Researches in Earth Sciences

Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

Research Article

Classification of the new raster-based method for Iranian regional climate

Mahmoud Ahmadi[1*], Mohammad Kamangar[1]

1-Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 23 Jan 2025 Accepted: 30 Jun 2025

Extended Abstract

Introduction

Climate is a fundamental component of the Earth system that governs a wide array of environmental, ecological, and socio-economic processes. The diversity of climatic elements—including temperature, precipitation, humidity, wind, and solar radiation—plays a pivotal role in shaping regional and global climatic patterns. This variability results in the emergence of distinct climatic zones, each with unique environmental and socio-economic characteristics. Historically, the study of climate has intrigued scholars, scientists, and policy-makers alike, dating back to ancient civilizations that sought to understand weather phenomena to improve agricultural practices, navigation, and settlement planning. In contemporary times, with the escalation of global climate change, the importance of accurately understanding and classifying regional climates has grown exponentially. However, the diverse nature of climatic elements, coupled with their spatial and temporal variability, presents significant challenges in conducting integrated and simultaneous analyses. These challenges are further intensified in regional studies that span large geographical extents, diverse topographical features, and variable data quality from multiple stations or monitoring systems. Consequently, climate classification has emerged as an essential scientific tool, aiming to simplify this complexity by categorizing regions into coherent climatic zones based on statistical and environmental indicators. Such classifications are foundational for various applications, including ecological zoning, water resource management, urban planning, and climate adaptation strategies. In countries like Iran, where climatic diversity is pronounced due to a wide range of elevation zones, proximity to seas, and interaction with different atmospheric circulation systems, the need for accurate and region-specific climate classification becomes even more critical. Previous studies on Iran's climate have employed traditional classification systems such as Köppen-Geiger, De Martonne, or Emberger indices, which, while useful, often fall short in capturing localized microclimatic variations and the dynamic influence of topographic features. Moreover, these classifications typically rely on long-term averages and may not incorporate recent trends linked to global climate change. This study addresses these gaps by adopting a data-driven and spatially explicit approach to classify the Iranian climate using long-term meteorological observations. By integrating advanced geostatistical methods and clustering techniques, this research aims to delineate coherent climatic zones across the country that reflect both macro- and micro-climatic influences. The outcomes not only contribute to the refinement of climatic classification in Iran but also serve as a crucial baseline for evaluating future climate trends and guiding decision-making in sectors such as agriculture, water resource management, tourism, and urban development.

Materials and Methods

The study area encompasses the entire territory of Iran, situated in the southwest of Asia and characterized by its complex topography, including mountain ranges such as Alborz and Zagros, vast deserts like Dasht-e Kavir and Dasht-e Lut, and coastal zones along the Caspian Sea, Persian Gulf, and the Sea of Oman.

Citation: Ahmadi, M. and Kamangar, M., 2025. Classification of the new raster-based method for Iranian regional climate, *Res. Earth. Sci:* 16(3), (71-90) DOI: 10.48308/esrj.2025.238444.1253

* Corresponding author E-mail address: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

This geomorphological diversity significantly influences the distribution of climatic variables across the country. The research utilized ground-based meteorological data collected from 92 synoptic stations maintained by the Iran Meteorological Organization (IRIMO), covering a 40-year period from 1980 to 2019. The selected parameters included daily minimum temperature, maximum temperature, total precipitation, and relative humidity—each being a critical determinant of climatic conditions. To create continuous climatic surfaces from the discrete point data, the CoKriging interpolation technique was employed. This geostatistical method allows for the estimation of spatially distributed climatic variables by considering both the primary and secondary variables, thereby improving the accuracy of spatial predictions. The interpolation results were validated using cross-validation techniques to ensure reliability and minimize spatial bias. For classification, a multivariate clustering approach was adopted. Initially, all variables were normalized to ensure uniformity in the scale and to avoid dominance by any single variable. Then, the Euclidean distance metric was used to calculate the dissimilarity matrix among the observations. Hierarchical clustering with Ward's linkage method was applied, which minimizes the variance within each cluster. To determine the optimal number of clusters (i.e., climatic zones), various validity indices such as the Davies-Bouldin Index and the Silhouette Score were evaluated. Spatial analysis and visualization were performed in GIS environments using tools such as ArcGIS and QGIS, allowing for the integration of climatic data with elevation models, land cover maps, and hydrographic networks. This facilitated a nuanced understanding of the spatial relationships between climate zones and physiographic features.

Results and Discussion

The spatial distribution of climatic variables across Iran reveals substantial heterogeneity that reflects the interplay between latitude, elevation, proximity to water bodies, and the influence of prevailing wind patterns and atmospheric systems. The analysis showed that:

- **Temperature:** Maximum temperature values exhibit a clear gradient from north to south and from west to east. The southern and southeastern regions, including Sistan-Baluchestan, Kerman, and parts of Khuzestan, experience the highest maximum temperatures, often exceeding 45°C in summer. In contrast, the northwestern provinces such as West Azerbaijan and Kurdistan, influenced by higher elevations and continental air masses, record the lowest maximum temperatures, with winter temperatures frequently dropping below zero.
- **Precipitation:** Precipitation patterns are largely dictated by elevation and the presence of orographic barriers. The highest precipitation occurs along the southern Caspian coast and the western slopes of the Zagros Mountains. These regions benefit from moist air masses from the Caspian Sea and the Mediterranean, respectively. In contrast, central and southeastern Iran are characterized by hyper-arid conditions, with annual rainfall often below 100 mm, making them among the driest areas in the world.
- **Humidity:** Relative humidity is markedly higher in coastal regions—particularly the northern Caspian belt—due to maritime influences. In inland desert regions, low humidity values correspond with high evaporation rates and limited vegetation cover, intensifying aridity.

Through cluster analysis, Iran was categorized into **ten major climatic zones**, each with distinctive climatic characteristics. These include:

1. **Western Caspian Coastal** – High rainfall (>1100 mm), mild winters, and moderate summers.
2. **Zagros Highlands** – Moderate rainfall and cold winters; high topographic variability.
3. **Northwestern Cold** – Characterized by long, cold winters and moderate precipitation.
4. **Central Arid** – Low precipitation (<100 mm), large temperature range.
5. **Eastern Highlands** – Moderate elevation, low humidity, relatively cooler than adjacent deserts.
6. **Southeastern Arid** – High temperatures (>25°C annual mean), minimal rainfall.
7. **Kerman-Sistan Semi-Arid** – Transitional zone with variable rainfall and high temperature extremes.
8. **Southern Coastal** – Maritime influence from the Persian Gulf; hot and humid summers.
9. **Khorasan Semi-Humid** – Influenced by northern air masses; moderate rainfall.
10. **Central Plateau Margin** – A zone of transition with mixed climatic signatures.

Elevation and topographic complexity emerged as major determinants in shaping climatic diversity. The Alborz and Zagros Mountain ranges act as significant barriers, redirecting air flows and creating rain shadows that contribute to the development of microclimates. These features explain why even regions at similar latitudes can have vastly different climates, as is the case in southern Iran, where some areas are hot and humid while others are hot and arid.

The classification also highlighted the influence of large-scale atmospheric systems such as the **Subtropical Jet Stream**, **Mediterranean cyclones**, and **Indian Monsoon** incursions, which periodically affect parts of Iran, contributing to seasonal rainfall variability and interannual extremes.

Conclusion

This study presents a novel, data-driven framework for the climatic classification of Iran based on long-term observational records and advanced spatial analysis. By integrating ground-based meteorological data from 92 synoptic stations over a 40-year period and employing geostatistical and clustering techniques, the research successfully delineated ten distinct climatic zones across the country. This classification reflects not only large-scale atmospheric circulation patterns but also the pronounced impact of topography, elevation, and proximity to water bodies, which contribute to the development of localized microclimates . Among the identified zones, the central-eastern arid region emerged as the most extensive, covering nearly one-third of the country, characterized by hot, dry conditions and minimal annual precipitation (~90 mm). In stark contrast, the western Caspian coastal zone, the smallest in spatial extent (~0.44% of Iran's area), was found to be the most humid and rain-rich region, receiving more than 1137 mm of precipitation annually. These sharp contrasts illustrate the climatic heterogeneity of Iran, driven by elevation gradients, wind systems, and land-sea interactions .Moreover, the study identified temperature and precipitation gradients across the country: temperature increases generally from north to south and west to east, while precipitation shows a reverse gradient, increasing from south to north and from east to west. The southeastern region was identified as the hottest zone, with average annual temperatures exceeding 25°C, whereas the northwestern highlands of Azerbaijan and Kurdistan exhibited the coldest conditions, with annual mean temperatures around 12°C. One of the major achievements of this study lies in overcoming the limitations of classical climate classification methods by using high-resolution spatial modeling techniques. The use of CoKriging interpolation minimized the errors typically associated with point-based station data, and the clustering method enabled the recognition of transitional climatic zones that are often overlooked in rigid classification systems like Köppen or Emberger .The implications of this work are far-reaching. Accurate identification of climatic zones provides a foundation for climate-informed decision-making in key sectors such as agriculture, water management, urban development, health, and disaster risk reduction. For example, agricultural planning can benefit from knowing the precise climatic needs of crops, urban infrastructure can be designed to better withstand local climatic stressors, and water resource allocations can be tailored to match the precipitation and evaporation patterns of each zone. Furthermore, this classification provides a baseline for monitoring future climate change. As global temperatures rise and precipitation patterns shift, tracking how and where Iran’s climatic zones evolve will be crucial for building adaptive capacity and resilience in both natural ecosystems and human systems .From a scientific perspective, the approach adopted here—combining long-term ground observations with spatial modeling and multivariate clustering—offers a replicable and scalable method for climatic classification in other topographically and climatically diverse regions. It can also serve as a base layer for more complex environmental modeling, such as hydrological simulations, ecological niche modeling, and climate change impact assessments.

Keywords: Analysis of Variance, Climate Zoning, Co-Kriging, Heterogeneous Regions, Iran.

پژوهشهای دانش زمین
Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir
Shahid Beheshti University

طبقه‌بندی نوین اقلیمی یاخته مبنای ایران

محمود احمدی[۱]* ، محمد کمانگر[۱]

۱-گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(**پژوهشی**) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۴ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

چکیده گسترده

مقدمه

اقلیم یکی از مؤلفه‌های اساسی سامانه زمین به شمار می‌رود که مجموعه‌ای گسترده از فرایندهای محیط‌زیستی، بوم‌شناختی و اجتماعی- اقتصادی را کنترل می‌کند. تنوع عناصر اقلیمی از جمله دما، بارش، رطوبت، باد و تابش خورشیدی نقش محوری در شکل‌دهی به الگوهای اقلیمی منطقه‌ای و جهانی دارد. این تغییرپذیری منجر به شکل‌گیری نواحی اقلیمی متمایزی می‌شود که هر یک دارای ویژگی‌های خاص محیط‌زیستی و اجتماعی- اقتصادی هستند. در طول تاریخ، مطالعه اقلیم توجه دانشمندان، پژوهشگران و سیاست‌گذاران را به خود جلب کرده است و سابقه آن به تمدن‌های باستانی بازمی‌گردد که در تلاش برای درک پدیده‌های جوی به‌منظور بهبود کشاورزی، ناوبری و برنامه‌ریزی اسکان بوده‌اند. در دوران معاصر و با شدت یافتن تغییرات اقلیمی جهانی، اهمیت درک دقیق و طبقه‌بندی علمی اقلیم‌های منطقه‌ای به شدت افزایش یافته است. با این حال، ماهیت متنوع عناصر اقلیمی همراه با تغییرپذیری مکانی و زمانی آن‌ها، انجام تحلیل‌های یکپارچه و همزمان را با چالش‌های قابل توجهی مواجه می‌سازد. این چالش‌ها در مطالعات منطقه‌ای که گستره‌های جغرافیایی وسیع، ویژگی‌های توپوگرافی متنوع و کیفیت متغیر داده‌ها از ایستگاه‌ها یا سامانه‌های پایش مختلف را در بر می‌گیرد، شدت می‌یابند. به دنبال آن، طبقه‌بندی اقلیمی به‌عنوان یک ابزار علمی ضروری مطرح می‌شود که با هدف ساده‌سازی این پیچیدگی، مناطق مختلف را بر اساس شاخص‌های آماری و محیط‌زیستی به نواحی اقلیمی منسجم تقسیم می‌کند. این نوع طبقه‌بندی‌ها زیربنای کاربردهای مختلفی همچون منطقه‌بندی بوم‌شناختی، مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی شهری و راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم هستند. در کشورهایی مانند ایران که تنوع اقلیمی ناشی از تفاوت ارتفاع، نزدیکی به دریاها و تعامل با سامانه‌های جوی مختلف بسیار برجسته است، نیاز به طبقه‌بندی دقیق و خاص منطقه‌ای اقلیم، اهمیتی دوچندان می‌یابد. مطالعات پیشین درباره اقلیم ایران عمدتاً بر سامانه‌های سنتی طبقه‌بندی مانند کوپن-گایگر، دمارتن یا امبرژه تکیه داشته‌اند که با وجود مزایای خود، اغلب در شناسایی تغییرات میکرو اقلیمی محلی و تأثیرات پویا و متغیر توپوگرافی ناتوان هستند. افزون بر این، این طبقه‌بندی‌ها معمولاً مبتنی بر میانگین‌های بلندمدت بوده و روندهای اخیر ناشی از تغییر اقلیم جهانی را در نظر نمی‌گیرند. پژوهش حاضر در راستای رفع این کاستی‌ها، با اتخاذ رویکردی داده‌محور و صریح از نظر مکانی، به طبقه‌بندی اقلیم ایران بر اساس مشاهدات بلندمدت هواشناسی پرداخته است. با تلفیق روش‌های پیشرفته ژئواستاتیکی و تحلیل‌های خوشه‌ای، این مطالعه سعی دارد نواحی اقلیمی منسجمی در سطح کشور ترسیم نماید که بازتاب‌دهنده تأثیرات اقلیمی در مقیاس‌های بزرگ و کوچک باشند.

استناد: احمدی، م. و کمانگر، م.، ۱۴۰۴. طبقه‌بندی نوین اقلیمی یاخته مبنای ایران، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۳)، (۹۰-۷۱)،
DOI: 10.48308/esrj.2025.238444.1253

* نویسنده مسئول: E-mail: ma_ahmadi@sbu.ac.ir

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نتایج این پژوهش نه تنها به بهبود طبقه‌بندی اقلیم ایران کمک می‌کند بلکه مبنای مهمی برای ارزیابی روندهای اقلیمی آتی و هدایت تصمیم‌گیری در حوزه‌هایی مانند کشاورزی، مدیریت منابع آب، گردشگری و توسعه شهری فراهم می‌سازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شامل کل قلمرو ایران است که در جنوب غربی آسیا واقع شده و با توپوگرافی پیچیده‌ای همچون رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس، بیابان‌های وسیعی مانند دشت کویر و دشت لوت و نواحی ساحلی در امتداد دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان مشخص می‌شود. این تنوع ژئومورفولوژیکی به‌طور قابل توجهی بر توزیع متغیرهای اقلیمی در سراسر کشور تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش از داده‌های هواشناسی سطح زمین از ۹۲ ایستگاه همدیدی که توسط سازمان هواشناسی ایران گردآوری شده‌اند و دوره‌ای ۴۰ ساله از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۹ را پوشش می‌دهند، استفاده شده است. پارامترهای انتخابی شامل دمای حداقل روزانه، دمای حداکثر، بارش تجمعی و رطوبت نسبی بودند که هرکدام نقشی اساسی در تعیین شرایط اقلیمی ایفا می‌کنند. برای تولید سطوح پیوسته اقلیمی از داده‌های نقطه‌ای، از روش درون‌یابی ژئواستاتیکی کوکریجینگ استفاده شد. این روش امکان برآورد متغیرهای اقلیمی توزیع شده در فضا را از طریق لحاظ کردن متغیرهای اصلی و فرعی فراهم می‌سازد و دقت پیش‌بینی مکانی را افزایش می‌دهد. نتایج درون‌یابی با استفاده از روش‌های اعتبارسنجی متقاطع بررسی شدند تا از صحت و کاهش سوگیری مکانی اطمینان حاصل شود. برای طبقه‌بندی، از روش خوشه‌بندی چندمتغیره استفاده شد. در ابتدا همه متغیرها نرمال‌سازی شدند تا یکنواختی مقیاس‌ها حفظ و از تسلط یک متغیر خاص جلوگیری شود. سپس از فاصله اقلیدسی برای محاسبه ماتریس ناهمگونی بین مشاهدات استفاده گردید. روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی با پیوند وارد (Ward) به کار گرفته شد که واریانس درون هر خوشه را به حداقل می‌رساند. برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها (یعنی نواحی اقلیمی)، شاخص‌های اعتبارسنجی گوناگونی مانند شاخص دیویس- بولدین و نمره سیلوئت ارزیابی شدند. تحلیل‌های فضایی و مصورسازی داده‌ها در محیط‌های GIS مانند ArcGIS و QGIS انجام شد که امکان تلفیق داده‌های اقلیمی با مدل‌های ارتفاعی، نقشه‌های پوشش زمین و شبکه‌های هیدروگرافی را فراهم ساخت. این فرایند موجب درک بهتر روابط فضایی بین نواحی اقلیمی و ویژگی‌های فیزیوگرافیکی شد.

نتایج و بحث

توزیع فضایی متغیرهای اقلیمی در ایران ناهمگونی قابل توجهی را نشان می‌دهد که بازتاب‌دهنده تعامل عرض جغرافیایی، ارتفاع، مجاورت با توده‌های آبی و تأثیر سامانه‌های جوی و الگوهای باد غالب است. تحلیل‌ها نشان داد:

- دمای هوا: بیشینه دما گرادیانی مشخص از شمال به جنوب و از غرب به شرق دارد. مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی مانند سیستان و بلوچستان، کرمان و بخش‌هایی از خوزستان بیشترین دماها را با دمای بالای ۴۵ درجه سانتی‌گراد در تابستان تجربه می‌کنند. در مقابل، استان‌های شمال‌غربی مانند آذربایجان غربی و کردستان که تحت‌تأثیر ارتفاعات بالاتر و توده‌های هوای قاره‌ای هستند، کمترین دماها را داشته و در زمستان‌ها دمای هوا اغلب زیر صفر است.

- بارش: الگوهای بارشی به‌طور عمده تحت‌تأثیر ارتفاع و موانع کوهستانی قرار دارند. بیشترین بارش در نوار جنوبی دریای خزر و دامنه‌های غربی زاگرس ثبت شده است. این مناطق از توده‌های هوای مرطوب خزر و مدیترانه‌ای بهره‌مند هستند. در مقابل، بخش‌های مرکزی و جنوب‌شرقی ایران شرایط فوق‌خشکی داشته و بارندگی سالانه آن‌ها اغلب زیر ۱۰۰ میلی‌متر است.

- رطوبت: رطوبت نسبی در نواحی ساحلی به‌ویژه نوار شمالی خزر به دلیل تأثیرات دریایی بسیار بالاست. در نواحی بیابانی داخلی، مقدار رطوبت پایین بوده و به دلیل نرخ تبخیر بالا و پوشش گیاهی محدود، شدت خشکی افزایش می‌یابد.

از طریق تحلیل خوشه‌ای، ایران به ده ناحیه اقلیمی عمده تقسیم شد که هر کدام ویژگی‌های اقلیمی متمایزی دارند:

۱) ساحلی خزر غربی - بارش بالا < ۱۱۰۰ میلی‌متر، زمستان‌های ملایم، تابستان‌های معتدل

۲) ارتفاعات زاگرس - بارش متوسط و زمستان‌های سرد، تنوع بالای توپوگرافی

۳) سرد شمال‌غربی - زمستان‌های طولانی و سرد همراه با بارش متوسط

۴) خشک مرکزی - بارش کم> ۱۰۰ میلی‌متر، دامنه دمایی وسیع

۵) ارتفاعات شرقی - ارتفاع متوسط، رطوبت پایین، خنک‌تر از بیابان‌های مجاور

۶) خشک جنوب‌شرقی - دمای بالا< ۲۵ درجه میانگین سالانه، بارندگی اندک
۷) نیمه‌خشک کرمان - سیستان - منطقه انتقالی با بارش متغیر و دماهای شدید
۸) ساحلی جنوبی - تأثیر دریایی خلیج فارس، تابستان‌های گرم و مرطوب
۹) نیمه‌مرطوب خراسان - تحت تأثیر توده‌های هوای شمالی، بارش متوسط
۱۰) حاشیه فلات مرکزی - منطقه گذار با نشانه‌های اقلیمی ترکیبی

ارتفاع و پیچیدگی توپوگرافی به‌عنوان عوامل اصلی در شکل‌دهی به تنوع اقلیمی ظاهر شدند. رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس به‌عنوان موانع اصلی جریان‌های هوا عمل کرده و با ایجاد سایه بارشی، به توسعه میکرو اقلیم‌ها کمک می‌کنند. این ویژگی‌ها توضیح می‌دهند که چرا حتی نواحی واقع در عرض جغرافیایی مشابه می‌توانند اقلیم‌های کاملاً متفاوتی داشته باشند؛ همان‌گونه که در جنوب ایران برخی نواحی گرم و مرطوب و برخی گرم و خشک هستند. این طبقه‌بندی همچنین تأثیر سامانه‌های جوی مقیاس بزرگ مانند جریان جتی جنب‌حاره‌ای، سیکلون‌های مدیترانه‌ای و نفوذ موسمی هند را نشان داد که به‌طور دوره‌ای بخش‌هایی از ایران را تحت‌تأثیر قرار داده و به نوسانات بارشی فصلی و افراط‌های بین‌سالی منجر می‌شوند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه چارچوبی نوین و داده‌محور برای طبقه‌بندی اقلیم ایران بر پایه سوابق مشاهداتی بلندمدت و تحلیل‌های فضایی پیشرفته ارائه داده است. با تلفیق داده‌های هواشناسی سطح زمین از ۹۲ ایستگاه همدیدی در بازه ۴۰ ساله و بهره‌گیری از روش‌های ژئواستاتیکی و خوشه‌بندی، پژوهش حاضر موفق به ترسیم ده ناحیه اقلیمی متمایز در سراسر کشور شده است. این طبقه‌بندی نه تنها بازتاب‌دهنده الگوهای چرخش جو در مقیاس کلان است، بلکه تأثیرات برجسته توپوگرافی، ارتفاع و نزدیکی به منابع آبی را که به توسعه میکرو اقلیم‌ها منجر می‌شوند نیز در نظر گرفته است. در میان نواحی شناسایی‌شده، منطقه خشک مرکز- شرق گسترده‌ترین ناحیه بوده که حدود یک‌سوم کشور را پوشش می‌دهد و با شرایط گرم، خشک و بارندگی سالانه اندک (~۹۰ میلی‌متر) مشخص می‌شود. در مقابل، ناحیه ساحلی خزر غربی کوچک‌ترین منطقه اقلیمی (حدود ۰/۴۴ ٪ از مساحت کشور) و مرطوب‌ترین ناحیه با بیش از ۱۱۳۷ میلی‌متر بارش در سال است. این تضاد شدید نشان‌دهنده ناهمگونی اقلیمی ایران است که توسط گرادیان ارتفاع، سامانه‌های باد و تعاملات خشکی - دریا هدایت می‌شود. افزون بر این، مطالعه حاضر گرادیان‌های دما و بارش را در سراسر کشور نشان داد: دما عموماً از شمال به جنوب و از غرب به شرق افزایش یافته، در حالی که بارش به‌طور معکوس از جنوب به شمال و از شرق به غرب افزایش می‌یابد. منطقه جنوب‌شرقی به‌عنوان گرم‌ترین ناحیه با دمای میانگین سالانه بالای ۲۵ درجه سانتی‌گراد شناسایی شد، در حالی که ارتفاعات شمال‌غربی آذربایجان و کردستان سردترین شرایط را با میانگین دمای سالانه حدود ۱۲ درجه داشتند. یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش، رفع محدودیت‌های روش‌های سنتی طبقه‌بندی اقلیمی از طریق استفاده از تکنیک‌های مدلسازی مکانی با وضوح بالا بود. استفاده از روش کوکریجینگ موجب کاهش خطاهای معمول در داده‌های ایستگاهی نقطه‌ای شد و روش خوشه‌بندی نیز امکان شناسایی نواحی انتقالی اقلیمی را که در طبقه‌بندی‌های کلاسیک مانند کوپن یا امبرژه نادیده گرفته می‌شوند، فراهم ساخت. پیامدهای این پژوهش بسیار گسترده است. شناسایی دقیق نواحی اقلیمی، پایه‌ای برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه اقلیمی در بخش‌هایی مانند کشاورزی، مدیریت منابع آب، توسعه شهری، بهداشت و کاهش خطرپذیری بلایای طبیعی فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، برنامه‌ریزی کشاورزی می‌تواند با توجه به نیازهای اقلیمی خاص هر محصول بهینه شود، زیرساخت‌های شهری می‌توانند متناسب با تنش‌های اقلیمی محلی طراحی گردند و تخصیص منابع آبی بر اساس الگوهای بارندگی و تبخیر هر منطقه صورت گیرد. افزون بر این، این طبقه‌بندی مبنایی برای پایش تغییرات اقلیمی آینده فراهم می‌آورد. با افزایش دمای جهانی و تغییر در الگوهای بارندگی، رصد چگونگی و محل تغییر نواحی اقلیمی ایران برای ارتقاء ظرفیت سازگاری و تاب‌آوری در نظام‌های طبیعی و انسانی حیاتی خواهد بود. از دیدگاه علمی، رویکرد به‌کار رفته در این پژوهش - تلفیق مشاهدات بلندمدت زمینی با مدلسازی مکانی و خوشه‌بندی چندمتغیره - الگویی قابل تکرار و مقیاس‌پذیر برای طبقه‌بندی اقلیمی در سایر مناطق دارای تنوع توپوگرافی و اقلیمی است. این رویکرد همچنین می‌تواند به‌عنوان لایه پایه‌ای برای مدلسازی‌های زیست‌محیطی پیچیده‌تر مانند شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی، مدلسازی جایگاه بوم‌شناختی و ارزیابی‌های اثرات تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: ایران، پهنه‌بندی اقلیمی، تحلیل واریانس، کوکریجینگ، مناطق ناهمگن.

مقدمه

اقلیم به میانگین بلندمدت و تغییرپذیری شرایط هواشناسی در یک مکان مشخص اطلاق می‌شود که معمولاً بر اساس یک دوره مرجع ۳۰ ساله ارزیابی می‌گردد (Lovejoy, 2013). تنوع عناصر اقلیمی در تعیین اقلیم یک ناحیه مؤثر بوده و باعث شکل‌گیری اقلیم‌های متنوع و متفاوت می‌شود (Hedayati and Kakavand, 2013; Javadinejad et al, 2021). مقایسه ویژگی‌های ثبت شده آب و هوایی در مکان‌های مختلف زمین نشان‌دهنده وجود اختلاف‌های چشمگیر در سطح این سیاره است. چنانکه هر مکانی دارای ویژگی‌های منحصر به فرد است. شناخت هوا و در نهایت آب و هوا جزء موضوعات بسیار مهمی است که از زمان‌های دور مورد توجه انسان بوده و در زندگی بشر امروز نیز اهمیت خاصی یافته است. شناخت ویژگی های طبیعی هر منطقه، بخصوص آب و هوا می‌تواند در امر برنامه‌ریزی و آمایش سرزمین نقش عمده‌ای ایفا نماید (Tofigh, 2025). از طرف دیگر تنوع عناصر اقلیمی و تنوع رفتار مکانی - زمانی این عناصر موجب شده مطالعه توأم عناصر اقلیمی کاری دشوار، پیچیده و زمان بر باشد. از طرف دیگر در مطالعات پهنه‌ای که از تعداد ایستگاه‌ها یا یاخته‌های بیشتری استفاده می‌شود، بر پیچیدگی و دشواری مطالعه می‌افزاید (Dargahian et al, 2022). بر همین اساس و به‌منظور دستیابی به این هدف، انجام پهنه‌بندی اقلیمی برای شناسایی نواحی مختلف از نظر ویژگی‌های آب‌وهوایی و برنامه‌ریزی متناسب با آن‌ها امری ضروری است. از منظر جغرافی‌دانان، پهنه‌بندی اقلیمی به معنای ساماندهی و طبقه‌بندی نواحی بر اساس شرایط آب‌وهوایی آن‌هاست، به گونه‌ای که هر پهنه دارای خصوصیات اقلیمی نسبتاً همگنی باشد (Torsoni et al, 2024). ضرورت طبقه‌بندی اقلیمی به معنای تقسیم‌بندی یک منطقه بر اساس ویژگی‌های آب‌وهوایی آن است. این کار به دلیل تنوع بالای شرایط جوی در نقاط مختلف جغرافیایی ضروری است. مسئله اصلی این است که: چگونه می‌توان مناطق مختلف را بر اساس شاخص‌های اقلیمی دسته‌بندی کرد؟ این طبقه‌بندی چه کاربردی در مدیریت محیطی و برنامه‌ریزی توسعه دارد؟ این ضرورت می‌تواند تنوع آب‌وهوایی و نیاز به مدیریت منطقه‌ای، تأثیر تغییرات اقلیمی، برنامه‌ریزی اقتصادی و توسعه پایدار، کاهش مخاطرات طبیعی، حفاظت از محیط زیست و تنوع زیستی با هدف شناسایی مناطق هم‌اقلیم برای مدیریت بهینه منابع پیش‌بینی تغییرات آتی بر اساس مدل‌های اقلیمی و ارائه راهکارهای سازگاری باشد. به همین دلیل بین عناصر اقلیمی و موقعیت مکانی - زمانی آنها روابطی وجود دارد. برای مثال در همه جا با افزایش ارتفاع دما کاهش می‌یابد. این گونه روابط باعث ایجاد نواحی تقریباً همگنی می‌شود که عناصر اقلیمی در آن تجانس درونی چشم‌گیری دارند. در ناحیه‌بندی مکان‌های مشابه را گروه-بندی می‌کنند (Alijani, 2008). با استفاده طبقه‌بندی‌ها و نواحی اقلیمی، استدلال هایی منطقی صورت می‌گیرد که استفاده از آنها در برنامه‌ریزی های فضایی بسیار با اهمیت است. در روش‌های ناحیه‌بندی اقلیمی به طور سنتی یک یا چند عامل اختیاری به همراه مرز طبقات در نظر گرفته می‌شود. دو نقد بر این روش‌ها وارد است؛ اگر دو مکان متفاوت در یک یا چند عنصر شبیه هم بودند ولی به لحاظ عناصر دیگر همانند نبودند در یک طبقه جا می‌گرفتند و مرز طبقات نیز اختیاری بودند. به هرحال روش‌های سنتی به لحاظ تاریخی و از جنبه مقایسه‌ای اهمیت دارند. در روش‌های جدید طبقه‌بندی همچون تحلیل عاملی و تحلیل مولفه‌های اصلی تعداد عناصر شرکت کننده در طبقه‌بندی محدودیتی ندارد و تعیین مرز طبقات ماهیت آماری دارد. طبقه‌بندی های اقلیمی بسیاری توسط پژوهشگران صورت گرفته است. از جمله: بلدا و همکاران (Belda et al, 2014) در مطالعه‌ای به بازبینی طبقه‌بندی اقلیمی جهان از کوپن به تروارتا با توجه به تغییرات آب و هوا پرداخته‌اند. این بررسی تغییراتی را در بعضی از زیرگروه‌ها نشان می‌دهد. همچنین دی کاستر و همکارن (De Castro et al, 2022) با استفاده از یک نوع طبقه‌بندی اقلیمی به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در اروپا براساس مجموعه نه مدل اقلیمی منطقه‌ای پرداخته‌اند. همچنین کروسبی و همکاران (Crosbie et al, 2012) تغییرات آینده در انواع آب و هواهای تحت طبقه‌بندی کوپن برای استرالیا مورد بررسی

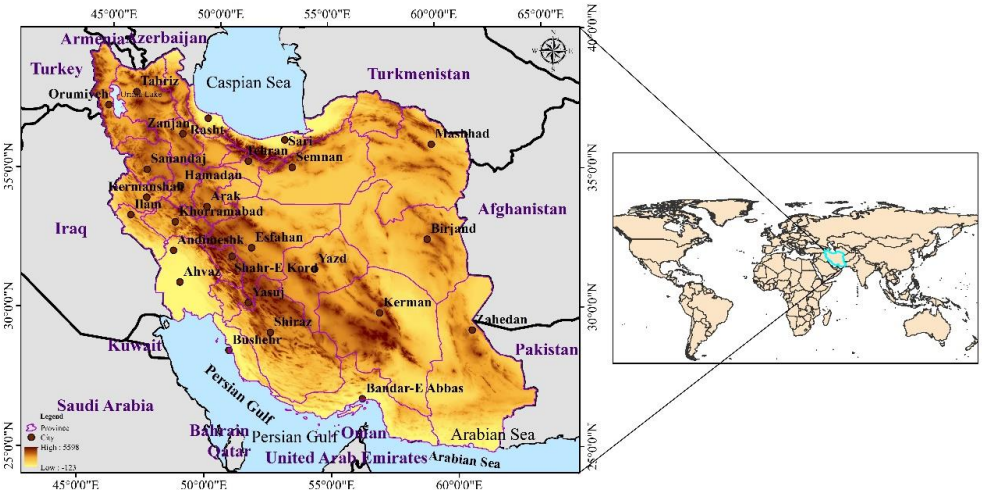
قرار دادند. هدایتی و کاکاوند (Hedayati and Kakavand, 2012) استان قزوین، منتظری و بای (Montazeri and Bay, 2012) ناحیه خزری را با استفاده از داده‌های ایستگاه-های سینوپتیک انجام داده‌اند. پور محمدی و ملک زاده (Pourmohammadi and Malekzadeh, 2013) مناطق همگن اقلیمی را تحت‌تاثیر تغییر اقلیم و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه ای با استفاده از تکنیک گشتاور خطی طبقه بندی نمودند. جعفرپور و کارشناس (Karshenas Jafar Poora, 1999). طبقه‌بندی اقلیمی - تابشی کشور را با استفاده از روش‌های چندمتغیره انجام دادند. چن و همکاران (Chen et al, 2013) با استفاده از طبقه‌بندی کوپن، میزان تغییر و دگرگونی اقلیمی در جهان طی دوره زمانی ۲۰۱۰-۱۹۰۱ را مورد بررسی قرار دادند. میرموسوی و کیانی (Mirmousavi and kiani, 2017) جابجایی مرزهای طبقه‌بندی اقلیمی کوپن را در ایران در سال‌های آتی با استفاده از مدل زوجی MIROC نشان داده‌اند. ایران به دلیل گستردگی در طول و عرض‌های جغرافیایی مختلف و وجود شرایط محلی متفاوت در نواحی مختلف، از تنوع اقلیمی بالایی برخوردار بوده و همین موضوع اهمیت پهنه-بندی اقلیمی را افزون می‌کند. از سوی دیگر با توجه به قرارگیری ایران در کمربند گرم و خشک جهان، این کشور تحت‌تاثیر مسئله گرمایش جهانی و تغییر اقلیم قرار گرفته است. در سال ۱۳۵۵ شمسی، ثابتی برای نخستین بار طبقه‌بندی اقلیمی ایران را معرفی کرد و کشور را به سه منطقه آب‌وهوایی شمالی، مرکزی و جنوبی تقسیم نمود. گنجی در سال ۱۳۸۵ شمسی طبقه‌بندی جدیدی ارائه داد که ایران را به ۱۹ منطقه اقلیمی تقسیم می‌کند؛ این مناطق شامل نیمه‌بیابانی، بیابانی، کوهستانی، کوهستانی بارانی، معتدل، معتدل کوهستانی، سرد و قطبی بودند. در سال ۱۳۵۹ شمسی، تاکتاش طبقه‌بندی دیگری را مطرح کرد که ایران را در ۱۲ منطقه اقلیمی دسته‌بندی می‌کرد و شامل مناطق نیمه‌بیابانی، بیابانی، کوهستانی، کوهستانی بارانی، معتدل و معتدل کوهستانی می‌شد. طبقه‌بندی اقلیمی ایران که در سال ۱۳۷۷ توسط سازمان برنامه و بودجه کشور ارائه شد، بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و آب و هوایی مناطق مختلف ایران، صورت گرفته است. برای طبقه‌بندی، از ۳۰۰ ایستگاه سینوپتیک (ایستگاه‌های مشاهداتی آب و هوایی) در سراسر ایران استفاده شد. در این روش، ابتدا با استفاده از روش آنالیز عاملی، فاکتورهای آب و هوایی مهمی که در تعیین نوع اقلیم در مناطق مختلف ایران تاثیرگذارند، شناسایی شدند. سپس با استفاده از روش خوشه‌بندی، مناطق با شرایط آب و هوایی مشابه در یک خوشه قرار گرفتند و در نهایت با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی مناطق، طبقات اقلیمی مشخص شدند. نتایج این طبقه‌بندی، شامل ۳۱ نوع اقلیمی است که هر کدام شامل چندین استان ایران هستند. این طبقه‌بندی به دلیل در نظر گرفتن ویژگی‌های مختلف مناطق ایران، از اهمیت بالایی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع طبیعی و اقتصادی استفاده می‌شود. همچنین، این طبقه‌بندی می‌تواند در بررسی تغییرات اقلیمی و اثرات آن در مناطق مختلف ایران نیز مورد استفاده قرار گیرد. در سال‌های اخیر، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل داده‌های هواشناسی به‌عنوان ابزارهای مؤثری برای بهبود دقت در طبقه‌بندی اقلیمی ایران مورد توجه قرار گرفته است (Ahmadi and Darand, 2020; Zare and Koch, 2018). این رویکردها با به‌کارگیری روش‌های نوین تحلیل داده‌های اقلیمی و بررسی تأثیر تغییرات آب و هوایی، به ارزیابی و بازنگری تقسیم‌بندی‌های اقلیمی در کشور پرداخته‌اند (Alizadeh-Choobari and Najafi, 2018; Mohammadi and Moradi, 2021). علاوه بر این، پژوهش‌هایی در زمینه تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی بر کیفیت خاک و اکوسیستم‌های مختلف ایران نشان داده‌اند که تغییرات آب و هوایی می‌تواند به طور قابل‌توجهی بر ویژگی‌های اقلیمی و محیط‌زیستی مناطق مختلف تأثیر بگذارد (Khormali, Ayoubi, and Abtahi, 2019)؛ بنابراین، می‌توان گفت که طبقه‌بندی اقلیمی ایران همچنان مورد تحقیق و بررسی قرار دارد و به‌منظور بهبود و دقت بیشتر در طبقه‌بندی اقلیمی، تحقیقات و پژوهش‌های بیشتری باید انجام شود. یکی از چالش‌های اصلی در طبقه‌بندی اقلیمی، دستیابی به داده‌های دقیق و قابل‌اعتماد برای مناطق مختلف جغرافیایی است. این امر به‌ویژه در مناطق ناهمگن و کوهستانی مانند ایران اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (Li et al, 2023). روش‌های میان‌یابی به‌عنوان ابزارهای آماری قوی، امکان تخمین و برآورد داده‌های اقلیمی در نقاطی که فاقد داده‌های مستقیم هستند را فراهم می‌کنند (Chen and Liu, 2022). در این میان، روش کوکریجینگ به دلیل توانایی آن در استفاده هم‌زمان از چندین متغیر و ارتقاء

دقت میان‌یابی، به‌ویژه در مناطق پیچیده و فاقد داده کافی، به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر شناخته می‌شود (Sadeghi et al, 2022). این روش با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاهی موجود و ترکیب آن‌ها با داده‌های کمکی مانند تصاویر ماهواره‌ای یا مدل‌های رقومی ارتفاعی، می‌تواند الگوهای دقیق‌تری از توزیع متغیرهایی چون دما، بارش و رطوبت نسبی ارائه دهد (Wang et al, 2023). استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای مانند کوکریجینگ نقش کلیدی در بهبود دقت و صحت پهنه‌بندی‌های اقلیمی ایفا می‌کند و می‌تواند به شناسایی بهتر ویژگی‌های اقلیمی مناطق مختلف ایران کمک کند (Rahmani and Zarei, 2022). با توجه به تنوع گسترده اقلیمی ایران و تأثیر عوامل متنوع جغرافیایی، توپوگرافیک و انسانی، توسعه یک طبقه‌بندی اقلیمی دقیق، پویا و به روز امری ضروری است (Karimi et al, 2023). اگرچه پژوهش‌های پیشین در این زمینه گام‌های مهمی برداشته‌اند، اما بسیاری از آن‌ها مبتنی بر داده‌های سنتی و روش‌های میان‌یابی ساده بوده‌اند که نمی‌توانند به خوبی ناهمگونی‌های اقلیمی موجود در کشور را شناسایی کنند (Jalili et al, 2022). به‌کارگیری تکنیک‌های نوین مانند کوکریجینگ و مدل‌سازی‌های آماری پیشرفته، می‌تواند به شناسایی بهتر و دقیق‌تر مناطق اقلیمی منجر شود، به‌ویژه در مناطقی با داده‌های ناقص یا پراکنده است (Zhang and Fang, 2022). این طبقه‌بندی‌های نوین، نه تنها در بهبود مدل‌سازی توزیع گونه‌های گیاهی و مدیریت منابع طبیعی مؤثرند، بلکه ابزار مهمی در تحلیل و ارزیابی تغییرات اقلیمی به شمار می‌آیند (Yousefi and Mohammadi, 2023). در نتیجه، می‌توان گفت که طبقه‌بندی اقلیمی ایران همچنان نیازمند بازنگری و توسعه بر اساس داده‌ها و روش‌های نوین است. چنین طبقه‌بندی‌هایی می‌توانند در تصمیم‌گیری‌های کلان در حوزه‌هایی چون کشاورزی، صنعت، منابع آب و گردشگری نقش بسزایی ایفا کنند و به تحقق اهداف توسعه پایدار و ارتقای عدالت فضایی کمک نمایند (Nazari et al, 2023). با توجه به تنوع گسترده اقلیمی ایران و تأثیرات مختلف عوامل جغرافیایی، آب‌وهوایی و انسانی، توسعه یک طبقه‌بندی اقلیمی دقیق و به روز برای کشور امری ضروری است. پژوهش‌های پیشین در این زمینه، اگرچه گام‌های مهمی در شناسایی و تحلیل اقلیم‌های مختلف برداشته‌اند، اما همچنان نیاز به بررسی‌های عمیق‌تر و استفاده از داده‌های نوین و روش‌های میان‌یابی پیشرفته احساس می‌شود. به کارگیری تکنیک‌های جدیدی نظیر کوکریجینگ و تحلیل‌های آماری پیشرفته می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر مناطق ناهمگن و پیچیده ایران کمک کند. این طبقه‌بندی‌های نوین، نه‌تنها در بهبود مدل‌سازی توزیع گونه‌های گیاهی و مدیریت منابع طبیعی مؤثر خواهند بود، بلکه به‌عنوان ابزاری کارآمد در ارزیابی تغییرات اقلیمی نقش حیاتی دارند. بنابراین، می‌توان گفت که طبقه‌بندی اقلیمی ایران همچنان مورد تحقیق و بررسی قرار دارد و به منظور بهبود و دقت بیشتر در طبقه‌بندی اقلیمی، تحقیقات و پژوهش‌های بیشتری باید انجام شود. طبقه‌بندی اقلیمی نوین ایران، به عنوان یکی از مهمترین ابزارهای ارزیابی تغییرات آب‌وهوایی، می‌تواند کمک شایانی به تصمیم‌گیران در حوزه‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت، گردشگری و غیره باشد. این نوع طبقه‌بندی‌ها نه‌تنها به پیش‌بینی و مدیریت بهتر بحران‌های اقلیمی کمک می‌کنند، بلکه در برنامه‌ریزی‌های توسعه پایدار و دستیابی به عدالت اجتماعی نیز نقش بسزایی دارند. لذا طبقه‌بندی اقلیمی در ایران به دلایل متعددی اهمیت دارد که برخی از مهم‌ترین آنها عبارتند از: توجه به مدیریت منابع آب و کشاورزی، برنامه‌ریزی شهری و عمرانی، مدیریت بلایای طبیعی، حفاظت از محیط زیست و تنوع زیستی، توسعه انرژی و صنعت، سلامت عمومی، توسعه گردشگری و کمک به مدل‌سازی تغییرات آب‌وهوایی و پیش‌بینی اثرات گرمایش جهانی با اجرای تدوین سیاست‌های کلان ملی و بین‌المللی برای مقابله با تغییرات اقلیمی. در کل، طبقه‌بندی اقلیمی به کشورها کمک می‌کند تا با شناخت دقیق‌تر محیط خود، تصمیم‌های هوشمندانه‌تری در زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بگیرند.

منطقه‌ی مورد مطالعه

ایران بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی با مساحت ۱٬۶۴۸٬۱۹۵ کیلومتر مربع در جنوب غرب آسیا واقع شده است (شکل ۱). ایران از شمال غرب با ارمنستان و آذربایجان، از شمال با دریای خزر، از شمال شرق با ترکمنستان، از شرق با افغانستان و پاکستان، از جنوب با خلیج فارس و دریای عمان و در غرب با عراق و ترکیه

هم‌مرز است. سطح وسیعی از سرزمین ایران نواحی کوهستانی و نیمه‌خشک بوده و میانگین ارتفاع آن بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریاست. به علت گستردگی و وجود عوامل متعدد جغرافیایی از یک طرف و قرارگیری در محل گذار سامانه‌های متفاوت گردش جوی از طرف دیگر، تنوع اقلیمی در سرتاسر آن وجود دارد (Alijani, 2012).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی ایران

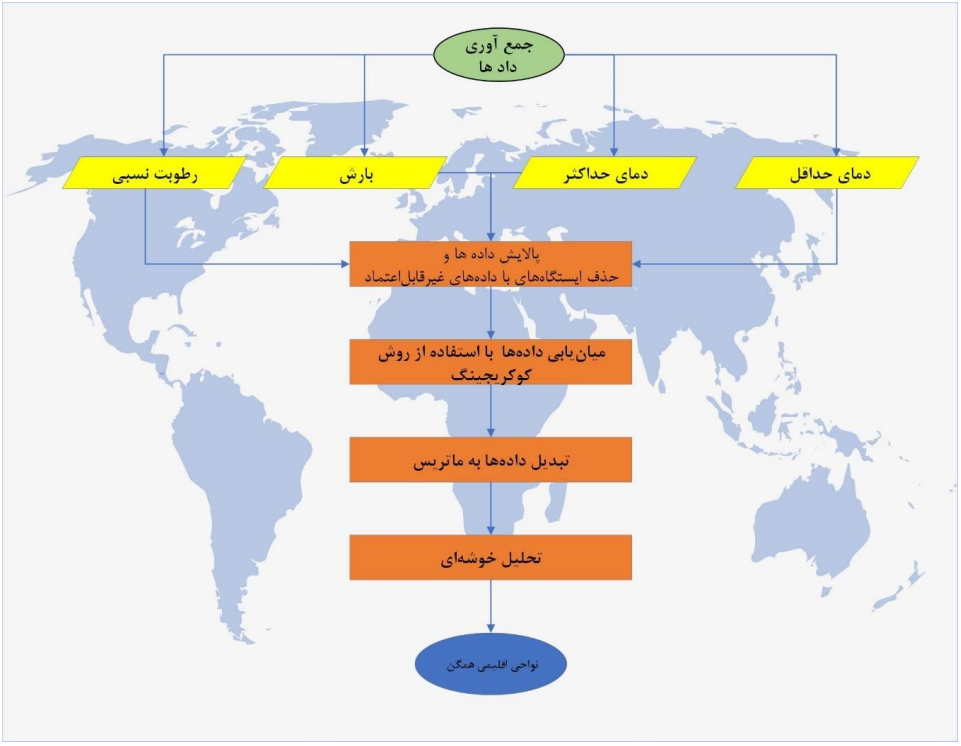
Fig. 1: Geographical location of Iran

ایران از لحاظ دمایی به دو بخش سرد کوهستانی و گرم کم ارتفاع تقسیم می‌شود. میانگین دمای کشور حدود ۱۸ درجه سلسیوس است. حاکمیت سامانه‌های همدید، نظیر کم‌فشار گنگ و پرفشار آزور از یک‌سو و محتوای رطوبتی جو نیز از سوی دیگر در شکل‌گیری نواحی دمایی ایران نقش دارند (Masoodian and Kavyani, 2008). وضعیت دمایی ایران در تابستان همگن‌تر از زمستان است. میانگین بارش سالانه در ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که ایران را جزو کشورهای خشک دنیا قرار داده است. در دوره سرد سال، به علت حاکمیت بادهای غربی و نزدیکی به منبع رطوبتی دریای مدیترانه، بارندگی زیادی دارد؛ اما دوره گرم سال نفوذ پرفشار آزور باعث کاهش بارندگی می‌شود. توزیع زمانی و مکانی باران در کشور نیز پراکندگی یکسانی ندارد. بیشترین مقدار بارش‌ها مربوط به کرانه‌های جنوبی دریای خزر و کمترین مقدار مربوط به بیابان‌های مرکزی لوت و کویر نمک است (Masoodian et al, 2018).

مواد و روش‌ها

داده ایستگاه های آب‌وهوا شناسی

در این پژوهش داده های زمینی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و رطوبت نسبی ۹۲ ایستگاه سینوپتیک در بازه زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۹ از سازمان هواشناسی اخذ شد. به دلیل خلاءهای آماری و غیر قابل اطمینان بودن داده به لحاظ کیفیت آماری، ۷ ایستگاه کنار گذاشته شد و از ۸۵ ایستگاه باقی مانده استفاده گردید. نمودار جریانی تحقیق در شکل دو آورده شده است.



شکل ۲: نمودار جریانی تحقیق طبقه‌بندی نوین اقلیمی ایران

Fig. 2: Flowchart of the research on the new climate classification of Iran

چهار عنصر استفاده شده از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین متغیرهای اقلیمی هستند که به‌طور مستقیم بر تعیین و طبقه‌بندی اقلیم یک منطقه اثر می‌گذارند. دمای حداقل و دمای حداکثر: این دو عنصر مهم‌ترین شاخص‌های دمایی در تحلیل اقلیم محسوب می‌شوند. دمای حداقل و حداکثر روزانه نه‌تنها شاخصی از گرمای روز و سرمای شب را ارائه می‌دهند، بلکه نشان‌دهنده تغییرات دمایی فصلی و تأثیرات آن بر الگوهای اقلیمی هستند. این داده‌ها برای شناسایی موج‌های گرما و سرما، تحلیل‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی و همچنین تأثیرات آنها بر زیست‌بوم‌ها و فعالیت‌های کشاورزی ضروری‌اند.

بارش: میزان و توزیع بارش در طول سال یکی از عوامل کلیدی در تعریف انواع اقلیم‌ها است. بارش به‌طور مستقیم بر روی کشاورزی، منابع آب، زیست‌بوم‌ها و توسعه مناطق مختلف تأثیر می‌گذارد. بررسی الگوهای بارش به ما کمک می‌کند تا مناطق خشک، نیمه‌خشک، و مرطوب را شناسایی کرده و تغییرات اقلیمی بالقوه را بررسی کنیم.

رطوبت نسبی: رطوبت نسبی به‌عنوان شاخصی از میزان بخار آب موجود در هوا، نقشی حیاتی در تعیین وضعیت اقلیمی ایفا می‌کند. این عنصر بر دمای احساسی، تبخیر، و فرآیندهای جوی مانند تشکیل ابر و بارندگی تأثیرگذار است. همچنین، رطوبت نسبی بر سلامت گیاهان و انسان‌ها و نیز بر فرآیندهای طبیعی مانند تعریق و تبخیر از سطح خاک مؤثر است.

میان یابی (درون یابی)

فرایند برآورد مقادیر برای نقاط فاقد داده با استفاده از نقاط مجاور و معلوم یا پیمونگاه (ایستگاه‌های هواشناسی) را درون‌یابی تعریف کرده‌اند. این فرایند به دلیل لزوم شناخت پهنه‌های آب و هوایی، رفتار عناصر اقلیمی در این پهنه‌ها و از سوی دیگر نقطه‌ای بودن داده‌های اقلیمی و لزوم شناخت پهنه‌ها صورت می‌گیرد (Asakereh, 2008). به این ترتیب و به بیانی ساده، میان یابی فرایند تبدیل کمیت‌های نقطه‌ای به کمیت‌های پهنه‌ای با در نظر گرفتن اصول و قواعدی مشخص و علمی می‌باشد. در تعیین ارزش یک نقطه تمامی پیمونگاه‌های (نقاط معلوم) مجاور، به یک اندازه اثر ندارند. از این رو هر یک از نقاط مجاور به نسبت اثری که بر ارزش نقطه مجهول دارند؛ حامل وزنی خواهند بود. در تحلیل‌های مکانی اقلیمی، تبدیل داده‌ها به ماتریس و استفاده از روش کوکریجینگ یک روی کرد کارآمد برای درون یابی و تخمین مقادیر در نقاط فاقد داده است که می‌تواند تخمین دقیق‌تر نسبت به روش‌های تک‌متغیره (مثل IDW یا کریجینگ ساده) باشد و استفاده از داده‌های کمکی (مانند

ارتفاع، شیب، فاصله از دریا) برای بهبود نتایج و کاهش خطا در مناطق با داده‌های پراکنده و مناسب برای داده‌های ناهمگن (مثلاً مناطق کوهستانی با تغییرات شدید اقلیمی) تلقی گردد.

به عنوان مثال اگر مجموعه ایستگاه‌ها در یک پهنه باشد؛ برای یک نقطه مثل q، ارزش یک عنصر یا متغیر اقلیمی بر اساس ارزش‌های ایستگاه‌های پیرامون طبق رابطه ۱ تعریف می‌شود.

رابطه ۱)

$$f(q)=\sum_{i=1}^{n} w_i f(s_i)$$

در این‌جا w_i وزن‌های s_i است. این روش برای تعیین ارزش‌های نقاط مجهول به نام میانگین وزنی (موزون) موسوم است. روش‌های مختلف تعیین وزن موجب شکل گیری روش‌های متنوعی در میان‌یابی مشاهدات شده است (Asakereh, 2008). در میان روش‌های مختلفِ زمین آمار، روش کریجینگ به شرط برخورداری از صلاحیت‌های اولیه می‌تواند بهترین میانگین موزون از یک پهنه را ارائه دهد. میان یابی کریجینگ روشی محلی - احتمالی - رسا - خطی - نااریب - با پراش کمینه است و برای داده‌هایی که پراکنش نامنظم دارند روشی مناسب محسوب می‌شود از این رو و با توجه به ویژگی‌های پدیده‌های اقلیمی مثل احتمالی بودن و پراکنش نامنظم ایستگاه‌های هواشناسی، روشی مناسب در برآوردهای آب و هوایی است. با این حال اگر تعدادی متغیر همبسته با هم تخمین زده می‌شوند، کوکریجینگ نسبت به روش‌های کریجینگ یک متغیره برتری دارد (Hassani, 1998). از این رو در تحقیق حاضر، ضمن بهره مندی از داده‌های ایستگاه همدید کشور بر اساس روش کوکریجینگ و با استفاده از متغیر کمکی ارتفاع، میان‌یابی عناصر دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و رطوبت نسبی انجام شد. تبدیل نقشه‌ها به ماتریس داده‌ها: در گام بعد نقشه‌های دمای عناصر جوی کشور که در مرحله قبل برای هر روز تهیه شده بود به ماتریس داده‌ای تبدیل گردید. به این ترتیب، هر نقشه به یک ماتریس تبدیل شد که در آن ارزش درایه n_{ij} برابر با ارزش یاخته n_{ij} از نقشه معادل است. از اتصال ماتریس مربوط به هر روز به روزهای دیگر ماتریس نهایی داده‌ها حاصل گردید که پایه محاسبات در مراحل بعدی تحقیق گردید.

طبقه‌بندی اقلیمی

تحلیل خوشه‌ای یک روش قدرتمند برای گروه‌بندی داده‌ها بر اساس شباهت‌ها است. مشخصات توصیفی، می‌تواند مبنای طبقه‌بندی ویژگی‌های دمایی به روش تحلیل خوشه‌ای باشد. در روش تحلیل خوشه‌ای جایگاه ویژه‌ای به هر مشاهده در یک فضای چند بعدی اختصاص داده می‌شود که ابعاد را تعداد صفات اندازه‌گیری شده تعیین می‌کنند. همچنین به منظور سنجش فاصله بین مشاهدات از روش های ریاضی استفاده می‌شود. به این ترتیب تحلیل خوشه‌ای را مناسب‌ترین روش جهت تشخیص شباهت‌های بین افرادِ یک مجموعه می‌دانند (Farshadfar, 2005). چون هدف آن، گروه‌بندی خودکار داده‌ها بر اساس شباهت‌ها است و چون خوشه‌بندی یک فرآیند چندمرحله‌ای است که در آن معیارهایی مانند فاصله اقلیدوسی می‌توانند به‌عنوان ابزار اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گیرد لذا فاصله اقلیدوسی یک مفهوم ریاضی است که فقط برای سنجش فاصله بین دو نقطه در فضا به کار می‌رود. و چون این فاصله، یک عدد است که نشان می‌دهد دو نقطه چقدر از هم دور هستند لذا هیچ گونه تحلیل یا تصمیم‌گیری انجام نمی‌دهد؛ و فقط به صورت عددی بیان می‌کند که "فاصله چقدر است". به همین جهت در این تحقیق سعی گردید جهت تشخیص فاصلهٔ بین افراد از روش فاصله اقلیدسی[1] به شرح رابطه دو بهره گرفته شود.

رابطه ۲)

$$e_{jk}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_{ij}-X_{ik})^2}$$

در این رابطه e_{jk} ضریب فاصله اقلیدسی، X_{ij} مقدار صفت i ام بر روی فرد j ام و X_{ik} مقدار صفت i ام روی فرد k ام است. برای ادغام افراد در گروه‌ها نیز از روش ادغام (وارد)[2] استفاده شد است. فاصله اقلیدسی و روش وارد از مقبولیت بالایی در نزد اقلیم‌شناسان برخوردارند. در روش ادغام وارد طی هر مرحله، کمبود اطلاعاتی که در اثر دسته-بندی افراد در دسته‌ها به وجود می‌آید را می‌توان توسط کل مجموع مربعات خطای (SSE)[3] هر نقطه از میانگین دسته‌ای که به آن تعلق دارد به دست آورد. در هر مرحله دو دسته‌ای که ادغام آن‌ها سبب کمینه شدن مجموع مربعات خطا گردد با هم ترکیب می‌شوند. بنابراین مشاهداتی که در یک جفت از گروه‌ها مجموع مربعات

خطای کمینه داشته باشند، در یک دسته قرار می‌گیرند. عبارت ریاضی برای محاسبهٔ مجموع مربعات خطا (SSE) از رابطه ۳ بدست می آید. (Farshadfar, 2005).

رابطه ۳)

$$SSE = \sum_{j=1}^{k}\left[\sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}^{2} - \frac{1}{n_j}\left[\sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}\right]^{2}\right]$$

در رابطه بالا X_{ij} نمره فرد i ام در دسته j ام است. K شمار کل دسته‌ها در هر مرحله و n_j شمار افراد در هر دسته j ام است. به عنوان مثال برای انجام این ادغام در مرحله اول هر یاخته به عنوان یک دسته دارای یک عضو در نظر گرفته می‌شود، در این صورت SSE=0 خواهد بود. دو یاخته‌ای که ادغام آن‌ها سبب افزایش SSE اما در عین حال نسبت به ادغام‌های دیگر کمینه باشد، اولین دسته را تشکیل می‌دهد. ملحق شدن یاخته‌های دیگر به دسته‌های تشکیل شده مرحلهٔ بعدی خواهد بود. به این ترتیب یاخته‌های مشابه در یک گروه جای گرفته و در نتیجه نواحی همگن شناسایی می‌شوند. برای انجام تحلیل خوشه‌ای به‌منظور طبقه‌بندی ویژگی‌های دمایی یا هر نوع داده دیگر، نیاز به توضیح جامع و گام‌به‌گام متدولوژی است. تحلیل خوشه‌ای یک روش آماری بدون نظارت است که داده‌ها را بر اساس شباهت‌هایشان به گروه‌هایی تقسیم می‌کند. مراحل انجام تحلیل خوشه‌ای، معیارهای مورد استفاده، و جزئیات مربوط به فاصله اقلیدسی این تحقیق در زیر آورده شده است.

۱) انتخاب متغیرها و آماده‌سازی داده‌ها

اولین گام، انتخاب متغیرهای مناسب برای تحلیل است. عناصر دمای حداقل و حداکثر، بارش و رطوبت نسبی با توجه به وضعیت اقلیمی انتخاب شوند. سپس داده‌ها مثلاً نرمال‌سازی یا استانداردسازی تا از تأثیر مقیاس‌های مختلف جلوگیری شود.

۲) انتخاب معیار فاصله

معیار فاصله برای سنجش شباهت یا تفاوت بین مشاهدات استفاده شد.

۳) انتخاب الگوریتم خوشه‌بندی

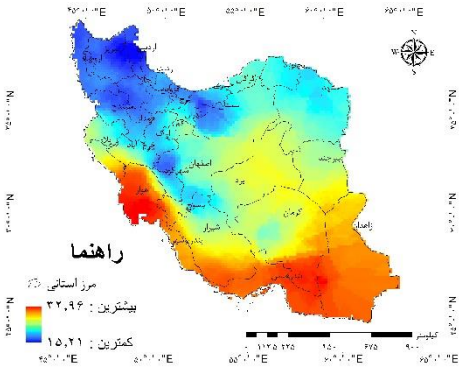
خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (Hierarchical Clustering): در این روش، خوشه‌ها به‌صورت سلسله‌مراتبی ساخته شده و از رویکرد پایین به بالا (Agglomerative) و معیارهای پیوند از Ward استفاده شد.

۴) تعیین تعداد خوشه‌ها برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها، روش معیار silhouette استفاده شد.

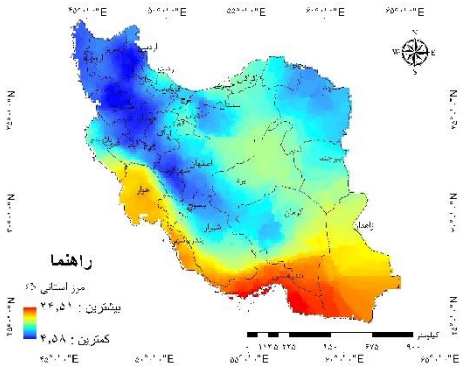
۵) اجرای تحلیل و تفسیر نتایج: پس از اجرای الگوریتم، خوشه‌ها تشکیل و تفسیر شد. برای تفسیر، از ویژگی‌های هر خوشه مانند میانگین و الگوها استفاده شد.

بحث و نتایج

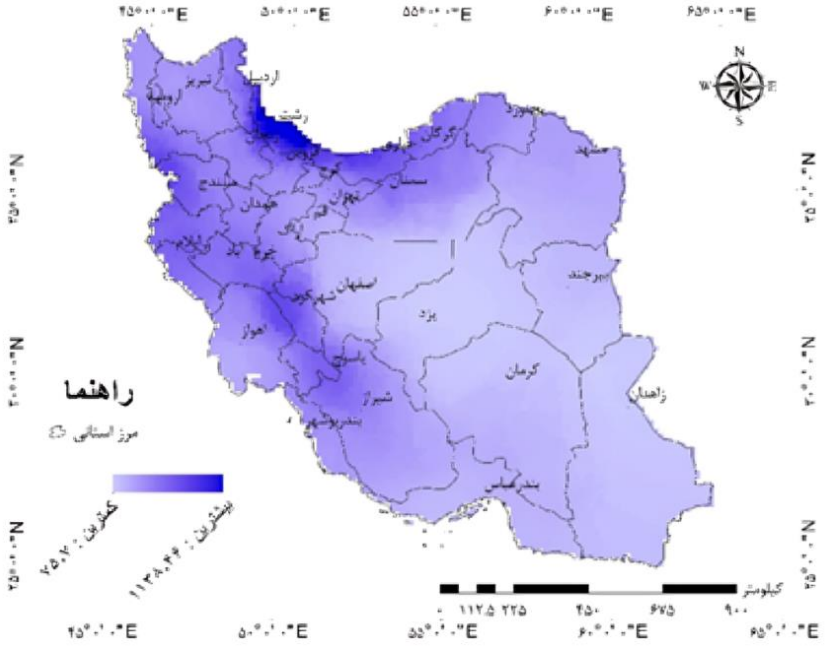
در اشکال سه و چهار الگوی پراکندگی دمای حداقل دما، حداکثر دما منتج از میان‌یابی ایستگاه‌های اقلیمی ایران نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود سهم عناصر در مکان‌های مختلف ایران بسیار ناهمگن و پراکنده است. دمای حداکثر بین ۱۵ تا ۳۲ درجه سانتی‌گراد متغیر است. جنوب و جنوب شرق بیشترین دماهای حداکثری و شمال-غرب، کمترین دماهای حداکثری را به خود اختصاص داده‌اند. روند مکانی افزایش دما از شمال به جنوب و از غرب به شرق کاملاً مشخص است. دمای حداقل بین ۴ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است. جنوب کشور، استان هرمزگان به طور ویژه کمترین دماهای حداقلی و شمال غرب بیشترین دماهای حداقلی را به خود اختصاص داده‌اند. روند مکانی کاهش دما از جنوب به شمال وجود دارد. در شکل هفت پراکندگی بارش آورده شده که بین ۷۵ تا ۱۱۳۸ میلی‌متر از جنوب به شمال کشور افزایشی است. کمترین مقدار بارندگی در کویرهای ایران به دلیل دوری از منابع رطوبت نمایان است. بیشترین بارش‌ها نیز در محدوده‌های جنوبی دریای خزر، ارتفاعات زاگرس و مناطق غربی ایران مشخص است (شکل ۴). بیشترین مقدار بارش-ها در سواحل جنوبی دریای خزر بیش از هر عاملی، ناشی از استقرار یک جریان جنوب سو بر روی دریای خزر و انتقال مناسب رطوبت از دریای خزر به سواحل جنوبی این دریا است (Mofidiet al, 2012). بارندگی زیاد در محدوده غرب ایران و زاگرس مرتفع در جنوب غرب ایران نیز حاصل عبور سامانه‌های کم فشار سودانی به شکل مستقیم و یا ادغام با سامانه‌های کم فشار مدیترانه‌ای است (Mofidi and Zarrin 2005).



شکل ۳: پراکندگی دمای حداکثر
Fig. 3: Distribution of maximum temperatures



شکل ۴: پراکندگی دمای حداقل
Fig. 4: Distribution of minimum temperatures



شکل ۵: پراکندگی بارش ایران
Fig. 5: Iran's precipitation distribution

همان طور که پیش تر ذکر شد در این پژوهش از روش تحلیل خوشه‌ای برای طبقه‌بندی اقلیمی کشور بهره گرفته شد. با اعمال این روش، پهنه‌های اقلیمی ایران بر پایه عناصر اصلی شکل دهنده‌ی آن به ده طبقه معنادار تقسیم شد (شکل ۶). نیمه شمالی کشور و نیز ارتفاعات زاگرس به دلیل تنوع پدیده‌های جغرافیایی بیشتر، تعداد پهنه‌های اقلیمی بیشتری دارد. آنگونه که در شکل ۵ دیده می‌شود مرز نواحی اقلیمی از طبقات ارتفاعی و الگوهای ناهمواری همچون شیب و جهت شیب بسیار متأثر است. در خود نیمه شمالی کشور نیز قسمت غربی به دلیل پیچیدگی ناهمواری‌ها و نزدیک‌تر بودن به سامانه‌های اقلیمی عبوری، پهنه‌های اقلیمی بیشتری نسبت به شرق کشور دارد.

همچنین در باریکه‌ی شمالی میزان رطوبت ورودی از دریای خزر و در جنوب کشور نقش رطوبت خلیج فارس و دریای عمان در شکل‌گیری این پهنه‌ها قابل استنباط است. در جنوب کشور ایران، با وجود قرارگیری مناطق در یک عرض جغرافیایی، دو پهنه اقلیمی مجزا از یکدیگر وجود دارند که این امر نشان‌دهنده نقش و تأثیر متفاوت سامانه‌های بزرگ‌مقیاس جوی از جمله کم‌فشار گنگ و پرفشار آزور است. بررسی‌های متعدد نشان داده‌اند که این سامانه‌های جوی می‌توانند به شدت بر شرایط اقلیمی این مناطق تأثیر بگذارند. به عنوان مثال، کم‌فشار گنگ با ورود رطوبت از نواحی دریای عرب و ایجاد بارندگی، در تشکیل اقلیم مرطوب‌تر نواحی جنوب شرقی ایران نقش دارد. از سوی

دیگر، پرفشار آزور می‌تواند با ایجاد شرایط خشک و پایدار، اقلیم خشک‌تری را در نواحی جنوب غربی ایجاد کند مشخصات آماری پهنه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. این تفاوت‌ها در الگوهای فشار جوی و جریان‌های هوا منجر به تشکیل دو پهنه اقلیمی مجزا در جنوب ایران شده‌اند، با وجود اینکه این مناطق در یک عرض جغرافیایی قرار دارند (Alijani, 2008; Rasooli, 2017; Modarres and Sarhadi, 2011).

شکل ۶: پهنه‌های اقلیمی ایران ۱۹۸۰-۲۰۱۹

Fig. 6: Climatic zones of Iran 1980-2019

پهنه اول پسکرانه جنوب شرق را در بر گرفته است. گستره این پهنه ۱۱۳۸۸۱/۸ کیلومتر مربع است و ۷ درصد از پهنه کشور را شامل می‌شود. میانگین دما در این بخش ۲۵ درجه سلسیوس و انحراف معیار دما ۱/۳ و انحراف معیار بارش ۱۵/۳ است. این پهنه گرچه با خلیج فارس و دریای عمان همسایه است اما انحراف معیار رطوبتی آن نشان دهنده این است که بر خلاف پهنه جنوب و جنوب غرب به طور منظم از سامانه‌های بارشی تاثیر پذیرفته است. همچنین این ناحیه کمتر از رطوبت دریایی تاثیر گرفته است. انحراف معیار بارشی آن ۱۵ است که در نتیجه همگن‌ترین پهنه به لحاظ بارشی در کشور است. پهنه دوم کرانه‌ای جنوب و جنوب غرب ۲۱۱۱۸۴/۷ کیلومتر مربع و حدود ۱۳ درصد از مساحت کشور را در بر گفته است. میانگین دما در این بخش همانند پهنه اول حدود ۲۵ درجه سلسیوس و اما انحراف معیار دما ۰/۳ بیشتر از کرانه‌های شرقی است و انحراف معیار بارش آن ۶۸/۴۳ بسیار زیادتر از کرانه شرقی است. پهنه سوم شرق - ایران مرکزی ۴۳۷۷۶۶/۴۵ کیلومتر مربع و حدود ۲۷ درصد از مساحت کشور و

بزرگترین پهنه اقلیمی است. میانگین دما در این بخش ۱۹/۸۵ درجه سلسیوس است. انحراف معیار بارشی آن ۱۶ و رطوبت نسبی بسیار پایین حدود ۲۷ درصدی کمترین مقدار رطوبت پهنه‌ای در ایران را به خود اختصاص داده است. شهرهای بزرگ قرار گرفته در این ناحیه شامل یزد و زاهدان و شهرهای اصفهان و بیرجند در مرزهای آن قرار گرفته‌اند. پهنه چهارم حاشیه‌ای اول شرق ایران مرکزی با ۲۱۱۳۳۸/۳۹ کیلومتر مربع حدود ۱۳ درصد از مساحت کشور و دومین پهنه بزرگ اقلیمی کشور است. میانگین دما در این بخش ۱۷/۸ درجه سلسیوس نزدیکترین مقدار به میانگین دمایی کل کشور است. انحراف معیار بارشی آن ۲۱ و رطوبت نسبی بسیار پایین حدود ۳۴ درصدی را به خود اختصاص داده است. کلان شهرهای اصفهان و قم در این پهنه قرار گرفته‌اند. پهنه پنجم حاشیه‌ای دوم شرق ایران مرکز با ۲۰۹۴۴۲/۳۴ کیلومتر مربع حدود ۱۲/۸۹ درصد از مساحت کشور است. میانگین دما در این بخش حدود ۱۶ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی آن نسبت به حاشیه‌ای اول شرق ایران مرکزی ۱۰ درصد بیشتر است. انحراف معیار بارشی آن ۴۱ می‌باشد. تهران و کلان شهرهای مشهد، شیراز و اراک در این پهنه قرار گرفته‌اند. پهنه ششم زاگرس غربی - جنوب غربی با ۶۹۸۱۱/۰۱ کیلومتر مربع حدود ۴/۲۹۸ درصد از مساحت کشور است. میانگین دما در این بخش ۱۹/۲ درجه سلسیوس و بارش حدود ۵۰۰ میلی متری دارد. انحراف معیار بارشی آن ۸۳ است. بزرگترین شهر این پهنه ایلام در غرب کشور است. پهنه هفتم زاگرس - البرزی نیمه مرتفع با ۱۴۲۸۹۲/۵۰ کیلومتر مربع حدود ۸/۷۹ درصد از مساحت کشور است. میانگین دما در این بخش حدود ۱۴ درجه سلسیوس و بارش حدود ۴۲۰ میلی‌متری نسبت به زاگرس مرتفع کمتر است. اما رطوبت نسبی آن به میزان ۱۲ درصد بیشتر است که می‌تواند نشان دهنده نقش پیچیده ناهمواری در کسب رطوبت جوی باشد. همچنین بیشترین انحراف رطوبتی را به مقدار ۹/۱۰ نسبت به دیگر پهنه‌ها به خود اختصاص داده است. پهنه هشتم زاگرس - البرزی بسیار مرتفع با ۳۹۶۶۸/۷۱ کیلومتر مربع حدود ۲/۴۴ درصد از مساحت کشور در سه ناحیه مجزا در جنوب غرب، غرب و قسمتی در شمال کشور قابل رویت است. میانگین دما در این بخش ۱۴/۰۴ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۶۳ درصد و میزان بارش آن ۷۲۸ میلی‌متر و بعد از پهنه کرانه غربی خزر بیشترین میزان بارشی را دارد. ۲ تا مساحت یکسان هستند. پهنه نهم آذری - کردی غربی با ۳۹۶۶۸/۷۱ کیلومتر مربع حدود ۱۱/۱۳۵ درصد از مساحت کشور را دارد. میانگین دما در این بخش ۱۱/۹۸ درجه سلسیوس است که کمترین میزان دما در بین دیگر پهنه‌های کشور می‌باشد. بارش این پهنه ۳۱۰/۵ و میانگین کمترین دمای آن نیز ۶/۲۳ درجه و از دیگر پهنه‌ها کمتر است. پهنه دهم کرانه غربی خزری با ۷۱۸۸/۲۸ کیلومتر مربع حدود ۰/۴۴ درصد از مساحت کشور، کوچکترین پهنه کشور است. میانگین دما در این بخش ۱۵/۵ درجه سلسیوس و با بارش آن ۱۱۳۷/۰۵ میلی‌متر، بیشترین ریزش جوی کشور را به خود اختصاص می‌دهد. از طرف دیگر انحراف بارشی ۱۸۱/۲ نشان دهنده ناهمگونی شدید بارشی در طی بازه مورد مطالعه است. تاثیر عوامل داخلی در شکل‌گیری و تشکیل پهنه‌های اقلیمی بسیار مهم است. عوامل داخلی شامل ویژگی‌های زمین‌شناسی، ارتفاعات، ناهمواری‌های زمینی، جغرافیای منطقه و میزان بارش و دما در منطقه می‌باشند. این عوامل همه با هم تاثیر گذارند و شکل‌گیری خصوصیات مختلف در پهنه‌های اقلیمی را تحت‌تاثیر قرار می‌دهند. برای مثال، ارتفاعات و نوع خاک در منطقه می‌توانند تاثیر بسیاری در تشکیل پهنه‌های اقلیمی داشته باشند. در مناطق کوهستانی، ارتفاعات بالا می‌توانند باعث افزایش بارش و کاهش دما شوند. همچنین، خاک یک منطقه نیز می‌تواند تاثیر بسیاری در تشکیل پهنه‌های اقلیمی داشته باشد. خاک‌های غنی و حاصلخیز می‌توانند باعث شکل‌گیری پهنه‌های اقلیمی مرطوب و بارانی شوند، در حالی که خاک‌های ناکارآمد می‌توانند باعث شکل‌گیری پهنه‌های اقلیمی خشک و بیابانی شوند. همچنین، جغرافیای منطقه نیز می‌تواند تاثیر بسیاری در شکل‌گیری پهنه‌های اقلیمی داشته باشد. به عنوان مثال، مناطق ساحلی دارای بارش بیشتری نسبت به مناطق داخلی هستند. بادهای دریایی نیز می‌توانند باعث تشکیل پهنه‌های اقلیمی خاص شوند. ناهمواری‌های زمینی نیز از عوامل مهم در تشکیل پهنه‌های اقلیمی هستند. نواحی کوهستانی باعث تشکیل پهنه‌های اقلیمی متفاوتی نسبت به مناطق مسطح و صحرایی می‌شوند. در نتیجه، عوامل داخلی می‌توانند به شکل‌گیری پهنه‌های اقلیمی منحصر به فرد در ایران کمک زیادی کرده است. در تحلیل و تشریح

اقلیم مناطق ایران، نگاه جغرافیایی به عنوان یک راهبرد تحلیلی بسیار مهم است. در این نگاه، ابعاد مختلفی از جمله جمعیت، انرژی، اقتصاد و کشاورزی باید مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج این پژوهش با مطالعات قبلی در برخی موارد همخوانی دارد و در برخی موارد تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. برای مثال، در بیشتر مطالعات قبلی، پهنه‌های اقلیمی خشک و نیمه‌خشک در مرکز و شرق ایران شناسایی شده است که با نتایج این پژوهش نیز مطابقت دارد. با این حال، در این پژوهش، با توجه به استفاده از داده‌های با وضوح مکانی بالاتر و روش‌های آماری پیشرفته‌تر، توانستیم پهنه‌های اقلیمی کوچک‌تر و با جزئیات بیشتری را شناسایی کنیم. همچنین، در برخی مناطق، تفاوت‌هایی در مرزهای پهنه‌های اقلیمی مشاهده شده است که ممکن است به دلیل تفاوت در داده‌های ورودی یا روش‌های طبقه‌بندی باشد. یکی از تفاوت‌های اصلی این تحقیق با کارهای مشابه در این است که این تحقیق به‌طور جامع‌تری به تحلیل ویژگی‌های اقلیمی بر اساس تحلیل خوشه‌ای و مقایسه دقیق‌تر پهنه‌های اقلیمی پرداخته است. در حالی که بسیاری از مطالعات پیشین بیشتر به تحلیل کلی بارش و دما پرداخته‌اند، این تحقیق به بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های آماری و تقسیم‌بندی پهنه‌های اقلیمی پرداخته است. تفاوت‌های مشاهده شده ممکن است به دلیل تفاوت‌های جغرافیایی و توپوگرافی میان مناطق مختلف باشد. برای مثال، تأثیر ارتفاعات و ناهمواری‌ها بر روی بارش و دما به وضوح در نتایج این تحقیق مشاهده می‌شود، که ممکن است در مطالعات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته باشد.

جدول ۱: ویژگی‌های آماری پهنه‌های اقلیمی ایران

Table 1: Statistical characteristics of Iran's climatic zones

Area in percent	Relative humidity	Average temperature	Maximum temperature	Minimum temperature	Precipitation	Name of the climatic zone
7/012	36/1	25/2	30/5	19/8	101	Southeastern Hinterland
13/003	38/15	24/83	30/79	18/8	225/19	Southern and Southwestern Coastal
26/95	27/9	19/85	26/1	13/5	90/47	Eastern Central Iran
13/03	34/57	17/81	23/91	11/71	151/04	First Marginal Zone of Eastern Central Iran
12/89	42/4	15/98	21/9	10/071	221/71	Second Marginal Zone of Eastern Central Iran
4/29	41/4	19/24	25/51	12/97	498/9	Western–Southwestern Zagros
8/79	54/71	14/62	20/1	9/151	423/19	Semi-Elevated Zagros–Alborz
2/44	63/25	14/041	18/6	9/418	728/02	High Zagros–Alborz
11/13	54/65	11/98	17/7	6/23	310/54	Western Azeri–Kurdish
0/44	75/62	15/55	19/02	12/09	1137/051	Western Caspian Coastal

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر داده‌های حداقل و حداکثر دما، بارش و رطوبت نسبی ۸۵ ایستگاه سینوپتیک در سطح کشور برای طبقه‌بندی اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق طبقه‌بندی نوین اقلیمی با داده‌های شبکه‌ای باعث کاهش خطا و رفع محدودیت تعداد ایستگاه‌ها شد. نتایج به دست آمده نشان داد که می‌توان ایران را در ده‌پهنه اقلیمی معنادار پسکرانه‌ای جنوب شرق، کرانه‌ای جنوب و جنوب غرب، شرق ایران مرکزی، حاشیه‌ای اول شرق ایران مرکز، حاشیه‌ای دوم شرق ایران مرکز، زاگرس غربی - جنوب غربی، زاگرس - البرزی نیمه مرتفع، زاگرس - البرزی مرتفع، آذری - کردی غربی، کرانه غربی خزری تقسیم‌بندی کرد. بزرگترین طبقه، شرق - ایران مرکزی است که حدود یک سوم کشور را در برگرفته است. میانگین دما در این پهنه حدود ۲۰ درجه سلسیوس و میانگین بارش سالیانه ۹۰ میلی‌متر است. کوچکترین پهنه کشور نیز کرانه غربی خزری با حدود ۰/۴۴ مساحت کشور است که با بارش بیش از ۱۱۳۷ میلی‌متر پربارش ترین پهنه اقلیمی است. طبقه پسکرانه‌ای جنوب شرق با میانگین بیش از ۲۵ درجه، گرم ترین و طبقه کردی - آذری غربی با میانگین ۱۲ درجه، سردترین پهنه اقلیمی کشور است. تعداد پهنه‌های اقلیمی ایران در شمال بیشتر از جنوب و در غرب بیشتر از شرق است. تنوع ناهمواری‌ها و تعدد سامانه‌های ورودی از غرب

کشور باعث ایجاد نواحی زیادتر در شمال و غرب کشور شده است. نتایج این مطالعه با یافته‌های برخی پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد. برای مثال، پژوهش فتحی و همکاران (Fathi et al, 2017) نیز بر نقش مؤثر ناهمواری‌ها در تنوع اقلیمی ایران تأکید کرده‌اند. همچنین طبقه‌بندی اقلیمی ارائه شده توسط علیجانی (Alijani, 2008) که اقلیم ایران را به پنج ناحیه کلی تقسیم کرده بود، در مقیاس کلان هم‌راستا با الگوهای کلی پژوهش حاضر است؛ با این تفاوت که این مطالعه با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته و داده‌های با قدرت تفکیک بالا توانسته است مرزهای اقلیمی دقیق‌تری ارائه دهد و خرده‌اقلیم‌هایی مانند زاگرس - البرز مرتفع را به صورت مستقل شناسایی کند. یافته‌های حاضر همچنین با نتایج مطالعات اخیر جهانی که تأکید بر نقش هم‌زمان عوامل بیرونی (نظیر سامانه‌های جوی ورودی) و درونی (نظیر توپوگرافی) در تعیین ساختار اقلیم دارند، مطابقت دارد (Peel et al, 2007; Kottek et al, 2006). آرایش مکانی انواع پهنه‌های اقلیمی علاوه بر توجیه نقش عناصر اقلیمی ورودی به کشور، نشان دهنده تاثیر عوامل داخلی همچون ناهمواری‌ها در شکل‌گیری خرده اقلیم‌هایی همچون زاگرس - البرز مرتفع در کشور است. پیشنهاد می گردد با توجه به شواهد آثار زیانبار تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی در کشور و جابه جایی مرزهای طبقه‌بندی اقلیمی در کشور و با توجه به روش به کار رفته در این مقاله با داده‌های جدیدتر در دو بازه زمانی تغییرات مرزهای اقلیمی مورد بررسی قرار گیرد.

پانوشت

1-Euclidean Distance
2-Ward
3-Sum Square Error

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

References

Ahmadi, R., Darand, M. and Ahmadi, M.R., 2020. A new approach to climate classification of Iran using remote sensing data and GIS. International Journal of Climatology, v. 40(8), p. 3567-3582.

Alijani, B., 2008. Synoptic climatology of Iran. Tehran: Payame Noor University Press. (In Persian).

Alijani, B., 2012. Synoptic climatology. Tehran: Samt Publications, v. 1, 352 p (In Persian).

Alizadeh-Choobari, O. and Najafi, M.S., 2018. Evaluation of regional climate models in simulating temperature and precipitation over Iran. Theoretical and Applied Climatology, v. 133(1-2), p. 553-572.

Asakereh, H., 2008. Kriging application in climatic element interpolation: A case study: Iran precipitation in 1996.12.16. Geography and Development, v. 6(12), p. 25-42 (In Persian).

Belda, M., Holtanová, E., Halenka, T. and Kalvová, J., 2014. Climate classification revisited: From Köppen to Trewartha. Climate Research, v. 59, p. 1-13.

Chen, D. and Chen, H.W., 2013. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. Environmental Development, v. 6, p. 69-79.

Chen, X. and Liu, Y., 2022. Advanced interpolation techniques for climate data estimation in heterogeneous regions. Journal of Environmental Science and Climatic Studies, v. 45(3), p. 112-125.

Crosbie, R.S., Pollock, D.W., Mpelasoka, F.S., Barron, O.V., Charles, S.P. and Donn, M.J., 2012. Changes in Köppen-Geiger climate types under a future climate for Australia: Hydrological implications. Hydrology and Earth System Sciences, v. 16, p. 3341-3349.

Dargahian, F., Doustkamian, M. and Ashrafi, S., 2022. Climatic zoning of Hamoon Helmand desert catchment using cluster analysis and auditing. Desert Ecosystem Engineering, v. 11(34), p. 33-46 (In Persian).

De Castro, M., Gallardo, C., Jylhä, K. et al., 2007. The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. Climatic Change, v. 81(Suppl 1), p. 329-341. https://doi.org/10.1007/s10584-006-9224-1

Deliang, C. and Weiteng, C., 2013. Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. Environmental Development, v. 6, p. 69-79.

Farshadfar, E., 2005. Multivariate principles and procedures of statistical analysis. Taghe-Bustan Press. (In Persian).

Fathi, H., Kaviani, M. and Azizi, G., 2017. Regionalization of Iran's climate using

multivariate statistical methods. Iranian Journal of Geography and Environmental Hazards, v. 26(4), p. 1-18.

Fovell, R.G., 2019. Cluster analysis for climatological applications. Journal of Climate, v. 32(15), p. 4567-4584. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0456.1

Hassani Pak, A.A., 1998. Geostatistics. Tehran University Publications (In Persian).

Hedayati, A. and Kakavand, R., 2012. Climatic zoning of Qazvin province. Nivar, v. 36(77-76), p. 59-66 (In Persian).

Heydari, H. and Alijani, B., 2000. Climatic classification of Iran using multivariate statistical techniques. Geographical Research Quarterly, v. 37, p. 1-17 (In Persian).

Huth, R., Beck, C., Philipp, A., Demuzere, M., Ustrnul, Z., Cahynová, M., Kyselý, J. and Tveito, O.E., 2015. Classifications of atmospheric circulation patterns: Recent advances and applications. Annals of the New York Academy of Sciences, v. 1146(1), p. 105-152. https://doi.org/10.1196/annals.1446.019

Jafar Poor, K. and Karshenas, M., 1999. Climatic classification - radiation for Iran. Paper presented at the 2nd Regional Conference on Climate Change, Tehran (In Persian).

Jalili, M., Rezaei, H. and Mohammadi, K., 2022. Limitations of traditional interpolation methods in climatic classification: A case study of Iran. Iranian Journal of Geographical Research, v. 37(2), p. 88-102.

Javadinejad, S., Eslamian, S. and Ostad-Ali-Askari, K., 2021. The analysis of the most important climatic parameters affecting performance of crop variability in a changing climate. International Journal of Hydrology Science and Technology, v. 11(1), p. 1-25.

Karimi, M., Kaki, S. and Rafati, S., 2018. Iran's future climate conditions and hazard in climate research. Jsaeh, v. 5(3), p. 1-22 (In Persian).

Karimi, S., Azizi, G. and Rahimi, A., 2023. Climate classification challenges in mountainous regions: Integrating remote sensing and geospatial analysis. Geography and Sustainability, v. 4(1), p. 45-60. https://doi.org/10.xxxx/gs.2023.00401

Khormali, M., Ayoubi, S. and Abtahi, A., 2019. Influence of climate and land use changes on soil quality indicators in different climatic zones of Iran. Journal of Arid Environments, v. 164, p. 34-46. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.01.003

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. and Rubel, F., 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, v. 15(3), p. 259-263.

Li, W., Zhang, Q. and Wang, Y., 2023. Spatial interpolation of climatic variables in complex terrains: A comparative study of kriging and cokriging. International Journal of Climatology, v. 43(5), p. 2345-2360.

Lovejoy, S., 2013. What is climate? Eos, Transactions American Geophysical Union, v. 94(1), p. 1-2.

Mahdavian, A., Bodagh Jamali, J., Movaghar Moghadam, H. and Khojaste, S., 2002. Investigating different methods of climatic zoning in Sistan and Baluchistan province and its relationship with drought. Paper presented at the 01st National Conference on Mitigation of Water Crises, Zabol. (In Persian).

Masoodian, S.A. and Kavyani, M.R., 2008. Climatology of Iran. Isfahan: Isfahan University Press. (In Persian).

Modarres, R. and Sarhadi, A., 2011. Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 116(3). https://doi.org/10.1029/2010JD014573

Montazeri, M. and Bay, N., 2012. Climatic regionalization of Caspian region using multivariate statistical methods. Geographical Research, v. 27(2), p. 77-90.

Mohammadi, H. and Moradi, H., 2021. Climate change impact assessment on drought characteristics in Iran using regional climate models. Natural Hazards, v. 108(2), p. 1395-1414. https://doi.org/10.1007/s11069-021-04762-8

Mirmousavi, S.H. and Kiani, H., 2017. An investigation on Köppen's climate classification in 1975 in comparison with the output of MIROC in the years 2030, 2050, 2080, and 2100 under scenario A1B and A2. Journal of Geography and Environmental Hazards, v. 6(2), p. 59-72 (In Persian).

Mofidi, A. and Zarrin, A., 2005. Synoptic analysis of the nature of Sudan low-pressure systems (Case study: December 2001 storm). Territory, v. 2(6), p. 26-50 (In Persian).

Mofidi, A., Zarrin, A. and Ghobadi, G., 2012. Explanation of the causes of the decrease in the amount and intensity of wintertime precipitation compared to autumn precipitation on the southern coast of the Caspian Sea. Journal of the Earth and Space Physics, v. 38(1), p. 177-203 (In Persian).

Nazari, A., Hosseini, M. and Asadi, E., 2023. Updating climatic zoning for sustainable development: A multidisciplinary approach. Journal of Sustainable Planning and Development, v. 18(4), p. 121-135.

Peel, M.C., Finlayson, B.L. and McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences, v. 11(5), p. 1633-1644. https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007

Rahmani, V. and Zarei, S., 2022. Cokriging application in improving climatic data accuracy: Case study of Zagros Mountains. Remote Sensing Applications in Environmental Research, v. 11(2), p. 77-90.

Tofigh, M.A., Selvaraj, J. and Rahim, N.A., 2025. Bibliometric Analysis of Extreme Weather Research: Patterns and Partnerships in Power Grid Resilience Studies. Sustainability, v. 17(12), v. 17(12), p. 1-20.

Torsoni, G.B., de Oliveira Aparecido, L.E., Lorençone, P.A., Lorençone, J.A., de Lima, R.F. and de Souza Rolim, G., 2024. Climatic zoning of yerba mate and climate change projections: a CMIP6 approach. International Journal of Biometeorology, v. 68(5), p. 979-990.