روند معنی‌دار کاهش	(%) روند کاهش
SU25	100	0	0	0
ID0	0	0	57	43
TR20	71	29	0	0
FD0	0	0	71	29
GSL	71	29	0	0
TXx	100	0	0	0
TXn	29	71	0	0
TNx	71	29	0	0
TNn	29	71	0	0
DTR	43	29	28	0
Rx1day	71	0	0	29
Rx5day	0	43	14	43
SDII	29	57	0	14
R10mm	0	29	14	57
R20mm	0	71	0	29
CDD	0	57	0	43
CWD	0	0	29	71
R95p	0	71	0	29
R99p	0	86	14	0
PRCPTOT	0	29	0	71

روندهای فصلی شاخص‌های فرین دما و بارش

شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ توزیع‌های فضایی فصلی شاخص‌ها را نشان می‌دهند که روندهای ماهانه را منعکس می‌کنند. همانطور که در بخش روش‌شناسی بیان شد، تکنیک درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) برای تولید توزیع فضایی فصلی این روندها مورد استفاده قرار گرفت، مزیت این تکنیک توانایی آن در درون‌یابی موثر مجموعه داده‌های بزرگ است که درک آن را آسان می‌کند و در برنامه‌های مختلف رایانه‌ای قابل اجرا می‌باشد (Ruiz-Alvarez et al., 2019). با این حال، این رویکرد دارای محدودیت‌هایی

است، به‌ویژه هنگام ترسیم خطوط با دایره‌های متحدالمرکز برای نشان دادن روندهای صعودی یا نزولی بدون مبنای مفهومی، همانطور که در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است (Liu et al., 2021). شاخص‌های TNx و TNn به همراه توزیع‌های فضایی فصلی آنها در شکل ۳ نشان داده شده است. در تابستان این شاخص در تمامی ایستگاه‌ها افزایش یافت، اما در مهاباد و تکاب این روند از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل‌های 3a و 3b). در پاییز، شاخص TNn در همه ایستگاه‌ها، روند صعودی را نشان داد، به جز ایستگاه ارومیه که روند کاهشی غیرمعنی‌داری را نشان داد (شکل 3c).

در تابستان و بهار روند نزولی اما در پاییز روند افزایشی را نشان داد. در زمستان، روند افزایشی برای بارندگی یک روزه مشاهده شد، در حالی که روند کاهشی برای بارندگی پنج روزه مشاهده شد. در ایستگاه مهاباد روند فصلی بارش های یک روزه و پنج روزه متوالی در بهار، تابستان و پاییز به طور پیوسته کاهشی بود. در فصل زمستان، مهاباد روند افزایشی را برای بارندگی یک روزه و روند کاهشی را برای بارندگی پنج روزه در هر دو ایستگاه نشان داد. در سردشت، رویدادهای یک روزه و پنج روزه بارندگی در فصل زمستان روند افزایشی را نشان دادند. در تکاب برای بارندگی یک روزه در زمستان روند افزایشی اما برای بارندگی پنج روزه روند کاهشی داشت. در فصل بهار بارندگی یک روزه و پنج روزه در تکاب روند کاهشی را نشان داد. با این حال، در سردشت، روند بارش یک روزه افزایش یافته، در حالی که روند بارش پنج روزه کاهش یافته است (شکل a-h 6).

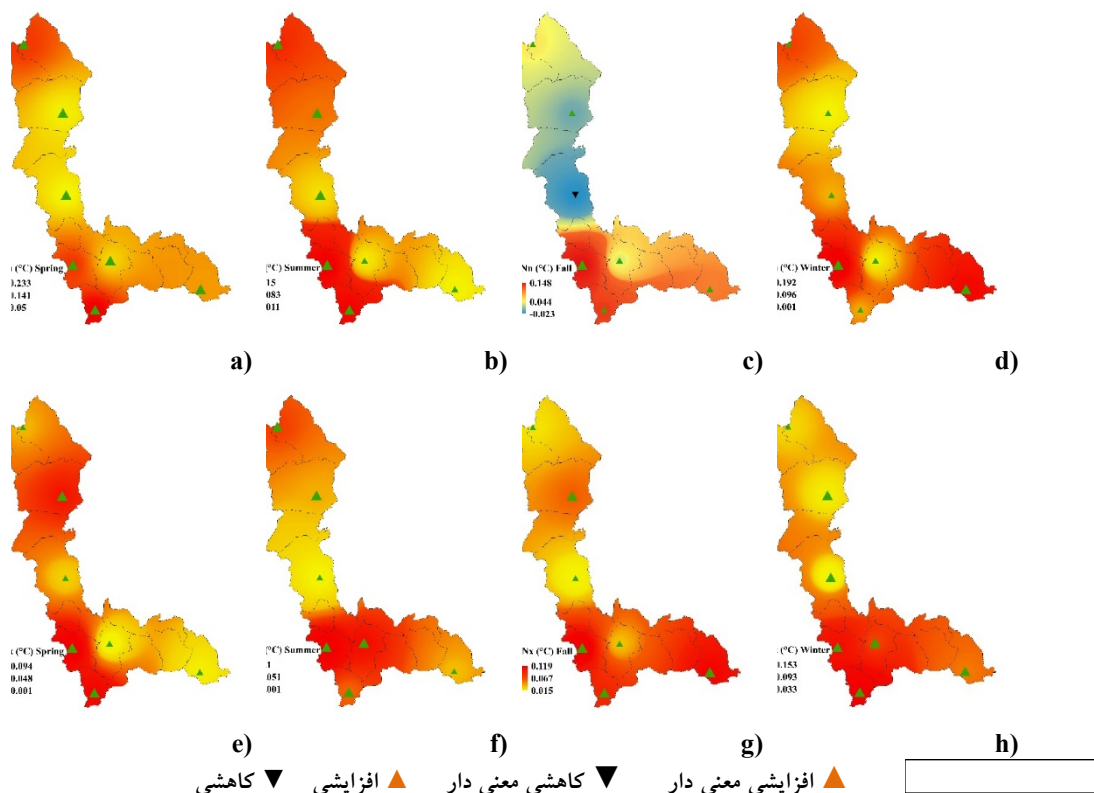
شاخص‌های فرین و عملکرد محصول

جدول ۶ ضرایب همبستگی پیرسون را برای بارندگی فرین، شاخص‌های دما و تولید محصول (گندم و جو) در ایستگاه پیرانشهر را نشان می‌دهد. مقادیر پررنگ نشان‌دهنده معنی داری ($P \leq 0.05$) در سطح اطمینان ۹۵ درصد است، که توسط آزمون دو طرفه تعیین می‌شود. شاخص‌های ماهانه در دوره مهر تا تیرماه به‌طور میانگین محاسبه شدند که مربوط به دوره رشد بهینه برای محصولات مورد بررسی در آذربایجان غربی ایران است. شاخص‌های TNn ، TXx ، TNx و TNx همبستگی معنی‌داری با عملکرد گندم و جو نشان ندادند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش تعداد روزهای با بیشینه دمای بیش از ۲۵ درجه سلسیوس، همراه با دامنه دمایی روزانه و بیشینه دمای روزانه بالاتر، می‌تواند بر تولید محصولات دیم در پیرانشهر تأثیر نامطلوب بگذارد. با این حال، شکل ۷ افزایش عملکرد محصول را نشان می‌دهد که ممکن است به پیشرفت‌های ژنتیکی و تکنولوژیکی نسبت داده شود (Pingali, 2012). شاخص DTR رابطه منفی قوی با عملکرد گندم و جو نشان داد. جدول ۳ نشان می‌دهد که شاخص TNn در استان آذربایجان غربی به ویژه در پیرانشهر در حال افزایش است. همانطور که در جدول ۶ نشان داده

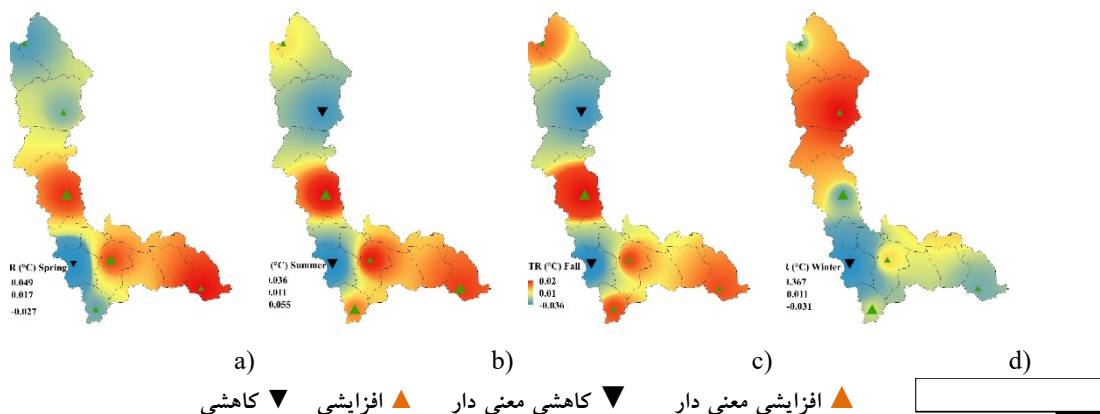
در فصل زمستان، شاخص TNn در تمام ایستگاه‌ها افزایش یافت و در پیرانشهر و تکاب روند قابل توجهی مشاهده شد (شکل 3d). شاخص TNx در فصل بهار در تمامی ایستگاه‌ها روند افزایشی را نشان داد و در پیرانشهر، تکاب و خوی از نظر آماری افزایش معنی‌داری داشت (شکل 3e). در تابستان، شاخص TNx نیز در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایش یافت، به جز ارومیه و تکاب که این روند از نظر آماری معنی دار نبود (شکل 3f). مشابه بهار و تابستان، شاخص TNx در تمام ایستگاه‌ها در طول پاییز و زمستان افزایش یافت و روندهای مثبت در اکثر ایستگاه‌ها از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل‌های 3g و 3h). توزیع فضایی فصلی شاخص‌های TXn و TXx در شکل ۴ نشان داده شده است. برای شاخص TXn ، روندها در تمام ایستگاه‌ها در طول بهار و تابستان مثبت و معنی‌دار بود (شکل 4a و 4b). در پاییز، شاخص TXn در همه ایستگاه‌ها به جز مهاباد روند کاهشی را نشان داد و در بقیه ایستگاه‌ها روندی عمدتاً مثبت داشت، اگرچه این از نظر آماری معنی‌دار نبود (شکل 4c). در زمستان، شاخص TXn روند مثبتی را در تمام ایستگاه‌ها نشان داد که مطابق با روند مشاهده شده در بهار و تابستان است (شکل 4d). شاخص TNx روند مثبت غالب را در تمام فصول و در تمام ایستگاه‌های آذربایجان غربی نشان داد (شکل‌های 4e، 4f، 4g و 4h). شکل ۵ روند توزیع فضایی فصلی محدوده دمایی روزانه (DTR) را نشان می‌دهد. اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه در آذربایجان غربی روند مثبت غالب را نشان دادند، به جز ایستگاه پیرانشهر که در تمام فصول سال روند کاهشی را نشان داد (شکل‌های 5a، 5b، 5c و 5d) و ایستگاه خوی که در تابستان روند کاهشی را نشان داد. پاییز (شکل‌های 5b و 5c). شکل ۶ به بررسی و تحلیل رویدادهای بارندگی در یک روز و پنج روز متوالی در آذربایجان غربی می‌پردازد و روندهای مختلف را نشان می‌دهد. شایان ذکر است بارندگی یک روزه و پنج روزه در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز در ایستگاه‌های خوی، ماکو و پیرانشهر روند افزایشی را نشان می‌دهد. در فصل زمستان، ماکو و پیرانشهر روند افزایشی را نشان دادند، در حالی که خوی برای بارندگی یک روزه روند افزایشی و برای بارندگی پنج روزه متوالی روند کاهشی را نشان داد. در ایستگاه ارومیه، بارندگی هر دو یک و پنج روزه

می‌شود و این رابطه روند افزایش یا کاهش واضحی را در طول زمان نشان نمی‌دهد. عملکرد محصولات دیم با شاخص‌های بارش فرین همبستگی معنی‌دار و مثبت داشت. به طور خاص، شاخص‌هایی مانند تعداد روزهای بارندگی بیش از ۱۰ میلی‌متر (R10 mm) و ۲۰ میلی‌متر (R20 mm)، همراه با روزهای بسیار مرطوب (R95p)، سهم قابل توجهی در کل بارندگی سالانه (PRCPTOT) داشتند و تأثیر مثبتی بر بازده محصول داشتند.

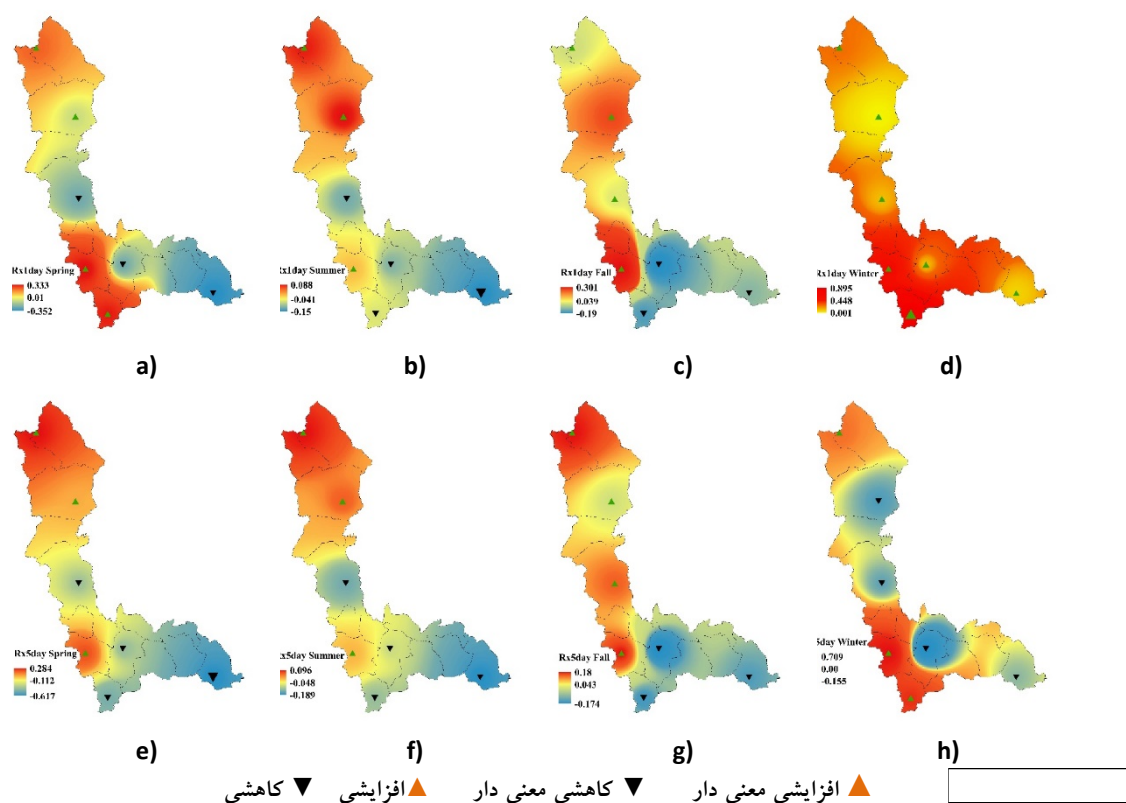
شده است، هیچ همبستگی آماری معنی‌داری بین TNn و عملکرد محصول وجود نداشت. این یافته بیشتر از همبستگی بین DTR و بازده پشتیبانی می‌کند، زیرا TNn تنها یک روز از ماه را نشان می‌دهد. در مقابل، DTR میانگین ماهانه تفاوت بین حداکثر و حداقل دمای روزانه را نشان می‌دهد. DTR با در نظر گرفتن تمام مقادیر حداقل و حداکثر، اندازه‌گیری جامع‌تری را ارائه می‌دهد. در نتیجه، همبستگی بین DTR و عملکرد محصول از تغییرپذیری معکوس هر دو عامل ناشی



شکل ۴. a-h توزیع فضایی روندهای فصلی حداقل دمای روزانه (TNn) و حداکثر ماهانه حداقل دمای روزانه (TNx) (درجه سلسیوس در سال) استان آذربایجان غربی، ایران



شکل ۵. a-d توزیع فضایی روندهای فصلی دامنه دمای شبانه روزی (DTR) (درجه سلسیوس در سال) استان آذربایجان غربی، ایران

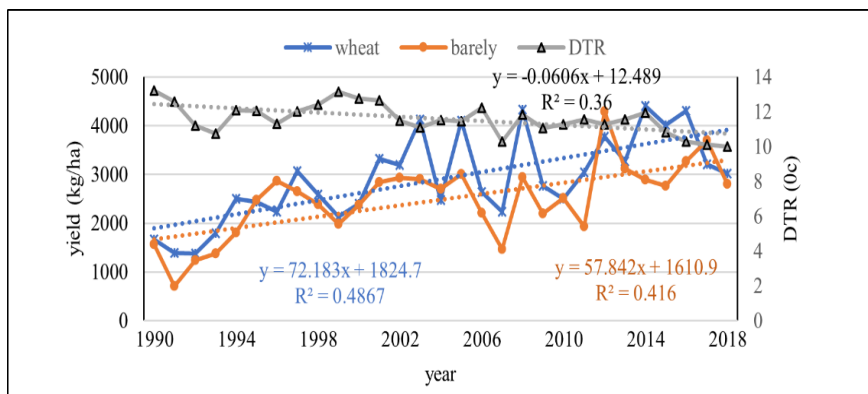


شکل ۶. a-h توزیع فضایی روند فصلی شاخص‌های حداکثر بارش یک روزه ماهانه (RX1day) (میلی‌متر/روز/سال) و حداکثر بارش ماهانه ۵ روزه (RX5days) (میلی‌متر/۵ روز/سال) استان آذربایجان غربی، ایران

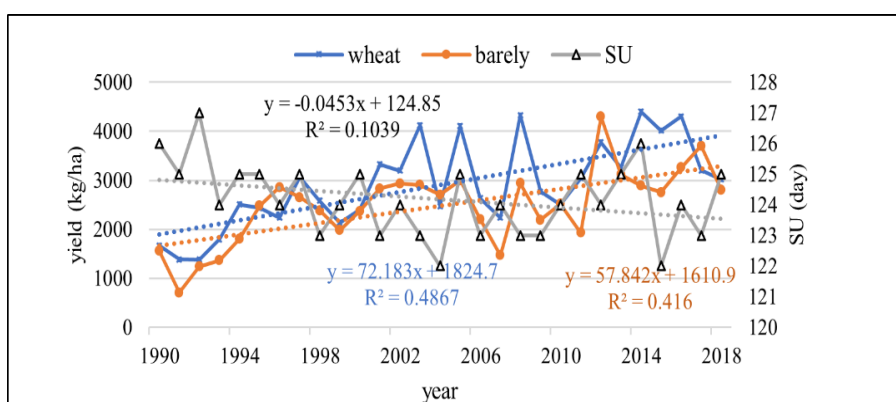
جدول ۶: ضرایب همبستگی پیرسون (r) شاخص‌های فرین دما، بارش و عملکرد محصول (گندم و جو) برای ایستگاه پیرانشهر. مقادیر پررنگ نشان دهنده معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p \leq 0.05$) بر اساس آزمون دو طرفه.

شاخص	عملکرد گندم (آبی)	عملکرد گندم (دیم)	عملکرد جو (آبی)	عملکرد جو (دیم)
FD0	0.051	0.030	0.081	0.051
ID0	-0.002	0.290	-0.097	0.027
SU25	0.153	-0.403	0.242	-0.356
TNn*	0.108	-0.124	0.084	-0.211
TNx*	0.146	0.069	0.147	0.003
TXn*	0.060	-0.119	0.177	-0.139
TXx*	0.185	-0.063	0.151	-0.073
DTR*	-0.080	-0.448	-0.156	-0.383
GSL	-0.122	-0.226	-0.066	-0.359
CDD	-0.219	0.308	0.178	0.128
CWD	-0.120	0.318	0.087	0.347
R10mm	-0.167	0.312	-0.299	0.403
R20mm	0.001	0.451	-0.317	0.495
RX1day*	-0.147	0.388	-0.168	0.403
Rx5day*	-0.047	0.382	-0.101	0.495
R95p	-0.161	0.398	-0.224	0.517
R99p	-0.325	0.112	-0.223	0.292
SDII	-0.018	0.475	-0.289	0.514
PRCPTOT	-0.114	0.387	-0.342	0.541

* میانگین ماه‌های مهر تا خرداد، فصل رشد محصولات مورد مطالعه در آذربایجان غربی



شکل ۷: ارتباط بین سری زمانی دامنه دمای شبانه روزی (DTR) (درجه سانتی گراد) و عملکرد گندم و جو (کیلوگرم در هکتار) برای ایستگاه بیرانشهر



شکل ۸: ارتباط بین سری زمانی روزهای تابستانه (SU25) (درجه سانتی گراد) و عملکرد گندم و جو (کیلوگرم در هکتار) برای ایستگاه بیرانشهر

غربی افزایش قابل توجهی در تعداد شب های گرم و کاهش قابل توجهی در تعداد شب های سرد در سال را تجربه کردند. شاخص های دمای حداکثر روزانه روندی مشابه با دمای حداقل اما با بزرگی کمتر نشان دادند. در حالی که افزایش قابل توجهی در شدت بارندگی وجود داشت، تغییرات مکانی در تغییرات بارندگی نسبت به تغییرات دما نسبتاً کوچکتر بود. دونات و همکاران (Donat et al., 2013) آخرین مجموعه داده های شبکه جهانی (HadEX2) را برای شاخص های فرین اقلیمی ارائه کرده اند. نتایج اصلی شامل الگوهای گرمایشی گسترده و قابل توجه مرتبط با شاخص های فرین دما می باشد، که عمدتاً برای شاخص های مبتنی بر حداقل دمای هوا قویتر از شاخص های مبتنی بر حداکثر دمای هوای روزانه می باشد. یافته های این تحقیق با حیدر و همکاران (Haider et al., 2024) همسو است، که روندهای فرین در شاخص های دما و بارندگی در بنگلادش را بررسی کردند.

بحث

تجزیه و تحلیل مجموعه داده های شبکه های رصدی مترامک به وضوح نشان می دهد که زمین در حال گرم تر شدن است (Masoudi & Asrari, 2023). تغییرات دمای هوا و بارندگی از جمله شاخص های اولیه تغییر اقلیم هستند و تأثیرات قابل توجهی بر جوامع دارند. اگرچه زمین در حال گرم شدن است، تغییرات آب و هوایی ناهمگونی قابل توجهی را در زمان و مکان نشان می دهد. مناطق خشکی در نیمکره شمالی با گرم شدن قابل توجهی مواجه شده اند و میانگین دمای هوا بین سال های ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ به میزان ۲.۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است (Hu et al., 2021). یافته های مطالعات بالا تغییرات قابل توجهی را در دمای آستانه مرتبط با گرم شدن، به ویژه برای شاخص های مبتنی بر حداقل دمای هوای روزانه نشان داد. مطابق با این یافته ها، این مطالعه نشان داد که بیشتر ایستگاه های مورد مطالعه در استان آذربایجان

روند گرمایش عمومی مشاهده شده در داده های دما را برجسته می کند. بررسی تغییرات فصلی شاخص های دمای هوا (TXn, TNn, TXx, TNx, DTR) و شاخص های بارندگی (Rx1day و Rx5day) افزایش قابل توجهی را در تمام فصول نشان داد. در زمستان، TXx در همه ایستگاه ها افزایش یافت و این افزایش در ۵۷ درصد ایستگاه ها از نظر آماری معنی دار بود. TXn افزایش را در تمام فصول به طور خاص، در بهار و تابستان نشان داد. روند افزایشی در TXn در تمام ایستگاه ها قابل توجه بود. این روندها افزایش مداوم حداکثر و حداقل دمای فرین در طول سال را نشان می دهد که به یک الگوی گرمایش عمومی کمک می کند. علاوه بر یافته های قبلی، TNx افزایش ثابتی را در تمام فصول و ایستگاه ها نشان داد. این روند در زمستان در تمامی ایستگاه ها به جز ماکو قابل توجه بود. به طور مشابه، در تابستان، روند افزایشی تقریباً به اندازه زمستان قابل توجه بود. در حالی که TNx در زمستان روند افزایشی قابل توجهی را نشان داد، این روند در پاییز کمتر مشخص بود. تغییرات فصلی تأثیر گرمایش قوی تری را در زمستان نسبت به پاییز نشان می دهد. این مشاهدات نشان می دهد که دمای شبانه و حداکثر دمای روز هر دو در حال افزایش هستند ولی دمای شبانه روند افزایشی بیشتری را نشان می دهد. علیرغم روند افزایشی TNx در تمام ایستگاه ها در طول بهار و پاییز، این روند از نظر آماری تنها در ۵۰ درصد ایستگاه ها معنی دار بود. روند مشاهده شده در حداکثر و حداقل دمای هوا منجر به کاهش محسوس محدوده دمایی روزانه (DTR) در ایستگاه های خوی و پیرانشهر در پاییز و تابستان شده است. این روند نشان می دهد که در حالی که دماهای حداقل و حداکثر در حال افزایش هستند، تفاوت بین آنها (محدوده دمای روزانه، DTR) در این مکان ها در حال کاهش است، که نشان دهنده کاهش تغییرات دما بین روز و شب است. تجزیه و تحلیل شاخص های بارندگی شدید هیچ الگوی فصلی واضحی را در طول دوره مطالعه نشان نداد. تنوع مشاهده شده در روندهای فصلی و سالانه دمای هوا، تأثیر بالقوه فعالیت های انسانی، مانند تغییرات کاربری زمین/پوشش زمین (LULC) و انتشار گازهای گلخانه ای را نشان می دهد. همانطور که هیئت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC, 2021) گزارش کرده

ارزیابی آنها، کاهش شب های سرد و روزهای یخبندان را در کنار افزایش روزها و شب های گرم نشان داد. علاوه بر این، آنها کاهش روزهای بارانی و افزایش روزهای خشک متوالی را در چندین ایستگاه مشاهده کردند. در سطح منطقه ای، یافته های این تحقیق با یافته های تانگ و همکاران (Tong et al., 2024) مطابقت دارد، که ۲۰ شاخص دمای فرین و بارندگی را در چین مطالعه کردند. یافته های آنها کاهش در محدوده دمایی روزانه (DTR) را نشان داد، و تأکید کرد که شاخص های مرتبط با حداقل دما افزایش قابل توجه تری را در مقایسه با شاخص های مرتبط با حداکثر دما نشان دادند. در این مطالعه اختلاف بین بیشترین و کمترین دمای هوا در ۷۲ درصد ایستگاه ها افزایش یافت که نشان می دهد شاخص دمای حداکثر با سرعت بیشتری نسبت به شاخص دمای حداقل در حال افزایش است. این یافته با نتایج (Jacques and Sauchyn, 2024) که روندهای مشابهی را در منطقه یوتا مشاهده کردند، مطابقت دارد. علاوه بر این، شاخص های بارندگی در این مطالعه تنوع بالایی با روندهای آماری، معنی داری کمی نشان می دهند که منعکس کننده ماهیت پیچیده و کمتر سازگار تغییرات بارش در مقایسه با دما است. هنگام جداسازی شاخص ها برای دماهای شبانه (TR20, FD0, TNn, TNx) و دمای روز (TXx, TXn, SU25, ID0)، واضح است که روند دماهای پایین تر از دماهای بالاتر بارزتر است. این نشان می دهد که در حالی که هر دو روند گرم شدن عمومی را نشان می دهند، افزایش دمای شبانه شدیدتر است. این یافته ها با گزارش Rehana و همکاران (۲۰۲۴) همسو می باشد که افزایش روزهای گرم و کاهش شب های سرد را پیش بینی می کند و نشان می دهد که شدت امواج سرد کمتر می شود در حالی که امواج گرما تشدید می شوند همانگونه که IPCC (۲۰۲۱) آن را تایید کرده است. مشاهدات نشان می دهد که شاخص های بارش نوسانات قابل توجهی را به همراه روند مثبت و منفی مشاهده می کنند. با وجود این تنوع، اکثر روندها مثبت هستند که منعکس کننده افزایش حجم و شدت بارندگی است (Rx1day, R20mm, R95p) و (R99p). اما برخلاف روند دمای هوا، میانگین بارندگی سالانه در استان آذربایجان غربی روند کاهشی محسوس دارد. این اختلاف، ماهیت پیچیده الگوهای بارش و واگرایی آنها از

می‌شود. علاوه بر این، دمای بالا در شب می‌تواند پیری و بلوغ گیاه را تسریع کند، در نتیجه دوره در دسترس برای رشد بذر را کوتاه کرده و بر بهره‌وری کلی محصول تأثیر می‌گذارد (Hatfield, 2016). روند صعودی TNn همراه با افزایش TXx نشان می‌دهد که این تغییرات احتمالاً بر کشاورزی در استان آذربایجان غربی تأثیر منفی می‌گذارد. برنامه تحقیقاتی تغییر جهانی ایالات متحده (USGCRP, 2018) تأکید کرد که افزایش دما عامل اصلی کاهش عملکرد محصول در طول فصل رشد در غرب میانه ایالات متحده است. دمای هوا تنها یک عامل موثر بر تولید کشاورزی است. کمبود آب کوتاه مدت و خشکسالی می‌تواند کارایی فتوسنتز و ترقق را در گیاهان مختل کند، بر رشد ریشه تأثیر منفی بگذارد و در نهایت عملکرد دانه را کاهش دهد (Hatfield et al., 2018). همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده است، شاخص‌های بارندگی فرین همبستگی مثبتی با عملکرد محصولات دیم نشان دادند. این همبستگی از نقش آنها در تأمین آب و کاهش کمبودهای آبی در مناطقی با بارندگی کم در طول فصل رشد ناشی می‌شود، جایی که رطوبت موجود برای برآوردن نیاز آبی کامل گیاهان کافی نیست. با این حال، شاخص‌های بارش فرین، روند فصلی یا سالانه غالب یا معنی‌داری را در استان آذربایجان غربی نشان ندادند. همچنین بین این شاخص‌ها و عملکرد محصولات آبی همبستگی ضعیف و غیرمعنی‌دار وجود داشت. این نتیجه نیز پیش‌بینی شده بود، زیرا آبیاری به محافظت از گیاهان در برابر دوره‌های خشک طولانی کمک می‌کند. شیوه‌های مدیریت گونه‌های کاشته شده، بر تأثیر دماهای شدید و بارندگی بر محصولات تأثیر می‌گذارد. در استان آذربایجان غربی، تقریباً ۷۶ درصد از مزارع گندم دیم است و ارقام بذر مورد استفاده در مقایسه با ارقام کشت شده در شرایط آبی، احتمالاً نسبت به تنش آبی و گرما مقاوم‌تر هستند. دمای شدید هوا می‌تواند بر گیاهان استرس وارد کند و سرعت رشد آنها را به میزان قابل توجهی کاهش دهد (dos Santos et al., 2022). مهم است که بدانیم دمای فرین هوا یک عامل چندوجهی است که شامل مدت، شدت و سرعت افزایش دما است. علاوه بر این، هنگامی که افزایش دمای هوا منجر به افزایش دمای خاک، همراه با کاهش رطوبت خاک می‌شود، این اثرات واضح‌تر می‌شوند (Zhang & Huang,

است، پیش‌بینی می‌شود که این عوامل به افزایش دمای تقریباً ۱ درجه سلسیوس بالاتر از سطوح قبل از صنعتی شدن کمک کنند. با تجزیه و تحلیل رابطه بین شاخص‌های آستانه و عملکرد محصول ارائه شده در جدول ۶، مشخص می‌شود که روند شاخص‌های دمای حداکثر، DTR و SU همبستگی منفی با عملکرد گندم و جو در پیرانشهر نشان می‌دهد (شکل‌های ۷ و ۸). عامل اصلی موثر بر رشد دانه غلات دمای هوا است (Tomás et al., 2020). شاخص‌های پایین‌تر SU25 و TXx در طول دوره رشد می‌تواند منجر به بلوغ بهتر محصول و عملکرد بالقوه بیشتر شود. همانطور که توسط فرانتی و ماریانی (Ferrante and Mariani, 2018) گزارش شده است، شرایط خنک‌تر در محدوده دمایی بهینه می‌تواند رشد محصول را افزایش دهد و از تنش ناشی از دمای بیش از حد بالا جلوگیری کند. به گفته شاهین و همکاران (Shaheen et al., 2020)، محدوده دمایی مساعد برای رشد گندم بین ۱۰ تا ۲۵ درجه سلسیوس است که دمای مطلوب رشد ۱۲ تا ۲۳ درجه سلسیوس است. این محدوده به گندم اجازه می‌دهد تا به طور موثر رشد کند، زیرا دمای در این محدوده از فرآیندهای فیزیولوژیکی حیاتی مانند فتوسنتز و جذب مواد مغذی پشتیبانی می‌کند که منجر به عملکرد بهتر می‌شود. با این حال، دمای هوا بالاتر از این آستانه مضر است زیرا استرس گرمایی می‌تواند به گیاهان آسیب برساند و عملکرد محصول را کاهش دهد. افزایش حداکثر دمای روزانه می‌تواند منجر به نرخ تبخیر بالاتر، افزایش تنش آبی و نیاز آبی بیشتر برای محصولات شود. این شرایط می‌تواند بر رشد و بهره‌وری غلات تأثیر منفی بگذارد و مدیریت دما را برای نتایج بهینه کشاورزی بسیار مهم می‌کند (Liu et al., 2023). زلیکه (Zeleeke, 2021) مشاهده کرد که تغییر ± 2 درجه سلسیوس در دمای متوسط فصل رشد در استرالیا می‌تواند منجر به کاهش ۵۰ درصدی عملکرد دانه شود. در مطالعه حاضر، روند افزایشی غالب TNn نشان‌دهنده افزایش دمای هوای شبانه در استان آذربایجان غربی است که می‌تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد محصول تأثیر بگذارد. تحقیقات لیو و وانگ (Liu and Wang, 2022) این امر را تایید می‌کند و نشان می‌دهد که دمای بالا در شب منجر به افزایش تنفس گیاه، بلوغ زودتر و در نتیجه کاهش عملکرد

نتیجه گیری

این پژوهش تاثیر مکانی و زمانی تغییرپذیری اقلیمی را بر محصولات کشاورزی گندم و جو در استان آذربایجان غربی مورد بررسی قرار داد. ابتدا روندهای منطقه‌ای شاخص‌ها فرین براساس داده‌های دما و بارش روزانه مشاهداتی بلند مدت چند ایستگاه به دست آمد. سپس با عملکرد گندم و جو در شرایط مختلف مدیریت مزرعه (دیم و آبیاری) همبسته شدند. بر اساس نتایج به دست آمده، مشخص شد که افزایش در میانگین حداکثر و حداقل دما در استان آذربایجان غربی در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه پدیده غالب بوده است و افزایش در حداقل دما روند گرم شدن شبانه را نشان داده است. صرف نظر از شاخص بارش، ایستگاه‌های محدودی روندهای آماری معنی‌داری را نشان دادند و روند رویدادهای فرین در بیشتر ایستگاه‌ها کاهشی می‌باشد. بیشینه دماهای فرین و شاخص‌های دامنه دمای شبانه روزی همبستگی منفی معنی‌داری را با عملکرد گندم و جو دیم در پیرانشهر نشان دادند. همانگونه که انتظار می‌رود شاخص‌های فرین بارش همبستگی مثبت و معنی‌داری را با عملکرد محصول دیم نشان داد. نتایج حاکی از آن است که تعداد روزهای با حداکثر دمای بیش از ۲۵ درجه سلسیوس و همچنین بیشینه دمای حداکثر روزانه و تفاوت بین حداقل و حداکثر دمای روزانه، به عنوان عوامل محیطی می‌توانند بر عملکرد محصول دیم در آذربایجان غربی تاثیر منفی داشته باشد. بر این اساس در استان آذربایجان غربی تولید محصول به طور قابل توجهی تحت تاثیر دما و بارش فرین می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش شاخص‌های فرین اقلیمی تاثیر نامطلوبی بر عملکرد بخش کشاورزی در استان آذربایجان غربی خواهد داشت و امنیت غذایی و اقتصادی منطقه را تحت تاثیر قرار خواهد داد، از این رو، اتخاذ سیاست‌ها و انجام برنامه‌ریزی‌ها و اقدامات مناسب جهت کاهش آثار منفی و سازگاری با تغییر اقلیم و مخاطرات ناشی از آن ضروری می‌باشد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی، به‌ویژه افزایش دما و تغییر در الگوهای بارش، تاثیر قابل توجهی بر عملکرد محصولات کشاورزی دیم به‌ویژه گندم و جو در استان آذربایجان غربی دارد. روند افزایش دما (به‌ویژه حداقل دما) و کاهش رخداد‌های بارشی، همراه با افزایش تعداد

(2023). بنابراین، نظارت بر رطوبت خاک در طول امواج گرما ضروری است و حفظ رطوبت کافی در لایه‌های خاک برای کاهش تنش حرارتی در گیاهان بسیار مهم است (Li and Yang, 2022). فتوسنتز گندم در دمای ۲۸-۲۹ درجه سانتی‌گراد متوقف می‌شود و زمانی که دمای برگ از ۲۹ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد بالاتر می‌رود، گیاه می‌میرد و منجر به تولید مواد بیشتر نمی‌شود (Fahad & Hussain, 2023). ژائو و سنورانت (Zhao and Seneviratne, 2022) گزارش کردند که دمای زیر ۸ درجه سلسیوس در طول رشد گندم می‌تواند منجر به کاهش عملکرد کل شود، با کاهش دما به زیر ۵ درجه سلسیوس باعث عقیمی ۹۸ درصدی می‌شود. افزایش ۱ درجه سانتی‌گراد در دمای متوسط فصلی منجر به کاهش عملکرد دانه غلات ۰.۱٪ تا ۱.۰٪ شده است (Lobell ۲۰۲۳ and Burke, ۲۰۲۳). دمای کوتاه مدت بیش از ۳۰ درجه سلسیوس در طول مراحل گلدهی یا پر شدن بذر بر عملکرد و کیفیت دانه غلات تاثیر منفی می‌گذارد (Raza and Huang, ۲۰۲۳). به دلیل تنش گرمایی در پایان فصل رشد، گیاهان دانه‌های کوچک و چروکیده تولید می‌کنند که منجر به کاهش عملکرد در رابطه با صفاتی از جمله پنجه‌زنی، وزن هزار دانه و تعداد دانه در سنبله می‌شود. علاوه بر این، کاهش‌هایی در عملکرد زیست توده، شاخص برداشت و ارتفاع بوته مشاهده می‌شود که این اثرات در بین ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت است (Fahad and Ali, 2023). انتخاب گونه‌های زراعی با مقاومت بیشتر در برابر دماهای شدید می‌تواند به کاهش اثرات منفی استرس آب و هوایی بر عملکرد و بهره‌وری کمک کند (Reynolds and Langridge, 2022). پیش‌بینی دقیق آب و هوا برای رديابی امواج گرمایی و اتخاذ تصمیمات آگاهانه برای جلوگیری از تلفات محصول ضروری است (Nepal et al., 2024). انتظار می‌رود شرایط آب و هوایی آینده با افزایش دما، کاهش رطوبت خاک و افزایش تنش گیاه به دلیل کمبود آب بر بهره‌وری مواد غذایی تاثیر منفی بگذارد. تحقیقات بیشتر برای ارزیابی اینکه چگونه دماهای فرین در طول مراحل مختلف فنولوژیکی بر رشد گیاه و بهره‌وری کلی تاثیر می‌گذارد ضروری است (Bandoc et al., ۲۰۲۲).

افزایشی و روند شاخص‌های مرتبط با بارش سنگین نوسانی بوده‌اند و شاخص‌های مرتبط با بارش‌های فرین در بیشتر موارد معنی دار نبود.

۳- عملکردهای هر دو کشت گندم و جو وابستگی یکسانی به فرین‌های اقلیمی نشان می‌دهند.

هر چند که هر دو محصول گندم و جو در شرایط اقلیمی مشابه کشت می‌شوند، اما حساسیت و واکنش آنها به فرین‌های اقلیمی متفاوت است و نمی‌توان وابستگی عملکرد آنها به این شاخص‌ها را یکسان دانست در این تحقیق تاثیرگذاری فرین‌های اقلیمی در عملکرد گندم دیم بیشتر از عملکرد جو دیم می‌باشد.

پیشنهادات کاربردی

۱. استفاده از بذره‌های مقاوم به خشکی، گرما و آفات و در کنار آن توسعه سیستم‌های آبیاری نوین (قطره‌ای، زیر سطحی) برای کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری محصول
۲. راه‌اندازی سامانه‌های پایش اقلیمی برای پیش‌بینی رویدادهای فرین اقلیمی و استفاده از فناوری‌های نوین مانند سامانه‌های پایش هوشمند رطوبت خاک و پیش‌بینی خشکسالی
۳. طرح‌های بیمه محصولات کشاورزی با پوشش ریسک‌های اقلیمی و اعطای تسهیلات کم‌بهره به کشاورزان برای تغییر الگوی کشت یا خرید تجهیزات مقاوم و سازگار با تغییرات اقلیمی
۴. تدوین سند راهبردی تغییر اقلیم مختص استان آذربایجان غربی با مشارکت ذی‌نفعان محلی و همچنین اصلاح قوانین تخصیص آب بر اساس شرایط جدید اقلیمی و نیازهای اکولوژیکی.

منابع

- 1- Adisa OM, Botai CM, Botai JO, Hassen A, Darkey D, Tesfamariam E, Adisa AF, Adeola AM, Ncongwan KP (2018) Analysis of agroclimatic parameters and their influence on maize production in South Africa. *Theoret Appl Climatol* 134:991-1004.
- 2- Ahmadalipour A, Moradkhani H (2018) Escalating heat-stress mortality risk due to global warming in the Middle East and North Africa (MENA). *Environ Int* 117:215-225.
- 3- Back, S. G., Park, J. J., Kim, S., Lee, M. J., Paek, J. S., Choi, J., Jang, J. Y., Kim, J., & Lee, T. (2022). Evaluation of Barley and Wheat Germplasm for Resistance to Head Blight and Mycotoxin Production by

روزهای گرم، شرایط بحرانی‌تری را برای تولید پایدار محصولات کشاورزی ایجاد کرده است.

پیشنهاد‌های سیاست‌محور برای بخش کشاورزی و تصمیم‌گیران:

- ۱- توسعه سیستم‌های هشدار سریع اقلیمی: برای اطلاع‌رسانی به موقع کشاورزان در مورد موج‌های گرما و خشکسالی.
- ۲- حمایت از کشت محصولات مقاوم به تنش‌های حرارتی و خشکی: به‌ویژه گونه‌های گندم و جو با توان تحمل دمای بالا و نیاز آبی کمتر.
- ۳- ترویج کشاورزی حفاظتی و بهینه‌سازی زمان کاشت: برای کاهش مواجهه گیاه با شرایط اقلیمی نامطلوب در مراحل حساس رشد.
- ۴- سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های آبیاری هوشمند و کارآمد: برای جبران کاهش بارندگی‌ها و حمایت از کشت دیم.
- ۵- گنجاندن ریسک‌های اقلیمی در برنامه‌های بیمه محصولات کشاورزی: جهت افزایش تاب‌آوری کشاورزان در برابر خسارات احتمالی.
- ۶- ایجاد نقشه پهنه‌بندی اقلیمی-زراعی استان: جهت تعیین مناطق پرریسک و اجرای سیاست‌های منطقه‌ای هدفمند.

تحلیل فرضیات

- ۱- شاخص‌های فرین دما و بارش بر میزان عملکرد کشت گندم و جو در مناطق مورد مطالعه تاثیر گذار هستند. با توجه به ماهیت اقلیم محور تولید گندم و جو، به‌ویژه در سیستم‌های زراعت دیم که بخش وسیعی از اراضی کشاورزی استان آذربایجان غربی را شامل می‌شود، عملکرد این دو محصول به شدت تحت تأثیر شاخص‌های فرین اقلیمی قرار دارد. شاخص‌هایی نظیر افزایش تعداد روزهای گرم (TX90p)، افزایش طول دوره‌های خشک (CDD)، کاهش تعداد روزهای بارانی (R10mm یا R20mm) و افزایش حد دمای حداقل یا حداکثر به‌طور مستقیم بر رشد، نمو و عملکرد نهایی گیاه تأثیر می‌گذارند. در این تحقیق شاخص‌های دمایی اثر منفی معنی دار بر عملکرد گندم و جو و شاخص‌های بارش اثر مثبت بر عملکرد محصول دیم نشان دادند.
- ۲- بارش‌ها و دماهای فرین در منطقه مورد مطالعه دارای روند معنی داری در تغییرات است.

مطابق یافته‌ها و تحلیل داده‌های اقلیمی بلندمدت روند تغییرات شاخص‌های فرین دما در بیشتر موارد معنی دار و

- in Illinois and its implications for agricultural production. *Water* 10:433.
- 14- Ding, C., Xia, Y., Su, Y., Li, F., Xiong, C., & Xu, J. (2022). Study on the Impact of Climate Change on China's Import Trade of Major Agricultural Products and Adaptation Strategies. *International journal of environmental research and public health*, 19(21), 14374. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114374>
 - 15- Donat MG et al (2013) Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: the HadEX2 dataset. *J Geophys Res Atmos* 118:2098-2118.
 - 16- Doratotaj, K., Zare, A., & Pournouri, M. (2022). Comparative Study of Environmental Challenges of Urmia Lake and Aral Lake in order to Protect and Rehabilitate Urmia Lake. *Environmental Energy and Economic Research*, 6(4), 1-15. doi: 10.22097/eeer.2022.342347.1250
 - 17- dos Santos, C.A.C., Neale, C.M.U., Mekonnen, M.M. et al. Trends of extreme air temperature and precipitation and their impact on corn and soybean yields in Nebraska, USA. *Theor Appl Climatol* 147, 1379–1399 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03903-7>.
 - 18- El-Rawy M, Batelaan O, Al-Arifi N, Alotaibi A, Abdalla F, Gabr ME. Climate Change Impacts on Water Resources in Arid and Semi-Arid Regions: A Case Study in Saudi Arabia. *Water*. 2023; 15(3):606. <https://doi.org/10.3390/w15030606>.
 - 19- Fahad, S., & Ali, S. (2023). "Heat stress effects on seed development and yield traits in different cereal genotypes." *Journal of Plant Physiology*, 272, 153588. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153588>
 - 20- Fahad, S., & Hussain, S. (2023). "Temperature thresholds for wheat photosynthesis and plant survival under heat stress conditions." *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(2), 303-315. <https://doi.org/10.1111/jac.12847>.
 - 21- Fatemi, R., Yarnia, M., Mohammadi, S., Khalil Vand, E., & Mirashkari, B. (2019). Evaluation of adaptability, yield potential and relationship between traits in barley variety and lines in West Azerbaijan. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 12(3), 709-724. doi: 10.22077/escs.2019.1593.1359
 - 22- Ferrante A, Mariani L. Agronomic Management for Enhancing Plant Tolerance to Abiotic Stresses: High and Low Values of Temperature, Light Intensity, and Relative Fusarium asiaticum and F. graminearum. The plant pathology journal, 38(6), 637–645. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.09.2022.0130>
 - 4- Bai, D., Ye, L., Yang, Z. and Wang, G. (2022), "Impact of climate change on agricultural productivity: a combination of spatial Durbin model and entropy approaches", *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-02-2022-0016>.
 - 5- Bandoc G, Piticar A, Patriche C, Roşca B, Dragomir E. Climate Warming-Induced Changes in Plant Phenology in the Most Important Agricultural Region of Romania. *Sustainability*. 2022; 14(5):2776. <https://doi.org/10.3390/su14052776>
 - 6- Challinor AJ, Watson J, Lobell DB, Howden SM, Smith DR, Chhetri N (2014) A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nat Clim Chang* 4(4):287-291.
 - 7- Chenu, K., Porter, J. R., Martre, P., Basso, B., Chapman, S. C., Ewert, F., Bindi, M., & Asseng, S. (2017). Contribution of Crop Models to Adaptation in Wheat. *Trends in plant science*, 22(6), 472–490. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.02.003>
 - 8- Cheshmehzangi, A. (2020) The Analysis of Global Warming Patterns from 1970s to 2010s. *Atmospheric and Climate Sciences*, 10, 392-404. <https://doi.org/10.4236/acs.2020.103022>.
 - 9- Dai S, Shulski MD, Hubbard KG, Takle ES (2016) A spatiotemporal analysis of Midwest US emperature and precipitation trends during the growing season from 1980 to 2013. *Int J Climatol* 36:517–525.
 - 10- Darand M, Dolat Yari, Zahra, Aslani, Fariba, Azizi, Yesri, (2013), investigating the behavior of rainfall and temperature variables in Kermanshah with the help of statistical tests, *Scientific Research Quarterly of Geographical Space*, 14 (46): 213 - 233.
 - 11- Dawood M, Rahman AU, Rahman G, Nadeem B, Miandad M. Geo-statistical analysis of climatic variability and trend detection in the Hindu Kush region, North Pakistan. *Environ Monit Assess*. 2023 Dec 4;196(1):4. doi: 10.1007/s10661-023-12175-9. PMID: 38044361.
 - 12- Driouech F, EIRhaz K, Moufouma-Okia W, Arjdal K, Balhane S (2020) Assessing future changes of climate extreme events in the CORDEX-MENA region using regional climate model ALADINclimate. *Earth Systems and Environment* 4(3):477–492.
 - 13- Dahal V, Gautam S, Bhattarai R (2018) Analysis of the long-term precipitation trend

- Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 32- Haider, S., Karim, M. R., Islam, M. S., Megumi, T. A., & Rahnama, Q. S. (2024). Extreme weather events and Spatio-temporal characterization of climate change variables in Bangladesh during 1975-2019. *Heliyon*, 10(5), e27118. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27118>
- 33- Hoseinpour, M., Mousavi, M. N. & Jafarpour Ghalehtemouri, K. 2024. Enhancing urban and regional development for border security in Iran: A futures study of West Azerbaijan province. *Town and Regional Planning*, no. 84, pp. 15-28.
- 34- Högy, P., Poll, C., Marhan, S., Kandeler, E., & Fangmeier, A. (2013). Impacts of temperature increase and change in precipitation pattern on crop yield and yield quality of barley. *Food chemistry*, 136(3-4), 1470–1477. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.056>
- IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- 35- Hu, G., Zhao, L., Wu, T., Wu, X., Park, H., Fedorov, A., Wei, Y., Li, R., Zhu, X., Sun, Z., Ni, J., & Zou, D. (2021). Spatiotemporal variations and regional differences in air temperature in the permafrost regions in the Northern Hemisphere during 1980-2018. *The Science of the total environment*, 791, 148358. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148358>.
- 36- IPCC, 2021: Summary for policymakers. In: *Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- 37- IPCC, 2018: Summary for policymakers. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in Humidity. Horticulturae*. 2018; 4(3):21. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4030021>
- 23- Frimpong, B.F., Koranteng, A. & Molkenthin, F. Analysis of temperature variability utilising Mann–Kendall and Sen's slope estimator tests in the Accra and Kumasi Metropolises in Ghana. *Environ Syst Res* 11, 24 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00269-1>
- 24- Ghaderi, R., Hoseinzadeh, R., Omidvarfar, S., & Abrun, M. (2024). Survey and ranking of the development of the agricultural sector (Case Study: the border townships of The West Azerbaijan province). *Journal of Geography and Regional Future Studies*, 1(3), 1-13.
- 25- Gimeno, L., Sorí, R., Vázquez, M., Stojanovic, M., Algarra, I., Eiras-Barca, J., Gimeno-Sotelo, L., & Nieto, R. (2022). Extreme precipitation events. *WIREs Water*, 9(6), e1611. <https://doi.org/10.1002/wat2.1611>
- 26- Ghanim, A. A. J., Anjum, M. N., Rasool, G., Saifullah, Irfan, M., Rahman, S., Mursal, S. N. F., & Niazi, U. M. (2023). Assessing spatiotemporal trends of total and extreme precipitation in a subtropical highland region: A climate perspective. *PloS one*, 18(8), e0289570. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289570>
- 27- Golla B (2021) Agricultural production system in arid and semi-arid regions. *J Agric Sc Food Technol* 7(2): 234-244. DOI: 10.17352/2455-815X.000113.
- 28- Habib-ur-Rahman M, Ahmad A, Raza A, Hasnain MU, Alharby HF, Alzahrani YM, Bamagoos AA, Hakeem KR, Ahmad S, Nasim W, Ali S, Mansour F and EL Sabagh A (2022) Impact of climate change on agricultural production; Issues, challenges, and opportunities in Asia. *Front. Plant Sci.* 13: 925548. doi: 10.3389/fpls.2022.925548
- 29- Hatfield JL, Wright-Morton L, Hall B (2018) Vulnerability of grain crops and croplands in the Midwest to climatic variability and adaptation strategies. *Climatic Change* 146:263–275.
- 30- Hatfield JL (2016) Increased temperatures have dramatic effects on growth and grain yield of three maize hybrids. *Agric Environ Lett* 1:150006.
- 31- Hartmann, D.L.; Klein Tank, A.M.G.; Rusticucci, M.; Alexander, L.V.; Bronnimann, S.; Charabi, Y.; Dentener, F.J. et al. (2013). Observations: atmosphere and surface. In *climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M.

- Interpolation Method Considering Spatial Differentiation in 3D Geological Modeling. *Geosciences* 2021, 11, 51. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020051>
- 46- Lobell, D. B., & Burke, M. B. (2023). "Impact of seasonal temperature increases on cereal grain yields: A global assessment." *Nature Climate Change*, 13(2), 183-191. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01494-7>.
- 47- Liu, C., Allan, R. P. 2013. Observed and simulated precipitation responses in wet and dry regions 1850–2100. *Environmental Research Letters* 8(3): 34002.
- 48- Marklein, A., Elias, E., Nico, P., & Steenwerth, K. (2020). Projected temperature increases may require shifts in the growing season of cool-season crops and the growing locations of warm-season crops. *The Science of the total environment*, 746, 140918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140918>.
- 49- Masoudi, M., & Asrari, E. (2023). Hazard assessment of global warming around the world using GIS. *Environmental monitoring and assessment*, 195(9), 1025. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11464-7>.
- 50- Mesgaran, M.B., Madani, K., Hashemi, H. et al. (2017). Iran's Land Suitability for Agriculture. *Sci Rep* 7, 7670 <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08066-y>.
- 51- Minoli, S., Jägermeyr, J., Asseng, S., Urfels, A., & Müller, C. (2022). Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change. *Nature communications*, 13(1), 7079. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34411-5>.
- 52- Mirzabaev, A., Olsson, L., Kerr, R.B., Pradhan, P., Ferre, M.G.R., Lotze-Campen, H. (2023). *Climate Change and Food Systems*. In: von Braun, J., Afsana, K., Fresco, L.O., Hassan, M.H.A. (eds) *Science and Innovations for Food Systems Transformation*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-15703-5-27>.
- 53- Moore, D. S., & McCabe, G. P. (2006). *Introduction to the practice of statistics*. W.H. Freeman and Company.
- 54- Muia V. K., Opere A. O., Ndunda E., Amwata D. A. (2024) Rainfall and Temperature Trend Analysis using Mann-Kendall and Sen's Slope Estimator Test in Makueni County, Kenya. *J. Mater. Environ. Sci.*, 15(3), 349-367
- 55- Nepal, M., Ashfaq, M., Sharma, B.R. et al. Impact of weather and climate advisories on agricultural outcomes in Pakistan. *Sci Rep* 14, 1036 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51066-4>.
- 56- Nie, H.; Qin, T.; Yang, H.; Chen, J.; He, S.; Lv, Z.; Shen, Z. Trend Analysis of the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson Delmotte, V.; Zhai, P.; Portner, H.O.; Roberts, D.; Skea, J.; Shukla, P.R.; Pirani, A.; Moufouma-Okia, W.; Pean, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- 38- Jake, F., Weltzin., Julio, L., Betancourt., Benjamin, I., Cook., Theresa, M., Crimmins., Carolyn, A., F., Enquist., Michael, D., Gerst., John, E., Gross., Geoffrey, M., Henebry., Rebecca, A., Hufft., Melissa, A., Kenney., John, S., Kimball., Bradley, C., Reed., Steven, W., Running. (2020). Seasonality of biological and physical systems as indicators of climatic variation and change. *Climatic Change*, 163(4):1755-1771. doi: 10.1007/S10584-020-02894-0.
- 39- Klein Tank, A.M.G., Zwiers, F.W. and Zhang, X. (2009) Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation. *Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72*, 56.
- 40- Kogo, B.K., Kumar, L. & Koech, R. Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security. *Environ Dev Sustain* 23, 23–43 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00589-1>.
- 41- Lan, Y., Xu, B., Huan, Y., Guo, J., Liu, X., Han, J., & Li, K. (2023). Food Security and Land Use under Sustainable Development Goals: Insights from Food Supply to Demand Side and Limited Arable Land in China. *Foods* (Basel, Switzerland), 12(22), 4168. <https://doi.org/10.3390/foods12224168>.
- 42- Li, X., & Yang, Y. (2022). "The role of soil moisture in moderating plant thermal stress during extreme heat events." *Journal of Hydrology*, 605, 127423. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127423>
- 43- Li, X., Liu, N., You, L., Ke, X., Liu, H., Huang, M., & Waddington, S. R. (2016). Patterns of Cereal Yield Growth across China from 1980 to 2010 and Their Implications for Food Production and Food Security. *PloS one*, 11(7), e0159061. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159061>
- 44- Liu, H., Liu, Y., Yang, W., & Sun, X. (2023). "Impact of extreme high temperatures on crop yield and water use efficiency: Evidence from recent studies." *Field Crops Research*, 278, 108318. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108318>
- 45- Liu, Z.; Zhang, Z.; Zhou, C.; Ming, W.; Du, Z. An Adaptive Inverse-Distance Weighting

- Applications. In press, Mexico. <https://doi.org/10.1002/met.1838>.
- 66- Shaheen, N., Jahandad, A., Goheer, M., & Ahmad, Q. (2020). Future changes in growing degree days of wheat crop in Pakistan as simulated in CORDEX South Asia experiments. *APN Science Bulletin*, 10(1). doi:10.30852/sb.2020.1221.
- 67- Shahzad, A., Ullah, S., Dar, A.A. et al. Nexus on climate change: agriculture and possible solution to cope future climate change stresses. *Environ Sci Pollut Res* 28, 14211–14232 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12649-8>.
- 68- Solaymani, H.R., Badripour, H. (2018). Integrated Watershed Management Approach in Drylands of Iran. In: Gaur, M., Squires, V. (eds) *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56681-8_6
- 69- St. Jacques, J. M., & Sauchyn, D. J. (2016). Recent trends in precipitation and temperature extremes across the Pacific Northwest. *International Journal of Climatology*, 36(13), 4331-4343. <https://doi.org/10.1002/joc.4600>
- 70- Tomás, Diana, José Carlos Rodrigues, Wanda Viegas, and Manuela Silva. 2020. "Assessment of High Temperature Effects on Grain Yield and Composition in Bread Wheat Commercial Varieties" *Agronomy* 10, no. 4: 499. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040499>.
- 71- Tong, S., Li, X., Zhang, J., Bao, Y., Bao, Y., Na, L., & Si, A. (2019). Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960-2017. *The Science of the total environment*, 649, 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.262>
- 72- USGCRP, 2018: Impacts, risks, and adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II [Reid miller, D.R., C.W. Avery, D.R. Easterling, K.E. Kunkel, K.L.M. Lewis, T.K. Maycock, and B.C. Stewart (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 1515 pp. <https://doi.org/10.7930/NCA4.2018>.
- 73- Zhao, J.; Liu, D.; Huang, R. A Review of Climate-Smart Agriculture: Recent Advancements, Challenges, and Future Directions. *Sustainability* 2023, 15, 3404. <https://doi.org/10.3390/su15043404>
- 74- Zhao, C., & Seneviratne, S. I. (2022). "Effects of low temperatures on wheat yield and sterility: Insights from recent studies." *Field Temperature and Precipitation Extremes during Winter Wheat Growth Period in the Major Winter Wheat Planting Area of China*. *Atmosphere* 2019, 10, 240. <https://doi.org/10.3390/atmos10050240>.
- 57- OUFRIGH, O., ELOUISSI, A., & BENZATER, B. (2023). Trend Assessment by the Mann-Kendall Test and the Innovative Trend Analysis Method (North-West Algeria). *GeoScience Engineering*, 69(2), 186–233. <https://doi.org/10.35180/gse-2023-0099>
- 58- Roy, P., Pal, S. C., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., Saha, A., & Shit, M. (2022). Climate change and groundwater overdraft impacts on agricultural drought in India: Vulnerability assessment, food security measures and policy recommendation. *The Science of the total environment*, 849, 157850. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157850>
- 59- A. G. Pendergrass, R. Knutti, F. Lehner, C. Deser, B. M. Sanderson, Precipitation variability increases in a warmer climate. *Sci. Rep.* 7, 17966 (2017).
- 60- Powell, J.P., and Reinhard, S., 2016. Measuring the effects of extreme weather events on yields. *Weather Clim. Extr.* 12, 69-79.
- 61- Pingali, P. L. (2012). Technological advancements in agriculture and their impact on crop yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(31), 12302-12308. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>.
- 62- Raza, A., & Huang, Y. (2023). "Impact of short-term heat stress on cereal grain yield and quality during flowering and seed-filling stages." *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(4), 532-546. <https://doi.org/10.1111/jac.12893>.
- 63- Raza, A.; Razzaq, A.; Mehmood, S.S.; Zou, X.; Zhang, X.; Lv, Y.; Xu, J. Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome: A Review. *Plants* 2019, 8, 34. <https://doi.org/10.3390/plants8020034>.
- 64- Reynolds, M. P., & Langridge, P. (2022). "Breeding for resilience to extreme temperatures in crops: Challenges and opportunities." *Journal of Experimental Botany*, 73(1), 100-112. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab478>
- 65- Ruiz-Alvarez O, Singh VP, Enciso-Medina J, Ontiveros-Capurata RE, Santos CAC (2019) Observed trends in daily precipitation extreme indices in Aguascalientes. *Meteorological*

- 76- Zeleke K. Simulating Agronomic Adaptation Strategies to Mitigate the Impacts of Climate Change on Wheat Yield in South-Eastern Australia. *Agronomy*. 2021; 11(2):337. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020337>.
- 77- Zhu X, Troy TJ, Devineni N (2019) Stochastically modeling the projected impacts of climate change on rainfed and irrigated US crop yields. *Environ Res Lett* 14:074021.
- Crops Research, 290, 108737. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108737>
- 75- Zhang, X., & Huang, B. (2023). "The complexity of extreme air temperatures: Intensity, duration, and impacts on soil temperature and moisture." *Environmental Research Letters*, 18(4), 104012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acd4b5>.