

# Risk Assessment of Climatic Constraints During Different Phenological Stages of Canola in Golestan Province Under Current and Future Climate Change

## Abstract

This research investigates the projected impacts of future climate change on the vulnerability to climate-related constraints during the canola cultivation cycle within Golestan Province, Iran. Daily meteorological observations, encompassing precipitation, minimum temperature, and maximum temperature, were procured from ten synoptic weather stations operating in the region. The thermal thresholds for the four principal phenological phases of canola—specifically germination, vegetative growth, reproductive development, and seed maturation—were rigorously established based on prior investigations. Following meticulous data quality assessment and the statistical imputation of any identified gaps, outputs from two representative global climate models, simulated under the intermediate Shared Socioeconomic Pathway (SSP2-4.5) scenario, were downscaled for the near-term future (2023–2053) utilizing the LARS-WG statistical downscaling model. Subsequently, the phenological progression of canola through its four developmental stages was delineated for both the historical baseline period (1992–2022) and the projected future climate, employing a growing degree-day (GDD) model. A suite of eight key agroclimatic indices was then formulated, and their temporal variations were quantified across both the baseline and future scenarios for each phenological phase. Our findings reveal a discernible trend towards increased annual precipitation in nine months and statistically significant warming across nearly all months for both minimum and maximum temperatures when compared to the baseline. Under the projected climate change scenario, a notable shortening of the canola emergence and vegetative phases is anticipated, while the reproductive and maturation periods are expected to lengthen. These temporal shifts are intrinsically linked to the projected directional changes in temperature (warming) and precipitation (drying trends) during these respective developmental periods. Furthermore, the analysis highlights an augmented risk of frost damage during the critical reproductive stage, a diminished likelihood of satisfying the necessary vernalization (chilling) requirements in the vegetative phase, alongside an elevated probability of both extreme drought conditions and intense precipitation events throughout the entire canola phenological cycle. These findings underscore the critical need for adaptive agricultural strategies to mitigate the adverse impacts of projected climate change and ensure food security in the study area.

**Keywords:** Climate change, Risk, Phenology, Canola, Golestan province.

## Extended Abstract

### Introduction

Canola (*Brassica napus* L.) plays a strategic role in global food security as one of the world's most significant sources of edible and industrial vegetable oil, ranking second in consumption only to palm oil. The success of crop

production, like canola, across diverse geographical regions is substantially contingent upon a thorough understanding of their climatic potentials. When determining the climatic potential of agricultural production areas, due attention must be paid to climatic hazards (climate extremes). This research investigates the projected impacts of future climate change on the vulnerability to climate-related constraints during the canola growth period within Golestan Province, Iran.

### **Data and Methods**

Daily meteorological observations, encompassing precipitation, minimum temperature, and maximum temperature, were procured from ten synoptic weather stations operating in the region. The thermal thresholds for the four principal phenological phases of canola—specifically germination, vegetative growth, reproductive development, and seed maturation—were rigorously established based on prior investigations. Following meticulous data quality assessment and the statistical imputation of any identified gaps, outputs from two representative global climate models (MPI-ESM1-2-LR and ACCESS-ESM1-5), simulated under the intermediate Shared Socioeconomic Pathway (SSP2-4.5) scenario, were downscaled for the near-term future (2023–2053) utilizing the LARS-WG statistical downscaling model. Subsequently, the phenological progression of canola through its four developmental stages was delineated for both the historical baseline period (1992–2022) and the projected future climate, employing a growing degree-day (GDD) model. A suite of eight key agroclimatic indices was then formulated, and their temporal variations were quantified across both the baseline and future scenarios for each phenological phase. The agroclimatic indices defined in this study are: a) Number of dry days (precipitation  $< 2.0$  mm) (Ndry), b) Number of heavy rainfall days (precipitation  $> 10$  mm) (NHrain10), c) Number of frost days (minimum temperature  $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ) (NTmin0), d) Number of vernalization days (average temperature between  $0^{\circ}\text{C}$  and  $5^{\circ}\text{C}$ ) (NTmean0-5), e) Number of heat stress days (maximum temperature  $> 30^{\circ}\text{C}$ ) (NTmax30), f) Total precipitation during the phenological stage (SUMrain), g) Average daily temperature during the phenological stage (AVETmea), h) Duration of the phenological stage (DurationDev). The risk (probability of occurrence) of agroclimatic indices within each of the four canola growth stages, was calculated for the baseline period and the future period (under two global climate models) across all stations.

### **Results**

Our findings revealed the LARS-WG model demonstrated greater success in reproducing daily precipitation compared to daily minimum and maximum temperatures for the baseline period. Also, it was detected a discernible trend towards increased annual precipitation in nine months and statistically significant warming across nearly all months for both minimum and maximum temperatures when compared to the baseline. Under the projected climate change scenario, a notable shortening of the canola emergence and vegetative phases is anticipated, while the reproductive and maturation periods are expected to lengthen. These temporal shifts are intrinsically linked to the projected directional changes in temperature (warming) and precipitation (drying trends) during these respective developmental periods. The results obtained from comparing the occurrence risk of indices between the baseline and future periods are as follows: a) The probability of frost occurrence is higher in the vegetative and reproductive stages of canola compared to other stages. In the future, the risk of frost occurrence is expected to decrease during the vegetative stage and increase during the reproductive stage. b) The probability of temperatures between 0 and 5 degrees Celsius is higher in the vegetative and reproductive stages of canola than in other stages. The likelihood of

this temperature range occurring is expected to decrease in the future. c) The highest probability of temperatures exceeding 30 degrees Celsius is associated with the maturity stage. However, there is also a possibility of heat stress occurring during the germination and reproductive stages. Overall, the probability of heat stress is projected to decrease across all phenological stages in the future. d) The probability of no precipitation (dryness) is highest during the germination stage compared to other stages. It is anticipated that the likelihood of dryness in this stage will be lower in the future compared to the baseline period. In other phenological stages, the probability of no precipitation is expected to increase in the future. e) The probability of heavy rainfall is projected to decrease during the germination stage in the future. However, the likelihood of heavy rainfall is expected to increase in other stages in the future.

### **Conclusion**

The analysis highlights an augmented risk of frost damage during the critical reproductive stage, a diminished likelihood of satisfying the necessary vernalization (chilling) requirements in the vegetative phase, alongside an elevated probability of both extreme drought conditions and intense precipitation events throughout the entire canola phenological cycle. These findings underscore the critical need for adaptive agricultural strategies to mitigate the adverse impacts of projected climate change and ensure food security in the study area.

پندرہ روزہ

## ارزیابی ریسک عوامل اقلیمی محدودکننده در مراحل مختلف فنولوژی محصول کلزا در استان گلستان تحت شرایط اقلیمی فعلی و تغییر اقلیم آینده

### چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم آینده بر ریسک وقوع عوامل محدودکننده اقلیمی در طی دوره رشد کلزا در استان گلستان انجام شده است. داده‌های هواشناسی مورد نیاز این مطالعه شامل بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر روزانه از ۱۰ ایستگاه هواشناسی استان گلستان دریافت گردید. نیاز حرارتی مراحل چهارگانه فنولوژی کلزا (سبزشدن، رویشی، زایشی و رسیدن دانه) از تحقیقات قبلی استخراج گردید. پس از بررسی‌های اولیه داده‌های هواشناسی و تکمیل نواقص آماری با استفاده روش‌های آماری، با استفاده از مدل LARS-WG اقدام به ریزمقیاس‌نمایی خروجی دو مدل اقلیم جهانی تحت سناریوی میانی SSP2-4.5 برای آینده نزدیک (۲۰۲۳-۲۰۵۳) گردید. در مرحله بعد، به کمک مدل درجه-روز رشد، مراحل چهارگانه فنولوژی محصول کلزا (سبزشدن، رویشی، زایشی و رسیدن دانه) در دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۲۲) و دوره آینده تحت شرایط تغییر اقلیم تعیین گردید. سپس، هشت نمایه اقلیم کشاورزی تعریف گردید و مقادیر این نمایه‌ها در طی دوره پایه و آینده برای هر یک از مراحل فنولوژی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در سرجمع ایستگاه‌ها، بارش در ۹ ماه و دمای حداقل و حداکثر تقریباً در تمام ماه‌های سال نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. در شرایط تغییر اقلیم، طول دوره سبزشدن و رویشی کلزا کاهش و طول دوره زایشی و رسیدن افزایش می‌یابد که به ترتیب، متناظر با تغییرات افزایشی (کاهش) و کاهش (افزایش) دمای هوا (بارش) در این دوره‌هاست. افزایش احتمال وقوع یخبندان در مرحله زایشی، کاهش احتمال تامین نیاز سرمایی در مرحله رویشی، افزایش احتمال بی‌بارشی و همچنین، افزایش احتمال بارش‌های سنگین در همه مراحل فنولوژی کلزا از دیگر نتایج این مطالعه است. این یافته‌ها بر لزوم تدوین راهبردهای کشاورزی تطبیقی برای کاهش اثرات نامطلوب تغییر اقلیم و تضمین امنیت غذایی در منطقه مطالعاتی تأکید می‌کند.

**واژگان کلیدی:** تغییر اقلیم، ریسک، فنولوژی، کلزا، استان گلستان.

### مقدمه

تشدید تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی جهان در قرن حاضر، اثرات گسترده‌ای بر تولید و بهره‌وری محصولات کشاورزی و امنیت غذایی در سراسر جهان به همراه دارد. پیش‌بینی می‌شود افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و افزایش فراوانی رویدادهای شدید اقلیمی مانند موج گرما و خشکسالی، توسعه فنولوژی گیاهان را تسریع، فصل‌های رشد را کوتاه و مراحل حیاتی رشد را در بسیاری از محصولات کشاورزی مختل کند و اغلب منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصولات شود (Hatfield et al., 2019).

کلزا (*Brassica napus L.*) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع روغن گیاهی خوراکی و صنعتی در جهان و دومین روغن گیاهی پرمصرف پس از نخل روغنی، نقشی راهبردی در تأمین امنیت غذایی جهان ایفا می‌کند. بر اساس آخرین گزارش‌های فائو، سطح زیر کشت جهانی کلزا در دهه منتهی به ۲۰۲۳ با رشد حدود ۱۵ درصدی مواجه بوده و تولید آن از مرز ۸۵ میلیون تن فراتر رفته است که این امر بیانگر جایگاه راهبردی این محصول در سبد غذایی کشورها و صنایع تبدیلی است (FAO, 2024).

تولید دانه روغنی کلزا بطور جدی در ایران از اواخر دهه ۱۳۷۰ با هدف تأمین بخشی از نیاز روغن نباتی کشور و اصلاح تناوب زراعت غلات زمستانه آغاز گردید و تحقیقات زیادی برای شناسایی مکانهای کشت، تعیین نیازهای رشدی گیاه و اصلاح و معرفی ارقام سازگار با مناطق کشت توسط سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی انجام شد (شیرانی راد و احمدی، ۱۳۷۴). استان گلستان به دلیل برخورداری از شرایط مساعد اقلیمی و دشت‌های حاصلخیز، همواره به عنوان یکی از قطب‌های اصلی تولید دانه‌های روغنی به ویژه کلزا مطرح بوده است. بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی، سطح زیر کشت کلزا در این استان در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ بالغ بر ۵۵ هزار هکتار بوده که سهمی معادل ۳۲ درصد از کل سطح زیر کشت کلزا در کشور را به خود اختصاص داده است. همچنین، در سال زراعی مذکور بیش از ۱۳۰ هزار تن دانه کلزا از مزارع استان برداشت شده است که در حدود یک‌سوم کل تولید این محصول در کشور را شامل می‌شود (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۴). بررسی‌های میدانی و نتایج حاصل از مطالعات خلاء عملکرد کلزا در استان گلستان نشان می‌دهد که پتانسیل عملکرد کلزا در شرایط مطلوب زراعی و اقلیمی (بدون تنش) در شرایط دیم به بیش از ۴۰۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌رسد. با این وجود، میانگین تحقق یافته در مزارع زارعین استان به مراتب پایین‌تر است که بخشی از این کاهش تولید به دلیل ریسک‌های ناشی از مخاطرات اقلیمی نظیر خشکسالی‌های فصلی و تنش‌های گرمایی انتهای فصل نسبت داده می‌شود (سخاوتی‌فر و همکاران، ۱۳۹۹).

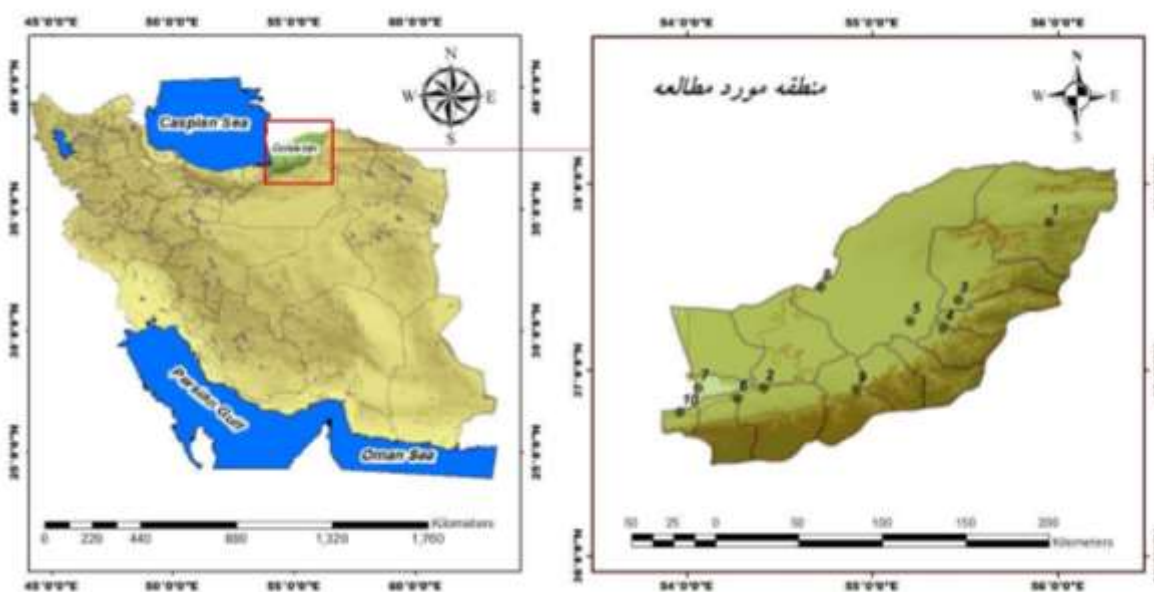
مطالعات مختلفی در زمینه تاثیر عوامل اقلیمی و تغییر اقلیم بر تولید کلزا در نواحی مختلف دنیا و ایران انجام شده است. Rathke & Diepenbrock (2006) نشان دادند که تنش خشکی در مراحل اولیه رشد کلزا می‌تواند منجر به شرایط نامطلوبی شود که بر استقرار محصول و رشد بعدی آن تأثیر می‌گذارد.

در حالی که مرطوب بودن طولانی خاک می‌تواند منجر به بسترهای بذر نامناسب شود و در نتیجه موفقیت استقرار محصول را کاهش دهد. Kutcher et al. (2010) به بررسی تاثیر بارش و دمای هوا بر عملکرد کلزای زمستانه در ساسکاچوان کانادا پرداختند. تجزیه و تحلیل‌ها اثرات منفی دمای بالا و بارش کم و اثرات مثبت بارش بیشتر از حد متوسط و تا حد کمتری، دمای شبانه خنک‌تر از حد متوسط را بر عملکرد کلزا نشان دادند. به‌علاوه، تحلیل‌ها نشان دادند که دمای بالا (بالتر از ۳۰ درجه سلسیوس) توام با بارش کم در اوایل دوره گلدهی منجر به کاهش عملکرد کلزا می‌شود. (2015) Weymann et al. اقدام به بررسی اثرات عوامل اقلیمی بر حداکثر عملکرد دانه و حداکثر عملکرد روغن در طی مراحل فنولوژی کلزا در آلمان نمودند. نتایج نشان داد که در زمان شروع تشکیل غلاف و بذر، عملکرد به طور معنی‌داری تحت تاثیر دما، تابش و تنش خشکی قرار می‌گیرد. در واقع، دما پارامتر اصلی تعیین‌کننده طول مراحل رشد است. در صورت کمبود آب بین زمان گلدهی و دوره رشد زایشی، وزن دانه و غلظت روغن کاهش می‌یابد. (2017) Zhang et al. تاثیر محدودیت‌های اقلیمی بر عملکرد کلزای زمستانه را در استان هوئی چین (اقلیم موسمی نیمه‌گرمسیری) ارزیابی کردند. در آن مطالعه، پنج شاخص اقلیم کشاورزی شامل مجموع دماهای بالای صفر درجه سلسیوس، روزهای بهاره‌سازی، میزان بارش در اوایل رشد و ساعات آفتابی در طول دوره رشد گیاه محاسبه شدند. نتایج نشان داد که بارش بیش‌ترین تاثیر منفی را بر عملکرد داشت. به‌علاوه، مشخص شد که برای افزایش محصول و کم کردن اثرات تغییر اقلیم، باید راهبردهای کشاورزی بر اساس عوامل مختلف اقلیم کشاورزی تدوین و اجرا شوند. (2018) Qian et al. با استفاده از یک مدل زراعی، پاسخ عملکرد کلزا به تغییر اقلیم و راهکارهای سازگاری را در سه منطقه از کانادا شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم عملکرد کلزای دیم به دلیل افزایش تنش دمایی و رطوبتی کاهش خواهد یافت. (2019) Pullens et al. چگونگی تاثیر عوامل اقلیمی مخاطره‌آمیز بر تولید فعلی و آینده کلزای زمستانه در اروپا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که سطح زیر کشت فعلی کلزا به خوبی با مناطق دارای کمترین عوامل تنش‌زا مطابقت دارد. همچنین مشخص شد که تحت سناریوهای تغییر اقلیم این محصول به احتمال زیاد در مناطقی تحت کشت فعلی آن، از دمای پایین (یخبندان زودرس و دیررس) آسیب خواهد دید. در مناطق جنوبی اروپا، محصولات از خشکسالی رنج خواهند برد. در عوض، مناطقی شمال اروپا برای رشد کلزا مساعدتر خواهند شد. (2023) Secchi et al. به کمک فراتحلیل ۳۹ مقاله علمی اقدام به بررسی چگونگی تاثیر خشکسالی و گرما بر عملکرد و کیفیت دانه کلزا (عمدتاً پروتئین و روغن) نمودند. نتایج این مطالعه مروری نشان داد که الف) تنش گرمایی اولیه (قبل از پایان گلدهی) به عنوان یک بخش کوتاه مدت، بیشترین تاثیر را بر عملکرد دانه کلزا دارد، ب) وقوع خشکسالی طولانی در دوره گلدهی یا با مدت کوتاه‌تر در طی دوره تشکیل غلاف بیشترین تاثیر را بر عملکرد دانه دارد، و ج) تنش‌های کوتاه‌مدت در دوره تشکیل غلاف تاثیر زیادی بر غلظت روغن دانه دارند.

در ادامه، به نتایج برخی مطالعات داخلی اشاره می‌شود. امیدوار و همکاران (۱۳۹۳) امکان توسعه کشت کلزا در استان کرمانشاه را از نظر اقلیمی بررسی کردند. در آن مطالعه، ویژگی‌های دما و بارش در کل دوره رشد کلزا در هر یک از مراحل فنولوژی و تاریخ گذر از دماهای حدی ۷-، ۱۵-، و ۴۰ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفته و پهنه‌های کاملاً مناسب، مناسب، ضعیف و نامناسب کشت کلزا در سطح استان مشخص شد. حیدری بنی و همکاران (۱۳۹۷) اقدام به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژی کلزا در استان چهارمحال و بختیاری نمودند. منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم از پارامترهای اقلیمی ریزمقیاس‌شده مدل دینامیکی NOAA-GFDL استفاده شد. نتایج نشان داد که تحت سناریوهای تغییر اقلیم، مدت مراحل فنولوژیکی سبز شدن، گل‌دهی، تشکیل غلاف و رسیدن دانه کاهش خواهد یافت. رهبان و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از مدل SSM-iCrop، اقدام به شبیه‌سازی فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب گیاه کلزا در سطح کشور نمودند. در نتیجه پارامتریابی مدل مذکور در گستره کشور، سه رقم زودرس، متوسط‌رس و دیررس برای کلزا تعیین شد که درجه حرارت جمعی برای کامل شدن دوره رشد آن‌ها به ترتیب ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۲۷۰۰ درجه-روز برآورد گردید. حیدری و همکاران (۱۴۰۱) تاثیر تغییر عوامل اقلیمی بر تولید کلزا با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس در شهرستان اهر را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تامین آب مورد نیاز گیاه و دمای هوا به ترتیب در رتبه اول و دوم از نظر تاثیرگذاری بر میزان تولید قرار می‌گیرند. آب‌شناس و همکاران (۱۳۰۲) تاثیر تغییر اقلیم آینده بر تولید کلزا را در استان مازندران بررسی کردند. برای شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دما از مدل‌های SDSM و LARS-WG استفاده شد. از ابزارهایی چون سامانه اطلاعات جغرافیایی و فرایند تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای پهنه‌بندی زراعی گیاه کلزا بر اساس شرایط پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۵۰ در استان مازندران استفاده شد. مقایسه مدل‌های پیش‌نگری تغییر اقلیم نشان داد که مدل SDSM در پیش‌بینی دماهای اصلی موفق‌تر بوده است، اما برای پیش‌بینی میزان بارش، مدل LARS-WG عملکرد بهتری داشت. به‌طور کلی، مشخص شد که در سناریوی خوش‌بینانه تغییر اقلیم، تناسب اراضی برای کشت کلزا شرایط بهتر و پهنه وسیع‌تری خواهد یافت و در سناریوهای دیگر شرایط برای کشت کلزا در اراضی مازندران نسبت به زمان حال ضعیف‌تر خواهد شد و این کاهش کیفیت در اراضی غربی و جنوبی استان مشهودتر است. دولت‌پرست و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از یک مدل زراعی و چهار سناریوی تغییر اقلیم اقدام به شبیه‌سازی تاثیر تغییر اقلیم بر عملکرد کلزا در دشت دهگلان استان کردستان نمودند. نتایج نشان داد که تحت همه سناریوهای تغییر اقلیم، عملکرد کلزا کاهش یافته و میزان کاهش از سناریوی خوش‌بینانه به بدبینانه تشدید می‌شود. ترابی و همکاران (۱۴۰۳) تاثیر تغییر اقلیم بر کشت کلزای دیم را در ایران

بررسی کردند. برای شبیه‌سازی تاثیر تغییر اقلیم آینده، از دو مدل گردش عمومی HadGEM2-ES و IPSL-CM5A-MR گزارش پنجم تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره آینده ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی در شرایط تغییر اقلیم تحت هر دو سناریوی تغییر اقلیم نشان داد که با افزایش میانگین دما، طول فصل رشد کاهش خواهد یافت، اما میزان بهره‌وری آب در هر دو سناریوی انتشار افزایش می‌یابد.

موفقیت در تولیدات کشاورزی در مناطق جغرافیایی مختلف تا اندازه بسیار زیادی بستگی به شناخت کافی از پتانسیل‌های اقلیمی آن‌ها دارد. در تعیین پتانسیل اقلیمی نواحی تولید کشاورزی، توجه به مخاطرات اقلیمی (فرین‌های اقلیمی) اهمیت زیادی دارد. بنابراین، در این پژوهش اهدافی به شرح زیر تعیین گردید: الف) شبیه‌سازی مراحل فنولوژی با استفاده از مدل درجه-روز رشد کلزا، ب) محاسبه شاخص‌های اقلیم کشاورزی در مراحل مختلف رشد و نمو کلزا تحت شرایط اقلیم فعلی و تغییر اقلیم آینده، و ج) ارزیابی ریسک عوامل اقلیمی محدود کننده رشد کلزا تحت شرایط اقلیم فعلی و تغییر اقلیم در منطقه مطالعاتی.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان گلستان (سمت چپ) و ایستگاه‌های هواشناسی منتخب (سمت راست) شماره‌های روی شکل نشانگر موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منتخب طبق جدول ۱ است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعاتی و داده‌ها

استان گلستان از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۳۶ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۵ دقیقه شمالی و ۵۳ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی قرار گرفته است. مساحت استان ۲۰۳۷۶ کیلومتر مربع بوده که معادل ۱/۲۳ درصد مساحت کل کشور است. از نظر توپوگرافی، این استان از دو بخش کوهستانی و جلگه‌ای تشکیل شده است، که قسمت جنوب و شرق آن را مناطق کوهستانی در بر گرفته که به طور موازی و با جهت تقریبی شرقی-غربی، ادامه سلسله جبال البرز را شامل می‌شود و سایر نواحی استان را تقریباً مناطق پست و جلگه‌ای تشکیل می‌دهند. از نظر اقلیمی، نواحی شمالی استان از اقلیم نیمه‌خشک و تا حدودی خشک، نواحی مرکزی و غربی آن از اقلیم معتدل مدیترانه‌ای و نواحی جنوبی آن از اقلیم سرد و کوهستانی برخوردار است.

داده‌های هواشناسی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش در مقیاس روزانه طی دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۲۲ مربوط به ۱۰ ایستگاه هواشناسی استان گلستان (شکل ۱، جدول ۱) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. ایستگاه‌های هواشناسی منتخب در دامنه ارتفاعی ۲۰- متر زیر سطح دریا (بندر ترکمن) تا ۴۵۰ متر بالاتر از سطح دریا (مراوه تپه) قرار می‌گیرند. طولانی‌ترین دوره ثبت آمار مربوط به ایستگاه گرگان (۴۲ سال) و کمترین آن مربوط به ایستگاه مینودشت (۹ سال) است. بر اساس اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های استان، میزان بارش سالانه بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر و متوسط دمای هوا بین ۸ تا ۲۰ درجه سلسیوس تغییر می‌کند. بیشترین بارش روزانه ۱۴۷ میلی‌متر (گرگان)؛ بیشترین دمای هوا ۴۹/۳ درجه سلسیوس (اینچه برون) و کمترین دما ۱-/۲-

درجه سلسیوس (علی آباد) ثبت شده است.

مطالعات زیادی در مورد کلزا در استان گلستان انجام شده است اما کمتر به مسئله تاریخ مراحل فنولوژی و ثبت میزان درجه-روز رشد مورد نیاز مراحل مختلف نمو پرداخته شده است. در بین مطالعات انجام شده، تحقیق فرجی (۱۳۹۴) اطلاعات نسبتاً کاملی در مورد فنولوژی کلزا (ارقام هایولا ۴۰۱ و آرجی اس ۰۰۳) ارائه نموده است. بهترین تاریخ کاشت کلزا در استان گلستان بین ۱۵ مهر تا ۲۰ آبان است. در این مطالعه، ۲۰ آبان به عنوان تاریخ کاشت کلزا در نظر گرفته شد. تاریخ مراحل فنولوژی براساس درجه-روزهای مورد نیاز برای هر مرحله طبق جدول ۲ به دست می آید (فرجی، ۱۳۹۴). مقادیر درجه-روز مندرج در جدول مذکور، با متوسط گیری از آزمایش ۲ ساله فرجی (۱۳۹۴) روی رقم هایولا ۴۰۱ به دست آمده است. تاریخ برداشت نیز همان تاریخ رسیدن دانه پس از تکمیل درجه-روز رشد دوره رسیدگی در نظر گرفته شد. با توجه به جدول مذکور، کلزا برای کل دوره رشد و نمو ۲۰۶۰ واحد حرارتی نیاز دارد. ذکر این نکته لازم است که تاریخ هر مرحله فنولوژی زمانی در نظر گرفته شده است که ۵۰ درصد گیاهان هر کرت وارد آن مرحله شده باشند (فرجی، ۱۳۹۴).

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و دوره آماری ایستگاه های هواشناسی در منطقه مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی			عرض جغرافیایی			دوره آماری		
		ثانیه	دقیقه	درجه	ثانیه	دقیقه	درجه	ارتفاع (متر)	شروع	خاتمه
۱	مراوه تپه	۵۸	۵۶	۵۵	۶	۴۸	۳۷	۴۵۰	۱۹۹۳	۲۰۲۲
۲	گرگان	۳۴	۲۴	۵۴	۲۵	۵۴	۳۶	۱۶۰	۱۹۸۱	۲۰۲۲
۳	کلاله	۳۵	۲۷	۵۵	۴	۲۳	۳۷	۱۲۷	۲۰۰۶	۲۰۲۲
۴	مینودشت	۳	۲۳	۵۵	۲۶	۱۳	۳۷	۲۲۳	۲۰۱۴	۲۰۲۲
۵	گنبد کاووس	۰	۱۲	۵۵	۱	۱۶	۳۷	۵۲	۱۹۹۵	۲۰۲۲
۶	هاشم آباد گرگان	۰	۱۶	۵۴	۰	۵۱	۳۶	۱۳/۳	۲۰۰۷	۲۰۲۲
۷	بندر ترکمن	۳۵	۳	۵۴	۱۸	۵۴	۳۶	-۲۰	۲۰۰۷	۲۰۲۲
۸	اینچه برون	۱۰	۴۳	۵۴	۱۲	۲۷	۳۷	۷	۲۰۱۳	۲۰۲۲
۹	علی آباد کتول	۲۶	۵۴	۵۴	۷	۵۴	۳۶	۱۸۴	۲۰۰۷	۲۰۲۲
۱۰	بندر گز	۲۵	۵۷	۵۳	۴۵	۴۶	۳۶	-۱۶	۲۰۱۳	۲۰۲۲

جدول ۲. درجه-روز رشد لازم برای مراحل فنولوژی کلزا با در نظر گرفتن دمای پایه صفر و سقف ۲۵ درجه سلسیوس (فرجی، ۱۳۹۴).

مرحله فنولوژی	درجه-روز رشد
سبز شدن	۱۷۵
رویشی	۹۶۰
زایشی	۲۷۵
رسیدن دانه	۶۶۰
جمع	۲۰۶۰

### کنترل کیفی داده ها

کنترل کیفی به مجموعه ای از فعالیت ها و فرآیندها اطلاق می شود که به منظور اطمینان از صحت و اعتبار داده های ثبت شده در ایستگاه های هواشناسی انجام

می‌گیرد. برای این منظور لازم است ابتدا نواقص آماری مشخص شده و سپس، اقدام به بازسازی داده‌ها شود. برای انجام این کار، در این مطالعه از بسته نرم‌افزاری **hyfo** در محیط **R** استفاده شد (Xu, 2023). این نرم‌افزار برای بازسازی خلاء در ایستگاه مینا از داده‌های ثبت شده در ایستگاههای مجاور و تکنیک رگرسیون چندگانه استفاده می‌کند. با توجه به اینکه بازسازی در یک روز معین در ایستگاه مینا نیازمند داشتن اطلاعات دست‌کم یک ایستگاه مجاور است، این شرط در برخی موارد ممکن نبود و برای بازسازی سعی گردید از داده‌های بازتحلیل شبکه گرید **ERA5** (CCC, 2017) در موقعیت ایستگاه مینا استفاده شود. خوشبختانه به دلیل همبستگی بسیار زیاد و معنی‌دار (بیش از ۰/۹۴) بین دمای (حداکثر و حداقل روزانه) ایستگاه‌ها با داده‌های شبکه گرید **ERA5** امکان بازسازی خلاءهای آماری دما در ایستگاه‌ها با موفقیت انجام شد. با این حال، همبستگی بسیار ناچیز (نزدیک به صفر) بین بارش روزانه ایستگاه‌ها و بارش شبکه گرید **ERA5** سبب گردید که از داده‌های **ERA5** برای بازسازی خلاءهای آماری بارش استفاده نشود. این نتیجه با مطالعات کمالی و همکاران (۱۴۰۴) و Radmanesh et al. (2023) در ایران همخوانی دارد. محققان دلیل این امر را در گسسته‌بودن میدان بارش در مقایسه با دما، تاثیر کوهستان بر تقویت بارش، کم‌برآوردی بارش‌های سنگین و بیش‌برآوردی بارش‌های سبک ذکر کرده‌اند (Shen et al., 2026). پس از تکمیل نواقص آماری، از آزمون‌های آماری رایج برای بررسی تصادفی بودن (آزمون والد-ولفویترز) و نرمال بودن (آزمون کلموگروف-اسمیرنوف) داده‌ها استفاده شد. نتایج حاکی از تصادفی بودن داده‌ها در اکثر ایستگاه‌ها و نرمال بودن داده‌ها در مقیاس سالانه در همه ایستگاه‌ها بود. در مقیاس ماهانه و فصلی، تصادفی بودن و نرمال بودن داده‌ها در برخی ماه‌ها/فصل‌ها در برخی ایستگاه‌ها تایید نشد.

### شبیه‌سازی اقلیم آینده

برای شبیه‌سازی اقلیم آینده استان گلستان تحت سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) از مولد شبیه‌ساز داده‌های هواشناسی **LARS-WG** نسخه ۸ استفاده شد. مولد **LARS-WG** برای ریزمقیاس‌نمایی بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل روزانه در طیف وسیعی از اقلیم‌ها عملکرد خوبی داشته است (Khan and Naeem, 2023) و سناریوهای تغییر اقلیم با وضوح بالا را از یک منطقه با استفاده از خروجی‌های مستقیم **GCM** تولید می‌کند (Semenov et al., 2024; Semenov and Stratonovitch, 2015). مدل **LARS-WG** از توزیع‌های آماری پیچیده برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی استفاده می‌کند. بارش و احتمال وقوع آن با استفاده از روش توزیع شبه تجربی و رزنجیره‌های مارکوف مدل‌سازی می‌شوند، در حالی که دما با استفاده از سری فوریه مدل‌سازی می‌شود (Chen et al., 2013; Semenov and Barrow, 2002). ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های تغییر اقلیم با استفاده از **LARS-WG** شامل سه مرحله اصلی است: واسنجی، اعتبارسنجی و تولید داده‌های هواشناسی (Semenov et al. 2024; Semenov and Barrow 2002). در مرحله واسنجی، پارامترهای آماری مدل‌ها تعیین می‌شود. در مرحله اعتبارسنجی، پارامترهای مستخرج از داده‌های هواشناسی مشاهده‌ای در طی فرآیند واسنجی، برای تولید داده‌های ساختگی هواشناسی استفاده می‌شوند تا قابلیت مدل در شبیه‌سازی اقلیم فعلی مورد ارزیابی قرار گیرد (Mohammed and Hassan, 2022). آزمون  $t$  برای مقایسه میانگین‌ها و آزمون  $F$  برای مقایسه واریانس‌های سری‌های مشاهده‌ای و ساختگی استفاده می‌شود (Abdulsahib et al., 2024; Chen et al., 2013). در مرحله آخر، مدل **LARS-WG** برای ریزمقیاس‌نمایی سناریوهای تغییر اقلیم از روش دلتا استفاده می‌کند (Semenov et al., 2024). در این مطالعه، از دو مدل گردش کلی جو در گزارش ششم تغییر اقلیم **CMIP6** شامل **MPI-ESM1-2-LR** (که زین پس **MPI** نامیده می‌شود) و **ACCESS-ESM1-5** (که زین پس **ACCESS** نامیده می‌شود) تحت سناریوی **SSP2-4.5** (سناریوی میانی) برای افق زمانی نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) استفاده شد (IPCC, 2022). جزئیات مدل‌ها در جدول ۳ آورده شده است. ذکر این نکته لازم است که دوره زمانی ۱۹۹۲-۲۰۲۲ به‌عنوان دوره پایه (اقلیم فعلی) در نظر گرفته شد. در برخی ایستگاه‌ها، به دلیل تاسیس آن‌ها در اوایل قرن حاضر، این دوره کوتاه‌تر در نظر گرفته شد.

جدول ۳. مشخصات مدل‌های منتخب **CMIP6**

نام مدل	مرکز تحقیقاتی	کشور	تفکیک مکانی	مرجع
ACCESS-ESM1-5	سازمان تحقیقات علمی و صنعتی کشورهای مشترک المنافع (CSIRO)	استرالیا	$1/25^{\circ} \times 1/875^{\circ}$	Ziehn et al. (2020)
MPI-ESM1-2-LR	موسسه هواشناسی ماکس پلانک (MPI-M)	آلمان	$1/39^{\circ} \times 1/41^{\circ}$	Wieners et al. (2019)

### تعیین مراحل فنولوژی محصول کلزا

کلزا (*Brassica napus* L) از تیره چلیپانیان، گیاهی یکساله با تیپ‌های پاییزه و بهاره است. از نظر فنولوژیکی، مطابق روش کدگذاری انجمن کلزای کانادا

در سال ۱۹۹۸، دوره رشد و نمو کلزا شامل پنج مرحله است: کاشت، جوانه‌زنی و سبز شدن، رشد رویشی، رشد زایشی و رسیدن دانه. از نظر اکولوژیکی، کشت کلزا در مناطق سردسیر در بهار و در مناطق معتدل در پاییز متداول است. کاشت کلزا در اقلیم‌های مختلف ایران (از گرم و مرطوب تا سرد) انجام می‌شود. در منطقه مطالعاتی (استان گلستان) که واجد اقلیم گرم و مرطوب است، بهترین تاریخ کاشت کلزا در فاصله ۱۰ مهر تا ۳۰ آبان است (مجنون حسینی، ۱۴۰۳). در این مطالعه، با دانستن تاریخ کاشت کلزا (که ۲۰ آبان لحاظ شد)، از یک مدل درجه-روز رشد (GDD) برای تعیین مراحل چهارگانه فنولوژی گیاه کلزا استفاده شد. مطابق این مدل، درجه-روزهای رشد تجمعی هر یک از دوره‌های رشد گیاه کلزا (جدول ۲) به کمک رابطه پایه GDD محاسبه شد:

$$CGDD_j = \sum_{i=1}^n \left( \frac{T_{Max} + T_{Min}}{2} \right)_i - T_b, \quad j = 1, 2, \dots, 4 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن،  $CGDD_j$  درجه-روز رشد تجمعی مرحله فنولوژی  $j$ -ام،  $T_{Max}$  دمای حداکثر و  $T_{Min}$  دمای حداقل در روز  $i$ -ام،  $T_b$  دمای پایه رشد (همه دماها برحسب درجه سلسیوس) و  $n$  طول مرحله فنولوژی  $j$ -ام می‌باشند. دمای پایه کلزا در این مطالعه صفر و دمای سقف ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد (فرجی، ۱۳۹۴). در صورتی که دمای متوسط روزانه کمتر از دمای پایه باشد، درجه-روز رشد در آن روز برابر صفر است. همچنین، در صورتی که دمای متوسط روزانه بالاتر از دمای سقف باشد، فرآیندهای فیزیولوژیکی رشد مختل یا متوقف می‌شوند (فرجی، ۱۳۹۴).

### نمایه‌های اقلیم کشاورزی

در این مطالعه، براساس مستندات علمی، هشت نمایه اقلیم کشاورزی برای هر یک از مراحل فنولوژی کلزا در استان گلستان معرفی و محاسبه گردید: الف) تعداد روزهای خشک (بارش کمتر از ۲ میلی‌متر) (Ndry)، ب) تعداد روزهای بارش سنگین (بیش از ۱۰ میلی‌متر) (NHrain10)، ج) تعداد روزهای یخبندان (دمای حداقل مساوی یا کمتر از صفر درجه سلسیوس) (NTmin0)، د) تعداد روزهای بهاره‌سازی (دمای متوسط صفر تا ۵ درجه سلسیوس) (NTmean0\_5)، ه) تعداد روزهای تنش گرمایی (دمای حداکثر بیش از ۳۰ درجه سلسیوس) (NTmax30)، و) مجموع بارش مرحله فنولوژی (SUMrain)، ز) میانگین دمای روزانه مرحله فنولوژی (AVETmea)، ح) طول مرحله فنولوژی (DurationDev).

نمایه‌های الف) و ب) با توجه به الگوهای هواشناسی منطقه ممکن است در هر یک از مراحل فنولوژی اتفاق بیفتند. نمایه ج) عمدتاً در دوره رشد رویشی گیاه و اوایل دوره رشد زایشی اتفاق می‌افتد. نمایه د) معرف تعداد روزهای بهاره‌سازی کلزا و در دوره رشد رویشی اتفاق می‌افتد. نمایه ه) در دوره رشد زایشی و رسیدن دانه اتفاق می‌افتد. نمایه‌های و) و ز) برای اطلاع از وضعیت بارش و دما در هر یک از مراحل فنولوژی ارائه شده‌اند. نمایه آخر، طول هر یک از مراحل فنولوژی گیاه کلزا را نشان می‌دهد. در مجموع، سه نمایه رطوبتی، چهار نمایه حرارتی و یک نمایه گیاهی در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### برآورد ریسک وقوع نمایه‌های اقلیم کشاورزی

تحلیل ریسک در این مطالعه به صورت احتمال وقوع خطر در یک دوره زمانی در محدوده معین تعریف شده است. در این تعریف، خطر، به پیشامد نمایه‌های تعریف شده در بخش ۲-۵؛ دوره زمانی، به هر یک از مراحل چهارگانه نموی (جدول ۲)؛ و محدوده، به ایستگاه هواشناسی اشاره دارد. احتمال خطر در اینجا، به صورت فراوانی نسبی هر یک از پیشامدها تعریف شده است:

$$P = \frac{n}{N} \quad \text{رابطه (۲)}$$

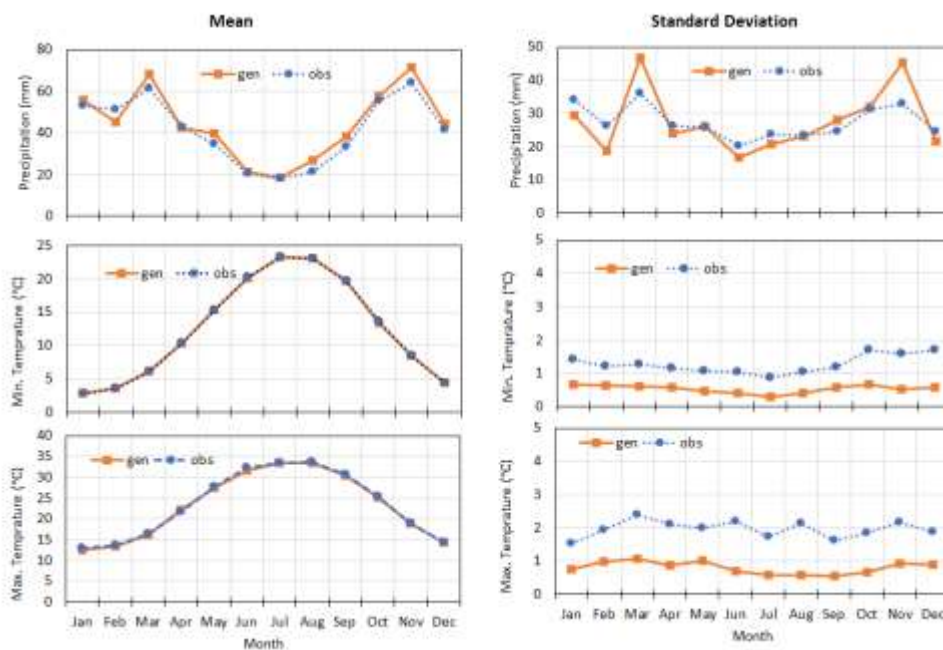
که در آن،  $n$  فراوانی وقوع نمایه معین اقلیم کشاورزی در مرحله نموی معین (بر حسب روز) و  $N$  طول مرحله نموی (بر حسب روز) که در طی آن نمایه مورد نظر محاسبه شده است. فرمول مذکور برای نمایه‌های الف) تا ه) که در واقع، فرین‌های اقلیمی هستند، بکار گرفته می‌شود.

### نتایج و بحث

#### ریز مقیاس‌نمایی داده‌های بارش و دمای هوا

قبل از بکارگیری مدل LARS-WG باید توانایی آن در بازتولید متغیرهای اقلیمی تحت شرایط اقلیم فعلی سنجیده شود. برای این منظور ابتدا پارامترهای مدل مذکور تحت شرایط اقلیم فعلی برآورد گردید. سپس، به کمک این پارامترها داده‌های تصادفی تحت شرایط اقلیم فعلی تولید گردید. شکل ۳ به عنوان نمونه، میانگین (سمت چپ) و انحراف معیار (سمت راست) داده‌های بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر مشاهده‌ای (obs) و ساختگی (gen) را در ایستگاه گرگان مقایسه کرده است. با توجه به شکل مذکور، هر سه متغیر از نظر میانگین‌های ماهانه اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند ولی در مورد دماهای حداقل و حداکثر، انحراف معیار داده‌های ساختگی کمتر از داده‌های مشاهده‌ای است. در مورد بارش، در برخی ماه‌ها انحراف معیار داده‌های ساختگی بیشتر از مشاهده‌ای

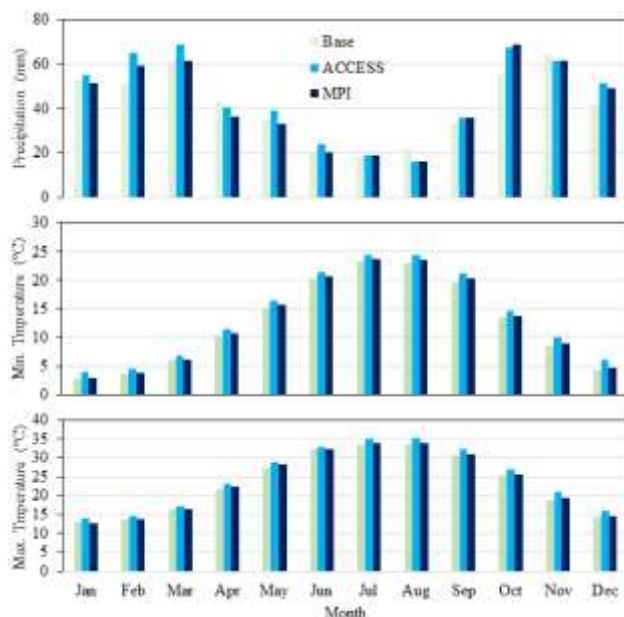
است. نتایج تقریباً مشابهی نیز در دیگر ایستگاه‌ها بدست آمد. برای مقایسه تفاوت بین داده‌های ساختگی و مشاهده‌ای از آزمون‌های آماری تساوی میانگین (آزمون  $t$ ) و تساوی واریانس (آزمون  $F$ ) استفاده شد. نتایج نشان داد در حالی که فراوانی نسبی فرضیه‌های تساوی میانگین رد شده در سطح ۵ درصد در مورد همه متغیرها کمتر از ۷/۵ درصد است، فرضیه‌های تساوی واریانس مربوط به دمای حداقل در ۹۶/۷ درصد، دمای حداکثر در ۸۰/۸ درصد، و بارش در ۱۶/۷ درصد از موارد رد شده است (شکل ارائه نشده است). بنابراین، مدل LARS-WG در اقلیم فعلی از نظر بازتولید میانگین، در مورد دما بهتر از بارش عمل نموده است. کارایی مدل LARS-WG در مطالعات منطقه‌ای شبیه‌سازی دما و بارش در حوضه دریاچه ارومیه (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۴؛ صالحی و همکاران، ۱۳۹۵)، نواحی ساحلی شمال و جنوب ایران (آبایی و همکاران، ۱۳۹۰)، نواحی غربی ایران (Lotfi et al., 2022)، غرب ایالات متحده (Mehan et al., 2017)، و چین (Wang et al., 2007) تایید شده است. افزون بر این، مدل مذکور در ریزمقیاس‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم در شرق چین (Disasa et al., 2025)، عراق (Abdulshahib et al., 2024) و آسیای جنوب‌شرقی (Punyawansiri and Kwanyuen, 2020) با موفقیت بکار گرفته شده است. اگرچه این مدل برای هر دو متغیر (دما و بارش) عملکرد بسیار خوبی دارد، یک یافته تقریباً جهانی در تمام اقلیم‌ها این است که مدل به طور کلی در شبیه‌سازی دما (هم پیشینه و هم کمینه دما) نسبت به بارش دقیق‌تر عمل می‌کند، که دلیل آن تغییرپذیری مکانی و زمانی بالاتر بارش است (دهقان و همکاران، ۱۳۹۴؛ Dehghani et al., 2025; Fenta Mekonnen & Disasa, 2018) و با نتایج به‌دست آمده در مورد شبیه‌سازی میانگین‌های بارش و دما در این مطالعه مطابقت می‌کند.



شکل ۳. مقایسه میانگین و انحراف معیار داده‌های بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر مشاهده‌ای (obs) و ساختگی (gen) در ایستگاه گرگان

در مرحله بعد، ریزمقیاس‌نمایی بارش و دما تحت سناریوی میانی SSP2-4.5 مربوط به دو مدل اقلیمی MPI و ACCESS برای افق زمانی نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) انجام شد. در شکل ۴ (به طور نمونه) میانگین ماهانه بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در ایستگاه گرگان تحت شرایط اقلیم فعلی (Base) و سناریوی SSP2-4.5 مدل‌های ACCESS و MPI ارائه شده است. شکل مذکور نشان می‌دهد که الگوی مشخصی از تغییرات در همه ماه‌ها از نظر هر سه متغیر مورد بررسی وجود ندارد. هر دو مدل اقلیمی، میانگین بارش در ماه‌های فوریه، مارس و سپتامبر تا دسامبر را بالاتر از دوره پایه پیش‌بینی کرده‌اند. میزان افزایش در این ماه‌ها بین ۴ درصد (ژولای) و ۲۷ درصد (فوریه) متغیر است. بالعکس، در ماه‌های آوریل، آگوست و نوامبر هر دو مدل کاهش ۱ تا ۱۶ درصدی بارش را نسبت به دوره پایه پیش‌بینی کرده‌اند. میانگین بارش سالانه دوره پایه در ایستگاه گرگان ۴۹۷/۵ میلی‌متر است. مدل ACCESS به میزان ۹/۱ درصد و مدل MPI به میزان ۲/۸ درصد بارش سالانه بیشتری را تحت سناریوی SSP2-4.5 نسبت به دوره مرجع پیش‌بینی نموده‌اند. در همه ماه‌های

سال، هر دو مدل اقلیمی افزایش دمای حداقل را در آینده پیش‌بینی کرده‌اند. مدل ACCESS میزان افزایش دما را بین ۰/۸ (مارس) و ۱/۷ (دسامبر) درجه سلسیوس و مدل MPI بین ۰/۸ (مارس) و ۰/۶ (سپتامبر) درجه سلسیوس پیش‌بینی کرده است. در خصوص شبیه‌سازی دمای حداکثر در اقلیم آینده، هر دو مدل اقلیمی افزایش دما را در اکثر ماه‌های سال پیش‌بینی کرده‌اند.

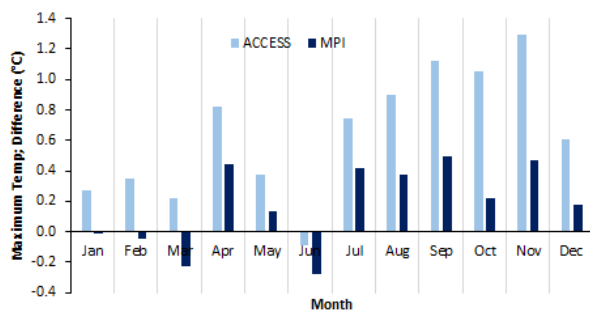
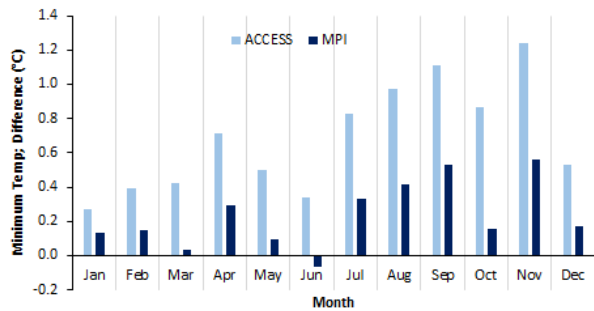
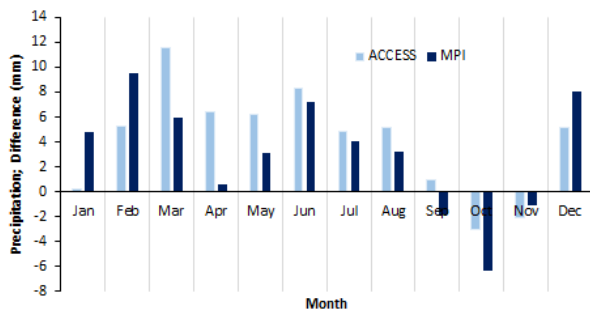


فصل

شکل ۴. مقایسه میانگین ماهانه بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در ایستگاه گرگان تحت اقلیم فعلی (Base) و سناریوی SSP2-4.5 مدل‌های اقلیمی منتخب

برای بدست آوردن یک نگرش کلی در مورد تغییرات متغیرهای اقلیمی در آینده نسبت به دوره پایه، نتیجه شبیه‌سازی در سرجمع ایستگاه‌ها برای هر یک از ماه‌های سال در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور، تفاضل میانگین بارش ایستگاه‌ها در دوره آینده در مقایسه با دوره پایه، در ماه‌های اکتبر و نوامبر برای هر دو مدل منفی است و در مابقی ماه‌ها مثبت است (به استثنای ماه سپتامبر که تفاضل در مورد مدل ACCESS مثبت و برای مدل MPI منفی است). تفاضل مثبت به معنی آن است که مدل در آینده مقدار بزرگتری را نسبت به گذشته برآورد کرده است و تفاضل منفی عکس این حالت است. ماه مارس با بزرگی +۱۲ میلی‌متر بزرگترین اختلاف مثبت و ماه اکتبر با -۶ میلی‌متر بزرگترین اختلاف منفی را پیش‌بینی کرده است. در مورد دمای حداقل، در همه ماه‌ها مقادیر اختلاف دوره آینده و پایه مثبت و مدل ACCESS همواره اختلاف بزرگتری را نسبت به MPI پیش‌بینی کرده است. بر مبنای مدل ACCESS، بیشینه اختلافات مربوط به ماه نوامبر (۱/۲ درجه سلسیوس) و کمینه آن مربوط به ماه ژانویه (۰/۳ درجه سلسیوس) است. در مورد دمای حداکثر، در همه ماه‌ها (بجز ژوئن) مقادیر اختلاف دوره آینده و پایه مثبت و مدل ACCESS همواره اختلاف بزرگتری را نسبت به MPI پیش‌بینی کرده است. بیشینه اختلافات با دوره پایه، مربوط به ماه نوامبر (۱/۲ درجه سلسیوس) و کمینه آن مربوط به ماه ژانویه (۰/۲- درجه سلسیوس) است.

نتایج این مطالعه در بخش تغییر اقلیم، حاکی از افزایش دما تقریباً در همه ماه‌های سال (Silakhori et al., 2022) و قربانی مینایی و همکاران، ۱۴۰۳) و کاهش بارش پاییز و افزایش بارش در دیگر فصول در دوره آینده در مقایسه با گذشته است. گرچه در مورد دما نتایج این مطالعه مطابق مناسبی با دیگر مطالعات دارد ولی در مورد بارش، مطالعات انجام شده به‌صورت ایستگاهی (قربانی مینایی و همکاران، ۱۴۰۳) روند کاهشی، در غرب استان (Akbari et al., 2016) افزایش خفیف و در حوضه زیارت (Silakhori et al., 2022) افزایش نسبی را گزارش کرده‌اند، که دلیل آن تفاوت در نوع مدل‌های مورد استفاده و روش ریزمقیاس‌سازی است.

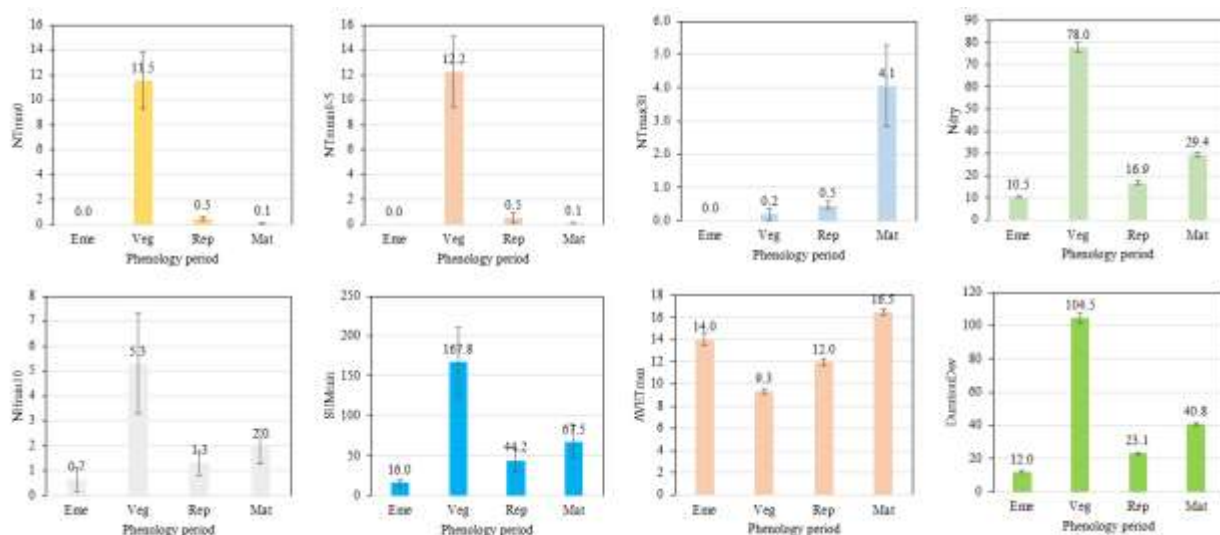


شکل ۵. مقایسه تفاضل میانگین مقادیر آینده (مبتنی بر دو مدل ACCESS و MPI) و گذشته برای متغیرهای بارش (بالا، سمت چپ)، دمای حداقل (بالا، سمت راست)، و دمای حداکثر (پایین)

### تحلیل نمایه‌های اقلیم کشاورزی در دوره گذشته

هشت نمایه اقلیم کشاورزی در همه ایستگاههای منتخب در دوره رشد و نمو کلزا تحت شرایط اقلیم فعلی محاسبه و در شکل ۶ ارائه شد. به علاوه، روند زمانی هر یک از نمایه‌ها در هر یک از مراحل فنولوژی طی دوره زمانی پایه ۱۹۹۲-۲۰۲۱ مورد بررسی قرار گرفت که برای جلوگیری از طولانی شدن مقاله، نمودارهای مربوطه ارائه نشد. با توجه به شکل ۶، تعداد روزهای خشک (Ndry) در مرحله رشد رویشی (با میانگین ۷۸ روز) بیشتر از سایر دوره‌ها است که البته به دلیل دوره زمانی طولانی‌تر این مرحله نمودی است. البته اگر نسبت درصد طول دوره خشکی به طول مرحله فنولوژی را در نظر بگیریم، احتمال وقوع خشکی در مرحله اول نمو (سبز شدن) بیشتر از دیگر مراحل است. بررسی سری زمانی Ndry (شکل ارائه نشده است) در طی دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۲۲) نشان می‌دهد که سه مرحله سبز شدن، رشد رویشی و پر شدن دانه از روند افزایشی و طی مرحله رشد زایشی، از روند کاهشی برخوردار است. میانگین تعداد روزهای بارش سنگین بیش از ۱۰ میلی‌متر (NHrain10) در دوره رشد رویشی ۵ روز و در سایر مراحل کمتر از ۲ روز است. به دلیل طولانی بودن دوره رشد رویشی، احتمال خسارت بارش سنگین به محصول در این دوره نیز بیشتر است. بررسی سری زمانی NHrain10 (شکل ارائه نشده است) نشان می‌دهد که در دوره رشد رویشی، در تمام سال‌ها، دست‌کم ۳ پدیده بارش سنگین اتفاق افتاده است که دال بر قطعیت بالای وقوع آن در دوره رشد رویشی است. در مقابل، در سایر مراحل فنولوژی، در برخی سال‌ها این پدیده هرگز اتفاق نیفتاده است. تعداد روزهای یخبندان (NTmin0) غالباً در دوره رشد رویشی اتفاق افتاده است که منطبق بر فصل زمستان و اوایل بهار است. در زمستان سال ۲۰۰۶، که سردترین زمستان سه دهه اخیر در ایران بوده است، فراوانی وقوع یخبندان در همان دوره نمو، ۴۶ روز بوده است. در سایر دوره‌های نمو، به‌ویژه دوره رسیدن دانه، وقوع این پدیده نادر است. تعداد روزهای با دمای متوسط صفر تا ۵ درجه سلسیوس (NTmea0-5) پارامتر مهمی برای تامین نیاز سرمایی (بهاره‌سازی) کلزا در مرحله رشد رویشی است و در سایر مراحل نمو اهمیتی ندارد. میانگین سالانه این نمایه در مرحله رویشی ۱۲/۲ روز است و سری زمانی آن روند کاهشی را طی دوره پایه در ایستگاه‌های منتخب نشان می‌دهد. میانگین سالانه تعداد روزهای با دمای حداکثر بیش از ۳۰ درجه سلسیوس (NTmax30) یا تنش گرمایی، در مرحله رسیدن دانه بیش از دیگر مراحل نمودی است. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی تنش گرمایی (۱۱ روز) در مرحله پر شدن دانه در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۳ اتفاق افتاده است. در دیگر مراحل نمو، میانگین این نمایه کمتر از یک روز است. حتی در مرحله رشد زایشی، بیشینه تنش گرمایی ۳ روز بوده است. نکته دیگر آن که تعداد روزهای NTmax30 در مرحله رسیدن دانه روند کاهشی داشته است. میانگین نمایه مجموع بارش مرحله فنولوژی (SUMrain) در مرحله رشد رویشی ۱۶۷/۸ میلی‌متر است و مراحل رسیدن دانه، رشد زایشی و سبز شدن بارش‌های کمتری دریافت می‌کند. بررسی سری‌های زمانی مجموع بارش مراحل مختلف فنولوژی نشان می‌دهد

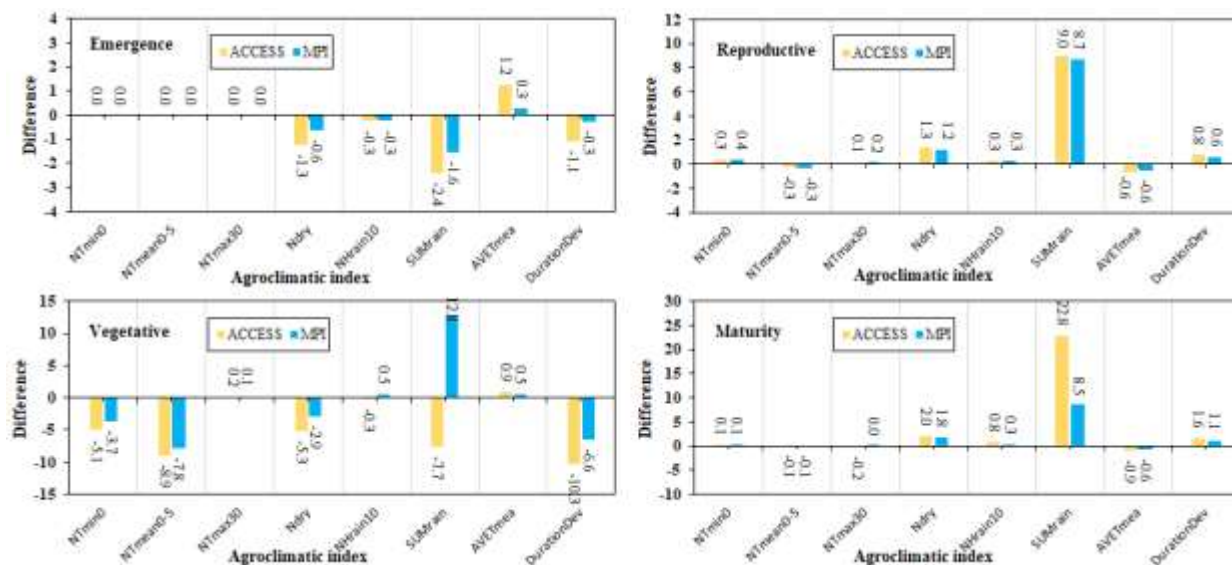
که حد بالای بارش در مرحله رشد زایشی به بیش از ۲۰۰ میلی‌متر و در مرحله رسیدن دانه به ۴۰۰ میلی‌متر نیز می‌رسد که بسیار قابل توجه است، زیرا این مقدار بارش می‌تواند با ایجاد ورس و توسعه بیماری‌ها سبب خسارت زیادی به محصول در زمان برداشت گردد. میانگین دمای هوا (AVETmea) بین ۹/۳ (مرحله رشد رویشی) و ۱۶/۵ درجه سلسیوس (مرحله رسیدن دانه) تغییر می‌کند زیرا رشد رویشی عمدتاً منطبق بر فصل زمستان و رسیدن دانه منطبق بر اواسط تا اواخر بهار است. میانگین طول مرحله فنولوژی (DurationDev) در مرحله رشد رویشی ۱۰۴/۵ روز است و طول مراحل سبز شدن، زایشی و پر شدن دانه به ترتیب، ۱۲، ۲۳/۱ و ۴۰/۸ روز است.



شکل ۶. میانگین و انحراف معیار نمایه‌های اقلیم کشاورزی در مراحل مختلف نمو کلزا در دوره پایه در سرجمع ایستگاه‌های منتخب استان گلستان

### تاثیر تغییر اقلیم بر نمایه‌های اقلیم کشاورزی

تفاضل نمایه‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دو مدل ACCESS و MPI با مقادیر متناظرشان در دوره پایه در هر یک از مراحل چهارگانه فنولوژی کلزا در شکل ۷ ارائه شده است. مقادیر منفی تفاضل دال بر کاهش نمایه‌ها در شرایط تغییر اقلیم در مقایسه با دوره پایه است و بالعکس، مقادیر مثبت دال بر افزایش نمایه‌ها در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه است. با توجه به شکل مذکور، در مرحله سبز شدن (Emergence)، میانگین نمایه‌های NTmin0، NTmin0-5 و NTmax30 در دوره آینده نسبت به دوره پایه تغییر نمی‌کند. فقط مقدار نمایه AVETmea تحت در هر دو مدل در آینده افزایش ۰/۳ و ۱/۲ درجه سلسیوس خواهند داشت. مابقی نمایه‌ها در مرحله سبز شدن در آینده نسبت به گذشته کاهش می‌یابند. در مرحله رشد رویشی (Vegetative)، اکثر نمایه‌ها تغییرات کاهشی تحت شرایط تغییر اقلیم نشان می‌دهند. کاهش زیادی در نمایه‌های NTmin0 و NTmin0-5 اتفاق می‌افتد. به‌ویژه در مورد NTmean0-5 کاهش‌ها به طور متوسط تا تقریباً ۹ روز نیز می‌رسد و بدین معنی است که گیاه ممکن است در شرایط تغییر اقلیم نیاز سرمایی کامل را دریافت نکند. در این مرحله فنولوژی، تفاوتی بین دوره آینده و پایه از نظر نمایه‌های NTmax30 و NHrain10 وجود ندارد. به‌علاوه، طول دوره خشک تا ۵ روز و طول دوره رشد رویشی تا ۱۰ روز کاهش می‌یابد. تضاد مشخصی بین دو مدل از نظر مقدار بارش (SUMrain) در دوره رشد رویشی وجود دارد. مدل ACCESS کاهش ۷/۷ میلی‌متر و مدل MPI افزایش ۱۲/۸ میلی‌متر را نسبت به دوره پایه پیش‌بینی کرده است. در مورد میانگین دما (AVETmea)، هر دو مدل افزایش دمای ۰/۵ تا ۰/۹ درجه سلسیوس را به‌طور متوسط در دوره رویشی پیش‌بینی کرده‌اند. نتایج برای مراحل رشد زایشی و رسیدن دانه کلزا تقریباً مشابه است. میانگین دمای هوا (AVETmea) در هر دو دوره کاهش می‌یابد و همین امر علت افزایش طول (DurationDev) هر دو دوره رشد در آینده می‌باشد. مقدار بارندگی (SUMrain) در هر دو دوره افزایش می‌یابد و این افزایش برای مرحله انتهایی فنولوژی کلزا بیشتر از مرحله رشد زایشی پیش‌بینی شده است. سایر متغیرها در این دو دوره فنولوژی، اختلاف مثبت اندکی با دوره پایه دارند.



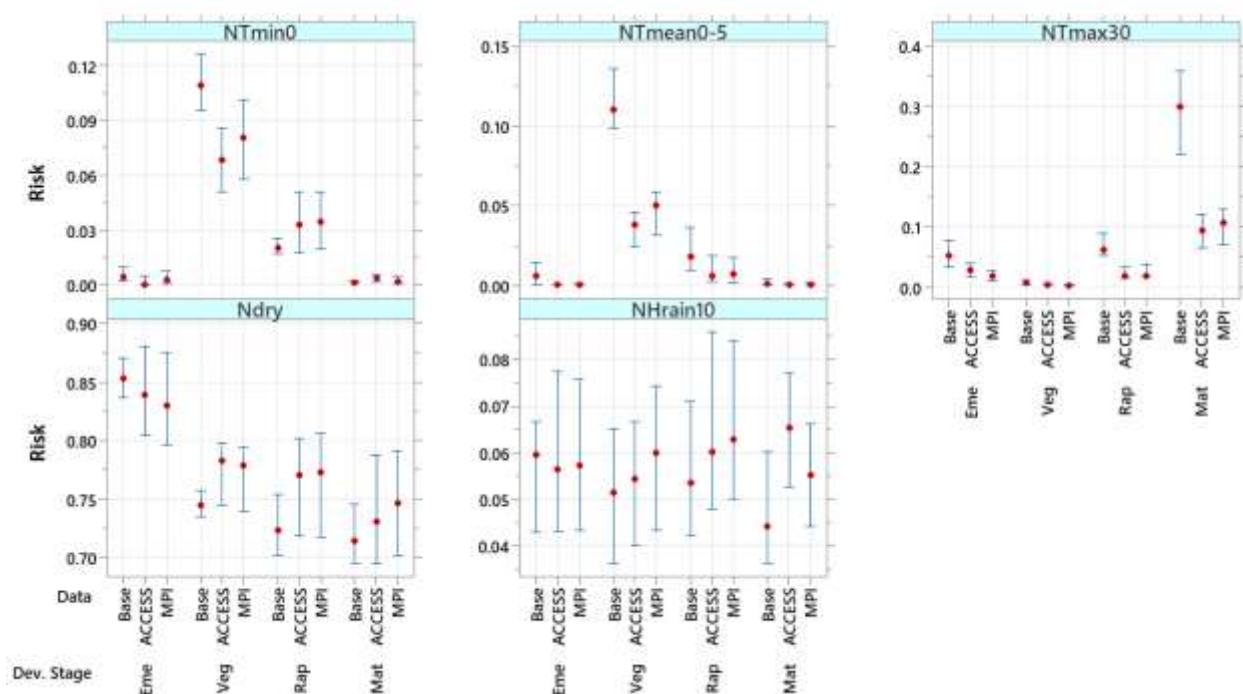
شکل ۷. تفاضل میانگین نمایه‌های اقلیم کشاورزی در دوره آینده (تحت دو مدل ACCESS و MPI) و دوره پایه در سرجمع ایستگاه‌های منتخب

پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که کلزا در مراحل مختلف فنولوژی (از جوانه‌زنی تا رسیدگی) حساسیت متفاوتی به تنش‌های اقلیمی به ویژه دماهای فرین و تنش رطوبتی دارد. پژوهشی در ایستگاه تحقیقاتی گنبد (گلستان) نشان داد که رابطه معکوسی بین میانگین دما و طول دوره جوانه‌زنی تا سبز شدن وجود دارد. به این معنا که افزایش دما این دوره را کوتاه می‌کند، اما در دماهای بسیار بالا می‌تواند جوانه‌زنی را مختل کند (فرجی، ۱۳۹۴). این نتیجه با یافته‌های این تحقیق همخوانی دارد. در مرحله جوانه‌زنی تا سبز شدن و همچنین رشد رویشی دمای هوا در آینده بیشتر از اقلیم فعلی خواهد بود و همین امر طول این دوره‌ها را در استان کوتاه نموده است. مطالعات انجام‌شده بر این نکته تأکید دارند که مرحله گلدهی حساسترین مرحله فنولوژی کلزا به تنش گرمایی است (Markie et al., 2025). خوشبختانه، در منطقه مطالعاتی، میانگین دمای هوا و تعداد روزهای با دمای بیش از ۳۰ درجه سلسیوس در طول دوره رشد زایشی در آینده کاهش می‌یابد و همین امر سبب افزایش طول مرحله گلدهی در آینده خواهد شد. شایان ذکر است که تأثیر تنش گرمایی در مرحله پرشدن دانه نیز همانند مرحله گلدهی است و می‌تواند باعث کاهش طول دوره رشد و کاهش عملکرد شود (فرجی، ۱۳۹۴). در مطالعه حاضر، به دلیل کاهش میانگین دما در آینده در دوره پرشدن دانه، طول دوره پرشدن افزایش خواهد یافت. این نتایج مغایر با نتایج حیدری بنی و همکاران (۱۳۹۷) در استان چهارمحال و بختیاری است که نتیجه گرفتند تغییر اقلیم باعث کاهش طول همه مراحل فنولوژی کلزا می‌شود.

#### ارزیابی ریسک نمایه‌های اقلیم کشاورزی

ریسک (احتمال وقوع) نمایه‌های اقلیم کشاورزی مبتنی بر فراوانی وقوع شامل تعداد روزهای یخبندان (NTmin0)، تعداد روزهای بهارسازی (NTmean0-5)، تعداد روزهای تنش گرمایی (NTmax30)، تعداد روزهای خشک (Ndry) و تعداد روزهای بارش سنگین (Nhrain10) در هر یک از مراحل چهارگانه نمو کلزا، در دوره پایه و دوره آینده (تحت دو مدل اقلیم جهانی) در همه ایستگاهها محاسبه و نتایج در سرجمع ایستگاه‌ها در شکل ۸ ارائه گردید. نتایج حاصل از مقایسه ریسک وقوع نمایه‌ها در دوره پایه و دوره آتی به شرح زیر است: الف) احتمال وقوع یخبندان در مراحل رویشی و زایشی کلزا بیشتر از سایر مراحل است. انتظار می‌رود در آینده ریسک وقوع یخبندان در دوره رویشی، کاهش و در دوره زایشی، افزایش یابد. این نتیجه با مطالعه Pullens et al. (2019) مبنی بر افزایش ریسک وقوع دماهای پایین در اواخر قرن بیستم در نواحی کشت کلزای زمستانه در اروپا مطابقت دارد. ب) احتمال وقوع دماهای بین صفر تا ۵ درجه سلسیوس در مرحله رویشی و زایشی کلزا بیش از سایر مراحل است. انتظار می‌رود در آینده احتمال وقوع این دامنه دمایی کاهش یابد. ج) بالاترین احتمال وقوع دماهای بیش از ۳۰ درجه سلسیوس مربوط به مرحله رسیدن دانه است. البته در مراحل سبز شدن و زایشی نیز احتمال وقوع تنش گرمایی وجود دارد. در کل، انتظار می‌رود در آینده احتمال تنش گرمایی در همه مراحل فنولوژی کاهش یابد. د) احتمال وقوع بی‌بارشی در مرحله سبز شدن بیش از سایر مراحل است و انتظار می‌رود در این مرحله، احتمال وقوع در آینده نسبت به دوره پایه کمتر باشد. در سایر مراحل فنولوژی، احتمال وقوع بی‌بارشی در آینده افزایش می‌یابد. نتیجه اخیر با مطالعه Pullens et al. (2019) مبنی بر افزایش تنش خشکسالی در مناطق کشت کلزای زمستانه در نواحی جنوبی اروپا در اواخر قرن بیستم مطابقت دارد. و) احتمال وقوع بارش سنگین در مرحله سبز شدن، در آینده کاهش می‌یابد. با این حال، احتمال وقوع بارش

سنگین در سایر مراحل، در آینده افزایش می‌یابد.



شکل ۸. میانه و حدود اطمینان ۵۰ درصد ریسک وقوع نمایه‌های اقلیم کشاورزی در سرجمع ایستگاه‌ها در مراحل مختلف فنولوژی کلزا مبتنی بر داده‌های دوره پایه (Base) و دوره آینده تحت دو مدل اقلیم جهانی (ACCESS و MPI)

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از خروجی ریزمقیاس‌شده دو مدل ACCESS و MPI، تاثیر سناریوی حد واسطه SSP2-4.5 گزارش ششم تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دما در مراحل مختلف فنولوژی گیاه کلزا در استان گلستان مورد بررسی قرار گرفت. برخلاف بسیاری از مناطق دیگر ایران و جهان که تغییر اقلیم عمدتاً اثرات منفی بر کلزا دارد، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی آینده در منطقه مورد مطالعه، در مراحل حساس فنولوژی (زایشی و پر شدن دانه) بهبود نسبی پیدا خواهد کرد به طوری که: الف) دماهای فرین گرمایی در مرحله گلدهی و پر شدن دانه کاهش می‌یابند، ب) بارندگی در مراحل حساس رشد زایشی و رسیدن دانه افزایش می‌یابد، ج) طول دوره گلدهی و پر شدن دانه به دلیل کاهش میانگین دما افزایش می‌یابد. با این حال، چالش‌هایی از قبیل موارد زیر وجود دارد: الف) کاهش نیاز سرمایی دریافتی در طول دوره رشد رویشی، ب) افزایش ریسک یخبندان در مرحله رشد زایشی، ج) افزایش ریسک بارش‌های سنگین در مراحل پایانی رشد. راهبردهای مدیریتی برای رفع این چالش‌ها انتخاب ارقام با نیاز سرمایی کمتر و انتخاب تاریخ کاشت مناسب کلزا است تا تاریخ گلدهی پس از آخرین یخبندان بهاره قرار گیرد. در مورد بارش سنگین، لازم است زهکشی مزرعه برای جلوگیری از غرقابی شدن بهبود یابد. متأسفانه، (طبق مصاحبه انجام شده با کشاورزان و بررسی‌های میدانی) در سال زراعی جاری (۱۴۰۴-۱۴۰۵) بارش‌های زیاد و مداوم چند ماهه در استان گلستان اتفاق افتاده است که هنوز هم ادامه داشته و با غرقابی کردن خاک و عدم وجود زهکش در مزارع، در کنار کاهش زیاد دمای هوا سبب از بین رفتن محصول و حمله بیماری‌های قارچی به مزارع بویژه در نواحی دشت نزدیک به کوهپایه‌ها شده است. در نتیجه، کل محصول کلزا در این مناطق نابود شده است و احتمالاً سبب کاهش عملکرد کلی کلزا در سطح استان خواهد شد.

#### منابع فارسی

آب شناس، محسن، کامکار، بهنام، سلطانی، افشین، کاظمی، حسین (۱۴۰۲). پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر تناسب اراضی کشت کلزا (*Brassica napus L.*) در استان مازندران با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی SDSM و Lars-WG بوم‌شناسی کشاورزی، ۱۵ (۴): ۸۶۲-۸۴۳.

آبابایی، بهنام، میرزائی، فرهاد، و سهرابی، تیمور (۱۳۹۰). ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG در ۱۲ ایستگاه ساحلی ایران. پژوهش آب ایران ۵، ۲۱۷-۲۲۲.

امیدوار، کمال، مزیدی، احمد، دوست‌مرادی، سودابه (۱۳۹۳). امکان سنجی اقلیمی کشت کلزا در استان کرمانشاه. جغرافیا و توسعه، ۳۵: ۹۷-۱۱۶.

ترابی، بنیامین، حبیب پورکاشفی، احسان، سلطانی، افشین، و زینلی، ابراهیم (۱۴۰۳). ارزیابی راهکارهای سازگاری گیاه کلزا به اقلیم آینده در ایران. پژوهش‌های تولید گیاهی. پذیرفته شده برای انتشار.

حیدری بنی، مهران، یزدان‌پناه، حجت اله، محنت‌کش، عبدالمحمد (۱۳۹۷). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژیکی کلزا (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۲۵(۲)، ۳۷۳-۳۸۹.

دهقان، زهره، فتحیان، فرهاد، اسلامیان، سعید (۱۳۹۴). ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های SDSM، IDW و LARS-WG برای شبیه‌سازی و ریز مقیاس کردن دما و بارش آب و خاک ۲۹(۵)، ۱۳۷۶-۱۳۹۰.

دولت پرست، بهروز، حسین پناهی، فرزاد، منصوری حامد، سی و سه مرده، عادل (۱۴۰۲). اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد دانه کلزا در دشت دهگلان استان کردستان با استفاده از برنامه DSSAT. نشریه علوم زراعی ایران، ۲۵(۲)، ۱۰۱-۱۱۸.

رهبان، سمانه، ترابی، بنیامین، سلطانی، افشین، و زینلی، ابراهیم (۱۴۰۰). استفاده از مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی فنولوژی، عملکرد و بهره‌وری آب کلزا در شرایط ایران. بوم‌شناسی کشاورزی، ۱۳(۱)، ۱۵۷-۱۷۷.

سختوتی فر، شهرام، راحمی کارزکی، علی، نخزری مقدم، علی، و ملاشاهی، مهدی (۱۳۹۹). شناسایی عوامل محدودکننده عملکرد کلزا با استفاده از روش تحلیل مقایسه کارکرد به زراعی کشاورزی ۲۲(۱)، ۱۳-۲۵.

شیرانی راد، امیرحسین، و احمدی، مهدی (۱۳۷۴). اثر تاریخ کاشت و تراکم بوته بر صفات زراعی دو رقم کلزای پاییزه. نهال و بذر، ۱۱(۲)، ۹-۲۰.

صالحی، برومند، گودرزی، مسعود، حسینی، سیداسعد (۱۳۹۵). پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه. مهندسی و مدیریت آبخیز ۸(۴)، ۴۲۵-۴۳۸.

عبدی، سکیه، عابدی، رویا، کاظمی راد، لادن، عابدی، طوبی (۱۴۰۱). بررسی اثر تغییر عوامل اقلیمی موثر بر تولید کلزا با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس در شهرستان اهر. هواشناسی کشاورزی، ۱۱(۱)، ۴۹-۵۵.

فرجی، ابوالفضل (۱۳۹۴). بررسی تأثیر دما و فتوپریود بر مراحل رشد و نمو دو رقم کلزا. به زراعی کشاورزی ۱۷(۴)، ۱۰۴۹-۱۰۶۲.

قربانی مینائی، لیلی، مساعدی، ابوالفضل، ذاکری نیا، مهدی، کلبعلی، الهام، و قباپی سوق، محمد (۱۴۰۳). بررسی تغییر اقلیم بر روند دما و بارش آبی حوزه قره‌سو طبق مدل‌های CMIP6. تحقیقات آب و خاک ایران ۵۵، ۲۴۵-۲۶۸.

مجنون حسینی، ناصر (۱۴۰۳). زراعت، تولید و فراوری گیاهان صنعتی و علوفه‌ای. انتشارات دانشگاه تهران.

وزارت جهاد کشاورزی. (۱۴۰۴). آمارنامه کشاورزی: محصولات زراعی سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳. معاونت آمار، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات. تهران، ایران.

#### منابع انگلیسی

- Ababaei, B., Mirzaei, F., & Sohrabi, T. (2011). Assessment of LARS-WG Performance in 12 Coastal Stations of Iran. *Iranian Water Research Journal*, 5(2), 217-222. (In Persian)
- Abdi, S., Abedi, R., Kazemirad, L., & Abedi, T. (2022). Investigation of climatic factors affecting Canola production using TOPSIS multicriteria decision making approach in Ahar region. *Journal of Agricultural Meteorology*, 10(1), 55-69. (In Persian)
- Abdulsahib, S.M., Zubaidi, S.L., Almamalachy, Y., Dulaimi, A. (2024). Temperature and precipitation change assessment in the North of Iraq using LARS-WG and CMIP6 models. *Water (Switzerland)*, 16(19), 1-25.
- Abshenas, M., Kamkar, B., Soltani, A., & Kazemi, H. (2023). Predicting the Effect of Climate Change on the Suitability of Canola (*Brassica napus* L.) Cultivation Land using SDSM and Lars-WG Models in Mazandaran Province. *Journal Of Agroecology*, 15(4), 843-862. (In Persian)
- Akbari, M., Ownegh, M., Asgari, H., Sadoddin, A., & Khosravi, H. (2016). Drought Monitoring Based on the SPI and RDI Indices under Climate Change Scenarios (Case Study: Semi-Arid Areas of West Golestan Province). *ECOPERSIA* 4, 1585-1602.
- C.C.C. (2017). ERA5: Fifth Generation of ECMWF Atmospheric Reanalyses of the Global Climate. Copernic. Clim. Change Serv. Clim. Data Store (CDS). 15, 2020.
- Chen, H., Guo, J., Zhang, Z., Xu, C.Y. (2013). Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Sudan

- by using LARS-WG in future. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(3–4), 363–375.
- Dehghan, Z., Fathian, F., & Eslamian, S. (2015). Comparative Assessment of SDSM, IDW and LARS-WG Models for Simulation and Downscaling of Temperature and Precipitation. *Water and Soil*, 29(5), 1376-1390. (In Persian)
- Dehghani, N., Goodarzi, M., & Karimi, M. (2025). Performance Analysis of LARS-WG and SDSM Models in Downscaling the Output of CMIP6 Models in The Urmia Lake Watershed. *Environment and Interdisciplinary Development*, 10, 98-111.
- Disasa, K.N., Yan, H., Zhang, J., Wang, G., Zhang, C., Zhang, D., Wang, B., & Hao, B. (2026). Comprehensive review of drought characteristics and intensification under climate change: implications for agriculture and water resources. *Journal of Hydrology*, 664, 134571.
- Dolatparast, B., Hosseinpanahi, F., Mansouri, H., & Siosemardeh, A. (2023). Effect of climate change on growth and seed yield of canola (*Brassica napus* L.) in Dehgolan plain of Kurdistan province in Iran using the DSSAT program. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 25(2), 101-118. (In Persian)
- Faraji, A. (2015). Evaluation the effect of temperature and photoperiod on growth and development periods of two canola cultivars. *Journal of Crops Improvement*, 17(4), 1049-1062. (In Persian)
- Fenta Mekonnen, D., & Disse, M. (2018). Analyzing the future climate change of Upper Blue Nile River basin using statistical downscaling techniques. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 2391-2408.
- FAO (2024). FAOSTAT: Crops and livestock products [Internet]. Rome: FAO. [Available from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>]
- GhorbaniMinaei, L., Mosaedi, A., Zakerinia, M., Kalbali, E. & Ghabaei Soogh, M. (2024). Study of future climate change on the temperature and precipitation trends in Qarasu basin based on the CMIP6 models. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(2), 245-268. (In Persian)
- Hatfield, J.L., Sivakumar, M.V.K., & Prueger, J.H. (2019). *Agroclimatology: Linking Agriculture to Climate*. *Agronomy Monograph* 60. USA.
- Heidarybeni, M., Yazdanpanh, H. and Mehnatkesh, A. (2018). Impacts of Climate Change on Canola Yields and Phenology (Case Study: Chahrmahal Va Bakhtiari, Iran). *Physical Geography Research*, 50(2), 373-389. (In Persian)
- IPCC (2022). WGI Interactive Atlas: Regional information. Intergovernmental panel on climate change. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>. Accessed 10/03/2024.
- Khan, S.F., Naeem, U.A. (2023). Future climate projections using the LARS-WG6 downscaling model over Upper Indus Basin, Pakistan. *Environmental Monitoring Assessment*, 195(7).
- Kutcher, H.R., Warland, J.S., & Brandt, S.A. (2010). Temperature and precipitation effects on canola yields in Saskatchewan, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 161-165.
- Lotfi, M., Kamali, G.A., Meshkatee, A.H., & Varshavian, V. (2022). Performance analysis of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulating temperature and precipitation changes in the West of Iran. *Modeling Earth System Environment*, 8(4), 4649–4659
- Majnoon Hosseini, N. (2024). *Agriculture, production and processing of industrial and fodder plants*. Tehran University Press. (In Persian)
- Markie, E., Khoddami, A., Liu, S. Y., Chen, S., & Tan, D. K. Y. (2025). The Impact of Heat Stress on Canola (*Brassica napus* L.) Yield, Oil, and Fatty Acid Profile. *Agronomy*, 15(7), 1511.
- Mauritsen, T., Bader, J., Becker, T., Behrens, J., Bittner, M., Brokopf, R. & Roeckner, E. (2019). Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1. 2) and its response to increasing CO<sub>2</sub>. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(4), 998-1038.
- Mehan, S., Guo, T., Gitau, M.W., & Flanagan, D.C. (2017). Comparative study of different stochastic weather generators for long-term climate data simulation. *Climate*, 5(2), 26.
- Ministry of Agricultural Jihad. (2025). *Agricultural Statistics: Crops for the Crop Year 1402-1403*. Deputy for Statistics, Information and Communication Technology Center. Tehran, Iran. (In Persian)
- Mohammed, Z.M., & Hassan, W.H. (2022). Climate change and the projection of future temperature and precipitation in southern Iraq using a LARS-WG model. *Modeling Earth System Environment*, 8(3), 4205–4218.
- Omidvar, K., Mazidi, A. & Doostmoradi, S. (2014). Climatic feasibility of rapeseed cultivation in Kermanshah province. *Geography and Development*, 12(35), 97-116. (In Persian)
- Pullens, J.W.M., Sharif, B., Trnka, M., Balek, J., Semenov, M.A., & Olesen, J.E. (2019). Risk factors for European winter oilseed rape production under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 272-273, 30-39.
- Punyawansiri, S., & Kwanyuen, B. (2020). Forecasting the future temperature using a downscaling method by LARS-WG stochastic weather generator at the local site of Phitsanulok province, Thailand. *Atmospheric and Climate Sciences*, 10(4), 538-552.

- Qian, B., Jing, Q., Bélanger, G., Shang, J., Huffman, T., Liu, J. & Hoogenboom, G. (2018), Simulated canola yield responses to climate change and adaptation in Canada. *Agronomy Journal*, 110, 133-146.
- Radmanesh, Y., Tabrizi, M.S., Etedali, H.R., Azizian, A., & Babazadeh, H. (2023). Comparative evaluation of the accuracy of re-analysed and gauge-based climatic data in Iran. *Journal of Earth System Science*, 132, 190.
- Rahban, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinali, E. (2021). Using SSM-iCrop model to predict phenology, yield, and water productivity of canola (*Brassica napus L.*) in Iran condition. *Journal of Agroecology*, 13(1), 157-177. (In Persian)
- Rathke, G.W., & Diepenbrock, W. (2006). Energy balance of winter oilseed rape (*Brassica napus L.*) cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. *European Journal of Agronomy*, 24, 35-44.
- Salahi, B., Goudarzi, M., & Hosseini, S.A. (2016). Predicting the temperature and precipitation changes during the 2050s in Urmia Lake Basin. *Watershed Engineering and Management*, 8(4), 425-438. (In Persian)
- Secchi, M.A., Fernandez, J A., Stamm, M. J., Durrett, T., Prasad, P.V.V., Messina, C.D., & Ciampitti, I.A. (2023). Effects of heat and drought on canola (*Brassica napus L.*) yield, oil, and protein: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 293, 108848.
- Sekhavati-Far, S., Rahemi Karizaki, A., Nakhzari Moghaddam, A., & Mollashahi, M. (2020). Identification of rapeseed limiting factors using performance comparison analysis. *Journal of Crops Improvement*, 22(1), 13-25. (In Persian)
- Semenov, M., Brooks, R., Barrow, E., Richardson, C. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10, 95–107
- Semenov, M.A., Barrow, E.M. (2002). LARS-WG a stochastic weather generator for use in climate impact studies. *User Manual*, Hertfordshire
- Semenov, M.A., Senapati, N., Coleman, K., & Collins, A.L. (2024). A dataset of CMIP6-based climate scenarios for climate change impact assessment in Great Britain. *Data Brief*, 55,110709.
- Semenov, M.A., Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41, 1–14.
- Semenov, M.A., Stratonovitch, P. (2015). Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Climate Research*, 65, 123–139.
- Shen, Z., Ding, M., Huang, R., Wu, H., & Yong, B. (2026). Modeling and characterizing errors in satellite and reanalysis precipitation estimates using a two-step decomposition procedure. *Journal of Hydrology*, 669, 135009.
- Shirani-Rad, A.H., Ahmadi, M. (1995). The effect of planting date and plant density on agronomic traits of two winter rapeseed cultivars. *Seed and Plant*, 11(2), 9-20. (In Persian)
- Silakhori, E., Dahmardeh Ghaleno, M.R., Meshram, S.G. et al. (2022). To assess the impacts of climate change on runoff in Golestan Province, Iran. *Natural Hazards* 112, 281–300.
- Torabi, B., Habibpour-Kashefi, E., Soltani, A., & Zeinali, E. (2024). Assessment of Adaptation Strategies for Canola to Future Climate in Iran. *Journal of Plant Production Research*. (Articles in Press) (In Persian)
- Wang, Y., Fan, J., & Shao, M.A. (2007). Adaptability of climate generator of LARS-WG on the Loess Plateau. *Science of Soil Water Conservation*, 5(3), 24–27.
- Weymann, W., Böttcher, U., Steling, K., & Kage, H. (2015). Effects of weather conditions during different growth phases on yield formation of winter oilseed rape. *Field Crops Research*, 173, 41-48.
- Xu, Y. (2023). hyfo: Hydrology and Climate Forecasting R Package for Data Analysis and Visualization. Retrieved from <https://yuanchao-xu.github.io/hyfo/>
- Zhang, Z., Lu, J., Cong, R., Ren, T., & Li, X. (2017). Evaluating agroclimatic constraints and yield gaps for winter oilseed rape (*Brassica napus L.*) – A case study. *Scientific Reports*, 7, 7852.
- Ziehn, T., Chamberlain, M. A., Law, R. M., Lenton, A., Bodman, R. W., Dix, M., & Srbinovsky, J. (2020). The Australian earth system model: ACCESS-ESM1. 5. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 70(1), 193-214.