Simulating Grain Yield and Water Use Efficiency of Autumn Rapeseed Using APSIM-canola Model in Lorestan Province

M. Sadeghi, S. Rahimi-Moghaddam*, E. Mohammadi-Ahmadmahmoudi, and Kh. Azizi

MSc Student, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Khorramabad, Iran. **mojganmagham01@gmail.com**

Assistant Prof., Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Khorramabad, Iran. **rahimi.s@lu.ac.ir**

PhD Graduate, Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. **esmaeil.mohammadi68@yahoo.com**

Prof., Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Khorramabad, Iran. **azizi.kh@lu.ac.ir**

Received: May 2024 and Accepted: December 2024

Abstract

In recent years, enhancing crop grain yield and water use efficiency have become among the important objectives of researchers. Therefore, this study was conducted to identify the optimal combination of cultivar and irrigation in autumn rapeseed. To do this, the current research was carried out using APSIM simulation model on three autumn rapeseed cultivars (Hyola308, Hyola401, and RGS003) and four irrigation treatments (full irrigation, withholding irrigation at flowering stage, withholding irrigation at pod initiation stage, and withholding irrigation at grain filling period) in four counties of Lorestan Province. The results showed that the highest grain yield in Khorramabad, Pol-e Dokhtar, and Kuhdasht was obtained with Hyola401 cultivar and full irrigation (5361, 5378, and 4488 $kg.ha^{-1}$, respectively), while in Aleshtar, cultivation of Hyola308 cultivar and withholding irrigation in one of the treatments led to the highest yield (2634 $kg.ha^{-1}$). The results also showed that Hyola401 cultivar and withholding irrigation at flowering stage in Pol-e Dokhtar and Khorramabad and full irrigation in Kuhdasht (0.457, 0.398, and 0.307 $kg.m^{-3}$, respectively) led to the highest crop water use efficiency in these counties. In Aleshtar, Hyola308 cultivar and withholding irrigation at flowering stage resulted in the highest crop water use efficiency (0.239 $kg.m^{-3}$). Overall, the results showed that for these rapeseed agro-ecosystems, the air temperature in each county played a key role in choosing the optimal cultivar (i.e. cultivars with higher percentage of fertile pods under water stress conditions) and proper irrigation management.

Keywords: Autumn rapeseed cultivation, Khorramabad, Optimum irrigation method, Rapeseed cultivars, withholding irrigation

*- Corresponding Author's email: **rahimi.s@lu.ac.ir**

https://doi.org/10.22092/jwra.2024.365786.1041

مقاله پژوهشی نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۳/ ۱۴۰۳.ص۲۵۷-۲۷۸
https://doi.org/10.22092/jwra.2024.365786.1041

شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب کلزای پاییزه با استفاده از مدل APSIM-canola در استان لرستان

مژگان صادقی، سجاد رحیمی مقدم*، اسماعیل محمدی احمدمحمودی و خسرو عزیزی

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
mojganmagham01@gmail.com
استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
rahimi.s@lu.ac.ir
دانش‌آموخته دکترای گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، ایران.
esmaeil.mohammadi68@yahoo.com
استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
azizi.kh@lu.ac.ir

دریافت: اردیبهشت ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

چکیده

در سال‌های اخیر، بهبود عملکرد و افزایش کارایی مصرف آب محصولات زراعی به یکی از اهداف مهم پژوهش‌گران تبدیل شده است. از این‌رو، هدف این پژوهش شناسایی رقم مناسب و روش آبیاری بهینه در گیاه کلزای پاییزه بود. به این منظور، پژوهشی با استفاده از مدل شبیه‌سازی APSIM بر روی سه رقم کلزای پاییزه Hyola308، Hyola401 و RGS003 و چهار تیمار آبیاری (آبیاری کامل، قطع آبیاری در گلدهی، قطع آبیاری در غلاف‌بندی و قطع آبیاری در پر شدن دانه) در چهار شهرستان استان لرستان انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در خرم‌آباد، پلدختر و کوهدشت با کشت رقم Hyola401 و آبیاری کامل (به‌ترتیب ۵۳۶۱، ۵۳۷۸ و ۴۴۸۸ کیلوگرم در هکتار) و در شهرستان الشتر با کشت رقم Hyola308 و استفاده از یکی از تیمارهای قطع آبیاری (۲۶۳۴ کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. نتایج همچنین نشان داد که کشت رقم Hyola401 و قطع آبیاری در مرحله گلدهی در پلدختر و خرم‌آباد و آبیاری کامل در کوهدشت به‌ترتیب با ۰/۴۵۷، ۰/۳۹۸ و ۰/۳۰۷ کیلوگرم بر مترمکعب منجر به بیشترین کارایی مصرف آب در این مناطق شد. در شهرستان الشتر نیز کشت رقم Hyola308 و قطع آبیاری در مرحله گلدهی بیشترین کارایی مصرف آب (۰/۲۳۹ کیلوگرم بر مترمکعب) را موجب گردید. یافته‌های این پژوهش نشان داد که در بوم‌نظام‌های کشت کلزا در این مناطق، گزینش رقم مناسب (ارقام با درصد بیشتر غلاف بارور در شرایط تنش رطوبتی) و اتخاذ روش صحیح مدیریت آبیاری، به شکل قابل توجهی به شرایط دمایی آن منطقه بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: ارقام کلزا، خرم‌آباد، روش آبیاری بهینه، قطع آبیاری، کشت پاییزه کلزا

*- آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **rahimi.s@lu.ac.ir**

مقدمه

دانه‌های روغنی با توجه به جایگاه ویژه‌ای که در تأمین روغن خوراکی سبد غذایی مردم ایران دارند، نقش مهمی را در تأمین امنیت غذایی کشور ایفا می‌کنند. روند بلندمدت مصرف روغن‌های گیاهی در ایران نشان می‌دهد که وابستگی به این گروه از مواد غذایی از سال ۱۳۲۰ با کاهش اقبال به مصرف روغن‌های حیوانی آغاز شد و روندی صعودی را تا به امروز داشته است (بی‌نام، ۱۳۸۴). علاوه بر این، افزایش جمعیت کشور در سالیان اخیر تقاضا برای این گروه از مواد غذایی را در کنار سایر گروه‌های غذایی بیشتر کرده است (فرامرزی و همکاران، ۱۴۰۲). آمارها نشان می‌دهد که در حال حاضر تنها ۱۰ درصد از روغن خوراکی مورد نیاز کشور از منابع داخلی تأمین‌شده و ۹۰ درصد آن با واردات روغن خام تأمین می‌گردد (گلچین و همکاران، ۱۴۰۱)؛ بنابراین توجه به افزایش میزان تولید دانه‌های روغنی در کشور یکی از راه‌حل‌های مهم در کاهش وابستگی به واردات و کمک به تأمین نیاز داخلی است. کلزا پس از سویا دومین گیاه مهم کشور برای تولید روغن خوراکی است (اسکندری و کاظمی، ۱۴۰۳). بر اساس آخرین آمار منتشرشده در سال ۱۴۰۱، گیاه کلزا با داشتن بیش از ۱۵۳ هزار هکتار سطح زیر کشت (آبی و دیم)، بیشترین سطح زیر کشت را در بین محصولات صنعتی کشور به خود اختصاص داده است (بی‌نام، ۱۴۰۲). این گیاه زراعی حدود ۱۵ درصد از روغن خوراکی مورد نیاز دنیا را تأمین می‌کند (عبید و همکاران، ۲۰۲۲). کلزا به‌دلیل داشتن درصد بالای روغن مرغوب (حاوی امگا ۳ و ویتامین E) به‌عنوان یک محصول امیدوارکننده برای تأمین روغن خوراکی بشر شناخته‌شده است (عبید و همکاران، ۲۰۲۲). کلزا به‌دلیل راندمان بالای مصرف آب و تحمل نسبی به خشکی می‌تواند به‌عنوان یک گیاه جایگزین در مناطق نیمه‌خشک کشت گردد (مُرسی و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، در مقایسه با سایر دانه‌های روغنی تنها کلزا امکان کشت پاییزه و بهره‌برداری بهتر از نزولات جوی را دارد (اسکندری و عالی زاده امرایی، ۱۳۹۵).

برآوردهای صورت گرفته حاکی از آن است که تنش آبی مهم‌ترین عامل کاهش عملکرد محصولات کشاورزی است (محمدی احمدمحمودی و همکاران، ۱۳۹۸) به شکلی که تنش آبی می‌تواند تا ۷۰ درصد موجب افت عملکرد محصولات کشاورزی گردد (وو و همکاران، ۲۰۱۷؛ دوگان و همکاران، ۲۰۱۱). بررسی‌ها نشان داده که بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب‌های شیرین کره زمین است (دیروی و همکاران، ۲۰۲۱). در کشور ایران نیز بخش اعظمی از آب‌های شیرین موجود در بخش کشاورزی به مصرف می‌رسد (حسین‌زاد و همکاران، ۱۳۹۲). این موضوع ضرورت توجه به روش‌های مختلف زراعی و مدیریتی برای صرفه‌جویی در مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی و بهبود راندمان مصرف آب را بیش از پیش هویدا می‌سازد (حیدری، ۱۳۹۷؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۶).

بنابراین یکی از اولویت‌های بخش کشاورزی، شناخت و توسعه روش‌های مختلف زراعی و مدیریتی برای افزایش کارایی مصرف آب است (مجنونی هریس و همکاران، ۲۰۱۴). امروزه می‌توان به‌جای اعمال آبیاری کامل و دست‌یابی به حداکثر عملکرد از واحد سطح، با به‌کارگیری مفهوم کم‌آبیاری، کارایی مصرف آب را در تولید محصولات زراعی بهینه‌سازی نمود (استانبوللو اوغلو و همکاران، ۲۰۱۰؛ گیرتس و راس، ۲۰۰۹). برنامه‌ریزی صحیح برای کم‌آبیاری علاوه بر تأمین نیاز آبی گیاه زراعی در طول مراحل بحرانی می‌تواند منجر به کاهش مصرف آب‌شده و به کاهش اثرات منفی محدودیت آب بر روی عملکرد گیاه زراعی کمک کند (کامکار و همکاران، ۲۰۱۱). مطالعات متعددی در راستای شناسایی راهکارهای ارتقاء کارایی مصرف آب در گیاهان مختلف انجام شده است. نتایج بسیاری از مطالعات نشان داده که مصرف آب کمتر در برخی گیاهان زراعی می‌تواند منجر به بهبود کارایی مصرف آب گردد (گریس و همکاران، ۲۰۲۱؛ هائو و همکاران، ۲۰۱۰). در مطالعات متعددی نیز گزارش‌شده است که می‌توان از قطع آبیاری در مرحله خاصی از رشد

گیاه به‌عنوان یک راه‌حل برای ارتقاء کارایی مصرف آب بهره برد (اورتگا-فاریاس و همکاران، ۲۰۲۰؛ غریب و همکاران، ۲۰۱۶؛ وو و همکاران، ۲۰۲۳؛ باختری و همکاران، ۱۳۹۵).

محققان دریافته‌اند که استفاده از رقم مناسب نیز یکی از روش‌های مدیریتی مؤثر در استفاده بهتر از منابع محیطی مانند آب است (رحیمی‌مقدم و همکاران، ۱۴۰۲). در واقع، تحمل خشکی در گیاه زراعی یک صفت کمّی است که توسط چندین ژن تنظیم می‌شود و شدت این صفت در رقم‌های مختلف متغیر است (گودوی آندروسیولی و همکاران، ۲۰۲۰). به نظر می‌رسد که تلفیق سایر راهکارهای مدیریتی مانند کم‌آبیاری با انتخاب رقم مناسب می‌تواند در جهت افزایش کارایی مصرف آب در بوم‌نظام‌های کشاورزی مؤثر باشد (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۸؛ کیلوانگو-چیمارو و همکاران، ۲۰۲۲). در مطالعات متعددی که در شادگان (اسکندری و کاظمی، ۱۴۰۲) و کرج (خدابین و همکاران، ۱۳۹۹؛ عینی نرگسه و همکاران، ۱۳۹۷) انجام شد، استفاده از ارقام مقاوم به خشکی و قطع آبیاری در مراحل پایانی رشد گیاه زراعی کلزا مورد بررسی قرار گرفت و در تمام این مطالعات به تأثیر مثبت تیمارهای یاد شده بر روی کارایی مصرف آب بوم نظام‌های کشت کلزا با وجود برداشت عملکرد مطلوب اشاره شده است. در حال حاضر روش‌های مختلفی برای ارزیابی تأثیر مدیریت-های مختلف بر گیاهان زراعی وجود دارد که از این بین می‌توان به آزمایش‌های مزرعه‌ای و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گیاه زراعی اشاره نمود. با توجه به مشکلات و محدودیت-های مربوط به انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای مانند هزینه بالا، زمان‌بر بودن و...، مدل‌های شبیه‌سازی زراعی به ابزاری قدرتمند در این زمینه تبدیل شده‌اند (ون دام و همکاران، ۲۰۰۸). این مدل-ها از مجموعه معادلات ریاضی تشکیل شده‌اند که فرآیندهای بیولوژیکی گیاه زراعی را در تعامل با محیط فیزیکی و شیمیایی شبیه‌سازی می‌کنند. از این مدل‌ها برای برآورد عملکرد محصول در سطوح مختلف، بهینه‌سازی مدیریت محصول و ارزیابی کارایی مصرف نهاده-ها در مقیاس مزرعه‌ای استفاده می-گردد (محمدی احمد محمودی و همکاران، ۲۰۲۰).

در سالیان اخیر مدل‌های متعددی برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی ارائه شده است که در این بین مدل شبیه‌سازی APSIM به‌عنوان یک چارچوب شبیه‌سازی سامانه‌های کشاورزی است که پتانسیل بالایی برای شبیه-سازی فرآیندهای بیوفیزیکی را در انواع سامانه‌های کشاورزی دارد (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱؛ کیتینگ و همکاران، ۲۰۰۳). در خصوص استفاده از مدل شبیه‌سازی APSIM برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا پژوهش‌های معدودی در مناطق مختلف دنیا از جمله ایران (حیدری بنی و همکاران، ۱۳۹۷)، استرالیا (زلکه و همکاران، ۲۰۱۴)، ایالات‌متحده (جورج و کافکا، ۲۰۱۷) و چین (شایکویچ و بولاک، ۲۰۲۰) انجام شده است. رحیمی مقدم و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی از مدل شبیه‌سازی APSIM-Canolaبرای شبیه‌سازی تولید و کارایی مصرف آب ارقام مختلف کلزای بهاره در استان‌های خوزستان و لرستان استفاده نمودند. ایشان گزارش کردند که استفاده از ارقام متوسط رس مانند رقم Hyola401 در مناطق معتدل و گرم خوزستان و لرستان می‌تواند با بهبود مقدار تولید به ازای یک واحد آب مصرف‌شده در مزرعه، افزایش کارایی مصرف آب و پایداری سامانه‌های تولید کلزا را در پی داشته باشد. ونگ و همکاران (۲۰۱۲) برای برآورد عملکرد و رشد کلزا در شرق چین از مدل شبیه‌سازی APSIM استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل APSIM قابلیت شبیه‌سازی مراحل نموی کلزا در تاریخ کاشت‌های مختلف را دارد و ۷۵ درصد از تغییرات عملکرد و زیست‌توده ناشی از کاشت دیرهنگام توسط این مدل قابل شناسایی و تشریح بود. نتایج این مدل حاکی از کاهش عملکرد کلزا به‌صورت خطی با تأخیر در کاشت بود که این کاهش عمدتاً ناشی از کوتاه شدن مراحل رشد رویشی کلزا بود. در پژوهشی دیگر توسط رابرتسون و لیلی (۲۰۱۶)، توانایی مدل APSIM برای شبیه‌سازی رشد و تولید کلزا در کشورهای استرالیا، چین و آلمان بررسی شد و گزارش

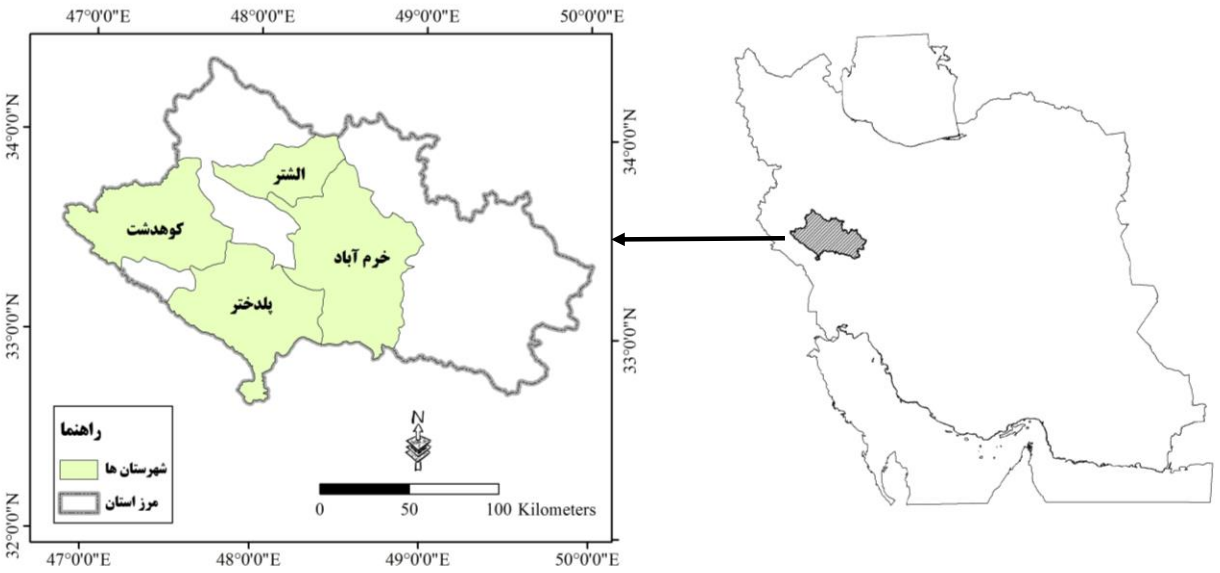
شد که مقدار خطای برآورد (RMSE) برای تخمین تعداد روز تا گلدهی کلزا حدود پنج روز و برای تخمین عملکرد دانه برابر با ۰/۴ تن در هکتار بود.

همان‌طور که توضیح داده شد، در زمینه‌های مختلفی از مدل شبیه‌سازی APSIM در جهت بهینه‌سازی مدیریت محصول و ارتقاء بهره‌وری تولید کلزا استفاده شده است؛ بنابراین با توجه به چالش‌های موجود در تأمین روغن خوراکی مورد نیاز کشور و محدودیت منابع آبی، در این مطالعه سعی شد از این مدل شبیه‌سازی –به‌عنوان یک ابزار کاربردی، به‌روز و کم‌هزینه– جهت ارزیابی کارکرد ارقام مختلف کلزا و همچنین تیمارهای مختلف قطع آبیاری در مناطق مختلف استان لرستان به‌صورت بلندمدت استفاده شود و راهکارهای مناسب جهت ارتقاء تولید و افزایش کارایی مصرف آب در بوم نظام‌های کشت کلزای پاییزه استان لرستان شناسایی گردد.

روش بررسی

منطقه مورد بررسی و شرایط اقلیمی

مطالعه پیش رو در قالب آزمایش شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های بلندمدت اقلیمی و با هدف بررسی قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد بر روی کارایی مصرف آب ارقام مختلف کلزای پاییزه در چهار شهرستان خرم‌آباد، کوهدشت، پلدختر و الشتر استان لرستان انجام شد. استان لرستان با مساحتی حدود ۲۸۱۵۷ کیلومترمربع ۱/۷ درصد از سطح زیر کشور را به خود اختصاص داده و بین طول‌های جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی در جنوب غربی ایران قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان‌های مورد مطالعه در استان لرستان و ایران

این استان به‌واسطه قرارگیری در بخش کوهستانی رشته کوه زاگرس و تأثیر از توده هوای مدیترانه‌ای، از بارندگی مطلوبی برخوردار است و بخش عمده‌ای از آن بر اساس روش طبقه‌بندی اقلیمی کوپن دارای اقلیم معتدل با تابستان‌های خشک و گرم است (رضیئی و میری، ۱۴۰۱). شرایط اقلیمی مناسب موجب شده است که این استان به‌ترتیب ۲/۲۶ و ۶/۳۵ درصد از سطح زیر کشت محصولات زراعی آبی و دیم کشور را به خود اختصاص دهد (بی‌نام، ۱۴۰۲). معیار انتخاب شهرستان‌های مورد مطالعه در این پژوهش، شرایط اقلیمی (به‌ویژه دمای هوا) مناطق مورد بررسی بود، به شکلی که سعی گردید طیف متنوعی از انواع شرایط دمایی استان در بین مناطق مورد بررسی وجود داشته باشد (جدول ۱).

جدول ۱- ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی مناطق مورد مطالعه

(برگرفته از داده‌های اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور)

شهرستان	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	میانگین دمای سالانه (درجه سانتی‌گراد)	مجموع بارندگی سالیانه (میلی‌متر)
خرم‌آباد	48.3	33.6	1147	16.5	486.2
الشتر	48.26	33.86	1638	13.5	450.0
پلدختر	47.72	33.14	658	23.0	378.4
کوهدشت	47.4	33.5	1195	16.0	369.8

مدل شبیه‌سازی APSIM

این مدل شبیه‌سازی در بردارنده تعداد زیادی ماژول بوده که فرآیندهای مربوط به گیاه (طیف وسیعی از گیاهان زراعی، مرتعی و درختان)، خاک (تعادل آب خاک، تحولات نیتروژن و فسفر خاک، اسیدیته و فرسایش خاک)، اقلیم و مدیریت (دامنه وسیعی از تصمیمات مدیریتی) را توصیف می‌کنند (گایدون، ۲۰۱۴) و با به‌کارگیری این مؤلفه‌ها رشد و نمو گیاه زراعی را در مقیاس روزانه شبیه-سازی می‌کند (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۱۹).

برای اولین بار ماژول APSIM-canola توسط رابرتسون و همکاران (۱۹۹۹) برای شبیه‌سازی رشد و نمو کلزا در استرالیا ارائه شد و پس از آن در سال‌های اخیر برای مطالعه بوم نظام‌های کشت کلزای پاییزه مورد توجه محققان متعددی در نقاط مختلف دنیا مانند ایران (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱)، ایالات‌متحده (جورج و همکاران، ۲۰۱۸)، آلمان (هافمن و همکاران، ۲۰۱۵) و چین (هی و همکاران، ۲۰۱۷) قرار گرفت. این مدل پیش‌تر در مطالعه رحیمی مقدم و همکاران (۲۰۲۱) برای کلزا و شرایط ایران واسنجی و اعتبارسنجی شده بود که پارامترهای واسنجی مدل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی برای ارقام مختلف کلزا در مدل زراعی APSIM-Canola (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱)

ضریب	رقم			واحد
	RGS003	Hyola401	Hyola308	
درجه روز رشد تجمعی مورد نیاز از مرحله سبز شدن تا پایان مرحله جوانی	350	300	235	درجه روز رشد
بیشینه درجه روز رشد مورد نیاز برای تکمیل مرحله جوانی بدون بهاره‌سازی	500	460	395	درجه روز رشد
درجه روز رشد تجمعی مورد نیاز از مرحله گلدهی تا مرحله شروع پر شدن دانه	200	200	200	درجه روز رشد
بیشینه تعداد روز برای تکمیل فرآیند بهاره‌سازی	25	25	25	روز

واسنجی مدل با استفاده از اطلاعات یک آزمایش مزرعه‌ای دوساله در دو سال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ در مرکز تحقیقات کشاورزی صفی‌آباد دزفول انجام شد. این آزمایش به‌صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و دو سال انجام شد که تیمارهای آن شامل سه تاریخ کاشت و سه رقم بودند. واسنجی مدل از طریق روش آزمون‌وخطا برای به حداقل رساندن تفاوت بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده انجام شد و برای واسنجی هر رقم کلزا ابتدا پارامترهای مربوط به نمو و فنولوژی و سپس پارامترهای مربوط به‌سرعت رشد دانه، تعداد دانه و عملکرد دانه واسنجی شدند (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱).

علاوه بر این، برای اطمینان بیشتر به خروجی‌های مدل مورد استفاده، قابلیت این مدل در برآورد عملکرد دانه کلزا با استفاده از داده-های حاصل از سه پژوهش مستقل با شرایط اقلیمی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. پژوهش اول یک مطالعه دو ساله مزرعه‌ای (سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷) بر روی ارقام مختلف کلزا و در شرایط آب محدود در شرایط اقلیمی گرم بود (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱) و پژوهش‌های دوم و سوم در دو منطقه اردبیل (حمزه‌پور

و همکاران) و خرم‌آباد (دالوند و همکاران)، با شرایط اقلیمی سرد و معتدل بودند. به این منظور از شاخص‌های آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE)، میانگین اریب خطا (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص سازگاری ویلموت (d-index)، ضریب تبیین (R^2) و خط یک‌به‌یک برای تشخیص قابلیت مدل استفاده شد (روابط ۱ الی ۴؛ والاچ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ویلموت، ۱۹۸۲).

$$\mathrm{nRMSE}(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (۱)$$

$$\mathrm{MBE} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}(O_i - S_i) \quad (۲)$$

$$\mathrm{EF} = 1 - \frac{\sum_{1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۳)$$

$$\mathrm{d-index} = 1 - \frac{\sum_{1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{1}^{n}(|O_i - \bar{O}| + |S_i - \bar{O}|)^2} \quad (۴)$$

در روابط بالا O مقدار عملکرد مشاهده شده، S مقدار عملکرد شبیه‌سازی‌شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر عملکردهای مشاهده شده و n تعداد مشاهدات را نشان می‌دهند. در صورتی‌که مقدار ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده و میانگین اریب خطا به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر دقت بیشتر مدل است؛ در حالی‌که مقدار شاخص کارایی مدل و شاخص سازگاری ویلموت بین صفر و یک متغیر بوده که هر چقدر مقدار این شاخص‌ها به عدد یک نزدیک‌تر باشد بیانگر دقت بیشتر مدل در برآورد عملکرد محصول است. علاوه بر این، انطباق شیب خط رگرسیون برآورد با خط یک به یک بیانگر برآورد بهتر مدل است.

داده‌های مورد نیاز پژوهش

داده‌های ورودی مدل برای شبیه‌سازی رشد و تولید کلزا شامل داده‌های اقلیمی، خاکی، ژنتیکی (گیاهی) و مدیریتی هستند. داده‌های اقلیمی مورد نیاز شامل دماهای کمینه و بیشینه روزانه (درجه سانتی‌گراد)، مقدار بارندگی روزانه (میلی‌متر) و مقدار تشعشع دریافتی در طول روز (مگاژول بر مترمربع در روز) بوده که به این منظور داده‌های بلندمدت (از بدو تأسیس تا سال ۲۰۲۱ میلادی) روزانه هواشناسی مربوط به چهار منطقه مورد بررسی از سازمان هواشناسی دریافت گردید. به‌منظور اطمینان از عدم اشتباه در ثبت صحیح و کامل داده‌های هواشناسی در بلندمدت از برنامه WeatherMan (هوگنبوم و همکاران، ۲۰۰۴) برای شناسایی و اصلاح داده‌های پرت ثبت‌شده و همچنین بازسازی داده‌های ثبت‌نشده در برخی بازه‌های زمانی استفاده گردید. همان‌طور که اشاره شده مقدار تشعشع دریافتی یکی از ورودی‌های اصلی مدل شبیه‌سازی بوده و با توجه به عدم ثبت این داده در ایستگاه‌های هواشناسی کشور در بلندمدت، از داده‌های روزانه تعداد ساعات آفتابی روزانه و رابطه آنگستروم (پرسکات، ۱۹۴۰) برای برآورد این متغیر در هر ایستگاه استفاده گردید.

$$R_s = \left(a + b\,\frac{n}{N}\right) R_a \quad (۵)$$

در رابطه ۵، Rs، Ra، n و N به‌ترتیب نشان‌دهنده مقدار تابش روزانه، تشعشع فرازمینی، تعداد ساعات آفتابی و حداکثر تعداد ساعات آفتابی ممکن می‌باشند و ضرایب a و b نیز به‌عنوان ضرایب کالیبره محلی آنگستروم بوده و در محاسبات این پژوهش به‌ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۵ لحاظ شدند (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱).

داده‌های خاکی مورد نیاز به‌عنوان ورودی مدل نیز شامل مقدار محتوای رطوبتی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه ($cm^3\ cm^{-3}$)، نقطه پژمردگی ($cm^3\ cm^{-3}$) و نقطه اشباع خاک ($cm^3\ cm^{-3}$) و همچنین عمق خاک زراعی و وزن مخصوص ظاهری خاک ($g\ cm^{-3}$) بودند. به‌منظور دست‌یابی به این داده‌ها از اطلاعات منتشرشده از مقالات، گزارش‌های مراکز تحقیقات کشاورزی و گزارش‌های منتشرشده توسط سازمان جهاد کشاورزی و آزمایشگاه‌های خاک‌شناسی استفاده شد (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۳؛ ولی‌پور و همکاران، ۱۴۰۲). به این منظور اطلاعات به‌دست‌آمده از این منابع با استفاده از توابع انتقالی تعبیه‌شده

در مدل SPAW (ساکستون و همکاران، ۲۰۰۶) برای برآورد نقاط رطوبتی خاک در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گرفتند.

داده‌های مدیریتی مورد نیاز مدل شامل اطلاعات مربوط به تاریخ کاشت، آبیاری، نوع رقم، نوع خاکورزی، تراکم، عمق و فاصله کشت و مقدار کود ازت بودند که این اطلاعات در هر منطقه با کمک پرسشنامه از کارشناسان جهاد کشاورزی آن منطقه تهیه گردید (جدول ۳). داده‌های گیاهی که شامل ضرایب ژنتیکی ارقام مختلف کلزا بودند نیز از تحقیق رحیمی مقدم و همکاران (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۱) استخراج و مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۳- اطلاعات خاکی و اطلاعات مدیریتی کشت کلزا در شهرستان‌های مورد بررسی

شهرستان	چگالی ظاهری (گرم بر مترمکعب)	محتوی آب خاک (سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب)			تاریخ کاشت	مقدار کود نیتروژن (کیلوگرم در هکتار)
		نقطه پژمردگی	نقطه ظرفیت مزرعه	نقطه اشباع		
خرم‌آباد	1.28	0.231	0.392	0.518	23-Sep	119.6
الشتر	1.28	0.242	0.395	0.515	1-Sep	121.4
پلدختر	1.38	0.062	0.286	0.475	17-Oct	138
کوهدشت	1.34	0.259	0.396	0.500	12-Oct	116

* این اعداد میانگین نقاط مختلف نمونه‌برداری از دشت‌های مختلف کشاورزی در سطح هر شهرستان است. عمق خاک برای تمام آزمایش‌های شبیه‌سازی ۱۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (رحیمی مقدم و همکاران، ۲۰۲۳)

تیمارهای آزمایش شبیه‌سازی و متغیرهای پژوهش

تیمارهای این پژوهش شامل آزمایش‌های بلندمدت شبیه‌سازی به‌صورت فاکتوریل بوده که این تیمارها دربردارنده سه رقم کلزای پاییزه Hyola308، Hyola401 و RGS003 (به‌ترتیب به‌عنوان ارقام زودرس، متوسط رس و دیررس با بیشترین سطح زیر کشت در مناطق مورد بررسی) و چهار تیمار رژیم آبیاری (شامل تیمارهای آبیاری ۱: آبیاری کامل، ۲: قطع آبیاری در مرحله گلدهی، ۳: قطع آبیاری در مرحله غلاف‌بندی و ۴: قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه) بود که در سطح چهار شهرستان خرم‌آباد، کوهدشت، پلدختر و الشتر به‌صورت بلندمدت پیاده‌سازی گردید. تعداد سال‌های شبیه‌سازی در هر شهرستان با توجه به دسترسی داده‌های اقلیمی متفاوت بود و سعی گردید تعداد سال شبیه‌سازی در هر منطقه بر اساس کل داده‌های موجود باشد که به این ترتیب در شهرستان‌های خرم‌آباد، کوهدشت و پلدختر هر کدام ۴۱ سال و در شهرستان الشتر ۲۱ سال شبیه‌سازی تیمارهای یاد شده صورت گرفت که در مجموع حدود ۱۷۲۸ شبیه‌سازی در این پژوهش انجام گردید. در ضمن سایر عوامل مدیریتی مانند تاریخ کاشت (جدول ۳)، عمق (سه سانتی‌متر) و تراکم کشت (۸۰ بوته در مترمربع)، مقدار مصرف کود ازت (جدول ۳)، نوع خاکورزی (مرسوم) و ... در تمام شبیه‌سازی‌ها در به‌صورت یکسان و بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از مناطق مورد بررسی در نظر گرفته شد. برای آبیاری کامل، در سامانه‌های فاریاب، با مبنای الگوی رایج کشاورزان محلی در منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن دو دور آبیاری از زمان کاشت تا مرحله ساقه‌دهی، آب اولیه خاک روی ۵۰ درصد آب بالقوه موجود در خاک تنظیم شد. از مرحله ساقه‌دهی به بعد آبیاری در مدل بر مبنای محتوای آب خاک در نقطه ظرفیت مزرعه انجام گرفت به این صورت که رطوبت خاک همواره در حد ۷۵ درصد ظرفیت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه باشد. برای تیمارهای مختلف قطع آبیاری این موضوع تا زمان قطع آبیاری نیز در نظر گرفته شد.

پس از اجرای مدل برای تیمارهای مختلف و انجام شبیه‌سازی‌ها در تمام مناطق، صفاتی مانند عملکرد دانه، حجم آبیاری انجام‌شده، تبخیر و تعرق واقعی، طول دوره رشد و میانگین دمای هوا در طول فصل رشد به‌عنوان خروجی‌های مدل مورد بررسی و تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند. علاوه بر این، با استفاده از خروجی‌های مدل، کارایی مصرف آب زراعی نیز با استفاده از رابطه ۶ در تمام

مناطق، تیمارها و سال‌های شبیه‌سازی محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت (جمان و همکاران، ۲۰۱۸).

$$\text{کارایی مصرف آب زراعی} = \frac{\text{عملکرد دانه}}{\text{مقدار آب عرضه شده}} \quad (۶)$$

در این رابطه عملکرد دانه همان مقدار عملکرد شبیه‌سازی‌شده کلزا توسط مدل (کیلوگرم در هکتار) بوده و مقدار آب عرضه‌شده نیز شامل مقدار آب مصرفی از ابتدا تا انتهای دوره رشد کلزا (مترمکعب) است. در این پژوهش از نرم‌افزارهای EXCEL و OriginPro (سیفرت، ۲۰۱۴) برای تجزیه‌وتحلیل خروجی‌ها و رسم شکل استفاده شد.

یافته‌ها

ارزیابی مدل شبیه‌سازی

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، مقادیر عملکردهای مشاهده‌شده بین ۱۴۶۶ تا ۳۲۵۲ کیلوگرم در هکتار متغیر بود؛ در حالی‌که مقادیر عملکرد تخمین زده شده توسط مدل بین ۱۲۵۰ تا ۳۵۵۰ کیلوگرم در هکتار تغییرات داشت. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۴ مقدار ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده برای تخمین عملکرد کلزای پاییزه برابر با ۱۴/۳۱ درصد بود که نشان‌دهنده دقت خوب این مدل در شبیه‌سازی عملکرد کلزای پاییزه است. نتایج به‌دست آمده نشان داد برآوردهای صورت گرفته از عملکرد کلزا توسط مدل شبیه‌سازی APSIM-canola به میزان کمتر از یک کیلوگرم در هکتار در مقایسه با شرایط واقعی کمتر بود. علاوه بر این مقادیر d-index و EF به‌دست‌آمده (به‌ترتیب برابر با ۰/۸۴ و ۰/۴۲) حاکی از سازگاری قابل قبول بین مقادیر عملکرد شبیه‌سازی‌شده و مقادیر مشاهده‌شده و کارایی متوسط مدل APSIM-canola در برآورد عملکرد کلزای پاییزه در شرایط محدودیت آبی است (جدول ۴). با توجه به نتایج به‌دست آمده و ارزیابی مقادیر گزارش شده از مشاهدات مزرعه‌ای و خروجی‌های به‌دست آمده از مدل شبیه‌سازی APSIM-canola می‌توان نتیجه گرفت که این مدل برآورد مناسبی از عملکرد کلزای پاییزه در شرایط آب محدود را ارائه می‌دهد.

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی مدل APSIM-canola برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ارقام مختلف کلزای پاییزه (ارقام Hyola308، Hyola401 و RGS003) تحت ۴ تیمارهای مختلف قطع آبیاری (تیمار آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله گلدهی، قطع آبیاری در مرحله غلاف‌بندی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه) و شرایط اقلیمی مختلف

تعداد جفت مشاهدات	رابطه رگرسیونی	ضریب تبیین	ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (درصد)	میانگین اریب خطا (کیلوگرم در هکتار)	شاخص سازگاری ویلموت	کارایی مدل
44	y = 0.7197x + 0.6517	0.49**	14.31	-0.81	0.84	0.42

تأثیر تغییر رقم و اعمال رژیم‌های قطع آبیاری بر عملکرد کلزای پاییزه

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های بلندمدت نشان داد میانگین عملکرد دانه کلزای پاییزه در تمام مناطق، ارقام، تیمارهای آبیاری و سال‌ها برابر با ۳۷۶۶ کیلوگرم در هکتار بود و اختلاف عملکرد این محصول بین مناطق مورد بررسی قابل ملاحظه (۲۵۳۴ کیلوگرم در هکتار) بود (شکل ۲). بر این اساس مقایسه بین مناطق مورد مطالعه نشان داد که بیشترین میانگین عملکرد دانه کلزای پاییزه در تمام ارقام و تیمارهای آبیاری با ۴۴۹۱ کیلوگرم در هکتار به شهرستان خرم‌آباد تعلق داشت؛ در حالی‌که کمترین میانگین عملکرد دانه در شهرستان الشتر به میزان ۱۹۵۷ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. بررسی‌ها نشان داد که به‌طور عمومی مقدار عملکرد در مناطق شرقی و جنوبی در مقایسه با غرب و شمال استان بیشتر بود به شکلی که با حرکت به سمت شمال استان، مقدار عملکرد دانه کلزای پاییزه نیز کاهش یافت.

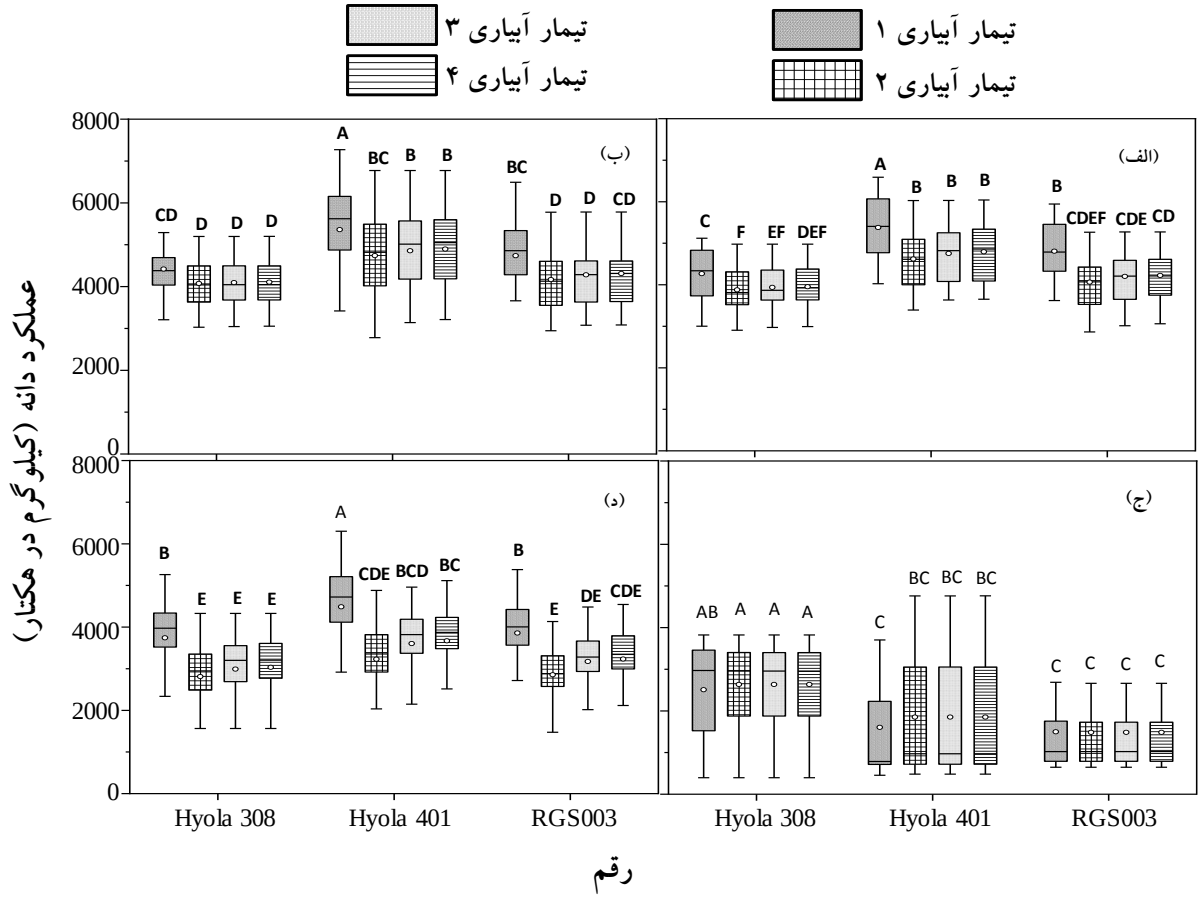
بررسی تغییرات عملکرد کلزا بین سال‌های شبیه‌سازی‌شده در هر تیمار (طول باکس پلات در هر تیمار) بیانگر تغییرپذیری بالای عملکرد در سال‌های مختلف بود. بیشترین تغییرپذیری عملکرد بین سال‌های شبیه‌سازی در شهرستان الشتر و به‌ویژه رقم Hyola401 با انحراف از معیار ۱۳۹۶ کیلوگرم در هکتار وجود داشت؛ درحالی‌که کمترین تغییرپذیری عملکرد در بلندمدت به شهرستان

پلدختر و رقم Hyola308 با ۵۵۶ کیلوگرم انحراف معیار تعلق داشت (شکل ۲). این نتایج در واقع حاکی از تفاوت در پایداری اقلیم مناطق مورد بررسی طی سالیان مختلف بود. از این‌رو نتایج به‌دست آمده نشان داد که شرایط اقلیمی در شهرستان پلدختر در مقایسه با سایر شهرستان‌ها طی بلندمدت ثبات بیشتری را دارد درحالی‌که تنوع شرایط اقلیمی طی سالیان مختلف در شهرستان الشتر منجر به تغییرپذیری بیشتر عملکرد کلزای پاییزه در این منطقه گردید و به‌نوعی بیانگر ریسک بیشتر تولید کلزا در این منطقه بود.

مقایسه عملکرد به‌دست‌آمده از ارقام مختلف کلزا در هر شهرستان نشان داد که اختلاف عملکرد به‌دست‌آمده از ارقام مختلف کلزا در مناطق مورد بررسی قابل ملاحظه بود به شکلی که بیشترین و کمترین اختلاف عملکرد بین ارقام مختلف در مناطق مختلف به‌ترتیب ۱۱۱۲ و ۶۰۰ کیلوگرم (به‌ترتیب در شهرستان‌های کوهدشت و الشتر) بود. نتایج به‌دست آمده نشان داد رقم میان‌رس Hyola401 در شهرستان‌های خرم‌آباد، پلدختر و کوهدشت در مقایسه با سایر ارقام عملکرد بهتری داشت؛ در حالی‌که میانگین عملکرد به‌دست آمده از رقم Hyola308 در شهرستان الشتر بیشتر از سایر ارقام بود. نتایج به‌دست آمده همچنین نشان داد که کشت پاییزه رقم Hyola308 کلزا در شهرستان‌های خرم‌آباد، پلدختر و کوهدشت منجر به دست‌یابی عملکرد کمتر در مقایسه با دو رقم دیگر شد و در شهرستان الشتر نیز کمترین عملکرد کلزا با کشت رقم دیررس RGS003 به‌دست آمد (شکل ۲).

بررسی تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری (تیمارهای قطع آبیاری) بر عملکرد کلزای پاییزه نیز نشان داد که واکنش کلزا به تیمار آبیاری در مناطق مختلف متفاوت بود به شکلی که استفاده از تیمار آبیاری کامل در تمام رقم‌های شهرستان‌های خرم‌آباد، پلدختر و کوهدشت (به‌ترتیب با میانگین عملکرد ۴۸۱۵، ۴۸۱۳ و ۴۰۲۲ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با سایر تیمارهای آبیاری منجر به عملکرد دانه بیشتری شد؛ درحالی‌که میانگین عملکرد دانه کلزا در تیمار آبیاری کامل در شهرستان الشتر با ۱۸۷۹ کیلوگرم در هکتار در مقایسه با تیمارهای قطع آبیاری کمتر بود و عملکرد دانه کلزا در این شهرستان در تیمارهای قطع آبیاری بیشتر از تیمار آبیاری کامل بود (۱۹۸۵ کیلوگرم در هکتار) و در مقایسه با هم اختلاف محسوسی نداشتند.

نتایج مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای رقم×رژیم-های مختلف قطع آبیاری در مراحل مختلف بر عملکرد دانه کلزای پاییزه در مناطق مورد بررسی (شکل ۲) بسته به منطقه متفاوت بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در شهرستان-های خرم‌آباد، پلدختر و کوهدشت تیمار رقم Hyola401 و آبیاری کامل در سطح آماری پنج درصد با سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار داشت و منجر به تولید بیشترین مقدار عملکرد دانه کلزا در این شهرستان‌ها (به‌ترتیب ۵۳۶۱، ۵۳۷۸ و ۴۴۸۸ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با سایر تیمارها شد؛ در حالی‌که کشت رقم زودرس Hyola308 و قطع آبیاری در مرحله گلدهی موجب دست‌یابی به کمترین عملکرد دانه کلزا در این مناطق (به‌ترتیب ۴۰۷۴، ۳۸۷۸ و ۲۸۱۱ کیلوگرم در هکتار) شد. نتایج به‌دست آمده در شهرستان الشتر با سایر مناطق متفاوت بود به شکلی که بر اساس آزمون دانکن کشت رقم Hyola308 و استفاده از یکی از تیمارهای قطع آبیاری در مراحل گلدهی، غلاف-بندی و پر شدن دانه از نظر آماری در سطح پنج درصد با سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار داشتند و با ۲۶۳۴ کیلوگرم در هکتار بیشترین عملکرد دانه در کشت پاییزه کلزا را به همراه داشتند؛ این در حالی بود که کمترین عملکرد به‌دست‌آمده در این شهرستان با کشت رقم RGS003 و قطع آبیاری در مرحله گلدهی به میزان ۱۴۸۴ کیلوگرم در هکتار به‌دست‌آمده آمد (شکل ۲).



شکل ۲- عملکرد شبیه‌سازی‌شده ارقام مختلف کلزای پاییزه در واکنش به تیمارهای مختلف آبیاری (۱: تیمار آبیاری کامل، ۲: قطع آبیاری در مرحله گلدهی، ۳: قطع آبیاری در مرحله غلاف‌بندی و ۴: قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه) در شهرستان‌های الف: پلدختر، ب:خرم‌آباد، ج: الشتر و د: کوهدشت. (مقادیر دارای حروف غیرمشترک در هر شهرستان در سطح آماری پنج درصد و بر اساس آزمون توکی دارای اختلاف معنی‌دار هستند)

ارتقاء کارایی مصرف آب زراعی با انتخاب رقم و تیمار آبیاری مناسب

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های بلندمدت در مناطق مورد بررسی (شکل ۳) نشان داد که میانگین کارایی مصرف آب زراعی در تمام ارقام، تیمارهای آبیاری و سال-های شبیه‌سازی در محدوده مورد بررسی برابر با ۰/۲۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود که تغییرپذیری قابل توجهی بین مناطق مورد بررسی وجود داشت. بررسی‌ها نشان داد که به‌طورکلی مقدار کارایی مصرف آب زراعی در مناطق جنوبی و مناطق غربی بیشتر از مناطق شمالی و شرقی استان بود به شکلی که میانگین کارایی مصرف آب زراعی (در تمام ارقام، تیمارهای آبیاری و سال‌های شبیه‌سازی) در شهرستان‌های پلدختر و الشتر به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار در بین مناطق مورد بررسی و برابر با ۰/۳۶۹ و ۰/۱۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود.

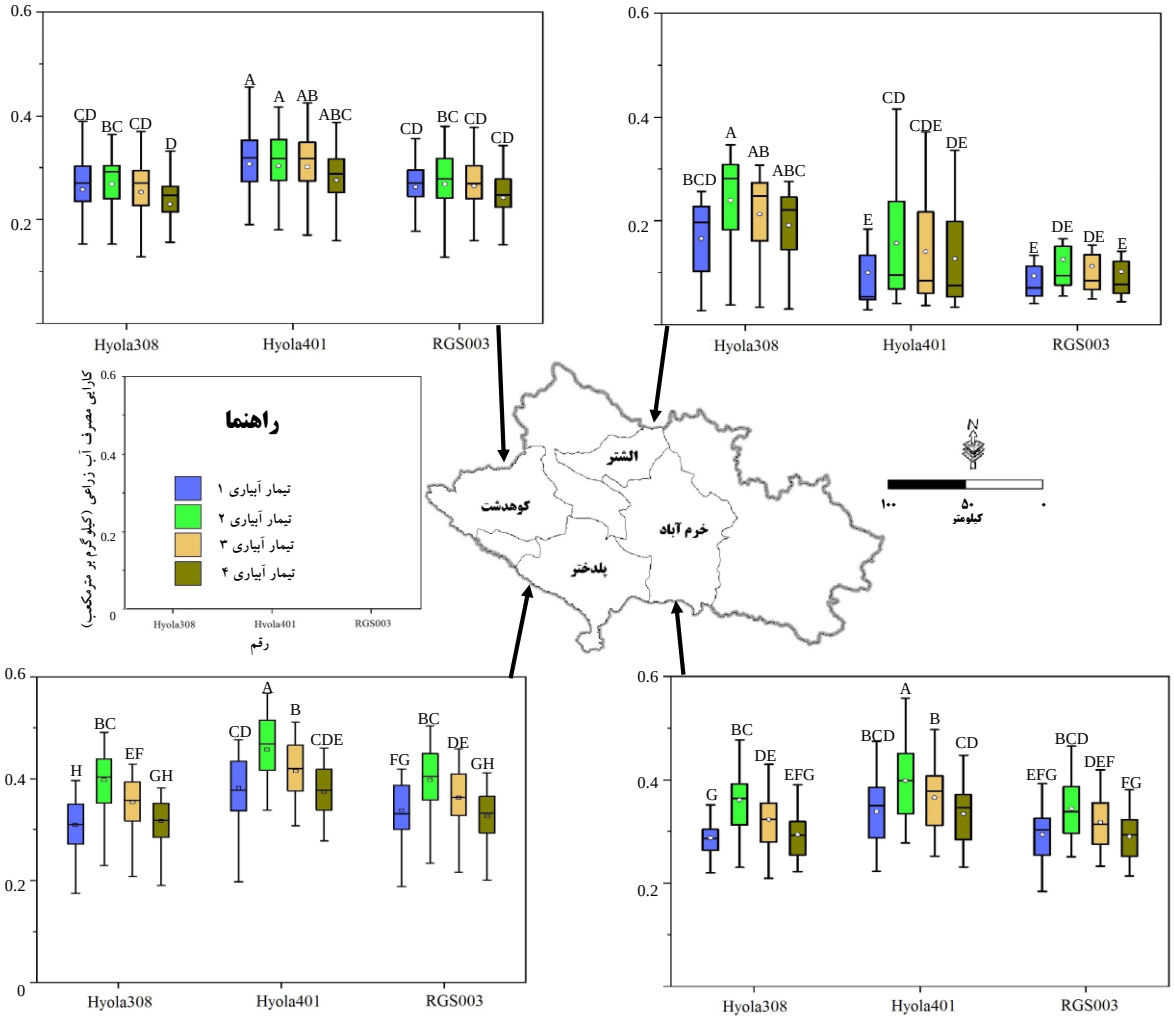
بررسی مقادیر کارایی مصرف آب زراعی در تیمارهای پژوهش هر منطقه بیانگر تغییرپذیری قابل توجه این متغیر بین سال‌های مختلف (طول نمودار جعبه‌ای در شکل ۳) بود. بررسی‌ها نشان داد به‌طورکلی تغییرپذیری کارایی مصرف آب زراعی بین سال‌های مختلف در شهرستان‌های پلدختر و خرم‌آباد کمتر از سایر مناطق بود؛ درحالی‌که در شهرستان الشتر در سال‌های مختلف تغییرات بیشتری در مقایسه با سایر مناطق وجود داشت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد بیشترین انحراف از معیار مشاهده‌شده بین سال‌های شبیه-سازی در شهرستان الشتر و مربوط به تیمار قطع آبیاری در مرحله گلدهی رقم Hyola401

(۰/۱۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب) بود درحالی‌که کمترین انحراف معیار در بلندمدت به تیمار آبیاری کامل رقم Hyola308 در شهرستان خرم‌آباد تعلق داشت. مقایسه مقادیر کارایی مصرف آب زراعی در ارقام مورد بررسی در مناطق مختلف نشان داد که انتخاب رقم مناسب تأثیر قابل‌توجهی در ارتقاء کارایی آب مصرف‌شده در سطح بوم نظام‌های کشت کلزای پاییزه در مناطق مورد بررسی دارد. خروجی‌های به‌دست‌آمده از شبیه‌–سازی‌های بلندمدت نشان داد به‌طور میانگین در تمامی مناطق و تیمارهای آبیاری مورد بررسی، بیشترین کارایی مصرف آب زراعی (۰/۳۲ کیلوگرم بر مترمکعب) با کشت رقم میان‌رس Hyola401 به‌دست آمد؛ درحالی‌که کشت رقم دیررس RGS003 با ۰/۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب کمترین کارایی مصرف آب زراعی را داشت. بررسی ارقام به تفکیک مناطق نیز نشان داد که در شهرستان‌های پلدختر، خرم‌آباد و کوهدشت بیشترین کارایی مصرف آب زراعی بین ارقام مورد بررسی (میانگین تمام تیمارهای آبیاری در هر منطقه) با کشت رقم Hyola401 به‌ترتیب به میزان ۰/۴۰۷، ۰/۳۵۹ و ۰/۲۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب به‌دست آمد. در شهرستان الشتر نیز کشت رقم Hyola308 منجر به بیشترین مقدار کارایی مصرف آب زراعی (۰/۲۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب) شد. نتایج به‌دست‌آمده همچنین نشان داد که کمترین مقدار کارایی مصرف آب زراعی با کشت رقم Hyola308 در شهرستان‌های پلدختر و کوهدشت (به‌ترتیب ۰/۳۴۴ و ۰/۲۵۲ کیلوگرم بر مترمکعب) و کشت رقم RGS003 در شهرستان‌های خرم‌آباد و الشتر (به‌ترتیب ۰/۳۱۱ و ۰/۱۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب) به‌دست آمد (شکل ۴).

ارزیابی کارایی مصرف آب زراعی در تیمارهای آبیاری مورد بررسی در این پژوهش نیز حاکی از تأثیرپذیری این متغیر از تیمارهای آبیاری مختلف بود. میانگین کارایی مصرف آب زراعی تیمارهای آبی مختلف در کل مناطق، ارقام و سال‌های مورد بررسی بین ۰/۳۳۱ و ۰/۲۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب تغییرات داشت که بیشترین و کمترین آن به‌–ترتیب به تیمارهای قطع آبیاری در مرحله گلدهی و قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه تعلق داشت. بررسی کارایی مصرف آب زراعی در تیمارهای آبیاری مختلف به تفکیک مناطق نیز بیانگر برتری تیمار آبی قطع آبیاری در مرحله گلدهی در مقایسه با سایر تیمارها در تمام شهرستان‌ها بود به شکلی که مقدار کارایی مصرف آب زراعی در این تیمار در شهرستان‌های پلدختر، خرم‌آباد، کوهدشت و الشتر به‌-ترتیب برابر با ۰/۴۱۸، ۰/۳۶۸، ۰/۲۸۰ و ۰/۱۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود. در مقابل کمترین مقدار کارایی مصرف آب زراعی در بین تیمارهای آبی در شهرستان‌های پلدختر و کوهدشت (به‌ترتیب ۰/۳۳۹ و ۰/۲۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب) با قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه و در شهرستان‌های خرم‌آباد و الشتر (به‌ترتیب ۰/۳۰۵ و ۰/۱۲۱ کیلوگرم بر مترمکعب) با انجام آبیاری کامل به‌دست آمد (شکل ۳).

بررسی نتایج اثر متقابل اعمال تیمارهای مختلف آبیاری و استفاده از ارقام مختلف بر کارایی مصرف آب زراعی در بر اساس آزمون دانکن در سطح آماری پنج درصد حاکی از واکنش متفاوت این متغیر در مناطق مختلف بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها (شکل ۳) نشان داد که تأثیر تیمار رقم Hyola401 و قطع آبیاری کلزا در مرحله گلدهی بر روی کارایی مصرف آب زراعی با سایر تیمارها در سطح آماری پنج درصد اختلاف معنی‌دار داشت و برای دست–یابی به بیشترین کارایی مصرف آب زراعی در شهرستان-های پلدختر و خرم‌آباد (به‌ترتیب ۰/۴۵۷ و ۰/۳۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب)، این تیمار بهترین راهکار بود. در مقابل، نتایج به‌دست آمده نشان داد که کشت رقم زودرس Hyola308 و انجام آبیاری گیاه زراعی به‌طور کامل تا پایان فصل رشد در شهرستان–های پلدختر و خرم‌آباد در مقایسه با سایر تیمارها به شکل معنی‌داری (در سطح آماری پنج درصد) منجر به حداقل کارایی مصرف آب زراعی (به‌ترتیب ۰/۳۱۰ و ۰/۲۸۷ کیلوگرم بر مترمکعب) شد. مقایسه میانگین کارایی مصرف آب زراعی در شهرستان کوهدشت با استفاده از آزمون دانکن در سطح آماری پنج درصد نشان داد بیشترین کارایی مصرف آب زراعی به میزان ۰/۳۰۷ کیلوگرم بر

مترمکعب با کشت رقم میان-رس Hyola401 و آبیاری کامل گیاه زراعی تا انتهای فصل رشد در این شهرستان محقق گردید درحالی‌که قطع آبیاری در مرحله پر شدن دانه در مزارع کشت‌شده با رقم Hyola308 منجر به افت کارایی مصرف آب زراعی به کمترین مقدار در بین تیمارهای مورد بررسی (۰/۲۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب) شد. مقایسه میانگین کارایی مصرف آب زراعی در شهرستان الشتر نیز با استفاده از آزمون دانکن حاکی از اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای مورد بررسی در این شهرستان در سطح آماری پنج درصد بود. بر این اساس، امکان بیشینه‌سازی این متغیر به میزان ۰/۲۳۹ کیلوگرم بر مترمکعب با کشت رقم زودرس Hyola308 و قطع آبیاری گیاه زراعی در مرحله گلدهی در مقایسه با سایر تیمارهای مورد بررسی بود. در این منطقه کشت رقم دیررس RGS003 و آبیاری کامل آن تا انتهای فصل رشد کاهش محسوس کارایی مصرف آب زراعی را به کمترین مقدار ممکن (۰/۰۹۴ کیلوگرم بر مترمکعب) به همراه داشت.



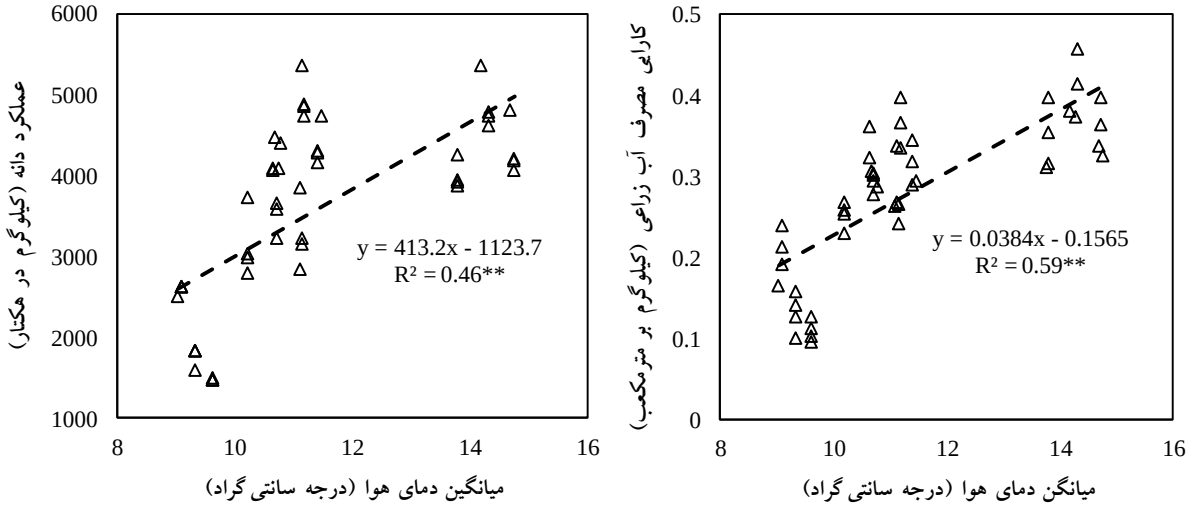
شکل ۳- کارایی مصرف آب زراعی کلزای پاییزه در پاسخ به ارقام و تیمارهای آبیاری مختلف در شهرستان‌های مورد مطالعه. (مقادیر داری حروف غیرمشترک در هر شهرستان در سطح آماری پنج درصد و بر اساس آزمون توکی دارای اختلاف معنی‌دار هستند)

بحث

تغییرپذیری عملکرد دانه و کارایی مصرف آب زراعی بین مناطق

مرور کلی نتایج مربوط به مقادیر عملکرد و کارایی مصرف آب زراعی در تیمارهای مورد بررسی نشان داد که وضعیت عملکرد دانه و کارایی مصرف آب زراعی

در بوم نظام‌های کشت کلزای پاییزه در شهرستان‌های پلدختر و خرم‌آباد (به‌طور عمومی مناطق جنوبی و شرقی) به شکل قابل ملاحظه‌ای نسبت به شهرستان‌های کوهدشت و الشتر (شمال و غرب مناطق مورد بررسی) بهتر بود. در واقع مقادیر عملکرد بالای کلزا در شهرستان‌های خرم‌آباد و پلدختر در مقایسه با شهرستان‌های کوهدشت و الشتر (شکل ۲) موجب تفاوت فاحش در مقدار کارایی مصرف آب زراعی شهرستان‌های یاد شده بود به شکلی که میانگین کارایی مصرف آب زراعی در تمامی تیمارها و سال-های مورد بررسی در شهرستان‌های پلدختر و خرم‌آباد به‌ترتیب برابر با ۰/۳۶۹ و ۰/۳۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب و در شهرستان‌های کوهدشت و الشتر برابر با ۰/۲۶۹ و ۰/۱۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود. مقایسه بین میانگین دمای هوای مناطق یادشده (جدول ۱) حاکی از تأثیر قابل‌توجه اقلیم (به‌ویژه دما) بر مقدار تولید و بهره‌وری کلزای پاییزه در هر منطقه بود. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش میانگین دمای هوا در مناطق مورد بررسی، مقدار عملکرد و همچنین کارایی مصرف آب زراعی نیز افزایش یافت (شکل ۴). بر این اساس، بررسی رابطه رگرسیونی بین میانگین دمای هوا در طول فصل رشد و مقدار عملکرد دانه و کارایی مصرف آب زراعی در تمام مناطق و تیمارهای مورد بررسی نیز حاکی از ارتباط مستقیم و معنی‌دار بین میانگین دمای هوا و دو متغیر مذکور بود. در واقع دماهای کمتر در کشت پاییزه کلزا منجر به وقوع بیشتر تنش دماهای کمینه به گیاه زراعی شده و امکان استفاده مطلوب از منابع محیطی را از گیاه زراعی سلب می‌کند. هافمن و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که وقوع تنش دمای کمینه در کشت پاییزه کلزا در شمال آلمان منجر به افزایش ریزش برگ و تلفات نیتروژن شد. عدم استفاده مطلوب از منابع محیطی افت عملکرد و همچنین کاهش کارایی مصرف آب را به همراه خواهد داشت. عینی نرگسه و همکاران (۲۰۲۰) نیز در پژوهشی مزرعه‌ای در منطقه کرج عنوان کردند که دمای کمتر در طول فصل رشد منجر به حصول عملکرد کمتر در بوم نظام-های کشت کلزای پاییزه شد. در پژوهشی دیگر در چهار منطقه سردسیری بر روی کلزای پاییزه، مدنی و همکاران (۱۳۸۵) گزارش کردند که بیشترین عملکرد دانه کلزای پاییزه در مناطق با میانگین دمای بیشتر به‌دست آمد.

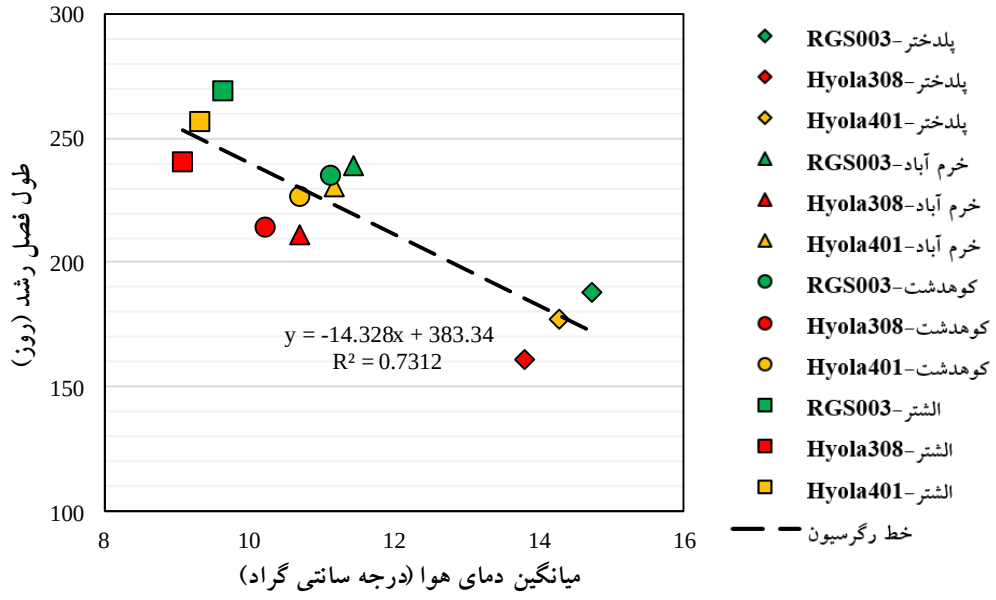


شکل ۴- رابطه رگرسیونی بین میانگین دمای هوا در طول فصل رشد با عملکرد دانه و کارایی مصرف آب زراعی در مناطق مورد بررسی

واکنش کلزای پاییزه به تغییر رقم

نتایج بررسی ارقام مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که طول فصل رشد در تمام مناطق با تغییر رقم تغییر کرد به شکلی که به‌طور میانگین طول فصل رشد در ارقام Hyola308، Hyola401 و RGS003 در تمام مناطق به‌ترتیب برابر با ۲۰۷، ۲۲۳ و ۲۳۳ روز بود. بررسی مناطق

به‌صورت جداگانه نیز مؤید همین موضوع بود؛ البته باید توجه داشت که در مناطق گرم‌تر مانند پلدختر طول فصل رشد در ارقام مورد بررسی بین ۱۶۱ تا ۱۸۸ روز تغییرات داشت؛ درحالی‌که در شهرستان الشتر (به‌عنوان سردترین شهرستان) طول فصل رشد در ارقام مورد استفاده بین ۲۴۱ تا ۲۶۹ روز متغیر بود (شکل ۵). به‌نظر می‌رسد که این اختلاف قابل‌توجه در طول فصل رشد ارقام مورد بررسی در مناطق موردمطالعه به اقلیم (دمای هوا) این مناطق بستگی دارد (شکل ۵). در واقع دمای هوا با توجه به نقش کلیدی و تأثیر مستقیم و غیرمستقیم آن بر متغیرهای مهمی مانند دمای خاک و نیاز حرارتی گیاه زراعی می‌تواند طول دوره‌های فنولوژیک گیاه زراعی را تغییر داده و طول فصل رشد گیاه زراعی را دستخوش تغییرات کند (گریگوریوا، ۲۰۲۰). بر این اساس، انتخاب رقم مناسب برای کشت پاییزه کلزا در هر منطقه باید با توجه به هدف کشاورز و با در نظر گرفتن شرایط دمایی هر منطقه و تأثیر آن بر برخی ویژگی‌های گیاه زراعی انجام گردد. برای مثال درصورتی‌که هدف از تولید بیشینه‌سازی تولید و یا حداکثر استفاده مطلوب از آب مصرفی باشد استفاده از رقم میان‌رس Hyola401 در مناطق گرم‌تر مانند پلدختر، خرم‌آباد و کوهدشت به‌دلیل استفاده مطلوب از منابع محیطی و همچنین عدم برخورد دوره زایشی گیاه زراعی به دماهای بالا قابل توصیه است. نتایج پژوهش صادقی نژاد و همکاران (۱۳۹۳) در ابرکوه یزد بر روی تأثیر تنش خشکی بر روی پنج رقم کلزای پاییزه نشان داد که استفاده از رقم میان–رس Hyola401 به‌دلیل کارایی مصرف آب بالا قابل توصیه است. در مناطق خنک‌تر مانند شهرستان الشتر نیز به نظر می‌رسد که با توجه به‌احتمال بیشتر وقوع تنش دمای کمینه در فصل پاییز و زمستان، استفاده از ارقام زودرس موجب تسریع رشد گیاه زراعی در ابتدای فصل رشد شده و امکان ورود زودتر گیاه زراعی به مرحله روزت و آمادگی بهتر گیاه زراعی برای زمستان گذرانی را فراهم می‌کند. مدنی و همکاران (۱۳۸۵) در پژوهشی بر روی ۲۴ رقم کلزای پاییزه در مناطق سردسیر به لزوم استفاده از رقم مناسب در مناطق سردسیر برای مقاوم‌سازی بهتر به سرما در مرحله روزت اشاره کردند.



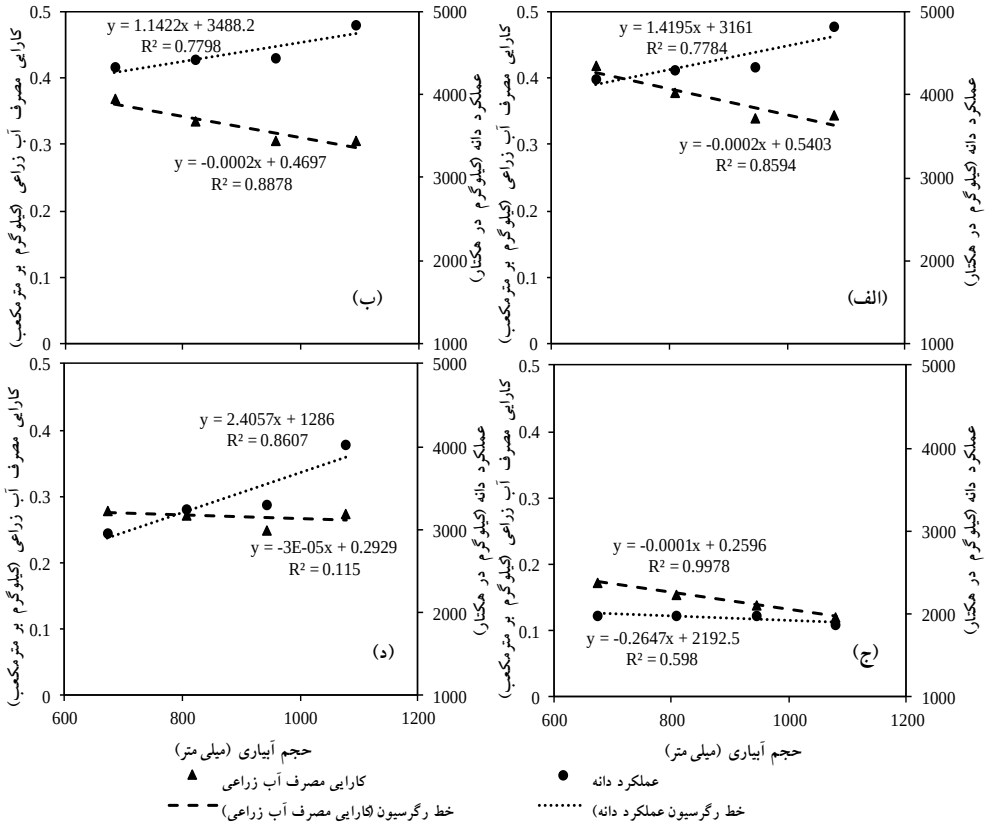
شکل ۵- رابطه رگرسیونی بین طول فصل رشد ارقام مختلف کلزای پاییزه و میانگین دمای هوا در طول فصل رشد در مناطق مختلف

واکنش کلزا به قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد

بررسی نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان داد که واکنش کلزای پاییزه (عملکرد و کارایی مصرف آب زراعی) به تیمارهای آبیاریِ این پژوهش بسته به منطقه متفاوت است که به نظر می‌رسد تفاوت در شرایط اقلیمی این مناطق مهم‌ترین عامل در بروز این واکنش متفاوت به

تیمارهای آبیاری است. رابطه رگرسیونی بین حجم آبیاری اعمال‌شده در تیمارهای مختلف آبیاری با مقدار عملکرد دانه کلزا به تفکیک شهرستان‌های مورد بررسی (شکل ۶) حاکی از وجود ارتباط مستقیم بین حجم آبیاری و عملکرد دانه در سه شهرستان پلدختر، خرم‌آباد و کوهدشت (به‌ترتیب با شیب ۱/۴۱۹۵+، ۱/۱۴۲۲+ و ۲/۴۰۵۷+) بود که نتایج نشان داد با افزایش مقدار آبیاری عملکرد دانه در شهرستان کوهدشت با شیب بیشتری افزایش یافت. نتایج به‌دست‌آمده همچنین نشان داد که در شهرستان الشتر اعمال آبیاری بیشتر موجب افت عملکرد دانه (با شیب ۰/۲۶۴۷-) در این شهرستان شد. این موضوع لزوم توجه به مدیریت آبیاری برای دست‌یابی به عملکرد دانه مطلوب به‌صورت مکان ویژه و با توجه به ویژگی‌های اقلیمی هر منطقه را هویدا می‌سازد. بررسی رابطه رگرسیونی بین مقدار آب آبیاری عرضه‌شده به بوم نظام‌های کشت کلزا و کارایی مصرف آبیاری زراعی در شهرستان‌های مختلف حاکی از شیب نزولی بین این دو متغیر در تمام مناطق بود. این نتایج به این معنی است که بر اساس تیمارهای مورد بررسی در این تحقیق، عرضه مقدار آب بیشتر تأثیر مثبتی بر روی کارایی مصرف آب زراعی کلزا نداشت و حتی اعمال آبیاری بیشتر بر اساس تیمارهای تعبیه‌شده در این پژوهش موجب کاهش کارایی مصرف آب زراعی شد (شکل ۶). در واقع، درصورتی‌که کم آبیاری موجب تنش شدید آبی برای محصول نشود می‌تواند تأثیر مثبتی بر کارایی مصرف آب محصول زراعی داشته باشد. باید توجه داشت که یکی از دلایل مهم در واکنش مثبت کارایی مصرف آب به تیمارهای قطع آبیاری در این پژوهش به دلیل نوع ارقام مورد بررسی بود. در واقع در شرایط رطوبتی مطلوب، گیاه زراعی با انجام فتوسنتز کافی تناسب مطلوبی بین منبع (برگ) و مخزن (دانه) ایجاد نموده و موجب دستیابی به عملکرد مطلوب می‌گردد. بااین‌وجود با وقوع تنش رطوبتی تعداد غلاف‌های بارور در کلزا کاهش‌یافته که موجب کاهش عملکرد محصول می‌گردد. در این بین ارقامی که بتوانند در شرایط تنش آبی تعداد غلاف بارور بیشتری داشته باشند می‌توانند به عملکرد قابل قبولی دست یابند (عینی نرگسه و همکاران، ۱۳۹۷). در بین ارقام مختلف کلزا، رقم Hyola401 به دلیل تولید تعداد مناسب غلاف در شاخه‌های اصلی و فرعی در شرایط تنش، درصد غلاف بارور بالایی داشته که منجر به تولید عملکرد دانه معقولی می‌شود (نعیمی و همکاران، ۱۳۸۹) و این موضوع موجب کارایی مصرف آب بالا در این رقم می‌گردد. نتایج مطالعات مختلف در زمینه کم‌آبیاری کلزا نیز بیانگر ارتباط منفی بین مقدار آب عرضه‌شده به گیاه زراعی و کارایی مصرف آب بود. اسکندری و کاظمی (۱۴۰۳) در آزمایش خود اثر تاریخ کاشت، کود ورمی‌کمپوست و قطع آبیاری در مرحله گلدهی بر تولید دانه و روغن و کارایی مصرف آب کلزا بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاهش حجم آبیاری موجب افزایش کارایی مصرف آب در کلزا شد به شکلی که قطع آبیاری در مرحله گلدهی باعث افزایش کارایی مصرف آب در کلزا به میزان ۲۹ درصد شد. داشادی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر دور آبیاری (بر اساس تبخیر از تشتک تبخیر) و مصرف کود نیتروژن بر کلزای پاییزه در جنوب شرقی اصفهان پرداختند و گزارش کردند که انجام آبیاری در دورهای کوتاه موجب دست-یابی به عملکردهای بیشتر شد؛ درحالی‌که آبیاری پس از تبخیر ۱۰۰ میلی‌متر از تشتک تبخیر (طولانی‌ترین دور آبیاری مورد بررسی) موجب دست‌یابی به بیشترین کارایی مصرف آب به میزان ۰/۳۹۴ کیلوگرم بر مترمکعب شد. نتایج پژوهش کاتوال و همکاران (۲۰۲۰) بر روی تأثیر روش‌های کم آبیاری بر کلزا در ایالات‌متحده نشان داد که عدم آبیاری در دوره رشد رویشی (کم آبیاری به میزان ۱۳ الی ۱۸ درصدِ تبخیر و تعرق واقعی گیاه زراعی در شرایط آبیاری کامل) موجب افزایش بهره‌وری تولید کلزا در مقایسه با تیمار آبیاری کامل شد. این نتایج با توجه به محدودیت منابع آبی و فشار بر سفره‌های زیرزمینی می‌تواند در انتخاب روش آبیاری مناسب و مؤثر با حداکثر بهره‌وری و حداقل فشار بر منابع آبی کمک قابل توجهی کند. خدابین و همکاران (۱۳۹۹) در تحقیقی به بررسی اثر قطع آبیاری و

محلول‌پاشی روی و منگنز بر گیاه کلزا پرداختند و گزارش کردند که با قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد در ارقام R15 و KS7 کارایی مصرف آب کاهش یافت (به‌ترتیب ۱۱ و ۲۰ درصد) درحالی‌که قطع آبیاری از مرحله گلدهی به بعد در رقم نیما منجر به افزایش کارایی مصرف آب به میزان ۸/۵ درصد در مقایسه با آبیاری کامل شد. در مطالعه‌ای دیگر در کشور ترکیه که اثر رژیم‌های کم آبیاری بر روی گیاه کلزا را بررسی کرده بودند، محققان دریافتند که با قطع آبیاری پس از مرحله گلدهی، مقدار عملکرد دانه در مقایسه با تیمار آبیاری کامل ۱۶/۴ درصد کاهش یافت درحالی‌که کارایی مصرف آب ۱۴/۹ درصد افزایش یافت (استانبوللو اوغلو و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل ۶- رابطه رگرسیونی بین حجم آبیاری اعمال‌شده با عملکرد دانه و کارایی مصرف آب زراعی در تیمارهای مختلف آبیاری در شهرستان‌های الف: پلدختر، ب: خرم‌آباد، ج: الشتر و د: کوهدشت

نتیجه‌گیری

پژوهش پیش رو با هدف شناسایی رقم و تیمار آبیاری مناسب در مناطق مختلف استان لرستان انجام شد. نتایج کلی این پژوهش در گام اول بیانگر توانایی خوب مدل شبیه‌سازی APSIM-canola در برآورد رشد و تولید کلزای پاییزه بود. این نتایج نشان داد که خطای برآورد این مدل در شرایط محدودیت آب تنها ۱۰ درصد بود و امکان استفاده از این مدل در انجام مطالعات گوناگون برای بررسی اثر تیمارهای آبی مختلف و انواع رقم بر روی کلزا امکان‌پذیر است. نتایج همچنین نشان داد که مقدار عملکرد و کارایی مصرف آب زراعی در مناطق، ارقام و تیمارهای آبیاری مورد بررسی متفاوت بودند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که توجه به شرایط اقلیمی هر منطقه به‌ویژه شرایط دمایی آن تأثیر بسزایی در انتخاب روش مدیریتی محصول خواهد داشت و در صورت انتخاب رقم مناسب و روش مدیریتی صحیح آبیاری می‌توان علاوه بر دست‌یابی به

عملکرد دانه معقول، کارایی مصرف آب زراعی مزارع کشت کلزای پاییزه را ارتقاء داد. بر این اساس، نتایج نشان داد که کشت رقم میان‌رس Hyola401 در شهرستان‌های خرم‌آباد، پلدختر و کوهدشت و کشت رقم Hyola308 در شهرستان الشتر منجر به حصول بیشترین عملکرد و کارایی مصرف آب شد. نتایج به‌دست‌آمده همچنین نشان داد در شهرستان-های خرم‌آباد، پلدختر و کوهدشت بیشترین عملکرد با آبیاری کامل محصول به‌دست آمد؛ درحالی‌که در صورت وجود محدودیت آبی، با قطع آبیاری در مرحله گلدهی می-توان در ازای اندکی افت در عملکرد به بیشترین کارایی مصرف آب زراعی ممکن در بوم نظام‌های کشت کلزا در این مناطق دست یافت. این موضوع از آن جهت اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که همواره هم‌زمانی مراحل انتهایی رشد کلزای پاییزه با مراحل ابتدایی سایر محصولات بهاره موجب تردید کشاورزان در استفاده از زمین زراعی به‌صورت کشت پاییزه می‌گردد و استفاده بهینه از منابع طبیعی را با مشکل مواجه می‌کند. علاوه بر این، عدم مصرف آب بیشتر در مراحل انتهایی رشد در صورت تولید قابل قبول دانه کلزا می‌تواند کمک شایانی به بازسازی منابع آب زیرزمینی و پایداری تولید در مناطق مورد بررسی در بلندمدت نماید. بررسی واکنش کلزا در شهرستان الشتر به تیمارهای آبیاری نیز نشان داد که قطع آبیاری در مرحله گلدهی منجر به بیشترین عملکرد دانه و بیشترین کارایی مصرف آب زراعی شد. به نظر می‌رسد که خروجی‌های به‌دست آمده در این شهرستان به‌ویژه در بخش عملکرد با نتایج سایر مطالعات هم‌سو نیست. این موضوع نشان می‌دهد که عامل محدودکننده رشد در این منطقه چیزی به غیر از محدودیت آبی است دست‌یابی به تولید و بهره‌وری مطلوب در این منطقه نیازمند بررسی دقیق‌تر شرایط این منطقه و شناسایی دقیق عوامل محدودکننده تولید کلزا در این منطقه است. با توجه به خروجی‌های این پژوهش پیشنهاد می‌گردد علاوه بر رقم‌های فوق، این مطالعه بر روی ارقام جدید و امیدبخش پاییزه نیز انجام گردد تا بتوان از تمامی ظرفیت-های موجود در غلبه بر چالش‌های موجود در این بخش گام برداشت. علاوه بر این توصیه می‌شود که در مطالعات بعدی قطع آبیاری در سایر مراحل رشدی کلزا به‌ویژه مراحل رشد رویشی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته تا بتوان با حداقل استفاده از منابع آبی به بیشترین تولید دست یافت.

تشکر و قدردانی

این مقاله بر اساس نتایج یک پایان‌نامه کارشناسی ارشد تحت حمایت دانشگاه لرستان می‌باشد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

فهرست منابع

۱. اسکندری، حمداله و عالی‌زاده امرایی، اشرف، ۱۳۹۵. تأثیر آبیاری تکمیلی در مرحله رشد زایشی بر عملکرد دانه، روغن و کارآیی انرژی سیستم تولید کلزا در شرایط دیم. *مجله به زراعی کشاورزی*، ۱۸(۴)، صص. ۹۱۹-۹۰۷. **https://doi.org/10.22059/jci.2017.56663**

۲. اسکندری، حمداله و کاظمی، کامیار، ۱۴۰۳. ارزیابی تولید و کارایی مصرف آب کلزا در رژیم‌های آبیاری و سطوح ورمی‌کمپوست در تاریخ کاشت‌های متفاوت. *پژوهش‌های زراعی ایران*، ۲۲(۱)، صص. ۱۲۰-۱۰۳. **https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.83981.1263**

۳. باختری، سارا، خواجوئی نژاد، غلامرضا و محمدی نژاد، قاسم، ۱۳۹۵. تأثیر قطع آبیاری در مرحله گلدهی و محلول‌پاشی اسپرمیدین بر کمیت و کیفیت اسانس سه توده زیره سبز (Cuminum cyminum L.). *نشریه بوم‌شناسی کشاورزی*، ۸(۴)، صص. ۵۲۱-۵۳۵. **https://doi.org/10.22067/jag.v8i4.40538**

۴. بی‌نام، ۱۳۸۴. گزارشی پیرامون وضعیت صنایع روغن‌کشی و روغن نباتی با تأکید بر دانه روغنی پنبه‌دانه در ایران. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی جمهوری اسلامی ایران.

۵. بی‌نام، ۱۴۰۲. آمارنامه کشاورزی محصولات زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰. تهران: وزارت جهاد کشاورزی.

۶. حسین‌زاد، جواد، کاظمیه، فاطمه، جوادی، اکرم و غفوری، هوشنگ، ۱۳۹۲. زمینه‌ها و سازوکارهای مدیریت آب کشاورزی در دشت تبریز. *دانش آب‌وخاک*، ۲۳(۲)، صص. ۹۸-۸۵.

۷. حمزه‌پور، غلامرضا، توبه، احمد و شیخ‌زاده، پریسا، ۱۳۹۶. مطالعه همبستگی و تجزیه رگرسیون بین صفات کمی و کیفی در ارقام مختلف کلزا (*Brassica napus* L) در آرایش‌های مختلف کاشت. *مجله اکوفیزیولوژی گیاهی*. ۹(۳۱)، صص. ۱۷۱-۱۵۸.

۸. حیدری بنی، مهران، یزدان‌پناه، حجت‌الله، و محنت‌کش، عبدالمحمد، ۱۳۹۷. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد و مراحل فنولوژیکی کلزا (مطالعهٔ موردی: استان چهارمحال و بختیاری). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۰(۲)*، صص. ۳۷۳-۳۸۹. **https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.239399.1007101**

۹. حیدری، نادر، ۱۳۹۷. مسائل و چالش‌های صرفه‌جویی واقعی آب از طریق افزایش بهره‌وری آب و کاربرد سامانه‌های نوین آبیاری (یادداشت فنی). *آب و توسعه پایدار*، ۸(۴)، صص. ۱۶۹-۱۷۵. **https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i2.71076**

۱۰. خدابین، قربان.، طهماسبی سروستانی، زین‌العابدین، شیرانی راد، امیرحسین، مدرس ثانوی، سید علی‌محمد و بخشنده، اسماعیل، ۱۳۹۹. تأثیر قطع آبیاری و محلول‌پاشی روی و منگنز بر عملکرد و صفات اکوفیزیولوژیک کلزا (Brassica napus L.). *نشریه پژوهش‌های زراعی ایران*، ۱۸(۱)، صص. ۸۵-۱۰۰. **https://doi.org/10.22067/gsc.v18i1.80050**

۱۱. داشادی، مختار، گودرزی، شهرام و عبدالهی، عبدالوهاب، ۱۳۹۹. بررسی تأثیر دور آبیاری و کود نیتروژنه بر عملکرد کلزا (Brassica napus L.) (رقم پائیزه). تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۳(۳)، صص. ۸۰۳-۷۹۳. **https://doi.org/10.22077/escs.2020.2203.1551**

۱۲. دالوند، احمد، شیرانی راد، امیرحسین، خورگامی، علی و پزشک‌پور، پیام، ۱۳۹۱. بررسی تأثیر مقادیر و روش‌های تقسیط کود نیتروژن بر خصوصیات کیفی کلزا (رقم هایولا ۴۰۱) در شهرستان خرم آباد. *اولین همایش ملی توسعه پایدار کشاورزی و محیط‌زیست سالم. ۸ اسفند ۱۳۹۱ ،همدان، ایران.*

۱۳. رحیمی‌مقدم، سجاد، عزیزی، خسرو، عینی نرگسه، حامد و کلانتر احمدی، سید احمد، ۱۴۰۲. شبیه‌سازی تولید و کارایی مصرف آب ارقام بهاره کلزا در اقلیم‌های گرم و معتدل. *فصلنامه علوم محیطی*، ۲۱(۱)، صص.۱۵-۳۰. **https://doi.org/10.48308/envs.2022.1213**

۱۴. رحیمی، زینب، حسین پناهی، فرزاد و سی‌وسه مرده، عادل، ۱۳۹۸. ارزیابی عملکرد، کارایی مصرف آب و نور در ارقام حساس و مقاوم به خشکی گندم تحت سطوح مختلف آبیاری. *تولید و ژنتیک گیاهی*، ۲(۱)، صص. ۳۴-۱۹.

۱۵. رضیئی، طیب و میری، مرتضی، ۱۴۰۱. *طبقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن-کایگر*. تهران، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

۱۶. صادقی نژاد، علی‌اکبر، مدرس ثانوی، سید علی‌محمد، طباطبایی، سید علی و مدرس وامقی، سید مرتضی، ۱۳۹۳. اثر تنش کمبود آب در مراحل مختلف رشد بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب ارقام پاییزه کلزا (Brassica napus L.). *دانش آب‌وخاک*، ۲۱(۲)، صص. ۵۳-۶۴.

۱۷. عباسی، فریبرز، عباسی، نادر و توکلی، علیرضا، ۱۳۹۶. بهره‌وری آب در بخش کشاورزی؛ چالش‌ها و چشم‌اندازها. *آب و توسعه پایدار*، ۴(۱)، صص. ۱۴۱-۱۴۴.
https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.67121

۱۸. عینی نرگسه، حامد، آقاعلیخانی، مجید، شیرانی راد، امیرحسین، مختصی بیدگلی، علی و مدرس ثانوی، سید علی‌محمد، ۱۳۹۷. پاسخ ژنوتیپ‌های جدید کلزا (Brassica napus) به قطع آبیاری انتهای فصل در آب‌وهوای نیمه‌خشک. *تولیدات گیاهی*، ۴۱(۴)، صص. ۵۵-۶۸.
https://doi.org/10.22055/ppd.2018.22672.1491

۱۹. فرامرزی، سارا، آزادمرد دمیرچی، صدیف، افخمی سرای، ابراهیم و داخته هارونی، مهری، ۱۴۰۲. روغن دانه خار مریم (Silybum marianum) به‌عنوان منبع روغنی جدید خوراکی. *مجله علوم و صنایع غذایی ایران*، ۲۰(۱۴۵)، صص. ۲۳-۳۴. **http://dx.doi.org/10.22034/FSCT.20.145.23**

۲۰. گلچین، لیلی، توکلی، افشین و محسنی فرد، احسان، ۱۴۰۱. ارزیابی اثرات کاربرد سیتوکنین برتسهیم مواد فتوسنتزی و درصد روغن دانه در ارقام گلرنگ در شرایط تنش خشکی. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۳(۳)، صص. ۲۶۱-۲۴۹. **https://doi.org/10.22059/ijfcs.2021.324063.654827**

۲۱. محمدی احمد-محمودی، اسماعیل، دیهیم فرد، رضا و نوری، امید، ۱۳۹۸. ارزیابی وضعیت بهره‌وری و شاخص نسبت عرضه به تقاضای آب در چغندرقند (Beta vulgaris L.) با استفاده از مدل‌های شبیه سازی رشد در استان خراسان رضوی. *نشریه علوم زراعی ایران*، ۲۱(۳)، صص. ۲۸۲-۲۶۸.
http://dx.doi.org/10.29252/abj.21.3.268

۲۲. مدنی، حمید، نورمحمدی، قربان، مجیدی، اسلام و دهقان شعار، مجید، ۱۳۸۵. تحلیل شاخص‌های دمایی و اهمیت آن در بهینه‌سازی تولید کلزای پاییزه. علوم کشاورزی، ۱۲(۴)، صص. ۸۶۷-۸۷۶.

۲۳. نعیمی، معصومه، اکبری، غلامعلی، شیرانی‌راد، امیرحسین، مدرس ثانوی، سید علی‌محمد و سادات نوری، سید احمد، ۱۳۸۹. بررسی تأثیر تنش خشکی پایان دوره رشد بر عملکرد کمی و کیفی ارقام کلزا. به زراعی کشاورزی، ۱۲(۲)، صص. ۷۱-۶۳.

۲۴. ولی‌پور، علی، عزیزی، خسرو و رحیمی‌مقدم، سجاد، ۱۴۰۲. شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر محصول جو (*Hordeum vulgare*)آبی در استان‌های لرستان و همدان. علوم گیاهان زراعی ایران، ۵۴(۴)، صص. ۷۹-۹۱.
https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.354454.654977

25. Dirwai, T.L., Senzanje, A. and Mabhaudhi, T., 2021. Calibration and evaluation of the FAO AquaCrop model for canola (Brassica napus) under varied moistube irrigation regimes. *Agriculture*, *11*(5), p.410. **https://doi.org/10.3390/agriculture11050410**
26. Djaman, K., O'Neill, M., Owen, C., Smeal, D., West, M., Begay, D., Angadi, S.V., Koudahe, K., Allen, S. and Lombard, K., 2018. Seed yield and water productivity of irrigated winter canola (Brassica napus L.) under semiarid climate and high elevation. *Agronomy*, *8*(6), p.90. **https://doi.org/10.3390/agronomy8060090**
27. Dogan, E., Copur, O., Kahraman, A., Kirnak, H. and Guldur, M.E., 2011. Supplemental irrigation effect on canola yield components under semiarid climatic conditions. *Agricultural Water Management*, *98*(9), pp.1403-1408. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.04.006**
28. Ebaid, M., Abd El-Hady, M. A., El-Temsah, M. E., El-Gabry, Y. A., Abd-Elkrem, Y. M., Hussein, H., Abdelkader, Ebaid, M., Abd El-Hady, M.A., El-Temsah, M.E., El-Gabry, Y.A., Abd-Elkrem, Y.M., Hussein, H., Abdelkader, M.A., Eliwa, T.A., Salama, E. and Saad, A.M., 2022. Response of Canola productivity to integration between mineral nitrogen with yeast extract under poor fertility sandy soil condition. *Scientific Reports*, *12*(1), p.20216. **https://doi.org/10.1038/s41598-022-24645-0**
29. Eyni-Nargeseh, H., AghaAlikhani, M., Shirani Rad, A.H., Mokhtassi-Bidgoli, A. and

Modarres Sanavy, S.A.M., 2020. Late season deficit irrigation for water-saving: selection of rapeseed (Brassica napus) genotypes based on quantitative and qualitative features. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *66*(1), pp.126-137. **https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1602866**

30. Gaydon, D., 2014. The APSIM model–An overview. *The SAARC-Australia project-developing capacity in cropping systems modelling for South Asia*, pp.15-31.
31. Geerts, S. and Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural water management*, *96*(9), pp.1275-1284. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009**
32. George, N. and Kaffka, S., 2017. Canola as a new crop for California: A simulation study. *Agronomy Journal*, *109*(2), pp.496-509. **https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0247**
33. George, N., Thompson, S.E., Hollingsworth, J., Orloff, S. and Kaffka, S., 2018. Measurement and simulation of water-use by canola and camelina under cool-season conditions in California. *Agricultural Water Management*, *196*, pp.15-23. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.015**
34. Geries, L.S.M., El-Shahawy, T.A. and Moursi, E.A., 2021. Cut-off irrigation as an effective tool to increase water-use efficiency, enhance productivity, quality and storability of some onion cultivars. *Agricultural Water Management*, *244*, p.106589. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106589**
35. Gharib, S.H. and Meleha, M.E., 2016. The mutual effect of withholding irrigation at some growth stages and potassium fertilizer on yield and water productivity of wheat. *Journal of Plant Production*, *7*(12), pp.1303-1313. **https://dx.doi.org/10.21608/jpp.2016.47025**
36. Godoy Androcioli, L., Mariani Zeffa, D., Soares Alves, D., Pires Tomaz, J. and Moda-Cirino, V., 2020. Effect of water deficit on morphoagronomic and physiological traits of common bean genotypes with contrasting drought tolerance. *Water*, *12*(1), p.217. **https://doi.org/10.3390/w12010217**
37. Grigorieva, E., 2020. Evaluating the sensitivity of growing degree days as an agro-climatic indicator of the climate change impact: a Case Study of the Russian Far East. *Atmosphere*, *11*(4), p.404. **https://doi.org/10.3390/atmos11040404**
38. Hao, B., Xue, Q., Bean, B.W., Rooney, W.L. and Becker, J.D., 2014. Biomass production, water and nitrogen use efficiency in photoperiod-sensitive sorghum in the Texas High Plains. *Biomass and Bioenergy*, *62*, pp.108-116. **https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.008**
39. He, D., Wang, E., Wang, J. and Lilley, J.M., 2017. Genotype× environment× management interactions of canola across China: A simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*, *247*, pp.424-433. **https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.027**
40. Hoffmann, M.P., Jacobs, A. and Whitbread, A.M., 2015. Crop modelling based analysis of site-specific production limitations of winter oilseed rape in northern Germany. *Field Crops Research*, *178*, pp.49-62. **https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.018**
41. Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Boote, K.J., Singh, U., Uryasev, O., Bowen, W.T., Gijsman, A.J., Du Toit, A., White, J.W. and Tsuji, G.Y., 2004. Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0. *University of Hawaii, Honolulu, HI (CD-ROM)*.
42. Istanbulluoglu, A., Arslan, B., Gocmen, E., Gezer, E. and Pasa, C., 2010. Effects of deficit irrigation regimes on the yield and growth of oilseed rape (Brassica napus L.). *Biosystems engineering*, *105*(3), pp.388-394. **https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.12.010**
43. Kamkar, B., Daneshmand, A.R., Ghooshchi, F., Shiranirad, A.H. and Langeroudi, A.S., 2011. The effects of irrigation regimes and nitrogen rates on some agronomic traits of canola under a semiarid environment. *Agricultural Water Management*, *98*(6), pp.1005-1012. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.009**
44. Katuwal, K.B., Cho, Y., Singh, S., Angadi, S.V., Begna, S. and Stamm, M., 2020. Soil water extraction pattern and water use efficiency of spring canola under growth-stage-based irrigation management. *Agricultural Water Management*, *239*, p.106232. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106232**

45. 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., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R. L., Freebairn, D. M. and Smith, C. J. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European journal of agronomy*, *18*(3-4), pp.267-288. **https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9**
46. Majnooni-Heris, A., Nazemi, A.H. and Sadraddini, A.A., 2014. Effects of deficit irrigation on the yield, yield components, water and irrigation water use efficiency of spring canola. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, *5(2)*, pp.44-53.
47. Mohammadi-Ahmadmahmoudi, E., Deihimfard, R. and Noori, O., 2020. Yield gap analysis simulated for sugar beet-growing areas in water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, *113*, p.125988. **https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125988**
48. Morsi, N.A., Hashem, O.S., El-Hady, M.A.A., Abd-Elkrem, Y.M., El-Temsah, M.E., Galal, E.G., Gad, K.I., Boudiar, R., Silvar, C., El-Hendawy, S., Mansour, E. and Abdelkader, M.A., 2023. Assessing drought tolerance of newly developed tissue-cultured canola genotypes under varying irrigation regimes. *Agronomy*, *13*(3), p.836. **https://doi.org/10.3390/agronomy13030836**
49. Ortega-Farias, S., Villalobos-Soublett, E., Riveros-Burgos, C., Zúñiga, M. and Ahumada-Orellana, L.E., 2020. Effect of irrigation cut-off strategies on yield, water productivity and gas exchange in a drip-irrigated hazelnut (Corylus avellana L. cv. Tonda di Giffoni) orchard under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, *238*, p.106173. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106173**
50. Prescott, J.A., 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, *46*, pp.114-118.
51. Quiloango-Chimarro, C.A., Coelho, R.D., Heinemann, A.B., Arrieta, R.G., da Silva Gundim, A. and França, A.C.F., 2022. Physiology, yield, and water use efficiency of drip-irrigated upland rice cultivars subjected to water stress at and after flowering. *Experimental Agriculture*, *58*, p.e19. **https://doi.org/10.1017/S0014479722000205**
52. Rahimi-Moghaddam, S., Deihimfard, R., Nazari, M.R., Mohammadi-Ahmadmahmoudi, E. and Chenu, K., 2023. Understanding wheat growth and the seasonal climatic characteristics of major drought patterns occurring in cold dryland environments from Iran. *European Journal of Agronomy*, *145*, p.126772. **https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126772**
53. Rahimi-Moghaddam, S., Eyni-Nargeseh, H., Ahmadi, S.A.K. and 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. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106487**
54. Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J. and 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. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105570
55. Robertson, M.J. and Lilley, J.M., 2016. Simulation of growth, development and yield of canola (Brassica napus) in APSIM. *Crop and Pasture Science*, *67*(4), pp.332-344. **https://doi.org/10.1071/CP15267**
56. Robertson, M.J., Holland, J.F., Kirkegaard, J.A. and Smith, C.J., 1999, September. Simulating growth and development of canola in Australia. In *Proceedings 10th International Rapeseed Congress*, pp. 26-29. Saxton, K.E., Willey, P.H. and Rawls, W.J., 2006. Field and pond hydrologic analyses with the SPAW model. In *2006 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
57. Seifert, E., 2014. OriginPro 9.1: scientific data analysis and graphing software-software review. *Journal of chemical information and modeling*, *54*(5), p.1552. **https://doi.org/10.1021/ci500161d**
58. Shaykewich, C.F. and Bullock, P.R., 2020. Modeling Canola Phenology. *Agroclimatology: Linking Agriculture to Climate*, *60*, pp.303-325.

https://doi.org/10.2134/agronmonogr60.2018.0003

59. Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F. and Kroes, J.G., 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, *7*(2), pp.640-653. **https://doi.org/10.2136/vzj2007.0060**
60. Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W. and Brun, F., 2018. *Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment*. Academic Press.
61. Wang, S., Wang, E., Wang, F. and Tang, 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 and Pasture Science*, *63*(5), pp.478-488. **https://doi.org/10.1071/CP11332**
62. Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *63*(11), pp.1309-1313.https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2
63. Wu, B., Lin, X., Ali, M.F. and Wang, D., 2023. Development of an irrigation regime for winter wheat to save water resources by avoiding irrigation at anthesis stage. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *209*(1), pp.188-203. **https://doi.org/10.1111/jac.12615**
64. Wu, S., Ning, F., Zhang, Q., Wu, X. and Wang, W., 2017. Enhancing omics research of crop responses to drought under field conditions. *Frontiers in plant science*, *8*, p.174. **https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00174**
65. Zeleke, K.T., Luckett, D.J. and Cowley, R.B., 2014. The influence of soil water conditions on canola yields and production in Southern Australia. *Agricultural Water Management*, *144*, pp.20-32. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.016**