



Evaluating the efficiency of the WOFOST model to determine the effective climatic potential on rapeseed yield in Lorestan province

Mahdi Sahnalizadeh¹, Behrouz Nasiri², Sajjad Rahimi-Moghaddam³, ✉, Mostafa Karampour⁴, 

1. Department of Geographical Sciences, Faculty of Literature and Humanities, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: mehdi.sahn2013@gmail.com

2. Department of Geographical Sciences, Faculty of Literature and Humanities, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: nasiri.b@lu.ac.ir

3. Corresponding author, Department of Plant Production and Genetics Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: rahimi.s@lu.ac.ir

4. Department of Geographical Sciences, Faculty of Literature and Humanities, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: karampour.m@lu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 21 July 2025;

Received in revised form:
24 October 2025;

Accepted: 09 December
2025

Available online: 03
August 2026

Keywords:

rapeseed, WOFOST
model, Lorestan
province, model
performance assessment.

ABSTRACT

Objective: Rapeseed is one of the major oilseed crops in Iran and has considerable potential for expanding the cultivated area and contributing to the country's edible oil supply. Modeling approaches can be used to assess the cultivation potential of crops, including rapeseed, across different regions.

Method: The present study aimed to evaluate the WOFOST model for simulating rapeseed growth and yield in Lorestan province and to identify suitable areas for rapeseed cultivation. The study area included the counties of Azna, Aleshtar, Aligudarz, Borujerd, Pol-e Dokhtar, Khorramabad, Dorud, Kuhdasht, and Nurabad. The WOFOST model was applied to simulate rapeseed growth and yield, and model calibration and validation were assessed using nRMSE, d-index, and MBE. Yield and climatic variables were zoned using interpolation techniques in GIS 10.8 software.

Results: The calibration and validation results indicated that the WOFOST model simulated rapeseed growth and yield with high accuracy under potential and water-limited conditions. Simulation results showed that the highest grain yield was obtained in the eastern part of the province, particularly in Dorud county (7957 kg/ha), and in the northern region, including Borujerd county (6286 kg/ha). In contrast, Aligudarz and Aleshtar counties had the lowest rapeseed grain yields.

Conclusions: Overall, considering the favorable climatic conditions of Dorud and Borujerd, including suitable minimum and maximum temperatures and adequate rainfall amount and distribution during the rapeseed growing period, the expansion of rapeseed cultivation in these areas is more suitable than in other parts of Lorestan province.

1. Introduction

Rapeseed (*Brassica napus* L.) is known as the third most important oilseed crop in the world and is cultivated in a wide range of fields around the world due to its good characteristics such as

resistance to drought, salinity, and cold, high rotation value, and high ability to compete with weeds. An acceptable share of the country's water resources (about 12 percent) on the one hand and favorable precipitation on the other hand have

Cite this article: Sahnalizadeh, M., Nasiri, B., Rahimi-Moghaddam, S., Karampour, M. (2026). Evaluating the efficiency of the WOFOST model to determine the effective climatic potential on rapeseed yield in Lorestan province, *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*, 7 (26), 23-42. <http://doi.org/10.22034/gsma.2026.2066586.1108>



© Author(s) retain the copyright and full publishing rights.

Publisher: Lorestan University.



DOI: <http://doi.org/10.22034/gsma.2026.2066586.1108>

made it possible to cultivate and increase the cultivated area and production of rapeseed in Lorestan province. There are various approaches to assessing crop cultivation potential, including the direct approach of cultivating the crop in different years and regions, which would not be a suitable choice due to its high cost and time-consuming nature. Another approach for determining the potential of regions is to use a modeling approach and estimate the ability of each region to produce the desired crop. Accordingly, the present study aimed to evaluate the WOFOST model in simulating rapeseed growth and yield and identifying potential areas suitable for rapeseed cultivation in different counties of Lorestan province, considering different climatic variables.

2. Methodology

This research was conducted in the counties of Azna, Aleshtar, Aligudarz, Borujerd, Pol-e Dokhtar, Khorramabad, Dorud, Kuhdasht, and Nurabad located in Lorestan province. The WOFOST model was used to simulate the growth and development of rapeseed. The statistical indices of nRMSE, d-index, and MBE were used to evaluate the model. Finally, zoning maps of rapeseed yield, rapeseed growth period, and climatic variables (average minimum temperature, average maximum temperature, and average annual precipitation) in Lorestan province were drawn using GIS 10.8 software.

3. Results

The results of the calibration and validation showed that the WOFOST model simulated the growth and yield of rapeseed with high accuracy under potential and water-limited conditions. The soil moisture storage calculated by the model under full irrigation (irrigated cultivation) and rainfed cultivation were compared with the actual amount. In this evaluation, the WOFOST model was able to estimate the amount of stored moisture in the soil reasonably well. The highest average minimum temperature in the studied areas, with an average of 16.8 °C, belonged to Pol-e Dokhtar county, while the counties of Azna (5 °C) and Aligudarz (6.4 °C) in the eastern half of the province and the counties of Aleshtar (6.2 °C) and Nurabad (4.9 °C) in the north of Lorestan province had lower average minimum temperatures. In Lorestan province, the highest average annual maximum temperature was observed in the south of the province (Pol-e Dokhtar county with an average of 28.8°C), while the eastern regions (Azna and Aligudarz with averages of 20.6°C and 19.9°C, respectively) and the northern regions (Borujerd and Nurabad with averages of 22.1°C and 19.5°C) had lower average

maximum temperatures than other regions of the province. Precipitation ranged from 373 mm in Pol-e Dokhtar county to 643 mm in Dorud county. The longest growing season was observed in Azna, Aligudarz, and Nurabad counties with an average of 161 days. On the other hand, the shortest growing season (99 days) was recorded in Pol-e Dokhtar county. The simulation results showed that the highest grain yield was produced in the eastern half of the province, especially in Dorud county (7957 kg/ha) and the north of the province, including Borujerd (6286 kg/ha). On the other hand, Aligudarz and Aleshtar counties had the lowest rapeseed yield.

4. Discussion

The findings of this study showed that the central and eastern half of Lorestan province (specifically, Dorud county) had the highest rapeseed yield. Among the reasons for the high rapeseed yield in Dorud county can be attributed to the high rainfall (643 mm), the average favorable and cool air temperature (16.4 °C), and the long growth period (157 days) for photosynthesis and sufficient dry matter production. On the other hand, the counties of Khorramabad and Pol-e Dokhtar had a low average grain yield compared to other studied areas, which can be attributed to the inappropriate amount and distribution of seasonal rainfall on the one hand and the shorter growing season on the other hand, among the factors affecting the decline in rapeseed yield in these areas. The results of linear regression between grain yield and growing period length, average annual rainfall, and minimum and maximum temperatures also confirmed the above, showing that areas with high rainfall and long growing period had higher grain yield.

5. Conclusion

In general, considering the suitable climate of the counties of Dorud and Borujerd and the minimum and maximum temperatures that are favorable for canola growth, as well as the amount and distribution of rainfall during the canola growth period, the development of canola cultivation in the aforementioned areas is more suitable than in other areas of the province.

Author Contributions

All authors contributed equally to all aspects of this study and approved the final manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

Not applicable.

Ethical Considerations

The authors declare that this research was conducted in accordance with ethical standards and research integrity principles.

Funding

This study was conducted as part of a Ph.D. dissertation at Lorestan University. The authors acknowledge the financial and institutional support provided by Lorestan University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



سنجش کارایی مدل WOFOST جهت تعیین پتانسیل اقلیمی مؤثر بر عملکرد دانه کلزا

در استان لرستان

مهدی صحنعلی زاده^۱؛ بهروز نصیری^۲؛ سجاد رحیمی مقدم^۳؛ مصطفی کرم پور^۴

۱. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: mehdi.sahn2013@gmail.com

۲. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: nasiri.b@lu.ac.ir

۳. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: rahimi.s@lu.ac.ir

۴. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: karampoor.m@lu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت مقاله:

۱۴۰۴/۰۴/۳۰

تاریخ تجدیدنظر:

۱۴۰۴/۰۸/۰۲

پذیرش نهایی:

۱۴۰۴/۰۹/۱۸

تاریخ انتشار:

۱۴۰۵/۰۵/۱۲

واژگان کلیدی:

استان لرستان، سنجش

کارایی مدل، کلزا، مدل

WOFOST

هدف: کلزا یکی از محصولات دانه روغنی مهم در کشور است که از پتانسیل بالایی برای توسعه سطح زیر کشت و تأمین نیاز روغن کشور برخوردار است. به منظور پتانسیل یابی کشت محصولات زراعی از جمله کلزا، می توان از رهیافت مدل سازی در مناطق مختلف استفاده کرد.

روش: تحقیق حاضر با هدف ارزیابی مدل WOFOST برای شبیه سازی رشد و عملکرد کلزا در استان لرستان، و پتانسیل یابی مناطق مختلف استان جهت شناسایی مناطق مناسب کشت کلزا انجام شد. محدوده مورد مطالعه جهت پهنه بندی عملکرد کلزا شامل شهرهای ازنا، الشتر، الیگودرز، بروجرد، پلدختر، خرم آباد، درود، کوهدشت و نورآباد بود. به منظور شبیه سازی رشد و عملکرد کلزا از مدل WOFOST استفاده گردید و واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از شاخص های $d-index$ ، $nRMSE$ و MBE مورد آزمون قرار گرفت. پهنه بندی عملکرد و متغیرهای اقلیمی نیز با استفاده از روش درونیابی در نرم افزار GIS 10.8 انجام شد.

نتایج: نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد مدل WOFOST با دقت بالایی رشد و عملکرد کلزا را تحت شرایط پتانسیل و محدودیت آب شبیه سازی کرد. نتایج شبیه سازی نشان داد بیشترین عملکرد دانه در نیمه شرقی استان بخصوص شهرستان درود (۷۹۵۷ کیلوگرم در هکتار) و شمال استان شامل بروجرد (۶۲۸۶ کیلوگرم در هکتار) تولید شد. در طرف مقابل، شهرستان های الیگودرز و الشتر کمترین عملکرد دانه کلزا را داشتند.

نتیجه گیری: به طور کلی با توجه به اقلیم مناسب شهرستان های درود و بروجرد و برخورداری از دماهای کمینه و بیشینه مطلوب برای رشد کلزا و همچنین میزان و توزیع بارندگی ها در طول دوره رشد کلزا، توسعه کشت کلزا در مناطق مذکور مناسب تر از سایر مناطق استان است.

استناد: صحنعلی زاده، مهدی؛ نصیری، بهروز؛ رحیمی مقدم، سجاد؛ و کرم پور، مصطفی (۱۴۰۵). سنجش کارایی مدل WOFOST جهت تعیین پتانسیل

اقلیمی مؤثر بر عملکرد دانه کلزا در استان لرستان. *مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی*، ۷ (۲۶)، ۴۲-۲۳. <http://doi.org/10.22034/gsma.2026.2066586.1108>

10.22034/gsma.2026.2066586.1108



DOI: <http://doi.org/10.22034/gsma.2026.2066586.1108>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه لرستان.

۱. مقدمه

کلزا با نام علمی *Brassica napus* به عنوان سومین گیاه دانه روغنی مهم دنیا شناخته شده است و به دلیل خصوصیات خوب مانند مقاومت به کم آبی، شوری و سرما، ارزش تناوبی زیاد و قابلیت بالا در رقابت با علف‌های هرز در سطح وسیعی از مزارع جهان کشت می‌گردد. لزوم توجه به وضعیت تولید دانه‌های روغنی (کلزا) از ضرورت نیاز به روغن در سبد مصرفی خانوارها نشأت می‌گیرد. دانه کلزا حاوی ۴۰-۴۵ درصد روغن، ۱۷ تا ۲۶ درصد پروتئین و کنجاله آن حاوی ۵۰ درصد پروتئین است. کنجاله کلزا دارای ترکیب متوازی از اسیدهای آمینه است. کلزا در حال حاضر استراتژیک‌ترین محصول جهت خودکفایی در تولید روغن خوراکی مورد نیاز کشور است.

در استان لرستان به علت وجود ۱۲ درصد از منابع آبی کشور و همچنین بارش مطلوب نزولات جوی، امکان کشت، افزایش سطح زیر کشت و افزایش تولید دانه کلزا وجود دارد (Torabi Podeh & Emamgholizadeh, 2014: 75). سطح زیر کشت کلزا در کشور ایران ۱۵۳/۵۳۶ هکتار بوده که سهم استان لرستان ۱۶۲۳ هکتار در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ بود (Statistics of crops of the Ministry of Agricultural Jihad, 2023: 41). با توجه به توانایی بالقوه این استان و داشتن دامنه متنوع اقلیمی از سرد و معتدل تا گرم و نیمه خشک و همچنین دخایر آبی و بارش مناسب، این سطح زیر کشت قابل ارتقا می‌باشد. با این وجود باید ارزیابی دقیقی از پتانسیل تولید این محصول زراعی در سطح استان انجام شود که تمام مناطق مختلف را شامل شود. برای ارزیابی پتانسیل کشت محصول راهکارهای مختلفی وجود دارد؛ از جمله راهکار مستقیم کشت محصول در سال‌ها و مناطق مختلف که به دلیل هزینه بالا و زمان‌بر بودن این راهکار، انتخاب مناسبی نخواهد بود. راهکار دیگر برای پتانسیل‌یابی مناطق، استفاده از رهیافت مدل‌سازی و برآورد میزان توانایی هر منطقه در زمینه تولید محصول مورد نظر است.

یکی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو محصولات زراعی، مدل WOFOST^۱ است. این مدل ابزاری برای تجزیه و تحلیل کمی رشد و عملکرد محصولات زراعی یکساله است. این مدل در چارچوب مطالعات بین رشته‌ای در مورد امنیت غذایی جهان و

پتانسیل تولید غذای جهان و توسط مرکز مطالعات غذایی جهان با همکاری دانشگاه کشاورزی واگنینگن ساخته شد (Boogaard et al, 2011: 11). مدل WOFOST می‌تواند در شرایط تحت آبیاری، تنش خشکی و تنش غذایی عملکرد محصولات زراعی یکساله را برآورد کند. مدل مذکور رشد و نمو گیاه را از جوانه‌زنی تا رسیدگی، شبیه‌سازی می‌کند. مدل WOFOST عملکرد تعدادی از گیاهان زراعی را در سه وضعیت شامل پتانسیل تولید، تولید با محدودیت آب و تولید با محدودیت نیتروژن بررسی می‌کند (Nasiri Mahallati & Koocheki, 2009: 300). این مدل با بکارگیری طیف متنوعی از داده‌ها به صورت روزانه، به برآورد شاخص‌های مختلف مانند شاخص سطح برگ، شاخص برداشت، عملکرد بیوماس و عملکرد دانه می‌پردازد.

پهنه‌بندی نواحی بر مبنای استعداد تولید، امروزه به کمک مدل‌های زراعی صورت می‌گیرد. با کمک روش‌های پهنه‌بندی اگروکلیماتیک می‌توان ابعاد مختلف کشاورزی را از بعد مکانی-زمانی مورد مطالعه قرار داد و پس از هماهنگ کردن این جوانب، نواحی یکنواختی را درون یک منطقه تعیین حدود کرد (Gharineh et al, 2012: 255). در واقع پس از تلفیق داده‌های خروجی مدل WOFOST در زمینه تخمین عملکرد کلزا با داده‌های مکانی در استان لرستان، استعداد هر منطقه به کمک روش‌های متداول میانایی با بهره بردن از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مشخص می‌شود.

Ebrahimipak et al (2018) کارایی مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین را بررسی کردند. آماره nRMSE برای مدل‌های AquaCrop، WOFOST و CropSyst در تعیین عملکرد به ترتیب برابر با ۰/۱۰، ۰/۱۳ و ۰/۱۵ و در تعیین بیوماس ۰/۰۴، ۰/۰۹ و ۰/۰۹ بود. نتایج آماره EF نشان داد که AquaCrop بهترین کارایی را در تعیین عملکرد (۰/۵۷) و زیست‌توده (۰/۹۱) داشت. Rahimi-Moghaddam et al (2021) عملکرد دانه کلزا را تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در ده منطقه از چهار استان غربی و جنوب غربی ایران با بکارگیری مدل APSIM-canola بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پتانسیل عملکرد کلزا در

^۱World Food Studies

دانه (به ترتیب: ۰/۸۹، ۲۶۸/۷۶ کیلوگرم در هکتار و ۴/۰۱ درصد) و در رسیدگی فیزئولوژیک (به ترتیب: ۰/۹۸، ۱۰۲/۶۵ کیلوگرم در هکتار و ۱/۵۳ درصد) برآورد شدند. به این ترتیب مدل با کارایی مطلوبی توانست پتانسیل عملکرد ذرت را شبیه سازی کند.

از آنجایی که تاکنون رشد و نمو کلزا با استفاده از مدل رشدی WOFOST در استان لرستان مورد بررسی قرار نگرفته است و با توجه به اهمیت این گیاه در تأمین روغن مورد نیاز کشور و شرایط اقلیمی مناسب استان برای توسعه سطح زیر کشت آن، این تحقیق با هدف ارزیابی عملکرد مدل WOFOST در شبیه سازی رشد و عملکرد کلزا و پتانسیل یابی مناطق مستعد کشت این محصول در شهرستان های مختلف استان لرستان انجام شد. در این راستا، با بهره گیری از تلفیق رهیافت های سیستمی از جمله مدلسازی فرایندهای رشد گیاه و تحلیل فضایی در محیط GIS، تلاش شد تا چارچوبی علمی برای تصمیم گیری بهینه در برنامه ریزی کشت کلزا در شرایط اقلیمی متنوع استان ارائه گردد.

۲. روش تحقیق

۲.۱. معرفی محدوده مورد مطالعه

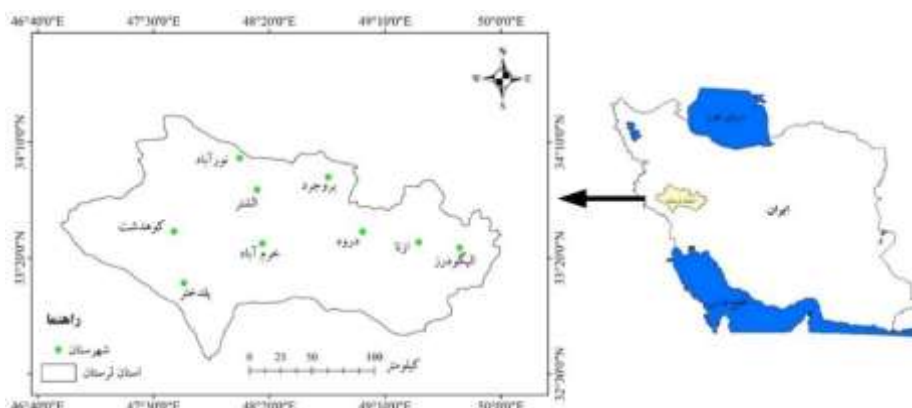
محدوده مورد مطالعه جهت پهنه بندی عملکرد کلزا شامل استان لرستان می باشد (شکل ۱). این استان با وسعت حدود ۲۸۵۵۹ کیلومتر مربع در غرب ایران قرار گرفته است. لرستان بین ۴۶ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۲ دقیقه و ۳۴ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی از خط استوار قرار گرفته است. لرستان سرزمینی کوهستانی است و غیر از چند دشت محدود، سراسر آن را کوه های زاگرس پوشانده است. اشترانکوه با ۴۱۵۰ متر ارتفاع، بلندترین نقطه استان واقع در حد فاصل شهرستان های درود، ازنا و الیگودرز و پست ترین نقطه آن در جنوبی ترین ناحیه استان واقع شده و حدود ۵۰۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. این تحقیق در شهرستان های ازنا، الشتر، الیگودرز، بروجرد، پلدختر، خرم آباد، درود، کوهدشت و نورآباد انجام شد. موقعیت جغرافیایی ایستگاه های مورد مطالعه در شکل ۱ معرفی نشان داده شده است. همچنین اطلاعات آب و هوایی (اخذ شده از اداره کل هواشناسی استان لرستان) و جغرافیایی مناطق مورد بررسی و دوره آماری مربوط به هر ایستگاه در جدول ۱ ارائه گردیده است.

غرب ایران بواسطه دارا بودن اقلیم معتدل تر (۲۸۵۲/۶ کیلوگرم در هکتار) نسبت به جنوب غرب که اقلیمی گرمی دارد (۱۸۸۵/۱ کیلوگرم) بیشتر بود. در این تحقیق، رقم Hyola401 بیشترین عملکرد (۲۷۹۸/۴ کیلوگرم در هکتار) را در شرایط بدون محدودیت آب به خود اختصاص داد.

Gharineh et al (2012) اقدام به منطقه بندی آگروکلیماتیکی استان خوزستان بر اساس پتانسیل عملکرد گندم آبی کردند. در این تحقیق از مدل WOFOST استفاده شد. نتایج ارزیابی و واسنجی مدل حاکی از شبیه سازی قابل قبول عملکرد گندم آبی توسط مدل WOFOST بود. مقدار RMSE برای عملکرد دانه ۱۲۷۴ و ۸۱۰ کیلوگرم در هکتار بدست آمد. بیشترین و کمترین عملکرد شبیه سازی به ترتیب مربوط به ایزه (۹۲۴۷ کیلوگرم در هکتار) و شوشتر (۷۵۳۸ کیلوگرم در هکتار) بود. در نهایت در این تحقیق استان خوزستان به سه منطقه اقلیم زراعی تقسیم شد: ۱- ایزه ۲- بستان، مسجد سلیمان، دزفول و بهبهان ۳- امیدیه، آبادان، اهواز، رامهرمز، ماهشهر و شوشتر.

Zhiqiang et al (2022) کارایی و انطباق مدل WOFOST را جهت شبیه سازی رشد و نمو گندم زمستانه در استان شانندونگ چین مورد بررسی قرار دادند. مقدار شاخص R^2 برای ارزیابی مدل در زمینه تعیین زمان پر شدن دانه، دوره گل دهی و دوره رسیدگی به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۶۹ و ۰/۶۸ بود. همچنین مقدار nRMSE به ترتیب ۰/۶۸، ۴/۳ و ۳/۲ درصد بدست آمد. در زمینه عملکرد نیز شبیه سازی مدل در شرایط تنش خشکی، R^2 و nRMSE برابر با ۰/۷۷ و ۷/۴ درصد بودند. ضمن اینکه با افزایش شدت خشکی مقدار عملکرد بیوماس، حداکثر مقدار شاخص سطح برگ، مجموع وزن خشک برگ ها و مجموع عملکرد دانه به ترتیب ۱۳/۶ تا ۴۱ درصد، ۳۷/۸ تا ۵۶/۵ درصد، ۱۹/۴ تا ۴۲/۱ درصد و ۲۰/۳ تا ۵۱/۲ درصد کاهش داشتند. نتایج همچنین ثابت کرد که مدل WOFOST به خوبی می تواند فرایند تولید و عملکرد کلزا را در هر دو شرایط عادی و هم شرایط تنش خشکی، شبیه سازی کند.

Ren et al (2023) در استان شانندونگ در ساحل شرقی چین به پیش بینی عملکرد پتانسیل ذرت تابستانه در فازهای مختلف رشد این محصول پرداختند. در این مطالعه از مدل WOFOST استفاده شد. نتایج ارزیابی مدل نشان داد که مقدار شاخص های آماری R^2 ، RMSE و MRE در مرحله کاشت تا گلدهی (به ترتیب: ۰/۵۳، ۵۵۴/۸۴ کیلوگرم در هکتار و ۸/۲۷ درصد) در مرحله شیری شدن



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان لرستان و ایستگاه‌های سینوپتیک محدوده مورد مطالعه، منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

جدول ۱. میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی (بارش، دمای بیشینه و کمینه)، ارتفاع از سطح دریا و دوره آماری ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان لرستان.

ایستگاه	ارتفاع (متر)	بارش (میلی‌متر)	دمای بیشینه (سانتی‌گراد)	دمای کمینه (سانتی‌گراد)	دوره آماری
الشتر	۱۵۶۷/۲	۴۶۶/۱	۲۳/۹	۶/۲	۱۹۹۵-۲۰۲۱
الیگودرز	۲۰۲۲	۳۸۸/۲	۱۹/۹	۶/۴	۱۹۹۹-۲۰۱۸
ازنا	۱۸۷۱/۹	۴۸۸/۶	۱۹/۵	۴/۹	۲۰۰۲-۲۰۱۸
بروجرد	۱۶۳۲/۴	۴۷۲/۷	۲۲/۱	۸/۹	۱۹۹۹-۲۰۱۸
پلدختر	۱۶۳۲/۴	۳۷۲/۶	۲۸/۸	۱۶/۸	۱۹۹۹-۲۰۱۸
خرم‌آباد	۱۱۴۷/۸	۴۴۲/۹	۲۵/۵	۹/۱	۱۹۹۹-۲۰۱۹
دورود	۱۵۲۲/۲	۶۴۳/۲	۲۲/۷	۱۰/۲	۲۰۰۱-۲۰۲۱
کوه‌دشت	۱۱۹۷/۸	۳۷۳/۵	۲۵/۱	۷/۴	۱۹۹۹-۲۰۱۸
نورآباد	۱۸۵۹/۱	۵۳۳/۹	۱۹/۵	۴/۹	۲۰۰۲-۲۰۲۱

منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

عملکرد، محدودیت آبی و کاهش عملکرد محصول را محاسبه

نمود (Boogaard, 2011: 17).

مدل WOFOST عضوی از خانواده بزرگ مدل‌های شبیه‌سازی است که در دانشگاه واگنینگن هلند توسعه یافته است. این مدل ابتدا جهت دستیابی به پتانسیل عملکرد محصولات زراعی یکساله در کشورهای منطقه حاره مورد استفاده قرار گرفت (Boogaard, 2011: 17).

برای واسنجی مدل از پژوهش (Ghobadi, 2006) استفاده شد. این آزمایش مزرعه‌ای در سال‌های ۱۳۸۲-۸۳ و ۸۴-۱۳۸۳ (معادل با ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ میلادی) در مزرعه نمونه دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان اجرا شد. این مزرعه در شهر رامین و در شمال شرقی شهرستان اهواز قرار دارد.

۲.۲. توصیف، واسنجی و سنجش کارایی مدل

WOFOST

مدل WOFOST ابزاری برای تجزیه و تحلیل کمی رشد و عملکرد محصولات زراعی یکساله است؛ مانند سایر مدل‌های شبیه‌سازی کشاورزی، این مدل نیز یک ساده‌سازی از واقعیت است. عملکرد محصول نتیجه همکاری متقابل عوامل اکولوژیکی، تکنولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی است. در مدل WOFOST تنها عوامل اکولوژیکی و مدیریت زراعی مورد توجه قرار می‌گیرند. این مدل رشد را بر پایه فرایندهای مهمی چون فتوسنتز، تنفس گیاه و تاثیر شرایط محیطی بر این فرایندها تفسیر می‌نماید. با استفاده از این مدل می‌توان عملکرد محصول، بیوماس، پتانسیل

این آزمایش که آزمایش تاریخ کاشت نیز محسوب می شود در سه تاریخ کاشت مختلف (۱ آذرماه، ۲۰ آذرماه و ۱۰ دی ماه در هر دو سال اجرای تحقیق) انجام شد و خصوصیات مختلف شامل طول دوره رشد در هر مرحله تا عملکرد بیوماس، عملکرد دانه، شاخص سطح برگ و شاخص برداشت تعیین گردید. بنابراین جهت واسنجی مدل WOFOST از نتایج این آزمایش استفاده شد. در این پژوهش، فرآیند تنظیم و واسنجی مدل به صورت گام به گام و از طریق روش سعی و خطا انجام شد؛ به گونه ای که با تغییر تدریجی پارامترهای مدل و مقایسه ی خروجی های شبیه سازی شده با داده های مشاهده شده ی واقعی، میزان اختلاف میان آن ها کاهش یافت تا در نهایت بهترین تطابق بین داده های شبیه سازی شده و داده های مشاهده شده حاصل شد.

برای ارزیابی مدل، از داده های آزمایش های رحیمی مقدم و همکاران (Rahimi-Moghaddam et al, 2021) و دالوند و همکاران (Dalvand et al, 2013) استفاده شد که شرایط اقلیمی متنوع از جمله اقلیم استان لرستان را در بر می گرفتند. این آزمایش ها برای ارزیابی عملکرد دانه در شرایط پتانسیل و محدودیت آب و همچنین وضعیت رطوبت خاک استفاده شد تا توان مدل در شبیه سازی عملکرد در شرایط مختلف اقلیمی و رطوبتی مورد سنجش قرار گیرد.

توصیف، واسنجی و سنجش کارایی مدل WOFOST

داده های اقلیمی مورد نیاز جهت واسنجی و شبیه سازی نهایی، از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید و به قالب منطبق با محیط کاربری مدل تبدیل شد. این داده ها شامل دمای کمینه و بیشینه، سرعت باد در ارتفاع دو متر بر حسب متر بر ثانیه، بارش، فشار بخار آب (هکتوپاسکال) و تابش (کیلوژول بر متر مربع) می شوند که همگی به صورت روزانه جمع آوری شدند. برای محاسبه میزان تابش در نقاط و روزهایی که این متغیر در ایستگاه وجود نداشت از میزان ساعات آفتابی کمک گرفته شد (Soltani & Sinclair, 2012).

اطلاعات و داده های مرتبط با مدیریت زراعی شامل تاریخ کاشت، طول دوره رشد، سطح زیر کشت، متوسط عملکرد واقعی و تاریخ رسیدگی و برداشت مورد نیاز مدلسازی، از جهاد کشاورزی استان لرستان اخذ گردید. از این داده ها در بخش مدیریت زراعی مدل استفاده شد (جدول ۲).

داده های گیاهی مورد نیاز جهت بکارگیری در مدل WOFOST شامل خصوصیات نمو و فنولوژی و اکولوژی می شود. دمای

این آزمایش که آزمایش تاریخ کاشت نیز محسوب می شود در سه تاریخ کاشت مختلف (۱ آذرماه، ۲۰ آذرماه و ۱۰ دی ماه در هر دو سال اجرای تحقیق) انجام شد و خصوصیات مختلف شامل طول دوره رشد در هر مرحله تا عملکرد بیوماس، عملکرد دانه، شاخص سطح برگ و شاخص برداشت تعیین گردید. بنابراین جهت واسنجی مدل WOFOST از نتایج این آزمایش استفاده شد. در این پژوهش، فرآیند تنظیم و واسنجی مدل به صورت گام به گام و از طریق روش سعی و خطا انجام شد؛ به گونه ای که با تغییر تدریجی پارامترهای مدل و مقایسه ی خروجی های شبیه سازی شده با داده های مشاهده شده ی واقعی، میزان اختلاف میان آن ها کاهش یافت تا در نهایت بهترین تطابق بین داده های شبیه سازی شده و داده های مشاهده شده حاصل شد.

برای ارزیابی مدل، از داده های آزمایش های رحیمی مقدم و همکاران (Rahimi-Moghaddam et al, 2021) و دالوند و همکاران (Dalvand et al, 2013) استفاده شد که شرایط اقلیمی متنوع از جمله اقلیم استان لرستان را در بر می گرفتند. این آزمایش ها برای ارزیابی عملکرد دانه در شرایط پتانسیل و محدودیت آب و همچنین وضعیت رطوبت خاک استفاده شد تا توان مدل در شبیه سازی عملکرد در شرایط مختلف اقلیمی و رطوبتی مورد سنجش قرار گیرد.

برای ارزیابی مدل از شاخص های آماری nRMSE، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (Wallach & Goffinet, 1987)، d-index؛ شاخص توافق (Willmott, 1982)؛ MBE؛ میانگین انحراف خطا (Willmott & Matsuura, 2005) با توجه به رابطه های زیر استفاده شد:

$$\text{nRMSE}(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{d-index} = 1.0 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)}{n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این روابط n: تعداد مشاهدات؛ O: داده مشاهده شده؛ S: داده شبیه سازی شده و $\bar{O}$: میانگین داده مشاهده شده می باشند. شاخص MBE برای تعیین این که آیا پیش بینی های مدل بیش برآورد یا کم برآورد هستند، استفاده شد؛ به طوری که مقدار منفی MBE بیانگر تمایل مدل به بیش برآورد است (Willmott, 1982). به طور کلی، مقادیر MBE نزدیک به صفر نشان دهنده کارایی بهتر مدل است، زیرا حاکی از حداقل میزان خطای

مطلوب رشد، آستانه تحمل دمایی گیاه، تعداد روزهای مرحله کاشت تا گلدهی و گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیکی، مجموع درجه روز لازم در هر مرحله، ویژگی‌های عملکرد رقم کلزا (شاخص سطح برگ، شاخص برداشت، عملکرد دانه و عملکرد بیوماس) می‌شود. شایان ذکر است که در این پژوهش از کلزا رقم هایولا ۴۰۱ استفاده شد (جدول ۳).

داده‌های خاک شامل نوع خاک، ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک، توانایی نگهداشت آب در خاک، رطوبت خاک و سایر ویژگی‌ها می‌شوند که از طریق مشترک دانشگاه و گئینگ هلند و دانشگاه نبراسکا

(<https://www.yieldgap.org/web/guest/home>)

گردآوری شدند. این وبگاه نوع و بافت خاک، ویژگی‌های

جدول ۲. داده‌های مدیریت زراعی کلزا در ایستگاه‌های استان لرستان.

شهرستان داده	ازنا	درود	بروجرد	الیگودرز	الشر	کوه‌دشت	خرم آباد	نورآباد	پلدختر
تاریخ کاشت	۱۵ شهریور تا ۱۰ مهر	۱۵ شهریور تا ۱۰ مهر	۱۵ شهریور تا ۱۰ مهر	۱۵ شهریور تا ۱۰ مهر	۱۵ شهریور تا ۳۰ مهر	۱۵ شهریور تا ۳۰ مهر	۱۵ شهریور تا ۳۰ مهر	۱۵ شهریور تا ۳۰ مهر	۱ مهر تا ۳۰ آبان
سطح زیر کشت (هکتار)	۱۳۰	۲۳۰	۳۰۵	۱۲۱	۱۴۰۸	۲۵۶	۳۶۴	۳۸۶	۴۰۰
تاریخ برداشت	۱ تیر تا ۳۰ تیر	۱ تیر تا ۳۰ تیر	۱ تیر تا ۳۰ تیر	۱ تیر تا ۳۰ تیر	۲۰ خرداد تا ۲۰ تیر	۱۵ خرداد تا ۲۰ تیر	۱۵ خرداد تا ۱۵ تیر	۱۵ خرداد تا ۱۰ تیر	۱ خرداد تا ۳۰ خرداد

منبع: جهاد کشاورزی استان لرستان، ۱۴۰۳.

جدول ۳. برخی از صفات زراعی مورد استفاده کلزا (رقم هایولا ۴۰۱) در دو سال زراعی ۱۳۸۲-۸۳ (سال اول) و ۱۳۸۳-۸۴ (سال دوم)

برای واسنجی مدل WOFOST.

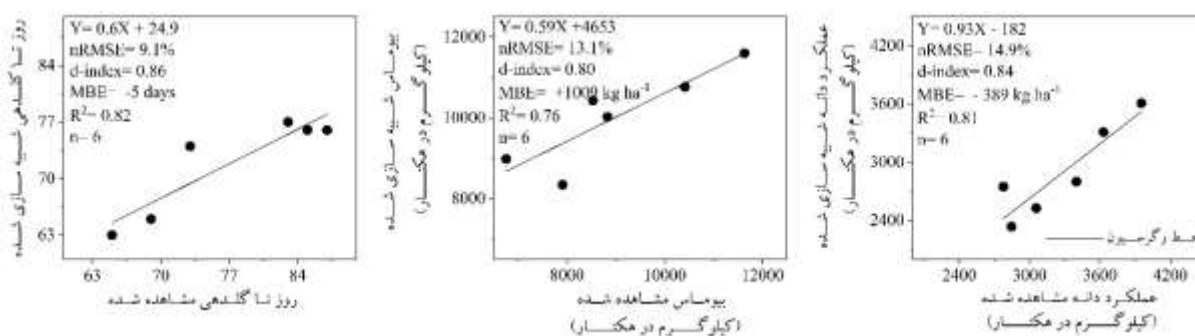
صفت	۱ آذر	۲۰ آذر	۱۰ دی
عملکرد بیوماس	سال اول ۱۱۶۳۴	سال دوم ۱۰۴۱۰/۶	سال اول ۷۹۰۸/۸
عملکرد دانه	سال اول ۳۹۵۳/۹	سال دوم ۶۳۳۰/۳	سال اول ۲۸۴۶/۳
شاخص برداشت	سال اول ۳۴/۰۱	سال دوم ۳۴/۹۳	سال اول ۳۵/۹۸
وزن هزار دانه	سال اول ۳/۷۴	سال دوم ۳۷/۷۲	سال اول ۲/۶۹
طول دوره رشد (روز)	سال اول ۱۴۵	سال دوم ۱۵۰	سال اول ۱۲۵
درجه روز کل دوره رشد	سال اول ۱۴۹۳	سال دوم ۱۵۴۶/۴	سال اول ۱۵۱۱/۴

۳. یافته‌های پژوهش

۳.۱. ارزیابی مدل (واسنجی و اعتبار سنجی)

براساس روال معمول در پژوهش‌های مبتنی بر مدل‌سازی و شبیه‌سازی، ابتدا می‌بایست نتایج حاصل از واسنجی مورد ارزیابی

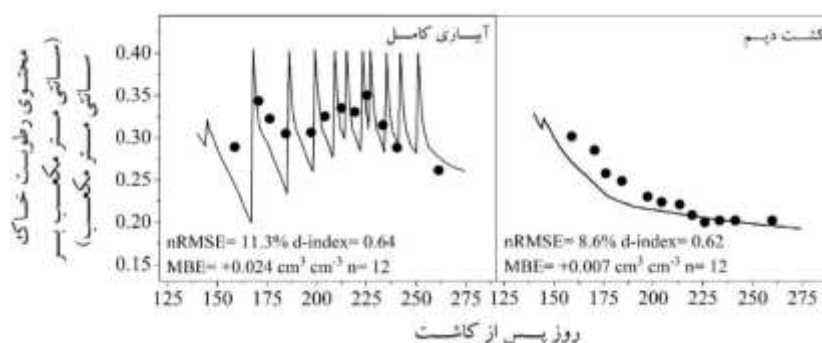
قرار گیرد. در صورتی که نتایج حاکی از توانمندی خوب و مطلوب مدل در شبیه‌سازی باشند، شبیه‌سازی برای تمام ایستگاه‌ها و دوره آماری مورد مطالعه اجرا می‌گردد. نتایج حاصل از واسنجی مدل WOFOST نشان از دقت و کارایی مطلوب این مدل در برآورد روز تا گلدهی، بیوماس و عملکرد دانه کلزا بود (شکل ۲).



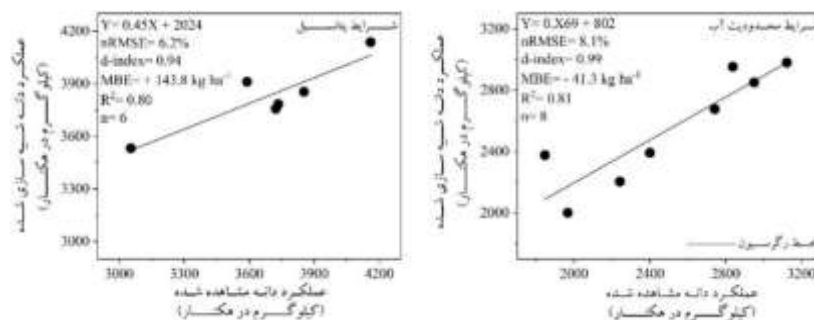
شکل ۲. نتایج واسنجی مدل WOFOST برای رقم Hyola401 برای صفات مختلف (روز تا گلدهی، بیوماس و عملکرد دانه). منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

جهت شبیه‌سازی عملکرد دانه کلزا را داراست (شکل ۲). واسنجی مورد ارزیابی قرار گیرد. در صورتی که نتایج حاکی از توانمندی خوب و مطلوب مدل در شبیه‌سازی باشند، شبیه‌سازی برای تمام ایستگاه‌ها و دوره آماری مورد مطالعه اجرا می‌گردد. نتایج حاصل از واسنجی مدل WOFOST نشان از دقت و کارایی مطلوب این مدل در برآورد روز تا گلدهی، بیوماس و عملکرد دانه کلزا بود (شکل ۲).

بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از واسنجی (مقادیر کمتر از ۱۰ درصد nRMSE، d-index برابر ۰/۸۶، MBE برابر ۵ روز و ضریب تبیین برابر ۰/۸۲ برای روز تا گلدهی، مقادیر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد nRMSE، d-index برابر ۰/۸۰، MBE برابر ۱۰۰۹ کیلوگرم در هکتار و ضریب تبیین برابر ۰/۷۶ برای بیوماس و مقادیر کمتر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد nRMSE، d-index برابر ۰/۸۴، MBE برابر ۳۸۹ کیلوگرم در هکتار و ضریب تبیین برابر ۰/۸۱ برای عملکرد دانه)، مدل WOFOST توانایی و کارکرد لازم



شکل ۳- نتایج ارزیابی رطوبت خاک در حالات مختلف (آبیاری کامل و کشت دیم) در مدل WOFOST. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳



شکل ۴. نتایج اعتبارسنجی مدل WOFOST برای عملکرد دانه کلزا در شرایط پتانسیل (بدون تنش) و محدودیت آب. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳

داد. این مهم با شبیه‌سازی رشد کلزا در دوره‌ای بلندمدت و در محدوده مورد مطالعه صورت گرفت. با وجود دقت قابل قبول مدل WOFOST در شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا، بخشی از خطاهای باقی‌مانده می‌تواند ناشی از عدم قطعیت‌های موجود در داده‌های ورودی (به‌ویژه داده‌های هواشناسی و خصوصیات خاک) و ساده‌سازی برخی فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه در مدل باشد. همچنین محدودیت داده‌های میدانی در مرحله واسنجی می‌تواند بر میزان دقت نتایج تأثیرگذار باشد. با این حال، مقادیر شاخص‌های آماری نشان دادند که این عدم قطعیت‌ها در دامنه قابل قبول قرار دارند و مدل از قابلیت اطمینان مناسبی برای شبیه‌سازی در مقیاس منطقه‌ای برخوردار است.

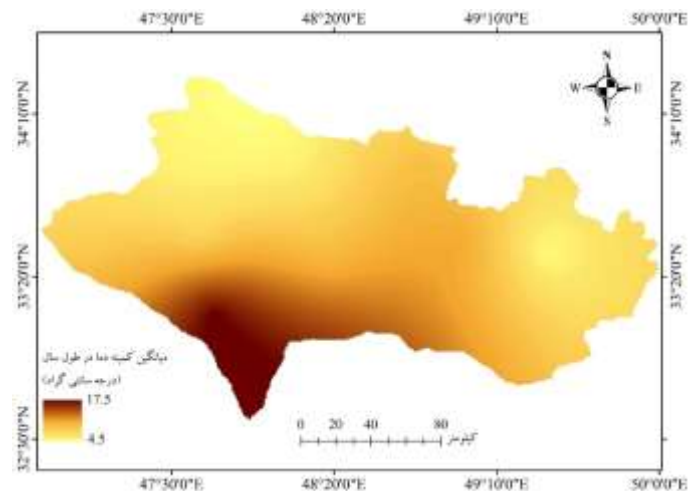
۲.۳. میانگین دمای کمینه سالانه

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مناطق جنوبی استان لرستان میانگین دمای سالانه بالاتری در مقایسه با مناطق شمالی و شرقی استان دارند. بیشترین میانگین دمای کمینه در مناطق مورد بررسی با میانگین ۱۶/۸ درجه سانتی‌گراد به شهرستان پلدختر تعلق داشت درحالی که شهرستان‌های ازنا (۵ درجه سانتی‌گراد) و الیگودرز (۶/۴ درجه سانتی‌گراد) در نیمه شرقی استان و شهرستان‌های الشتر (۶/۲ درجه سانتی‌گراد) و نورآباد (۴/۹ درجه سانتی‌گراد) در شمال استان لرستان از میانگین کمینه دمای پایینی برخوردار بودند (شکل ۵).

میزان رطوبت ذخیره شده خاک محاسبه شده توسط مدل در وضعیت آبیاری کامل (کشت آبی) و در حالت کشت دیم با میزان واقعی مقایسه شد (شکل ۳). در این ارزیابی نیز مدل WOFOST به خصوص در وضعیت در کشت دیم، توانسته میزان رطوبت ذخیره در خاک را به خوبی برآورد کند. این سنجش نیز به کمک شاخص‌های nRMSE، MBE و d-index ارزیابی شدند. در وضعیت کشت آبی، شاخص‌ها به ترتیب برابر ۱۱/۳ درصد، ۰/۰۲۴ سانتی‌متر مکعب/سانتی‌متر مکعب و ۰/۶۴ و در وضعیت کشت دیم به ترتیب ۸/۶۸ درصد، ۰/۰۰۷ سانتی‌متر مکعب/سانتی‌متر مکعب و ۰/۶۲ محاسبه شدند (شکل ۳).

نتایج اعتبارسنجی مدل نیز در مرحله نهایی نشان داد که هم تحت شرایط محدودیت آب و هم شرایط پتانسیل مدل قادر است عملکرد دانه در شرایط اقلیمی مختلف از جمله اقلیم لرستان را به خوبی شبیه‌سازی کند به طوری که برای شرایط پتانسیل، شاخص‌های nRMSE، MBE و d-index ارزیابی به ترتیب برابر با ۶/۲ درصد، ۱۴۳/۸ کیلوگرم در هکتار و ۰/۹۴ بودند و برای شرایط محدودیت آب، به ترتیب ۸/۱ درصد، ۴۱/۳ کیلوگرم در هکتار و ۰/۹۹ بودند (شکل ۴).

در مجموع مدل WOFOST در سنجش‌ها و ارزیابی‌های مختلف به نحو مطلوب توانست رشد و عملکرد کلزا را شبیه‌سازی کند. بر همین اساس، می‌توان نتایج حاصل از مدل‌سازی را به سال‌های دیگر و دوره بلند مدت برای هر ایستگاه در استان لرستان تعمیم



شکل ۵- پهنه‌بندی میانگین کمینه دما در طول سال در استان لرستان. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳.

در مناطق مورد مطالعه طول دوره رشد کلزا با توجه به میانگین دمای هر منطقه متفاوت بود؛ بیشترین طول دوره رشد در شهرستان‌های ازنا، الیگودرز و نورآباد با میانگین ۱۶۱ روز مشاهده شد. در طرف مقابل، کمترین طول دوره رشد (۹۹ روز) در شهرستان پلدختر به ثبت رسید و پس از آن شهرستان خرم آباد با میانگین طول دوره ۱۰۸ روز قرار داشت (شکل ۸).

۳.۶. عملکرد دانه کلزا شبیه‌سازی شده

نتایج حاصل از شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا در مناطق مختلف استان لرستان نشان داد بیشترین عملکرد دانه در مناطق نیمه شرقی استان بخصوص شهرستان‌های درود و ازنا (۷۹۵۷ و ۳۳۰۸ کیلوگرم در هکتار) و شمال استان شامل بروجرد (۶۲۸۶ کیلوگرم در هکتار) تولید شد. در طرف مقابل، شهرستان‌های الیگودرز و الشتر کمترین عملکرد دانه کلزا را داشتند و شهرستان‌هایی مانند خرم‌آباد، پلدختر، کوهدشت و نورآباد در حدواسط بیشترین و کمترین عملکردها قرار داشتند (شکل ۹).

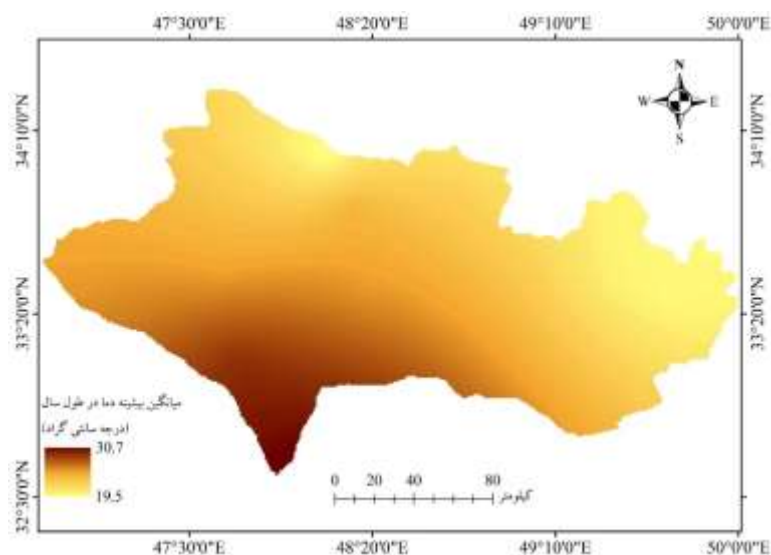
۳.۳. میانگین دمای بیشینه سالانه

در استان لرستان بیشترین میانگین بیشینه دمای سالانه در جنوب استان (شهرستان پلدختر با میانگین ۲۸/۸ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد در صورتی که مناطق شرقی (ازنا و الیگودرز به ترتیب با میانگین‌های ۲۰/۶ و ۱۹/۹ درجه سانتی‌گراد) و شمالی (بروجرد و نورآباد با میانگین‌های ۲۲/۱ و ۱۹/۵ درجه سانتی‌گراد) میانگین بیشینه دمای کمتری را نسبت به سایر مناطق استان داشتند (شکل ۶).

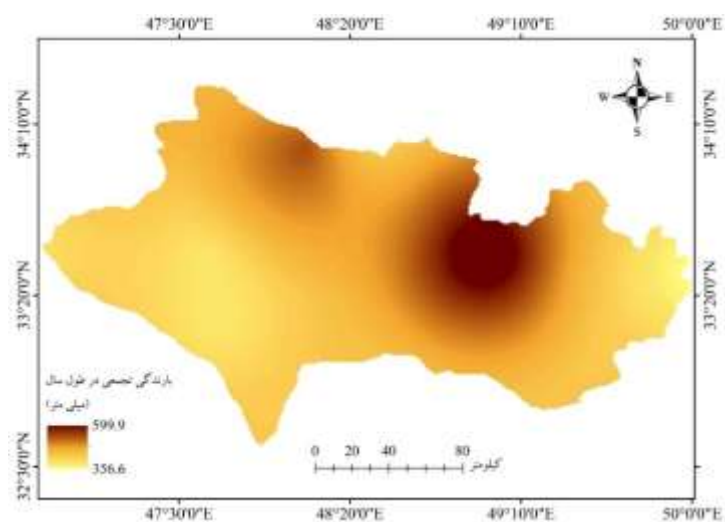
۳.۴. میانگین دمای بیشینه سالانه

نقشه پهنه‌بندی بارش سالانه در استان لرستان نشان می‌دهد میزان بارش از ۳۷۳ میلی‌متر در شهرستان پلدختر تا ۶۴۳ میلی‌متر در شهرستان درود متغیر است (شکل ۷). به‌طورکلی میانگین بارش سالانه در مناطق غربی استان کمتر از مناطق شرقی و شمالی استان بود.

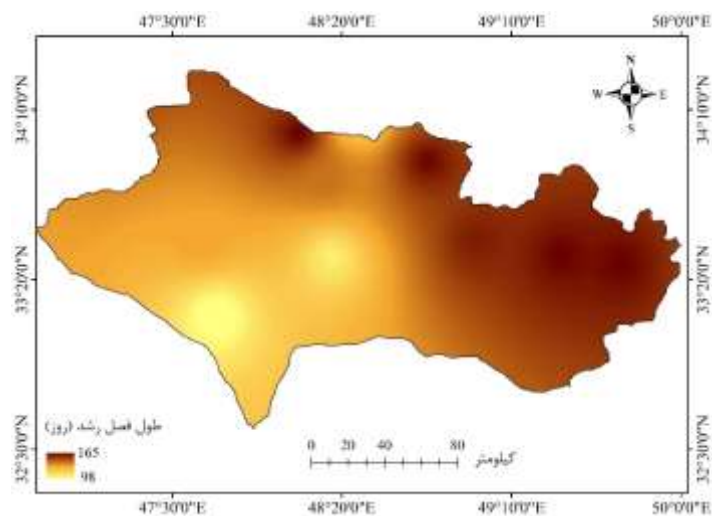
۳.۵. طول دوره رشد کلزا



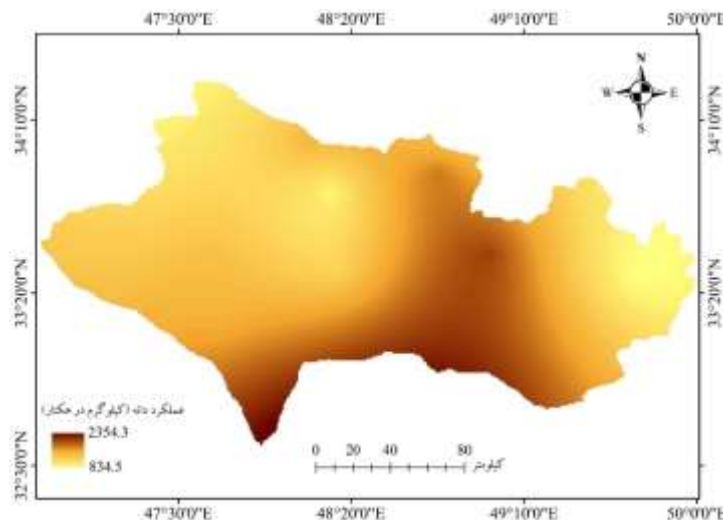
شکل ۶. پهنه‌بندی میانگین بیشینه دما در طول سال در استان لرستان. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳.



شکل ۷. پهنه‌بندی بارندگی تجمعی در طول سال در استان لرستان. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳.



شکل ۸. پهنه‌بندی طول دوره رشد کلزا در استان لرستان. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳.



شکل ۹. پهنه‌بندی عملکرد دانه کلزا در استان لرستان. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

۴.۱. ارزیابی مدل (واسنجی و اعتبار سنجی)

همان‌گونه که می‌دانیم، دقت مدل‌های رشدی در شبیه‌سازی رشد و عملکرد محصولات زراعی منجر به کسب نتایج دقیق‌تر می‌شود. یافته‌های حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST نشان داد که دقت این مدل در شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا در استان لرستان در شرایط مختلف آبیاری (کامل و دیم) در سطح بالایی بود. این مدل در مطالعات دیگر هم توانسته به صورت مطلوب رشد گیاهان زراعی را شبیه‌سازی کند. در تحقیقی مدل WOFOST جهت شبیه‌سازی رشد و نمو گندم زمستانه در استان شاندونگ چین مورد بررسی قرار گرفت. مقدار شاخص R^2 برای ارزیابی مدل در زمینه تعیین زمان پرشدن دانه، دوره گلدهی و دوره رسیدگی به ترتیب ۰/۹۵، ۰/۶۹ و ۰/۶۸ بود. همچنین مقدار nRMSE به ترتیب ۰/۶۸، ۴/۳ و ۳/۲ درصد بدست آمد. در واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST برای پیش‌بینی مراحل فنولوژی و عملکرد سیب‌زمینی در ایران نیز ضریب تبیین (۰/۸۰)، آزمون T (۰/۷۸)، جذر میانگین مربعات خطا (۵/۷)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (۵/۱) مورد استفاده قرار گرفتند و در مجموع نتایج پژوهش نشان داد که مدل با خطای پایینی مراحل رشد و عملکرد سیب‌زمینی را شبیه‌سازی کرده است (Torkaman et al, 2023: 603).

در اعتبارسنجی مدل WOFOST نیز نتایج حاصل از مقایسه عملکرد دانه شبیه‌سازی شده کلزا در شرایط پتانسیل و همچنین عملکرد دانه در شرایط محدودیت آب با مقادیر واقعی حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه بود (شکل ۴). نتایج مشابه دیگری در اثبات دقت مدل WOFOST در شبیه‌سازی تولید و عملکرد کلزا در هر دو شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی گزارش شده است (Zhiqiang et al, 2022: 1). شاخص ویژه دیگری که جهت سنجش تطابق و کارایی مدل WOFOST مورد استفاده قرار گرفت و کمک شایانی به تایید شبیه‌سازی رشد کلزا توسط این مدل کرد، ترسیم و تحلیل نمودارهای آب خاک و مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده مدل با عملکرد واقعی تحت شرایط رطوبتی مختلف است (آبیاری کامل و کشت دیم) (شکل ۳). از آنجا که هدف و تمرکز تحقیق حاضر بر کشت دیم و محدودیت آب است، خاک در کنار بارندگی مهمترین عناصر شبیه‌سازی رشد گیاه کلزا هستند. بدین منظور میزان رطوبت موجود در لایه‌های خاک در مراحل فنولوژی و شرایط مختلف آبی بررسی گردید (شکل ۳) و یافته‌های حاصل از ارزیابی مدل WOFOST نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک در دو حالت آبیاری کامل و دیم بود.

۴.۲. پهنه‌بندی عملکرد کلزا در استان لرستان

متغیرهای آب و هوایی مانند دما و بارش بطور مستقیم رشد و

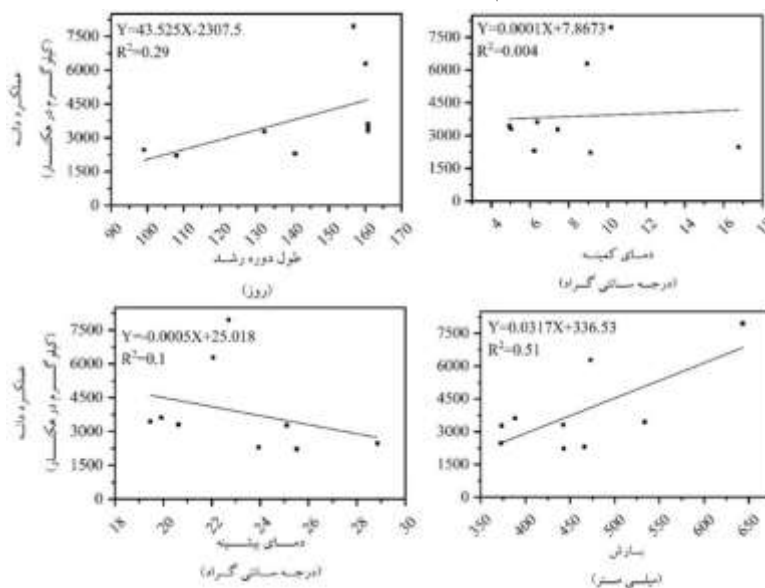
عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Sobhani & Nasiri, 2022: 68). در این میان محصولاتی که به صورت دیم کشت می‌شوند میزان اثرپذیری آن‌ها از بارش در آن منطقه بیشتر از سایر متغیرهای اقلیمی است (Maryanaji et al, 2021: 101). البته بدیهی است میزان و توزیع بارش‌ها بطور توأم بر تولید و عملکرد نهایی تأثیر می‌گذارند. یافته‌های حاصل از این تحقیق نشان داد قسمت مرکزی نیمه شرقی استان لرستان (بطور مشخص شهرستان درود) بیشترین عملکرد دانه کلزا را داشت (شکل ۹). از جمله دلایل عملکرد بالای دانه کلزا در شهرستان درود را می‌توان به میزان بارندگی بالا (۶۴۳ میلی‌متر)، میانگین دمای هوای مطلوب و خنک (۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد) و دوره رشد طولانی (۱۵۷ روز) جهت فتوسنتز و تولید ماده خشک کافی نسبت داد. شهرستان بروجرد نیز در رتبه دوم بیشترین عملکرد دانه شبیه‌سازی شده قرار داشت که از عوامل این برتری می‌توان به میزان بارش مناسب (۴۷۲ میلی‌متر)، میانگین دمای هوای خنک (۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد) و طول دوره رشد زیاد (۱۶۰ روز) اشاره کرد. در طرف مقابل، شهرستان‌های خرم‌آباد و پلدختر میانگین عملکرد دانه کمی در مقایسه با سایر مناطق مورد مطالعه داشتند، که می‌توان میزان و توزیع نامناسب بارش‌های فصلی از یک سو و طول دوره رشد کمتر را از سوی دیگر از جمله عوامل موثر بر افت عملکرد دانه کلزا در این مناطق برشمرد. نتایج حاصل از رگرسیون خطی بین عملکرد دانه با طول دوره رشد، میانگین بارش سالانه، دماهای کمینه و بیشینه نیز در تأیید مطالب بالا، نشان دادند مناطقی که میزان بارش بالا و طول دوره رشد بالایی داشتند از عملکرد دانه بالاتری برخوردار بودند (شکل ۱۰). همچنین، باوجود اینکه روند خطی معنی‌داری بین دماهای کمینه و بیشینه با عملکرد دانه مشاهده نشد، اما همانطور که از شکل ۱۰ پیداست با افزایش دمای حداقل (کاهش شدت سرما) افزایش جزئی در عملکرد دانه قابل حصول است در صورتی که با افزایش دمای بیشینه (افزایش شدت گرما) افت عملکرد قابل پیش‌بینی است. در واقع کلزا برای تولید عملکرد بهینه نیاز به آب و هوای معتدل دارد که

در شرایط آب و هوایی درود و بروجرد این آب و هوا وجود دارد. در همین زمینه در تحقیقی تولید کلزا تحت تأثیر متغیرهای آب و هوایی مورد بررسی قرار گرفت و گزارش شد بارش و رطوبت در دوره‌های رشدی مختلف بخصوص جوانه‌زنی، گلدهی و پر شد دانه تأثیر قابل توجهی بر تولید نهایی کلزا در مناطق جنوب شرقی اروپا دارد (Marjanović-Jeromela et al, 2019: 1). در پژوهشی در همدان، تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد کلزا مورد ارزیابی قرار گرفت و گزارش شد که بین عملکرد محصول نهایی کلزا و تغییرات اقلیمی رابطه معنی‌داری مشاهده شد؛ عملکرد دانه کلزا بیشترین رابطه معنی‌دار را با تعداد ساعات آفتابی و کمترین رابطه با دمای کمینه نشان داد (Maryanaji et al, 2021: 101). طول دوره رشد بیشتر نیز فرصت بیشتری در اختیار گیاه قرار می‌دهد تا در صورت مهیا بودن شرایط محیطی مناسب مانند دما، بارش و تابش، تولید ماده خشک در نتیجه فرآیند فتوسنتز انجام شده و عملکرد نهایی افزایش یابد. در همین زمینه در تحقیقی که صفات فنولوژیکی و فیزیولوژیکی ۴ رقم کلزا مورد بررسی قرار گرفت، گزارش شد که طول دوره رشد ارقام کلزا همبستگی مثبت و معنی‌داری (۰/۷۷+) با عملکرد دانه داشت (Safikhani et al, 2019: 170)؛ این موضوع نشان می‌دهد هر چقدر طول دوره رشد کلزا بیشتر باشد عملکرد دانه نیز می‌تواند بیشتر باشد. اگرچه در زراعت دیم، آب و هوا و بطور خاص بارش جزء مهم‌ترین عوامل موثر بر رشد و تولید گیاهان زراعی است، با این وجود عواملی مانند استفاده از ارقام مقاوم به کم‌آبی و همچنین شرایط خاکی (بافت و ساختمان خاک) نیز می‌توانند بطور بالقوه بر رشد و عملکرد نهایی محصولات دیم اثرگذار باشند. در مناطقی که قدرت نگهداری آب خاک به دلیل بافت و ساختمان نامناسب کم باشد، بالطبع در طول دوره رشد بخصوص در بازه‌های زمانی عدم بارندگی در طول دوره رشد، گیاه زراعی با کم‌آبی مواجه می‌شود. در همین راستا، در تحقیقی در استان گلستان اراضی کشاورزی برای کشت کلزا با استفاده از سامانه GIS و فرآیند تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی پهنه بندی شد؛ یافته‌های حاصل از این

جویبار، محمودآباد، نور، نوشهر، چالوس و رامسر) برای کشت کلزا محدودیتی نداشتند. شایان ذکر است علاوه بر عوامل اقلیمی، توپوگرافی و خاکی، راهکارهای مدیریتی دیگر مانند رعایت تاریخ کاشت مناسب نیز در رشد و تولید نهایی محصولات زراعی و بطور خاص دیم حیاتی است و همواره لازم است مورد توجه کشاورزان و محققین قرار گیرد.

روی هم رفته و با توجه به یافته‌های این تحقیق، مدل WOFOST جهت شبیه‌سازی رشد و عملکرد کلزا در استان لرستان از دقت بالایی برخوردار بود. با توجه به اقلیم مناسب شهرستان‌های درود و بروجرد و برخورداری از دماهای کمینه و بیشینه مطلوب برای رشد کلزا و همچنین میزان و توزیع بارندگی‌ها در طول دوره رشد کلزا، توسعه کشت کلزا در مناطق مذکور مناسب‌تر از سایر مناطق استان است.

مطالعه نشان داد عوامل اقلیمی (بارش و منابع آبی، دماهای بیشینه و متوسط و کمینه) نسبت به عوامل توپوگرافی (جهات شیب، شیب، و ارتفاع از سطح دریا) و خاکی (شوری، اسیدیته، نیتروژن، ماده آلی، بافت خاک، فسفر، پتاسیم، کلسیم، آهن و روی) از نظر تأثیر بر مکان‌یابی کشت کلزا در اولویت اول قرار گرفت (Kazemi Poshtmasari et al, 2012: 131). همچنین یافته‌های این محققین نشان داد حدود ۲۱ درصد از مساحت استان گلستان (علی آباد کتول، رامیان و گرگان) در پهنه بسیار مستعد برای کشت کلزا قرار داشت. به همین ترتیب، در پژوهشی دیگر در استان مازندران نیز عوامل اقلیمی، توپوگرافی و خاکی برای پهنه‌بندی قابلیت کشت کلزا اولویت‌بندی شدند و عوامل اقلیمی (بارش و دماهای بیشینه و کمینه) از اولویت بالاتری نسبت به سایر عوامل برخوردار بودند (Sobhani & Roshanali, 2018: 146). بر اساس عوامل مورد بررسی، ۱۵ درصد از مساحت استان مازندران (شهرستان‌های بهشهر، نکا، ساری، قائم‌شهر،



شکل ۱۰. آنالیز رگرسیون بین عملکرد دانه با دمای کمینه، بیشینه، بارش و طول دوره رشد کلزا در شهرستان‌های مختلف استان لرستان. منبع: نگارندگان، ۱۴۰۳.

نشده است. توصیه می‌شود برای نزدیک شدن به شرایط واقعی کشاورزان مدل برای عوامل مذکور ارزیابی شود و شبیه‌سازی‌ها تحت کلیه‌ی شرایط عوامل محدودکننده و کاهنده عملکرد انجام شود.

محدودیت‌های پژوهش

تحقیق حاضر تحت شرایط محدودیت آب انجام شده است و سایر عوامل محدودکننده عملکرد مانند عناصر غذایی از جمله نیتروژن، پتاسیم و فسفر و همچنین عوامل کاهنده عملکرد از جمله علف هرز، بیماری و آفت در نظر گرفته

References

- Boogaard, H. et al., 2011. WOFOST Control Centre 1.8 and WOFOST 7.1.3 User Manual, Wageningen, the Alterra, Wageningen University and Research Centre Netherlands.
- Dalvand, A., Shirani Rad, A., Khorgami, A., Pezeshkpour, P., 2013. Assessing the effect of amounts and distribution methods of nitrogen fertilizer on the qualitative characteristics of rapeseed (Hyola401) in Khorramabad County. First National Conference on Sustainable Agricultural Development and Healthy Environment, February 26, Hamedan, Iran. (In Persian).
- Dettoni, 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. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.008>
- Ebrahimipak, N., Egdernazhad, A., Tafteh, A., & Ahmadee, M., (2019). Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to simulate rapeseed yield. Iranina Journal of Irrigation and Drainage, 13(3), 715-726. <https://dx.doi.org/20.1001.1.20087942.1398.13.3.14.4>. (In Persian).
- Gharineh, M.H., Bakhshandeh, A., Andarzian, B., Fayzizadeh, N., (2012). Agro-climatic zonation of Khouzestan province based on potential yield of irrigated wheat using WOFOST model. Journal of Agroecology, 4(3), 255-264. <https://dx.doi.org/10.22067/jag.v4i3.15314>. (In Persian).
- Ghobadi, M., (2006). Investigating the effects of drought stress and heat at the end of the growth period on morpho-physiological characteristics and yield in spring rapeseed cultivars. PhD thesis in agriculture, crop plant physiology. Department of Agriculture and Plant Breeding. Ramin Agricultural Educational and Research Complex.
- Kazemi Poshtmasari, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., Kamkar, B., Shataei, Sh., & Sadeghi, S., (2012). Agroecological zoning of agricultural lands in Golestan province for canola cultivation by Geographic Information System (GIS) and Analytical Hierarchy Process (AHP). Electronic Journal of Crops Production, 5(1), 123-139. (In Persian).
- Marjanović-Jeromela, A., Terzić, S., Jankulovska, M., Zorić, M., Kondić-Špika, A., Jocković, M., Hristov, N., Crnobarac, J., & Nagl, N., (2019). Dissection of year related climatic variables and their effect on winter rapeseed (*Brassica Napus* L.) development and yield. Agronomy, 9(9), 517. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090517>
- Marjanović-Jeromela, A., Terzić, S., Jankulovska, M., Zorić, M., Kondić-Špika, A., Jocković, M., Hristov, N., Crnobarac, J., Nagl, N., (2019). Dissection of year related climatic variables and their effect on winter rapeseed (*Brassica napus* L.) development and yield. Agronomy, 9(9), p.517. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090517>
- Maryanaji, Z., Shamshiri, S., & Sotoudeh, F., (2021). Investigation of the climate change Effects on rapeseed cultivation in Hamadan province. Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas, 2(2), 101-115. <https://dx.doi.org/10.52547/gasma.2.2.101>. (In Persian).
- Ministry of Agriculture Iran. 2023. Agricultural Statistics, 2022-2023. Volume 1. Available at: <http://www.maj.ir/Portal/Home/.pdf>. (In Persian).
- Miri, N., Darvishsefat, A.A., Shaker, Z., & Zargham, N., (2017). Estimation of leaf area index in Zagros forests using Landsat 8 data. Iranian Journal of Forest, 9(1), 29-42. <https://dx.doi.org/10.22092/ijfpr.2023.364041.2129>. (In Persian).

- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R. L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
<https://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nasiri Mahallati, M., & Koocheki, A., (2009). Agroecological zoning of wheat in Khorasan provinces: Estimating yield potential and yield gap. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 7(2), 695-709. (In Persian).
- Rahimi-Moghaddam, S., Eyni-Nargeseh, H., Kalantar Ahamdi, S.A., & Azizi, Kh., (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.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106487>
- Ren, Y., Li, Q., Du, X., Zhang, Y., Wang, H., Shi G., & Wei., M., (2023). Analysis of corn yield prediction potential at various growth phases using a process-based model and deep learning. *Planets*, 12 (3), 446.
<https://doi.org/10.3390/plants12030446>
- Safikhani, S., Biabani, A., Faraji, A., Rahimi-Karizaki, A., & Gholizadeh, A., (2019). Study of the phenological and physiological traits associated with the seed yield in different canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Plant Production Technology*, 19(1), 161-172.
<https://doi.org/10.22084/ppt.2017.6072.1350> .(In Persian).
- Sobhani, B., & Nasiri, F., (2022). Agro-ecological zonation of canola cultivation in Ardebil Plain. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 22(65), 61-78.
<https://doi.org/10.52547/jgs.22.65.61>. (In Persian).
- Sobhani, B., & Roshanali, M., (2018). Land suitability assessment of Mazandaran province for rapeseed cultivation based on multi criteria decision making evaluation methods in GIS Environment. *Geography and Territorial Spatial Arrangement*, 8(27), 129-147.
<https://doi.org/10.22111/gaij.2018.4094>. (In Persian).
- Soltani A., & Sinclair, T.R., (2012). Modeling physiology of crop development, growth and yield. CAB International. In: SRAD Issue.
- Torabi Poodeh, H., & Emamgholizadeh, S., (2014). Studying the trend of water flow changes in rivers of Lorestan province using the TFPW-MK method. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 14(35), 73-93. (In Persian).
- Torkaman, M., Nasiri Mahallati, M., & Koocheki, A., (2023). Calibration and validation of WOFOST model for predicting the phenology and yield in potato (*Solanum tuberosum* L.) Growing Regions in Iran. *Journal of Agroecology*, 14(4), 601-615.
<https://doi.org/10.22067/jag.v1i1.47502>. (In Persian).
- Wallach, D., & Goffinet, B., (1989). Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comparing system models. *Ecological Modelling*, 44(3-4), 299-306. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(89\)90035-5](https://doi.org/10.1016/0304-3800(89)90035-5)
- Willmott, C.J., & Matsuura, K., (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79-82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
- Willmott, C.J., (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2)
- Zhiqiang, D., Mengyuan, J., Xiaoping, X., Zhihua, P., Nan, L., Hong, Z., & Yingyu,

H., (2022). The applicability evaluation and drought validation of the WOFOST model for the simulation of winter wheat growth in Shandong Province, China. Heliyon, 8(12), e12004. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12004>