فصلنامه علوم محیطی، دوره بیست و یکم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲

۱۵-۳۰

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی تولید و کارایی مصرف آب ارقام بهاره کلزا در اقلیم‌های گرم و معتدل

سجاد رحیمی مقدم[۱*]، خسرو عزیزی[۱]، حامد عینی نرگسه[۲] و سید احمد کلانتر احمدی[۳]

[۱] گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

[۲] گروه علوم کشاورزی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

[۳] بخش زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی‌آباد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۴/۲۶

رحیمی مقدم، س.، خ. عزیزی، ح. عینی نرگسه و س.ا. کلانتر احمدی. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی تولید و کارایی مصرف آب ارقام بهاره کلزا در اقلیم‌های گرم و معتدل. فصلنامه علوم محیطی. ۲۱(۱): ۱۵-۳۰.

سابقه و هدف: کلزا یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی در سراسر دنیا می‌باشد. کشت این گیاه به علت درصد روغن بالای آن (حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد روغن) می‌باشد. با این حال، در سال‌های اخیر سطح زیر کشت گیاه کلزا به علت کمبود آب کاهش پیدا کرده است. کاربرد ارقام مقاوم به خشکی و دارای کارایی مصرف آب بالا می‌تواند به توسعه سطح زیرکشت و افزایش تولید این گیاه کمک کند. بنابراین این مطالعه به منظور ارزیابی کارایی مصرف آب ارقام بهاره کلزا در اقلیم‌های گرم و معتدل انجام شد.

مواد و روش‌ها: هدف از این پژوهش بررسی ارقام مختلف به عنوان راهکاری برای افزایش تولید کلزا و بهبود کارایی مصرف آب این گیاه در اقلیم‌های مختلف در استان‌های خوزستان و لرستان بود. برای این هدف چهار شهرستان شامل دو شهرستان خرم‌آباد و کوهدشت در استان لرستان به عنوان اقلیم‌های معتدل و نیمه خشک و دو شهرستان دزفول و شوشتر در استان خوزستان به عنوان اقلیم‌های گرم و خشک انتخاب شدند. ابتدا داده‌های اقلیمی بلند مدت روزانه (شامل دمای کمینه و بیشینه، بارندگی و تابش روزانه) این شهرستان‌ها جمع‌آوری شد. ارقامی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند شامل Hyola308 (زودرس)، Hyola401 (متوسطرس) و RGS003 (دیررس) بودند. همچنین به منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا تحت مناطق مختلف از مدل APSIM-Canola استفاده گردید. در این مطالعه برای تمامی تجزیه‌های آماری و رسم شکل‌ها از نرم افزار OriginPro 9.1 استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج این مطالعه نشان داد که صفات مورد بررسی (شامل عملکرد دانه، زیست توده، کارایی مصرف آب، وزن دانه، تبخیر و تعرق واقعی، میانگین دما در طول دوره رشد و طول دوره رشد کلزا) تحت تاثیر رقم و منطقه (نوع اقلیم) قرار داشتند. بر اساس نتایج به دست آمده در مجموع آزمایش‌های بلند مدت شبیه‌سازی بالاترین مقدار عملکرد دانه و کارایی مصرف آب (به ترتیب ۳۰۳۷ کیلوگرم در هکتار و ۶/۹ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر) در سطح رقم متوسط رس Hyola401 به دست آمد. همچنین نتایج مشخص نمود که مناطق

* Corresponding Author: *Email Address*. rahimi.s@lu.ac.ir

http://dx.doi.org/10.48308/envs.2022.1213

http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1402.21.1.5.1

معتدل و نیمه خشک نسبت به مناطق گرم و خشک مقدار عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب را به ترتیب ۲۵۰۷ کیلوگرم در هکتار، ۱۰۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و ۲/۷ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر افزایش می‌دهد. تیمار خرم‌آباد × Hyola401 به علت میانگین کمتر دما در طول دوره رشد (۱۰/۹ درجه سانتی‌گراد) و طول دوره رشد (۲۲۴/۹ روز) بیشتر، بالاترین مقدار کارایی مصرف آب، عملکرد دانه و زیست توده (به ترتیب ۹ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر، ۴۹۵۴ و ۱۷۹۴۳ کیلوگرم در هکتار) را به خود اختصاص داد در حالی که کمترین مقدار صفات مذکور در تیمار دزفول × Hyola308 (به ترتیب ۵ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر، ۱۳۶۹ و ۵۵۱۴ کیلوگرم در هکتار) ثبت گردید.

نتیجه‌گیری: به طور کلی نتایج نشان داد که توسعه کشت کلزا در مناطق معتدل می‌تواند در جهت افزایش تولید این گیاه در کشور و در راستای پایداری سیستم‌های کشت کلزا قرار گیرد. همچنین استفاده از یک رقم متوسطرس مانند Hyola401 در هر دوی اقلیم‌های معتدل و گرم می‌تواند از طریق تولید بیشتر به ازای آب مصرفی باعث افزایش کارایی مصرف آب و پایداری سیستم‌های تولید کلزا مورد توجه قرار بگیرد.

واژه‌های کلیدی: APSIM-Canola، زیست توده، عملکرد دانه، مناطق نیمه خشک.

مقدمه

با سیر افزایشی نرخ رشد جمعیت در جهان، تقاضا برای تولیدات کشاورزی افزایش خواهد یافت. اگر چه گندم، ذرت، برنج و حبوبات (از جمله نخود، عدس، لوبیا و غیره) غذای عمده انسان‌ها را تشکیل می‌دهند، اما در این میان نقش دانه‌های روغنی غیر قابل انکار می‌باشد (Koocheki and Khajeh Hosseini, 2008). روغن خوراکی یکی از محصولات غذایی عمده کشور است که بیش از ۹۰٪ نیاز داخلی آن با صرف هزینه‌های زیاد از کشورهای خارجی تأمین می‌شود (Mostafavi Rad *et al.*, 2014). امروزه کلزا (*Brassica napus* L.) یکی از پنج گیاه دانه روغنی مهم به شمار می‌رود که در سراسر جهان کشت می‌شود (Miri, 2007; Khattab *et al.*, 2012; Liersch *et al.*, 2013). روغن تولید شده از آن غذای اصلی و منبع انرژی مهمی محسوب می‌شود. کلزا به دلیل ویژگی‌های خاص مانند سازگاری با شرایط آب و هوایی، ارزش تناوبی بالا، کنترل علف‌های هرز، دارا بودن رقم‌های بهاره و پاییزه، محتوای بالای روغن دانه (۴۰-۴۴ درصد) به‌عنوان نقطه امیدی برای تأمین روغن خوراکی موردنیاز کشور به شمار می‌آید (Rezaeizadeh *et al.*, 2011). همچنین این گیاه برای تناوب‌های زمستانه-بهاره، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب است (Hamzei and Soltani, 2012).

طبق آخرین گزارش وزارت جهاد کشاورزی کل سطح زیر کشت کلزا در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ حدود ۱۰۲ هزار هکتار است (Anonymous, 2017). این در حالی است که در سراسر دنیا سطح زیر کشت این محصول مهم به بیش از ۳۶ میلیون هکتار می‌رسد (FAO, 2018). بنابراین تحقیقات جدید برای افزایش سطح زیر کشت کلزا در کشور مهم و ضروری است. با توجه به این‌که ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک واقع شده (Deihimfard *et al.*, 2018) و با محدودیت آب مواجه می‌باشد (Shirani Rad *et al.*, 2013) بنابراین توجه به آثار کمبود آب در طول فصل رشد گیاه ضروری است. یکی از راه‌حل‌های افزایش تولید محصول در شرایط محدودیت منابع آب بهبود ژنتیکی یا به‌بیان‌دیگر، کاربرد ارقام مقاوم به خشکی هستند (Nemoto *et al.*, 1998). در شرایط کمبود آب، رقم‌های مقاوم توانایی بیشتری برای سازگاری به این شرایط دارند (Shirani Rad *et al.*, 2013). اما در این زمینه اطلاعات کافی برای انتخاب ارقام جدید کلزا با پتانسیل عملکرد بالا تحت شرایط محدودیت آب وجود ندارد (Naderi and Emam, 2014).

برای ارزیابی عملکرد و کارایی مصرف آب گیاهان مختلف تحت شرایط مختلف آب و هوایی روش‌های مختلفی از جمله آزمایش‌های مزرعه‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی وجود دارد. امروزه در سراسر دنیا با توجه به اینکه اجرای آزمایش‌های مزرعه‌ای مستلزم پرداخت هزینه بالایی است، مدل‌های شبیه‌سازی با توجه به کاهش هزینه‌ها و همچنین سهولت استفاده مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2019; Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2018; Deihimfard *et al.*, 2019; Eyni-Nargeseh *et al.*, 2019a; Chenu *et al.*, 2017). این مدل‌ها می‌توانند برای بررسی اثرات مختلف از جمله تغییر اقلیم (Eyni-Nargeseh *et al.*, 2019a; Liu *et al.*, 2013)، مدیریت تاریخ کاشت (Deihimfard *et al.*, 2019)، اثر رقم (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2018) و بررسی عملکرد و کارایی مصرف آب (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2019) در محصولات مختلف مورد استفاده قرار بگیرند.

در نهایت محدودیت منابع آبی برای تولید محصولات کشاورزی در کشور (Bahrani and Pourreza, 2016)، ایجاب می‌کند به منظور دستیابی به عملکرد بالاتر در گیاهان روغنی و از جمله کلزا تدابیر ویژه‌ای اندیشیده شود. بنابراین شناسایی ارقام دارای کارایی مصرف آب بالا از اهمیت بسزایی برخوردار است. با توجه به مطالب ذکرشده و لزوم توجه به ارقام مقاوم دارای عملکرد دانه و کارایی مصرف آب بالا و همچنین استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به عنوان ابزاری برای کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان، هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی و بررسی کارایی مصرف آب ارقام بهاره کلزای کشور در اقلیم‌های مختلف کشور (معتدل و نیمه خشک و گرم و خشک) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ایستگاه‌های مورد بررسی

تحقیق حاضر در دو استان خوزستان و لرستان با دو اقلیم متفاوت انجام شد (جدول ۱). در هر استان دو شهرستان انتخاب شد که شامل شهرستان‌های خرم‌آباد و کوهدشت در استان لرستان و دزفول و شوشتر در استان خوزستان بودند. معیارهایی که برای انتخاب این مناطق در نظر گرفته شد شامل سطح زیرکشت کلزا و تنوع آب و هوایی بود. لرستان از استان‌های غربی ایران دارای مساحتی به میزان ۲۸۳۰۸ کیلومتر مربع است و بین ۴۶ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۳۲ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۲ دقیقهٔ عرض شمالی از خط استوا قرار گرفته است که از شمال به استان اراک، از غرب به استان ایلام، از شرق به استان اصفهان و از جنوب به استان خوزستان محدود می‌شود. این استان دارای آب و هوای معتدل می‌باشد که از نظر سطح زیر کشت کلزا دارای ۱۷۸۵ هکتار (۲ درصد کل کشور) می‌باشد (Anonymous, 2017). استان خوزستان نیز با مساحتی برابر با ۶۴۰۵۷ کیلومتر مربع در محدوده ۲۹ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی از خط استوا و ۴۷ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۹ دقیقه از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد که در جنوب غرب ایران واقع شده است و از شمال به استان لرستان، از جنوب به خلیج فارس، از شرق به استان‌های کهگیلویه و بویراحمد و چهارمحال بختیاری و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود. استان خوزستان دارای آب و هوای گرم و خشک است که دارای ۱۴/۳ درصد (۱۲۸۷۰ هکتار) کل سطح زیر کشت کلزا در کشور می‌باشد (Anonymous, 2017).

جدول ۱- ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی مناطق مورد مطالعه
Table 1. Climatic and geographical properties of study locations

تاریخ کشت (مرسوم) **Sowing date (common)**	سطح زیر کشت **Area under cultivation (ha)**	دوره شبیه‌سازی Simulation period	نوع اقلیم **Climate type**	بارندگی تجمعی سالانه **Annual cumulative rainfall (mm)**	میانگین دمای سالانه **Annual mean temperature (°C)**	ارتفاع Elevation (m)	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	مناطق Locations
۱ مهر 23-Sep	184	1980-2016	نیمه خشک و معتدل Semi-arid and temperate	486.2	16.5	1147	33.6	48.3	خرم‌آباد Khorramabad
۲۰ آبان 11-Nov	2515	1961-2016	خشک و گرم Arid and hot	318.7	24.5	143	32.4	48.38	دزفول Dezful
۲۰ آبان 11-Nov	1685	1994-2016	خشک و گرم Arid and hot	302.0	26.8	65	32.05	48.83	شوشتر Shushtar
۱ مهر 23-Sep	61	1997-2016	نیمه خشک و معتدل Semi-arid and temperate	369.8	16.0	1195	33.5	47.4	کوهدشت Kuhdasht

مدل زراعی APSIM-Canola

زیر مدل کلزا در APSIM[1] در CSIRO[2] و در اوخر دهه ۱۹۹۰ توسعه داده شد (Robertson *et al.*, 1999). در ابتدا این مدل برای ارقام بهاره در سرتاسر طیف گسترده‌ای از محیط‌ها در مناطق نیمه گرمسیری شمالی، جنوبی و شرقی در استرالیا آزمایش شد (Robertson and Lilley, 2016). همچنین اخیرا این مدل برای ارقام زمستانه کلزا در جنوب استرالیا (Christy *et al.* 2013) چین (Wang *et al.*, 2012) و آلمان (Hoffmann *et al.*, 2015) مورد استفاده قرار گرفته است. مدل زراعی APSIM-Canola رشد، نمو و تجمع نیتروژن را در پاسخ به دما، فتوپریود، تابش، آب خاک و عرضه نیتروژن در یک مقیاس روزانه شبیه‌سازی می‌کند (Robertson and Lilley, 2016). بیشینه و کمینه دمای روزانه، تابش و بارندگی داده‌های اقلیمی ورودی مدل هستند. همچنین داده‌های خاکی شامل مقدار آب قابل دسترس گیاه، تبخیر خاک، پارامترهای رواناب و ویژگی‌های خاکی و ماده آلی برای شبیه‌سازی آب خاک و بیلان نیتروژن مورد نیاز می‌باشد. در تحقیق حاضر با توجه به اینکه تمامی شبیه‌سازی‌ها در شرایط پتانسیل و عدم محدودیت آب و نیتروژن صورت گرفت ورودی‌های آب و نیتروژن در مدل به صورت بهینه در نظر گرفته شد به‌طوری‌که به گیاه کلزا از لحاظ نیتروژن و آب تنشی وارد نشد. بنابراین داده‌های ورودی مدل که برای مناطق مختلف در نظر گرفته شدند شامل اطلاعات آب و هوایی، داده‌های گیاهی و اطلاعات مدیریتی بودند.

داده‌های اقلیمی بلندمدت مورداستفاده در این تحقیق شامل دمای کمینه و بیشینه دما (°C)، بارندگی (mm) و تعداد ساعات آفتابی هستند که از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شدند. این داده‌ها از زمان تاسیس ایستگاه هواشناسی تا سال ۱۳۹۵ (معادل ۲۰۱۶ میلادی) جمع‌آوری گردیدند (جدول ۱). داده‌های مذکور به‌عنوان ورودی مدل‌های اقلیمی و مدل شبیه‌سازی رشد گیاه زراعی مورد استفاده قرار گرفتند. به دلیل اینکه در

ایستگاه‌های هواشناسی در بعضی از ماه‌های سال داده‌ی هواشناسی ثبت نشده و در برخی موارد داده‌های پرت وجود داشت، داده‌های پرت و گم شده در ایستگاه‌های مختلف با استفاده از برنامه WeatherMan[3] (Hoogenboom *et al.*, 2003) اصلاح و بازسازی شدند. همچنین با توجه به اینکه در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی کشور، مقدار تابش روزانه ثبت نشده بود با در اختیار داشتن تعداد ساعت آفتابی، تابش روزانه با استفاده از رابطه آنگستروم (Prescott, 1940) به‌صورت زیر تخمین زده شد:

$$R_s = \left(a + b\,\frac{n}{N}\right) R_a \qquad (1)$$

در این معادله، R_s نشان دهنده‌ی تابش روزانه (مگاژول در مترمربع)، n تعداد ساعات آفتابی، N بیشینه تعداد ساعات آفتابی ممکن و R_a تابش فرازمینی[4] می‌باشد. پارامترهای a و b ضرایب آنگستروم کالیبر شده محلی هستند. در این تحقیق مقدار پارامترهای a و b برای مناطق مختلف به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شد.

داده‌های گیاهی شامل ضرایب ژنتیکی ارقام Hyola308، Hyola401 و RGS003 بودند که مدل در شرایط پتانسیل واسنجی و اعتبار سنجی شد. برای این منظور از یک آزمایش مزرعه‌ای در سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ استفاده گردید. آزمایش به صورت طرح کرت‌های خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در دو سال (۱۳۸۴ و ۱۳۸۵) انجام شد (Kalantar Ahmadi, 2009). کرت‌های اصلی شامل تاریخ کاشت در سه سطح (۱۰ آبان، ۲۵ آبان و ۱۰ آذر) و کرت‌های فرعی شامل ارقام مختلف در سه سطح (Hyola308، Hyola401 و RGS003) بودند. داده‌های سال اول شامل روز تا گلدهی، روز تا رسیدگی و عملکرد دانه به منظور واسنجی مدل و تخمین ضرایب ژنتیکی ارقام مختلف (جدول ۲) مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین داده‌های سال دوم و صفت عملکرد دانه به منظور اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین اطلاعات مدیریتی شامل تاریخ‌های کشت مختلف (جدول ۱) از طریق مکاتبه شخصی با مراکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان‌های لرستان و خوزستان تهیه شد. سایر عملیات مدیریتی شامل تراکم (۸۰ بوته در متر مربع)، خاکورزی (به روش مرسوم)، فاصله بین ردیف (۳۰ سانتی‌متر)، عمق کاشت (۳ سانتی‌متر) در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت در نظر گرفته شد.

جدول ۲– ضرایب ژنتیکی برای ارقام مختلف کلزا در مدل زراعی APSIM-Canola

Table 2. The genetic coefficient for different canola cultivars in the APSIM-Canola crop model

ضریب Coefficient	رقم Cultivar			واحد Unit
	RGS003	Hyola401	Hyola308	
درجه روز رشد تجمعی مورد نیاز از مرحله سبز شدن تا پایان مرحله جوانی Cumulative thermal time required from emergence to end of juvenile	350	300	235	درجه روز رشد °Cd
بیشینه درجه روز رشد مورد نیاز برای تکمیل مرحله جوانی بدون بهاره سازی Maximum thermal time required to complete the juvenile process at no vernalization	500	460	395	درجه روز رشد °Cd
درجه روز رشد تجمعی مورد نیاز از مرحله گلدهی تا مرحله شروع پر شدن دانه Cumulative thermal time required from flowering to start grain-filling	200	200	200	درجه روز رشد °Cd
بیشینه تعداد روز برای تکمیل فرآیند بهاره‌سازی Maximum vernal days required to complete the vernalisation process	25	25	25	روز day

آزمایش‌ها و تیمارهای شبیه‌سازی، صفات مورد بررسی و تجزیه‌های آماری

آزمایش‌های بلند مدت شبیه‌سازی از سه رقم، چهار منطقه و تعداد سال‌های شبیه‌سازی شده در هر منطقه تشکیل شدند. با در نظر گرفتن موارد فوق آزمایش‌های شبیه‌سازی تقریبا شامل ۴۰۸ آزمایش شبیه‌سازی بودند

[(۳۷ سال × سه رقم : خرم‌آباد) + (۵۶ سال × سه رقم : دزفول) + (۲۳ سال × سه رقم : شوشتر) + (۲۰ سال × سه رقم :کوهدشت)]. از نظر اقلیم و طبقه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن (Karki *et al.*, 2016) خرم‌آباد و کوهدشت دارای اقلیم معتدل و نیمه خشک و دزفول و شوشتر دارای اقلیم گرم و خشک بودند. ارقامی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند ارقام Hyola308 (زودرس)، Hyola401 (متوسطرس) و RGS003 (دیررس) بودند این ارقام بیشترین سطح زیر کشت را در گروه رسیدگی خود در مناطق مورد مطالعه دارند.

به منظور ارزیابی مدل زراعی و همچنین مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده از شاخص‌های مختلفی استفاده شد. بدین منظور از شاخص‌های آماری ضریب تبیین[۵] (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده[۶] (NRMSE)، میانگین خطای اریب[۷] (MBE) و خط یک به یک با توجه به رابطه‌های زیر استفاده شد:

$$NRMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (۲)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)}{n} \quad (۳)$$

در این معادلات S داده شبیه‌سازی شده، O داده مشاهده شده $\bar{O}$ میانگین داده مشاهده شده و n تعدات مشاهدات می‌باشد. در زمینه دقت شبیه‌سازی مدل هنگامی که جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده و میانگین خطای اریب به سمت صفر میل کند دقت افزایش می‌یابد و همچنین نزدیک بودن خط یک به یک و خط رگرسیون نشان دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی می‌باشد.

پس از اجرای مدل، خروجی‌های موردنظر شامل عملکرد دانه، تبخیر و تعرق، زیست توده و وزن دانه در مناطق موردبررسی در استان‌های لرستان و خوزستان تجزیه و تحلیل شدند. همچنین برای محاسبه کارایی مصرف آب از رابطه زیر استفاده شد (Rahimi-Moghadam *et al.*, 2019):

$$\mathrm{WUE} = \frac{\mathrm{Y}}{\mathrm{ET}} \quad (۴)$$

در این رابطه Y: عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده (کیلوگرم در هکتار) و ET: تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی‌شده (میلی‌متر) در طول فصل رشد (از کاشت تا برداشت) می‌باشد. در این مطالعه برای تمامی تجزیه‌های آماری و رسم شکل‌ها از نرم افزار OriginPro 9.1 (Seifert, 2014) استفاده گردید.

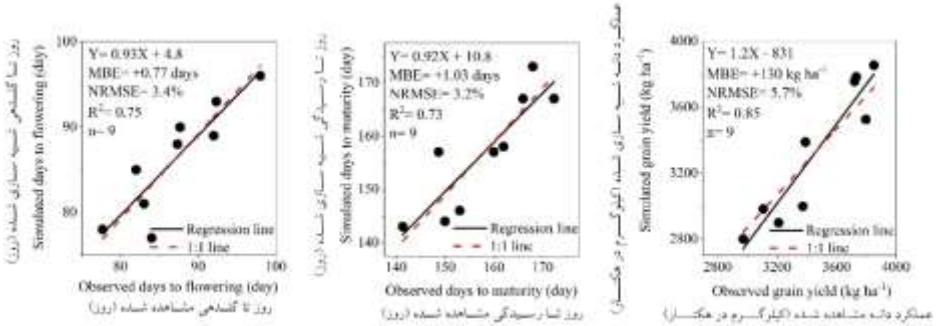
نتایج و بحث

ارزیابی مدل زراعی APSIM-Canola

نتایج حاصل از واسنجی مدل در مراحل گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیکی سه رقم در تاریخ کاشت‌های نشان داد که مدل با دقت خوبی مراحل مذکور را شبیه‌سازی کرده است (شکل ۱)، به‌طوری‌که NRMSE، MBE و R^2 به عنوان شاخص‌های کارکرد مدل برای روز تا گلدهی به‌ترتیب برابر ۳/۴ درصد، ۰/۷۷+ روز و ۰/۷۵ و برای روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی برابر ۳/۲ درصد، ۱+ روز و ۰/۷۳ بود (شکل۱). همچنین نتایج واسنجی مدل تحت تاریخ کاشت‌ها و ارقام مختلف برای عملکرد دانه مشخص کرد که دقت مدل در حد قابل قبولی قرار دارد به‌طوری‌که مقادیر NRMSE، MBE و R^2 به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی دقت مدل برای عملکرد دانه ۵/۷ درصد، ۱۳۰+ کیلوگرم در هکتار و و ۰/۸۵ به دست آمد (شکل ۱).

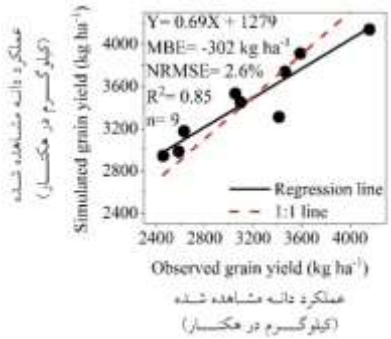
نتایج اعتبارسنجی مدل برای سه رقم سینگل‌کراس Hyola308، Hyola401 و RGS003 نشان داد که مدل APSIM-Canola دقت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد دانه دارد، به‌طوری‌که مقادیر NRMSE، MBE و R^2 برای ارقام مختلف Hyola308، Hyola401 و RGS003 در تاریخ کاشت‌های متفاوت به ترتیب ۲/۶ درصد، ۳۰۲- کیلوگرم در هکتار و ۰/۸۵ بود (شکل ۲). همچنین نزدیکی خط یک به یک و خط رگرسیون نشان‌دهنده دقت خوب شبیه‌سازی مدل گیاه زراعی و نزدیکی نقاط شبیه‌سازی و مشاهده شده می‌باشد (شکل ۲). بر طبق مطالعات مختلف (Deihimfard *et al.*, 2018; Rahimi-Moghadam *et al.*,

2018; Rahimi-Moghadam *et al.*, 2019) مقدار دامنه‌ی بدست آمده از شاخص‌های آماری مختلف نشان دهنده دقت بالا و خوب مدل در شبیه‌سازی صفت‌های بررسی شده است.



شکل ۱- نتایج واسنجی مدل APSIM-Canola برای ارقام کلزا در تاریخ کاشت‌های مختلف

Fig. 1- Results of the APSIM-Canola model calibration for canola cultivars on different sowing dates

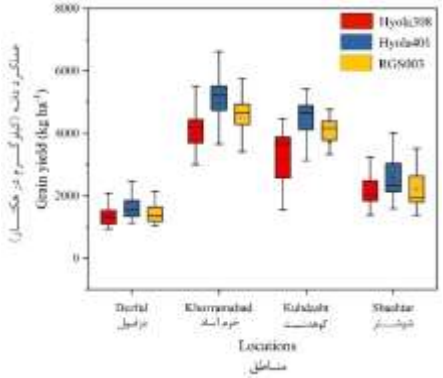


شکل ۲- اعتبارسنجی عملکرد دانه برای ارقام مختلف کلزا در تاریخ کاشت‌های مختلف

Fig. 2- Validation of grain yield for different canola cultivars on different sowing dates

عملکرد دانه

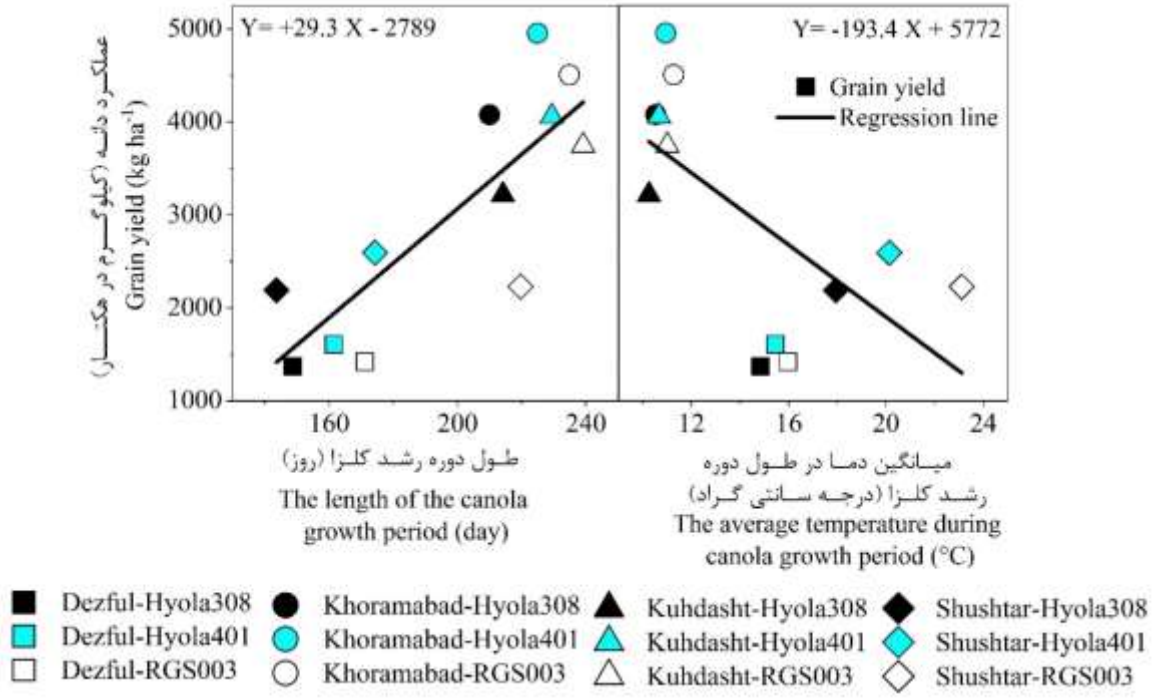
میانگین عملکرد در اکوسیستم‌های کلزای استان خوزستان و لرستان در سراسر مناطق و ارقام برابر با ۲۷۶۰ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۳). همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود مقدار عملکرد دانه در مناطق (اقلیم‌ها)، ارقام و سال‌های مختلف بسیار متفاوت بود. این تغییرات به‌خوبی در شکل ۳ و منطقه دزفول و کوهدشت قابل مشاهده است به طوری که در کوهدشت تغییرات عملکرد دانه کلزا (طول باکس پلات‌ها در شکل ۳) در تمامی تیمارهای رقم (به ویژه در رقم Hyola308 از ۲۹۸۰ تا ۳۸۶۵ کیلوگرم در هکتار) بسیار بالا می‌باشد. در نقطه مقابل در شهرستان دزفول تغییرات عملکرد دانه در تیمارهای مختلف از عملکرد ۱۲۱۴ تا ۱۶۹۸ کیلوگرم در هکتار متغیر بود (شکل ۳).



شکل ۳- عملکرد دانه کلزا در تیمارهای مختلف رقم و منطقه

Fig. 3- Grain yield of canola in different cultivar and location treatments

در سراسر ارقام، مناطق معتدل و نیمه خشک (خرم آباد و کوهدشت) نسبت به مناطق گرم و خشک (دزفول و شوشتر) از لحاظ عملکرد دانه دارای کارکرد بهتری بودند به طوری که در مناطق معتدل میزان عملکرد دانه کلزا برابر ۴۲۲۲ کیلوگرم در هکتار و در مناطق گرم برابر با ۱۷۱۵ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۳). در بین ارقام مختلف در سراسر مناطق رقم Hyola401 بیشترین عملکرد دانه (۳۰۳۷ کیلوگرم در هکتار) و رقم Hyola308 کمترین مقدار (۲۵۱۰ کیلوگرم در هکتار) این صفت را به خود اختصاص دادند (شکل ۳). همچنین با در نظر گرفتن تیمارهای منطقه و رقم اختلافی برابر با ۳۵۸۵ کیلوگرم در هکتار ایجاد شد به طوری که بالاترین عملکرد دانه در اثر متقابل Hyola401 × خرم‌آباد (۴۹۵۴ کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقدار در برهمکنش Hyola308 × دزفول (۱۳۶۹ کیلوگرم در هکتار) ثبت گردید (شکل ۳). در مناطق معتدل دو عامل بر افزایش عملکرد این مناطق نسبت به مناطق گرم تاثیر گذار بود. اولین عامل میانگین دما در طول دوره رشد کلزا در این مناطق بود. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود میانگین دما در طول دوره رشد در مناطق معتدل (۱۰/۸ درجه سانتی‌گراد) بسیار کمتر از مناطق گرم (۱۷/۹ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود کلزا بتواند طول دوره رشدی خود را افزایش دهد به طوری که با درنظر گرفتن میانگین ارقام، طول دوره رشد کلزا در مناطق معتدل ۵۵ روز بیشتر از مناطق گرم است (شکل ۴). افزایش دما (میانگین دمای روزانه بیشتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد) باعث کاهش طول دوره رشد می‌شود و به موازات آن طول پرشدن دانه کاهش می‌یابد و در نتیجه عملکرد دانه کاهش خواهد یافت. نتایج رگرسیون بین عملکرد دانه و میانگین دما با شیب منفی (۱۹۳/۴-) و بین عملکرد دانه و طول دوره رشد کلزا با شیب مثبت (۲۹/۳+) نیز موید این موضوع می‌باشد (شکل ۴). وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2004) نیز بیان داشتند که درجه حرارت بالا باعث تسریع در نسبت رشد و توسعه گیاه شده و باعث تخریب گل‌ها و کاهش عملکرد دانه گردید. بسیاری از مطالعات دیگر نیز بیانگر تاثیر منفی میانگین دما بر طول دوره رشد و عملکرد دانه و تاثیر مثبت افزایش طول دوره رشد بر عملکرد دانه ذرت هستند (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2019; Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2018).

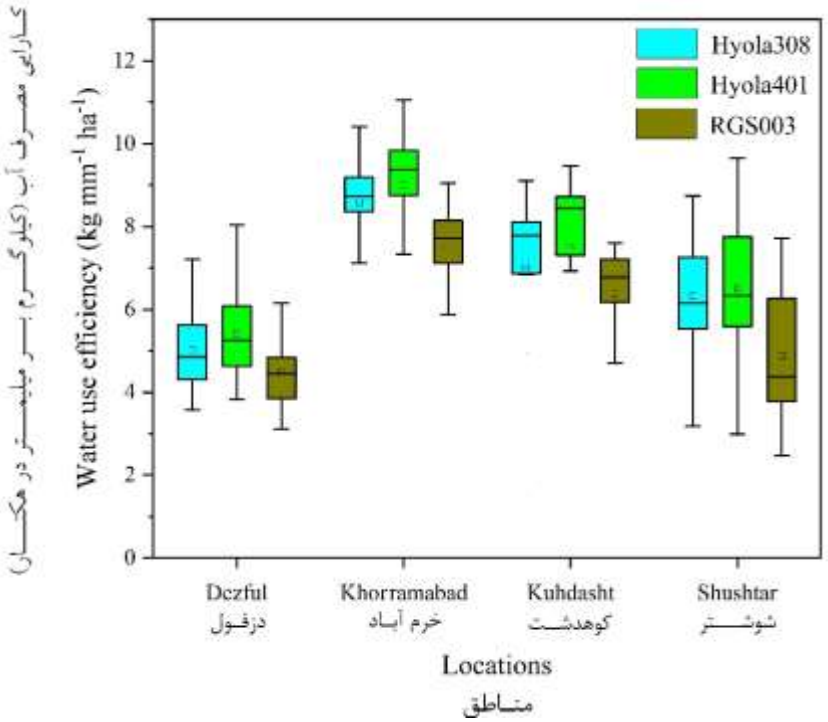


شکل ۴- رگرسیون بین عملکرد دانه کلزا با میانگین دما در طول دوره رشد و طول دوره رشد کلزا در مناطق و ارقام مختلف

Fig. 4- Regression analysis of grain yield of canola, the average temperature during the canola growth period and the length of the canola growth period in different cultivars and locations

کارایی مصرف آب و تبخیر و تعرق

نتایج نشان داد، رقم Hyola401 در تمامی مناطق کارایی مصرف آب بالاتری نسبت به ارقام دیگر داشت (شکل ۵). همچنین در تمامی ارقام، شهرستان خرم‌آباد با کارایی مصرف آب ۸/۴ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر نسبت به سایر مناطق دارای برتری بود. در بین تمامی تیمارهای آزمایش، بالاترین کارایی مصرف آب با مقدار ۹ کیلوگرم بر میلی‌متر در هکتار در شهرستان خرم‌آباد و رقم Hyola401 به دست آمد. همچنین تیمار شهرستان دزفول × Hyola308 (۵ کیلوگرم بر میلی‌متر در هکتار) کمترین کارکرد را از این لحاظ به خود اختصاص داد (شکل ۵).



شکل ۵- کارایی مصرف آب کلزا در تیمارهای مختلف رقم و منطقه

Fig. 5- Water use efficiency of canola in different cultivar and location treatments

به طور میانگین کشت کلزا در استان‌های خوزستان و لرستان در حال حاضر تبخیر و تعرقی معادل ۴۱۰/۷ میلیمتر دارد که با توجه به منطقه و رقم متفاوت می‌باشد (جدول ۳). در این بین در تمامی مناطق، تبخیر تعرق در رقم دیررس RGS003 (۴۵۵/۳ میلی‌متر) نسبت به ارقام زودرس (۳۶۳/۴ میلی‌متر) و متوسط‌رس (۴۱۳/۴ میلی‌متر) بیشتر بود. همچنین به طور میانگین در سراسر ارقام مورد بررسی مقدار تبخیر تعرق در مناطق معتدل و نیمه خشک مانند خرم‌آباد و کوهدشت (۵۲۶/۶ میلی‌متر) نسبت به مناطق گرم و خشک مورد مطالعه یعنی دزفول و شوشتر (۳۲۸ میلی‌متر) بیشتر بود (جدول ۳). در واقع تبخیر و تعرق بیشتر در مناطق معتدل نیمه خشک را می‌توان به طول دوره رشد بیشتر آن‌ها نسبت داد که در نهایت موجب تولید عملکرد دانه بیشتر در این مناطق شده است. دیهیم‌فرد و همکاران (Deihimfard *et al.*, 2017) با بررسی نیاز آبیاری و کارایی مصرف آب گندم در استان خوزستان گزارش کردند که مناطقی با عملکرد بالا (مانند ایذه) به دلیل طول دوره رشد و همچنین تبخیر-تعرق بیشتر توانستند بیشترین عملکرد دانه را به خود اختصاص دهند. آن‌ها همچنین گزارش کردند که بین عملکرد دانه گندم با طول دوره رشد و تبخیر-تعرق یک همبستگی مثبت معنی‌دار وجود دارد در حالی که عملکرد دانه با دمای طول دوره رشد یک همبستگی منفی نشان داد.

جدول ۳- میانگین زیست توده، وزن دانه و تبخیر و تعرق واقعی در ارقام و مناطق مختلف
Table 3. Mean biomass, grain weight, and actual evapotranspiration in different cultivars and locations

منطقه Location	رقم Cultivar	زیست توده (کیلوگرم در هکتار) Biomass (kg ha^{-1})	وزن دانه (گرم در متر مربع) Grain weight (g m^{-2})	تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر) Actual evapotranspiration (mm)
خرم‌آباد Khorramabad	Hyola308	16478 ± 518	407.7 ± 13	471 ± 8.3
	Hyola401	17943 ± 646	495.4 ± 19.6	542 ± 11
	RGS003	19705 ± 599	450.5 ± 13.7	597.7 ± 8.3
دزفول Dezful	Hyola308	5514 ± 160	136.9 ± 4	272.7 ± 4.2
	Hyola401	5839 ± 162	160.8 ± 4.4	297.8 ± 4.3
	RGS003	6206 ± 167	142.1 ± 3.8	317.6 ± 4.7
شوشتر Shushtar	Hyola308	8825 ± 387	219.1 ± 9.5	349.4 ± 7.4
	Hyola401	9286 ± 471	259.3 ± 13	404.7 ± 10.7
	RGS003	9708 ± 526	222.9 ± 12	468.2 ± 11
کوهدشت Kuhdasht	Hyola308	13177 ± 961	321.6 ± 26.3	437.9 ± 18.8
	Hyola401	14868 ± 1083	405.8 ± 34.1	513.9 ± 23.1
	RGS003	16428 ± 1106	374.5 ± 26	569.5 ± 24.3

به طور کلی کارایی مصرف آب با افزایش عملکرد گیاه افزایش و با افزایش تبخیر و تعرق کاهش می‌یابد. با وجود اینکه مقدار تبخیر و تعرق در مناطق معتدل نسبت به مناطق گرم و خشک بیشتر بود ولی کارایی مصرف آب این مناطق نسبت به مناطق گرم به علت عملکرد دانه بسیار بیشتر (۴۲۲۲ کیلوگرم در هکتار در مقابل ۱۷۱۵ کیلوگرم در هکتار) به ازای مقدار آب مصرفی بالاتر بود (شکل‌های ۳ و ۵، جدول ۳). در واقع در مناطق معتدل سهم تعرق نسبت به تبخیر بیشتر بوده و آب بیشتر صرف این فرآیند تولیدی گردیده است. در تحقیقی بر کارایی مصرف آب ذرت نشان داده شد که در برخی از مناطق استان خوزستان با وجود آب مصرفی بیشتر در ذرت، به علت تولید عملکرد دانه بیشتر کارایی مصرف آب بیشتر بود (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2018).

تاثیر مقدار عملکرد دانه در تعیین کارایی مصرف آب را نیز می‌توان در ارقام مختلف مشاهده نمود جایی که رقم Hyola401 با وجود ۵۰ میلی‌متر تبخیر و تعرق بیشتر نسبت به رقم Hyola308 ولی با تولید ۵۲۷ کیلوگرم در هکتار عملکرد بیشتر نسبت به رقم زودرس Hyola308 دارای کارایی مصرف آب بیشتری بود (شکل‌های ۳ و ۵، جدول ۳). تاثیر ژنتیک و نوع رقم کلزا بر تعیین مقدار عملکرد دانه این گیاه در بسیاری از مطالعات و گزارش‌ها تایید شده است (Eyni-Nargeseh,*et al.*, 2019b; Shirani Rad *et al.*, 2013). در واقع هر رقم به دلیل منحصر به فرد بودن ساختار ژنتیکی پاسخ متفاوتی به شرایط محیطی نشان می‌دهد و همین امر موجب دستیابی به عملکردهای متفاوت رقم‌ها تحت شرایط محیطی مختلف می‌شود. به طور کلی نتایج مشخص کرد که اگرچه در حال حاضر در مناطق معتدل و نیمه خشک مانند استان لرستان سطح زیر کشت کلزا (۲ درصد کشور) نسبت به مناطق گرم و خشک مانند استان خوزستان (۱۴/۳ درصد کشور) بسیار پایین می‌باشد (جدول ۱) ولی در این مناطق پتانسیلی برای افزایش سطح زیر کشت کلزا به دلیل مقدار عملکرد دانه بالا و کارایی مصرف آب بیشتر وجود دارد و توسعه این گیاه در این مناطق معتدل می‌تواند در جهت افزایش تولید این گیاه در کشور و در راستای پایداری سیستم‌های کشت کلزا قرار گیرد. همچنین استفاده از یک رقم متوسطرس مانند Hyola401 در هر دوی اقلیم‌های معتدل و نیمه خشک و گرم و خشک می‌تواند از طریق تولید بیشتر به ازای هر واحد آب مصرفی باعث افزایش کارایی مصرف آب و پایداری سیستم‌های تولید کلزا قرار بگیرد.

زیست توده و وزن دانه

مقدار زیست توده و وزن دانه کلزا به طور قابل توجهی تحت تاثیر نوع اقلیم و رقم قرار گرفت (جدول ۳). طبق جدول ۳، اقلیم‌های معتدل و نیمه خشک (خرم‌آباد و

کوهدشت) از نظر مقدار زیست توده و وزن دانه بهترین کارکرد را به ترتیب با میانگین ۱۶۹۳۱ کیلوگرم در هکتار و ۴۲۲/۲ گرم در متر مربع نسبت به مناطق گرم و خشک (دزفول و شوشتر) با میانگین ۶۸۳۰ کیلوگرم در هکتار و ۱۷۱/۵ گرم در متر مربع داشتند. از نظر تاثیر رقم بر دو صفت بالا، به طور میانگین در سراسر مناطق، بیشترین مقدار زیست توده (۱۱۹۴/۳ کیلوگرم در هکتار) مربوط به رقم دیررس RGS003 و بالاترین مقدار وزن دانه (۳۰۳/۷ گرم در متر مربع) در سطح رقم متوسطرس Hyola401 به دست آمد (جدول ۳). همچنین اختلافی که به واسطه کاربرد ارقام و مناطق مختلف در مقدار زیست توده و وزن دانه ایجاد شد به ترتیب برابر با ۱۴۱۹۱ کیلوگرم در هکتار و ۳۸۵/۵ گرم در متر مربع بود (جدول ۳).

برتری مناطق معتدل و ارقام متوسطرس نسبت به ارقام زودرس از نظر مقدار زیست توده و وزن دانه را می‌توان به مقدار بالاتر طول دوره رشد کلزا در این مناطق و ارقام نسبت داد (شکل ۴). افزایش طول دوره رشد باعث افزایش فتوسنتز گیاه می‌شود که این موضوع باعث ساخت مواد پرورده بیشتر و افزایش مقدار زیست توده گیاه می‌شود. همچنین افزایش مقدار زیست توده و مواد پرورده از یک سو و افزایش طول دوره پر شد دانه از سوی دیگر باعث می‌گردد که گیاه هم مقدار مواد لازم و هم فرصت کافی را برای پر کردن دانه‌های خود (از دو منبع فتوسنتز جاری و انتقال مجدد مواد ذخیره‌ای) در اختیار داشته باشد که خود موجبات افزایش وزن دانه گیاه را فراهم می‌آورد. در مطالعه‌ای توسط مدنی و همکاران (Madani1 *et al.*, 2005) نشان داده شد ارقام مختلف با طول دوره رسیدگی متفاوت در مناطق مختلف (زنجان، همدان، شهرکرد و کرج) دارای کارکرد مختلفی هستند و بیشترین وزن هزار دانه در رقم "Cobra" (۴/۵۹ گرم) و منطقه زنجان و همدان (۴/۱۹ گرم) بدست آمد. آن‌ها همچنین نتیجه‌گیری کردند که افزایش وزن دانه در مناطق مذکور به علت مطلوبیت رشد و نمو کلزا در مرحله رشد بهار آن‌ها بوده است. تحقیق Eyni-Nargeseh *et al.* (2019c) بر روی ارقام مختلف کلزا در شرایط آب و هوایی شهرستان کرج نتایج بیانگر کارکرد ارقام مختلف در سال‌های مختلف بود.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که صفات مورد بررسی شامل عملکرد دانه، زیست توده، کارایی مصرف آب، وزن دانه، تبخیر و تعرق واقعی، میانگین دما در طول دوره رشد و طول دوره رشد کلزا تحت تاثیر رقم و منطقه (نوع اقلیم) قرار داشتند. همچنین بیشترین مقدار عملکرد دانه و کارایی مصرف آب (به ترتیب۳۰۳۷ کیلوگرم در هکتار و ۶/۹ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر) در سطح رقم متوسط‌رس Hyola401 به دست آمد. نتایج همچنین مشخص نمود که مناطق معتدل و نیمه‌خشک نسبت به مناطق گرم و خشک مقدار عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب را به ترتیب ۲۵۰۷ کیلوگرم در هکتار، ۱۰۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و ۲/۷ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر افزایش می‌دهد. به طور کلی اگرچه در حال حاضر در مناطق معتدل و نیمه‌خشک مانند استان لرستان سطح زیر کشت کلزا (۲ درصد کشور) نسبت به مناطق گرم و خشک مانند استان خوزستان (۱۴/۳ درصد کشور) بسیار پایین می‌باشد ولی در این مناطق پتانسیلی برای افزایش سطح زیر کشت کلزا از نظر مقدار عملکرد دانه بالا و کارایی مصرف آب بیشتر وجود دارد و توسعه این گیاه در این مناطق معتدل می‌تواند در جهت افزایش تولید این گیاه در کشور و در راستای پایداری سیستم‌های کشت کلزا قرار گیرد. همچنین استفاده از یک رقم متوسطرس مانند Hyola401 در هر دوی اقلیم‌های معتدل و نیمه‌خشک و گرم و خشک می‌تواند از طریق تولید بیشتر به ازای آب مصرفی باعث افزایش کارایی مصرف آب و پایداری سیستم‌های تولید کلزا شود.

پی‌نوشت‌ها

[1] The Agricultural Production Systems sIMulator
[2] The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
[3] Weather Data Manager
[4] Extraterrestrial radiation
[5] Coefficient of determination
[6] Normalized root mean square error
[7] Mean bias error

منابع

Anonymous., 2015. Agricultural statistics. Iranian Ministry of Agriculture Jihad, Center of Information and Communication Technology. 1, 91-92. (In Persian with English abstract).

Bahrani, A. and Pourreza, J., 2016. Effect of alternate furrow irrigation and potassium fertilizer on seed yield, water use efficiency and fatty acids of rapeseed. Idesia Journal. 34 (2), 35-41.

Chenu, K., Porter, J.R., Martre, P., Basso, B., Chapman, S.C., Ewert, F., Bindi, M. and Asseng, S., 2017., Contribution of crop models to adaptation in wheat. Trends in Plant Science. 22, 472–490.

Christy, B., O'Leary, G., Riffkin, P., Acuna, T., Potter, T. and 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 and Pasture Science. 64, 901–913.

Deihimfard, R., Eyni-Nargeseh, H. and Farshadi, Sh., 2017. Modeling the effect of climate change on irrigation requirement and water use efficiency of wheat fields of Khuzestan province. Journal of Water and Soil. 31(4), 1015-1030. (In Persian with English Abstract).

Deihimfard, R., Eyni-Nargeseh, H. and Mokhtassi-Bidgoli, A., 2018. Effect of future climate change on wheat yield and water use efficiency under semi-arid conditions as predicted by APSIM-wheat model. International Journal of Plant Production. 12 (2), 115-125.

Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S. and Chenu, K., 2019. Risk assessment of frost damage to sugar beet simulated under cold and semi-arid environments. International Journal of Biometeorology. 63(4), 511-521.

Eyni-Nargeseh, H., Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S. and Mokhtassi-Bidgoli, A., 2019a. Analysis of growth functions that can increase irrigated wheat yield under climate change. Meteorological Applications. 27(1), 1804. http://dx.doi.org/10.1002/met.1804.

Eyni-Nargeseh, H., AghaAlikhani, M., Hosein Shirani Rad, A., Mokhtassi-Bidgoli, A. and Modarres Sanavy, S.A.M., 2019b. 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), 126-137. http://dx.doi.org/ 10.1080/03650340.2019.1602866.

Eyni-Nargeseh, H., AghaAlikhani, M., Hosein Shirani Rad, A., Mokhtassi-Bidgoli, A. and Modarres Sanavy, S.A.M., 2019c. Response of new genotypes of rapeseed (*Brassica napus*) to late season withholding irrigation under semi-arid climate. Journal of Plant Productions (Scientific Journal of Agriculture). 41(4), 55-68. (In Persian with English Abstract).

FAO., 2018. FAOSTAT Data. www.faostat.fao.org.

Hamzei, J. and Soltani, J., 2012. Deficit irrigation of rapeseed for water-saving: Effects on biomass accumulation, light interception and radiation use efficiency under different N rates. Agriculture Ecosystems and Environment. 155, 153-160.

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, 49–62.

Hoogenboom, G., Jones, J.W., Porter, C.H., Wilkens, P.W., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A. and Tsuji, G.Y., 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Overview. University of Hawaii, Honolulu, HI.

Kalantar Ahmadi, S.A., 2009. Comparison of different planting dates of rapeseed cultivars in different regions of Khuzestan. Agricultural Research, Education & Extension Organization (AREEO). Final report of the research project.

Karki, R., Talchabhadel, R., Aalto, J. and Baidya, S.K., 2016. New climatic classification of Nepal. Theoretical and Applied Climatology. 125(3-4), 799-808.

Khattab, R., Rempel, C., Suh, M. and Thiyam, U., 2012. Quality of canola oil obtained by conventional and supercritical fluid extraction. American Journal of Analytical Chemistry. 3, 966–976.

Koocheki, A. and Khajeh Hosseini, M., 2008. Modern Agronomy. Jihad University press of Mashhad. Iran. (In Persian).

Liersch, A., Bocianowski, J. and Bartkowiak-Broda, I., 2013. Fatty acid and glucosinolate level in seeds of different types of winter oilseed rape cultivars (*Brassica napus* L.). Communications in Biometry and Crop Science. 8, 39–47.

Liu, Z., Hubbard, K.G., Lin, X. and Yang, X., 2013. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China. Global Change Biology. 19, 3481-3492.

Madani, H., Noor-Mohammadi, G., Majidi, E., Shirani-Rad, A.H. and Naderi, M. R., 2005. Comparing winter rapeseed cultivars (*Brassica napus* L.) according to yield and yield components in cold regions of Iran. Iranian Journal of Crop Sciences. 7(1), 55-68. (In Persian with English Abstract).

Miri, H.R., 2007. Morphophysiological basis of variation in rapeseed (*Brassica napus* L.) yield. International Journal of Agriculture and Biology. 9, 701–706.

Mostafavi Rad, M., Jadidi, E. and Babaei, T., 2014. Effect of micronutrient elements on seed yield, qualitative traits and oil in winter rapeseed varieties. Journal of Crops Improvement. 16(3), 627-639. (In Persian with English Abstract).

Naderi, R. and Emam, Y., 2014. Evaluation of rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars performance under drought stress. Australian Journal of Crop Science. 8(9), 1319-1323.

Nemoto, H., Suga, R., Ishihara, M. and Okutsu, Y., 1998. Deep rooted rice varieties detected through the observation of root characteristics using the trench method. Breeding Science. 48, 321-324.

Prescott, J.A., 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Transactions of the Royal Society of South Australia. 64, 114-118.

Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J. and Deihimfard, R., 2018. Adaptation strategies to lessen negative impact of climate change on grain maize under hot climatic conditions: A model-based assessment. Agricultural and Forest Meteorology. 253, 1-14.

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, 105570.

Rezaeizadeh, A., Mohammadi, V., Zali, A, Zeinali, H. and Mardi, M., 2011. Investigation of important agronomic relationships and agronomic traits and their relationships under normal irrigation and drought stress in doubled haploid lines of canola. Iranian Journal of Field Crop Science. 24 (4), 383-694. (In Persian).

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), 332-344.

Robertson, M.J., Holland, J.F., Kirkegaard, J.A. and Smith, C.J., 1999. Simulating growth and development of canola in Australia. In Proceedings 10th International Rapeseed Congress, 26th–29th September, Canberra, Australia.

Seifert, E., 2014. OriginPro 9.1: Scientific Data Analysis and Graphing Software—Software Review. Journal of Chemical Information and Modeling. 54, 1552–1552.

Shirani Rad, A.H., Abbasian, A. and Aminpanah, H., 2013. Evaluation of rapeseed (*Brassica napus* L.) Cultivars for resistance against water deficit stress. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 19 (2), 266-273.

Wang, B., Vinocur, Shoseyov, O. and Altman, A., 2004. Role of plant heat shock proteins and molecular chaperones in a biotic stress response. Trends in Plant Science. 9, 244–252.

Wang, S., Wang, E., Wang, F. and 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.

Environmental Sciences Vol.21 / No.1 / Spring 2023

15-30

Original Article

Simulation of production and water use efficiency of spring canola cultivars in warm and temperate climates

Sajjad Rahimi-Moghaddam,[1*] Khosro Azizi,[1] Hamed Eyni-Nargeseh[2] and Seyed Ahmad Kalantar Ahmadi[3]

[1] Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

[2] Department of Agricultural Science, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

[3] Department of Agronomy and Horticultural Scinece, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Dezful, Iran

Received: 2022.07.04 Accepted: 2022.07.17

Rahimi-Moghaddam, S., Azizi, Kh., Eyni-Nargeseh, H. and Kalantar Ahmadi, S.A., 2023. Simulation of production and water use efficiency of spring canola cultivars in warm and temperate climates. Environmental Sciences. 21(1): 15-30.

Introduction: Canola is one of the most important oilseed crops all over the world. This oilseed crop is mainly utilized for its high oil content (with about 40–45% oil). However, in recent years, the area under cultivation of canola has decreased due to water scarcity. Applying drought-tolerant cultivars with high water use efficiency can help to develop the area under cultivation of canola and increase canola production. Therefore, the current study was conducted to assess the water use efficiency of spring canola cultivars in warm and temperate climates.

Material and methods: This study investigated different cultivars as a strategy for increasing canola production and improving its water use efficiency under different climate types in Khuzestan and Lorestan provinces. For this purpose, four locations including Khoramabad and Kuhdasht in Lorestan Province as semi-arid climate regions and Dezful, and Shushtar in Khuzestan Province as hot and arid climate regions were selected. Daily long-term climatic data (including minimum and maximum temperatures, rainfall, and global radiation) were collected for these locations from Iran Meteorological Organization. In this study, Hyola308 (early-maturity), Hyola401 (mid-maturity), and RGS003 (late-maturity) cultivars were used. In order to simulate the growth and yield of canola in different locations, the APSIM-Canola model was employed. OriginPro 9.1 software was used for all statistical analyses and the generation of figures.

[*] Corresponding Author: *Email Address*. rahimi.s@lu.ac.ir

Results and discussion: The results showed that grain yield, biomass, water use efficiency, grain weight, actual evapotranspiration, the average temperature during the canola growth period, and the length of the canola growth period were substantially affected by cultivar and region (climate type). According to the results, the highest grain yield and water use efficiency (3037 kg ha^{-1} and 6.9 kg mm^{-1} ha^{-1}, respectively) were achieved for the mid-maturity cultivar (Hyola401). Furthermore, simulation results revealed that temperate and semi-arid regions compared to hot and arid regions increased grain yield, biomass and water use efficiency by 2507 kg ha^{-1}, 10100 kg ha^{-1}, and 2.7 kg mm^{-1} ha^{-1}, respectively. Khorramabad × Hyola401 treatment had the highest water use efficiency, grain yield, and biomass (9 kg mm^{-1} ha^{-1}, 4954, and 17943 kg ha^{-1}, respectively) due to lower the average temperature during the canola growth period (10.9 ° C) and higher the length of the canola growth period (2424.9 day), while the lowest amount of these traits was recorded in Dezful × Hyola308 treatment (5 kg mm^{-1} ha^{-1}, 1369, and 5514 kg ha^{-1}, respectively).

Conclusion: The results indicated that expanding canola cultivation in temperate regions can be used to boost canola production in Iran and to improve the sustainability of canola cultivation agroecosystems. Also, using a mid-maturity cultivar such as Hyola401 in both temperate and hot climate conditions can increase water use efficiency and sustainability of canola production agroecosystems through higher production per water consumption.

Keywords: APSIM-Canola, Biomass, Grain yield, Semi-arid regions.