University of Tehran Press

Iranian Journal of Field Crop Science

Online ISSN: 2423-8082

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

Simulation of Replacing Wheat with Rapeseed in Terms of Water and Economic Productivity in Lorestan Province

Fatemeh Soltani[1]| Sajjad Rahimi-Moghaddam[2]✉| Naser Akbari[3]| Khosro Azizi[4]| Hamed Eyni-Nargeseh[5]

1. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: rahimi.s@lu.ac.ir
3. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
4. Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
5. Department of Agricultural Science, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: February 15, 2023
Received in revised form: September 21, 2023
Accepted: October 14, 2023
Published online: March 20, 2024

Keywords:
Grain yield,
irrigation,
model,
net income,
water consumption.

ABSTRACT

After soybean and oil palm, rapeseed has the third place in supplying vegetable oil in the world, so that it accounts for 14.7% of the total production of vegetable oil. The current research was carried out using modeling approach in order to simulate the replacement of wheat cultivation with rapeseed cultivation in terms of water and economic productivity in four locations (Aleshtar, Khorramabad, Pol-e Dokhtar, and Kuhdasht) in Lorestan province. APSIM model was used to simulate the growth and yield of wheat and rapeseed crops. The model validation results showed that it accurately simulates wheat and rapeseed grain yield with nRMSE of 8.6%. The results showed that wheat cultivation (3524.4 kg) had a higher grain yield than rapeseed cultivation (2750.2 kg). In addition, wheat cultivation system (1.45 kg m^{-3}) compared with rapeseed cultivation (1.15 kg m^{-3}) had higher water productivity. However, the difference between these two cultivation systems in terms of irrigation productivity was not considerable (0.11 kg m^{3}). Also, economic productivity and net income of rapeseed cultivation system were 0.220 million tomans per cubic meter and 59.9 million tomans per hectare, respectively, while they were 0.014 million tomans per cubic meter and 41.1 million tomans per hectare, respectively, for wheat cultivation system. In general, the results approved that moving from wheat cultivation to rapeseed cultivation can be environmentally and economically sustainable in the agro-ecosystems of Lorestan province, especially in Khorramabad county.

Cite this article: Soltani, F., Rahimi-Moghaddam, S., Akbari, N., Azizi, K., & Eyni-Nargeseh, H. (2024). Simulation of replacing wheat with rapeseed in terms of water and economic productivity in Lorestan province. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *55*(1), 37-48. DOI: 10.22059/ijfcs.2023.355437.654983.

© The Authors.
Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/ijfcs.2023.355437.654983

انتشارات دانشگاه تهران

علوم گیاهان زراعی ایران

شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۸۰۸۲

Homepage:https://ijfcs.ut.ac.ir/

شبیه‌سازی جایگزینی کشت گندم با کلزا از لحاظ بهره‌وری آبی و اقتصادی در استان لرستان

فاطمه سلطانی[۱]، سجاد رحیمی‌مقدم*[۲]، ناصر اکبری[۳]، خسرو عزیزی[۴]، حامد عینی‌نرگسه[۵]

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

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: rahimi.s@lu.ac.ir

۳. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

۴. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

۵. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

آبیاری،

درآمد خالص،

عملکرد دانه،

مدل،

مصرف آب.

چکیده

کلزا بعد از سویا و نخل روغنی مقام سوم را در تامین روغن نباتی جهان دارد، به‌طوری‌که ۱۴/۷ درصد از کل تولید روغن نباتی را به خود اختصاص داده است. این تحقیق با استفاده از تکنیک مدل‌سازی به‌منظور شبیه‌سازی جایگزینی کشت گندم با کلزا از لحاظ بهره‌وری آبی و اقتصادی در چهار منطقه الشتر، خرم‌آباد، پلدختر و کوهدشت در استان لرستان در سال ۱۴۰۱ انجام گرفت. برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد محصولات گندم و کلزا از مدل APSIM استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد که با میانگین مربعات اشتباه نرمال‌شده برابر با ۸/۶ درصد عملکرد دانه گندم و کلزا را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. نتایج نشان داد که کشت گندم (۳۵۲۴/۴ کیلوگرم) نسبت به کشت کلزا (۲۷۵۰/۲ کیلوگرم) از میزان عملکرد دانه بالاتری برخوردار بود. همچنین سیستم کشت گندم (۱/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب) نسبت به کشت کلزا (۱/۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب) بهره‌وری آبی بالاتری داشت. با این وجود، اختلاف این دو سیستم کشت از لحاظ بهره‌وری آبیاری قابل توجه نبود (۰/۱۱ کیلوگرم متر مکعب). سیستم کشت کلزا از لحاظ بهره‌وری اقتصادی و درآمد خالص به‌ترتیب با ۰/۲۲۰ میلیون تومان بر متر مکعب و ۵۹/۹ میلیون تومان در هکتار، از سیستم کشت گندم به‌ترتیب با ۰/۰۱۴ میلیون تومان بر متر مکعب و ۴۱/۱ میلیون تومان در هکتار دارای کارایی بالاتری بود. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که حرکت از کشت گندم به سمت کلزا می‌تواند در بوم‌نظام‌های زراعی استان لرستان به‌ویژه در شهرستان‌هایی مانند خرم‌آباد از لحاظ محیط زیستی و اقتصادی پایدار باشد.

استناد: سلطانی، ف.، رحیمی مقدم، س.، اکبری، ن.، عزیزی، ح.، و عینی نرگسه، ح. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی جایگزینی کشت گندم با کلزا از لحاظ بهره‌وری آبی و اقتصادی در استان لرستان. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۵(۱)، ۳۷-۴۸.

DOI: 10.22059/ijfcs.2023.355437.654983

ناشر: موسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان

۱. مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت و نیاز بیشتر به تولید محصولات غذایی، لزوم بهره‌برداری بهینه از منابع آب و تحصیل حداکثر منافع از واحد حجم آن در مناطق مختلف کشور از جمله استان لرستان به وضوح روشن است. در این استان برای اینکه بتوان با آب موجود اراضی بیشتری را به زیر کشت برد و یا با افزایش تولید در واحد سطح، غذای مورد نیاز جمعیت در حال رشد را تامین کرد باید به نحوی از هدررفت آب جلوگیری کرد. بدون تردید افزایش راندمان آب مستلزم آگاهی از نیاز آبی یا تبخیر–تعرق گیاه می‌باشد. معمولا بیش از ۹۸ درصد آب جذب‌شده توسط ریشه‌های گیاه، صرف تعرق شده و کمتر از دو درصد آن در فرآیندهای سلولی و رشد گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Efetha, 2011; Hajare *et al*., 2008; Holder *et al*., 2018; Salama *et al*., 2015; Zhao *et al*., 2010).

شرایط خاص اقلیمی ایران که خشکی و پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی واقعیت انکارناپذیر آن است، هرگونه تولید مواد غذایی و کشاورزی پایدار را منوط به استفاده صحیح و منطقی از منابع محدود آب کشور کرده است (Ebrahimi-Pak, 2022). در همین راستا می‌توان گفت که آب آبیاری مهمترین نهاده تولید کشاورزی است. به دلیل محدودیت منابع آب، از حدود ۳۷ میلیون هکتار اراضی مستعد کشاورزی کشور فقط ۷/۸ میلیون هکتار به صورت فاریاب کشت می‌شود. از طرف دیگر از ۸۹ میلیارد متر مکعب آب استحصال‌شده، حدود ۸۳ میلیارد متر مکعب یعنی ۹۳/۵ درصد آن به بخش کشاورزی اختصاص دارد. میزان کنونی تولیدات کشاورزی فاریاب در کشور بالغ بر ۵۷ میلیون تن است؛ یعنی به ازای هر متر مکعب آب مصرف‌شده تقریباً ۰/۷ کیلوگرم محصول تولید می‌شود که در مقایسه با کشورهای پیشرفته، رقم پایینی است (Karimi *et al*., 2002).

یکی از راهکارهای افزایش بهره‌وری آب، کشت گیاهان جایگزین می‌باشد؛ به عنوان مثال، بهره‌وری آب کشاورزی محصولات مهم زراعی در دشت مشهد بررسی و راهکارهایی در جهت ساماندهی الگوی زراعی ارائه شد (Karimi & Jolaini, 2017). در تحقیق مذکور برای محاسبه بهره‌وری آب کشاورزی از شاخص عملکرد به ازای واحد حجم آب استفاده شده است. نتایج نشان داد که اولویت کشت محصولات تا رتبه سوم بر اساس شاخص عملکرد به ازای واحد حجم آب به‌ترتیب پیاز (*Allium cepa*)، گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) و چغندر قند (*Beta vulgaris*) می‌باشند. با توجه به نتایج این تحقیق، کشت‌های با مصرف آب بالا و بازده اقتصادی پائین مانند یونجه (*Medicago sativa*) بایستی از الگوی کشت حذف شود (Karimi & Jolaini, 2017). در تحقیقی دیگر به مقایسه کارایی مصرف آب محصولات جو (*Hordeum vulgare*) و گندم (*Triticum aestivum*) در شهرستان سیستان پرداخته شد (Naderianfar & Dehghan, 2020).

با وجود بهره‌وری آبی، در زمینه افزایش پایداری باید به بهره‌وری اقتصادی توجه خاصی صورت گیرد؛ چرا که درآمد به عنوان یکی از مهم‌ترین محورهای تصمیم‌گیری کشاورزان در نظر گرفته می‌شود. در پژوهشی نسبت منفعت به هزینه برای گندم، برنج (*Oryza sativa*) و جو در استرالیا بررسی شد؛ نتایج نشان داد درحالی‌که جو دارای بالاترین بهره‌وری مصرف آب بود، ولی بالاترین نسبت منفعت به هزینه متعلق به برنج (۳/۳۳) بود و بعد از آن گندم و جو به‌ترتیب با نرخ‌های ۲/۸۲ و ۲/۵ قرار داشتند (Khan *et al*., 2010). در تحقیقات دیگر سود حاصل از مصرف هر متر مکعب آب آبیاری مصرفی در تولید گندم، جو، کلزا (*Brassica napus* L.) و ذرت (*Zea mays*) (Asadi *et al*., 2021) و بهره‌وری اقتصادی مربوط به محصولات مختلف (Zamani *et al*., 2014) مورد بررسی قرار گرفته است.

کلزا بعد از سویا (*Glycine max*) و نخل روغنی (*Elaeis guineensis*)، مقام سوم را در تامین روغن نباتی جهان دارد؛ به‌طوری‌که ۱۴/۷ درصد از کل تولید روغن نباتی را به خود اختصاص داده است. کلزا یکی از اعضای خانواده *Brassicaceae* و از مهمترین منابع روغنی در جهان می‌باشد. امروزه کلزا به دلیل اثرات مفید در تناوب با محصولات زراعی، قابلیت گسترش در طیف وسیعی از خاک‌ها (از خاک‌های شنی تا خاک‌های آهکی و رسی) را در سامانه‌های کشت و تناوب‌ها پیدا کرده است. کلزا به دلیل سازگاری با شرایط اقلیمی کشور ایران، قرارگرفتن در تناوب با کشت گندم برای کاهش شیوع بیماری و کشت ارقام پاییزه به عنوان یک گیاه مهم مورد توجه واقع شده است (Rahimi-Moghaddam *et al*., 2021).

رشد گیاه متاثر از عواملی همچون دما، تاریخ کشت، تراکم کشت، فواصل و ردیف‌های کشت، میزان آب مصرفی و نحوه تغذیه می‌باشد. به منظور بررسی اثر این عوامل بر رشد گیاه انجام پژوهش‌های گسترده مزرعه‌ای اجتناب‌ناپذیر است؛ اما به علت زمان‌بر بودن انجام هر کشت، عدم امکان ثابت در نظرگرفتن برخی از عوامل در مزرعه و یا عدم توانایی تهیه برخی از آن‌ها این کار به سادگی قابل انجام نیست. به همین منظور استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهی می‌تواند ابزار مناسبی به منظور بررسی رفتار گیاه در شرایط متفاوت مدیریتی باشد (Honar *et al*., 2011). یکی از این مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی مدل APSIM است. مدل APSIM یک مدل زراعی قدرتمند است که از آن برای شبیه‌سازی رشد و نمو طیف وسیعی از محصولات و شرایط مختلف مدیریت در سراسر جهان (Watson *et al.*, 2017; Chenu *et al.*, 2013; Kholov´a *et al.*, 2013) و در ایران (Eyni-Nargeseh *et al.*, 2019; Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2019, 2018; Deihimfard *et al.*, 2015) مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل رشد و توسعه محصول و عملکرد دانه را به‌صورت روزانه در پاسخ به اقلیم، خاک، روش‌های مدیریتی و عوامل ژنتیکی پیش‌بینی می‌کند. بیلان آب خاک بر اساس تبخیر روزانه، تعرق گیاه، زهکشی و رواناب محاسبه می‌شود. هر فرآیند به‌طور جداگانه بر اساس روابط شبیه‌سازی می‌شود. زیرمدل کلزا APSIM-canola در CSIRO[1] و در اوخر دهه ۱۹۹۰ توسعه داده شد (Robertson *et al.*, 1999). در ابتدا این مدل برای ارقام بهاره در طیف گسترده‌ای از محیط‌ها در مناطق نیمه‌گرمسیری شمالی، جنوبی و شرقی در استرالیا آزمایش شد (Robertson & 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 & Lilley, 2016). زیرمدل گندم APSIM-wheat نیز رشد و نمو گندم را به صورت روزانه شبیه‌سازی کرده و به عوامل مختلف از جمله آب و هوا (دما، بارندگی و تابش)، خاک (آب خاک و نیتروژن خاک)، ضرایب ژنتیکی و اطلاعات مدیریتی محصول زراعی پاسخ نشان می‌دهد. در این مدل مراحل فنولوژیکی گیاه گندم به ۱۰ مرحله نموی از جوانه‌زنی تا رسیدگی تقسیم می‌شود. بر این اساس و با توجه به اهمیت محدودیت آب و درآمد کشاورزان، این تحقیق با استفاده از تکنیک مدل‌سازی به منظور شبیه‌سازی جایگزینی کشت گندم با کلزا از لحاظ بهره‌وری آبی و اقتصادی در استان لرستان در سال ۱۴۰۱ انجام شد.

۲- روش‌شناسی پژوهش

استان لرستان در ناحیه جنوب غربی ایران بین عرض جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۱ دقیقه تا۵۰ درجه و ۰۱ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۴۰ دقیقه و ۳۴ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شمالی از نصف النهار گرینویچ واقع شده است. میانگین ارتفاع استان لرستان بیش از ۲۲۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد و پست‌ترین نقطه استان با ارتفاع ۲۳۹ متر در دشت‌های استان و بلندترین قله آن اشترانکوه با ارتفاع حدود ۴۰۸۰ متر از سطح دریا در میان رشته‌کوه زاگرس قرار دارد (وزارت کشور، ۱۳۸۵). آب و هوای این استان از سرد در شهرستان الیگودرز تا گرم در شهرستان پلدختر متغیر می‌باشد. این تحقیق در شهرستان‌های الشتر، خرم‌آباد، پلدختر و کوهدشت انجام شد. معیار انتخاب این شهرستان‌ها تنوع اقلیمی، سطح زیر کشت و همچنین پراکنش در سطح استان لرستان بود. ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی مناطق مورد مطالعه در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم و کلزا در این تحقیق از مدل APSIM استفاده شد. برای اجرای مدل به داده‌های اقلیمی، خاکی، مدیریتی و گیاهی نیاز است. داده‌های اقلیمی بلندمدت (از ۱۳۵۹ تا ۱۴۰۰) مورد استفاده در این تحقیق شامل دمای کمینه و بیشینه (درجه سانتی‌گراد)، بارندگی (میلی‌متر) و تعداد ساعات آفتابی بودند که از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شد. داده‌های مذکور به‌عنوان ورودی مدل‌های اقلیمی و مدل شبیه‌سازی رشد گیاه زراعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل اینکه در ایستگاه‌های هواشناسی در بعضی از ماه‌های سال داده هواشناسی ثبت نشده و در برخی موارد داده‌های پرت وجود دارد، داده‌های پرت و گم‌شده در ایستگاه‌های مختلف با استفاده از برنامه WeatherMan (Hoogenboom *et al*., 2003) اصلاح و بازسازی شدند. همچنین با

1.The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

توجه به اینکه در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی کشور، مقدار تابش روزانه ثبت نشده است، با در اختیار داشتن تعداد ساعت آفتابی، تابش روزانه با استفاده از رابطه آنگستروم (Prescott, 1940) به‌صورت زیر تخمین زده شد:

$$R_s = \left(\mathrm{a} + \mathrm{b}\ \frac{\mathrm{n}}{\mathrm{N}}\right) R_a \qquad \text{رابطه (۱)}$$

در این معادله، R_s نشان‌دهنده تابش روزانه (مگاژول در متر مربع)، n تعداد ساعات آفتابی، N بیشینه تعداد ساعات آفتابی ممکن و R_a تابش فرازمینی[۲] می‌باشد. پارامترهای a و b ضرایب آنگستروم کالیبره‌شده محلی هستند. در این تحقیق مقدار پارامترهای a و b برای مناطق مختلف به‌ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شد.

جدول ۱. ویژگی‌های اقلیمی (از ۱۳۵۹ تا ۱۴۰۰)، جغرافیایی و مدیریتی مناطق مورد مطالعه (داده‌های اقلیمی از سازمان هواشناسی کشاورزی کشور و داده‌های مدیریتی از طریق پرسشنامه به‌دست آمدند).

Locations	Longitude	Latitude	Elevation (m)	Annual mean temperature (°C)	Annual cumulative rainfall (mm)	Sowing date (Canola/ wheat)	Nitrogen fertilizer (kg ha^{-1}; Canola/ wheat)	Irrigation number (Canola/ wheat)	Cost production per hectare (Million toman Canola/ wheat)
Khorramabad	48.3	33.6	1147	16.5	486.2	23-Sep/6-Nov	119.6/ 121.4	5/ 7	17.9/ 20.7
Aleshtar	48.26	33.86	1638	13.5	450	1-Sep/6-Nov	121.4/127	6/ 7	27.8/ 30.6
Pol-e Dokhtar	47.72	33.14	658	23	378.4	17-Oct/6-Nov	138/ 115.9	5/ 7	25.1/ 27.5
Kuhdasht	47.4	33.5	1195	16.0	369.8	12-Oct/6-Nov	116/ 125.2	5/ 8	25.6/ 30.1

همچنین اطلاعات مدیریتی شامل تاریخ کشت، تراکم (۸۰ و ۳۰۰ بوته در متر مربع به‌ترتیب برای کلزا و گندم)، خاکورزی (مرسوم)، فاصله بین ردیف (۳۰ و ۲۵ سانتی‌متر به‌ترتیب برای کلزا و گندم)، عمق کاشت (سه و پنج سانتی‌متر به‌ترتیب برای کلزا و گندم)، آبیاری، کوددهی و سایر اطلاعات می‌باشند که با استفاده از پرسشنامه به‌دست آمدند و در جدول ۱ قابل مشاهده هستند. برای به‌دست‌آمدن حجم نمونه و تعداد پرسشنامه از فرمول کوکران استفاده شد:

$$n = \frac{\frac{Z^2 pq}{d^2}}{1+\frac{1}{N}(\frac{Z^2 pq}{d^2}-1)} \qquad \text{رابطه (۲)}$$

در این معادله n حجم نمونه آماری، N حجم جامعه آماری، d اشتباه مجاز برابر با ۰/۰۵، z مقدار متغیر نرمال با سطح اطمینان ۱−α است. در آزمون دو دامنه مقدار z برای سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر ۱/۹۶ و برای سطح اطمینان ۹۹ درصد برابر ۲/۵۸ است که در این مطالعه برابر با ۱/۹۶ بود. همچنین p نسبت برخورداری از صفت مورد نظر و q (1-p) نسبت عدم برخورداری از صفت مورد نظر است که در این مطالعه مقدار p و q برابر با ۰/۰۵ بود. همچنین داده‌های گیاهی شامل ضرایب ژنتیکی گندم (رقم چمران) و کلزا (رقم هایولا ۴۰۱) بودند که از تحقیق‌های Deihimfard *et al.* (2022) و Rahimi-Moghaddam *et al.* (2022) به‌دست آمدند. معیار استفاده از رقم چمران و هایولا۴۰۱ غالبیت استفاده از این ارقام توسط کشاورزان در مناطق مورد مطالعه بود.

داده‌های خاکی مورد نیاز مدل شامل عمق خاک (cm)، وزن مخصوص ظاهری خاک (g cm^{-3})، نقطه پژمردگی (cm^3 cm^{-3})، ظرفیت زراعی (cm^3 cm^{-3})، ظرفیت نقطه اشباع (cm^3 cm^{-3})، آب اولیه خاک و کربن آلی (%) است. اطلاعات خاکی از طریق مکاتبه با سازمان جهاد کشاورزی، مراکز تحقیقات منابع طبیعی و کشاورزی، آزمایشگاه‌های خاک، گزارش‌های سازمان خوار و بار جهانی و همچنین سایت اطلس خلاء ایران در سطح هر شهرستان جمع‌آوری شد. داده‌های خاکی مورد استفاده برای مناطق مورد مطالعه در جدول ۲ قابل مشاهده هستند.

2. Extraterrestrial radiation

جدول ۲. اطلاعات خاکی مناطق مورد مطالعه.

Location	Bulk density (g cm^{-3})	Soil water content at wilting point (cm^3 cm^{-3})	Soil water content at field capacity (cm^3 cm^{-3})	Saturation water content (cm^3 cm^{-3})
Khorramabad	1.28	0.231	0.392	0.518
Aleshtar	1.28	0.242	0.395	0.515
Pol-e Dokhtar	1.38	0.062	0.286	0.475
Kuhdasht	1.34	0.259	0.396	0.500

صفات مورد بررسی در این مطالعه شامل عملکرد دانه، تبخیر و تعرق واقعی، بیوماس تولیدی و همچنین شاخص‌های مورد بررسی در این تحقیق شامل بهره‌وری آب (WP)، بهره‌وری آبیاری (IP)، درآمد خالص (NI) و بهره‌وری اقتصادی آبیاری (IEP) طبق معادلات زیر محاسبه شدند:

$$WP = \frac{YG}{ET}$$ رابطه (۳)

$$IP = \frac{YG}{I}$$ رابطه (۴)

$$NI = (YG \times PG) + (YB \times PB) - C$$ رابطه (۵)

$$IEP = \frac{NI}{I}$$ رابطه (۶)

در این رابطه‌ها، YG: عملکرد دانه شبیه‌سازی‌شده (کیلوگرم در هکتار)، YB: عملکرد کاه و کلش شبیه‌سازی‌شده (کیلوگرم در هکتار)، ET: تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی‌شده (متر مکعب) در طول فصل رشد (از کاشت تا برداشت)، PG: قیمت هر کیلو عملکرد دانه (میلیون تومان)، PB: قیمت هر کیلو عملکرد کاه و کلش (میلیون تومان)، I: آبیاری خالص (متر مکعب در هکتار) و C: هزینه‌های تولید در هکتار (میلیون تومان) می‌باشد. در زمینه هزینه‌های تولید در هکتار شامل تمامی هزینه‌های تولید در یک هکتار گندم یا کلزا می‌باشد که توسط پرسشنامه به‌دست آمد و مواردی از جمله هزینه بذر مورد نیاز برای کشت، کودهای مورد استفاده، مبارزه با آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، اجاره زمین و حق‌آبه، کارگر، سوخت و ماشین‌آلات را پوشش می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است که قیمت هر کیلو دانه گندم و کلزا برابر با قیمت خرید تضمینی این دو محصول توسط دولت در سال ۱۴۰۱ بود که به‌ترتیب برای گندم و کلزا برابر با ۱۱/۵ و ۲۳/۵ هزار تومان بود.

برای ارزیابی مدل از شاخص‌های آماری nRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (Wallach & Goffinet, 1987) و MBE: میانگین انحراف خطا (Willmott & Matsuura, 2005) با توجه به رابطه‌های زیر استفاده شد:

$$nRMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Si-Oi)2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}}$$ رابطه ۷

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Si-Oi)}{n}$$ رابطه ۸

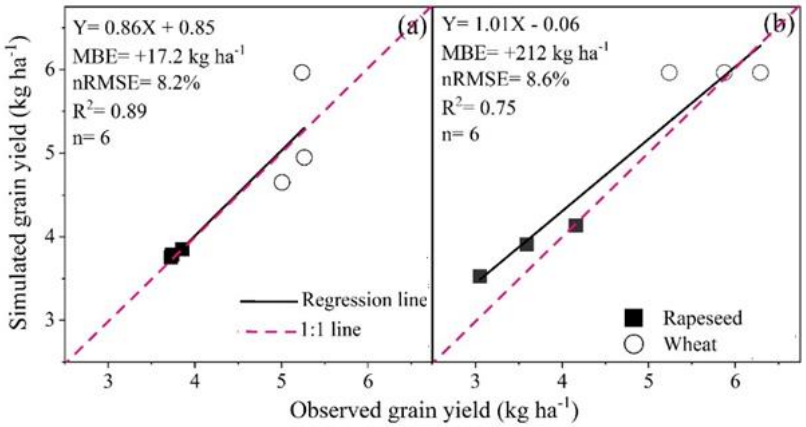
که در این روابط n: تعداد مشاهدات؛ O: داده مشاهده‌شده؛ S: داده شبیه‌سازی‌شده و $\bar{O}$: میانگین داده مشاهده‌شده می‌باشند. مقادیر شاخص میانگین مربعات اشتباه نرمال‌شده در بازه‌های ۱۰ -۰، ۲۰– ۱۰ و ۲۰–۳۰ درصد به‌ترتیب نشان‌دهنده وضعیت ایده‌آل (عالی)، مناسب (خوب) و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد بیانگر عدم کارا بودن مدل می‌باشد. میانگین انحراف خطا برآورد کم و بیش از حد مدل را نشان می‌دهد که از منفی بی‌نهایت تا مثبت بی‌نهایت متغیر است و دقت مدل با نزدیک‌شدن مقدار میانگین انحراف خطا به صفر افزایش می‌یابد. علاوه‌بر شاخص‌های بالا، از ضریب تبیین نیز برای اندازه‌گیری دقت مدل در مطالعه حاضر بهره‌گیری شد. ضریب تبیین نسبت پراکندگی بین داده‌های پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده را نشان می‌دهد (Mendenhall *et al.*, 1996). در صورت وجود تطابق کامل رگرسیونی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده، مقدار ضریب تبیین برابر با یک بوده و با کاهش مقدار این شاخص، درصد کمتری از تغییرات داده‌ها توسط خط رگرسیونی توجیه می‌شود؛ در صورت عدم وجود هیچگونه رابطه رگرسیونی مقدار ضریب تبیین صفر خواهد بود. بنابراین این ضریب بین صفر و یک متغیر می‌باشد

که نزدیک‌بودن به یک نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی صفت مورد نظر می‌باشد. در این مطالعه برای تمامی تجزیه‌های آماری و رسم شکل‌ها از نرم‌افزار OriginPro 9.1 (Seifert, 2014) استفاده شد.

۳- یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. ارزیابی مدل

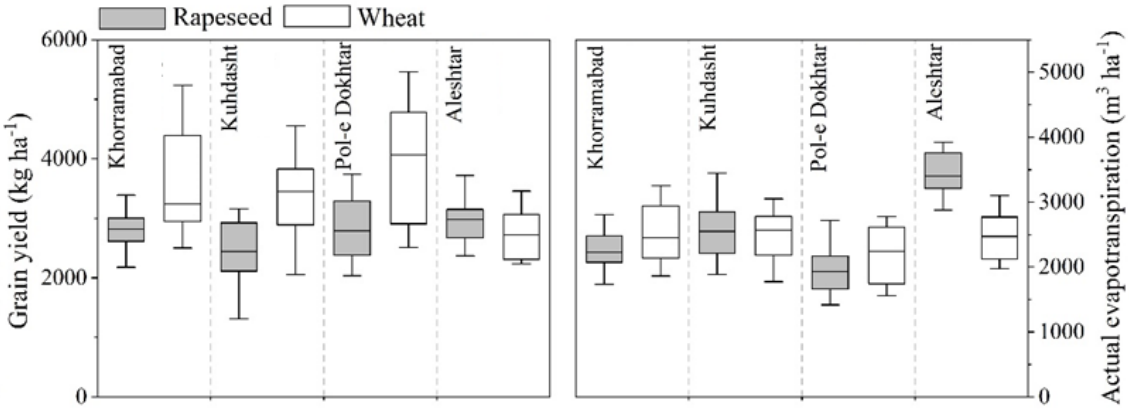
به‌طور کلی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی عملکرد دانه نشان داد که مدل APSIM با دقت قابل قبولی می‌تواند این صفت را برای گندم (رقم چمران) و کلزا (رقم هایولا۴۰۱) شبیه‌سازی کند؛ به‌طوری‌که در مرحله واسنجی مقدار شاخص میانگین مربعات اشتباه نرمال‌شده (nRMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و ضریب تبیین (R^2) به‌ترتیب برابر با ۸/۲ درصد، ۱۷/۲ کیلوگرم در هکتار و ۰/۸۹ بود (شکل ۱). همچنین مقدار شاخص‌های میانگین مربعات اشتباه نرمال‌شده، میانگین انحراف خطا و ضریب تبیین در مرحله اعتبارسنجی به‌ترتیب برابر با ۸/۶ درصد، ۲۱۲ کیلوگرم در هکتار و ۰/۷۵ بود. به‌طور کلی شبیه‌سازی با میانگین مربعات اشتباه نرمال‌شده کمتر از ۱۰ درصد عالی در نظر گرفته می‌شود، اگر میانگین مربعات اشتباه نرمال‌شده بزرگتر از ۱۰ درصد و کمتر از ۲۰ درصد باشد خوب است، اگر میانگین مربعات اشتباه نرمال‌شده بزرگتر از ۲۰ درصد و کمتر از ۳۰ درصد باشد متوسط و اگر میانگین مربعات اشتباه نرمال‌شده بیشتر از ۳۰ درصد باشد ضعیف است (Deihimfard *et al.*, 2019; Dettori *et al.*, 2009). با توجه به این موضوع نتایج شبیه‌سازی عالی بوده و مدل می‌تواند در مرحله بعد مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱. واسنجی (a) و اعتبارسنجی (b) عملکرد دانه گندم (رقم چمران) و کلزا (رقم هایولا ۴۰۱). داده‌ها از تحقیق‌های Deihimfard *et al.* (2022) و Rahimi-Moghaddam *et al.* (2021) به‌دست آمدند.

۳-۲. عملکرد دانه

به‌طور کلی نتایج آزمایش‌های بلندمدت (از ۱۳۵۹ تا ۱۴۰۰) شبیه‌سازی نشان داد که میزان تولید گندم و کلزای آبی در استان لرستان به‌ترتیب برابر با ۳۵۲۴/۴ و ۲۷۵۰/۲ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (شکل ۲). با این وجود، از لحاظ تولید گندم و کلزا در مناطق مختلف اختلاف قابل توجهی وجود داشت؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان تولید گندم در شهرستان پلدختر با عملکرد ۳۹۹۷/۳ کیلوگرم در هکتار ثبت شد. همچنین کمترین مقدار عملکرد دانه برای گندم مربوط به شهرستان الشتر با ۲۸۳۷/۶ کیلوگرم در هکتار بود. از نظر تولید کلزا منطقه الشتر با ۲۹۱۹/۷ کیلوگرم در هکتار بیشترین میزان تولید کلزا را داشت؛ درحالی‌که کمترین مقدار آن مربوط به شهرستان کوهدشت با مقدار ۲۴۵۰/۵ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۲). همچنین همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود تغییرات عملکرد در گیاه گندم در طول سال‌های مختلف شبیه‌سازی، بسیار بیشتر از تغییرات عملکرد گیاه کلزا بود، به‌طوری‌که در سرتاسر مناطق و سال‌های مورد بررسی تغییرات عملکرد در گندم از ۲۲۹۲/۴ تا ۴۹۳۳/۹ کیلوگرم در هکتار و در کلزا از ۱۹۸۱/۹ تا ۳۵۰۴/۹ کیلوگرم در هکتار متغیر بود.



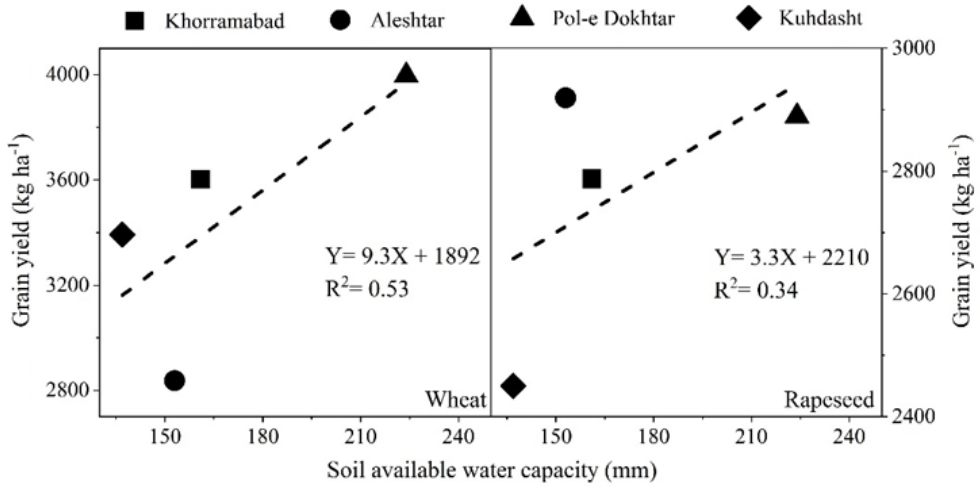
شکل ۲. عملکرد دانه و تبخیر و تعرق واقعی گندم و کلزا در مناطق مورد مطالعه.

عملکرد بالاتر گندم در منطقه پلدختر نسبت به مناطق دیگر را می‌توان به مقدار بیشتر آب قابل دسترس خاک نسبت داد (جدول ۲). همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، بین عملکرد دانه و ظرفیت آب قابل دسترس در گندم و کلزا ارتباط مثبتی وجود دارد و به‌ازای افزایش یک میلی‌متر ظرفیت آب قابل دسترس خاک میزان عملکرد دانه در گندم و کلزا به‌ترتیب ۹/۳ و ۳/۳ کیلوگرم در هکتار افزایش پیدا می‌کند. بسیاری از مطالعات نشان‌دهنده تاثیر ویژگی‌های خاکی بر عملکرد دانه هستند (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021; Chenu *et al.*, 2013; Kholov´a *et al.*, 2013). به عنوان مثال در تحقیقی مشاهده شد که در مناطق خیلی سرد و بارانی عملکرد دانه خیلی کمتر از مناطق معتدل با بارندگی کم بود؛ چرا که در منطقه خیلی سرد و بارانی ظرفیت آب قابل دسترس خاک (۹۰/۱ میلی‌متر) کمتر از منطقه معتدل با بارندگی کم (۱۱۱ میلی‌متر) بود (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021). در زمینه عملکرد دانه بالاتر کلزا در منطقه الشتر نسبت به سایر مناطق می‌توان به طول دوره رشدی بالاتر کلزا در این منطقه (۲۵۶ روز) نسبت به سایر مناطق (متوسط ۲۰۷ روز) اشاره کرد. افزایش طول دوره رشد باعث تولید بیشتر مواد پرورده و در نهایت عملکرد دانه بیشتر می‌شود. تعداد نهایی غلاف‌ها و دانه‌ها در یک دوره چهار هفته‌ای، تعیین می‌شود و بستگی زیاد به استمرار ماده‌سازی دارد. روابط بین منبع و مخزن در این فاز بر میزان ماده‌سازی مؤثر است (Eweida *et al.*, 1981). محققان به این نتیجه رسیده‌اند که برگ‌ها از نقش کلیدی در فتوسنتز گیاه برخوردارند و ماده خشکی که در طول دوره رشد رویشی تجمع می‌یابد در مرحله پر شدن دانه‌ها، با انتقال به اندام‌های ذخیره‌ای، رشد خورجین و پر شدن دانه را تأمین می‌کند. بین تجمع ماده خشک تا زمان گلدهی با تعداد خورجین در بوته رابطه خطی وجود دارد. دوره گلدهی بحرانی‌ترین مرحله در کلزا می‌باشد که روی عملکرد دانه مؤثر است. تعداد نهایی خورجین‌ها و دانه در این دوره چهار هفته‌ای که وابستگی زیادی به شیره پرورده دارد، تعیین می‌شود؛ بنابراین ارتباط بین منبع و مخزن طی این دوره به شیره پرورده قابل دسترس، بستگی دارد (Dipenbrock, 2000).

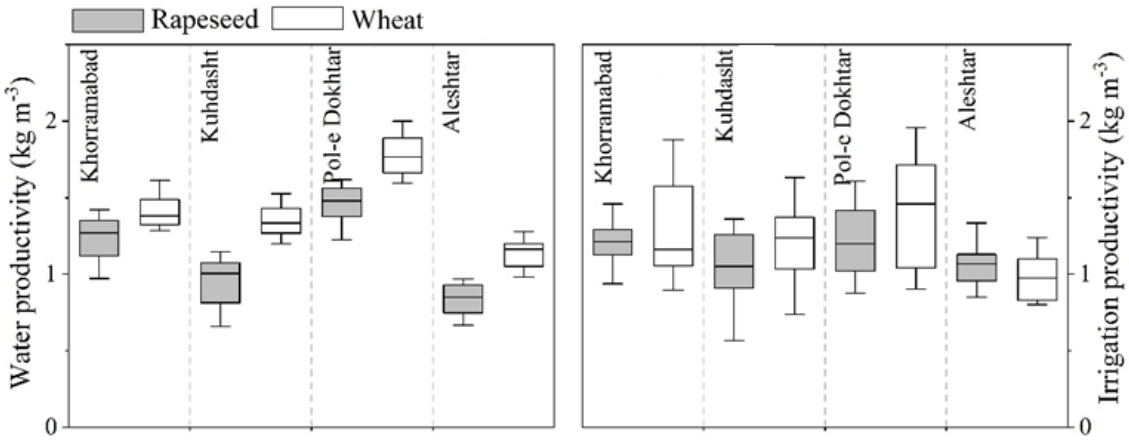
۳-۳. بهره‌وری آب و آبیاری

به‌طور کلی در سرتاسر مناطق، بهره‌وری آبی برای کشت گندم و کلزا در سطح استان لرستان به‌ترتیب برابر با ۱/۴۵ و ۱/۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب بود و برای بهره‌وری آبیاری این مقادیر به‌ترتیب برابر با ۱/۲۶ و ۱/۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب بود (شکل ۴). در بین مناطق مورد بررسی بالاترین بهره‌وری آب گندم در منطقه پلدختر (۱/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب) و کمترین آن در منطقه الشتر (۱/۱۳ کیلوگرم بر متر مکعب) ثبت شد. همچنین برای محصول گندم بالاترین بهره‌وری آبیاری در منطقه پلدختر (۱/۴۳ کیلوگرم بر متر مکعب) و کمترین آن در شهرستان الشتر (۱/۰۱ کیلوگرم بر متر مکعب) به‌دست آمد. در تحقیقی روی ارزیابی کارایی مصرف آب محصولات جو و گندم در ارضی زراعی دشت سیستان نشان داده شد که کارایی مصرف آب برای گندم و جو به‌ترتیب ۱/۰۳ و ۱/۰۸ متر مکعب بر کیلوگرم بود (Naderianfar & Dehghan, 2020). برای محصول کلزا نیز اختلاف قابل توجهی از نظر بهره‌وری آبی و آبیاری در بین مناطق وجود داشت، به‌طوری‌که برای بهره‌وری آبی این تغییرات از ۰/۸۴ کیلوگرم بر متر مکعب در منطقه الشتر تا ۱/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب در منطقه پلدختر متغیر بود و برای بهره‌وری آبیاری اختلافی برابر با ۰/۲۵ کیلوگرم بر متر

مکعب در بین مناطق وجود داشت (به‌ترتیب ۱/۰۴ و ۱/۲۹ کیلوگرم بر متر مکعب برای الشتر و خرم آباد) (شکل ۴). بالا بودن بهره‌وری آبی در کشت گندم نسبت به کشت کلزا را می‌توان به عملکرد بالاتر گندم در سطح هکتار نسبت داد. تایید این موضوع را می‌توان در شکل ۲ نیز مشاهده کرد؛ جایی‌که میزان تبخیر و تعرق در کشت گندم در اکثر مناطق بیشتر از کشت کلزا بود. به‌هرحال اختلاف بهره‌وری آبیاری در بین کشت کلزا و گندم نسبت به بهره‌وری آبیاری کاهش پیدا کرد و این موضوع احتمالاً به علت تعداد آبیاری کمتر در کشت کلزا (پنج آبیاری) نسبت به کشت گندم (هفت آبیاری) در سطح استان لرستان بود (جدول ۱). در بین شهرستان‌های مورد مطالعه پایین‌بودن بهره‌وری آبی و آبیاری در شهرستان الشتر را می‌توان با پایین‌بودن عملکرد دانه و بالا بودن تعداد آبیاری و تبخیر تعرق بیشتر در این شهرستان در کشت‌های گندم و کلزا مرتبط دانست (شکل ۲ و جدول ۱). در تحقیقی نشان داده شد که در بین بوم‌نظام‌های مختلف ذرت دانه‌ای استان خوزستان اختلاف قابل توجهی از لحاظ بهره‌وری آبیاری وجود داشت؛ به‌طوری‌که تحت بهینه‌ترین شرایط مدیریتی از لحاظ رقم و آبیاری بهره‌وری آبی از ۱۴/۹ کیلوگرم بر میلی‌متر در هکتار در شهرستان امیدیه تا ۲۹/۷ کیلوگرم بر میلی‌متر در هکتار در شهرستان شوشتر متغیر بود. همچنین گزارش شد که بین کشت زمستانه و تابستانه که دارای شرایط محیطی کاملا متفاوتی هستند اختلاف بهره‌وری آبی برابر با ۵/۵ کیلوگرم بر میلی‌متر در هکتار می‌باشد (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2019).



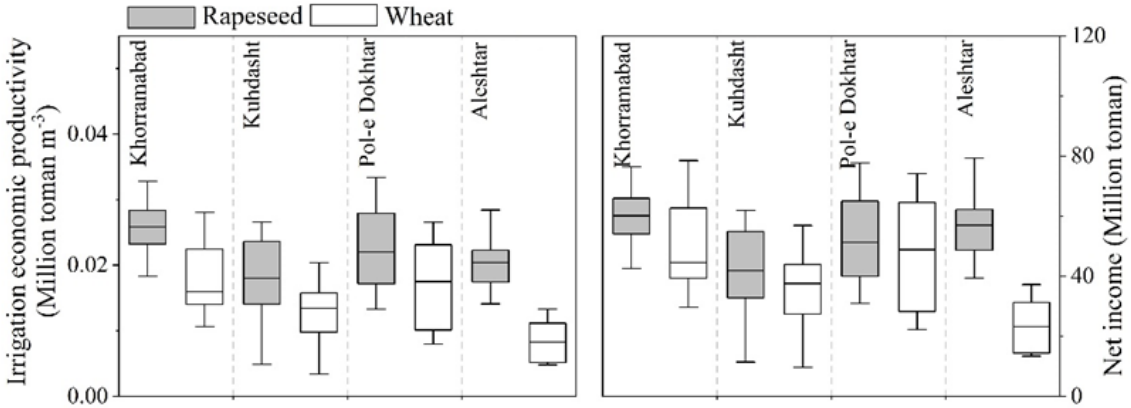
شکل ۳. رابطه بین عملکرد دانه گندم و کلزا با ظرفیت آب قابل دسترس خاک در مناطق مورد مطالعه.



شکل ٤. بهره‌وری آب و بهره‌وری آبیاری گندم و کلزا در مناطق مورد مطالعه.

۳-۴. بهره‌وری اقتصادی و درآمد خالص

میزان بهره‌وری اقتصادی و درآمد خالص در بوم‌نظام‌های گندم در استان لرستان به‌ترتیب برابر با ۰/۰۱۴ میلیون تومان بر متر مکعب و ۴۱/۱ میلیون تومان بود؛ درحالی‌که این مقدار برای بوم‌نظام‌های کلزا به‌ترتیب برابر با ۰/۲۲۰ میلیون تومان بر متر مکعب و ۵۹/۹ میلیون تومان بود (شکل ۵). همچنین تغییرات بهره‌وری اقتصادی برای بوم‌نظام‌های مختلف گندم از ۰/۰۰۹ (الشتر) تا ۰/۰۱۷ (خرم‌آباد) میلیون تومان بر متر مکعب بود. این صفت برای کلزا نیز از ۰/۰۱۸ (کوهدشت) تا ۰/۰۲۶ (خرم‌آباد) میلیون تومان بر متر مکعب متغیر بود. از لحاظ درآمد هم در بین مناطق و محصولات بررسی‌شده اختلاف قابل توجهی وجود داشت؛ به‌طوری‌که برای گندم دارای بالاترین درآمد خالص در منطقه پلدختر با ۵۴/۳ میلیون تومان در هکتار بود و کمترین میزان آن مربوط به منطقه الشتر با ۲۴/۸ میلیون تومان در هکتار بود. همچنین میزان درآمد خالص برای کشت کلزا در یک هکتار از ۴۲/۱ میلیون تومان در منطقه کوهدشت تا ۵۹/۸ میلیون تومان در منطقه خرم‌آباد متغیر بود (شکل ۵). بالا بودن میزان بهره‌وری اقتصادی و درآمد خالص در بوم‌نظام‌های کلزا در استان لرستان نسبت به گندم می‌تواند به دلیل چند مورد باشد؛ یکی از این موارد قیمت خرید تضمینی بالاتر هر کیلو کلزا (۲۳/۵ هزار تومان) نسبت به گندم (۱۱/۵ هزار تومان) در سال ۱۴۰۱ می‌باشد. همچنین با توجه به داده‌های جدول ۱ میزان هزینه تولید یک هکتار کلزا (۲۴/۱ میلیون تومان) نسبت به گندم (۲۷/۲ میلیون تومان) در بوم‌نظام‌های زراعی استان لرستان کمتر می‌باشد. این موضوع را می‌توان در بین مناطق مختلف مشاهده کرد؛ جایی که در آن کشاورزان شهرستان خرم‌آباد بالاترین بهره‌وری اقتصادی و درآمد خالص را به‌واسطه میزان هزینه کمتر (۱۷/۹ میلیون تومان) نسبت به شهرستان‌های دیگر کسب می‌کنند (شکل ۵ و جدول ۱). در مطالعه‌ای روی سودآوردی و بهره‌وری اقتصادی آب کشاورزی در تولید محصولات زراعی، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از مزارع تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر طی دوره ۹۸-۱۳۹۵، میانگین سود حاصل از مصرف هر متر مکعب آب آبیاری مصرفی در تولید گندم، جو، کلزا و ذرت علوفه‌ای آبی به‌ترتیب ۱۱۹۱/۱، ۱۰۷۵۰، ۷۲۹۱/۷ و ۱۳۱۲/۲ ریال بر متر مکعب آب تعیین شد (Asadi *et al.*, 2021). در تحقیقی دیگر روی منطقه دشت بهار استان همدان مشخص شد که در بین محصولات مورد بررسی بیشترین و کمترین شاخص بهره‌وری اقتصادی مربوط به محصولات سیر (*Allium sativum*) و یونجه بود (Zamani *et al.*, 2014).



شکل ۵. بهره‌وری اقتصادی آبیاری و درآمد خالص گندم و کلزا در مناطق مورد مطالعه.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در بوم‌نظام‌های گندم و کلزای استان لرستان از لحاظ میزان تولید، مصرف آب، بهره‌وری آبیاری و آبی، بهره‌وری اقتصادی و درآمد خالص اختلاف قابل توجهی وجود دارد که با در نظر گرفتن مناطق مختلف این اختلاف نیز بیشتر می‌شود. نتایج نشان داد اگرچه از لحاظ بهره‌وری آبی و عملکرد دانه، کشت گندم نسبت به کلزا دارای برتری می‌باشد ولی از لحاظ بهره‌وری آبیاری اختلاف قابل توجهی وجود نداشت. این در حالی بود که میزان مصرف آب در کشت کلزا نسبت به گندم پایین‌تر بود. همچنین نتایج نشان داد که بهره‌وری اقتصادی و درآمد خالص در بوم‌نظام‌های کلزا نسبت به گندم بسیار بیشتر بود؛ بنابراین اگر کشاورزان

کشت کلزا را جایگزین کشت گندم کنند از یک طرف از لحاظ اقتصادی درآمد بیشتری به‌دست می‌آورند و از سوی دیگر بار محیط زیستی کمتری به منابع آبی استان لرستان وارد خواهد شد. این موضوع به‌ویژه در شهرستان‌هایی که تولید کلزا دارای هزینه‌های تولیدی کمتری است می‌تواند بسیار مفید باشد. به‌طور کلی، حرکت از کشت گندم به سمت کلزا می‌تواند در بوم‌نظام‌های زراعی استان لرستان از لحاظ محیط زیستی و اقتصادی پایدار باشد. در پایان، باتوجه به اینکه این مطالعه فقط جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی (از بعد مصرف و بهره‌وری آب) را مورد بررسی قرار داده است، پیشنهاد می‌شود که مطالعات دیگر بر سایر جنبه‌های این جایگزینی کشت از جمله ابعاد اجتماعی، سیاسی و ... متمرکز شوند.

سپاس¬گذاری

این مقاله بر اساس نتایج یک پایانامه کارشناسی ارشد تحت حمایت دانشگاه لرستان می¬باشد.

۵. منابع

Asadi, H., Mahmoodi, M., & Zare, S. (2021). Determining profitability and the economic productivity of agricultural water in crop production. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *15*(6), 1404-1411. (In Persian).

Chenu, K., Deihimfard, R., & Chapman, S.C. (2013). Large-scale characterization of drought pattern: A continent-wide modelling approach applied to the Australian wheatbelt–spatial and temporal trends. *New Phytologist*, *198*(3), 801–820.

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

Deihimfard, R., Mahallati, M.N., & Koocheki, A. (2015). Yield gap analysis in major wheat growing areas of khorasan province, Iran, through crop modelling. *Field Crops Research*, *184*, 28-38.

Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., & 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.

Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., Collins, B., & Azizi, K. (2022). Future climate change could reduce irrigated and rainfed wheat water footprint in arid environments. *Science of the Total Environment*, *807*, 150991.

Dettori, M., Cesaraccio, C., Motroni, A., Spano, D., & Duce, P. (2011). Using CERES-wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy. *Field Crops Research*, *120*(1), 179-188.

Dipenbrock, W. (2000). Yield analysis of the winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review. *Field Crops Research*, *67*, 35-49.

Ebrahimi-Pak, N. (2022). The effect of irrigation amount and scheduling on rapeseed oil. In: Proceedings of 9th Iranian Congress of Agricultural Sciences and Plant Breeding, 24 Aug., Karaj, Iran. (In Persain).

Eweida, M.T., Hagras, A., Fayed, M.H., Kafour, E.L., & Abdel-Ruouf, E.L. (1981). Influence of some nutrient elements on plant characters, seed yield and quality in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Research Bulletin Faculty of Agriculture, Ainshams University. No, 1437, 18 pp.

Eyni-Nargeseh, H., Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, S., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2019). Analysis of growth functions that can increase irrigated wheat yield under climate change. *Meteorological Applications*, *27*(1), e1804.

Hajare, H.V., Raman, N.S., & Dharkar, E.J. (2008). New technique for evaluation of crop water requirement. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, *4*(5), 436-446.8.

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

Holder, A.J., Mccalmont, J.P., Mcnamara, N.P., Rowe, R., & Donnison, I.S. (2018). Evapotranspiration model comparison and an estimate of field scale miscanthus canopy precipitation interception. *GCB Bioenergy*, *10*, 353-366.

Honar, T., Sabet Sarvestani, A., Kamgar Haghighi, A., & Shams, S. (2011). Calibration of crop system model for growth simulation and yield estimation of canola. *Water and Soil*, *25*(3), 593-605. (In Persian).

Hoogenboom, G., Jones, J.W., Porter, C.H., Wilkens, P.W., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., & Tsuji, G.Y. (Editors). (2003). Decision support system for agrotechnology transfer Version 4.0. Vol. 1: Overview. University of Hawaii, Honolulu, HI.

Karimi, M., & Jolaini, M. (2017). Evaluation of agricultural water productivity indices in major field crops in Mashhad plain (Technical Note). *Journal of Water and Sustainable Development*, *4*(1), 133-138. (In Persian).

Karimi, M., Sedighi Nasr, S., & Esfahani, A. (2002). Water use efficiency of crops in Iran. *Dryness and Drought*, *4*(1), 52-56. (In Persian).

Khan, S., Khan, M.A., & Latif, N. (2010). Energy requirements and economic analysis of wheat, rice and barley production in Australia. *Soil and Environment*, *29*(1), 61-68.

Kholov´a, J., McLean, G., Vadez, V., Craufurd, P., & Hammer, G.L. (2013). Drought stress characterization of post-rainy season (rabi) sorghum in India. *Field Crops Research*, *141*, 38–46.

Mendenhall, W., Sincich, T., & Boudreau, N.S. (1996). A second course in statistics: Regression analysis. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey.

Naderianfar, M., & Dehghan, H. (2020). Investigation of water use efficiency of wheat and barley in Arable lands of Sistan plain. *Crop Science Research in Arid Region*, *2*(1), 1-9. (In Persian).

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., Deihimfard, R., Azizi, K., & Roostaei, M. (2021). Characterizing spatial and temporal trends in drought patterns of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) across various climatic conditions: A modelling approach. *European Journal of Agronomy*, *129*, 126333.

Rahimi-Moghaddam, S., Eyni-Nargeseh, H., Ahmadi, S.A.K., & Azizi, K. (2021). Towards withholding irrigation regimes and drought-resistant genotypes as strategies to increase canola production in drought-prone environments: A modeling approach. *Agricultural Water Management*, *243*, 106487.

Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2019). Optimal genotype environment management as a strategy to increase grain maize productivity and water use efficiency in water-limited environments and rising temperature. *Ecological Indicators*, *107*, 105-170.

Robertson, M.J., & Lilley, J.M. (2016). Simulation of growth, development and yield of canola (*Brassica napus*) in APSIM. *Crop & Pasture Science*, *67*(4), 332-344.

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

Salama, M.A., Yousef, K.M., & Mostafa, A.Z. (2015). Simple equation for estimating actual evapotranspiration using heat units for wheat in arid regions. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *8*(3), 418-427.

Seifert, E. (2014). OriginPro 9.1: Scientific data analysis and graphing software- software review. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *54*, 1552–1552.

Wallach, D., & Goffinet, B. (1987). Mean squared error of prediction in models for studying economic and agricultural systems. *Biometrics*, *43*, 561–576.

Wang, S., Wang, E., Wang, F., & Tan, L. (2012). Phenological development and grain yield of canola as affected by sowing date and climate variation in the Yangtze River basin of China. *Crop & Pasture Science*, *63*, 478–488.

Watson, J., Zheng, B., Chapman, S., & Chenu, K. (2017). Projected impact of future climate on water-stress patterns across the Australian wheatbelt. *Journal of Experimental Botany*, *68*(21), 5907–5921.

Willmott, C.J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over theroot mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, *30*, 79–82.

Zamani, O., Mortazavi, S., & Baladi, H. (2014). Economical water productivity of agricultural products in Bahar plain, Hamadan. *Journal of Water Research in Agriculture*, *28*(1), 51-62. (In Persian).

Zare, S., Zare Fizabadi, A., & Sabouhi, M. (2014). Investigation of yield and economic analysis of wheat- based crop rotation systems. *Seed and Plant Production Journal*, *30*(2), 19-33. (In Persian).

Zhao, W., Liu, B., & Zhang, Z. (2010). Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. *Agricultural Water Management*, *97*(2), 215–223.