

## Assessing the effect of climate change and irrigation management on yield and water use efficiency of canola cultivars in Khuzestan province

Abdolmajid Soheilnejad<sup>1</sup> , Sajjad Rahimi-Moghaddam<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Assistant Prof, Department of Agriculture, Faculty of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Prof., Department of Plant Production and Genetics Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

Climate change is one of the most pressing challenges for global agriculture, particularly in arid and semi-arid regions such as southwestern Iran. Increases in temperature, alterations in rainfall distribution, and the rise in atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations strongly affect crop growth, yield formation, and water use efficiency (WUE). Rapeseed (*Brassica napus* L.), as a C<sub>3</sub> plant and a major oilseed crop, is highly sensitive to both climatic fluctuations and water availability. In Khuzestan province, rapeseed has become increasingly important in recent years, but its productivity is constrained by limited water resources and the growing threat of climate stress. Therefore, it is crucial to evaluate the combined effects of cultivar choice and irrigation strategies under both current and projected climate conditions to support sustainable rapeseed production. This study aimed to assess the performance of various rapeseed cultivars and irrigation regimes under future climate conditions.

#### Materials and Methods

The research was conducted using the APSIM model to simulate the growth and yield of rapeseed at five sites in Khuzestan Province (Shush, Shushtar, Izeh, Dezful, and Behbahan) under both baseline and future periods. Climate projections for the future periods were obtained from five Global Circulation Models (GCMs: MPI-ESM1-2-LR, ACCESS-ESM1-5, MRI-ESM2-0, HadGEM3-GC31-LL, and CNRM-CM6-1) under three SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5). The LARS-WG software (version 8) was employed for statistical downscaling to generate future climate data. Three widely cultivated rapeseed cultivars, namely Hyola401, Hyola308, and RGS003, together with five irrigation treatments, were considered to simulate their responses to future climate conditions in terms of yield, WUE, ETC, and to identify the optimal combinations for the study sites. Irrigation treatments were defined based on soil field capacity (FC) levels, including FC50, FC60, FC70, FC80, and FC90. These treatments corresponded to the replenishment of soil moisture whenever the available water content was depleted to 50%, 60%, 70%, 80%, and 90% of field capacity, respectively. Statistical analyses, including regression analysis and Duncan's multiple range test, were applied at the 0.05 and 0.01 probability levels.

#### Results and Discussion

The results showed that, under the baseline period, the cultivar Hyola401 achieved the highest grain yield in the FC90 treatment (an average of 4631 kg ha<sup>-1</sup> across all regions). The highest WUE was obtained by Hyola401 under the FC50 treatment (1.1 kg m<sup>-3</sup>) in Izeh. Regression analysis revealed a positive and significant relationship between grain yield and WUE (R<sup>2</sup> = 0.91; p-value < 0.05). During the future period, mean temperature increased by 1.53 °C compared with the baseline, while the length of the growing season decreased by about 5%, leading to reductions in both yield and WUE in most regions. For instance, in Izeh, a slight improvement in yield was observed for the cultivar RGS003 under FC50 and FC60 irrigation (by 0.65% and 0.34%, respectively) under the SSP1-2.6 scenario. In Shushtar, however, yield improvements were associated with the cultivar Hyola401 across all scenarios and irrigation treatments, with yield increases ranging from 2.5% to 17%. The results highlight the trade-off between grain yield and water use efficiency under different irrigation levels. While FC90 maximized grain yield, it also increased ETC beyond 6000 m<sup>3</sup>, resulting in lower WUE. Conversely, deficit irrigation (FC50) improved WUE but caused a significant yield reduction. The optimal balance was achieved at intermediate irrigation levels (FC60–70), particularly when combined with high-performing cultivars such as Hyola401. Future climate scenarios suggested that the negative effects of increased temperature and shorter growth duration would outweigh the positive effects of CO<sub>2</sub> fertilization in most warm regions. The increase in temperature and its negative association with grain yield were observed in regression analyses, where the relationship between mean temperature and grain yield was significantly negative (R<sup>2</sup> = -0.68; p-value < 0.05). The largest yield reductions were predicted in Shush, confirming that heat stress during the reproductive stage is the most critical constraint. Nonetheless, in cooler regions such as Izeh, the positive impact of elevated CO<sub>2</sub> partially offset the yield decline, confirming the spatial heterogeneity of climate change impacts. These findings are consistent with previous reports indicating that elevated CO<sub>2</sub> may mitigate some of the negative consequences of rising temperatures in C<sub>3</sub> crops, but cannot fully compensate for severe heat stress.

#### Conclusion

This study demonstrated that both cultivar selection and irrigation management are key determinants of sustainable rapeseed production under climate change. Under baseline conditions, Hyola401 × FC90 achieved the highest grain yield, while

Hyola401 × FC50 achieved the highest WUE. However, under future climate conditions, yield reductions of up to -9% were projected, particularly in warmer areas such as Shush under SSP5-8.5. In contrast, yield and WUE improvements were observed in Izeh and Shushtar, largely due to the positive effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub>. Overall, intermediate irrigation strategies (FC60–70) combined with resilient cultivars such as Hyola401 and Hyola308 were found to offer the most sustainable balance between yield and WUE under future climate conditions. These results emphasize the importance of climate-smart strategies, including adaptive irrigation management, the selection of stress-tolerant cultivars, and the adjustment of planting schedules, to mitigate the adverse impacts of climate change and ensure sustainable rapeseed production in Khuzestan.

**Keywords:** Evapotranspiration, Temperature, Carbon dioxide, Climate scenario

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the Iran Meteorological Organization for providing the climatic data used in this study.

### Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### Data Availability Statement

All data generated during the manuscript analysis are included in the article.

### Authors' contribution

**Abdolmajid Soheilnejad:** Writing - original draft preparation, Statistical analysis; **Sajjad Rahimi-Moghaddam:** Manuscript editing, Software analyses and modeling

\*Corresponding Author, E-mail: Sajjad Rahimi-Moghaddam, rahimi.s@lu.ac.ir

**Citation:** Soheilnejad, A., & Rahimi-Moghaddam, S. (2026). Assessing the effect of climate change and irrigation management on yield and water use efficiency of canola cultivars in Khuzestan province. *Water and Soil Management and Modeling*, 6 (1), 270- 286.

doi: 10.22098/mmws.2025.18649.1708

Received: 25 October 2025, Received in revised form: 11 November 2025, Accepted: 11 November 2025, Published online: 21 March 2026

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2026, Vol. 6, No. 1, pp. 270-286

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی و مدیریت آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام کلزا در استان خوزستان

عبدالمجید سهیل‌نژاد<sup>۱</sup>، سجاد رحیمی‌مقدم<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

### چکیده

هدف این پژوهش بررسی اثر سطوح آبیاری بر عملکرد دانه و WUE ارقام مختلف کلزا در شرایط اقلیمی پایه و آینده استان خوزستان بود. برای این منظور، از مدل APSIM به منظور شبیه‌سازی و بررسی واکنش سه رقم کلزا شامل Hyola401، Hyola308 و RGS003 به پنج سطح آبیاری (FC50، FC60، FC70، FC80 و FC90) در قالب سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد. داده‌های اقلیمی دوره پایه از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شد و برای تولید داده‌های اقلیمی آینده از نرم‌افزار LARS-WG نسخه ۸ استفاده شد. نتایج نشان داد در دوره پایه، رقم Hyola401 توانست بیشینه عملکرد دانه را در تیمار FC90 (به‌طور میانگین ۴۶۳۱ کیلوگرم در هکتار) به‌طور میانگین در سراسر مناطق بدست آورد. بیشینه WUE را رقم Hyola401 و FC50 (۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب) در منطقه ایذه داشت. تحلیل رگرسیون نشان داد رابطه منفی و معنی‌داری میان عملکرد دانه و میانگین دما در طول فصل رشد ( $R^2=0.86$ ;  $p\text{-value}<0.05$ ) وجود داشت. در دوره آینده، میانگین دما نسبت به پایه ۱/۵۳ درجه سانتی‌گراد افزایش و طول دوره رشد حدود ۵ درصد کاهش یافت که منجر به کاهش عملکرد و WUE در بیش‌تر مناطق شد. به‌عنوان مثال در شهرستان ایذه، بهبود جزئی عملکرد در رقم RGS003 و آبیاری‌های FC50 و FC60 (به‌ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۳۴ درصد) تحت سناریوی SSP1-2.6 مشاهده شد و در منطقه شوشتر، بهبود عملکرد مربوط به رقم Hyola401 تحت تمامی سناریوها و تیمارهای آبیاری بود، که افزایش عملکردی از ۲/۵ تا ۱۷ درصد نشان داد که ناشی از اثرات مثبت دی‌اکسید کربن بود. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که در مناطق گرم و تحت سناریوهای آینده، استفاده از تیمارهای پرآب (FC90) به‌دلیل افزایش ETc و کاهش WUE توجیه‌پذیر نیست. در مقابل، تیمارهای میانی (FC60-70) همراه با ارقام Hyola401 و Hyola308 می‌توانند بهترین توازن بین عملکرد و WUE را برقرار کنند. این یافته‌ها اهمیت مدیریت انعطاف‌پذیر آبیاری و انتخاب رقم مناسب را برای پایداری تولید کلزا در شرایط آینده اقلیمی تأیید می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** تبخیر و تعرق، دما، دی‌اکسید کربن، سناریوی اقلیمی

**نوع مقاله:** پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: سجاد رحیمی‌مقدم، rahimi.s@lu.ac.ir

**استناد:** سهیل‌نژاد، عبدالمجید، و رحیمی‌مقدم، سجاد (۱۴۰۵). ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی و مدیریت آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام کلزا در استان خوزستان. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶(۱)، ۲۷۰-۲۸۶.

doi: 10.22098/mmws.2025.18649.1708

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

*مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، سال ۱۴۰۴، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۲۷۰ تا ۲۸۶

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



## ۱- مقدمه

(2022). این استان نقش بسیار مهمی در تولید کلزا در کشور را برعهده دارد به طوری که میزان سطح زیرکشت کلزا در این استان برابر با ۲۸ هزار هکتار که ۲۸/۵ درصد سطح زیر کشت در ایران است و میزان تولید این استان برابر با ۵۳ هزار تن که ۲۶/۸ درصد تولید کشور را شامل می شود (MAJ, 2023). مدل سازی محصول کشاورزی روشی مؤثر برای شبیه سازی تعاملات محصولات کشاورزی با اقلیم، آب، شرایط خاک و شیوه های مدیریتی است (Xing et al., 2017). رویکرد مدل سازی می تواند راهکارهایی را برای بهبود بهره وری و کارایی منابع در محیط ها، فصول و سناریوهای مدیریتی مختلف شناسایی کند (Wang et al., 2022). در میان مدل های شبیه سازی رشد، مدل APSIM یکی از قدرتمندترین مدل های شبیه سازی رشد و نمو گیاهان زراعی است که در شرایط اقلیمی و مدیریتی گوناگون جهان، از جمله ایران، به طور گسترده به کار رفته است (Watson et al., 2017; Rahimi-Moghaddam et al., 2019; Deihimfard et al., 2022). این مدل با شبیه سازی روزانه فرایندهای مرتبط با اقلیم، خاک، مدیریت زراعی و عوامل ژنتیکی، رشد، توسعه و عملکرد محصول را با دقت پیش بینی می کند. زیرمدل APSIM-canola نیز برای شبیه سازی رشد کلزا توسعه یافته و کارایی بالای آن در مناطق مختلف از جمله استرالیا، آلمان، چین و ایران تأیید شده است (Hoffmann et al., 2015; Wang et al., 2012; Christy et al., 2021; Rahimi-Moghaddam et al., 2013). در این مطالعه، مدل APSIM برای کلزا با استفاده از داده های شش سال آزمایش های میدانی شامل فنولوژی محصول، عملکرد، بیوماس و مدیریت محصول واسنجی شده است (Rahimi-Moghaddam et al., 2021). مدل واسنجی شده برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد و کارایی مصرف آب کلزا، با استفاده از داده های اقلیمی آینده حاصل از شش مدل اقلیمی جهانی (GCM) پروژه CMIP6 که به صورت آماری کاهش مقیاس یافته اند، مورد استفاده قرار گرفت. چنین تلفیقی از مدل سازی محصول متمرکز بر تغییرات اقلیمی و کارایی مصرف آب تولید کلزا در استان خوزستان خلأ دانشی مهمی را برای تولیدکنندگان، آموزش کشاورزی، برنامه ریزان و سیاستگذاران در زمینه تولید پایدار پر می کند. برخلاف اکثر مطالعات مدل سازی محصولات که جنبه پایداری تولید محصول را نادیده می گیرند، این مطالعه دیدگاه خوبی درباره سازگاری تولید کلزا در این منطقه در ارتباط با تغییرات کارایی مصرف آب آینده را ارائه می دهد که پیش تر بررسی نشده بود.

تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی که با افزایش دمای کره زمین و تغییر در الگوهای بارش مشخص می شود، به عنوان یک روند بزرگ جهانی مطرح شده است که در آینده تحولات قابل توجهی را در سطح جهان ایجاد خواهد کرد (IPCC 2018, 2023). ایران طی ۲۰ تا ۳۰ سال گذشته تغییرات قابل توجهی در دما و بارش تجربه کرده است؛ به طوری که دماهای بالاتر و توزیع نامنظم بارش در طول سال مشاهده شده است (Mianabadi and Davary, 2023). این تغییرات تأثیرات مثبت و منفی بر تولیدات کشاورزی ایران داشته اند و بر محصولاتی مانند گندم، ذرت و دانه های روغنی اثرگذار بوده اند. برای مثال، Deihimfard et al. (2022a) اثرات نامطلوب شرایط اقلیمی متغیر را بر عملکرد ذرت ایران گزارش کرده اند که ۴۸ درصد کاهش مواجه شده است. Dolatparast et al. (2023) نیز اثرات مشابهی را بر کلزا در دشت دهگلان، کردستان مشاهده کرده اند به طوری که کاهش ۲/۵۲ تا ۳۷/۵ درصد در عملکرد دانه کلزا تحت سناریو و دوره های مختلف را نشان می دهد. در مقابل، Deihimfard et al. (2022b) و Heidarybeni et al. (2018) گزارش داده اند که تغییرات اقلیمی می تواند تأثیر مثبتی بر عملکرد گندم و کلزا داشته باشد، به طوری که افزایش ۳/۵ و ۹ درصدی عملکرد گندم و آبی و پیش بینی افزایش ۶/۱۸ درصدی عملکرد کلزا در دوره آینده مشاهده می شود. ایران یکی از مصرف کنندگان عمده روغن کلزا در جهان است و تقریباً ۰/۴ درصد از تولید جهانی بذر کلزا را به خود اختصاص داده است (FAO, 2022). عملکرد کلزا در تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در ایران نوسانات قابل توجهی نشان می دهد (Dolatparast et al., 2023; Heidarybeni et al., 2018) که این نوسانات، پاسخگویی به تقاضای رو به افزایش کلزا در ایران را دشوار می کند. افزایش تقاضا برای کلزا موجب شده است تا مدیریت های نوین و تلاش هایی برای افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب در شرایط تغییرات اقلیمی آینده اتخاذ شود. این مدیریت ها شامل برنامه ریزی بهتر آبیاری (Deihimfard et al., 2025) و تغییر در زمان کاشت (Amiri et al., 2021) و کاربرد ارقام بهینه (Rahimi-Moghaddam et al., 2019) به منظور کاهش اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی است. تغییرات اقلیمی و نوسانات فصلی از لحاظ بارندگی و دما می توانند باعث افزایش نوسانات عملکرد محصولات به ویژه در مناطقی با تنش های دمایی بالا مانند استان خوزستان شوند (Deihimfard et al., 2022). استان خوزستان از لحاظ مواجهه با تنش های حرارتی و نوسانات بارش و دما به ویژه تحت شرایط تغییر اقلیم یکی از حساس ترین استان های ایران به شمار می رود (Karimifard et al., 2018; Rahimi-Moghaddam et al., 2019; Deihimfard et al.,

## ۲- مواد و روش‌ها

## ۲-۱- موقعیت مناطق مورد بررسی

مطالعه حاضر بر روی پنج منطقه در استان خوزستان واقع جنوب غرب ایران شامل دزفول، شوش، شوشتر، ایذه و بهبهان متمرکز شد (جدول ۱). این انتخاب مناطق به دلیل سطح زیر کشت کلزا، توزیع در سطح استان و دسترسی به داده‌های اقلیمی بلندمدت

انتخاب شدند. بر اساس روش شناسی اقلیمی کوپن، این مناطق در طبقه منطقه گرم خشک قرار می‌گیرند (Karki et al., 2016; Kottek et al., 2006). جزئیات طبقه‌بندی‌های اقلیمی کوپن در منابع کارکی و همکاران و کوتک و همکاران قابل مشاهده است (Karki et al., 2016; Kottek et al., 2006).

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی، ویژگی‌های اقلیمی و مدیریتی مناطق مورد مطالعه در استان خوزستان.

Location	Longitude and latitude (°)	Elevation (m)	Annual mean Temperature (°C)	Annual cumulative rainfall (mm)	Sowing date of canola
Izeh	49.87 – 31.82	835	21.3	610.7	Oct 17
Behbahan	50.23 – 30.59	325	24.8	323.5	Oct 23
Dezful	48.39 – 32.38	82	24.5	387.2	Nov 11
Shush	48.25 – 32.19	71	25.9	224.4	Nov 11
Shushtar	48.85 – 32.04	65	26.8	302	Nov 11

SSP1-2.6 (سناریوی خوشبینانه)، SSP2-4.5 (سناریوی حدواسط) و SSP5-8.5 (سناریوی بدبینانه) و در بازه زمانی ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ انجام شد (IPCC, 2021). میزان غلظت دی اکسید کربن برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و دوره زمانی ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ به ترتیب ۴۳۵، ۵۲۲ و ۶۰۳ قسمت در میلیون در نظر گرفته شد (IPCC, 2021).

ویژگی‌های خاک از سازمان هواشناسی کشاورزی ایران و گزارش‌ها و مقالات منتشر شده (Rahimi-Moghaddam et al., 2019; Nouri et al., 2016) استخراج شدند. عمق خاک (۱۰۰ سانتی‌متر)، حد بالای زهکشی (DUL)، حد پایین نیاز ریشه (CLL) و ظرفیت آب اشباع (SAT) داده‌های اصلی خاک بودند که برای اجرای زیرمدل موازنه آب خاک در مدل محصول مورد نیاز بود. داده‌های خاک جمع‌آوری شده شامل درصد رس، سیلت، ماسه، چگالی ظاهری و کربن آلی بودند که بر اساس تابع پدوتبدیل (Saxton et al., 1986) مقادیر DUL، CLL و SAT محاسبه شدند (جدول ۲).

## ۲-۲- جمع‌آوری داده‌های مختلف و پیش‌بینی اقلیم آینده

داده‌های بلندمدت (۱۹۸۰-۲۰۲۰) روزانه هواشناسی شامل مدت تابش (مگاژول در متر مربع)، حداقل و حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد) و بارش (میلی‌متر) برای هر محل مطالعه از سازمان هواشناسی ایران جمع‌آوری شد. برای تولید داده‌های اقلیمی آینده از نرم‌افزار LARS-WG نسخه ۸ استفاده شد. این نرم‌افزار یک ابزار تصادفی‌سازی آب‌وهوایی است که برای تولید داده‌های هواشناسی طراحی شده و از تکنیک‌های کاهش مقیاس آماری برای متغیرهایی مانند دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش بهره می‌برد (Semenov et al., 2024). نسخه ۸ این نرم‌افزار، دارای پنج مدل از مجموعه مدل‌های پروژه مقایسه‌ای فاز ششم مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) را شامل می‌شود (MPI-ESM1-2-LR; ACCESS-ESM1-5; MRI-ESM2-0; HadGEM3-GC31-LL; CNRM-CM6-1)، که برای پیش‌بینی اقلیم مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین، پیش‌بینی‌ها بر اساس این پنج مدل اقلیمی (GCM)، سه سناریو (SSPs) شامل

جدول ۲- ویژگی‌های خاکی مناطق مورد مطالعه در استان خوزستان

Location	Soil water capacity at wilting point (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Soil water capacity at field capacity (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Soil water capacity at saturation (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
Izeh	0.18	0.31	0.45
Behbahan	0.18	0.34	0.48
Dezful	0.13	0.29	0.47
Shush	0.19	0.35	0.48
Shushtar	0.19	0.35	0.48

تاریخ کاشت‌های مناطق مختلف در جدول ۱ مشخص هستند. حجم نمونه پرسشنامه بر اساس جامعه کلزا کاران استان و فرمول کوکران تعیین شد و در هر شهرستان ۲۰ پرسشنامه برای بدست آوردن اطلاعات مدیریتی تکمیل شد.

اطلاعات مربوط به شیوه‌های مدیریت کشاورزان محلی توسط کارشناسان وزارت کشاورزی و مراکز تحقیقات و آموزش منابع طبیعی استان خوزستان جمع‌آوری شد و شامل تاریخ کاشت، عملیات خاک‌ورزی (مرسوم)، تراکم بوته (۸۰ بوته در متر مربع)، عمق کاشت (۳ سانتی‌متر) و فاصله ردیف‌ها (۳۰ سانتی‌متر) بودند.

## ۲-۳- مدل زراعی و آزمایش های شبیه سازی

مدل شبیه سازی محصول کلزا مدل APSIM بود که چارچوبی برای مدل سازی سیستم های کشاورزی است که قابلیت بالایی در شبیه سازی رشد و عملکرد محصول دارد (Keating et al., 2003). زیرمدل کلزا در مدل APSIM ادغام شده است (Robertson et al., 1999). مدل APSIM-Canola توسعه یافته کلزا، رشد بیوماس و عملکرد دانه را در پاسخ به دما، طول روز، تابش، آب خاک و نیتروژن خاک در بازه های زمانی روزانه شبیه سازی می کند (Robertson et al., 1999; Robertson and Lilley, 2016). جزئیات بیشتر درباره زیرمدل کلزا در روبرتسون و لیلی (Robertson and Lilley, 2016) آمده است. این مدل پیش تر برای سه رقم اصلی و غالب استان خوزستان (Hyola308, Hyola401 و RGS003) تحت شرایط تیمارهای مختلف تاریخ کاشت و آبیاری در چهار آزمایش مزرعه ای مستقل در شش سال مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل با جذر مربعات خطای نرمال شده (nRMSE)

۱۰/۰۴ درصد در شبیه سازی رشد و نمو و عملکرد ارقام مذکور بود (Rahimi-Moghaddam et al., 2021). بنابراین در این پژوهش از مدل ارزیابی شده استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل برای کارایی مصرف آب در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین، ضرایب واسنجی شده برای ارقام مختلف کلزا در جدول ۴ مشخص هستند.

جدول ۳- ارزیابی مدل APSIM برای کارایی مصرف آب در ارقام مختلف کلزا

Table 3. Evaluation of the APSIM model for water use efficiency (WUE) of different canola cultivars

Index	Observed WUE (kg/m <sup>3</sup> )	Simulated WUE (kg/m <sup>3</sup> )
Mean	0.920	0.944
nRMSE (%)		8.76
MBE (kg/m <sup>3</sup> )		0.024
d-index		0.86
N		19

nRMSE: normalized root mean square error; MBE: mean bias error; d-index: index of agreement; N: number of observations.

جدول ۴- ضرایب واسنجی شده برای ارقام مختلف کلزا

Table 4. Calibrated parameters for various canola cultivars

Parameter	Cultivar			Unit
	RGS003	Hyola401	Hyola308	
Cumulative thermal time required from emergence to the end of the juvenile	350	300	235	°Cd
Maximum thermal time required to complete the juvenile process at no vernalisation	500	460	395	°Cd
Cumulative thermal time required for grain-filling	800	750	650	°Cd
Cumulative thermal time required from flowering to start grain-filling	200	200	200	°Cd
Harvest index	0.23	0.28	0.25	-

آب (حاصل تقسیم عملکرد دانه بر تبخیر و تعرق در طول فصل رشد)، میانگین دما در طول فصل رشد، بارندگی تجمعی در طول فصل رشد و طول فصل رشد بودند. مقایسه میانگین صفات مورد مطالعه با استفاده از آزمون چند دامنه ای دانکن (DMRT) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد برای تحلیل داده ها و رسم شکل ها از نرم افزار R (R Core Team, 2022) استفاده شد. بر این اساس از بسته های dplyr، agricola، tidyr و readr استفاده شد. در نرم افزار R استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- عملکرد دانه، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب در دوره پایه

میزان عملکرد دانه کلزا در دوره پایه در استان خوزستان برابر با ۴۰۵۰ کیلوگرم در هکتار بود. با این وجود تغییرات بالایی در عملکرد دانه با توجه مناطق مختلف، تیمارهای آبیاری و ارقام مختلف وجود داشت. در دوره پایه، بیشینه عملکرد دانه در شرایط FC90 و در منطقه ایذه برای رقم Hyola401 با میانگین ۵۶۱۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد، که به طور معنی داری بیش تر از

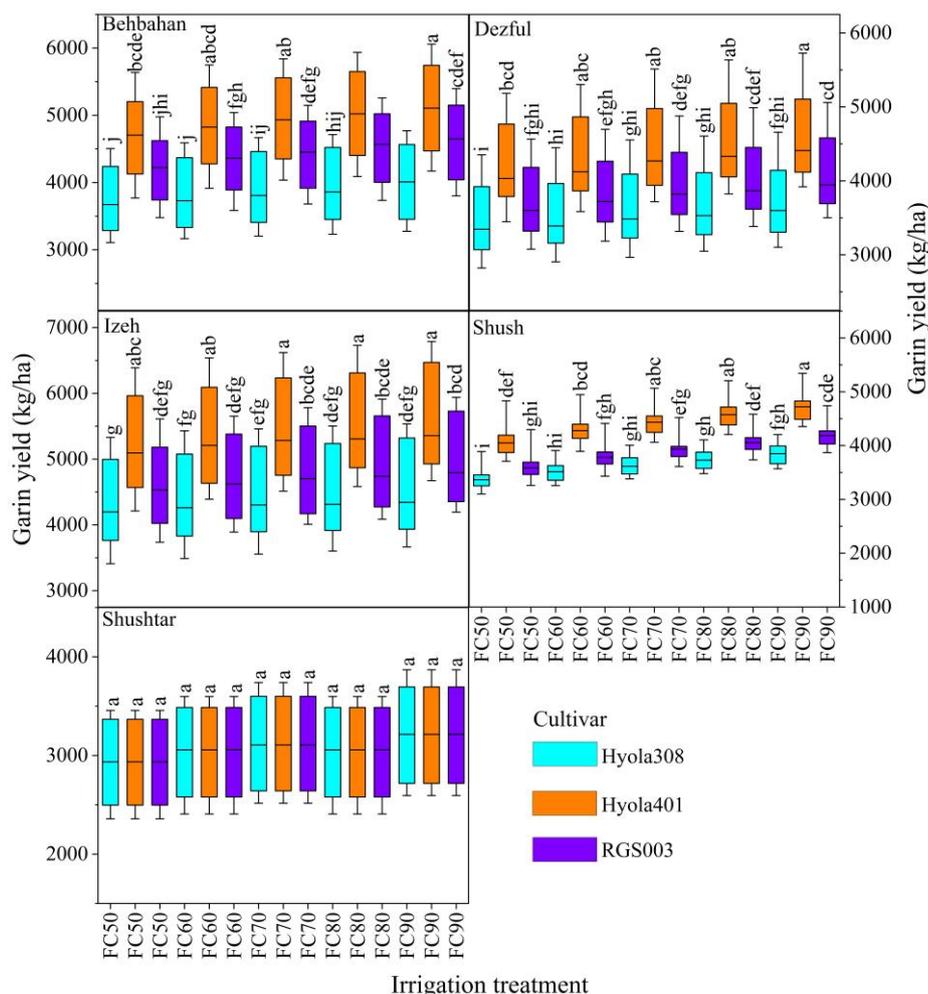
تمامی شبیه سازی های تحت شرایط بدون تنش از نظر نیتروژن و عوامل زیستی انجام شد. در نهایت، آزمایش های شبیه سازی بلندمدت شامل پنج رژیم آبیاری (FC60، FC50، FC70، FC80 و FC90 به ترتیب آبیاری بر اساس ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد از ظرفیت زراعی خاک)، سه رقم (Hyola308، Hyola401 و RGS003 به ترتیب ارقام زودرس، متوسط رس و دیررس) و پنج منطقه (دزفول، شوش، شوشتر، ایذه و بهبهان) برای دوره گذشته (۲۰۲۰-۱۹۸۰) و آینده (شامل پنج مدل اقلیمی MPI-ESM1-2-LR; ACCESS-ESM1-5; MRI-ESM2-0; HadGEM3-GC31-LL; CNRM-CM6-1 و SSP5-8.5 و SSP2-4.5، SSP1-2.6) تحت دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۰ بودند. تیمارهای آبیاری بعد از مرحله سبز شدن اعمال شدند و تا رسیدگی فیزیولوژیک گیاه ادامه یافتند. بنابراین مجموع آزمایشات شبیه سازی ۲۵۹۵۰ آزمایش شبیه سازی بود.

## ۲-۴- صفات مورد بررسی و آنالیز داده ها

خروجی های که برای گزارش در این مقاله استفاده شد شامل عملکرد دانه، تبخیر و تعرق در طول فصل رشد، کارایی مصرف

هکتار در FC50 به بیش از ۵۶۴۱ کیلوگرم در FC90 افزایش یافت. به طور کلی، رقم Hyola401 در اغلب مناطق و سطوح آبیاری عملکرد بالاتری نسبت به دو رقم دیگر داشت، در حالی که RGS003 عملکرد ضعیف تری از خود نشان داد. در نهایت در سراسر مناطق مختلف، از نظر برهمکنش‌های مختلف در سطح استان بالاترین عملکرد مربوط به رقم Hyola401 و آبیاری FC90 با ۴۶۳۱ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۱).

سایر تیمارها بود. در مقابل، کمینه عملکرد مربوط به رقم RGS003 در منطقه شوشتر و در تمامی سطوح آبیاری بود (میانگین ۳۰۳۸ کیلوگرم در هکتار)، به طوری که در این منطقه هیچ تفاوت معنی داری بین تیمارهای آبیاری و ارقام مشاهده نشد (شکل ۱). در اکثر مناطق، افزایش سطح رطوبتی خاک از FC50 به FC90 باعث افزایش معنی دار عملکرد شد؛ به عنوان مثال، در منطقه شوش، عملکرد رقم Hyola401 از ۴۰۵۹ کیلوگرم در



شکل ۱- عملکرد دانه در دوره پایه در مناطق، رژیم‌های آبیاری و ارقام مختلف. باکس‌پلات‌ها با حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است

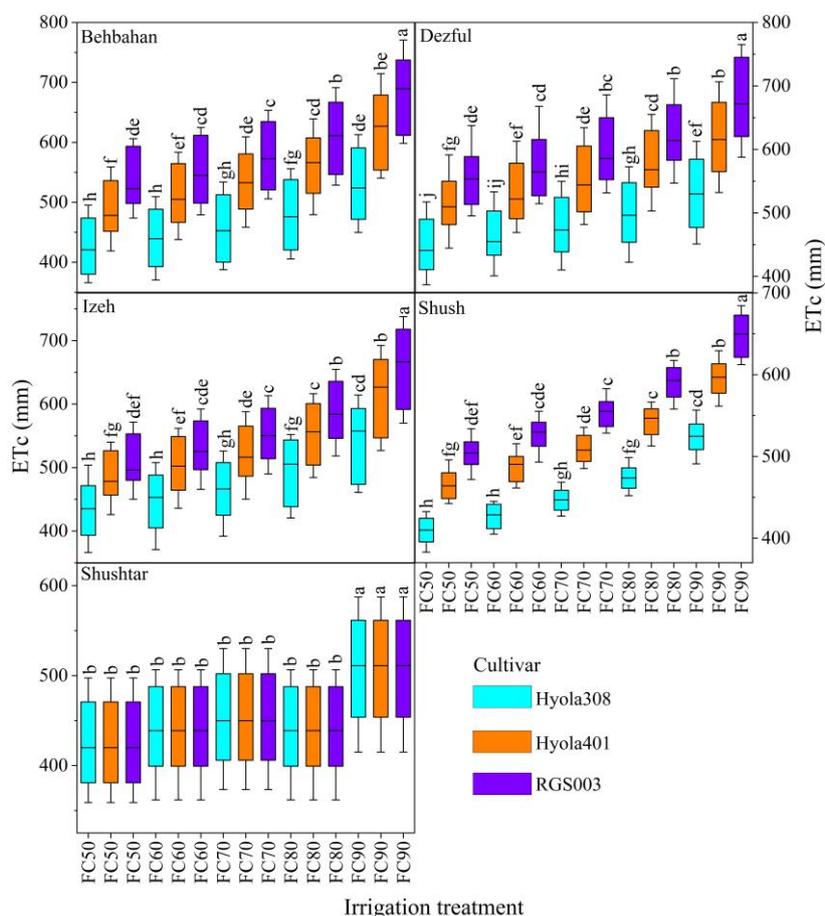
Figure 1. Grain yield during the baseline period across different locations, irrigation treatments, and cultivars. Box plots sharing the same letters indicate no significant difference at the 5% probability level

منطقه و تحت تیمار FC50، رقم Hyola308 کمینه مقدار را با ۴۴۸/۵ میلی‌متر در هکتار نشان داد (شکل ۲). در منطقه بهبهان نیز روند مشابهی مشاهده شد؛ به طوری که مقدار ETC رقم RGS003 از ۴۲۷/۱ میلی‌متر در FC50 به ۶۷۸/۶ میلی‌متر در FC90 افزایش یافت. رقم RGS003 در اکثر مناطق و تیمارها، تبخیر و تعرق بیشتری نسبت به Hyola401 و Hyola308 داشت. در منطقه ایذه، مقدار ETC برای این رقم در FC90 به

تبخیر و تعرق واقعی (ETc) کلزا در طول دوره رشد در دوره پایه در استان خوزستان برابر با ۵۱۲/۶ میلی‌متر در هکتار بود و تحت تأثیر مناطق، ارقام و تیمارهای آبیاری تغییرات زیادی نشان داد. افزایش سطوح آبیاری از FC50 به FC90 منجر به افزایش معنی دار ETC در اغلب مناطق شد. در منطقه دزفول، بیشینه مقدار ETC برای رقم RGS003 تحت تیمار FC90 با مقدار تقریبی ۶۷۸/۸ میلی‌متر در هکتار مشاهده شد، در حالی که در همین

به‌طوری که تفاوت آماری معنی‌داری بین تیمارها مشاهده نشد (شکل ۲).

۶۵۴/۵ میلی‌متر در هکتار رسید، در حالی که Hyola308 تحت FC50 تنها ۴۳۳/۴ میلی‌متر در هکتار مصرف آب داشت. منطقه شوشتر بار دیگر کمیته حساسیت به تیمارهای آبیاری را نشان داد،

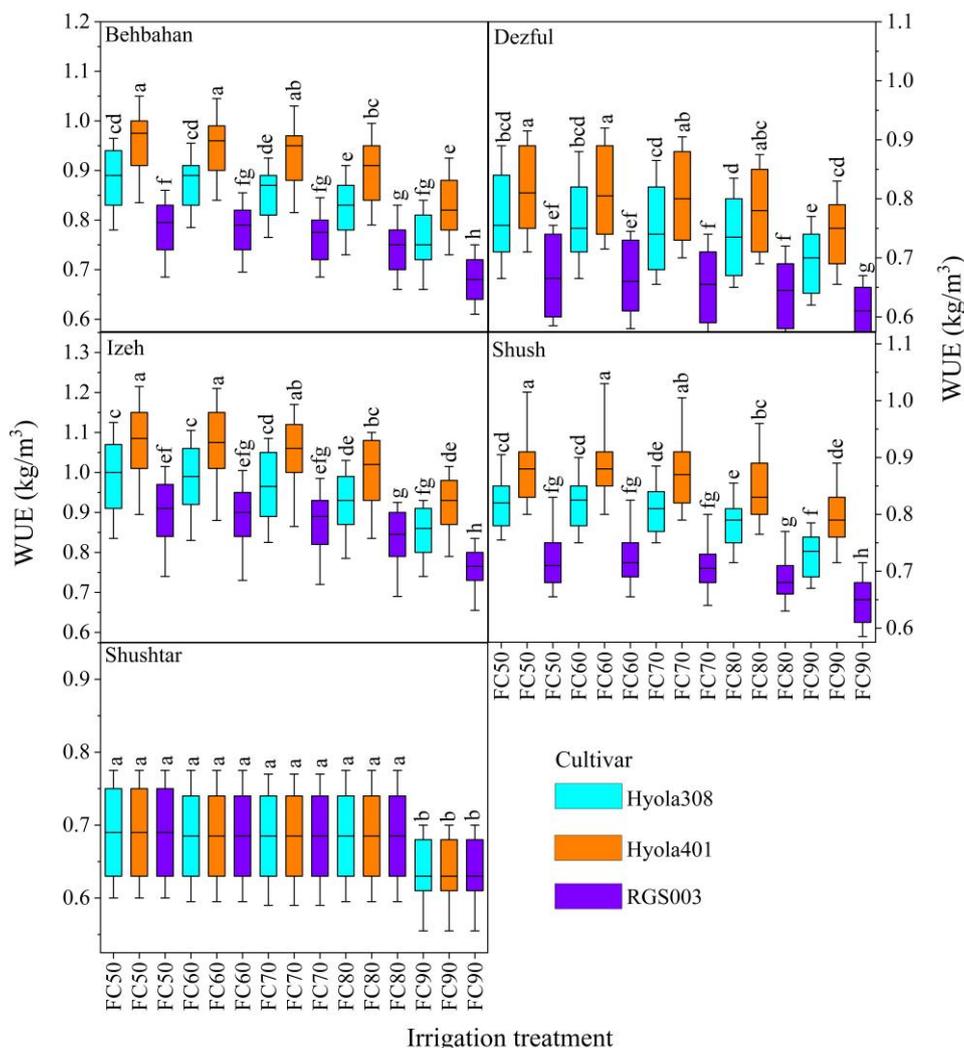


شکل ۲- تبخیر و تعرق واقعی در طول فصل رشد در دوره پایه در مناطق، رژیم‌های آبیاری و ارقام مختلف. باکس پلات‌ها با حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

Figure 2. Actual evapotranspiration (ETc) during the growing season in the baseline period across different locations, irrigation treatments, and cultivars. Box plots sharing the same letters indicate no significant difference at the 5% probability level.

WUE بالاتری نسبت به دو رقم دیگر نشان داد؛ برای مثال در دزفول تحت تیمار FC60، مقدار WUE این رقم به ۰/۸۱ کیلوگرم بر مترمکعب رسید، در حالی که RGS003 در همین شرایط تنها ۰/۶ کیلوگرم بر مترمکعب کارایی داشت. منطقه شوشتر کمیته حساسیت به تغییرات آبیاری را از خود نشان داد، به‌طوری که در تمام تیمارها اختلاف آماری معنی‌داری بین ارقام مشاهده نشد و WUE در بازه نسبتاً ثابتی (۰/۶۳ تا ۰/۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب) باقی ماند (شکل ۳). این موضوع می‌تواند بیانگر توزیع مناسب بارندگی در این منطقه در طول فصل رشد گیاه کلزا باشد که اثر تیمارهای آبیاری خنثی نموده است.

کارایی مصرف آب (WUE) کلزا استان خوزستان برابر ۰/۷۹ کیلوگرم بر متر مکعب بود. در بررسی WUE ارقام مختلف کلزا در سطوح متفاوت آبیاری، مشخص شد که بیشینه مقدار آن مربوط به رقم Hyola401 در منطقه ایزه تحت تیمار آبیاری FC50 با میانگین ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود، که به‌طور معنی‌داری بالاتر از سایر تیمارها قرار گرفت. در مقابل، کمیته مقدار WUE در منطقه دزفول و تحت تیمار FC90 برای رقم RGS003 (۰/۶ کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهده شد (شکل ۳). به‌طور کلی، کاهش سطح آبیاری از FC90 به FC50 منجر به افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب در اکثر مناطق شد، به‌ویژه در مناطق ایزه، شوش و دزفول. رقم Hyola401 در اکثر مناطق و سطوح آبیاری،



شکل ۳- کارایی مصرف آب در دوره پایه در مناطق، رژیم‌های آبیاری و ارقام مختلف. باکس پلات‌ها با حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است

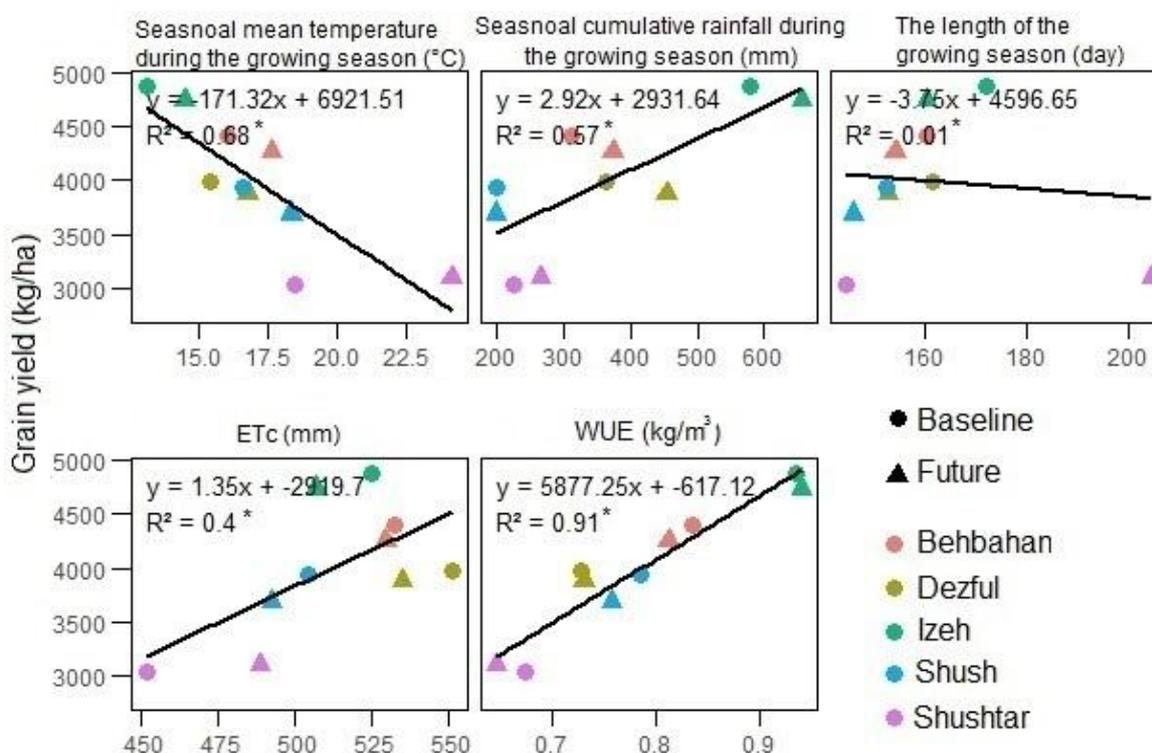
Figure 3. Water use efficiency during the baseline period across different locations, irrigation treatments, and cultivars. Box plots sharing the same letters indicate no significant difference at the 5% probability level

معنی‌داری ایجاد شد (شکل ۱، ۲ و ۳). بنابراین و برای تولید پایدار و بهینه کلزا، در بین برهمکنش‌های مختلف باید توازنی از عملکرد دانه و کارایی مصرف آب را در نظر گرفت. با نگاهی به شکل‌های ۱ و ۲ و بر اساس مقایسات میانگین دانکن می‌توان به این موضوع پی برد که برهمکنش رقم Hyola401 در کنار آبیاری FC60 از لحاظ عملکرد دانه و WUE در اکثر مناطق (بغیر از شوش) دارای کمینه اختلاف معنی‌دار با سایر برهمکنش‌های برتر از لحاظ عملکرد دانه یا WUE است. بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که برای تولید پایدار باید توازنی بین شاخص‌های مختلف از جمله عملکرد و کارایی مصرف آب در نظر گرفته شود و نتایج مطالعه حاضر نیز در راستای این پژوهش‌ها است (Faraji et al., 2009; Faraji et al., 2022). به‌عنوان مثال، مطالعه (Liyanage et al., 2009) نشان داد که استفاده از رقم Hyola401 و آبیاری تکمیلی، با وجود بهبود عملکرد، افزایش بیش از حد ETC می‌تواند

در بررسی نتایج دوره پایه، مشخص شد که انتخاب رقم می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر روی میزان عملکرد و کارایی مصرف آب (WUE) داشته باشد (شکل ۱ و ۳). به‌عنوان مثال در اکثر مناطق مورد بررسی رقم متوسط‌ترس Hyola401 توانست از نظر عملکرد دانه و WUE به‌عنوان رقم بهینه شناسایی شود. در بین نتایج مشاهده شد که این رقم در کنار آبیاری FC90 به‌عنوان برهمکنشی که عملکرد دانه را بیشینه کند شناخته شد. با این وجود این برهمکنش نتوانست کارایی مصرف آب را بیشینه کند. دلیل این موضوع بالا رفتن تبخیر و تعرق واقعی (ETc) در این سطح از آبیاری بود (شکل ۲). در زمینه بیشینه سازی WUE در بسیاری از مناطق مورد بررسی، رقم Hyola401 در کنار آبیاری FC50 توانست کارایی مصرف آب را از طریق ETC کمتر بیشینه کند، با این وجود عملکرد دانه نسبت به برهمکنش رقم Hyola401 و آبیاری FC90 عملکرد کمتری با اختلاف

افزایش زیاد طول فصل رشد به ویژه در مناطق گرم باعث افزایش ETc و همچنین مواجه شدن گیاه با تنش های گرمایی می شود که در نهایت باعث کاهش عملکرد گیاه و WUE می شود. از طرف دیگر باید کاهش زیاد طول فصل رشد باعث کاهش عملکرد می شود و بنابراین استفاده از یک رقم متوسط ترس مانند Hyola401 می تواند توازن از عملکرد و مصرف آب را ایجاد کرد.

باعث کاهش WUE شود و این نیاز به توازن را برجسته می کند؛ همچنین Liyanage et al. (2022) تأکید دارند که ارقام مختلف و مدیریت کود و آب باید به گونه ای تنظیم شوند که عملکرد و WUE هر دو به وضعیت مطلوب نزدیک شوند. این موضوع را می توان در شکل ۴ نیز مشاهده کرد به طوری که در عملکرد دانه با طول فصل رشد بالا دارد ( $R^2=0.1$ ;  $p\text{-value}<0.05$ ). در واقع



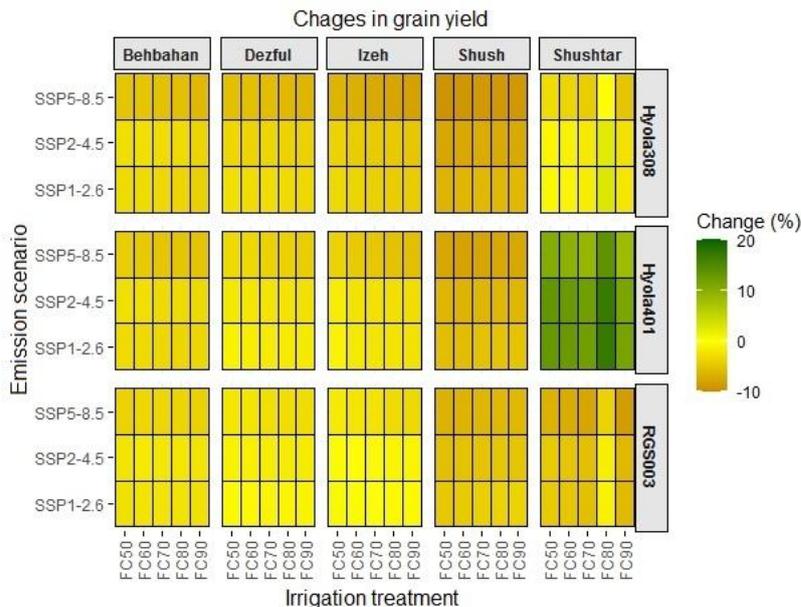
شکل ۴- تحلیل رگرسیون بین عملکرد دانه با میانگین دما در طول فصل رشد، بارندگی تجمعی در طول فصل رشد، طول فصل رشد، تبخیر و تعرق واقعی در طول فصل رشد و کارایی مصرف آب در سراسر مناطق و دوره های آینده و پایه

Figure 4. Regression analysis between grain yield and seasonal mean temperature, seasonal cumulative rainfall, length of the growing season, actual evapotranspiration during the growing season, and water use efficiency (WUE) across locations, and future and baseline periods.

تمام مناطق و سناریوها کاهش عملکرد نسبتاً یکنواختی را نشان داد (بین ۲ تا ۷ درصد)، که بیانگر حساسیت پایین تر آن به تغییرات اقلیمی اما با عملکرد پایین تر است. در مقابل، بهبود عملکرد در مناطق مانند ایزه و شوشتر در برخی ارقام و تیمارهای آبیاری مشاهده شد. به عنوان مثال در شهرستان ایزه، بهبود جزئی عملکرد در رقم RGS003 و آبیاری های FC50 و FC60 (به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۳۴ درصد) تحت سناریوی SSP1-2.6 مشاهده شد و در منطقه شوشتر، بهبود عملکرد مربوط به رقم Hyola401 تحت تمامی سناریوها و تیمارهای آبیاری بود، که افزایش عملکردی از ۲/۵ تا ۱۷ درصد نشان داد (شکل ۵).

### ۳-۲- تغییرات عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب در دوره آینده

بررسی تغییرات عملکرد دانه کلزا در دوره آینده تحت سه سناریوی اقلیمی مختلف (SSP2-6.5، SSP4-5.5 و SSP5-8.5) نشان داد که در اغلب مناطق و برای اکثر ارقام، کاهش عملکرد نسبت به دوره پایه پیش بینی می شود. به طور کلی عملکرد کلزا تحت سناریوها و تیمارهای مختلف عملکرد دانه کلزا در ۲/۶۷ درصد کاهش می یابد. این کاهش تحت سناریوی شدید SSP5-8.5 و در شرایط آبیاری FC90 در منطقه شوش و برای رقم Hyola308 به ۹- درصد می رسد (شکل ۵). رقم RGS003 در

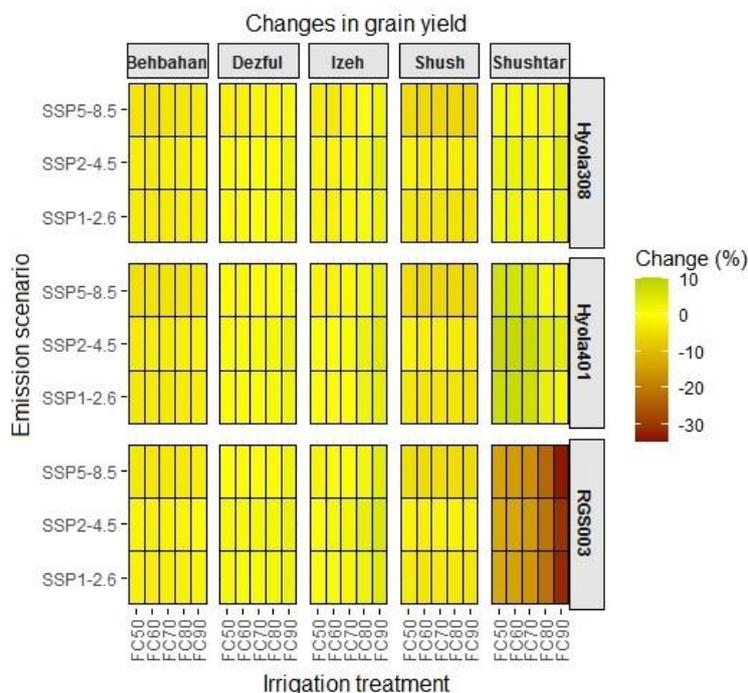


شکل ۵- تغییرات عملکرد در دوره آینده در مناطق، سناریوهای اقلیمی، رژیم‌های آبیاری و ارقام مختلف

Figure 5. Changes in the grain yield during the future period across different locations, climate scenarios, irrigation treatments, and cultivars.

افزایش ETC تا ۳۸ درصد نسبت به دوره پایه مشاهده شد. این در حالی است که ارقام Hyola401 و Hyola308 افزایش ETC کمتری داشته و در برخی از مناطق و تیمارهای آبیاری، میزان افزایش آن‌ها بین ۱۰ تا ۲۰ درصد باقی ماند (شکل ۶).

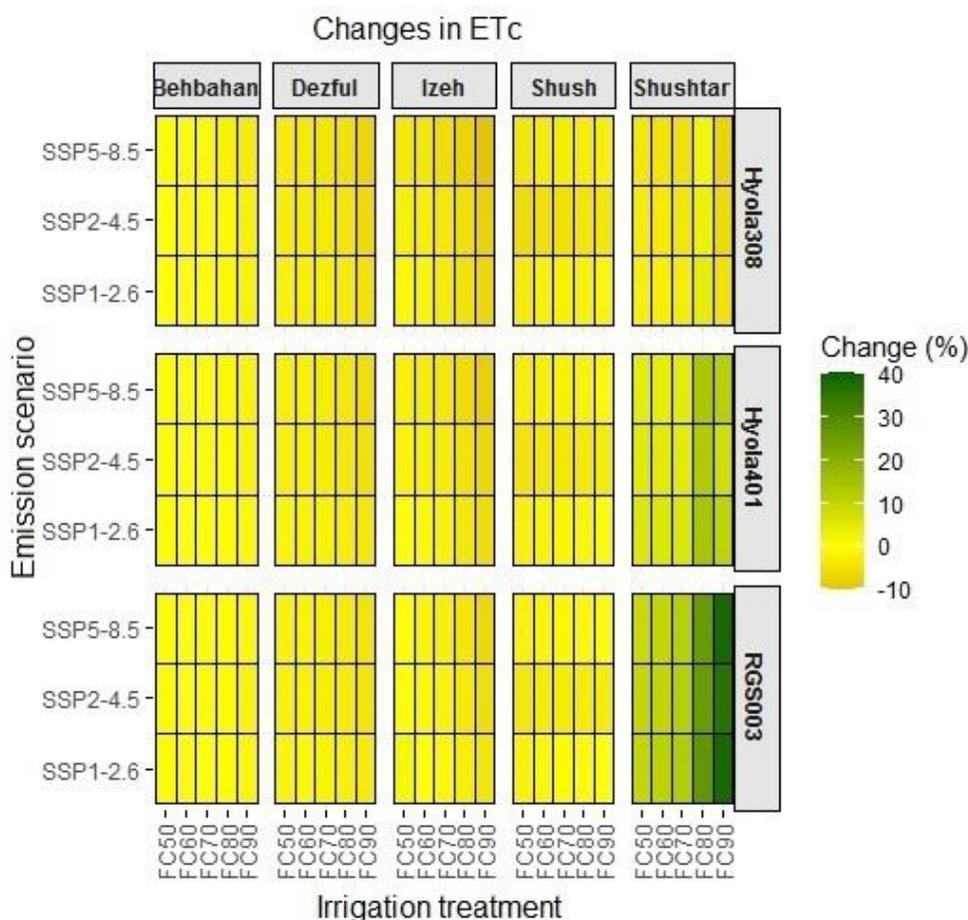
ETC در دوره آینده نشان داد که در اکثر مناطق و برای هر سه رقم کلزا، روندی افزایشی پیش‌بینی می‌شود. این افزایش در سناریوهای شدید اقلیمی (خصوصاً SSP5-8.5) بیش‌تر نمایان است. رقم RGS003 بیشینه افزایش تبخیر و تعرق را در منطقه شوشتر تجربه می‌کند، به طوری که در برخی سطح آبیاری FC90



شکل ۶- تغییرات تبخیر و تعرق واقعی در طول فصل رشد در دوره آینده در مناطق، سناریوهای اقلیمی، رژیم‌های آبیاری و ارقام مختلف  
Figure 6. Changes in the actual evapotranspiration (ETc) during the growing season in the future period across different locations, climate scenarios, irrigation regimes, and cultivars

سناریوی ملایم SSP1-2.6، WUE تقریباً بدون تغییر یا با کاهش ناچیز باقی مانده است. به‌طور کلی، مناطق مرکزی‌تر مانند شوش و شوشتر بیشینه کاهش WUE را تجربه خواهند کرد، در حالی که مناطق با اقلیم ملایم‌تر مانند بهبهان و ایذه کمینه تغییرات را دارند. این نتایج نشان می‌دهد که در دوره آینده، به‌کارگیری ارقام دارای پایداری عملکرد و کارایی مصرف آب بالا مانند Hyola401 و Hyola308 در مناطق نیمه‌گرمسیری، از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود و ارقام حساس مانند RGS003 باید با احتیاط و مدیریت دقیق‌تر در برنامه‌های زراعی قرار گیرند.

نتایج پیش‌بینی‌شده از WUE نشان می‌دهد که تحت شرایط اقلیمی آینده، بیشینه کاهش WUE مربوط به رقم RGS003 بوده و این کاهش به‌ویژه در منطقه شوشتر و تحت سناریوی شدید اقلیمی SSP5-8.5 به بیش از ۳۳- درصد می‌رسد (شکل ۷). این افت شدید در تمامی سطوح آبیاری برای RGS003 مشاهده شده و نشان‌دهنده حساسیت بالای این رقم به افزایش دما و تنش‌های اقلیمی است. در مقابل، دو رقم Hyola401 و Hyola308 در اغلب مناطق و سناریوها، کاهش WUE نسبتاً محدود (کم‌تر از ۱۰ درصد) را تجربه می‌کنند. در برخی تیمارها به‌ویژه در مناطق بهبهان و ایذه تحت



شکل ۷- تغییرات کارایی مصرف آب در دوره آینده در مناطق، سناریوهای اقلیمی، رژیم‌های آبیاری و ارقام مختلف

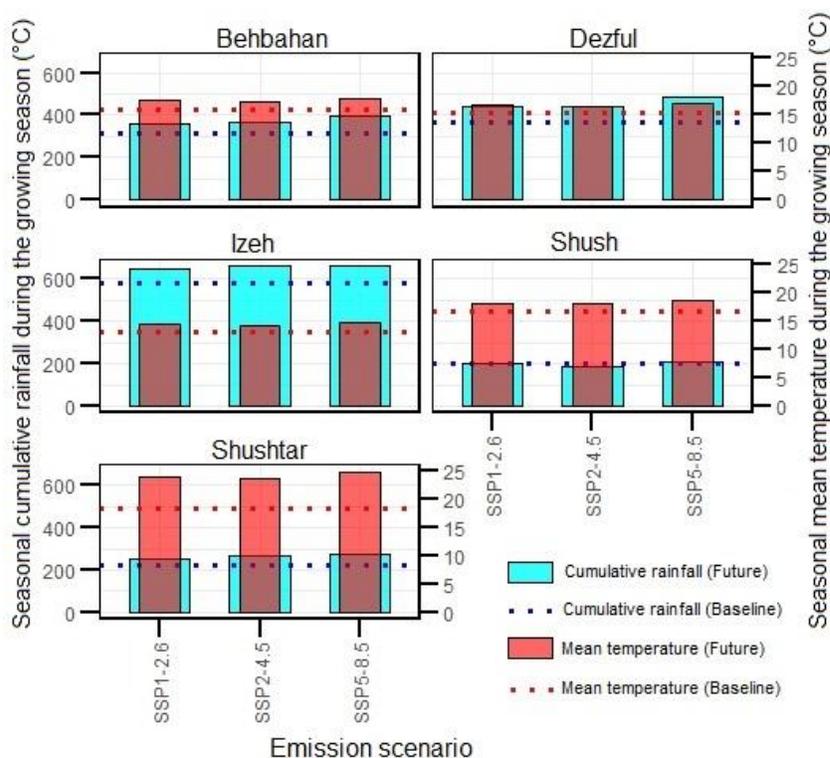
Figure 7. Changes in the water use efficiency (WUE) during the future period across different locations, climate scenarios, irrigation regimes, and cultivars

مرتبط دانست به‌طوری که در سراسر مناطق (بجز از شوشتر)، سناریوها و تیمارها، میانگین دما و طول فصل رشد به‌ترتیب ۱/۵۳ درجه سانتی‌گراد و ۵ درصد در دوره آینده افزایش می‌یابد (شکل ۸). افزایش و ارتباط منفی آن با عملکرد دانه را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد به‌طوری که ارتباط بین میانگین دما و عملکرد دانه

شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در دوره آینده (تحت مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی) به‌طور کلی عملکرد دانه و WUE کلزا در اغلب مناطق کاهش می‌یابد (شکل ۵ و ۷). بیشینه کاهش مربوط به سناریوی شدید SSP5-8.5 در منطقه شوش برای Hyola308 بود. کاهش عملکرد به افزایش دما و کوتاه‌تر شدن طول فصل رشد

Elferjani and هم‌چنین (et al., 2025). Soolanayakanahally, (2018) نشان دادند که ترکیب گرما و خشکی عملکرد کلزا را به شدت کاهش می‌دهد، به طوری که تعداد غلاف‌ها و وزن دانه در مراحل پس از گل‌دهی تحت تأثیر منفی قرار می‌گیرد.

به صورت معنی‌داری منفی بود ( $R^2=0.68$ ;  $p\text{-value}<0.05$ ). در پژوهشی نشان داده شد که در شرایط تغییرات اقلیمی افزایش دما باعث کاهش طول دوره رشد و به موازات آن کاهش عملکرد دانه می‌شود؛ برای مثال در پژوهشی بر روی اثر تنش گرمایی بر عملکرد کلزا تأکید شده است که افزایش دما در مراحل حساس رشد موجب کوتاه‌تر شدن دوره رشد و کاهش عملکرد دانه شده است (Markie



شکل ۸- میانگین دما و بارندگی تجمعی در طول فصل رشد در مناطق، سناریوهای آینده و دوره پایه

Figure 8. Seasonal mean temperature and cumulative rainfall across locations, future scenarios, and the baseline period

می‌تواند اثرات نامطلوب افزایش دما و کاهش بارش را از طریق افزایش فتوسنتز، کاهش تبخیر از روزنه‌ها و بهبود کارایی مصرف آب در گیاه کلزا تا حدی جبران کند (Xing et al., 2019). در دوره آینده در مناطق گرم مورد بررسی، استفاده از تیمارهای پرآب (FC90) توجیه‌پذیر نخواهد بود، زیرا افزایش ETC و کاهش WUE منجر به اتلاف منابع آب می‌شود. در عوض، انتخاب تیمارهای میانی (FC60-FC70) به همراه ارقام مقاوم‌تر مانند Hyola401 و Hyola308 می‌تواند بهترین توازن بین عملکرد و کارایی مصرف آب را برقرار کند. در مناطقی مانند ایزده و شوشتر، استفاده از همین ارقام همراه با مدیریت انعطاف‌پذیر آبیاری می‌تواند اثرات منفی تغییر اقلیم را کاهش دهد. در واقع ارقام Hyola401 و Hyola308 با طول دوره رشد کم‌تر می‌توانند از تنش‌های گرمایی آخر فصل

در مقابل، در برخی مناطق مانند ایزده و شوشتر، بهبود نسبی عملکرد و کارایی مصرف آب در برخی ارقام مشاهده شد (شکل ۵ و ۷). به عنوان نمونه، در شهرستان ایزده، رقم RGS003 تحت تیمارهای آبیاری FC50 و FC60 در سناریوی SSP1-2.6، و در شهرستان شوشتر، رقم Hyola401 در تمامی سناریوهای تیمارهای آبیاری، موجب افزایش عملکرد دانه و بهبود کارایی مصرف آب شدند (شکل ۵). این امر احتمالاً به تأثیرات مثبت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر رشد گیاهان، به‌ویژه گیاهان سه‌کربنه (C3) مانند کلزا، مربوط است که می‌تواند تا حدی اثرات منفی افزایش دما را تعدیل کند (Evans and Qaderi, 2024; Adireddy et al., 2024). نتایج این پژوهش با یافته‌های گزارش‌شده در استرالیا هم‌خوانی دارد، به طوری که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن جوی

در اکسید کربن بر فتوسنتز و کاهش اتلاف آب از روزنه‌ها باشد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که برای پایداری تولید کلزا در شرایط اقلیمی آینده، استفاده از ارقام میان‌رس و نسبتاً مقاوم به گرما نظیر Hyola401 و Hyola308 همراه با مدیریت آبیاری میانی (FC60-FC70) می‌تواند بهترین راهکار برای حفظ توازن بین عملکرد و کارایی مصرف آب باشد. این ارقام با طول دوره رشد کوتاه‌تر، قادرند از تنش‌های گرمایی انتهایی فصل اجتناب کرده و در عین حال تبخیر و تعرق کم‌تری داشته باشند. بنابراین، راهبردهای مدیریتی آینده باید بر پایه انتخاب ارقام سازگار با گرما و خشکی، تنظیم دقیق زمان و میزان آبیاری، و استفاده از هیات‌های تلفیقی مدل سازی و تصمیم‌گیری هوشمند متمرکز شوند تا بتوان عملکرد و بهره‌وری آب را در شرایط تغییر اقلیم بهینه ساخت.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از سازمان هواشناسی کشاورزی کشور برای فراهمی داده‌های اقلیمی مناطق مورد بررسی، تشکر و قدردانی می‌شود.

### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

### دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

### مشارکت نویسندگان

عبدالمجید سهیل نژاد: نگارش نسخه اولیه مقاله، تحلیل‌های آماری؛ سجاد رحیمی مقدم: ویرایش و بازبینی مقاله، تحلیل‌های نرم‌افزاری و مدل‌سازی.

### منابع

حیدری بنی، مهران، یزدان‌پناه، حجت‌الله، محنت‌کش، عبدالمحمد (۱۳۹۷). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژیکی کلزا (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۰ (۲۰): ۳۷۳-۳۸۹. doi: 10.22059/JPHGR.2018.239399.1007101  
دولت پرست، بهروز، حسین پناهی، فرزاد، منصوری، حامد، سی و سه مرده، عادل (۱۴۰۲). اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد دانه کلزا (*Brassica napus* L) در دشت دهگلان استان کردستان با استفاده از برنامه

اجتناب کنند. از سوی دیگر طول دوره کم‌تر این ارقام باعث مصرف کم‌تر آب و تبخیر و تعرق کم‌تر شود. این موضوع را می‌توان در شکل ۴ نیز مشاهده کرد جایی که ارتباط طول دوره رسیدگی رابطه منفی با عملکرد دانه دارد ( $R^2 = -0.01$ ) و این موضوع نشان می‌دهد تحت شرایط محدودیت آب و شرایط تنش گرما ارقام با طول دوره رشد کم‌تر عملکرد بالاتری دارند. مطالعات نشان می‌دهد تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، استفاده از استراتژی آبیاری میانی (مثلاً زمانی که درصد آب قابل استفاده خاک معینی وجود دارد) می‌تواند ضمن حفظ عملکرد، مصرف آب را کاهش دهد و توازن خوبی بین عملکرد و کارایی مصرف آب برقرار کند (Saddique et al., 2025). مطالعات هم‌چنین نشان می‌دهد که با افزایش دما و تبخیر مرجع (ET<sub>o</sub>) و تبخیر-تعرق گیاهی (ET<sub>c</sub>)، نیاز آبی افزایش می‌یابد؛ اما برای بهینه کردن مصرف آب، نیاز است که آبیاری هوشمند انجام شود و ارقامی انتخاب شوند که در دوره رشد کوتاه‌تر بتوانند مراحل حساس را پشت سر بگذارند (Deveci et al., 2025).

### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که عملکرد دانه، تبخیر و تعرق واقعی (ET<sub>c</sub>) و کارایی مصرف آب (WUE) کلزا در استان خوزستان تحت تأثیر هم‌زمان رقم، سطح آبیاری و شرایط اقلیمی قرار دارند. در دوره پایه، رقم Hyola401 در بیش‌تر مناطق با دارا بودن عملکرد بالا و کارایی مصرف آب مطلوب‌تر نسبت به سایر ارقام، به‌عنوان رقم برتر شناسایی شد. در حالی که رقم RGS003 عملکرد و WUE پایین‌تری نشان داد و حساسیت بیش‌تری به تغییرات آبیاری داشت. با افزایش سطح آبیاری از FC50 به FC90، اگرچه عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، اما افزایش چشم‌گیر تبخیر و تعرق باعث کاهش WUE شد. در نتیجه، برهمکنش Hyola401×FC60 به‌عنوان توازنی مناسب میان عملکرد بالا و کارایی مصرف آب مطلوب، به‌ویژه در مناطق مختلف استان، معرفی شد. پیش‌بینی‌ها برای دوره آینده تحت سناریوهای مختلف اقلیمی (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) نشان داد که در اغلب مناطق کاهش معنی‌داری در عملکرد دانه و WUE رخ خواهد داد، به‌ویژه تحت سناریوی شدید SSP5-8.5 که با افزایش دما و کوتاه‌تر شدن طول فصل رشد همراه است. این تغییرات منفی عمدتاً ناشی از افزایش میانگین دمای رشد (حدود ۱/۵ درجه سانتی‌گراد) و کاهش حدود ۵ درصدی طول فصل رشد است. با این حال، در برخی مناطق با اقلیم ملایم‌تر مانند ایزه و شوشتر، بهبود نسبی عملکرد و WUE مشاهده شد که می‌تواند ناشی از اثرات مثبت افزایش غلظت

پایدار، ۱۰ (۲): ۱۳-۲۶. doi: 10.22067/jwsd.v10i2.2301-1203  
 وزارت جهاد کشاورزی ایران. (۱۴۰۲). اداره برنامه‌ریزی و امور اقتصادی، آمار کشاورزی. وزارت جهاد کشاورزی، ایران، ۱۲۶ صفحه.  
<https://dpe.maj.ir/%D8%A2%D9%85%D8%A7%D8%B1%D9%86%D8%A7%D9%85%D9%87-%DA%A9%D8%B4%D8%A7%D9%88%D8%B1%D8%B2%DB%8C-%D8%AC%D9%84%D8%AF-%D8%A7%D9%88%D9%84>

## References

Adireddy, R.G., Anapalli, S.S., Reddy, K.N., Mubvumba, P., & George, J. (2024). Possible impacts of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on growth and development of grain legumes. *Environments*, 11(12), p.273. doi: 10.3390/environments11120273

Amiri, S., Eyni-Nargeseh, H., Rahimi-Moghaddam, S., & Azizi, K. (2021). Water use efficiency of chickpea agro-ecosystems will be boosted by positive effects of CO<sub>2</sub> and using suitable genotype× environment× management under climate change conditions. *Agricultural Water Management*, 252, p.106928. doi: 10.1016/j.agwat.2021.106928

Christy, B., O'Leary, G., Riffkin, P., Acuna, T., Potter, T., & Clough, A. (2013). Long-season canola (*Brassica napus* L.) cultivars offer potential to substantially increase grain yield production in south-eastern Australia compared with current spring cultivars. *Crop & Pasture Science*, 64, 901-913. doi: 10.1071/CP13241

Deihimfard, R., Ahmad-Mahmoudi, E.M., Rahimi-Moghaddam, S., Shakeri, A., & Rezaei, E.E. (2025). Water saving benefits of autumn-sown sugar beet as a climate adaptation strategy for Iran. *Agricultural Water Management*, 315, p.109540. doi: 10.1016/j.agwat.2025.109540

Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Azizi, K., & Haghghat, M., (2022a). Increased heat stress risk for maize in arid-based climates as affected by climate change: threats and solutions. *International Journal of Biometeorology*, 66(7), 1365-1378. doi: 10.1007/s00484-022-02282-6

Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Collins, B., Azizi, K. (2022b). Future climate change could reduce irrigated and rainfed wheat water footprint in arid environments. *Science of the Total Environment*, 807, p.150991. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150991

Deveci, H., Önler, B., & Erdem, T. (2025). Modeling the effects of climate change on the irrigation water requirements of wheat and canola in the TR21 Thrace Region using CROPWAT 8.0. *Frontiers in*

DSSAT. *علوم زراعی ایران*, ۲۵ (۲): ۱۰۱-۱۱۸. doi: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0  
 کریمی فرد، ساناز، مقدسی، رضا، یزدانی، سعید، محمدی نژاد، امیر (۱۳۹۷). تغییرات اقلیمی و عملکرد محصولات کشاورزی در ایران (مطالعه موردی: استان خوزستان). *اقتصاد کشاورزی*، ۱۲ (۲): ۹۱-۱۰۹. doi: 10.22034/iaes.2018.32538  
 میان‌آبادی، آمنه، داوری، کامران. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات مقدار و توزیع بارش و دما در ایران و اثرات آن‌ها بر رخدادهای حدی. *آب و توسعه*

*Sustainable Food Systems*, 9, p.1563048. doi: 10.3389/fsufs.2025.1563048

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. doi: 20.1001.1.23223243.2021.19.1.29.0 [In Persian]

Elferjani, R., & Soolanayakanahally, R. (2018). Canola responses to drought, heat, and combined stress: shared and specific effects on carbon assimilation, seed yield, and oil composition. *Frontiers in Plant Science*, 9, p.1224. doi: 10.3389/fpls.2018.01224

Evans, C.C., & Qaderi, M.M. (2024). Supplemental nitrogen alleviates the negative effects of higher temperature on the vegetative growth of canola regardless of carbon dioxide concentration. *Plant Stress*, 13, p.100521. doi: 10.1016/j.stress.2024.100521

Fao, f.a.o.s.t.a.t., 2022. Food and agriculture organization of the United Nations. Rome, URL: <http://faostat.fao.org>, 403.

Faraji, A., Latifi, N., Soltani, A., & Rad, A.H.S. (2009). Seed yield and water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.) as affected by high temperature stress and supplemental irrigation. *Agricultural Water Management*, 96(1), 132-140. doi: 10.1016/j.agwat.2008.07.014

Heidarybeni, M., Yazdanpanh. H., & Mehnatkesh, A. (2018). Impacts of climate change on canola yields and phenology (Case Study: Chahrmahal Va Bakhtiari, Iran). *Physical Geography Research Quarterly*, 50(2), 373-389. doi: 10.22059/JPHGR.2018.239399.1007101 [In Persian]

Hoffmann, M.P., Jacobs, A., & Whitbread, A.M. (2015). Crop modelling based analysis of site-specific production limitations of winter oilseed rape in northern Germany. *Field Crops Research*, 178, 49-62. doi: 10.1016/j.fcr.2015.03.018

IPCC, (2018.) Global warming of 1.5°C An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global

- greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [https://archive.ipcc.ch/report/sr15/pdf/sr15\\_citation.pdf](https://archive.ipcc.ch/report/sr15/pdf/sr15_citation.pdf)
- IPCC, (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., et al. (Eds.)]. Cambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SummaryVolume.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume.pdf)
- IPCC, (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_FullVolume.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf)
- Karimifard, S., Moghaddasi, R., Yazdani, S., & Mohammadi Nezhad, A. (2018). Survey the Fluctuation of Climate Variables on Agricultural output in Iran (Case Study: Khuzestan Province). *Agricultural Economics*, 12(2), 91-109. doi: 10.22034/iaes.2018.32538 [In Persian]
- Karki, R., Talchabhadel, R., Aalto, J., & Baidya, S.K. (2016). New climatic classification of Nepal. *Theoretical and Applied Climatology*, 125 (3-4), 799–808. doi: 10.1007/s00704-015-1549-0
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N., Meinke, H., Hochman, Z., & McLean, G. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18 (3), 267–288. doi: 10.1016/S1161-0301(02)00108-9
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Koppen- Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 259–263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- Liyanage, D.W., Bandara, M.S., & Konschuh, M.N. (2022). Main factors affecting nutrient and water use efficiencies in spring canola in North America: a review of literature and analysis. *Canadian Journal of Plant Science*, 102(4), 799-811. doi: 10.1139/cjps-2021-0210
- MAJ, (2023). In: Department of Planning and Economically (Ed.), Agricultural Statistics. The Ministry of Jihad-e-Agriculture, Iran, pp. 126 [In Persian]
- Markie, E., Khoddami, A., Liu, S.Y., Chen, S., & Tan, D.K. (2025). The Impact of Heat Stress on Canola (*Brassica napus* L.) Yield, Oil, and Fatty Acid Profile. *Agronomy*, 15(7), 1511. doi: 10.3390/agronomy15071511
- Mianabadi, A., & Davary, K. (2023). Investigation of Changes in the Amount and Distribution of Precipitation and Temperature in Iran and Their Effects on Extreme Events. *Journal of Water and Sustainable Development*, 10(2), 13-26. doi: 10.22067/jwsd.v10i2.2301-1203 [In Persian]
- Nouri, M., Homaeae, M., Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2016). Towards modeling soil texture-specific sensitivity of wheat yield and water balance to climatic changes. *Agricultural Water Management*, 177, 248–263. doi: 10.1016/j.agwat.2016.07.025
- R Core Team, (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>
- Rahimi-Moghaddam, S., Eyni-Nargeseh, H., Ahmadi, S.A.K., & Azizi, K. 2021. Towards withholding irrigation regimes and drought-resistant genotypes as strategies to increase canola production in drought-prone environments: A modeling approach. *Agricultural Water Management*, 243, p.106487. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106487
- Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2019). Optimal genotype× environment× management as a strategy to increase grain maize productivity and water use efficiency in water-limited environments and rising temperature. *Ecological Indicators*, 107, p.105570. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105570
- Robertson, M.J., & Lilley, J.M. (2016). Simulation of growth, development and yield of canola (*Brassica napus*) in APSIM. *Crop and Pasture Science*, 67, 332–344. doi: 10.1071/CP15267
- Robertson, M.J., Holland, J.F., Kirkegaard, J.A., & Smith, C.J. (1999). Simulating growth and development of canola in Australia. In: 10th International Rapeseed Congress. Canberra, Australia (Accessed date 04.06.09). <http://www.regional.org.au/au/>
- Saddique, Q., Liu, D.L., Ajaz, A., Wang, B., Gu, X., Adnan, M., Feng, P., Wang, Y., Zou, Y., & Cai, H. (2025). Identifying the optimum irrigation strategies to maximize canola yield and profitability under climate change in Guanzhong Plain, China. *Irrigation Science*, 1-16. doi: 10.1007/s00271-025-01031-y
- Saxton, K., Rawls, W.J., Romberger, J., & Papendick, R. (1986). Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1031–1036. doi: 10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x

- 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. doi: 10.1016/j.dib.2024.110709
- Wang, E., He, D., Wang, J., Lilley, J.M., Christy, B., Hoffmann, M.P., O'Leary, G., Hatfield, J.L., Ledda, L., Deligios, P.A., & Grant, B. (2022). How reliable are current crop models for simulating growth and seed yield of canola across global sites and under future climate change?. *Climatic Change*, 172(1), p.20. doi: 10.1007/s10584-022-03375-2
- Wang, S., Wang, E., Wang, F., & Tan, L. (2012). Phenological development and grain yield of canola as affected by sowing date and climate variation in the Yangtze River basin of China. *Crop & Pasture Science*, 63, 478– 488. doi: 10.1071/CP11332
- Watson, J., Zheng, B., Chapman, S., & Chenu, K. (2017). Projected impact of future climate on water-stress patterns across the Australian wheatbelt. *Journal of Experimental Botany*, 68(21), 5907–5921. doi: 10.1093/jxb/erx368
- Xing, H., Brill, R., Li, G., Li Liu, D., Blake, A., & Slinger, D. (2019). Future climate change increases canola productivity and water use efficiency in the rainfed cropping systems of Southern Australia. In 19th Australian Agronomy Conference 2019 (pp. 1-4). Australian Society of Agronomy. [https://www.agronomyaustraliaproceedings.org/images/sampled/2019/2019ASA\\_Xing\\_Hongtao\\_126.pdf](https://www.agronomyaustraliaproceedings.org/images/sampled/2019/2019ASA_Xing_Hongtao_126.pdf)
- Xing, H., Li Liu, D., Li, G., Wang, B., Anwar, M.R., Crean, J., Lines-Kelly, R., & Yu, Q. (2017). Incorporating grain legumes in cereal-based cropping systems to improve profitability in southern New South Wales, Australia. *Agricultural Systems*, 154, 112-123. doi: 10.1016/j.agsy.2017.03.010