

Agroclimatic Zoning of Iran Based on Barley (*Hordeum vulgare* L.) Planting Date and Length of Growing Period Using Advanced Spatial Analysis Methods

Kh. Ahmadaali^{1*}, M. Kazempour¹, E. Fazli², A. Liaghat¹, I. Hajirad¹

1- Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: khahmadauli@ut.ac.ir)

2- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 23 December 2025
Revised: 23 February 2026
Accepted: 16 March 2026
Available Online: 16 March 2026

How to cite this article:

Ahmadaali, Kh., Kazempour, M., Fazli, E., Liaghat, A., & Hajirad, I. (2026). Agroclimatic zoning of Iran based on barley (*Hordeum vulgare* L.) planting date and length of growing period using advanced spatial analysis methods. *Journal of Water and Soil*, 39(6), 539-552. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97155.1516>

Introduction

Increasing pressure on limited water resources, pronounced climatic variability, and the growing demand for agricultural production have made accurate agroclimatic assessment an essential component of sustainable agriculture in Iran. Identifying homogeneous agroclimatic zones enables more efficient resource management, optimized cropping calendars, and reduced production risk under variable environmental conditions. Agro-ecological zoning (AEZ) provides a scientific framework to integrate climatic, topographic, and crop phenological factors in order to delineate areas with similar production potential. Barley (*Hordeum vulgare* L.), as one of Iran's major cereal crops, plays a vital role in food security, livestock feed supply, and agricultural livelihoods. Barley yield and stability are highly sensitive to planting date and length of the growing period, both of which are directly influenced by climatic gradients, elevation, and rainfall patterns. Despite the importance of these parameters, national-scale agroclimatic zoning of barley based explicitly on planting date and growing period has received limited attention. Therefore, this study aimed to delineate agroclimatic zones for barley cultivation across Iran using advanced spatial interpolation and clustering techniques, providing a decision-support tool for sustainable crop planning.

Materials and Methods

This study adopted a spatial-analytical approach at the national scale of Iran. Point-based data on barley planting date and length of the growing period were obtained from the national Water Requirement System and related agroclimatic databases, covering approximately 790 stations distributed across the country. These data represent long-term average conditions relevant to barley phenology. To transform discrete point data into continuous spatial surfaces, the Empirical Bayesian Kriging Regression Prediction (EBK-RP) method was employed. This geostatistical technique combines regression modeling with Empirical Bayesian Kriging, allowing automatic estimation of semivariogram parameters and improved uncertainty handling, particularly in regions with sparse observations. Elevation derived from a digital elevation model (DEM) was incorporated as a covariate to enhance spatial prediction accuracy. The resulting raster layers for planting date and growing period length were then classified using the K-means clustering algorithm, a widely used unsupervised machine learning technique. The optimal number of clusters for each variable was determined using the elbow method based on within-cluster sum of squares (WCSS). Three clusters were identified for planting date and four clusters for growing period length. Finally, the classified layers were overlaid and combined to generate homogeneous agroclimatic zones for barley cultivation. To improve spatial coherence and reduce classification noise, focal statistics with a majority



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97155.1516>

filter were applied.

Results and Discussion

The spatial distribution of barley planting dates and growing period lengths exhibited strong correspondence with Iran's climatic and altitudinal gradients. Early planting dates were predominantly observed in the humid Caspian coastal region and parts of western and northwestern Iran, where higher precipitation, moderate temperatures, and lower frost risk prevail. In contrast, delayed planting was common in the arid and semi-arid central, eastern, and southeastern regions, reflecting dependence on late and irregular rainfall events. The length of the growing period showed an inverse relationship with temperature and aridity. Longer growing seasons (approximately 230–300 days) were identified in high-altitude and humid regions such as the Caspian lowlands, Alborz and Zagros mountain ranges, and western provinces. Shorter growing periods (around 120–170 days) characterized the hot, dry southern and eastern regions, where high temperatures and moisture stress accelerate crop development and shorten phenological stages. The integration of planting date and growing period classes resulted in twelve agroclimatic zones for barley cultivation. Among these, zones characterized by early to intermediate planting and moderate to long growing periods demonstrated the highest suitability for barley production. These zones are mainly located in northern, western, and parts of northwestern Iran, where climatic conditions provide more stable growth environments. Conversely, zones with late planting and short growing periods, largely distributed across central, eastern, and southeastern Iran, were identified as high-risk areas with significant climatic limitations for barley cultivation. These findings highlight the dominant role of climate, elevation, and moisture availability in shaping barley phenology and production potential. The spatial patterns observed are consistent with previous agro-ecological zoning studies in Iran and other semi-arid regions, reinforcing the reliability of the applied methodology.

Conclusion

This study demonstrated that integrating advanced geostatistical modeling (EBK Regression Prediction) with unsupervised clustering (K-means and elbow method) provides a robust framework for national-scale agroclimatic zoning of barley. The results clearly indicate that barley planting date and length of the growing period in Iran are strongly controlled by climatic–altitudinal gradients. Only a limited portion of the country—primarily humid and semi-humid northern and western regions—offers high and stable potential for sustainable barley production, while large arid and semi-arid areas face substantial climatic constraints. The derived agroclimatic zones can serve as a strategic decision-support tool for policymakers, planners, and extension services. They facilitate optimized cropping calendars, targeted selection of barley cultivars, improved water resource management, and risk reduction under climate variability. Ultimately, applying such zoning-based approaches can enhance productivity, promote sustainable land use, and support long-term food security in Iran.

Keywords: Agro-ecological zones, Barley, Elbow method, Empirical Bayesian Kriging, K-Means, Regression prediction

پهنه‌بندی اگروکلیمایی ایران بر اساس تاریخ کاشت و طول دوره رشد محصول جو (*Hordeum vulgare* L.) با استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیل فضایی

خالد احمدآلی^۱ * - مینا کاظم‌پور^۱ - عرفان فضلی^۲ - عبدالمجید لیاقت^۱ - ایمان حاجی‌راد^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

چکیده

کاهش منابع آب، تغییرات شدید اقلیمی و نیاز به بهره‌وری آب بالاتر، اهمیت ارزیابی قابلیت‌های اگروکلیمایی در کشاورزی ایران را افزایش می‌دهد. این پژوهش با تحلیل داده‌های ۷۹۰ ایستگاه، مناطق اگروکلیمایی جو را بر اساس تاریخ کاشت و طول دوره رشد با استفاده از کریجینگ بیزین تجربی با پیش‌بینی رگرسیون و الگوریتم K-Means شناسایی کرد. در این مطالعه، داده‌های اقلیمی و فنولوژیک ۱۷ ساله (۱۳۸۵ تا ۱۴۰۲) برای اطمینان از نمایندگی تغییرات اقلیمی اخیر استفاده شد. تعداد خوشه‌های بهینه تعیین شده با روش آرنج به این صورت بود که سه کلاس برای تاریخ کاشت و چهار کلاس برای طول دوره رشد استخراج گردید. برای ساده‌سازی، هر منطقه زراعی با کدی ترکیبی از کلاس تاریخ کاشت و طول دوره رشد مشخص شده است (مثلاً کد ۲۱ نشان‌دهنده کلاس دوم تاریخ کاشت و کلاس اول طول دوره رشد است) و این کدگذاری صرفاً برای دسته‌بندی و مقایسه مناطق است. ترکیب این دو منجر به تولید ۱۲ کلاس نهایی همگن زراعی برای محصول جو شد. نتایج نشان داد که توزیع زمان کاشت و طول دوره رشد، تابع مستقیم گرادیان اقلیمی-ارتفاعی ایران است. نواحی مرطوب خزری و غرب کشور در کلاس‌های ۱۳ (کاشت زودهنگام-دوره رشد طولانی)، ۱۴ (کاشت زودهنگام-دوره رشد بسیار طولانی)، ۲۳ (کاشت میان‌رس-دوره رشد طولانی)، ۲۴ (کاشت میان‌رس-دوره رشد بسیار طولانی) قرار گرفته که دارای کاشت زودهنگام و فصل رشدی طولانی هستند. مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی، شرقی و جنوب‌شرقی عمدتاً در کلاس‌های ۳۱ تا ۳۳ قرار دارند که کاشت دیر هنگام و دوره رشد کوتاه را نشان می‌دهد. مناسب‌ترین مناطق برای کشت جو در کلاس‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۲۲ با رطوبت و دمای متعادل و فصل رشد پایدار هستند، در حالی که کلاس‌های ۳۳ و ۳۴ بیشترین محدودیت اقلیمی و ریسک را دارند. این نتایج می‌تواند سیاست‌گذاران را در شناسایی مناطق کم‌بازده راهنمایی کند.

واژه‌های کلیدی: جو، روش آرنج، زون‌بندی کشاورزی-اکولوژیکی، K-Means، کریجینگ بیزین تجربی با پیش‌بینی رگرسیون

مقدمه

مدیریت بهینه آب و سایر نهاده‌ها را ارتقا داد (Hajirad et al., 2025). شناسایی و تفکیک نواحی مختلف کشور بر اساس ویژگی‌های اقلیمی و نیازهای فنولوژیک محصولات زراعی، یکی از رویکردهای کلیدی برای بهبود مدیریت منابع و افزایش کارایی تولید است (Hajirad et al., 2021). پهنه‌بندی کشاورزی-اکولوژیکی یا اگروکلیمایی^۳ (AEZ) این امکان را فراهم می‌کند که تاریخ کاشت، نیاز حرارتی و طول دوره

با افزایش جمعیت و رشد تقاضا برای تولید غذا، فشار فزاینده‌ای بر منابع مؤثر در تولید، به‌ویژه آب و خاک، وارد می‌شود. در این شرایط، شناخت و تفکیک مناطق همگن زراعی به‌عنوان واحدهای برنامه‌ریزی اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تنها از طریق آن می‌توان بهره‌وری منابع و

۱- گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(*) - نویسنده مسئول: Email: khahmadauli@ut.ac.ir

۲- بخش تحقیقات شناسایی خاک و ارزیابی اراضی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

دارد، گونه‌ها و ارقام زراعی نیز بسته به شرایط مکانی و زمانی، نیازمند مدیریت و تقویم زراعی متفاوتی هستند (Dadrasi et al., 2023; Aktaş & Gökdere, 2025). در ایران، این ناهمگنی اقلیمی بسیار برجسته است؛ به‌طوری‌که از اقلیم فراخشک در شرق کشور تا اقلیم مرطوب خزری در شمال و اقلیم سرد کوهستانی در غرب، طیف وسیعی از محیط‌های تولیدی وجود دارد که هر یک امکانات و محدودیت‌های خاص خود را دارند (Neamatollahi et al., 2012; Taati & Sarmadian, 2015). در ایران، مطالعات پهنه‌بندی برای گندم، چغندرکند و ذرت در دشت مشهد (Neamatollahi et al., 2012) و همچنین ارزیابی اراضی برای جو و گندم آبی و دیم در منطقه آبیک نشان داده‌اند که AEZ ابزار مؤثری برای طبقه‌بندی محیطی، تعیین مناطق مناسب و نامناسب کشت و ارائه راهبردهای مدیریتی است (Taati & Sarmadian, 2015). این پهنه‌بندی به پژوهشگران امکان می‌دهد تا تناسب مناطق مختلف برای محصولات خاص و زمان‌های بهینه کاشت و برداشت را پیش‌بینی کنند و پارامترهای کلیدی مانند درجه-روز-رشد (GDD)^۱، فصلی بودن دما و شاخص خشکی را برای تعیین رشد، عملکرد و دسترس‌پذیری آب محصول تحلیل نمایند.

محصول جو، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات کشور، از دیرباز نقش حیاتی در تأمین علوفه، خوراک دام و حتی امنیت غذایی مناطق مختلف ایران داشته است. با این حال، نیازهای حرارتی، آبی و فیزیولوژیک جو، و حساسیت آن به زمان کاشت و طول دوره رشد، موجب شده است که عملکرد این محصول در مناطق مختلف کشور تفاوت قابل توجهی داشته باشد (Bagheri, 2025). شناخت دقیق مناطق AEZ مناسب برای کشت جو و تعیین تاریخ‌های بهینه کاشت، طول دوره رشد و میزان نیاز آبی آن، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش بهره‌وری و کاهش ریسک‌های ناشی از تغییرات اقلیمی ایفا کند (Van Wart et al., 2013; Asante et al., 2019). AEZ امکان دسترسی به اطلاعات محیطی و خاکی در مقیاس وسیع را برای برنامه‌ریزی دقیق کشت و کاهش ریسک فراهم می‌کند. نتیجه مطالعات مختلف نشان داده که AEZ برای شناسایی محدودیت‌های اقلیمی، خاک، آب و تعیین مناطق پشتیبان تولید و ارائه استراتژی‌های افزایش تولید، کاربرد دارد. تعیین AEZ در هر کشوری کمک شایانی به برنامه‌ریزی ملی نموده و می‌تواند منجر به بهره‌وری بالاتر و مدیریت بهینه منابع شود.

تعیین زون‌های اگروکلیمایی، این امکان را فراهم می‌کند که ویژگی‌های اقلیمی و زیست‌محیطی هر منطقه به‌صورت کمی و مقایسه‌پذیر ارزیابی شود و نیازهای محصول با ظرفیت‌های محیطی تطبیق داده شود. این رویکرد علاوه بر تعیین مناسب‌ترین زمان کاشت، طول فصل رشد، و نیاز آبی، می‌تواند مناطق کمتر مساعد را که از نظر محیطی دچار محدودیت هستند نیز شناسایی کرده و اولویت‌های

رشد هر محصول در مناطق مختلف به‌صورت علمی و دقیق تعیین شود و از این طریق مدیریت بهینه‌تر منابع و افزایش پایداری تولید فراهم آید. ایران نیز با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، محدودیت منابع آب و خاک، و نوسانات اقلیمی گسترده، بیش از بسیاری از مناطق جهان با این چالش‌ها مواجه است. از این رو، به‌روشنی آشکار شده است که ارتقای تولیدات کشاورزی در آینده نه تنها باید با بهره‌گیری بهینه از نهاده‌ها صورت گیرد، بلکه باید هم‌زمان با حفاظت و تقویت پایه‌های طبیعی تولید همراه باشد تا پایداری درازمدت سیستم‌های زراعی تضمین شود (Neamatollahi et al., 2012; Taati & Sarmadian, 2015).

در گذشته، تمرکز اصلی پژوهش‌های کشاورزی عمدتاً بر بررسی روابط عمودی و تک‌بعدی در مقیاس‌های محدود بوده است؛ به‌گونه‌ای که گیاه، آب، خاک و اقلیم به‌صورت جداگانه و در واحدهای نسبتاً همگن مورد مطالعه قرار می‌گرفتند. اما امروزه مدیریت صحیح منابع طبیعی و دستیابی به تولید پایدار مستلزم نگرشی افقی و گسترده‌تر است که در آن تعاملات پیچیده عناصر زیستی، فیزیکی و اجتماعی-اقتصادی در مقیاس‌های وسیع‌تر مکانی و زمانی تحلیل شود (Sivakumar & Valentin, 1997; Yu et al., 2022). ابزارهای نوین از جمله سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های مدل‌سازی فضایی، امکان انجام تحلیل‌های یکپارچه و گسترده را فراهم کرده‌اند و رویکرد AEZ به‌عنوان یکی از کارآمدترین چارچوب‌ها برای این نوع ارزیابی مطرح است (Fischer et al., 2006; Van Wart et al., 2013). مفهوم AEZ ابتدا در دهه ۱۹۷۰ توسط سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO) ارائه شد (Dadrasi et al., 2023). این رویکرد به‌عنوان یک ابزار تحلیلی و عملی، زمینه‌ای یکپارچه برای تعریف زون‌ها فراهم می‌کند و ویژگی‌های اقلیمی و اکولوژیک مؤثر بر تولید را هم به‌صورت کمی و قابل مقایسه بررسی می‌کند و هم محدودیت‌ها و فرصت‌های منابع را بر اساس ویژگی‌های اکوفیزیولوژیکی محصولات، شرایط خاک و اقلیم ارزیابی می‌نماید. برای دستیابی به تولید بهینه و پایدار کشاورزی، لازم است شرایط محیطی و اقلیمی از نظر توانایی‌ها و محدودیت‌ها مشخص شوند. از جمله مزایای پهنه‌بندی AEZ می‌توان به شناسایی مناطق مشابه یا متفاوت، تسهیل انتقال فناوری و نتایج تحقیقات، تعیین دوره‌های تنش محصول و امکان ارائه راه‌حل واحد برای حل چالش‌ها در هر AEZ اشاره کرد؛ به‌گونه‌ای که اگر در مرکز AEZ، هر تحقیق و پژوهشی ارائه شود نتایج آن قابل تعمیم به کل سطح AEZ بوده و می‌توان در هر AEZ سیاست‌گذاری واحد داشت.

اگروکلیم در حقیقت تلاقی ویژگی‌های اقلیمی و اکولوژیک مؤثر بر رشد، توسعه و عملکرد یک گیاه یا سیستم زراعی است. از آنجاکه دما، بارندگی، تبخیر-تعرق، طول فصل رشد و زمان‌بندی رخدادهای اقلیمی در نقاط مختلف کشور و در سال‌های مختلف تفاوت چشمگیری

برگی و سفیدک پودری در مراحل حساس می‌شود. تاریخ کشت، زمان مناسب برای کاشت یک محصول زراعی در یک منطقه خاص است که بر اساس شرایط آب‌وهوایی، نیازهای حرارتی و نوری گیاه، رطوبت خاک و تقویم زراعی تعیین می‌شود. عواملی نظیر: دمای لازم برای جوانه‌زنی، احتمال وقوع یخبندان یا گرمای شدید، میزان بارندگی و رطوبت خاک، طول روز و نیاز نوری گیاه و نوع رقم محصول در تعیین تاریخ کشت آن موثر هستند. طول دوره رشد، مدت زمانی است که گیاه از مرحله کاشت تا برداشت طی می‌کند که شامل مراحل جوانه‌زنی، رشد رویشی، گلدهی، تشکیل دانه و مرحله رسیدگی است. طول دوره رشد می‌تواند بر اساس نوع گیاه و شرایط محیطی متفاوت باشد (Porter & Semenov, 2005; Hatfield & Prueger, 2015; Bhagat et al., 2023). طول دوره رشد در این پژوهش به صورت کل دوره فنولوژیک محصول از تاریخ کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و برداشت تعریف شده است و شامل تمامی مراحل رشد گیاه اعم از جوانه‌زنی، استقرار، رشد رویشی، ساقه‌دهی، خوشه‌دهی، گلدهی، تشکیل و پرشدن دانه و رسیدگی نهایی می‌باشد. بنابراین، منظور از طول دوره رشد در این مطالعه صرفاً دوره رشد رویشی نبوده، بلکه کل چرخه رشدی محصول تا زمان برداشت را دربر می‌گیرد.

این مطالعه از نوع مطالعات تحلیلی-مکانی^۲ است که با هدف پهنه‌بندی مناطق زراعی محصول جو در سطح ایران بر اساس شاخص‌های تاریخ شروع کشت و طول دوره رشد انجام شد. روند کلی تحقیق شامل تهیه بانک داده مربوط به تاریخ کشت و طول دوره رشد مستخرج از سامانه نیازآب (Ebrahimi-Pak et al., 2022)، مدل‌سازی مکانی، خوشه‌بندی آماری، ترکیب داده‌های رستری و نرم‌سازی نهایی بود. داده‌های اولیه شامل داده‌های نقطه‌ای ثانویه تاریخ شروع کشت و طول دوره رشد برای محصول جو در ۷۹۳ ایستگاه در سطح کشور بود. برای پردازش و تحلیل داده‌ها، از نرم‌افزار ArcGIS Pro نسخه ۴٫۳ جهت مدیریت داده‌های رستری و تحلیل‌های فضایی و از نرم‌افزار RStudio برای اجرای الگوریتم‌های خوشه‌بندی استفاده شد.

به منظور تبدیل داده‌های نقطه‌ای به سطوح پیوسته در مقیاس کشوری، روش درونیابی فضایی به کار گرفته شد. در این مطالعه از پیش‌بینی رگرسیونی با کریجینگ بیزین تجربی^۳ (EBK Regression Prediction) که یک مدل تخمین مکانی حاصل ترکیب کریجینگ بیزین تجربی (EBK) و رگرسیون برای مدل‌سازی مکانی است، استفاده شد. این روش یک تکنیک خودکار و از نظر آماری قوی است که قادر به تخمین مقادیر متغیرها در نقاط فاقد داده می‌باشد.

مدیریت منابع و توسعه کشاورزی را در آن‌ها مشخص نماید (Caldiz et al., 2002; Dadrasi et al., 2023). با توجه به خلأ موجود در مطالعات پیشین در زمینه لحاظ کردن همزمان تاریخ کاشت و طول دوره رشد در تعیین مناطق اگروکلیمایی (AEZ)، هدف این پژوهش تعیین و پهنه‌بندی مناطق AEZ محصول جو در مقیاس ملی بر اساس این دو پارامتر کلیدی با بهره‌گیری از روش نوین زمین‌آماری ترکیبی کریجینگ بیزین تجربی و رگرسیون (EBK-RP)^۱ است. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی کشت، بهینه‌سازی مدیریت منابع آب و اصلاح الگوی کشت مورد استفاده قرار گیرد.

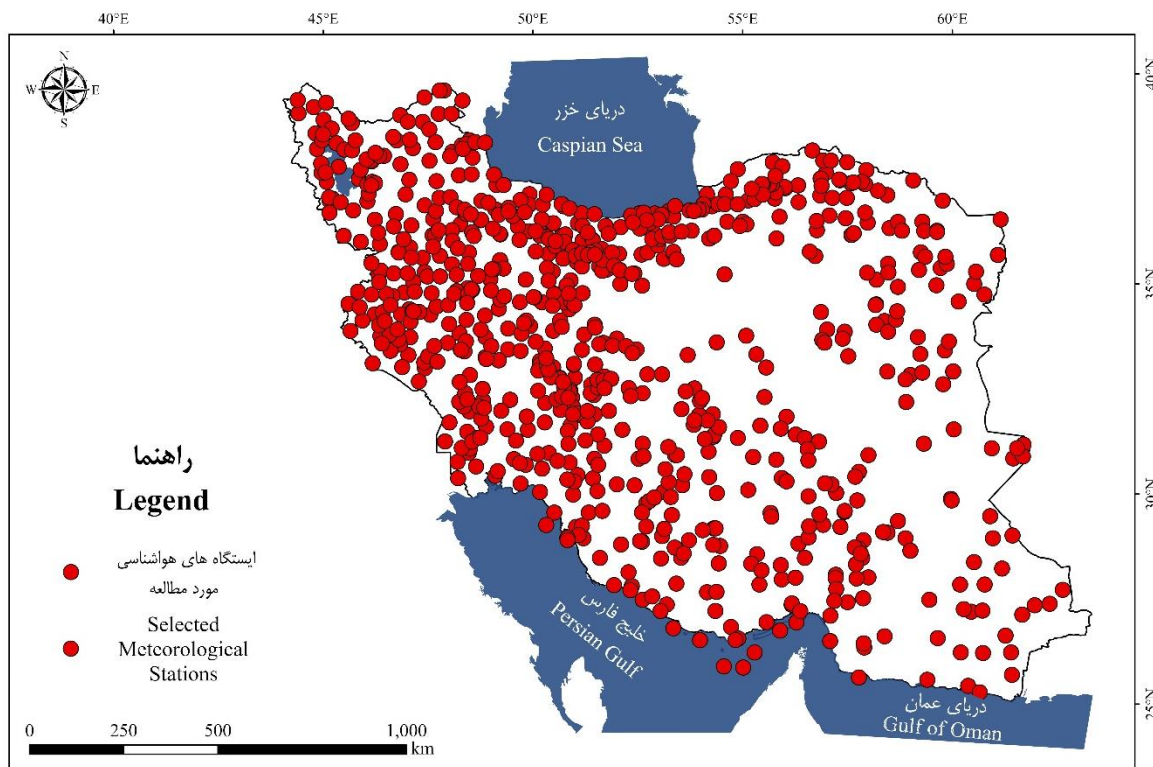
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایران با مساحتی بالغ بر ۱۶۴۸،۱۹۵ کیلومتر مربع یکی از بزرگترین کشورهای خاورمیانه است و بین مدار ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه شرقی (شکل ۱)، از ارتفاع ۴۰ متر پایین‌تر از سطح دریا تا ۵۶۷۸ متر بالاتر از سطح دریا واقع شده است (Ahmadaali et al., 2013). ایران به دلیل عوامل ژئوقلیمی از جمله بازه وسیع عرض جغرافیایی، وجود رشته کوه‌های البرز در شمال، رشته کوه‌های زاگرس در غرب، دو کویر بزرگ (لوت و کویر) واقع در مرکز فلات ایران و تنوع ارتفاعی قابل توجه، با طیف وسیعی از آب و هوا پوشیده شده است (Rahimi et al., 2013). میانگین بلندمدت بارش، دما و تبخیر-تعرق پتانسیل برابر ۲۲۶/۴۶ میلی‌متر، ۱۷/۶۷ درجه سانتی‌گراد و ۱۲۱۸/۲۴ میلی‌متر است. این مقادیر براساس میانگین بلندمدت داده‌های ۱۷ ساله (سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۲) محاسبه شده‌اند. دمای زمستان در ارتفاعات بالاتر عمدتاً کمتر از ۲۰- درجه سانتی‌گراد است و دمای تابستان در جنوب به ۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (Ahmadaali et al., 2021; Ramezani Etedali et al., 2019).

روش تحقیق

تاریخ کشت و طول دوره رشد از مهم‌ترین عوامل مدیریتی در تولید محصولات زراعی هستند که تأثیر مستقیمی بر عملکرد، کیفیت محصول و استفاده بهینه از منابع دارند. تعیین دقیق تاریخ کشت محصول جو به عنوان رایج‌ترین محصول زراعی کشور، می‌تواند سبب جلوگیری از سرمازدگی، استفاده بهتر از بارش مؤثر، جلوگیری از مقارن شدن گلدهی با گرمای بهار و کاهش آفات و بیماری‌هایی مثل لکه



شکل ۱- پراکنش داده‌های مورد مطالعه
Figure 1- Distribution of the study data

خوشه‌بندی آماری استفاده شد. خوشه‌بندی در محیط RStudio با بهره‌گیری از الگوریتم K-Means انجام گردید. الگوریتم K-Means یکی از شناخته‌شده‌ترین الگوریتم‌های خوشه‌بندی‌های پرکاربرد خوشه‌بندی‌های غیر سلسله مراتبی در حوزه یادگیری بدون نظارت است که جزو الگوریتم‌های خوشه‌بندی بخشی است. بخش‌بندی یک مجموعه داده به خوشه‌ها شامل یافتن حداقل خطای مربعات بین نقاط مختلف داده در مجموعه داده و میانگین یک خوشه است، سپس هر نقطه داده، به نزدیک‌ترین مرکز خوشه نسبت داده می‌شود. از نظر ریاضی، اگر یک مجموعه داده‌ای $X = \{x_i\}$ که $i = 1, 2, \dots, n$ شامل نقاط داده d بعدی با اندازه n داشته باشیم، X به k خوشه $C = \{C_j\}$ که $j = 1, 2, \dots, k$ تقسیم می‌شود (رابطه ۱).

$$J(c_k) = \sum_{x_i \in c_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (1)$$

تابع هدف الگوریتم K-means حداقل کردن مجموع مربعات خطا برای هر یک از k خوشه است (رابطه ۲):

$$J(C) = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in c_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (2)$$

در این الگوریتم فرآیند خوشه‌سازی را با انتخاب تصادفی k مرکز اولیه از میان داده‌ها آغاز می‌کند. سپس فاصله هر نقطه داده با این مراکز محاسبه می‌شود و هر نقطه به نزدیک‌ترین مرکز تخصیص

به این صورت که نیازی به تنظیم دستی پارامترها به منظور دستیابی به نتایج دقیق نیست و پارامترها طی فرآیند شبیه‌سازی محاسبه می‌گردند. تفاوت دیگر این تکنیک با سایر روش‌های کریجینگ این است که در این روش خطاهای مربوط به به برآورد نیم‌تغییرنما در نظر گرفته می‌شود در حالی که در سایر روش‌ها، نیم‌تغییرنما از مکان‌های با داده‌های مشخص استفاده می‌کند و سپس از این نیم‌تغییرنمای منفرد برای پیش‌بینی در مکان‌های نامشخص استفاده می‌کند. با توجه به اینکه عدم قطعیت برآورد نیم‌تغییرنما را در محاسبات وارد نمی‌کند، منجر به برآورد خطای استاندارد پایین می‌شود. از جمله محاسن این مدل نیاز به حداقل فعل و انفعالات مدل‌سازی، پیش‌بینی خطای استاندارد دقیق‌تر، دقت بیشتر برای مجموعه داده‌های کوچک و پیش‌بینی دقیق‌تر داده‌های نسبتاً ایستا اشاره نمود (Krivoruchko & Gribov, 2019). برای افزایش دقت برآوردها، مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک‌پذیری ۵۰۰ متری به‌عنوان رستر کمکی در مدل EBK لحاظ شد. نتایج این مرحله شامل چهار نقشه رستری پیوسته برای تاریخ شروع کشت و طول دوره رشد جو بود.

خوشه‌بندی آماری و تعیین کلاس‌های زراعی

برای طبقه‌بندی مقادیر پیوسته رستری به‌دست آمده، از روش

K از ۱ تا ۱۰ برای هر دو متغیر تاریخ کشت و طول دوره رشد محصول جو اجرا شد و مقدار WCSS متناظر با هر K محاسبه گردید. سپس نمودار تغییرات WCSS بر حسب افزایش K ترسیم شد. با افزایش تعداد خوشه‌ها، WCSS همواره کاهش می‌یابد، زیرا نقاط داده به مراکز خوشه‌های خود نزدیک‌تر می‌شوند. با این حال، نقطه‌ای که در آن نرخ کاهش WCSS به‌طور قابل توجهی کند می‌شود و نمودار شکل آرنج پیدا می‌کند، به‌عنوان تعداد بهینه خوشه‌ها انتخاب شد. این نقطه نشان‌دهنده آن است که افزودن خوشه‌های بیشتر، بهبود معناداری در فشرده‌سازی و همگنی خوشه‌ها ایجاد نکرده و تنها پیچیدگی مدل را افزایش می‌دهد. بر اساس این تحلیل، تعداد نهایی خوشه‌ها برای هر متغیر مشخص گردید.

ترکیب و نرم‌سازی نهایی نقشه‌ها

در مرحله نهایی، نقشه‌های طبقه‌بندی شده با یکدیگر ترکیب و به منظور کاهش نویز، نرم‌سازی شدند. ابتدا، نقشه‌های طبقه‌بندی شده مربوط به تاریخ شروع کشت و طول دوره رشد با استفاده از ابزار Raster Calculator ترکیب گردید. سپس به‌منظور حذف پیکسل‌های ایزوله و نرم کردن مرزهای کلاس‌های زراعی، نقشه‌های ترکیب شده از تابع آمار کانونی^۵ استفاده شد. در این فرآیند، نوع همسایگی دایره‌ای با شعاع ۵۰ واحد در نظر گرفته شد و معیار آماری اکثریت^۶ به کار گرفته شد تا لبه‌های کلاس‌ها صاف‌تر شده و همگنی پهنه‌ها افزایش یابد. انتخاب پارامترهای نرم‌سازی بر اساس ملاحظات فضایی و آزمون حساسیت انجام شد. نوع همسایگی دایره‌ای به‌دلیل شباهت بیشتر به الگوی انتشار تدریجی متغیرهای اقلیمی در طبیعت انتخاب گردید، زیرا تغییرات اقلیم و ارتفاع معمولاً به‌صورت پیوسته و شعاعی رخ می‌دهند نه در قالب ساختارهای مربعی. شعاع ۱۷ واحد با انجام چندین اجرای آزمایشی تعیین شد؛ به‌گونه‌ای که ضمن حذف پیکسل‌های منفرد و نویزهای ناشی از طبقه‌بندی K-means، از هموارسازی بیش از حد و ادغام غیرواقعی کلاس‌های مجاور جلوگیری شود. همچنین استفاده از معیار اکثریت به این دلیل انتخاب شد که بتواند کلاس غالب در همسایگی هر پیکسل را حفظ کرده و انسجام فضایی پهنه‌های اگروکلیمایی را بدون تغییر ساختار اصلی الگوهای اقلیمی-ارتفاعی تقویت نماید.

نتایج و بحث

خلاصه خصوصیات آماری داده‌های تاریخ کاشت و طول دوره رشد محصول جو در ۷۹۰ نقطه از کشور در جدول ۱ آورده شده است.

می‌یابد. با اضافه شدن هر نقطه به یک خوشه، مرکز آن خوشه دوباره محاسبه می‌شود. این فرآیند به‌صورت تکراری ادامه می‌یابد تا زمانی که ساختار خوشه‌ها به‌حالت پایدار برسد و تغییر معنی‌داری در عضویت نقاط مشاهده نشود (Ikotun et al., 2023). به‌دلیل سادگی پیاده‌سازی و کارایی بالا، الگوریتم K-means به‌طور گسترده در حوزه‌های مختلف برای انجام کارهای خوشه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اینکه در این الگوریتم تعداد خوشه‌های مورد نظر می‌بایست از پیش تعیین شود، چالش اصلی استفاده از الگوریتم مزبور است. برای حل مشکل، تعیین بهینه تعداد خوشه‌ها دو رویکرد اصلی سایه‌نما^۱ و روش آرنج^۲ ارائه شده است.

در این مطالعه، تعداد بهینه خوشه‌ها (K) برای هر متغیر به‌طور مستقل با استفاده از روش آرنج تعیین شد. این روش یک تکنیک تحلیلی و بصری است که بر اساس معیار مجموع مربعات خطاهای درون خوشه‌ای^۳ (WCSS) عمل می‌کند و به انتخاب بهترین تعداد خوشه‌ها کمک می‌کند. WCSS به‌صورت مجموع مربعات فواصل اقلیدسی هر نقطه داده از مرکز خوشه^۴ مربوط به خود تعریف می‌شود و هدف اصلی خوشه‌بندی کاهش حداقل مقدار WCSS است. در واقع هر خوشه با محاسبه و مقایسه فواصل نقاط آرنج استفاده کرد. یعنی هر خوشه با محاسبه و مقایسه فواصل نقاط داده در یک خوشه با مرکز آن تشکیل می‌شود. در همین راستا روشی ایده‌آل برای تعیین تعداد مناسب خوشه‌ها، محاسبه مجموع مربعات درون خوشه‌ها (WCSS) است. مقدار این متغیر مجموع مربعات فواصل هر نقطه داده در همه خوشه‌ها تا مرکز متناظر با آن ارائه می‌دهد:

$$WCSS = \sum_{C_k}^{C_n} \left(\sum_{d_i \in C_i}^{P_m} distance(d_i, C_k)^2 \right) \quad (3)$$

که در آن C مراکز خوشه و i نقاط موجود در خوشه است و تابع هدف حداقل نمودن مجموع بالا است (Kodinariya & Makwana, 2013). فرض n مشاهده در یک مجموعه داده وجود دارد که اگر تعداد خوشه‌ها را برابر n در نظر بگیریم، مقدار WCSS برابر صفر خواهد بود زیرا هر یک از نقاط داده خود به عنوان مرکز عمل می‌کنند و فاصله نقاط تا مرکز برابر صفر خواهد بود و در این حالت n خوشه خواهیم داشت که تعدادی بدیهی و غیرمنطقی است. لذا یک مقدار آستانه برای K وجود خواهد داشت که می‌توان آن را با استفاده از نمودار آرنج پیدا کرد. برای این منظور به‌طور تصادفی الگوریتم K-Means را برای محدوده‌ای از مقادیر K مقدار دهی اولیه نموده و مقدار WCSS را برای هر K ترسیم می‌کنیم.

در این مطالعه، الگوریتم K-Means به‌صورت متوالی برای مقادیر

4- Centroid

5- Focal Statistics

6- Majority

1- Silhouette Score

2- Elbow Method

3- Within-Cluster Sum of Squares

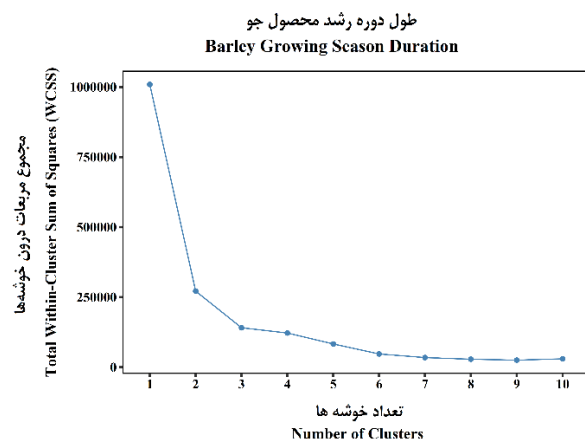
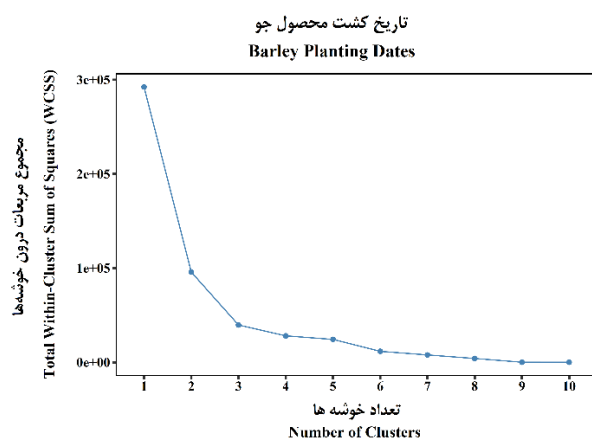
مرطوب) و تغییرات ارتفاعی (از ۴۰- تا ۵۶۷۸ متر) مرتبط است که باعث می‌شود بازه تاریخ کاشت در نقاط مختلف کشور تا ۸۱ روز اختلاف داشته باشد. در حالی که طول دوره رشد محصول، علی‌رغم تغییرات، تابع محدودیت‌های بیولوژیک گیاه بوده و نوسانات کمتری را نسبت به میانگین نشان می‌دهد.

ملاحظه می‌گردد که محدوده تغییرات تاریخ کاشت و طول دوره رشد به‌ترتیب از ۱ تا ۸۱ روز و از ۱۲۰ تا ۲۹۰ روز با میانگین‌های به‌ترتیب ۳۵/۷ و ۲۱۰/۴ متغیر است. بالا بودن ضریب تغییرات در پارامتر تاریخ کاشت (۵۳/۹٪) نسبت به طول دوره رشد (۱۷٪)، بازتاب‌دهنده ناهمگنی شدید زمانی در آغاز عملیات زراعی در مقیاس ملی است. این موضوع مستقیماً با تنوع گسترده اقلیم‌های ایران (از فراخشک تا

جدول ۱- آنالیز آماری تاریخ کشت و طول دوره رشد محصول جود در سطح کشور

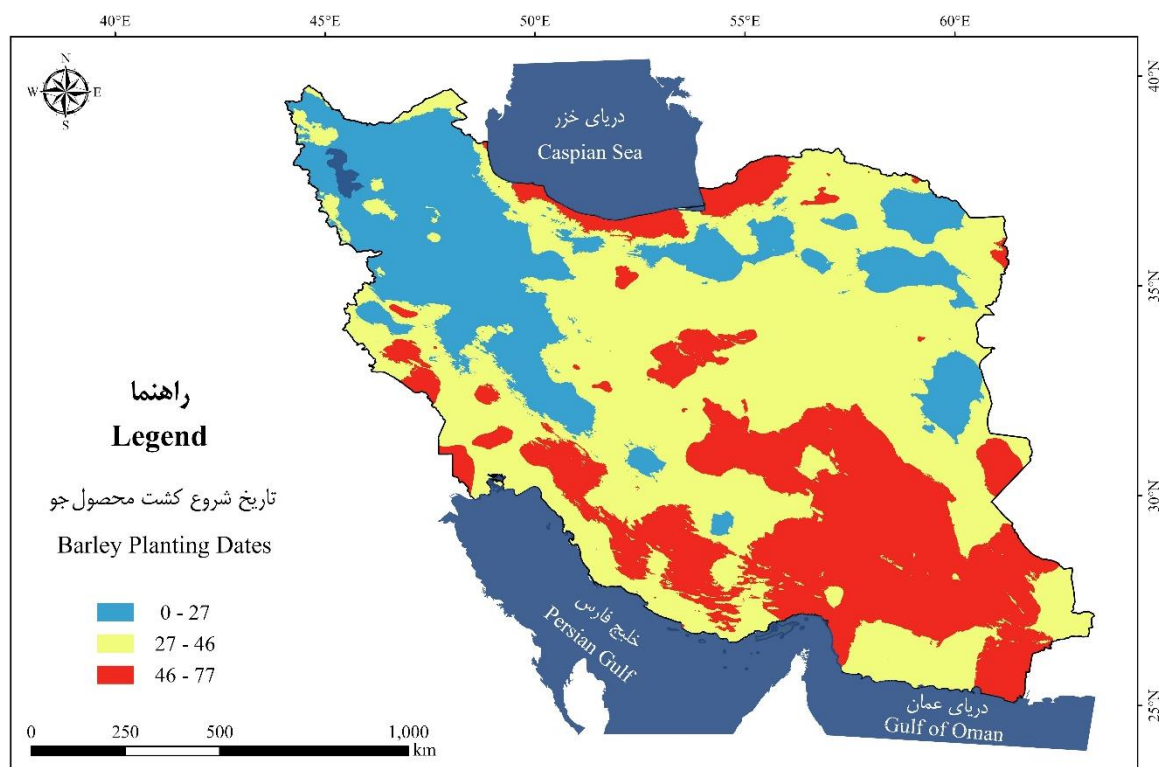
Table 1- Statistical analysis of planting date and length of the growth period of barley across the country

پارامتر Parameter	تاریخ کاشت (روز نسبت به اول مهر) Planting Date (days from 22nd September)	طول دوره رشد Length of Growth Period (days)
مینیمم Minimum	1	120
ماکزیمم Maximum	81	290
میانگین Mean	35.7	210.4
انحراف معیار Standard deviation	19.2	35.8
چولگی Skewness	0.06	-0.39
کشدگی Kurtosis	-0.59	-0.79
ضریب تغییرات Coefficient of variation	53.9	17



شکل ۲- نمودار تغییرات WCSS در مقابل تغییرات تعداد خوشه

Figure 2- Plot of WCSS variations versus the number of clusters



شکل ۳- نقشه طبقه‌بندی شده تاریخ کاشت با تکنیک K-Means و روش آرنج
Figure 3- Classified map of planting date using the K-Means technique and the elbow method

و نیمه‌مرطوب پهنه خیزی یعنی بخش‌هایی از گیلان، مازندران و نوار باریک شمالی البرز، وضعیت اقلیمی با رطوبت بالا و بارش پاییزه قابل‌تکا، زمینه کاشت بسیار زود هنگام جو را فراهم می‌کند. در این مناطق که اغلب ارتفاع کمی نیز دارند، خاک زودتر مرطوب می‌شود، خطر سرمای زودرس کمتر است. در مناطق غرب و شمال‌غرب که شامل آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، کردستان، همدان، زنجان و بخش‌هایی از کرمانشاه است مناطق مدیترانه‌ای و نیمه‌مرطوب دیده می‌شود. این مناطق بارش پاییزی خوبی دریافت می‌کنند اما ارتفاعات زاگرس و البرز غربی دمای هوا را در ماه‌های ابتدایی فصل سرد کاهش می‌دهد و همین امر باعث تأخیر نسبی در کاشت، نسبت به نواحی خیزی می‌شود. در نتیجه مقادیر تاریخ کاشت در بازه ۲۵ تا ۴۵ روز قرار گرفته که بیانگر تعادل میان رطوبت مناسب و سرمای ارتفاعی است. در فلات مرکزی ایران که بیشتر مساحت آن در طبقات نیمه‌خشک و خشک قرار دارد، الگوی کاشت تغییر قابل‌توجهی می‌یابد. میزان بارش کم، پراکندگی بارش‌های پاییزه و وابستگی شدید کشاورزی دیم به نخستین سامانه‌های بارش مؤثر، موجب می‌شود کاشت جو نسبتاً دیرتر انجام گیرد. ارتفاعات متوسط نیز در بخش‌هایی از اصفهان، یزد، مرکزی و قم این تأخیر را تشدید می‌کند. الگوی این مناطق حاصل کمبود رطوبت در اقلیم نیمه‌خشک و تأثیرات ارتفاعی بر سردی فصل است. در نهایت، شرق و جنوب‌شرق ایران شامل استان‌های

لازم به ذکر است که هرچند محدوده تغییرات داده‌های ایستگاهی بین ۱ تا ۸۱ روز متغیر است، اما در نقشه نهایی پهنه‌بندی، به دلیل فرآیند خوشه‌بندی K-means و اعمال فیلترهای نرم‌سازی فضایی جهت حذف نویزهای تک‌پیکسلی، بازه کلاس نهایی به ۷۷ روز تعدیل شده است. این امر به منظور دستیابی به پهنه‌های همگن و کاربردی در مقیاس ملی صورت گرفته است. بر اساس روش آرنج و با توجه به نمودارهای شکل ۲، تعداد خوشه پهنه، که به بیشترین میزان کاهش در مقدار WCSS منجر می‌شود، برای تاریخ کاشت و طول دوره رشد به ترتیب برابر سه و چهار کلاس تعیین شد. نقشه پهنه‌بندی شده تاریخ کاشت با استفاده از تکنیک رگرسیون کریجینگ بیزین تجربی و طبقه‌بندی شده با تکنیک K-Means و روش آرنج در شکل ۳ نشان داده شده است.

بررسی نقشه تاریخ کاشت جو در ایران نشان می‌دهد که الگوی زمانی کاشت از شمال‌غرب و شمال کشور با مقادیر بسیار پایین (۰ تا ۲۷ روز) آغاز می‌شود و در جهت جنوب‌شرق و شرق کشور به مقادیر بسیار بالا (۴۶ تا ۷۷ روز) افزایش می‌یابد. این الگوی گسترده و پیوسته به‌طور دقیق نتیجه برهم‌کنش دو عامل اساسی یعنی تنوع اقلیمی ایران و تغییرات ارتفاعی گسترده کشور است. با توجه به شکل ۳ و طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن گسترش یافته، ملاحظه می‌گردد که در نواحی مرطوب

و کاهش خشکی با افزایش طول دوره رشد و همچنین رابطه معکوس بین ارتفاع بالا (که دما را تعدیل می‌کند) و خشکی شدید با طول مدت رشد گیاه است. به‌طور پیوسته از جنوب گرم و بسیار خشک با ارتفاع کم و فصل رشد کوتاه، به شمال و شمال‌غرب مرطوب و خنک‌تر با ارتفاعات مؤثر و فصل رشدی بسیار طولانی حرکت می‌کنیم و این توزیع دقیقاً بازتاب هم‌زمان الگوی اقلیمی و توپوگرافی ایران است.

در ادامه با برهم‌نهی دو نقشه هم تاریخ کاشت و هم طول دوره رشد اقدام به تهیه نقشه کلاس‌های زراعی و قابلیت کشت محصول جو در ایران گردید. سپس نقشه تهیه شده بر اساس الگوریتم K-Means و روش آرنج طبقه‌بندی شد. ترکیب کلاس‌های تاریخ کشت (۳ کلاس) و طول دوره رشد (۴ کلاس) منجر به تولید ۱۲ کلاس زراعی نهایی برای جو (۳×۴) شد که در شکل ۵ ارائه شده است.

با توجه به نقشه شکل ۵، کدگذاری کلاس‌های نهایی بر اساس فرمول (۴) بدست آمده و در جدول ۲ آورده شده است.

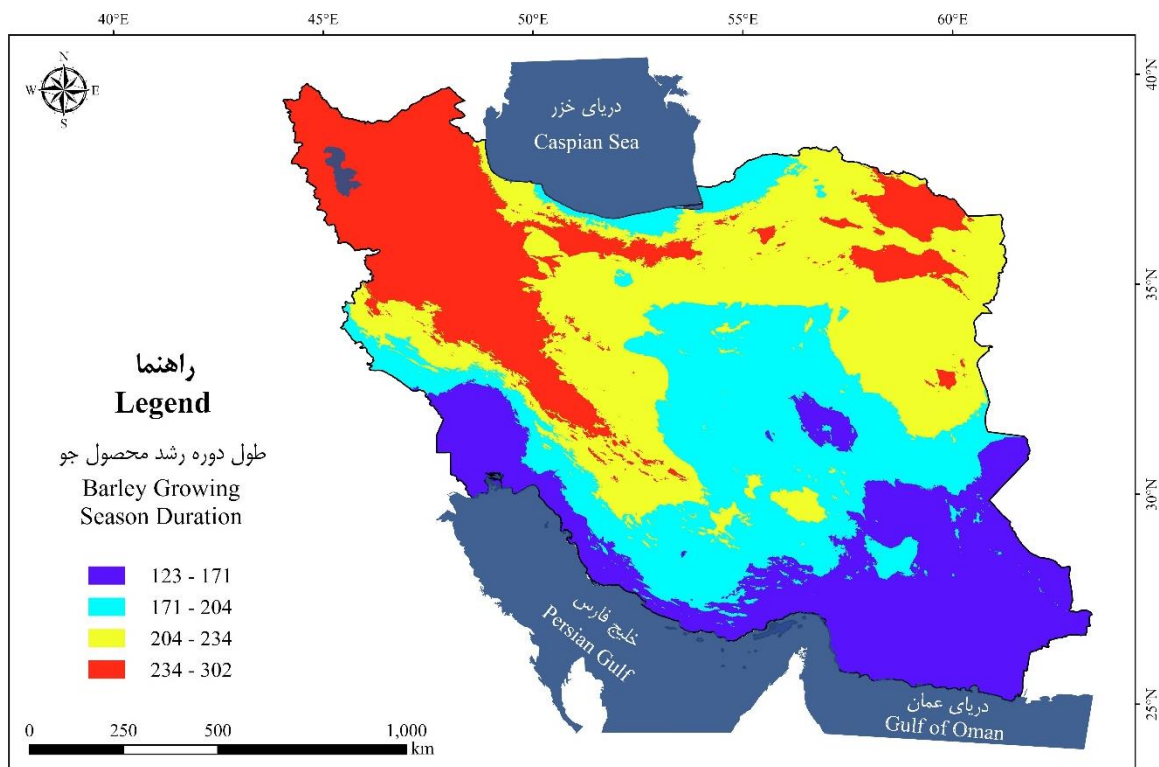
$$\begin{aligned} \text{Agricultural Class Number} \\ = \text{Planting Date Class Number} \times 10 \\ + \text{Growth Season Duration Class Number} \end{aligned} \quad (4)$$

در ایران، تنوع اقلیمی و تغییرات ارتفاعی نقش اساسی در تعیین کلاس‌های زراعی و قابلیت کشت جو دارند. نقشه‌های اقلیمی (Rahimi et al., 2013) و رقوم ارتفاعی کشور نشان می‌دهند که هرچه از شمال به جنوب و از غرب به شرق حرکت کنیم، از میزان رطوبت، بارش و شرایط مساعد برای رشد این محصول کاسته می‌شود و به تدریج کلاس‌های زراعی به سمت کدهای مرتبط با مناطق خشک و نیمه‌خشک تغییر می‌کنند.

در مناطق شمالی، شمال‌غربی و بخش‌هایی از شمال‌شرقی ایران، که شامل اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب در سواحل خزر و دامنه‌های البرز و همچنین اقلیم‌های نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای در ارتفاعات هستند، بهترین شرایط برای کشت جو مشاهده می‌شود. این نواحی معمولاً در کلاس‌های زراعی ۱۲، ۱۳ و ۱۴ قرار می‌گیرند که معرف دوره رشد طولانی‌تر، بارش مناسب و دمای معتدل‌تر هستند. علاوه بر این، در برخی جلگه‌های شمالی و مناطق با اقلیم معتدل‌تر، کلاس‌هایی مانند ۲۲ و ۲۳ نیز دیده می‌شود که نشان‌دهنده پتانسیل مناسب کشت آبی و دیم هستند. نقش ارتفاعات البرز و زاگرس در شکل‌گیری این شرایط مطلوب بسیار تعیین‌کننده است، زیرا با افزایش ارتفاع، بارش بیشتر و دما کاهش می‌یابد و امکان شکل‌گیری کلاس‌های نیمه‌سرد و معتدل فراهم می‌شود.

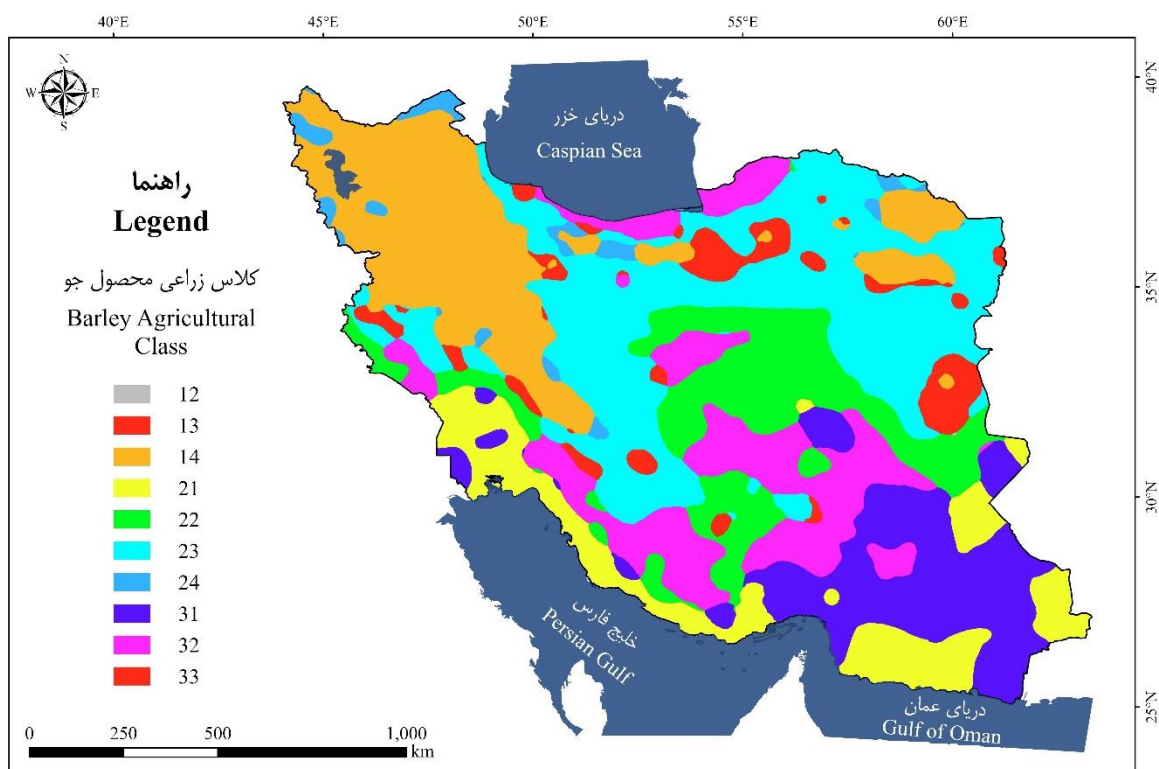
سیستان و بلوچستان، شرق کرمان، جنوب خراسان جنوبی و بخش‌هایی از هرمزگان، در طبقات فوق‌خشک و خشک قرار می‌گیرند. این مناطق خشک‌ترین نقاط ایران هستند و دریافت بارش پاییزی در آن‌ها دیر هنگام، بسیار محدود و نامنظم است. علاوه بر این، بخش‌هایی از شرق کشور تحت تأثیر بادهای خشک، تبخیر بسیار بالا، و وقوع تأخیر در نخستین بارش مؤثر هستند. همین شرایط باعث می‌شود که کاشت جو در این مناطق بیشترین تأخیر زمانی را داشته باشد. ترکیب اقلیم فوق‌خشک با ارتفاعات پراکنده و ناهمگن باعث شده کاشت جو حتی تا ۸۱ روز نیز به تعویق بیفتد.

نتایج شکل ۴ نشان داد که الگوی تغییرات طول دوره رشد محصول جو، به‌صورت پیوسته با اقلیم‌های ایران بر اساس دومارتین گسترش یافته و همچنین با الگوی ارتفاعی ایران هماهنگ است. هرچه شرایط اقلیمی خشک‌تر و ارتفاع پایین‌تر باشد، دما بالاتر و طول فصل رشد کوتاه‌تر می‌شود و برعکس. در اقلیم‌های مرطوب‌تر و نواحی مرتفع که دما پایین‌تر است، فصل رشد طولانی‌تر می‌شود. از جنوب و جنوب‌شرق و جنوب‌غرب ایران که عمدتاً در اقلیم فراخشک و خشک قرار دارند و ارتفاع آن‌ها نسبتاً پایین است، کوتاه‌ترین دوره رشد، یعنی حدود ۱۲۰ تا ۱۷۱ روز مشاهده می‌شود. این نواحی شامل سواحل مکران، بخش‌های وسیعی از هرمزگان و بوشهر، جنوب خوزستان و نواحی کم‌ارتفاع سیستان و بلوچستان هستند که هم از نظر اقلیمی بسیار گرم و خشک‌اند و هم به دلیل عرض جغرافیایی پایین و تابش زیاد، رشد محصول سریع‌تر اما کوتاه‌تر تمام می‌شود. با حرکت به سمت نواحی مرکزی ایران، در فلات مرکزی و اقلیم نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای، طول دوره رشد به حدود ۱۷۰ تا ۲۲۰ روز می‌رسد. این مناطق شامل بخش‌هایی از کرمان، یزد، اصفهان، قم، مرکزی و بخش‌هایی از خراسان جنوبی و رضوی هستند که گرچه خشک‌اند، اما در مقایسه با جنوب، دما کمی ملایم‌تر و نوسانات فصلی بیشتر است و همین باعث افزایش نسبی طول فصل رشد می‌شود. در مرحله بعد، نواحی واقع در ارتفاعات متوسط و اقلیم نیمه‌مرطوب مانند دامنه‌های زاگرس از فارس تا کهگیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری، لرستان و بخش‌هایی از کردستان و کرمانشاه، وارد محدوده ۲۰۴ تا ۲۳۴ روز می‌شوند. نقش ارتفاع در این بخش بسیار مهم است؛ دمای پایین‌تر در دوره‌های انتقالی سال باعث طولانی‌تر شدن زمان مناسب رشد می‌شود. در نهایت، بیشترین طول دوره رشد یعنی حدود ۲۳۴ تا نزدیک ۲۹۰ روز در نواحی شمالی و شمال‌غربی و مناطق پرباران کشور مشاهده می‌شود، جایی که اقلیم نیمه‌مرطوب و مرطوب دامنه‌های البرز و اقلیم مرطوب خزری غالب است. استان‌های گیلان، مازندران و بخش‌هایی از اردبیل و گلستان به دلیل بارش فراوان، رطوبت بالا، عرض جغرافیایی بالاتر و دمای معتدل، امکان یک دوره رشد بسیار طولانی و ممتد را فراهم می‌کنند. در این مناطق، سرمای شدید کوتاه‌مدت بوده و طول دوره گرمای مناسب برای رشد گیاه بیشتر ادامه دارد. بنابراین، این پهنه‌بندی بیانگر رابطه مستقیم بین افزایش رطوبت



شکل ۴- نقشه طبقه‌بندی شده طول دوره رشد با تکنیک K-Means و روش آرنج

Figure 4- Classified map of the length of the growing period using the K-Means technique and the elbow method



شکل ۵- پهنه‌بندی کلاس‌های زراعی و قابلیت کشت محصول جو در ایران

Figure 5- Zoning of agricultural classes and the suitability for cultivating barley in Iran

جدول ۲- کلاس‌های زراعی محصول جو در کشور و تفسیر آنها

Table 2- Agricultural classes of barley in the country and their interpretations

کلاس کشاورزی Agricultural Class	توضیحات Description
11*	تاریخ کاشت ۲۷-۰ روز و دوره رشد ۱۷۱-۱۲۰ روز Planting date 0-27 days and growth period 120-171 days
12	تاریخ کاشت ۲۷-۰ روز و دوره رشد ۱۷۱-۲۰۴ روز Planting date 0-27 days and growth period 171-204 days
13	تاریخ کاشت ۲۷-۰ روز و دوره رشد ۲۰۴-۲۳۴ روز Planting date 0-27 days and growth period 204-234 days
14	تاریخ کاشت ۲۷-۰ روز و دوره رشد ۲۳۴-۳۰۲ روز Planting date 0-27 days and growth period 234-302 days
21	تاریخ کاشت ۲۷-۴۶ روز و دوره رشد ۱۷۱-۱۲۰ روز Planting date 27-46 days and growth period 120-171 days
22	تاریخ کاشت ۲۷-۴۶ روز و دوره رشد ۱۷۱-۲۰۴ روز Planting date 27-46 days and growth period 171-204 days
23	تاریخ کاشت ۲۷-۴۶ روز و دوره رشد ۲۰۴-۲۳۴ روز Planting date 27-46 days and growth period 204-234 days
24	تاریخ کاشت ۲۷-۴۶ روز و دوره رشد ۲۳۴-۳۰۲ روز Planting date 27-46 days and growth period 234-302 days
31	تاریخ کاشت ۴۶-۸۱ روز و دوره رشد ۱۷۱-۱۲۰ روز Planting date 46-81 days and growth period 120-171 days
32	تاریخ کاشت ۴۶-۸۱ روز و دوره رشد ۱۷۱-۲۰۴ روز Planting date 46-81 days and growth period 171-204 days
33	تاریخ کاشت ۴۶-۸۱ روز و دوره رشد ۲۰۴-۲۳۴ روز Planting date 46-81 days and growth period 204-234 days
34*	تاریخ کاشت ۴۶-۸۱ روز و دوره رشد ۲۳۴-۳۰۲ روز Planting date 46-81 days and growth period 234-302 days

* کلاس‌های ۱۱ و ۳۴ که حاصل اشتراک شرایط مربوطه هست، در گستره کشور موجود نیست.

گرم و نیمه‌گرمسیر سازگارند.

در غرب و جنوب‌غربی کشور، تنوع اقلیمی بیشتری وجود دارد. ارتفاعات زاگرس با اقلیم نیمه‌خشک و بارندگی‌های کوهستانی امکان ایجاد کلاس‌های معتدل و نیمه‌سرد مانند ۲۲ و ۲۳ را فراهم می‌کنند، در حالی‌که با کاهش ارتفاع و نزدیک‌شدن به مناطق گرمسیری، کلاس‌های گرمسیری و کم‌بارش غالب می‌شوند.

به‌طور کلی، الگوی توزیع کلاس‌های زراعی جو در ایران کاملاً با پهنه‌بندی اقلیمی دومارتن و تغییرات ارتفاعی سازگار است. ارتفاعات بالاتر، اقلیم‌های مرطوب‌تر و دماهای پایین‌تر معمولاً با کلاس‌های مناسب‌تر کشت مانند ۱۲، ۱۳ و ۱۴ همراه‌اند، در حالی‌که با کاهش ارتفاع و افزایش خشکی، کلاس‌ها به سمت ۲۱، ۲۲، ۲۳ و نهایتاً ۳۱ و ۳۲ تغییر می‌کنند. این روند نشان می‌دهد که جغرافیا و اقلیم نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب نوع و کلاس مناسب کشت جو در مناطق مختلف کشور دارند و نواحی با بارش مناسب و دمای معتدل به‌طور

در مناطق مرکزی ایران، که اقلیم خشک و نیمه‌خشک بر آن غالب است، کلاس‌هایی مانند ۲۱ و ۲۲ رایج‌تر هستند. این نقاط دوره‌های رشد کوتاه‌تری دارند و میزان رطوبت و بارش در آن‌ها به شدت محدود است. به همین دلیل، کشت جو در این مناطق بیشتر به‌صورت کوتاه‌مدت یا در شرایط مدیریت‌شده منابع آب انجام می‌شود. هرچه به سمت کویرهای مرکزی و شرقی پیش می‌رویم، خشکی افزایش یافته و کلاس‌ها به سمت کدهای ۳۱ و ۳۲ تغییر می‌کنند که معرف محدودیت شدید منابع آبی و پتانسیل پایین‌تر برای کشت هستند.

در جنوب و جنوب‌شرق ایران، به‌ویژه در مناطق بیابانی و بسیار خشک، کلاس‌های زراعی ۲۳ تا ۳۳ گسترش دارند. این نواحی به دلیل دمای بالا، بارش بسیار کم و رطوبت محدود، مناسب کشت جو در دوره‌های طولانی نیستند و تنها امکان کشت جوهای مقاوم یا کوتاه‌دوره وجود دارد. در نواحی گرمسیری و کم‌ارتفاع جنوب مانند خوزستان و جنوب فارس، کلاس‌هایی مانند ۱۴ و ۳۳ دیده می‌شود که با شرایط

طبیعی برای تولید این محصول مناسب‌تر هستند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری هم‌زمان از داده‌های اقلیمی، ارتفاعی، فنولوژیک و روش‌های نوین تحلیل فضایی مانند کریجینگ بیزین تجربی و خوشه‌بندی K-Means با روش آرئج، می‌تواند امکان تعیین دقیق نواحی اگروکلیمایی محصول جو را در مقیاس ملی فراهم سازد. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که تاریخ کاشت و طول دوره رشد محصول جو در ایران به‌شدت تحت تأثیر گرادیان اقلیمی-ارتفاعی است؛ به‌طوری‌که نواحی غرب، شمال‌غرب و بخش‌هایی از سواحل خزری با بارش بیشتر، دمای معتدل‌تر و رطوبت کافی، توان بالایی برای کاشت زودهنگام و دوره رشدی طولانی دارند. این ویژگی‌ها زمینه ایجاد محیطی پایدار، کاهش احتمال تنش سرمایی یا گرمایی در مراحل حساس رشد و در نهایت افزایش عملکرد را فراهم می‌کند. در مقابل، نواحی شرقی، جنوب‌شرقی و بخش‌هایی از فلات مرکزی به‌دلیل رطوبت بسیار کم، پراکنش نامنظم بارش، دماهای بالا و تبخیر زیاد، شرایط محدودکننده‌ای برای محصول جو دارند. این مناطق معمولاً با کاشت دیرهنگام، دوره رشد کوتاه و ریسک بالای تنش‌های محیطی مواجه‌اند. در نتیجه مدل‌سازی با روش‌ها و الگوریتم‌های ذکر شده، سطح کشور به ۱۲ کلاس همگن زراعی از نظر تاریخ کاشت و طول دوره رشد برای محصول جو تقسیم شد که این طبقه‌بندی نشان داد که تنها بخش محدودی از کشور (عمدتاً در غرب و شمال‌غرب) دارای بالاترین پتانسیل برای کشت پایدار جو است، در حالی‌که بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک تنها در دوره‌های کوتاه و محدود امکان کشت را دارند. این نتایج اهمیت برنامه‌ریزی مبتنی بر

توان اکولوژیک، مدیریت منابع آب و پرهیز از توسعه کشت در مناطق ناپایدار را برجسته می‌کند. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان مناطق کم‌بازده و کم‌پتانسیل برای تولید را از مدار تولید خارج کرده همچنین برای ارتقا بهره‌وری می‌توان از تقویم‌های کاشت منطقه‌ای متناسب با کلاس‌های شناسایی‌شده، انتخاب ارقام زودرس و مقاوم به خشکی، تغییر زمان کاشت برای اجتناب از تنش‌های دمایی، و به‌کارگیری روش‌های نوین آبیاری بهره‌جست. علاوه بر این، انتقال کشت جو به پهنه‌های دارای پتانسیل بالا، کاهش سطح زیرکشت در مناطق با محدودیت شدید، مدیریت بقایا برای حفظ رطوبت خاک و توسعه سامانه‌های هوشمند مبتنی بر GIS جهت ارائه توصیه‌های دقیق کاشت از راهکارهای کلیدی برای ارتقای پایداری تولید جو در کشور به‌شمار می‌آیند. این اقدامات می‌توانند نقشی اساسی در مدیریت ریسک ناشی از تغییرات اقلیمی، بهبود بهره‌وری و افزایش امنیت غذایی ایفا کنند.

با وجود دقت مناسب روش‌های به‌کاررفته، این پژوهش با برخی محدودیت‌ها مواجه بود. نخست، تحلیل‌ها بر پایه داده‌های بلندمدت ایستگاهی و میانگین‌های اقلیمی انجام شد و تغییرات سالانه و نوسانات حدی اقلیم به‌صورت صریح وارد مدل نگردید. دوم، اثر سناریوهای تغییر اقلیم آینده بر جابجایی احتمالی پهنه‌های اگروکلیمایی مورد بررسی قرار نگرفت. همچنین متغیرهای خاک، مدیریت مزرعه و تنوع ارقام جو در سطح ملی به‌طور مستقیم در فرآیند پهنه‌بندی لحاظ نشدند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی از داده‌های با تفکیک مکانی و زمانی بالاتر، سناریوهای اقلیمی آینده، و مدل‌های تلفیقی اقلیم-رشد گیاه استفاده شود تا پویایی فضایی پهنه‌های زراعی و ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم با دقت بیشتری ارزیابی گردد.

References

- Ahmadaali, K., Eskandari Damaneh, H., Ababaei, B., & Eskandari Damaneh, H. (2021). Impacts of droughts on rainfall use efficiency in different climatic zones and land uses in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(2), 126. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06389-1>
- Ahmadaali, K., Liaghat, A.M., Heydari, N., & Haddad, O.B. (2013). Application of artificial neural network and adaptive neural-based fuzzy inference system techniques in estimating of virtual water. *International Journal of Computer Applications*, 76(6). <https://doi.org/10.5120/13250-0715>
- Aktaş, B., & Gökdere, H.İ. (2025). Evaluation of grain yield, and quality characteristics of some bread wheat cultivars in different agro-ecological regions of Türkiye. *Heliyon*, 11(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41547>
- Asante, B.O., Temoso, O., Addai, K.N., & Villano, R.A. (2019). Evaluating productivity gaps in maize production across different agroecological zones in Ghana. *Agricultural Systems*, 176, 102650. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102650>
- Bagheri, A. (2025). Effects of climate change on barley yield in Isfahan Province. *Spatial Planning*, 15(4), 69-90. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22108/sppl.2025.145531.1852>
- Bhagat, M.A., Kaur, N., & Kaur, S. (2023). Effect of sowing dates on the phenology, grain yield and stress tolerance indices of barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes under subtropical conditions of Punjab. *Journal of Agrometeorology*, 25(1), 113-119. <https://doi.org/10.54386/jam.v25i1.1841>

7. Caldiz, D.O., Haverkort, A.J., & Struik, P.C. (2002). Analysis of a complex crop production system in interdependent agro-ecological zones: a methodological approach for potatoes in Argentina. *Agricultural Systems*, 73(3), 297-311. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00085-3)
8. Dadrasi, A., Chaichi, M., Nehbandani, A., Soltani, E., Nemati, A., Salmani, F., ... & Yousefi, A.R. (2023). Global insight into understanding wheat yield and production through Agro-Ecological Zoning. *Scientific Reports*, 13(1), 15898. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43191-x>
9. Ebrahimi-Pak, N., Tafteh, A., Hosseini, N., & Keykhaii, F. (2022). *Water requirement system (Samaneh Niyaz Ab)*. Soil and Water Research Institute. <http://niwr.ir> (In Persian)
10. Fischer, G., Shah, M., van Velthuizen, H., & Nachtergaele, F. (2006). *Agro-ecological zones assessments*. Oxford: Eolss Publishers.
11. Hajirad, I., Ahmadaali, K., & Liaghat, A. (2025). Crop yield and water productivity modeling using nonlinear growth functions. *Scientific Reports*, 15(1), 30087. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16096-0>
12. Hajirad, I., Mirlatifi, S.M., Dehghanisanij, H., & Mohammadi, S. (2021). Determining yield response factor (ky) of silage maize under different irrigation levels of pulsed and continuous irrigation management. *Central Asian Journal of Plant Science Innovation*, 1(4), 214-220. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00880-9>
13. Hatfield, J.L., & Prueger, J.H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and climate extremes*, 10(Part A), 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
14. Ikotun, A.M., Ezugwu, A.E., Abualigah, L., Abuhaija, B., & Heming, J. (2023). K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data. *Information Sciences*, 622, 178-210. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.11.139>
15. Kodinariya, T.M., & Makwana, P.R. (2013). Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal*, 1(6), 90-95.
16. Krivoruchko, K., & Gribov, A. (2019). Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics*, 32, 100368. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2019.100368>
17. Neamatollahi, E., Bannayan, M., Jahansuz, M.R., Struik, P., & Farid, A. (2012). Agro-ecological zoning for wheat (*Triticum aestivum*), sugar beet (*Beta vulgaris*) and corn (*Zea mays*) on the Mashhad plain, Khorasan Razavi province. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 15(1), 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.05.002>
18. Porter, J.R., & Semenov, M.A. (2005). Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2021-2035. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1752>
19. Rahimi, J., Ebrahimpour, M., & Khalili, A. (2013). Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and applied climatology*, 112(3), 409-418. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0741-8>
20. Ramezani Etedali, H., Ahmadaali, K., Gorgin, F., & Ababaei, B. (2019). Optimization of the cropping pattern of main cereals and improving water productivity: application of the water footprint concept. *Irrigation and Drainage*, 68(4), 765-777. <https://doi.org/10.1002/ird.2362>
21. Sivakumar, M.V.K., & Valentin, C. (1997). Agroecological zones and the assessment of crop production potential. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 352(1356), 907-916. <https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0070>
22. Taati, A., & Sarmadian, F. (2015). Evaluation of land suitability for rainfed barley and wheat in agroecological zones of Abyek area. *Land Management Journal*, 2(2), 123-136. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/lmj.2015.101275>
23. Van Wart, J., van Bussel, L.G., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., ... & Cassman, K.G. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research*, 143, 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.023>
24. Yu, H., Huang, M., Zhao, T., Wang, J., Li, Z., Chen, D., ... & Wang, X. (2022). Analysis of agricultural production potential and enhancement strategy in the Qaidam Basin based on the Agro-Ecological Zone method. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 908888. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.908888>