

Analysis of Strategy for Enhancing Drought Resistance in Canola with Emphasis on the Future Climate of Iran

Ehsan Habibpour-Kashefi¹, Benjamin Torabi^{2*}, Afshin Soltani³, Ebrahim Zeinali⁴

¹ Ph.D. Student, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: p.ehsan1393@gmail.com

² Corresponding Author, Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: ben_torabi@yahoo.com

³ Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: afshin.soltani@gmail.com

⁴ Associate Professor, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: zeinalistudents@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2022-01-16
Accepted: 2024-11-27

Keywords:
Climate Change
Simulation
Yield
SSM-iCrop2 Model
Adaptation

ABSTRACT

Background and objectives: The canola plant (*Brassica napus* L.), containing 40 to 44 percent oil, is considered one of the most important edible oilseeds and is the third most significant annual oilseed crop in the world after soybean and oil palm. The global demand for food is rapidly increasing due to the growing population. This demand is expected to rise by 60 percent by the year 2050, which poses a significant challenge, especially in the context of climate change. Human activities since the industrialization era have led to an increase in greenhouse gas emissions, which are expected to alter regional rainfall patterns and temperatures. The most critical feature of global climate change is the significant increase in temperature and uneven distribution of precipitation, which are limiting factors for sustainable development. The ultimate goal of assessing climate change risks is to identify adaptation strategies to achieve sustainable development in a specific region. Adaptation strategies vary depending on agricultural systems, regions, and climate change scenarios. The aim of this study is to examine adaptation strategies to enhance drought resistance in rapeseed plants concerning future climate conditions in the country.

Materials and methods: The present study aims to predict the impact of climate change on the growth and development of rainfed canola in Iran using two general circulation models, HadGEM2-ES and IPSL-CM5A-MR, derived from the CMIP5 project under two emission scenarios, RCP4.5 and RCP8.5, as reported in the fifth assessment report of the IPCC for the future period from 2040 to 2069. The downscaling of climatic parameters generating weather data was conducted using climate scenario generation tools within the AgMIP project and implemented in R software. After simulating the future climate and producing the necessary parameters (minimum temperature, maximum temperature, precipitation, and solar radiation), the growth and development simulation of rainfed canola was carried out using the SSM-iCrop2 model under current and future climate conditions. Additionally, the results of the growth and

development simulation of rainfed canola under future climatic conditions in Iran were evaluated with increased drought resistance.

Results: The results indicated that the average temperature during the canola growing season in the future is expected to increase by an average of 2.3 degrees Celsius for the RCP4.5 emission scenario and by 3.1 degrees Celsius for the RCP8.5 scenario compared to current conditions. Additionally, the results showed that the distribution of precipitation among the growth seasons would vary between the two models. The simulation results under climate change for both RCP4.5 and RCP8.5 scenarios revealed that, with the increase in average temperature, the length of the growing season would decrease in both models studied. However, it is predicted that water productivity will increase under both emission scenarios. It is anticipated that the average yield of canola in the country in its main cultivation areas will increase by 5% and 8% under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively, compared to current conditions. By implementing adaptation strategies to enhance drought resistance, it is expected that under both RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the average yield changes will increase by 8% and 9%, respectively, compared to a future without adaptation strategies.

Conclusion: The results of this study indicate that, on average, the yield in most of the main canola cultivation areas in the country is expected to increase under both emission scenarios. By implementing adaptation strategies to enhance drought resistance in the future climate, it is predicted that the average yield will increase compared to a future without adaptation strategies.

Cite this article: Habibpour-Kashefi, E., Torabi, B., Soltani, A., Zeinali, E. 2024. Analysis of Strategy for Enhancing Drought Resistance in Canola with Emphasis on the Future Climate of Iran. *Crop Production Journal*, 17 (3), 19-42.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejcp.2024.19842.2482

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تولید گیاهان زراعی

شاپا چاپی: ۲۰۰۸-۲۳۹۸
شاپا الکترونیکی: ۲۰۰۸-۷۴۰۳



تحلیل راهکار افزایش مقاومت به خشکی در کلزا با تأکید بر اقلیم آینده ایران

احسان حبیب پورکاشفی^۱، بنیامین ترابی^{۲*}، افشین سلطانی^۳، ابراهیم زینلی^۴

^۱ دانشجوی دکتری گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ehsan1393@gmail.com

^۲ استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: ben_torabi@yahoo.com

^۳ استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: afshin.soltani@gmail.com

^۴ دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: zeinalistudents@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: گیاه کلزا (<i>Brassica napus</i> L.) با دارا بودن ۴۰ الی ۴۴ درصد روغن یکی از مهمترین دانه‌های روغنی خوراکی محسوب شده و پس از سویا و نخل روغنی، سومین گیاه روغنی یک‌ساله جهان است. تقاضای جهانی غذا با افزایش سریع جمعیت رو به افزایش است. این تقاضا تا سال ۲۰۵۰ باید به میزان ۶۰ درصد افزایش یابد که می‌تواند یک چالش اساسی، به ویژه در زمینه تغییرات آب و هوایی باشد. فعالیت‌های بشر از زمان صنعتی شدن منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است که انتظار می‌رود الگوهای بارندگی و دمای منطقه‌ای را تغییر دهد. مهمترین خصوصیت تغییر اقلیم جهانی، افزایش معنی‌دار دما و توزیع ناموزون بارش است که فاکتورهای محدود کننده‌ای برای توسعه پایدار هستند. هدف نهایی ارزیابی ریسک تغییر اقلیم، شناسایی استراتژی‌های سازگاری برای دستیابی به توسعه پایدار در یک منطقه خاص است. راهکارهای سازگاری بسته به سیستم کشاورزی، منطقه و سناریوهای تغییر اقلیمی متفاوت می‌باشد. هدف از این مطالعه، بررسی راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی در گیاه کلزا نسبت به اقلیم آینده در ایران می‌باشد.
واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم شبیه‌سازی عملکرد مدل SSM-iCrop2 سازگاری	مواد و روش‌ها: تحقیق حاضر به منظور پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر رشد و نمو کلزای دیم در کشور با استفاده از دو مدل گردش عمومی HadGEM2-ES و IPSL-CM5A-MR حاصل پروژه CMIP5 تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 گزارش ارزیابی پنجم IPCC در دوره آینده ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ صورت گرفت. ریزمقیاس نمایی پارامترهای اقلیمی مولد آب و هوایی با ابزارهای تولید سناریوی اقلیمی در قالب پروژه AgMIP و در نرم افزار R انجام شد. پس از شبیه‌سازی اقلیم آینده و تولید پارامترهای مورد نیاز (دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تشعشع خورشیدی)، شبیه‌سازی رشد و نمو کلزای دیم با استفاده از مدل SSM-iCrop2 تحت شرایط اقلیم فعلی و آینده انجام شد. همچنین با افزایش مقاومت به خشکی، نتایج شبیه‌سازی رشد و نمو کلزای دیم در شرایط اقلیمی آینده در ایران مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد میانگین دما در فصل کشت کلزا در دوره آینده به طور متوسط در هر دو مدل برای سناریوی انتشار RCP4.5 به میزان ۲/۳ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی RCP8.5 به میزان ۳/۱ درجه سانتی‌گراد نسبت به شرایط فعلی افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج نشان داد که پراکنش بارندگی در بین فصول رشد بین دو مدل مذکور متغیر خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی در شرایط تغییر اقلیم در هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نشان داد که با افزایش میانگین دما، طول فصل رشد در هر دو مدل مورد بررسی کاهش خواهد یافت، اما پیش‌بینی می‌شود میزان بهره‌وری آب در هر دو سناریوی انتشار افزایش یابد. پیش‌بینی می‌شود میانگین عملکرد کلزا در کشور در مناطق اصلی کشت آن، در سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به میزان ۵ و ۸ درصد نسبت به شرایط فعلی افزایش پیدا یابد. با استفاده از راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی، پیش‌بینی می‌شود تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به میزان ۸ و ۹ درصد میانگین تغییرات عملکرد نسبت به آینده بدون راهکار سازگاری افزایش یابد.

نتیجه‌گیری: نتایج این تحقیق نشان داد به طور میانگین، عملکرد در اکثر مناطق اصلی کشت کلزا در ایران در هر دو سناریوی انتشار افزایش می‌یابد. با استفاده از راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی در اقلیم آینده، پیش‌بینی می‌شود میانگین عملکرد نسبت به آینده بدون راهکار سازگاری افزایش یابد.

استناد: حبیب پورکاشفی، احسان؛ ترابی، بنیامین؛ سلطانی، افشین؛ زینلی، ابراهیم. (۱۴۰۳). تحلیل راهکار افزایش مقاومت به خشکی در کلزا با تأکید بر اقلیم آینده ایران. مجله تولید گیاهان زراعی، ۱۷ (۳)، ۴۲-۱۹.



© نویسندگان.

DOI: 10.22069/ejcp.2024.19842.2482

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

گیاه کلزا (*Brassica napus* L.) با دارا بودن ۴۰ الی ۴۴ درصد روغن یکی از مهمترین دانه‌های روغنی خوراکی محسوب شده و پس از سویا و نخل روغنی، سومین گیاه روغنی یک‌ساله جهان است (۱). تولید جهانی روغن‌های نباتی برای پاسخگویی به غذا، سوخت و نیازهای صنعتی باید به دو برابر افزایش یابد (۲). این تقاضا تا سال ۲۰۵۰ باید به میزان ۶۰ درصد افزایش یابد که اهمیت آن می‌تواند در مواجهه با تغییر اقلیم در آینده بیشتر شود (۳).

فرآیندهای تغییر اقلیم شامل افزایش غلظت CO₂ اتمسفری، دما و نیز نوسانات بارندگی برای یک دوره زمانی طولانی مدت است (۴ و ۵). یکی از اثرات تغییر در بارندگی و دما به دلیل تغییرات اقلیمی، بروز خشکی است. خشکی معمولاً به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن میانگین بارندگی سالانه از نصف مقدار تبخیر پتانسیل کمتر باشد (۶). اگرچه کمبود آب ورودی ناشی از بارندگی معمولاً محرک اصلی تنش خشکی است، اما از دست دادن آب از خاک از طریق تبخیر، که ناشی از اثرات دما و شدت نور بالا است، می‌تواند رویداد تنش خشکی را تشدید کند (۷). انتظار می‌رود تغییرات آب و هوای جهانی در آینده به دلیل افزایش دمای هوا و CO₂ اتمسفری که در نهایت الگوهای بارندگی و توزیع آن را تغییر می‌دهد، شتاب بگیرد (۸).

بارندگی تأثیر بسزایی بر مقدار عملکرد تولیدی در مناطق دیم دارد. به طور کلی مناطق دیم بایستی حداقل ۳۵۰ میلی‌متر بارندگی با پراکنش مناسب دریافت کنند (۹). بنابراین پیش‌بینی مقدار و الگوی بارش در آینده جهت اتخاذ راهکارهای مناسب برای افزایش عملکرد از اهمیت بیشتری برخوردار خواهند بود (۱۰). شواهد موجود حاکی از آن است که پدیده تغییر اقلیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک از طریق کاهش میانگین بارش سالانه و افزایش تبخیر و تعرق و نیز افزایش دما

باعث کاهش سرعت رشد محصول شده که این امر کاهش عملکرد را به دنبال دارد (۱۱). کاهش عملکرد در اقلیم آینده به دلیل تنش خشکی و دماهای بالا در انتهای فصل رشد روی گیاه کلزا (۱۲) و گندم دیم (۱۳ و ۱۴) نیز گزارش شده است.

هدف نهایی ارزیابی ریسک تغییر اقلیم، شناسایی راهکارهای سازگاری برای دستیابی به توسعه پایدار در یک منطقه خاص است. راهکارهای سازگاری به تغییرات اقلیمی آینده و ارزیابی میزان کارایی هر یک از این راهکارها در استفاده از شرایط جدید اقلیمی در آینده برای توسعه پایدار یک ناحیه یا منطقه ضروری است. راهکارهای سازگاری بسته به سیستم کشاورزی، منطقه و سناریوهای تغییر اقلیم متفاوت می‌باشد (۱۵). از جمله این راهکارها می‌توان به ارقام جدید، تغییر در تاریخ کاشت، ایجاد تناوب‌های زراعی جدید، تغییر در تعداد سال‌های آیش جهت ذخیره‌سازی آب در خاک و همچنین معرفی گیاهان جایگزین در یک منطقه اشاره نمود (۱۳ و ۱۶).

راهکارهای سازگاری افزایش مقاومت به خشکی می‌تواند شامل افزایش طول ریشه (۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳)، افزایش سرعت توسعه سطح برگ (۲۰، ۲۴ و ۲۵)، افزایش کارایی تعرق گیاه (۱۹، ۲۶ و ۲۷) و تأخیر در پیری برگ (۱۹، ۲۸ و ۲۹) باشد. چندین مطالعه در این زمینه انجام شده، به عنوان مثال سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲a) گزارش کردند که افزایش حداکثر عمق موثر ریشه می‌تواند باعث افزایش پتانسیل عملکرد نخود دیم در تبریز شود (۹). افزایش حداکثر عمق موثر ریشه می‌تواند احتمال دسترسی به آب در طول فصل رشد را افزایش دهد که این موضوع می‌تواند منجر به افزایش عملکرد شود (۲۱). در مناطقی که تنش خشکی در انتهای فصل اتفاق می‌افتد، توسعه سریع تر سطح برگ (کاهش فیلوکرون) در ابتدای فصل رشد، این امکان را برای گیاه ایجاد می‌کند تا از رطوبت موجود در خاک در اوایل دوره رویشی

طول توسعه رشد گیاه، کلید دستیابی به پتانسیل عملکرد بالاتر گندم همراه با ثبات عملکرد بالاتر در شرایط آب و هوایی آینده در اروپا است (۲۵). تأخیر در پیری برگ یک ویژگی مقاومت به خشکی است که گیاهان را قادر می‌سازد برگ‌های سبز بیشتری را پس از گلدهی بیشتر حفظ کنند و عملکرد تحت تنش خشکی را بهبود بخشند (۲۸ و ۲۹).

با توجه به اینکه در ایران در اکثر مناطق، خشکی انتهای فصل رخ می‌دهد که مصادف با مرحله پرشدن دانه‌ها می‌باشد (۳۱)، این تحقیق با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر رشد و نمو کلزای دیم و ارائه راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی، برای تولید بیشتر در آینده با توجه به تغییرات اقلیمی کشور در دوره آینده ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این پژوهش در سال ۱۳۹۸ در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر رشد و نمو کلزای دیم و ارائه راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی، برای تولید بیشتر در آینده با توجه به تغییرات اقلیمی کشور در دوره آینده ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۹ صورت گرفت. در این تحقیق از مدل شبیه‌سازی رشد گیاهای SSM-iCrop2 که توسط Soltani و همکاران (۲۰۲۰) توسعه یافته است استفاده شد (۳۲). این مدل توسط رهبان و همکاران (۱۳۹۹) برای گیاه کلزا در مناطق اصلی تولید کننده این محصول پارامتریابی و ارزیابی گردید و ایشان نشان دادند که مدل با دقت بالایی ($r=0/87$ ، $CV=18\%$ و $RMSE=67/04 \text{ g/m}^2$) عملکرد دانه، و روز تا رسیدگی محصول ($r=0/97$ ، $CV=5\%$ ، روز $RMSE=10/68$) را پیش بینی نمود (۳۳).

استفاده کرده و با تولید ماده خشک بیشتر منجر به تولید عملکرد دانه بیشتری شود (۲۴). سمونوف و همکاران (۲۰۰۹) به کمک مدل شبیه سازی Sirius تأثیر صفات گیاهی شامل کاهش فیلوکرون، حداکثر شاخص سطح برگ، عمق موثر نفوذ ریشه، سرعت جذب آب توسط ریشه و طول دوره پر شدن دانه گندم دیم را در دو منطقه واقع در بریتانیا و اسپانیا مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان گزارش کردند که بیشترین تأثیر بر عملکرد برای صفات گیاهی بود که منجر به کاهش سرعت پیری برگ‌ها و تولید ماده خشک در واکنش به تنش خشکی شدند. در این مطالعه، در سال های خشک، ارقام با صفات گیاهی تغییر داده شده منجر به افزایش ۷۰ درصدی عملکرد نسبت به عملکرد ارقام کنونی شدند (۲۰). بهبود عملکرد کلزا در مناطق خشک با افزایش کارایی تعرق (TE) نیز می‌تواند امکان پذیر باشد (۲۷). طبق نتایج هی و همکاران (۲۰۱۷) در مناطقی که بارندگی رشد محصول را محدود می‌کند، صفاتی که کارایی تعرق را افزایش می‌دهند بیشترین تأثیر را بر عملکرد خواهند داشت، به طوری که افزایش ۲۰ درصدی کارایی تعرق (TE) منجر به افزایش ۳۰ درصدی عملکرد کلزا در منطقه یانگتسه در کشور چین شد (۳۰). سنپاتی و همکاران (۲۰۱۹) برای طراحی ارقام گندم حساس و مقاوم به خشکی با استفاده از مدل Sirius برای بررسی عملکرد آن‌ها در شرایط اقلیم ۲۰۵۵ در شرایط اروپا در ۱۳ منطقه مختلف استفاده کردند. نتایج نشان داد با انجام راهکارهای افزایش مدت پر شدن دانه، سرعت جذب آب ریشه، پاسخ فتوسنتزی به تنش خشکی، کاهش فیلوکرون و تأخیر در پیری برگ، عملکرد به میزان ۲۸ تا ۳۷ درصد در جنوب اروپا و ۱۰ تا ۲۳ درصد در اروپای مرکزی و شرقی افزایش خواهد یافت. طبق نتایج این محققین مقاومت به خشکی در

تحلیل راهکار افزایش مقاومت به خشکی در کلزا... / احسان حبیب پورکاشفی و همکاران

جدول ۱- اطلاعات اقلیمی ایستگاه‌های مرجع شامل مختصات (عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاع)، متوسط دما (TEMP, °C) و بارندگی (PR, mm) در طی فصل رشد (زمستان، بهار و پاییز)

Table 1- The climatic information of the reference stations includes coordinates (latitude, longitude, and elevation), average temperature (TEMP, °C), and precipitation (PR, mm) during the growing season (winter, spring, and autumn)

ایستگاه Station	مختصات coordinate			زمستان Winter		بهار Spring		پاییز Autumn	
	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع Elevation (m)	متوسط دما TEMP (°C)	بارندگی PR (mm)	متوسط دما TEMP (°C)	بارندگی PR (mm)	متوسط دما TEMP (°C)	بارندگی PR (mm)
دهلران Dehloran	32.6	47.2	232	14.7	160.1	31.0	38.6	21.0	85.8
قراخیل Qara Kheyl	36.4	52.7	14.7	8.5	195.9	19.8	95.6	13.8	291.4
هاشم آباد Hashem Abad	36.8	54.2	13.3	9.3	182.0	21.4	77.5	14.6	151.4
ایزه Izeh	31.8	49.8	767	11.7	307.1	25.0	70.4	16.8	226.4
گالیکش Galikesh	37.3	55.6	302	9.1	295.4	20.4	190.0	15.0	209.1
کیاسر Kiasar	36.2	53.5	1294.3	5.3	182.9	15.9	81.1	10.0	199.6
مسجد سلیمان Masjed Soleyman	31.9	49.2	320.5	14.3	223.5	30.3	38.3	20.4	167.5
مروآتپه Maraveh Tappeh	37.8	55.9	460.0	8.8	121.3	21.3	84.5	14.1	102.6
پل دختر Pol Dokhtar	33.1	47.7	713.5	12.3	154.3	27.4	70.2	17.6	141.8
پل سفید Pol Sefid	36.1	53.0	610	7.9	172.2	17.7	108.1	12.2	180.1
ساری Sari	36.5	52.9	23.0	10.0	215.4	20.7	111.1	15.0	311.1
کرد کوی Kordkuy	36.7	54.1	67	8.4	157.9	20.0	101.3	14.0	234.1
بیله سوار Bileh Savar	39.3	48.3	101.4	6.1	86.4	19.0	75.9	11.0	134.8
شهمیرزاد Shahmirzad	35.7	53.3	1969	2.1	94.8	17.5	55.5	6.7	56.9
مینودشت Minudasht	37.3	55.6	223	9.1	295.4	20.4	190.0	15.0	209.1
آق تقه Aq Toqeh	37.9	55.6	250	8.5	94.2	21.4	55.6	13.0	63.5
بندرامیرآباد Bandar Amirabad	36.2	52.7	212	9.1	202.8	20.4	60.9	14.4	299.5
شیرین آباد Shirinabad	36.7	55.0	1945	9.1	295.4	20.4	190.0	15.0	209.1
گنبد Gonbad	37.2	55.2	37.2	9.7	160.9	21.8	87.6	14.9	127.7
پاشاکلا Pasha Kola	36.8	53.3	-20.0	9.1	202.8	20.4	60.9	14.4	299.5
کاره سنگ Karehsang	36.2	52.3	220	6.1	86.4	19.0	75.9	11.0	134.8

۹۰۰ نزدیک باشد اقلیم منطقه را مرطوب نشان می‌دهد. معیار تقسیم‌بندی مناطق اصلی کشت کلزا در مطالعه حاضر بر اساس کد اقلیمی، به این صورت بود که در مناطقی که عدد صدگان کد اقلیمی منطقه مورد نظر که در محدوده عدد صفر تا ۱۰۰ بود اقلیم خشک، در محدوده عدد ۲۰۰ تا ۳۰۰ اقلیم نیمه‌خشک و در محدوده عدد ۴۰۰ تا ۵۰۰ بود اقلیم نیمه‌مرطوب در نظر گرفته شد.

اطلاعات خاک موجود و مشخص نمودن نوع خاک

محدوده هر ایستگاه هواشناسی: برای بدست آوردن خصوصیات خاک مناطق مورد بررسی از روش تهیه پروفیل‌های عمومی خاک استفاده شد. بر اساس این روش که با نام نقشه HC۲۷ شناخته می‌شود، پروفیل‌های عمومی خاک بر اساس سه معیار کربن آلی، عمق ریشه و بافت آلی تعریف می‌شوند، و بر اساس حاصلخیزی خاک به سه گروه حاصلخیزی زیاد، متوسط و کم، و بر اساس بافت خاک، به سه گروه رس، سیلت و شن، و از نظر عمق خاک، در سه گروه عمیق، متوسط و سطحی طبقه‌بندی شده‌اند. در مجموع، پروفیل‌های عمومی خاک شامل ۲۷ نوع پروفیل است که از ۱ تا ۲۷ شماره‌گذاری شده‌اند که بر اساس فرمت قابل استفاده در مدل‌های شبیه‌سازی DSSAT و APSIM تهیه شده‌اند. در جدول ۳ مشخصات نوع خاک برای مناطق مورد بررسی ارائه شده است. لازم به توضیح است که فرمت اطلاعات تهیه شده در این نقشه خاک، قابل استفاده در مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop2 نیز می‌باشد (۳۶).

پس از اطمینان از درستی پیش‌بینی مدل برای بررسی اثر تغییر اقلیم و سناریوهای سازگاری از داده‌های هواشناسی که برای آینده نیاز بود استفاده گردید. برای این منظور ابتدا آمار هواشناسی دوره پایه ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ شامل دمای حداکثر (T_{MAX} , °C)، دمای حداقل (T_{MIN} , °C) و بارندگی (PR, mm) برای ایستگاه‌های اصلی و مهم کشت کلزای دیم کشور (۲۱ منطقه)، از مرکز اطلاعات و آمار سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید که در جدول (۱) مشخصات مناطق مورد بررسی آورده شده است. کنترل کیفی داده‌های موجود در کلیه ایستگاه‌های هواشناسی برای سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ با استفاده از برنامه WeatherMan در مدل DSSAT مورد استفاده قرار گرفت (۳۴).

اقلیم منطقه مورد مطالعه: اقلیم‌های اصلی کلزا با استفاده از رویکرد GYGA که بهره‌گیری از یک طرح ترکیبی پهنه‌بندی به نام دامنه برون‌یابی اطلس جهانی خلأ عملکرد می‌باشد، مشخص شد (۳۵). در این راستا، GYGA به دنبال ایجاد پهنه‌های اقلیمی با حداقل غیریکنواختی آب و هوایی است تا نیاز به اطلاعات هواشناسی را به حداقل برساند. در جدول ۲ مشخصات اقلیمی مناطق اصلی کشت کلزا، بر اساس کد اقلیمی در کشور نشان داده شده است. در مطالعه حاضر مناطق مورد بررسی به سه اقلیم خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب بر اساس کد اقلیمی تقسیم شده‌اند (جدول ۲). GYGA اقلیم مناطق را بر اساس عدد صدگان کد اقلیمی که بین محدوده عدد صفر تا ۹۰۰ متغیر می‌باشد تقسیم‌بندی می‌کند. هرچه عدد صدگان کد اقلیمی به صفر نزدیک‌تر باشد، خشک بودن منطقه و هرچه عدد صدگان کد اقلیمی به عدد

جدول ۲- مشخصات اقلیم مناطق کشت اصلی کلزای دیم در ایران بر اساس کد اقلیمی

Table 2- The climatic characteristics of the main rain-fed canola cultivation areas in Iran based on climat codes.

ایستگاه Station	کد اقلیمی Climate Code	اقلیم Climate
Sari ساری	6402	Semi-humid نیمه مرطوب
Qara Kheyl قراخیل	6502	Semi-humid نیمه مرطوب
Bandar Amirabad بندر امیرآباد	6202	Semi-arid نیمه خشک
Pasha Kola پاشاکلا	6302	Semi-arid نیمه خشک
Bileh Savar بیلہ سوار	5202	Semi-arid نیمه خشک
Karehsang کاره سنگ	5202	Semi-arid نیمه خشک
Shahmirzad شه میرزاد	4003	Arid خشک
Shirinabad شیرین آباد	4003	Arid خشک
Pol Sefid پل سفید	5002	Arid خشک
Kordkuy کردکوی	5002	Arid خشک
Minudasht مینودشت	5002	Arid خشک
Galikesh گالیکش	5003	Arid خشک
Kiasar کیاسر	5003	Arid خشک
Maraveh Tappeh مراوه تپه	5003	Arid خشک
Gonbad گنبد	6002	Arid خشک
Izeh ایزه	6003	Arid خشک
Pol Dokhtar پل دختر	6003	Arid خشک
Aq Toqeh آق تقه	6003	Arid خشک
Hashem Abad هاشم آباد	6102	Arid خشک
Dehloran دهلران	7003	Arid خشک
Masjed Soleyman مسجد سلیمان	7003	Arid خشک

بارش، دلتا حاصل نسبت بارش بین دوره آینده و پایه پیش‌بینی شده است. دلتا محاسبه شده برای دما و بارش به ترتیب در داده‌های دما و بارش دوره پایه مشاهده شده جمع و ضرب می‌شوند و نهایتاً دما و بارش دوره آینده مورد نظر پیش‌بینی می‌شود. عمل ریزمقیاس نمایی و تولید سناریوهای اقلیمی با استفاده از برنامه تهیه شده تحت نرم افزار R توسط AgMIP انجام شد (۳۷ و ۳۸). در نتایج ارائه شده در تحقیق حاضر از مخفف مدل‌های گردش عمومی یعنی HadGEM2 و IPSL استفاده شده است.

مدل و سناریوی اقلیمی: تولید سناریوی اقلیمی دوره آینده (۲۰۵۵) تا ۲۰۶۹ با استفاده از دو مدل گردش عمومی (GCM) HadGEM2-ES و IPSL-CM5A-MR حاصل پروژه CMIP5 تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 گزارش ارزیابی پنجم IPCC با ابزارهای تولید سناریوی اقلیمی AgMIP صورت گرفت (۳۷). برای ریزمقیاس نمایی و تصحیح اریب خروجی مدل‌های گردش عمومی از روش دلتا یا عامل تغییر استفاده شد. برای دما، دلتا از اختلاف بین دمای دوره آینده مورد نظر و پایه پیش‌بینی شده توسط مدل گردش عمومی به دست می‌آید. برای

جدول ۳- اطلاعات خاک ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 3 - Soil information of the studied stations

ایستگاه Station	شماره NO. HC	بافت texture	حاصلخیزی Fertility	عمق Depth
دهلران Dehloran	HC5	رسی Clay	متوسط Middle	120
قراخیل Qara Kheyl	HC2	رسی Clay	زیاد High	120
هاشم آباد Hashem Abad	HC2	رسی Clay	زیاد High	120
هاشم آباد Hashem Abad	HC8	رسی Clay	کم Low	120
هاشم آباد Hashem Abad	HC17	لومی Loam	کم Low	120
ایزه Izeh	HC12	لومی Loam	زیاد High	60
گالیکش Galikesh	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120
کیاسر Kiasar	HC2	رسی Clay	زیاد High	120
کیاسر Kiasar	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120
مسجد سلیمان Masjed Soleyman	HC5	رسی Clay	متوسط Middle	120
مراوه تپه Maraveh Tappeh	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120
مراوه تپه Maraveh Tappeh	HC17	لومی Loam	کم Low	120
پل دختر Pol Dokhtar	HC12	لومی Loam	زیاد High	60
پل سفید Pol Sefid	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120
ساری Sari	HC2	رسی Clay	زیاد High	120
کردکوی Kordkuy	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120
بیله سوار Bileh Savar	HC5	رسی Clay	متوسط Middle	120
شهمیرزاد Shahmirzad	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120
مینودشت Minudasht	HC5	رسی Clay	متوسط Middle	120
آق تقه Aq Toqeh	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120
بندرامیرآباد Bandar Amirabad	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120
شیرین آباد Shirinabad	HC12	لومی Loam	زیاد High	60
گنبد Gonbad	HC8	رسی Clay	کم Low	120
پاشاکلا Pasha Kola	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120
کاره سنگ Karehsang	HC14	لومی Loam	متوسط Middle	120

رابطه (۱)

$$\begin{aligned} \text{WSFL} &= 1 && \text{if } \text{FTSW} \geq \text{WSSL} \\ \text{WSFL} &= \text{FTSW} / \text{WSSL} && \text{if } \text{FTSW} < \text{WSSL} \\ \text{WSFG} &= 1 && \text{if } \text{FTSW} \geq \text{WSSG} \end{aligned}$$

رابطه (۲)

$$\text{WSFG} = \text{FTSW} / \text{WSSG} \quad \text{if } \text{FTSW} < \text{WSSG}$$

رابطه (۳)

$$\text{WSFDS} = (1 - \text{WSFG}) \times \text{WSSD} + 1$$

هر سه ضرایب اصلاحی به کسر آب قابل دسترس خاک (FTSW) در منطقه ریشه گیاه ارتباط داده می شوند. در معادلات فوق WSSL مقداری از FTSW است که در کمتر از آن گسترش سطح برگ رو به کاهش می‌گذارد و WSSG نیز مقداری از FTSW

کمی‌سازی اثر تنش خشکی: تأثیر تنش آب بر

فرآیندهای رشد و نمو با محاسبه ضرایب اصلاحی تنش خشکی که بین صفر و یک دامنه دارند، لحاظ می‌شود. تعداد ضرایب اصلاحی به ساختار مدل و فرضیات آن بستگی دارد. در مدل حاضر اثر تنش خشکی بر فرآیندهای مختلف گیاهی با محاسبه سه ضریب اصلاحی برای اثر تنش خشکی بر گسترش سطح برگ (WSFL)، تعرق و تولید ماده خشک (WSFG) و تسریع سرعت نمو و پیر شدن برگ‌ها (WSFDS) طبق روابط زیر شبیه‌سازی شد:

CO₂ بر تولید ماده خشک، توزیع ماده خشک، تاثیر دماهای اکستريم (دماهای بالا و پايين) بر سطح برگ، تشكيل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد (۳۶ و ۴۰).

در اين شبیه‌سازی متوسط مقدار CO₂ برای دوره گذشته ۳۸۵، برای دوره ۲۰۵۵ تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۴۹۹ و ۵۷۱ در نظر گرفته شد. در پايان شبیه‌سازی، طول دوره رسیدگی، عملکرد پتانسیل و بهره‌وری آب کلزا در شرایط ديم برای دوره گذشته و سناریوهای اقليمي آینده مورد تجزيه و تحليل قرار گرفت.

بر اساس راهکار افزایش مقاومت به خشکی، در مدل شبیه‌سازی به مقدار ضريب کارایی تعرق (TEC) در مدل شبیه‌سازی به میزان ۲۰ درصد اضافه شد و از مقادير WSSL (مقداری از کسر آب قابل دسترس در منطقه ریشه گیاه که در کمتر از آن گسترش سطح برگ رو به کاهش می‌گذارد) و WSSG (مقداری از کسر آب قابل دسترس در منطقه ریشه گیاه که در کمتر از آن روزنه‌ها شروع به بسته شدن کرده و در نتیجه تعرق و تولید ماده خشک رو به کاهش می‌گذارد) به میزان ۲۰ درصد کاسته شد. استفاده از داده های اقليمي آینده رشد و نمو کلزا تحت شرایط فوق شبیه سازی شد و نتایج حاصله با نتایج شبیه سازی رشد و نمو بدون راهکار سازگاری تحت اقليم آینده مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

پیش‌بینی تغییرات اقليمي

دماي هوا: خروجی مدل‌های HadGEM و IPSL تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 نشان دادند که میانگین دمای حداکثر و حداقل در طول فصل رشد کلزا در مناطق اصلی کشت آن نسبت به دوره پایه افزایش خواهند داشت (شکل ۱). دمای پیش‌بینی شده

است که در کمتر از آن روزنه‌ها شروع به بسته شدن کرده و در نتیجه تعرق و تولید ماده خشک شروع به کاهش می‌کند (۴۰).

طبق رابطه ۱ و ۲، مقدار ضرایب WSFL و WSFG تا زمانی که کسر آب قابل دسترس خاک به کمتر از یک حد معین کاهش نیافته باشد، برابر یک است که به معنی عدم تنش خشکی می‌باشد. این حد معین برای گسترش برگ‌ها زودتر از بسته شدن روزنه ها (تولید ماده خشک و تعرق)، اتفاق می‌افتد. با کاهش بیشتر کسر آب قابل دسترس، این دو ضریب به صورت خطی کاهش یافته و در نقطه پژمردگی دائم (FTSW=0) به صفر می‌رسند که نشانه شدیدترین تنش خواهد بود. مقادير WSSL و WSSG برای گیاه کلزا به ترتیب ۰/۴ و ۰/۳ مشخص شده است. همچنین ضریب حساسیت نمو و پیر شدن برگ به تنش خشکی (WSSD) در مدل شبیه‌سازی مورد بررسی به میزان ۰/۵ تعیین شده است (۳۹).

تنش کمبود آب باعث تسریع نمو (بعد از سبز شدن) و پیر شدن برگ‌ها می‌شود. این اثر با محاسبه ضریب اصلاحی WSFDS در رابطه ۳ لحاظ می‌شود. تا زمانی که تنش کمبود آب برای رشد اتفاق نیافتاده است، یعنی روزنه‌ها بسته نشده‌اند، سرعت نمو و پیری برگ‌ها نیز تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند، اما بعد از آن سرعت نمو و پیری برگ‌ها با افزایش تنش خشکی افزایش پیدا می‌کند (۳۹).

شبیه‌سازی رشد و عملکرد: برای شبیه‌سازی اثرات تغییرات اقليم بر گیاه کلزا از مدل SSM-iCrop2 استفاده شد (۳۶). این مدل رشد، نمو و عملکرد را به صورت روزانه به عنوان تابعی از شرایط آب و هوایی، خصوصیات خاک و مدیریت زراعی (مثل رقم، تاریخ کاشت، تراکم بوته، رژیم آبیاری) شبیه‌سازی می‌کند. این مدل توانایی شبیه‌سازی مراحل فنولوژی، گسترش و پیری برگ، تاثیر خشکی هوا، شوری و

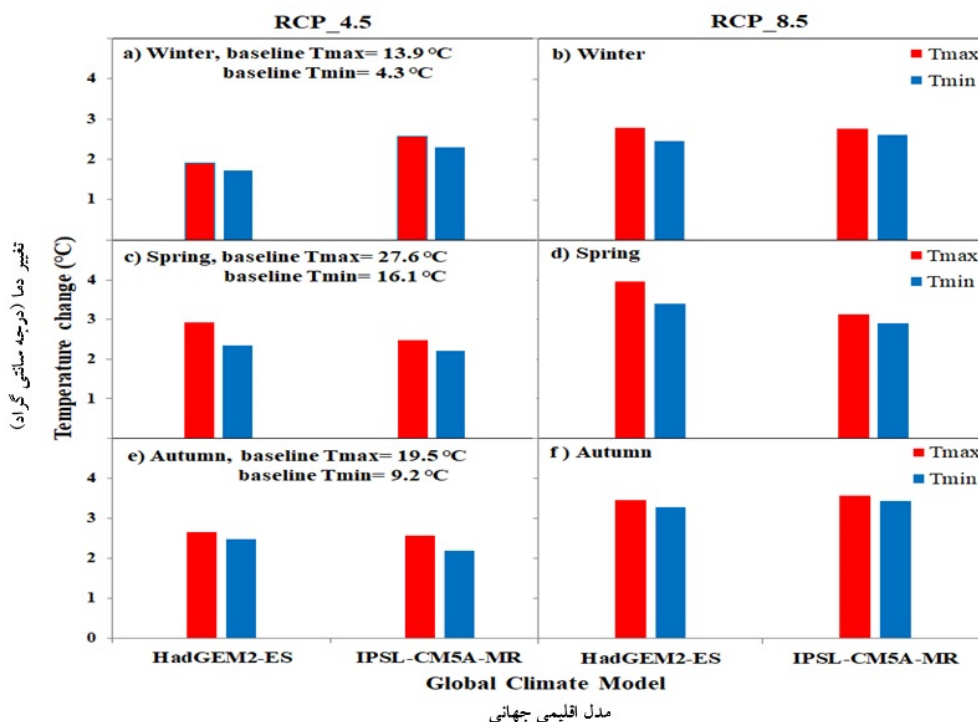
۳/۴ و ۲/۹ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت (شکل ۱d).

میزان افزایش دمای حداکثر در فصل پاییز تحت سناریوی RCP4.5 بین دو مدل تفاوت چندانی مشاهده نشد (شکل ۱e). دمای حداکثر در فصل پاییز برای هر دو مدل HadGEM و IPSL به ترتیب ۲/۶ و ۲/۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. افزایش دمای حداقل توسط این دو مدل به ترتیب ۲/۵ و ۲/۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه پیش‌بینی شد (شکل ۱e). میزان افزایش دمای حداکثر و حداقل در فصل پاییز در سناریوی RCP8.5 بیشتر بود، اما بین دو مدل تفاوت چندانی مشاهده نشد (شکل ۱f). افزایش دمای حداکثر نسبت به دوره پایه بین ۳/۵ و ۳/۶ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در مدل‌های HadGEM و IPSL پیش‌بینی شد (شکل ۱f). این در حالی بود که دمای حداقل توسط این دو مدل تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه با افزایشی به میزان ۳/۳ و ۳/۴ درجه سانتی‌گراد مواجه خواهد شد (شکل ۱f).

مدل اقلیمی جهانی: خروجی مدل‌های GCM نشان دادند که پیش‌بینی تغییرات بارندگی در طول فصل رشد کلزا توسط این دو مدل متغیر خواهد بود (شکل ۲). خروجی مدل HadGEM تحت سناریوی RCP4.5 نشان داد میانگین بارندگی در فصل زمستان در مناطق اصلی کشت کلزا به میزان ۱۰ درصد نسبت به شرایط پایه افزایش خواهد داشت، اما مدل IPSL کاهش بارندگی را به میزان ۰/۵ درصد پیش‌بینی کرد (شکل ۲a). در سناریوی RCP8.5 این دو مدل افزایش بارندگی در فصل زمستان را به ترتیب به میزان ۷ و ۱۴ درصد پیش‌بینی کردند (شکل ۲b).

توسط این دو مدل در فصول زمستان، بهار و پاییز تفاوت‌های چندانی را نشان نداد. همچنین نتایج نشان داد که تغییرات دمای پیش‌بینی شده تحت سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریوی RCP4.5 بود (شکل ۱). افزایش دمای حداکثر در فصل زمستان در مناطق اصلی کشت کلزا تحت RCP4.5 نسبت به دوره پایه بین ۱/۹ و ۲/۶ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در مدل‌های HadGEM و IPSL پیش‌بینی شد (شکل ۱a). این در حالی بود که افزایش دمای حداقل برای شرایط فوق به ترتیب بین ۱/۷ و ۲/۳ درجه سانتی‌گراد متغیر خواهد بود (شکل ۱a). میزان افزایش دمای حداکثر در فصل زمستان در سناریوی RCP8.5 برای هر دو مدل HadGEM و IPSL به ترتیب ۲/۸ و ۲/۷ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. افزایش دمای حداقل توسط این دو مدل به ترتیب ۲/۵ و ۲/۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه پیش‌بینی شد (شکل ۱b).

در فصل بهار مدل HadGEM در هر دو سناریوی انتشار، افزایش دمای حداقل و حداکثر بیشتری را نسبت به مدل IPSL پیش‌بینی کرد (شکل ۱c,d). دمای حداکثر در سناریوی RCP4.5 به میزان ۲/۹ درجه سانتی‌گراد در مدل HadGEM و ۲/۵ درجه سانتی‌گراد در مدل IPSL نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت (شکل ۱c). در سناریوی RCP8.5 دمای حداکثر حدود ۴ درجه سانتی‌گراد در مدل HadGEM و ۳/۱ درجه سانتی‌گراد در مدل IPSL افزایش خواهد داشت (شکل ۱d). هر دو مدل HadGEM و IPSL افزایش دمای حداقل تحت سناریوی RCP4.5 را به ترتیب ۲/۴ و ۲/۲ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی کردند (شکل ۱c). این در حالی بود که در سناریوی RCP8.5 دمای حداقل توسط این دو مدل به ترتیب به میزان

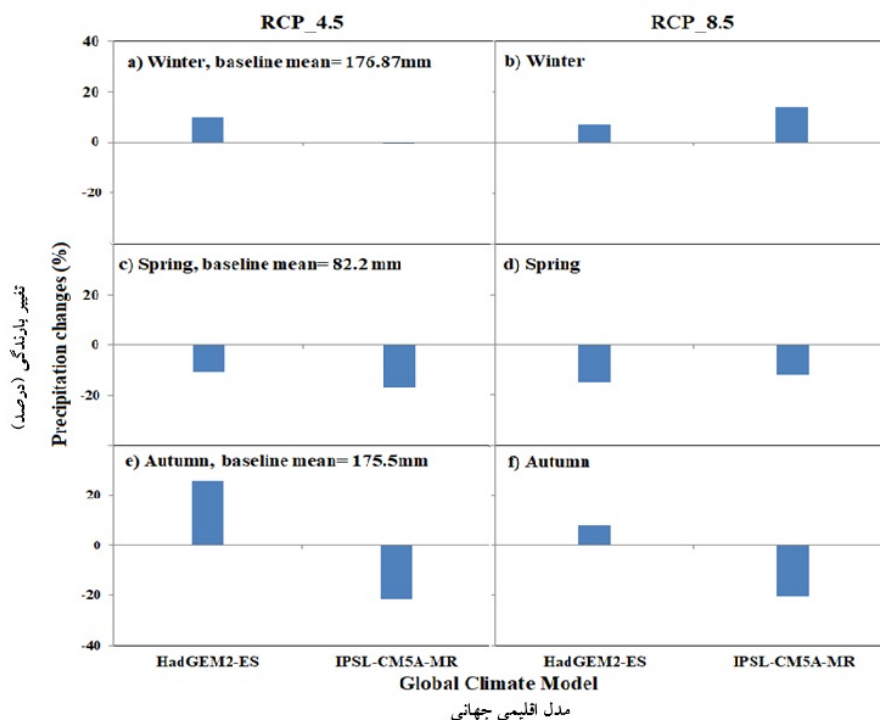


شکل ۱- پیش‌بینی تغییرات میانگین دمای حداکثر و حداقل در اقلیم آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۸۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۰۹) طی فصل رشد کلزا (زمستان، بهار و پاییز) در مجموع مناطق اصلی کشت در ایران، توسط خروجی مدل HadGEM2-ES و IPSL-CM5A-MR و تحت سناریوی‌های RCP4.5 و RCP8.5

Figure 1. Prediction of changes in average, maximum and minimum temperatures in future climates (2055; 2040-2069) compared to the baseline period (1980-2009) during the growing season of canola (winter, spring, and autumn) across the main cultivation areas in Iran, based on the outputs of the HadGEM2-ES and IPSL-CM5A-MR models under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

در سناریوی RCP4.5 به میزان ۲۶ درصد و در سناریوی RCP8.5 به میزان ۸ درصد نسبت به شرایط پایه بارندگی افزایش خواهد یافت (شکل ۲e,f). مدل IPSL در هر دو سناریو کاهش بارندگی را پیش‌بینی کرد (شکل ۲e,f). میزان کاهش بارندگی در بین دو سناریو تفاوت چندانی مشاهده نشد. بارندگی تحت سناریوی RCP4.5 به میزان ۲۲ درصد و در سناریوی RCP8.5 به میزان ۲۱ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت (شکل ۲e,f).

در فصل بهار، هر دو مدل GCM تحت هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 کاهش بارندگی را پیش‌بینی کردند (شکل ۲c,d). کاهش بارندگی تحت سناریوی RCP4.5 توسط هر دو مدل HadGEM و IPSL به ترتیب ۱۱ و ۱۷ درصد و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۱۵ و ۱۲ درصد خواهد بود (شکل ۲c,d). در فصل پاییز مدل HadGEM افزایش بارندگی را در هر دو سناریوی انتشار پیش‌بینی کرد (شکل ۲e,f).



شکل ۲- پیش‌بینی تغییرات میانگین بارندگی در اقلیم آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۰۹) طی فصل رشد کلزا (زمستان، بهار و پاییز) در مجموع مناطق اصلی کشت در ایران، توسط خروجی مدل HadGEM2-ES و IPSL-CM5A-MR و

تحت سناریوی‌های RCP4.5 و RCP8.5

Figure 1- Prediction of changes in average precipitation in future climates (2055; 2040-2069) compared to the baseline period (1980-2009) during the growing season of canola (winter, spring, and autumn) across the main cultivation areas in Iran, based on the outputs of the HadGEM2-ES and IPSL-CM5A-MR models under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

مناطق مورد بررسی در دوره ۲۰۵۵ تحت سناریوی RCP4.5 بین ۱۷ تا ۲۸ روز و تحت سناریوی RCP8.5 بین ۲۲ تا ۳۸ روز خواهد بود (جدول ۴).

به دلیل افزایش دما در آینده، گیاهان سریع‌تر نیاز دمایی خود را تامین می‌کنند و در نتیجه طول دوره رشد گیاه کاهش خواهد یافت (۴۱). گزارش شده است که افزایش دمای میانگین با دوره رشد گیاه رابطه منفی داشته و با افزایش دما طول دوره رشد کاهش می‌یابد (۲۲). کاهش طول دوره رسیدگی با افزایش دمای محیط باعث تسریع مراحل نمو می‌گردد (۴۲). چندین مطالعه در این زمینه بر روی گیاهان مختلف انجام شده است؛ به عنوان مثال، افزایش دمای متوسط

اثرات تغییر اقلیم بر رشد کلزا

طول دوره رسیدگی: دامنه تغییرات طول دوره رسیدگی گیاه کلزای دیم در مناطق اصلی کشت آن در کشور بین ۱۴۵ تا ۲۶۰ روز و با میانگین ۲۰۴ روز در دوره پایه تخمین زده شد (جدول ۴). نتایج شبیه‌سازی حاکی از کاهش طول دوره رسیدگی در کشور تحت هر دو سناریوی انتشار بود؛ شدت کاهش طول دوره رسیدگی تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP4.5 بیشتر بود (جدول ۳). میانگین طول دوره رسیدگی در کشور در دوره ۲۰۵۵ نسبت به دوره پایه، تحت سناریوی RCP4.5 به میزان ۲۳ روز و تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۳۰ روز کاهش خواهد یافت (جدول ۴). کاهش طول دوره رسیدگی در بین

پیرشدن برگ‌ها اتفاق می‌افتد. در هر دو سناریوی انتشار مشاهده می‌شود در اقلیم آینده در تمامی مناطق، متوسط دمای حداکثر در طی رشد رویشی و زایشی عامل محدود کننده‌ای برای رشد گیاه نمی‌باشد و گیاه تحت تنش گرمایی طی فصل رشد قرار نمی‌گیرد (جدول ۵). با توجه به میزان آب قابل دسترس گیاه در منطقه ریشه (FTSW) به صورت روزانه، در برخی مناطق، به عنوان نمونه در قراخیل (منطقه نیمه‌مرطوب) و بندر امیرآباد (منطقه نیمه‌خشک) (شکل ۳)، گیاه کلزا در اقلیم پایه و نیز اقلیم آینده در هر دو دوره رشد رویشی و رشد زایشی تحت تنش خشکی قرار نمی‌گیرند. بنابراین میزان افزایش عملکرد در اقلیم آینده می‌تواند به دلیل افزایش میزان CO_2 ، کارایی استفاده از تشعشع (RUE) و همچنین کارایی تعرق (TE) در اقلیم آینده نسبت به اقلیم پایه باشد (جدول ۶). در برخی از مناطق نیمه‌خشک (به‌عنوان نمونه پل‌سفید) در دوره پایه گیاه تحت تنش انتهایی فصل قرار می‌گیرد و در اقلیم آینده با توجه به کاهش طول دوره رشد، گیاه از تنش انتهایی فصل فرار می‌کند (شکل ۳) و در مرحله پرشدن دانه گیاه با تنش خشکی انتهایی فصل مواجه نمی‌شود و در نتیجه عملکرد افزایش خواهد داشت.

در مدل شبیه‌سازی مورد استفاده، پاسخ فتوسنتز خالص به تغییرات CO_2 به صورت واکنش RUE به تغییرات CO_2 نشان داده شده است. بر همین اساس می‌توان استنباط کرد که افزایش غلظت CO_2 محیط می‌تواند سبب افزایش عملکرد گیاهان C_3 شود، به دلیل اینکه این گیاهان در غلظت بالاتری از CO_2 به نقطه اشباع می‌رسند (۳۹ و ۴۴). با افزایش میزان CO_2 کارایی استفاده از تشعشع افزایش می‌یابد، به طوری که با دو برابر شدن CO_2 از ۳۵۰ به ۷۰۰ میکرو مول بر مول، کارایی استفاده از تشعشع به میزان ۲۳ درصد افزایش پیدا کرد (۴۵). CO_2 یکی از مهمترین پیش

تا ۱/۷ درجه سانتی‌گراد منجر به گلدهی زودتر گندم (تا ۱۱ روز) گردید (۴۲). با بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رشد و نمو گندم در ساحل شرقی دریای مدیترانه در ترکیه گزارش شد که بالا رفتن درجه حرارت باعث افزایش سرعت نمو گیاه می‌شود و این خود باعث زودرس شدن این محصول و در نتیجه کاهش دوره رشد می‌شود (۴۳).

عملکرد: نتایج شبیه‌سازی نشان داد میانگین عملکرد گیاه کلزا در مناطق اصلی کشت آن در دوره ۲۰۵۵ و نیز در هر دو سناریوی انتشار نسبت به دوره پایه حالت افزایشی خواهد داشت (جدول ۴). میانگین عملکرد کلزای دیم در کشور به میزان ۳۸۰۵ کیلوگرم در هکتار در دوره پایه تخمین زده شد (جدول ۴). در شرایط دوره پایه دامنه میزان عملکرد بین مناطق اصلی کشت کلزا در کشور، بین ۲۲۲۸ تا ۴۹۱۷ کیلوگرم در هکتار متغیر بود (جدول ۴).

نتایج شبیه‌سازی نشان داد در دوره ۲۰۵۵ تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 میانگین عملکرد کلزای دیم در کشور به ترتیب به میزان ۵ و ۸ درصد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت (جدول ۴). در دوره ۲۰۵۵ تحت سناریوی RCP4.5 دامنه تغییرات عملکرد در بین مناطق کشور بین +۲۰ تا -۱۱ درصد (جدول ۴) و تحت سناریوی RCP8.5 بین +۲۹ تا -۱۹ درصد، نسبت به دوره پایه متغیر خواهد بود (جدول ۴).

در تحقیق حاضر علت اصلی افزایش عملکرد در اکثر مناطق مورد بررسی در هر دو سناریوی انتشار نسبت به دوره پایه، عدم برخورد گیاه به تنش گرما و آب طی دوره رشد می‌باشد. آستانه دمای حداکثر در مدل شبیه‌سازی ۳۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد، بدین معنی که در هر روزی که دمای حداکثر هوا (TMAX) به بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد، گیاه دچار تنش گرمایی می‌شود و تسریع در

افزایش خواهد یافت (جدول ۴). دامنه تغییرات میزان افزایش بهره‌وری آب در مناطق اصلی کشت کلزا در کشور در دوره ۲۰۵۵ تحت سناریوی RCP4.5 بین ۶ تا ۳۶ درصد و تحت سناریوی RCP8.5 بین ۱۱ تا ۵۲ درصد نسبت به شرایط پایه پیش‌بینی شد (جدول ۴). بهره‌وری آب حاصل تقسیم عملکرد بر مبنای وزن خشک بر تبخیر و تعرق است و بنابراین کاهش یا افزایش آن به تأثیر تغییر اقلیم بر این دو بستگی دارد. در تحقیق حاضر با توجه به افزایش نسبی عملکرد در اقلیم آینده و کاهش میزان تبخیر و تعرق (جدول ۶)، افزایش بهره‌وری آب دور از انتظار نخواهد بود.

CO₂ و دما دو عامل مهم و تأثیرگذار بر میزان تبخیر و تعرق می‌باشد. با افزایش مقدار CO₂، مقدار تعرق کاهش می‌یابد (۴۹)، اما مقدار تبخیر از خاک در اثر افزایش دما می‌تواند روند افزایشی داشته باشد (۲۸). با افزایش دما، شاهد کاهش تعرق خواهیم بود، زیرا با افزایش دما روزنه‌ها بسته شده و میزان تعرق نیز روند کاهشی خواهد داشت. بنابراین افزایش دما اثر مستقیم بر افزایش میزان تعرق از گیاه و تبخیر از خاک می‌گذارد. حال در مورد اثر متقابل دما و CO₂، میزان تبخیر و تعرق با توجه به نوع خاک، گیاه و شرایط اقلیمی اندکی متفاوت است (۵۰).

نتایج مشابهی توسط دادرسی و همکاران (۵۱) حاکی از افزایش بهره‌وری آب در اثر تغییر اقلیم بر روی گیاه سیب زمینی تا سال ۲۰۵۰ گزارش شده است. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط افزایش CO₂ به ازای مصرف هر واحد آب مصرفی، مقدار عملکرد بیشتری تولید می‌شود (۲۸). افزایش غلظت CO₂ اتمسفری علی‌رغم نقش مستقیمی که در تغییرات اقلیمی دارد، به دلیل افزایش فتوسنتز و در نتیجه کاهش تعرق از سطح برگ گیاهان، به طور بالقوه موجب افزایش بهره‌وری آب گیاه زراعی می‌شود.

ماده‌های فرایند فتوسنتز است و افزایش غلظت آن در جو می‌تواند منجر به افزایش عملکرد محصولات شود. با این حال، افزایش غلظت CO₂ برای محصولات C3 به دلیل تنفس نوری در این گیاهان بیشتر قابل توجه است (۴۶). افزایش CO₂ از طریق افزایش کربوکسیلاسیون و کاهش تنفس نوری می‌تواند سبب افزایش فتوسنتز خالص گردد. افزایش عملکرد محصول برای گندم و کلزا در نتیجه اثرات مستقیم غلظت CO₂ در جو پیش‌بینی شده است (۴۷). در تحقیق حاضر با توجه به افزایش میزان CO₂ و عدم محدودیت آب در مرحله گرده افشانی تا رسیدگی، مشاهده شد که دما عامل محدود کننده‌ای در رشد گیاه نمی‌باشد و با افزایش دما در اقلیم آینده در اکثر مناطق عملکرد نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت.

علت اصلی کاهش عملکرد در برخی از مناطق (به عنوان نمونه در مینودشت و مرواه‌تپه) در هر دو سناریوی انتشار، قرار گرفتن گیاه تحت تنش خشکی طی دوره رشد رویشی (شکل ۳) و کاهش بارندگی در مرحله گرده‌افشانی تا رسیدگی می‌باشد، که در این شرایط ماده خشک کمتری در گیاه تولید خواهد شد. بنابراین، از آنجایی که بین تولید ماده خشک نهایی و عملکرد رابطه مستقیمی وجود دارد (۴۸) با کاهش ماده خشک در این مناطق مشاهده خواهد شد عملکرد نسبت به دوره پایه کاهش یابد (جدول ۴).

بهره‌وری آب: طبق نتایج این مطالعه میانگین بهره‌وری آب کلزای دیم در مناطق اصلی کشت آن، ۱/۳ کیلوگرم ماده خشک در مترمکعب تخمین زده شد و بین ۱ تا ۱/۷ کیلوگرم ماده خشک در مترمکعب متغیر بود (جدول ۴). نتایج حاکی از افزایش بهره‌وری آب در اثر تغییر اقلیم تا سال ۲۰۵۵ در هر دو سناریوی انتشار است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد میانگین بهره‌وری آب در کشور، در دوره ۲۰۵۵ تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱۹ و ۲۷ درصد نسبت به دوره پایه

تحلیل راهکار افزایش مقاومت به خشکی در کلزا... / احسان حبیب پورکاشفی و همکاران

جدول ۴- تغییرات عملکرد، بهره‌وری آب و روز تا برداشت در اقلیم آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۰۹)

در مناطق اصلی کشت کلزا در ایران در ترکیب دو مدل GCMs، تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

Table 4- Changes in yield, water productivity, and days to harvest in future climates (2055; 2040-2069) compared to the baseline period (1980-2009) in the main canola cultivation areas of Iran, based on the combination of two GCM models, under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

ایستگاه Station	دوره پایه Baseline period			RCP4.5			RCP8.5		
	روز تا برداشت Day to harvest	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار) Yield (Kg/ha)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب) Water prouductivity (Kg/m ³)	روز تا برداشت Day to harvest	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار) Yield (Kg/ha)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب) Water prouductivity (Kg/m ³)	روز تا برداشت Day to harvest	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار) Yield (Kg/ha)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر متر مکعب) Water prouductivity (Kg/m ³)
دهلران Dehloran	145	2228	1.2	-17	1.5	14	-22	-1	20
قراخیل Qara Kheyl	212	3882	1.3	-24	10	17	-32	13	26
هاشم آباد Hashem Abad	202	3850	1.4	-25	11	28	-32	14	40
ایزه Izeh	176	3472	1.0	-22	1	22	-29	6	28
گالیکش Galikesh	199	4917	1.1	-20	11	24	-26	19	38
کیاسر Kiasar	246	4277	1.2	-24	20	26	-31	23	37
مسجد سلیمان Masjed Soleyman	153	2833	1.1	-17	4	18	-22	7	24
مروآتپه Maraveh Tappeh	200	3422	1.7	-28	-11	11	-38	-19	11
پل دختر Pol Dokhtar	169	2634	1.1	-21	10	36	-26	20	52
پل سفید Pol Sefid	223	4146	1.3	-23	10	19	-30	14	32
ساری Sari	200	4297	1.3	-23	3	11	-31	7	22
کرد کوی Kordkuy	210	4711	1.5	-28	-4	15	-36	-0.3	11
بيله‌سوار Bileh Savar	233	3842	1.4	-22	12	24	-28	19	34
شهمیرزاد Shahmirzad	260	2761	1.4	-25	12	18	-35	-2	13
مینودشت Minudasht	201	4547	1.2	-28	-11	11	-38	-13	18
آق تقه Aq Toqeh	203	2718	1.3	-28	-4	20	-36	-2	31
بندرامیرآباد Bandar Amirabad	208	4632	1.7	-22	3	6	-29	5	13
شیرین‌آباد Shirinabad	197	4185	1.0	-20	18	30	-25	29	48
گنبد Gonbad	195	3311	1.3	-24	1	22	-30	7	38
پاشاکلا Pasha Kola	208	4632	1.7	-22	3	6	-29	5	13
کاره سنگ Karehsang	236	4613	1.7	-22	8	19	-28	14	28
میانگین Average	204	3805	1.3	-23	5	19	-30	8	27

جدول ۵- پیش‌بینی دمای حداکثر در مناطق اصلی کشت کلزا در ایران در اقلیم آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰) در طی دوره رشد در

ترکیب دو مدل GCM تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5

Table 5- Prediction of maximum temperature in the main canola cultivation areas of Iran in future climates (2055; 2040-2069) during the growing season, based on the combination of two GCM models under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

ایستگاه Station	RCP4.5		RCP4.5	
	دمای حداکثر ۲ (درجه سانتی‌گراد)	دمای حداکثر ۳ (درجه سانتی‌گراد)	دمای حداکثر ۲ (درجه سانتی‌گراد)	دمای حداکثر ۳ (درجه سانتی‌گراد)
	TMAX2 (°C)	TMAX3 (°C)	TMAX2 (°C)	TMAX3 (°C)
دهلران Dehloran	23	22.6	24.2	22.9
قراخیل Qara Kheyli	18	18.4	22.3	15.6
هاشم آباد Hashem Abad	19	19.4	22.6	17.1
ایزه Izeh	21.8	21.5	22.4	22.1
گالیکش Galikesh	20.2	20.3	19.3	21.6
کیاسر Kiasar	16.6	16.8	15.4	18.5
مسجد سلیمان Masjed Soleyman	23	22.6	23.7	23.2
مروآه تپه Maraveh Tappeh	19.1	19.4	25	15
پل دختر Pol Dokhtar	21.3	20.9	20.8	22.2
پل سفید Pol Sefid	17.7	18	17.7	18.7
ساری Sari	18.7	19.1	22.1	17.1
کردکوی Kordkuy	18.3	18.6	23.1	15.8
بیل‌سوار Bileh Savar	16.5	16.3	15.2	17.9
شهمیرزاد Shahmirzad	16	16	20.2	13.1
مینودشت Minudasht	20.6	20.9	25.5	17.5
آق‌تقه Aq Toqeh	19.3	19.4	22.6	17.3
بندرامیرآباد Bandar Amirabad	16.9	17.2	19	16
شیرین‌آباد Shirinabad	20.1	20.2	19.3	21.5
گنبد Gonbad	19.6	19.6	22.7	17.5
پاشاکلا Pasha Kola	16.9	17.2	19	16
کاره سنگ Karehsang	16.7	16.4	15	18.3

TMAX2: میزان دمای حداکثر از آغاز رشد تا شروع گرده افشانی

TMAX3: میزان دمای حداکثر از آغاز گرده افشانی تا رسیدگی

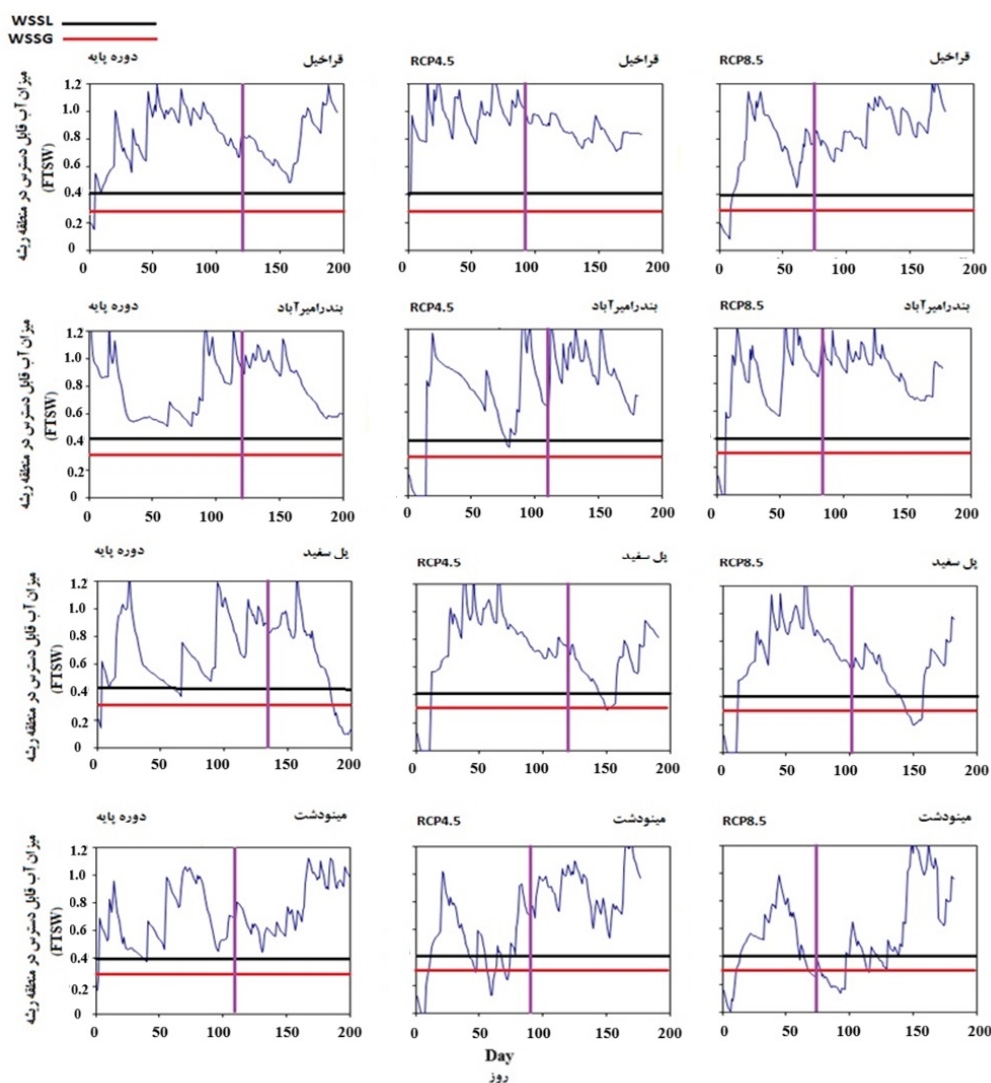
تحلیل راهکار افزایش مقاومت به خشکی در کلزا... / احسان حبیب پورکاشفی و همکاران

جدول ۶- تغییرات مجموع تبخیر و تعرق (SUMET)، کارایی استفاده از تشعشع (RUE) و کارایی تعرق (TE) طی دوره رشد گیاه

کلزا در اقلیم آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۹-۱۹۸۰) تحت سناریوی های RCP4.5 و RCP8.5

Table 6-Changes in the total evaporation and transpiration (SUMET), radiation use efficiency (RUE), and transpiration efficiency (TE) during the growth period of canola in the future climate (2055; 2040-2069) compared to the baseline period (2009-1980) under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

ایستگاه Station	دوره پایه Baseline period			RCP4.5 تغییرات Changes (%)			RCP8.5 تغییرات Changes (%)		
	مجموع تبخیر و تعرق SUMET (mm)	کارایی استفاده از تشعشع RUE (g.MJ ⁻¹)	کارایی تعرق TE (mm)	مجموع تبخیر و تعرق SUMET (mm)	کارایی استفاده از تشعشع RUE (g.MJ ⁻¹)	کارایی تعرق TE (mm)	مجموع تبخیر و تعرق SUMET (mm)	کارایی استفاده از تشعشع RUE (g.MJ ⁻¹)	کارایی تعرق TE (mm)
	دهلران Dehloran	186.8	1.3	5.6	-11	23	3	-16	32
قراخیل Qara Kheyl	307.9	1.4	7.3	-7	39	7	-10	54	11
هاشم آباد Hashem Abad	288.1	1.4	6.4	-12	34	7	-18	46	13
ایزه Izeh	328.4	1.5	4.8	-17	23	9	-18	37	12
گالیکش Galikesh	458.4	1.8	4.0	-9	23	16	-14	32	26
کیاسر Kiasar	354.3	1.4	5.4	-5	14	16	-10	19	28
مسجد سلیمان Masjed Soleyman	250.6	1.6	5.0	-13	50	44	-13	32	8
مروآه تپه Maraveh Tappeh	199.1	1.1	6.8	-21	30	4	-28	39	10
پل دختر Pol Dokhtar	242.0	1.4	5.4	-18	23	16	-20	39	21
پل سفید Pol Sefid	327.7	1.4	5.2	-7	19	18	-13	31	29
ساری Sari	341.5	1.5	6.5	-8	29	7	-13	43	12
کرد کوی Kordkuy	310.4	1.3	6.6	-16	29	7	-9	43	9
بیله سوار Bileh Savar	273.5	1.3	5.7	-8	16	21	-9	26	31
شهمیرزاد Shahmirzad	205.3	0.8	7.1	-10	11	18	-21	27	27
مینودشت Minudasht	381.7	1.3	4.8	-19	29	5	-26	36	9
آق تقه Aq Toqeh	201.6	1.0	4.7	-21	16	12	-27	31	17
بندرامیرآباد Bandar Amirabad	270.6	1.6	10.4	-4	25	5	-8	37	10
شیرین آباد Shirinabad	417.2	1.6	4.2	-8	27	13	-12	39	22
گنبد Gonbad	259.6	1.3	4.9	-17	27	11	-22	38	16
پاشاکلا Pasha Kola	270.6	1.6	10.4	-4	25	5	-8	37	10
کاره سنگ Karehsang	272.7	1.5	6.3	-9	12	20	-9	21	30
میانگین Average	292.7	1.4	6	-11.6	25	12.6	-15.4	35.2	17



شکل ۳- بررسی کسر آب قابل تعرق (قابل دسترس) گیاه در منطقه ریشه (FTSW)، به صورت روزانه در سه منطقه نیمه مرطوب (قراخیل)، نیمه خشک (بندر امیرآباد) و خشک (پل سفید و مینودشت) در دوره پایه، سناریوی RCP4.5 و RCP8.5، WSSL مقدار FTSW است که در کمتر از آن گسترش سطح برگ رو به کاهش می‌گذارد. WSSG مقدار FTSW است که در کمتر از آن روزنه‌ها شروع به بسته شدن کرده و در نتیجه تعرق و تولید ماده خشک رو به کاهش می‌گذارد. خط عمودی در شکل‌ها شروع پرشدن دانه را مشخص می‌کند.

Figure 3- Examining the fraction of available water for transpiration (accessible) in the root zone (FTSW) on a daily basis in three regions: semi-humid (Qara Kheyl), semi-arid (Bandar Amirabad), and arid (Pol Sefid and Minoodasht) during the baseline period, as well as under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. WSSL is the value of FTSW below which the leaf area expansion begins to decrease. WSSG is the value of FTSW below which stomata start to close, resulting in a decrease in transpiration and dry matter production. The vertical line in the figures indicates the start of seed filling.

راهکار سازگاری افزایش خواهد یافت (شکل ۴). از لحاظ افزایش میانگین عملکرد بین هر دو سناریوی انتشار تفاوت قابل توجهی مشاهده نشد (شکل ۴)، به طوری که در هر دو دوره در سناریوی RCP4.5 و

افزایش مقاومت به خشکی: نتایج شبیه‌سازی نشان داد با راهکار افزایش مقاومت به خشکی، در تمامی مناطق مورد بررسی در اقلیم آینده تحت هر دو سناریوی انتشار میانگین تغییرات عملکرد نسبت به آینده بدون

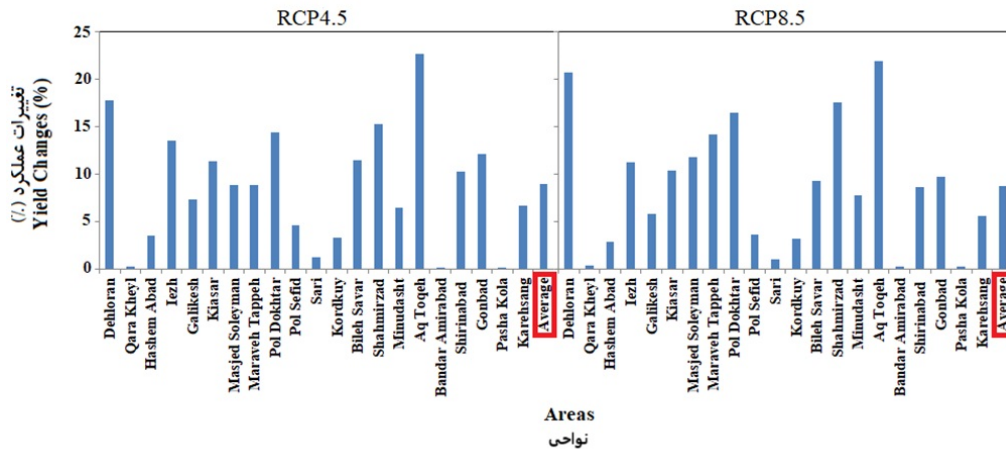
است در مناطقی با بارندگی مناسب، افزایش کارایی تعرق کمترین تأثیر را بر عملکرد داشته است که به نظر می‌رسد انتخاب ژنوتیپ‌هایی با کارایی تعرق بالاتر، بیشتر برای مکان‌های خشک مفید باشد (۳۰) که با نتایج به دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد.

تنش خشکی به‌طور کلی از طریق کاهش فتوسنتز و افزایش پیری برگ باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود (۴۹). در مناطقی که بارندگی رشد محصول را محدود می‌کند، صفاتی که کارایی تعرق را افزایش می‌دهند بیشترین تأثیر را بر عملکرد خواهند داشت، به‌طوری‌که افزایش ۲۰ درصدی کارایی تعرق (TE) منجر به افزایش ۳۰ درصدی عملکرد کلزا در منطقه یانگ‌تسه در کشور چین شد (۳۰). طبق نتایج پژوهشی، با استفاده از ارقام گندم متحمل به خشکی و حساس به خشکی تحت سناریوی آب و هوای دوره ۲۰۵۰ در اقلیم آینده در ۱۳ منطقه اروپا، گزارش شد که استفاده از ارقام مقاوم به تنش خشکی باعث افزایش عملکرد به میزان ۱۳/۴ درصد نسبت به ارقام حساس به تنش خشکی خواهد شد (۲۵). طبق نتایج این محققین کاهش پاسخ فتوسنتز به تنش آبی و کاهش حداکثر سرعت پیری برگ از صفات مهم تحمل به خشکی است (۲۵). همچنین گزارش شده است به تأخیر انداختن پیری برگ و ظرفیت بیشتر گیاه برای حفظ بافت‌های فتوسنتزی فعال بیشتر، تحت تنش خشکی در هنگام گلدهی و پر شدن دانه، یکی از مهمترین صفات تحمل به خشکی در نظر گرفته می‌شود (۲۸).

RCP8.5 میانگین عملکرد به ترتیب به میزان ۸ و ۹ درصد نسبت به آینده بدون راهکار سازگاری افزایش خواهد یافت (شکل ۴). در بین مناطق مورد بررسی پیش‌بینی می‌شود میزان تغییرات عملکرد بین ۰/۰۲ تا ۲۳ درصد نسبت به آینده بدون راهکار سازگاری افزایش یابد (شکل ۴).

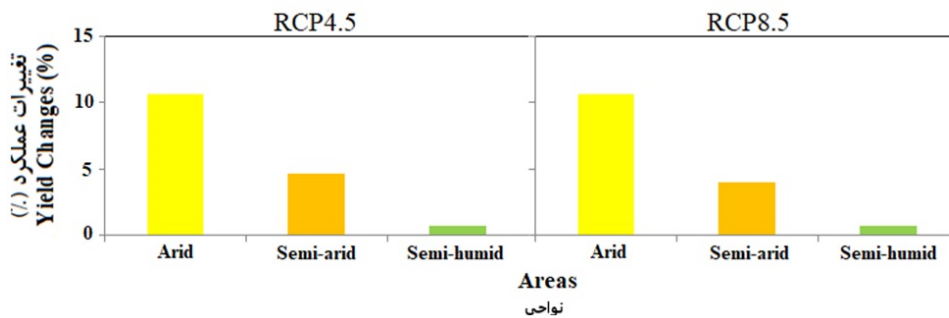
به‌طور میانگین در اقلیم آینده تحت هر دو سناریوی انتشار با راهکار افزایش مقاومت به خشکی، بیشترین افزایش عملکرد در مناطق خشک مشاهده خواهد شد (شکل ۵). مهمترین دلیل افزایش عملکرد در مناطق خشک و برخی از مناطق نیمه‌خشک (بیله سوار و کاره سنگ) با راهکار افزایش مقاومت به خشکی، افزایش بیشتر میزان بهره‌وری آب در این مناطق خواهد بود (شکل ۶). در برخی از مناطق خشک مانند مینودشت و مرواه تپه در آینده بدون راهکار سازگاری، گیاه در طی دوره رشد رویشی با تنش خشکی مواجه خواهد شد، اما با راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی، میزان کارایی تعرق و بهره‌وری آب افزایش می‌یابد و در نتیجه عملکرد افزایش پیدا خواهد کرد (شکل ۴).

با راهکار افزایش مقاومت به خشکی کمترین افزایش عملکرد در مناطق نیمه‌مرطوب (قراخیل و ساری) و برخی از مناطق نیمه‌خشک (بندرامیرآباد و پاشاکلا) مشاهده خواهد شد (شکل ۴)، به دلیل مناسب بودن بارندگی کل در طی دوره رشد گیاه کلزا، افزایش مقاومت به خشکی تأثیر چندانی بر میزان عملکرد در این مناطق نخواهد گذاشت (شکل ۴). گزارش شده



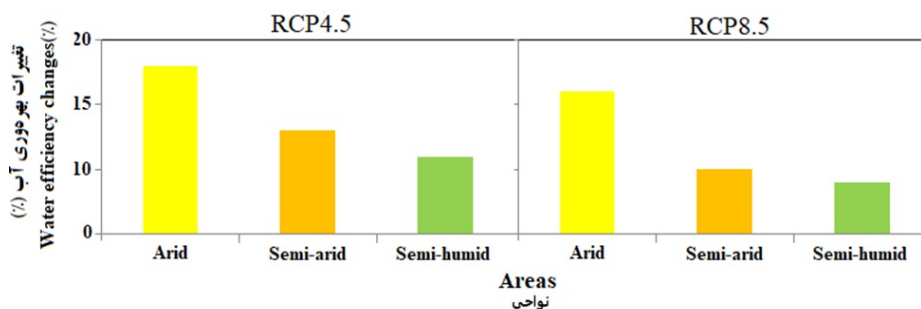
شکل ۴- تأثیر راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی بر تغییرات عملکرد کلزا در اقلیم آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰)، نسبت به آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰) بدون راهکار سازگاری تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

Figure 4- The impact of drought resistance enhancement adaptation strategies on changes in canola yield in the future climate (2055; 2040-2069) compared to the future (2055; 2040-2069) without adaptation strategies under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.



شکل ۵- بررسی راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی بر تغییرات عملکرد کلزا در اقلیم آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰) در سه منطقه خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب، نسبت به آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰) بدون راهکار سازگاری تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

Figure 5- Examining the impact of drought resistance enhancement adaptation strategies on changes in canola yield in the future climate (2055; 2040-2069) in three regions: arid, semi-arid, and semi-humid, compared to the future (2055; 2040-2069) without adaptation strategies under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.



شکل ۶- تغییرات بهره‌وری آب در اقلیم آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰) در سه منطقه خشک، نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب با راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی نسبت به آینده (۲۰۵۵؛ ۲۰۶۹-۲۰۴۰) بدون راهکار سازگاری تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

Figure 6- Changes in water efficiency in the future climate (2055; 2040-2069) in three regions: arid, semi-arid, and semi-humid, with drought resistance enhancement adaptation strategies compared to the future (2055; 2040-2069) without adaptation strategies under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios

نتیجه‌گیری کلی

در مطالعه حاضر اثر تغییر اقلیم بر رشد و نمو گیاه کلزا در شرایط دیم و همچنین ارائه راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی در مناطق اصلی کشت کلزا در کشور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان دارد که به طور میانگین عملکرد در اکثر مناطق اصلی کشت کلزا در هر دو سناریوی انتشار افزایش خواهد یافت. به طور کلی در تحقیق حاضر علت اصلی افزایش عملکرد در اکثر مناطق مورد بررسی در هر دو سناریوی انتشار نسبت به دوره پایه، عدم برخورد گیاه به تنش گرما و آب طی دوره رشد می‌باشد، که در این شرایط پیش‌بینی می‌شود به دلیل افزایش میزان CO₂ در اقلیم آینده، کارایی استفاده از تشعشع (RUE) و همچنین کارایی تعرق (TE) افزایش یابد و در نتیجه ماده خشک بیشتری تولید خواهد شد. علت اصلی کاهش عملکرد در برخی از مناطق (مروآب، مینودشت) در هر دو سناریوی

انتشار، قرار گرفتن گیاه تحت تنش خشکی طی دوره رشد رویشی در این مناطق می‌باشد. همچنین پیش‌بینی می‌شود در این مناطق بارندگی در مرحله گرده افشانی تا رسیدگی کاهش یابد. با استفاده از راهکار سازگاری افزایش مقاومت به خشکی، تحت هر دو سناریوی انتشار میانگین عملکرد نسبت به آینده بدون راهکار سازگاری افزایش خواهد داشت. بیشترین تأثیر راهکار افزایش مقاومت به خشکی در مناطق خشک و برخی از مناطق نیمه‌خشک (بیله‌سوار و کاره سنگ) مشاهده خواهد شد. مهمترین دلیل افزایش عملکرد با راهکار افزایش مقاومت به خشکی در این مناطق، افزایش بیشتر در میزان بهره‌وری آب خواهد بود. در مناطق نیمه‌مرطوب (قراخیل و ساری) و برخی از مناطق نیمه‌خشک (بندرامیرآباد و پاشاکلا) به دلیل مناسب بودن بارندگی کل در طی دوره رشد گیاه کلزا، افزایش مقاومت به خشکی تأثیر چندانی بر میزان عملکرد در این مناطق نخواهد گذاشت.

References

1. Enjalbert, J.N., Zheng, S., Johnson, J.J., Mullen, J.L., Byrne, P.F., & McKay, J.K. (2013). Brassicaceae germplasm diversity for agronomic and seed quality traits under drought stress. *Industrial Crops and Products*, 47, 176–185.
2. FAO. (2003). World Agriculture: Towards 2015/2030: An FAO perspective. Available at: www.fao.org/docrep/005/y4252e/y4252e00.htm.
3. Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA working paper no. 12-03. FAO, Rome.
4. Bannayan, M., Lotfabadi, S., Sanjani, S., Mohammadian, A., & Aghalikhani, M. (2011). Effects of precipitation and temperature on cereal yield variability in northeast of Iran. *International Journal of Biometeorology*, 55, 387-401.
5. IPCC. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., & Miller, H.L. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA.
6. Babaeian, I., Najafi Nik, Z., Zabol Abasi, F., Habibi Nokhandan, M., Adab, H., & Malbousi, S. (2008). Assessment of climate change of country in 2010-2039 period using General Circulation Model data of ECHO-G. *Geography and Development*, 16, 135-152 (In Persian).
7. Cohen, I., Zandalinas, S.I., Huck, C., Fritsch, F.B. & Mittler, R. (2021). Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. *Physiologia Plantarum*, 171, 66–76.
8. Yang, H., Huntingford, C., Wiltshire, A., Sitch, S., & Mercado, L. (2019). Compensatory climate effects link trends in global runoff to rising atmospheric CO₂ concentration. *Environmental Research Letters*, 14, 124075.

9. Hu, Y.N., Liu, Y.J., Tang, H.J. Xu., Y.L., & Jie., P.A.N. (2014). Contribution of drought to potential crop yield reduction in a wheat-maize rotation region in the North China Plain. *Journal of Agricultural Science*, 13(7), 1509-1519.
10. Ludwig, F., & Asseng, S. (2006). Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agricultural Systems*, 90, 159-179.
11. Koocheki, A., & Nassiri, M. (2008). Impacts of climate change and CO₂ concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 6, 139-153 (In Persian).
12. Anwar, M.R., Liu, D.L., Farquharson, R., Macadam, I., Abadi, A., Finlayson, J., Wang, B., & Ramilan, T. (2015). Climate change impacts on phenology and yields of five broadacre crops at four climatologically distinct locations in Australia. *Agricultural Systems*, 132, 133-144.
13. Qin, X., Wang, H., He, Y., Li, Z., Gao, Q., Wan, Y., & Parton, W. J. (2018). Simulated adaptation strategies for spring wheat to climate change in a northern high latitude environment by DAYCENT model. *European Journal of Agronomy*, 95, 45-56.
14. Wang, B., Feng, P., Chen, C., Li Liu, D., Waters, C., & Yu, Q. (2019). Designing wheat ideotypes to cope with future changing climate in South-Eastern Australia. *Agricultural Systems*, 170, 9-18.
15. Luo, X., Xia, J., & Yang, H. (2015). Modeling water requirements of major crops and their responses to climate change in the North China Plain. *Environmental Earth Sciences*, 74, 3531-3541.
16. White, J.W., Hoogenboom, G., Kimball, B.A., & Wall, G.W. (2011). Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Research*, 124, 357-368.
17. Battisti, R., Sentelhas, P.C., Boote, K.J., Câmara, G.M.D.S., Farias, J.R., & Basso, C.J. (2017). Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. *European Journal of Agronomy*, 83, 1-14.
18. Hatzig, S.V., Schiessl, S., Stahl, A., & Snowdon, R.J. (2015). Characterizing root response phenotypes by neural network analysis. *Journal of Experimental Botany*, 66, 5617-5624.
19. Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H., & Battaglia, M.L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10, 259.
20. Semenov, M.A., Martre, P., & Jamieson, P.D. (2009). Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6-7), 1095-1104.
21. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2012a). Identifying plant traits to increase chickpea yield in water-limited environments. *Field Crops Research*, 133, 186-196.
22. Tao, F., Rötter, R.P., Palosuo, T., Díaz-Ambrona, C.G.H., Mínguez, M.I., Semenov, M.A., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Cammarano, D., Hoffmann, H., Ewert, F., Dambreville, A., Martre, P., Rodríguez, L., Ruiz-Ramos, M., Gaiser, T., Höhn, J.G., Salo, T., Ferrise, R., Bindi, M., & Schulman, A.H. (2017). Designing future barley ideotypes using a crop model ensemble. *European Journal of Agronomy*, 82, 144-162.
23. Vadez, V. (2014). Root hydraulics: the forgotten side of roots in drought adaptation. *Field Crops Research*, 165, 15-24.
24. Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Condon, A.G., & Van Herwaarden, A.F. (2002). Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Science*, 42(1), 111-121.
25. Senapati, N., Stratonovitch, P., Paul, M.J. & Semenov, M.A. (2019). Drought tolerance during reproductive development is important for increasing wheat yield potential under climate change in Europe. *Journal of Experimental Botany*, 70(9), 2549-2560.
26. Walid, S., Jose, R.L., & Kevin, P.S. (2021). Transpiration increases under high-temperature stress: Potential mechanisms, trade-offs and prospects for crop resilience in a warming world. *Plant Cell Environment*, 44, 2102-2116.

27. Hossain, S.M., Masle, J., Easton, A., Hunter, M.N., Godwin, I.D., Farquhar, G.D., & Lambrides, C.J. (2020). Genetic variation for leaf carbon isotope discrimination and its association with transpiration efficiency in canola (*Brassica napus*). *Functional Plant Biology*, 47(4), 355-367.
28. Christopher, J.T., Christopher, M.J., Borrell, A.K., Fletcher, S. & Chenu, K. (2016). Stay-green traits to improve wheat adaptation in well-watered and water-limited environments. *Journal of Experimental Botany*, 67, 5159-5172.
29. Luche, H.D., Da Silva, J.A.G., Da Maia, L.C., & De Oliveira A.C. (2015). Stay green: a potentiality in plant breeding. *Ciencia Rural*, 45, 1755-1760.
30. He, D., Wang, E., Wang, J. & Lilley, J.M. (2017). Genotype× environment× management interactions of canola across China: A simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 424-433.
31. Dolferus, R. (2014). To grow or not to grow: a stressful decision for plants. *Plant Science*, 229, 247–261. 10.1016/j.plantsci.2014.10.002.
32. Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., van Ittersum, M.K., & Sinclair, T.R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182, 102855
33. Rahban, S., Torabi, B., Soltani, A., & Zeinali, E. (2021). Using SSM-iCrop model to predict phenology, yield and water productivity of canola (*Brassica napus*) in Iran condition. *Journal of Agroecology*, 13(1), 157-177 (In Persian).
34. Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.I., Koo, J., Asseng, A., Singels, L.P., & Jones, J.W. (2019). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5 (<https://DSSAT.net>). DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
35. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2012b). Optimizing chickpea phenology to available water under current and future climates. *European Journal of Agronomy*, 38, 22-31.
36. Ruane, A.C., Winter, J.M., McDermid, S.P., & Hudson, N.I. (2015). AgMIP climate data and scenarios for integrated assessment. In Rosenzweig, C., & Hillel, D. (Eds.). Handbook of climate change and agroecosystems: The agricultural model Intercomparison and improvement project (AgMIP) (pp. 45–78). Imperial College Press.
37. AgMIP. (2013). Guide for Running AgMIP Climate Scenario Generation Tools with R in Windows. AgMIP, URL: <http://www.agmip.org/wp-content/uploads/2013/10/Guide-for-Running-AgMIP-ClimateScenario-Generation-with-R-v2.3.pdf>.
38. Soltani, A. (2009). Mathematical Modeling in Field Crops. Ferdowsi of Mashhad Univ. Press, 176p. (In Persian).
39. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, 124, 252-260.
40. Meza, F.J., Silva, D. & Vigil, H. (2008). Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural Systems*, 98, 21–30.
41. Asseng, S., Jamieson, P.D., Kimball, B., Pinter, P., Sayre, K., Bowden, J.W., & Howden, S.M. (2004). Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Research*, 85, 85-102.
42. Yano, T., Aydin, M., & Haraguchi, T. (2007). Impact of climate change on irrigation demand and crop growth in a Mediterranean environment of Turkey. *Sensors*, 7, 2297-2315.
43. Fischer, G., Tupelo, F.N., Velthuisen, H., & Wiberg, D.A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990–2080. *Technological Forecasting Social Change*, 74(7), 1083–1107.

44. Soltani, A., Gholipour, M. & Ghassemi-Golezani, K. (2007). Analysis of temperature and atmospheric CO₂ effects on radiation use efficiency in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Plant Sciences*, 2, 89-95.
45. Mohammed, A., Tana, T., Singh, P., Molla, A., & Seid, A. (2017). Identifying best crop management practices for chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Northeastern Ethiopia under climate change condition. *Agricultural Water Management*, 194, 68-77.
46. Qian, B., Zhang, X., Smith, W., Grant, B., Jing, Q., Cannon, A. J., & Zhao, J. (2019). Climate change impacts on Canadian yields of spring wheat, canola and maize for global warming levels of 1.5 C, 2.0 C, 2.5 C and 3.0 C. *Environmental Research Letters*, 14(7), 074005.
47. Reynolds, M.P., Calderini, D., Condon, A., & Vargas, M. (2007). Association of source/sink traits with yield, biomass and radiation use efficiency among random sister lines from three wheat crosses in a high-yield environment. *Journal of Agricultural Science*, 145, 3-16.
48. Xu, Z., Zheng, X., Wang, Y., Wang, Y., Huang, Y., & Zhu, J. (2006). Effect of free-air atmospheric CO₂ enrichment on dark respiration of rice plants (*Oryza sativa* L.). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 115(1-4), 105-112.
49. Chen, S.X., Zhang, H., Sun, T., & Ren, Y.W. (2010). Effects of winter wheat row spacing on evapotranspiration, grain yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 97, 1126 -1132.
50. Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A., Salmani, F., Nehbandani, A., Nourbakhsh, F., & Ullah, A. (2022). Evaluation of water productivity in the main areas of potato cultivation in Iran, *Potato Research*. <https://doi.org/10.1007/s11540-022-09603-7>