



General Characteristics of the Lightning Phenomenon in Iran

Hamzeh Alizadeh ^{1*}, Hossein Asakareh ², Kohzad Raispour³

¹ Ph.D. Candidate, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran

² Professor, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran

³ Assistant Professor, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 28 August 2024

Revised: 11 July 2025

Accepted: 12 July 2025

Available Online: 25 July 2025

Keywords:

Lightning

Thunderstorm

Spatial Distribution

Geostatistics

Altitude / Topography

ABSTRACT

Lightning is a prominent atmospheric phenomenon, characterized by the transfer and discharge of electricity between clouds and the Earth's surface. This process poses significant risks to both human safety and the environment, thereby necessitating a detailed investigation of its climatological features. In addition to the electrical transfer, lightning is also accompanied by intense sound and light. Cloud formation typically begins at altitudes above the condensation level, where water droplets form below the zero-degree isotherm, and ice crystals develop above it. As these water droplets and ice crystals grow, they descend at an approximate rate of 8 meters per second. If the downward velocity of the particles is slower than the upward movement of the cloud, the droplets and crystals are subjected to continuous updrafts and downdrafts, resulting in repeated collisions. This process leads to the accumulation of larger particles and the separation of electrical charges, with negative charges concentrating at the base of the cloud and positive charges accumulating at the top. This study examines the statistical and geostatistical characteristics of lightning frequency across Iran from 2000 to 2022, using data from 382 synoptic stations. Descriptive statistics, including the mean and coefficient of variation, were computed for lightning events, and their correlations with geographic variables such as latitude, longitude, and altitude were assessed. Regression analysis was employed to model these relationships. The results reveal that the spatial distribution of lightning frequency in Iran follows a stochastic pattern, exhibiting significant annual variability. Among the spatial variables analyzed, latitude and longitude showed a stronger correlation with annual lightning frequency than altitude.

* Corresponding author: Hamzeh Alizadeh

E-mail address: hamzeh.alizadeh72@gmail.com

How to cite this article: Alizadeh, H., Asakareh, H., & Raispour, K. (2025). General Characteristics of the Lightning Phenomenon in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 140-165. <https://doi.org/10.22067/geoh.2025.89265.1508>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Lightning is a natural phenomenon that can be hazardous, claiming the lives of over two thousand people globally each year. It occurs predominantly in regions with variable climates and involves the transfer and discharge of electricity between clouds and the Earth's surface. This phenomenon has far-reaching consequences for both the environment and human society. For instance, lightning can ignite fires, cause financial losses, and result in fatalities when it strikes tall structures such as trees and buildings. It ranks second among atmospheric hazards in terms of mortality.

The occurrence of lightning on Earth is closely linked to climatic conditions, particularly temporal and spatial variations in solar radiation. The highest global frequency of lightning is found in the tropical regions of the Americas, Africa, and the oceans. Approximately 78% of lightning events occur between latitudes 30°S and 30°N. Satellite data indicates that lightning frequency is generally higher in tropical and humid climates. In coastal areas, lightning events account for about 70% of all oceanic lightning occurrences, with a higher frequency observed on the eastern coasts of continents compared to the western coasts. Consequently, the spatial distribution of lightning demonstrates considerable variability.

Lightning frequency tends to peak in the morning and afternoon, with a notable reduction during nighttime hours. Seasonal patterns also influence lightning occurrences, with the highest frequency generally observed in July. Studies conducted in Iran have identified diverse temporal and spatial patterns of lightning, with the highest frequency recorded in the northern regions of Khuzestan Province and the southern regions of Lorestan Province. In contrast, the central and flat interior areas exhibit lower lightning frequencies.

Material and Methods

Study Area

The study area encompasses mainland Iran, which spans an area of approximately 1,648,195 km², within the following geographic coordinates:

$N : 24^{\circ} 40' - 39^{\circ} 46'$

$E : 44^{\circ} 00' - 63^{\circ} 19'$

Data

Lightning frequency data from 2000 to 2022 were collected from 411 active synoptic stations across Iran. After reviewing the dataset, stations with insufficient records were excluded, leaving 382 stations with reliable data for analysis (Figure 1). Daily lightning event records were obtained from the Iranian Meteorological Organization (IRIMO) website (<https://data.irimo.ir/withoutlogin/index.aspx>).

An examination of station altitudinal distribution (Table 1) revealed that around 56% of stations (212) were located between 500 and 2000 meters, while only about 3% were situated in low-lying areas (-22 to 0 meters). The number of stations decreased at higher altitudes, with only one station located above 3000 meters.

This study investigates the long-term (climatic) frequency of lightning and its relationship with geographic coordinates (longitude, latitude) and altitude. Descriptive statistics, including the annual mean and coefficient of variation, were computed to characterize lightning events, and their spatial distribution was mapped.

Results and Discussion

General Characteristics

The highest frequency of lightning was observed in northwestern Iran. Precipitation in this region is primarily driven by convective activity, orographic uplift, and local fronts. Additionally, temperature and pressure contrasts induced by topography contribute to the frequency of lightning events.

In southern Iran, which has a hot and humid climate, the annual lightning frequency was found to be similar to that in the western regions. Stations in northern regions also recorded relatively high frequencies, consistent with their temperate and humid climate, which is conducive to lightning activity. The mean coefficient of variation across stations was approximately 25.5%. A value below 25.5 indicates relatively stable lightning occurrence, while higher values suggest more irregular patterns and strong year-to-year variability.

Probability Analysis

The highest probability of lightning occurrence was observed in the high and mountainous regions of the Zagros and Alborz mountain ranges. Factors contributing to this include the mountainous terrain, the frequent passage of air masses, and the uneven distribution of solar radiation on slopes, which promote atmospheric instability and convection.

The western half of Iran, especially the northwest, lies along the path of various air masses (including westerlies, Mediterranean cyclones, and associated short waves) during the cold season, creating favorable conditions for thunderstorms. The northern regions also experience significant lightning activity due to the moisture from the Caspian Sea, considerable elevations, and the combined effects of migratory westerly systems and Siberian high-pressure systems. In addition to these regions, scattered areas across the country experience occasional lightning events.

Conclusion

Lightning is a natural phenomenon that occurs worldwide, especially in regions with variable climates such as Iran. Analyzing data from 2000–2022 reveals that geographic coordinates and elevation have a minimal linear effect on the distribution and frequency of lightning events. The coefficient of variation maps highlight irregular lightning occurrences and significant annual variations across the country.

Correlation analysis indicates weak linear relationships between geographic factors and lightning frequency. Latitude exhibits a slight positive correlation with lightning activity in the northern regions, while longitude shows a moderate negative correlation, with lightning frequency decreasing eastward. Overall, lightning in Iran follows a stochastic pattern, with no strong linear spatial association with geographic coordinates or altitude.

Satellite-based monitoring, such as the Lightning Imaging Sensor (LIS) on the TRMM satellite, offers near-real-time and accurate coverage, complementing station-based measurements. Future studies should incorporate satellite data to more effectively capture the temporal and spatial distribution of lightning, thereby providing a comprehensive understanding of this phenomenon across Iran's diverse climatic regions.

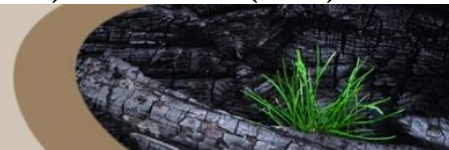


دسترسی آزاد

نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی

DOI: 10.22067/GEOEH.2025.89265.1508

مقاله پژوهشی



مشخصات عمومی پدیده رعدوبرق در ایران

حمزه علی زاده^{۱*}، حسین عساکره^۲، کوهزاد رئیس پور^۳^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران^۲ استاد اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران^۳ استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱	چکیده: رعدوبرق، به عنوان یکی از پدیده های مهم جوی - طبیعی، با انتقال الکتریسته و تخلیه برق بین ابرها و زمین می تواند توأم با اثرات مثبت (نظیر تاثیر بر فرایندهای زیستی) و منفی (نظیر مخاطراتی برای انسان و محیط زیست) باشد. بنابراین، شناخت عمیق از ویژگی های اقلیم شناختی این پدیده از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، جنبه هایی از این ویژگی ها شامل فراوانی رویدادهای رعدوبرق سالانه بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در ۳۸۲ ایستگاه همدیدی ایران جمع آوری و تحلیل شد. با استفاده از این داده ها، برخی ویژگی های توصیفی (نظیر میانگین و ضریب تغییرات) فراوانی رخداد رعدوبرق و نیز ارتباط (همبستگی) آن با مختصات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی) و ارتفاع، محاسبه، برآورد و بررسی شد. برای الگوسازی این روابط از روش های رگرسیونی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که توزیع مکانی فراوانی رخداد رعدوبرق در ایران فرایندی بی نظم و با تغییرات سال به سال شدید است. از میان متغیرهای مکانی (مختصات جغرافیایی و ارتفاع)، طول و عرض جغرافیایی رابطه نسبتاً قوی تری را با فراوانی سالانه رخداد رعدوبرق ایران نشان می دهند. مناطق مختلف ایران، احتمال وقوع رعدوبرق متفاوتی دارند که با عواملی همچون جغرافیا و شرایط آب و هوایی مرتبط است. مناطقی مانند شمال غرب و جنوب شرق ایران بیشترین میزان وقوع را دارند، در حالی که مناطق دیگر در اولویتهای بعدی قرار می گیرند.
کلمات کلیدی: رعدوبرق طوفان تندی توزیع مکانی زمین آمار ارتفاع/ توپوگرافی	

مقدمه

پدیده رعدوبرق یکی از پدیده‌های طبیعی، بعضاً توأم با مخاطره است که در سطح جهان سالانه جان بیش از دو هزار نفر را گرفته و به ویژه در مناطق با اقلیم متغیر رخ می‌دهد. کلینیک و برینگر (Kilinc & Beringer, 2007)، این پدیده همراه با انتقال و تخلیه الکتریسته بین ابرها و زمین، پیامدهای متعددی دارد (Adhikari, 2023). در فرایند تشکیل ابر و حرکات قائم همراه با آن اولاً قطرات و بلورها درشت‌تر می‌شوند و ثانیاً دو قطب الکتریکی منفی (در قطرات و بلورهای پایین ابر) و مثبت (در قطرات و بلورهای ریز بالای ابر)، ایجاد و به رعدوبرق منجر می‌شود (Kaviani & Alijani, 2004).

این پدیده دارای اثرات مختلفی بر محیط زیست و انسان‌ها است. به‌عنوان مثال، رعدوبرق در برخورد با اشیاء بلند، مانند درختان و ساختمان‌ها می‌تواند آتش سوزی، خسارات مالی و جانی به همراه داشته باشد. این پدیده در میان مخاطرات جوی، دومین رتبه را به لحاظ میزان مرگ و میر دارد. رعدوبرق علاوه بر خطرات مستقیم، از راه‌های غیرمستقیم بر جامعه انسانی نیز تأثیر می‌گذارد. این پدیده یکی از عوامل اصلی تخریب درختان و جنگل‌ها است. از مجموع رعدوبرق‌هایی که در ترازهای بالای جو رخ می‌دهد، حدود ۲۰ درصد از آن‌ها به زمین می‌رسد و سالانه حدود ۲۴۰۰ کشته در سطح جهان به دنبال دارد و صدمات زیادی ایجاد می‌کند (Shindo, Matsubara, Suda & Miki, 2012).

رعدوبرق در کره زمین، با آب و هوای زمین، به ویژه تحت تأثیر تباین‌های زمانی - مکانی تابش رسیده از خورشید، رابطه مستقیم نشان داده است (Mofokeng, Adelabu, Adepoju & Adam, 2019). از این رو، این باور وجود دارد که فراوانی رخداد و فعالیت رعدوبرق تحت تأثیر عوامل مکانی (نظیر موقعیت جغرافیایی، ارتفاع و توپوگرافی) به طور همسان در کره زمین توزیع نشده است. عوامل مکانی (نظیر موقعیت جغرافیایی، ارتفاع و توپوگرافی) به طور همسان در کره زمین توزیع نشده است (Thomson, 1980; Rasuli, Khorshiddoust & Fakhari Vahed, 2018; Gao et al., 2022). علاوه بر این، گرمایش روزانه و فصلی سطح زمین نوسانات شدید دما را در پی دارد و در نهایت بر ناپایداری جوی و شکل‌گیری گسترش طوفان‌های توأم با رعدوبرق تأثیر می‌گذارد. از این رو گفته می‌شود که رخداد رعدوبرق در مقیاس‌های زمانی کوتاه با شرایط سطح زمین، از جمله دماهای سطحی نیز مرتبط است و از رویدادهای قابل تأمل در ارتباط با پیامدهای گرمایش جهانی است (Price, 2009). بدین دلیل شناخت روابط زمانی - مکانی رعدوبرق از مسائل پیش روی اقلیم‌شناسان به شمار می‌آید.

توزیع جهانی بیشینه رخداد رعدوبرق در سه ناحیه گرمسیری قاره آمریکا، آفریقا و اقیانوس‌ها است. حدود ۷۸ درصد از رخداد این پدیده بین ۳۰ درجه عرض جنوبی تا ۳۰ درجه عرض شمالی کره زمین رخ می‌دهد. تحلیل داده‌های ماهواره‌ای نشان می‌دهد در مناطق استوایی و مناطق با آب و هوای مرطوب‌تر معمولاً فراوانی رعدوبرق بیشتر است. رویداد رعدوبرق در مناطق ساحلی تقریباً ۷۰ درصد از کل رعدوبرق اقیانوس‌ها را به خود اختصاص داده و وقوع آن در سواحل شرقی قاره‌ها بیشتر از سواحل غربی رخ می‌دهد. بنابراین، توزیع مکانی رعدوبرق گویای تباین قابل توجه مکانی است. بیشینه رعدوبرق اغلب در صبح و بعد از ظهر و کمینه آن در شب اتفاق می‌افتد. محل رخداد رعدوبرق نیز تحت تأثیر فصول مختلف، متفاوت است. تغییرات ماهانه رعدوبرق نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت رعدوبرق در ماه جولای رخ می‌دهد. گودمن و همکاران (Goodman et al., 2013)، رافی و مصطفی (Rafi & Mostafa, 2022)، کاپلان و لو (Kaplan & Lau, 2021)، کاپلان و لو (Kaplan & Lau, 2022)، فیشر و همکاران (Fischer et al., 2024)، آنیزی و همکاران (Aniezi et al., 2024)، تاسارک و همکاران (Taszarek et al., 2019) نشان دادند که مناطق مدیترانه مرکزی، کوه‌های آلپ و شبه‌جزیره بالکان بیشترین فراوانی رعدوبرق را در اروپا به ویژه در ماه‌های ژوئیه و اوت دارند. همچنین، تعداد روزهای رعدوبرق در کوه‌های آلپ و شرق اروپا افزایش یافته، در حالی که در جنوب غربی کاهش یافته است. گائو و همکاران (Gao et al., 2022) ارتباط بین فراوانی انتقال رعدوبرق ابر به زمین را با عوامل توپوگرافی در استان یوننان چین بررسی کردند و دریافتند که توپوگرافی نقش مهمی در ویژگی‌های رعدوبرق منطقه‌ای ایفا می‌کند. رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2018) در مطالعه رابطه

رعدوبرق با ارتفاع از سطح دریا نشان دادند که فراوانی رعدوبرق در دامنه‌های جنوبی ناحیه شمال غرب ایران بیشتر است، به طوری که بیشینه فراوانی رعدوبرق در دامنه‌های جنوبی و در ارتفاع بین ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ متر قرار دارد.

مطالعات انجام شده در نواحی مختلف کشور نشان داد که پدیده رعدوبرق با الگوهای زمانی - مکانی متنوعی رخ می‌دهد. براساس بررسی‌های صورت گرفته توسط خورشید دوست و همکاران (Khorshiddoust, Rasouly & Fakhari Vahed, 2017) فراوانی رعدوبرق ایران در ماه‌های می و آوریل بیشینه و در ماه‌های ژانویه و سپتامبر کمینه بود. علاوه بر این، بیشینه فراوانی رعدوبرق بین ساعات ۱۲:۳۰ تا ۲۰:۳۰ و کمینه فراوانی بین ساعات ۳:۳۰ تا ۹:۳۰ مشاهده شد. همچنین مناطق شمال استان خوزستان و جنوب استان لرستان دارای بیشترین فراوانی رعدوبرق بوده و مناطق مرکزی و هموار داخلی کشور دارای کمترین فراوانی رعدوبرق بوده‌اند. رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2018) نیز نشان دادند که بیشینه فراوانی رعدوبرق در ماه‌های مارس تا آگوست مشاهده شده و تغییرات روزانه فعالیت‌های رعدوبرقی، در بازه زمانی ساعات ۱۳ تا ۱۶ (به وقت محلی) به صورت معنی‌داری افزایش می‌یابد. جوان و عزیززاده (Javan & Azizzade, 2018). با بررسی رعدوبرق شمال غرب ایران در ماه‌های آوریل، می، ژوئن و ژوئیه در ۱۹ ایستگاه همدید نشان دادند که احتمال وقوع رعدوبرق در بخش‌های مرکزی و شمال غربی این منطقه بیشتر است در حالی که در مناطق جنوبی و شمال شرقی کمتر است. در پژوهشی دیگری که توسط اسماعیلی محمودآبادی و صادقی (Esmaeili Mahmoudabadi & Sadeghi, 2023) در بازه زمانی یازده ساله (۲۰۱۶ - ۲۰۰۶) روی ایران انجام گرفت، نشان دادند که بیشینه رعدوبرق ایران عمدتاً در استان‌های شمال و شمال غرب و کمینه آن در بخش‌های مرکزی و جنوب شرقی رخ می‌دهد.

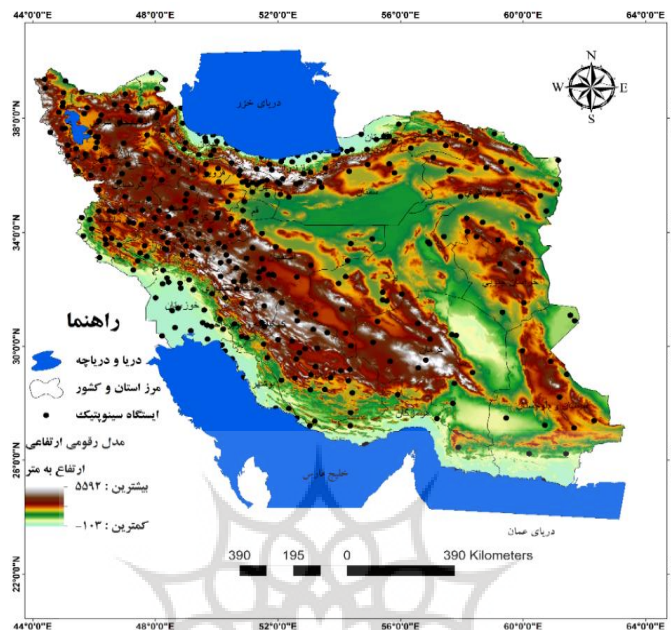
بنابراین به دلیل پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم حاصل از پدیده رعدوبرق، شناخت ویژگی‌های آن به عنوان یکی از مخاطرات اقلیمی بسیار ضروری است. همچنین مطالعه این پدیده، ضمن فهم الگوی زمانی - مکانی آن، می‌تواند ما را در آگاهی بخشی، محافظت و حتی مدیریت آن یاری دهد. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر، علاوه بر فهم الگوی رفتار زمانی - مکانی رعدوبرق، برآورد و پهنه‌بندی این رویداد در گستره ایران جهت اتخاذ تدابیر و اعمال مدیریت مناسب و متناسب است. بر همین اساس، این تحقیق می‌تواند به پر کردن خلأهای موجود به ما کمک نماید تا در مواجهه با آسیب‌پذیری از پدیده رعدوبرق، اتخاذ راهکارهای دقیق و علمی برای شناسایی خطرات و تهدیدهایی که این رویداد ممکن است به همراه داشته باشند، صورت گیرد. جهت دستیابی به اهداف مطرح شده، به بررسی و تحلیل ویژگی‌های عمومی (نظیر میانگین و ضریب تغییرات) فراوانی رخداد رعدوبرق در سراسر ایران پرداخته شد تا الگوهای زمانی - مکانی موجود در کشور، براساس داده‌ها و روش‌های متفاوت از گذشته شناسایی شده و درک بهتری از ویژگی‌های زمانی - مکانی رعدوبرق در سطح کشور به دست آید. بدین منظور از داده‌های روزانه تعداد ۳۸۲ ایستگاه همیددی در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۰ و نیز روش‌های آماری - احتمالاتی برای واکاوی داده‌ها، استفاده شد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، گستره سرزمین اصلی ایران با مساحتی حدود ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع در چارچوب مختصات زیر است (شکل ۱):

$N : 24^{\circ} 40' - 39^{\circ} 46'$

$E : 44^{\circ} 00' - 63^{\circ} 19'$



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و توزیع مکانی ایستگاه‌های منتخب

Fig.1. Study area and spatial distribution of selected stations

مواد و روش‌ها

در این مطالعه، فراوانی رویدادهای رعدوبرق بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در ۳۸۲ ایستگاه همدیدی در سراسر ایران جمع‌آوری شد. شکل ۱ توزیع مکانی این ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. در این مطالعه، فراوانی رخداد‌های روزانه رعدوبرق در فاصله زمانی ۲۰۰۰/۰۱/۰۱ تا ۲۰۲۲/۱۲/۳۱ برای ۳۸۲ ایستگاه از تارنمای سازمان هواشناسی کشور (IRIMO: <https://data.irimo.ir/withoutlogin/index.aspx>) استخراج شد. لازم به ذکر است تعداد ایستگاه‌ها طی دوره مورد مطالعه افزایش یافتند (جدول ۱).

بررسی توزیع ارتفاعی ایستگاه‌ها (جدول ۱) نشان داد که حدود ۵۶ درصد ایستگاه‌ها (۲۱۲ ایستگاه) در ارتفاع ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر و حدود ۳ درصد از ایستگاه‌ها در نواحی کم ارتفاع یعنی ۲۲- تا ۰ متر قرار دارند. از ارتفاع ۲۰۰۰ متر به سمت مناطق مرتفع (۲۵۰۰ تا ۳۵۰۰ متر)، از تعداد ایستگاه‌ها کاسته می‌شد، به طوری که از ارتفاع ۳۰۰۰ متر به بالا فقط یک ایستگاه وجود داشت. با تقسیم کشور به چهار ربع، توزیع جغرافیایی ایستگاه‌ها در این ربع‌ها نیز بررسی شد (جدول ۱). در ربع دوم (شمال‌غرب)، بیشینه سهم ایستگاه‌ها با ۵۰ درصد و ربع چهارم (جنوبی‌شرقی) و اول (شمال‌شرقی) به ترتیب ۲۱ و ۲۰ درصد ایستگاه‌ها را به خود اختصاص دادند، یعنی حدوداً بیش از ۹۰ درصد ایستگاه‌ها در این سه ربع قرار داشتند و ربع سوم (جنوب‌غربی) نیز با ۳۴ ایستگاه، حدود ۹ درصد ایستگاه‌های کشور را دارا بود.

جدول ۱- برخی مشخصات زمانی - مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 1- Some temporal-spatial characteristics of the studied stations

توزیع زمانی تعداد ایستگاه‌های مورد مطالعه							
Time distribution of the number of stations studied							
تعداد ایستگاه Number of stations	سال Year	تعداد ایستگاه Number of stations	سال year	تعداد ایستگاه Number of stations	سال سال	تعداد ایستگاه Number of stations	سال Year
367	2018	345	2012	273	2006	172	2000
371	2019	349	2013	289	2007	180	2001
376	2020	347	2014	304	2008	191	2002
375	2021	351	2015	315	2009	210	2003
377	2022	361	2016	318	2010	225	2004
		366	2017	328	2011	239	2005
توزیع ارتفاعی ایستگاه‌های مورد مطالعه							
Altitude distribution of the studied stations							
تعداد ایستگاه Number of stations				فاصله‌ی طبقات ارتفاعی (به متر) Distance between floors (in meters)			
11				-22 – 0			
73				0 – 500			
55				500 – 1000			
113				1000 – 1500			
99				1500 – 2000			
28				2000 – 2500			
2				2500 – 3000			
0				3000 – 3500			
1				3500 - +3500			
پراکنش ایستگاه‌های مورد مطالعه در چهار ربع کشور							
Distribution of study stations in the four quadrants of the country							
تعداد ایستگاه (به درصد) Number of stations (in percent)	تعداد ایستگاه Number of stations	مختصات جغرافیایی Geographic coordinates	مناطق جغرافیایی Geographic coordinates				
21 درصد 21 percent	80	N: 32° 00-39° 46 E: 52° 00-63° 19	ربع اول (شمال‌شرق) First quadrant (northeast)				
50 درصد 50 percent	191	N: 32° 00-39° 46 E: 44° 00-52° 00	ربع دوم (شمال‌غرب) Second quadrant (northwest)				
9 درصد 9 percent	34	N: 44° 40-32° 00 E: 44° 00-52° 00	ربع سوم (جنوب‌غرب) Third quadrant (southwest)				
20 درصد 20 percent	77	N: 24° 40-32° 00 E: 52° 00-63° 19	ربع چهارم (جنوب‌شرق) Fourth quadrant (southeast)				

جدول ۲- کدهای مربوط به پدیده رعدوبرق

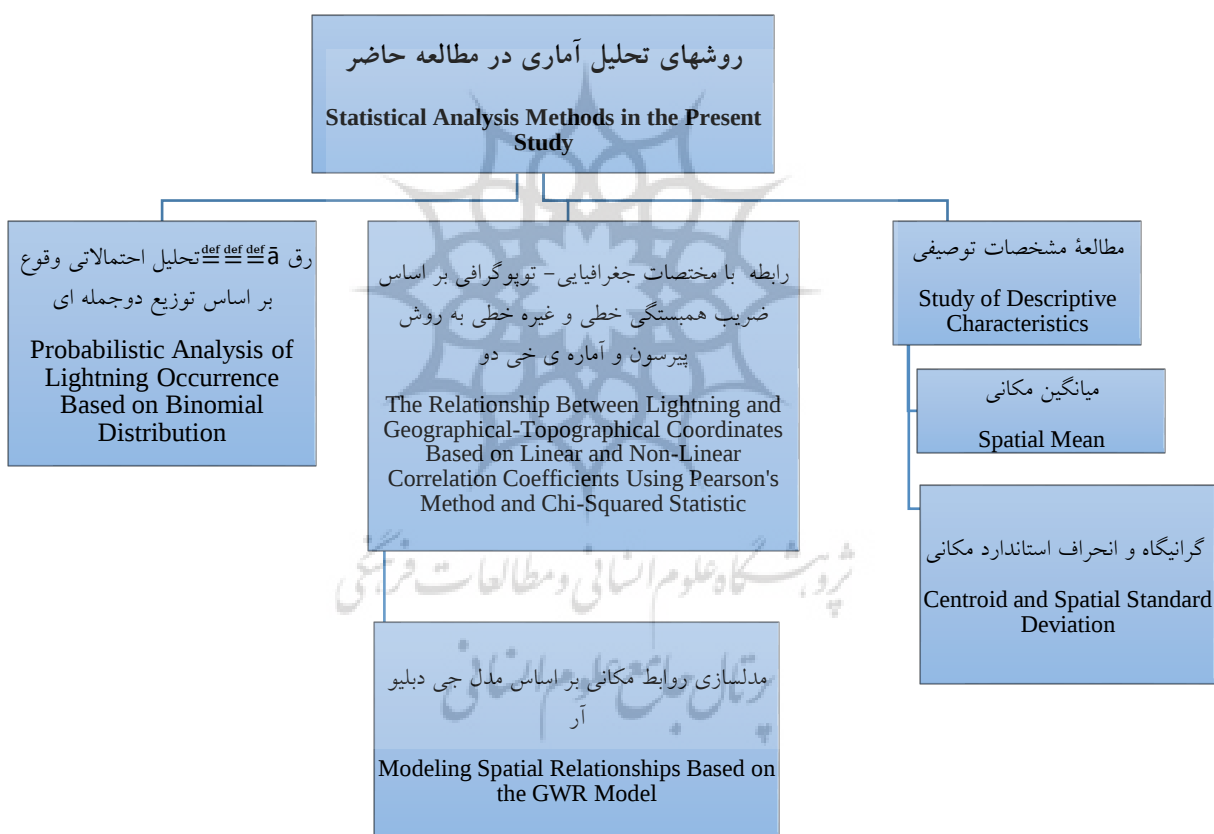
Table 2- Codes related to the lightning phenomenon (Lashkari, 2011)

تعریف کد Code definition	کد پدیده Phenomenon code	تعریف کد Code definition	کد پدیده Phenomenon code
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق، سبک یا متوسط بدون تگرگ، اما همراه با باران یا برف در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch (light or moderate thunderstorm without hail, but with rain or snow during watch)	95	برق مشاهده شده، ولی رعد شنیده نشده است. Lightning was seen, but thunder was not heard.	13
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق، سبک یا متوسط همراه با تگرگ، و در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch (light or moderate thunderstorm with hail, and during watch)	96	توفان رعدوبرق (همراه یا بدون بارش) Thunderstorm (with or without precipitation)	29
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق سنگین، بدون تگرگ، اما همراه با باران یا برف در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch (severe thunderstorm, without hail, but with rain or snow during watch)	97	توفان رعدوبرق در طول ساعت قبلی، اما در زمان دیده‌بانی پدیده مشاهده نشده است (باران سبک در موقع مشاهده ابر CF) Thunderstorm during the previous hour, but not observed at the time of observation (light rain at the time of observation of the CF cloud)	91
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق همراه با گرد و غبار یا توفان ماسه در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch time (thunderstorm accompanied by dust or sandstorm during watch time)	98	توفان رعدوبرق در طول ساعت قبلی، اما در زمان دیده‌بانی پدیده مشاهده نشده است (باران متوسط یا سنگین در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during the previous hour, but no thunderstorms were observed during the observation period (moderate or heavy rain during the observation period)	92
توفان رعدوبرق در زمان دیده بانی (توفان رعدوبرق، سنگین، همراه با تگرگ در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during watch (Thunderstorm, heavy, with hail during watch)	99	توفان رعدوبرق در طول ساعت قبلی، اما در زمان دیده‌بانی پدیده مشاهده نشده است (برف سبک، یا مخلوط برف و باران یا تگرگ در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during the previous hour, but no phenomenon observed during the observation period (light snow, or mixed snow and rain, or hail during the observation period)	93
		توفان رعدوبرق در طول ساعت قبلی، اما در زمان دیده‌بانی پدیده مشاهده نشده است (برف متوسط یا سنگین یا مخلوط برف باران یا تگرگ در زمان دیده‌بانی) Thunderstorm during the previous hour, but no phenomenon was observed during the observation period (moderate or heavy snow or mixed snow, rain or hail during the observation period)	94

در این پژوهش از داده‌های روزانه رعدوبرق ایستگاه‌های همدیدی برای تعیین فراوانی این پدیده در گستره ایران زمین استفاده شد. تعداد رعدوبرق‌ها در ایستگاه‌های همدیدی با کدهای ۱۳، ۱۷، ۲۹، و ۹۱ تا ۹۹ ثبت می‌شود (جدول ۲). فراوانی روزانه رعدوبرق براساس فراوانی تعداد کدهای روزانه استخراج شد. روزهای فاقد داده در تمام ایستگاه‌ها، شناسایی و محاسبات بدون در نظر گرفتن این مقادیر (بدون بازسازی آماری) انجام شد. داده‌های روزانه رخداد رعدوبرق به صورت سری‌های زمانی روزانه برای هر یک از ایستگاه‌ها آماده شد. به فراخور تحلیل‌های مورد نظر، فراوانی رعدوبرق، به سری‌های زمانی ماهانه و سالانه تبدیل شد.

روش تحقیق

این پژوهش به‌منظور بررسی درازمدت (اقلیمی) فراوانی رخداد رعد و برق و رابطه آن با مختصات جغرافیایی (طول و عرض) و ارتفاع انجام شده‌است. برای دستیابی به این هدف ابتدا برخی مشخصات توصیفی رعدوبرق (شامل میانگین سالانه و ضریب تغییرات) محاسبه و برآورد گردید و توزیع مکانی این مقادیر در نقشه‌هایی ارائه شد. روندنمای مطالعه حاضر در شکل ۲ آمده است:



شکل ۲- روند نمای مطالعه حاضر

Fig. 2. Flowchart of the Present Study

از سوی دیگر، توزیع جهت‌دار به معنای وجود یک روند فضایی در عوارض واقع در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. وجود روند معمولاً با یک بیضی شماتیک با عنوان بیضی انحراف استاندارد نشان داده می‌شود که قطر بزرگ آن نمایانگر جهت توزیع می‌باشد (Rahman, Yang & Di, 2018).

برای شناسایی گرانیکه توزیع فضایی مشاهدات، مرکز میانگین برآورد گردید. مرکز میانگین، نقطه‌ای در یک نقشه است که از آن

به منظور خلاصه‌سازی توزیع پدیده‌ها استفاده می‌شود. این آمار مرسوم‌ترین سنجه گرایش مرکزی برای داده‌های فضایی است که به صورت یک نقطه ارائه می‌شود. از این رو مختصات جغرافیایی مکان همچون طول (x)، عرض (y) اهمیت پیدا می‌کند (Wong & Wang, 2018). برای محاسبه مرکز میانگین، یک شبکه مختصات، با تعدادی مساوی از محورهای افقی و عمودی بر روی نقشه مورد نظر قرار داده می‌شود. به این ترتیب می‌توان مختصات هریک از نقاط را به دست آورد. در صورتی که مختصات نقطه i با (x_i و y_i) و ارزش عددی وابسته به این نقطه با p_i نشان داده شود، مختصات مرکز میانگین با $\bar{X}_c$ و $\bar{Y}_c$ نشان داده و از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.

$$\bar{X}_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

$$\bar{Y}_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i Y_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

جهت‌گیری مکانی (محدوده تغییر احتمالی) میانگین و محدوده پراکندگی متوسط آن با یک بیضی با عنوان بیضی انحراف استاندارد نشان داده می‌شود. مختصات کشیدگی این بیضی (S_x و S_y) براساس تعداد ایستگاه‌ها (n) مختصات ایستگاه (x_i و y_i) و مختصات مرکز میانگین ($\bar{X}_c$ و $\bar{Y}_c$) از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شود (Vahidi Asl, 2011).

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_c)^2} \quad (3)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_c)^2} \quad (4)$$

برای برآورد روابط بین متغیرهای مورد بررسی، با استفاده از روش‌های آماری همبستگی (خطی و غیرخطی؛ کمی و طبقه‌ای) میانگین سالانه و ضریب تغییرات آن با مختصات جغرافیایی (طول و عرض) و ارتفاع محاسبه و برآورد شد. در نهایت تلاش شد که این روابط در خانواده روش‌های رگرسیونی، الگوسازی شوند:

از آن‌جا که روابط متغیرهای اقلیمی همیشه به شکل خطی نیستند، از روش‌های غیر خطی محاسبه همبستگی استفاده شد. در این راستا از تبدیل شبه نرمال باکس-کاکس استفاده شد. این روش از نوع تبدیل‌های توانی است و معمولاً برای مشاهدات نامنفی (بیش از صفر) به کار می‌رود. تبدیل باکس - کاکس به شکل رابطه (۵) انجام می‌شود (Asakereh, 2011):

$$\frac{x^\lambda - 1}{\lambda} - 3 \leq \lambda \leq +3 \quad (5)$$

در این پژوهش، با استفاده از رابطه (۵) تمامی تبدیلات ممکن برای هر جفت متغیر (میانگین فراوانی رعدوبرق و ضریب تغییرات آن با مختصات جغرافیایی و ارتفاع) در دامنه ۳ تا -۳ با نمو ۰/۱ برای λ انجام شد. جایگشت تمام داده‌ها (میانگین فراوانی و ضریب تغییرات آن با مختصات جغرافیایی و ارتفاع) در تمامی حالات ممکن بررسی شدند. در نهایت برای ۳۸۴۳ حالت همبستگی‌ها محاسبه شد. هدف از انجام این محاسبات یافتن بهترین همبستگی بین هر جفت متغیر بود. قوی‌ترین همبستگی در هر یک از حالات مشخص شد. با محاسبه ضریب تعیین می‌توان درصد تغییرات (پراش) توأم (مشترک) دو متغیر (x و y) را برآورد کرد. این ضریب مجذور ضریب همبستگی دو متغیر است و می‌توان آن را به شکل درصد نشان داد (Asakereh, 2011). اگرچه روش باکس - کاکس برای تبدیل داده‌ها و شناسایی الگوهای غیرخطی پیچیده مناسب است، اما نتایج حاصل از روش غیرخطی نشان داد که ضریب همبستگی به طور قابل توجهی تغییر نکرد. بنابراین، استفاده از روش پیچیده‌تر، نتایج مشابهی به دست آمد. از این‌رو، و براساس اصل امساک، تحلیل خطی به عنوان روشی مناسب برای بررسی ارتباط بین داده‌ها انتخاب گردید.

آزمون ساده و پرکاربرد خی دو^۱ یکی از مهم‌ترین آزمون‌های ناپارامتری برای ارزیابی استقلال حالات دو متغیر است و از رابطه (۶) قابل برآورد است (Asakereh, Masoodian & Tarkarani, 2021):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (E_{ij} - O_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (6)$$

در این فرمول χ^2 مقدار کای دو، O_i تعداد مشاهدات واقعی هر دسته، E_i تعداد مشاهدات مورد انتظار هر دسته می‌باشد. برای بررسی بسامد رویداد رعدوبرق از تحلیل‌های احتمالاتی استفاده شد. در این زمینه و براساس روش‌های آزمون و خطا، توزیع دوجمله به‌عنوان توزیع مناسب و برازنده بر مشاهدات تشخیص داده شد. توزیع دوجمله‌ای، قادر است توزیع احتمالاتی تعداد رخدادها در یک فرایند مستقل را شبیه‌سازی و مدل‌سازی کند و از رابطه (۷) قابل برآورد است (Asakereh, 2011):

$$p(X = x) = \binom{p}{x} p^x q^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x q^{n-x} \quad (7)$$

در این رابطه $P(X=x)$ احتمال وقوع x رویداد از متغیر X می‌باشد، n تعداد کل رویدادها با تکرار، P احتمال رخداد و q احتمال عدم رخداد است.

در این راستا با استفاده از روش بیشینه درستنمایی، احتمال رخداد رعدوبرق محاسبه و براساس رابطه (۷) توالی و تداوم رعدوبرق برآورد شد.

تحلیل روابط مکانی رعدوبرق با استفاده از روش رگرسیون جغرافیایی موزون^۲ (GWR) انجام شد. این روش یک روش آماری-محلی است که اساس آن بر پایه قانون جغرافیایی «اصل نزدیکی همانندی» می‌باشد. این روش در تحلیل‌های مکانی بسیار مناسب و با دقت بالایی از واقعیت‌های محیطی برآورد و الگوسازی را به انجام می‌رساند. بر این اساس، با استفاده از مدل‌های رگرسیونی چند متغیره و بر پایه موقعیت نقاط مجاور و وزن‌دهی آماری به هریک از آنها الگوسازی انجام می‌شود، (Asakereh & Seifipour, 2012). برای الگوسازی مکانی رابطه بین میانگین فراوانی رخداد رعدوبرق با مختصات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی-ارتفاع)، از روش رگرسیون جغرافیایی موزون (GWR) استفاده شد. به هر متغیر مستقل متناسب با موقعیت جغرافیایی یک وزن اختصاص داده شد. این وزن‌ها نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر متغیر مستقل در مدل رگرسیونی هستند. در این روش، به دلیل وجود همبستگی میان متغیرهای توضیحی، نتایج قابل قبولی به دست نیامد. بنابراین، از پارامترهای موجود به طور مستقل از عرض جغرافیایی و ارتفاع، و همچنین از طول جغرافیایی و ارتفاع، با میانگین سالانه رعدوبرق، دو نقشه تهیه گردید. مدل ارائه شده برای این رابطه به شرح رابطه (۸) است:

$$R_i = b_0(\phi_i, \lambda_i) + \sum_{k=1}^k b_k(\phi_i, \lambda_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (8)$$

در مدل رگرسیونی موزون R_i متغیر وابسته، $b_0(\phi_i, \lambda_i)$ که به مختصات جغرافیایی (ϕ_i, λ_i) وابسته است که همان عرض از مبدأ می‌باشد. $b_k(\phi_i, \lambda_i)$ ضرایب رگرسیون برای متغیرهای مستقل X_k که به مختصات جغرافیایی (ϕ_i, λ_i) وابسته است، $x_{ik} : k$ متغیرهای مستقل برای مشاهده i ، ε_i خطای تصادفی می‌باشند (Lu, Charlton, Harris & Fotheringham, 2014).

1- χ^2

2- Geographically Weighted Regression

نتایج و بحث

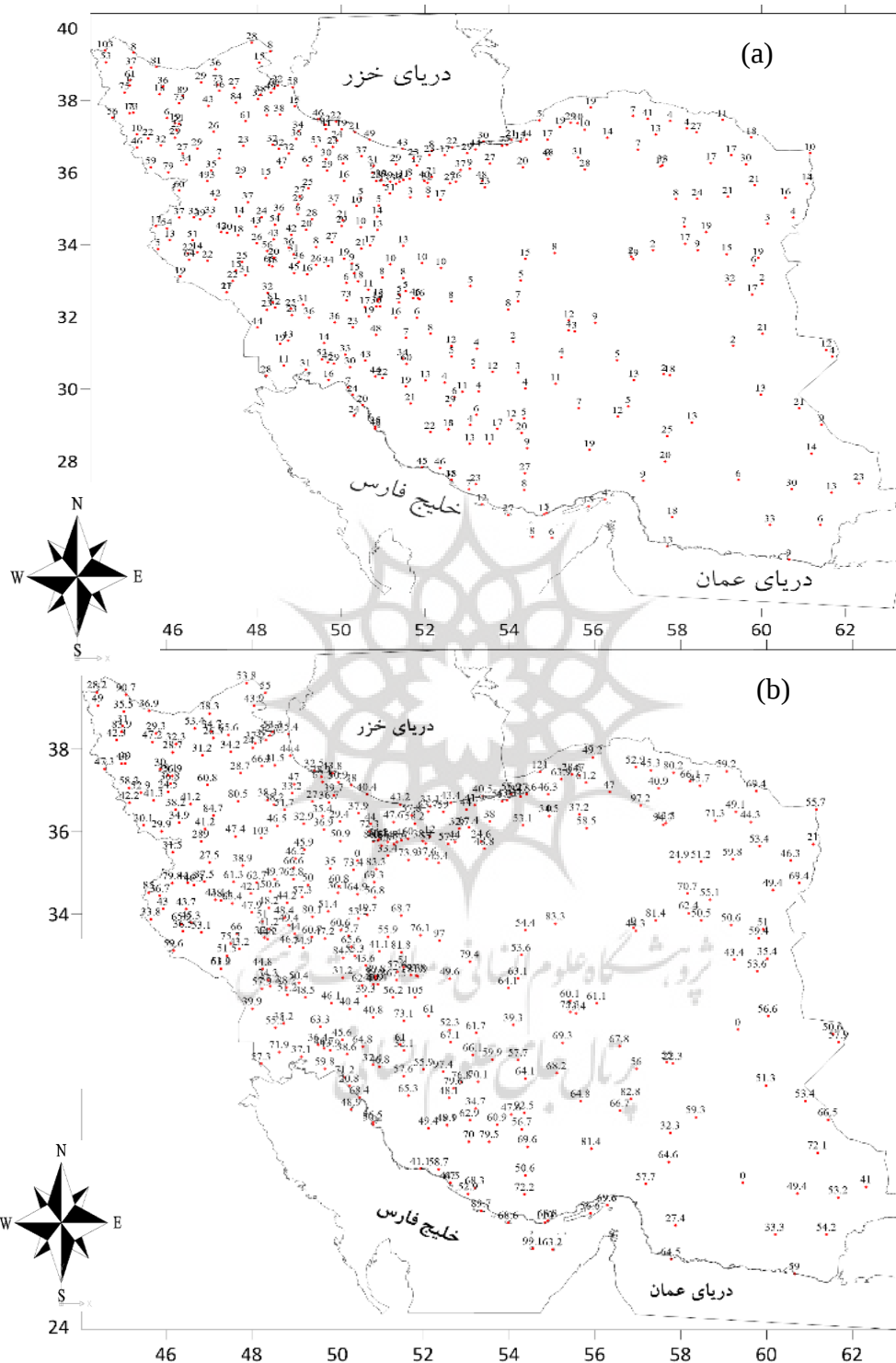
ویژگی‌های عمومی

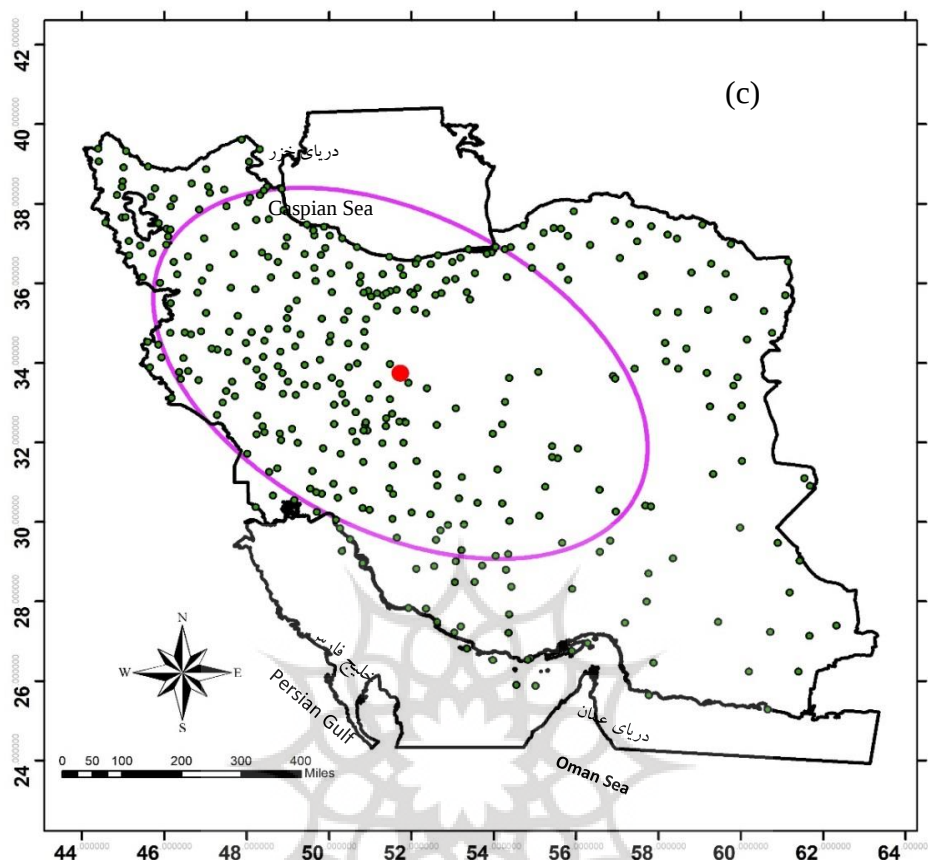
شکل ۳ توزیع مکانی میانگین (a)، ضریب تغییرات (b) و مرکز میانگین - بیضی استاندارد (c) سالانه فراوانی رعدوبرق را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ (a) می‌توان دید، بیشینه رخداد رعدوبرق در شمال غربی ایران رخ داد. بنا بر نظر عساکره و رزمی قلندری (Asakere & Razmi Qalandari, 2014)، بارش‌های شمال غرب کشور ایران عمدتاً حاصل فعالیت‌های همرفتی، صعود کوهستانی و جبهه‌های محلی است. همچنین این ناحیه با اختلافات دمایی و فشاری قوی‌تر حاصل از تباین‌های توپوگرافیک مواجه است. بنا بر نظر عساکره و همکاران (Asakereh et al., 2020)، تباین الگوهای فشار تراز دریا حاصل حضور پرفشار سیبری و کم‌فشارهای دیگر است. همچنین، حضور پشته غربی، ضمن ریزش هوای سرد به داخل ناوه مستقر بر منطقه، شرایط برخورد هوای سرد شمال اروپا و هوای گرم تر مدیترانه شرقی و شکل‌گیری جبهه‌ها را فراهم می‌کند. از این رو این ناحیه از کشور شرایط جوی مناسبی برای رخداد رعدوبرق را تجربه می‌کند.

میانگین سالانه فراوانی رخداد رعدوبرق در نواحی جنوبی ایران با اقلیم گرم و مرطوب، تقریباً نزدیک به میانگین سالانه فراوانی رخداد رعدوبرق در مناطق غربی بود. عوامل مرتبط با احتمال رخداد رعدوبرق در یافته‌های فتاحی و حجازی‌زاده (Fattahi & Hejazizadeh, 2006) توصیف شده است. ایشان وجود یک پرفشار در سطح زمین مستقر بر روی دریای عمان و شرق شبه‌جزیره عربستان را توأم با ریزش هوای گرم و مرطوب دریای عمان به سوی جنوب غربی ایران را پربسامدترین الگوی جوی می‌دانند. میانگین سالانه رعدوبرق، ایستگاه‌های شمال کشور، نسبتاً بالا است. این مناطق دارای آب و هوای معتدل و مرطوب هستند، که شرایط مطلوبی برای ایجاد این پدیده فراهم می‌کند. بنابر نظر مرادی (Moradi, 2004)، فرابار سیبری، سیستم‌های کم فشار و واچرخندهای مهاجر، الگوهایی هستند که شمال ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بارش‌های فرابار سیبری از دریای خزر، کم فشارها و واچرخندهای مهاجر از منابع دیگر (نظیر دریای سیاه، مدیترانه یا اقیانوس اطلس) رطوبت می‌گیرند. هرگاه در ساحل جنوبی دریای خزر، در سطح زمین پشته پرفشار کوتاه ناشی از گسترش هوای سرد در منطقه استقرار یابد و در ترازهای میانی و بالایی جو نیز ناوه وجود داشته باشد، شرایط لازم برای وقوع بارش‌های شدید و نیز فعالیت‌های رگباری - رعدوبرق در منطقه مهیا می‌شود. علاوه براین، در دامنه‌های شمالی البرز و کوهپایه‌های این ناحیه به ویژه در نواحی شرقی، بارش‌های همرفتی که از صفات اقلیمی نواحی مذکور هستند، نیز از عوامل شکل‌گیری تندر در این ناحیه است (Alizadeh-Choozari & Najafi, 2018).

میانگین سالانه رعدوبرق در ایستگاه‌های شرق کشور، نسبتاً کم‌تر از سایر مناطق است. آب و هوا در شرق ایران بیشتر خشک یا نیمه خشک است، با شرایط نیمه گرمسیری، در این منطقه با وجود برخی ناهمواری‌های زمین، شرایط برای ایجاد رعدوبرق به سختی فراهم می‌شود.

مناطق مرکزی ایران دارای اقلیم خشک و کم باران هستند، میانگین سالانه کم‌تری نسبت به کل ایران نشان می‌دهند؛ زیرا شرایط آب و هوایی مناسب برای تشکیل ابرهای تندری کم است. بنابر نظر علیجانی (Alijani, 1995) توده‌های هوای مرطوب (دریای مدیترانه‌ای - خزری) پس از تخلیه بخار آب در غرب کوه‌های زاگرس و شمال کوه‌های البرز به این ناحیه می‌رسند. در تابستان نیز این ناحیه محل استقرار پرفشار جنب حاره‌ای است و ناهمواری‌های شرقی از ورود رطوبت احتمالی خلیج بنگال و کوه‌های زاگرس جنوبی و بشاگرد از ورود رطوبت دریای عمان و خلیج فارس جلوگیری می‌کنند. از این رو شکل‌گیری ناپایداری‌های جوی توأم با تندر بسیار محدود است.





شکل ۳- (a) میانگین، (b) ضریب تغییرات سالانه فراوانی رعدوبرق و (c) مرکز میانگین و بیضی استاندارد
Fig.3. a) Mean, f) annual coefficient of variation of lightning frequency, and c) mean center and standard ellipse

شکل ۳ (b) توزیع مکانی ضریب تغییرات فراوانی رعدوبرق، به‌عنوان نمایه‌ای از میزان پایداری در دفعات رخداد، را نشان می‌دهد. متوسط ضریب تغییرات ایستگاه‌ها حدود ۲۵/۵ درصد حاصل شد. مقدار ضریب تغییرات کم‌تر از ۲۵/۵ نشانه رخداد با ثبات‌تر حول میانگین است. هرچه این مقدار بیش از ۲۵/۵ درصد باشد، دال بر بی‌نظمی سال به سال وقوع رعدوبرق و گویای تفاوت‌های شدید سالانه آن است. همچنین بر اساس شکل مربوط می‌توان دریافت که ضریب تغییرات داده‌های رعدوبرق در اکثر نقاط کشور با بی‌نظمی مشخص می‌شود. این نامنظمی را می‌توان به تغییرات عواملی نظیر شرایط اقلیمی و نقش عوامل جغرافیایی نسبت داد. بنابر نظر علیجانی (Alijani, 1995) تنوع اقلیمی ایران با تفاوت‌های چشمگیر دما، رطوبت، و بارش به وضوح مشهود است؛ به‌عنوان مثال مناطق کوهستانی با بارش فراوان و دمای پایین، مناطق جنوبی با دماهای بالا و بارش کم، و مناطق شمالی با تنوع دمایی و بارش سالانه و چشمگیر، هر یک جلوه‌هایی از این تنوع هستند. همچنین وجود مراکز فشار متنوع و در نتیجه ظهور جبهه‌های هوایی، تنوع اقلیمی را در پی دارد. این تنوع در اقلیم ایران تظاهرات مختلفی دارد. یکی از این تظاهرات تنوع در عناصر، پدیده‌ها و مخاطرات اقلیمی است. در این زمره تنوع در پدیده رعدوبرق را می‌توان یاد نمود.

مرکز میانگین و بیضی استاندارد در شکل ۳ (c) ارائه شده است. همانطور که در نقشه مشخص است، محل قرارگیری مرکز میانگین به صورت دایره قرمز رنگ در مختصات ۳۲ درجه عرض شمالی و ۵۲ درجه طول شرقی مشاهده می‌شود. این نقطه به‌عنوان مرکز ثقل رعدوبرق در ایران است. این نقطه در واقع میانگین فضایی رخداد رعدوبرق را نشان می‌دهد و مشابه میانگین در آمار کلاسیک است. از این نقطه به سمت شمال و غرب کشور متوسط فراوانی رعدوبرق افزایش و به سمت شرق و جنوب کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، دفعات رخداد رعدوبرق ناحیه کم وسعت شمال - غرب برابر با فراوانی گستره فراخ جنوب و شرق این نقطه است. شایسته است که به این نکته اشاره شود که این نقطه ثابت نبوده و در طول دوره آماری جا به جا می‌شده است. پهنه‌ای که مرکز میانگین، به طور متوسط در آن جا به جا می‌شد، به وسیله بیضی استاندارد نشان داده شده است. بیضی استاندارد ارائه شده، به طور ساده جهت‌گیری جنوب‌شرقی - شمال‌غربی مرکز میانگین را نشان می‌دهد.

تحلیل احتمالاتی

تحلیل‌های این بخش براساس اصول احتمالات، و برازش توزیع احتمال دوجمله‌ای بر روی داده‌های رعدوبرق در ایران ارائه می‌شود. این تحلیل شامل ارزیابی فراوانی وقوع رعدوبرق در مناطق مختلف ایران و با استناد به نتایج به دست آمده، الگوهای مختلف وقوع این پدیده‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج این تحلیل در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ ارائه شده است:

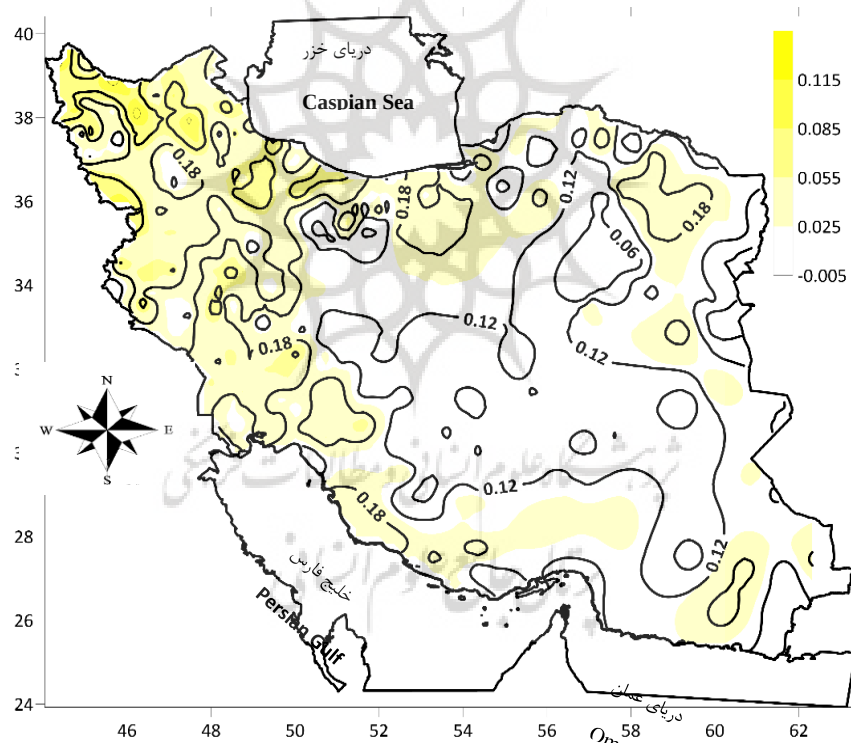
شکل ۴ توزیع مکانی احتمال وقوع رعدوبرق (پس‌زمینه رنگی) و انحراف معیار داده‌ها (خطوط هم‌مقدار) را طی بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۰ نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار احتمال وقوع منطبق بر نواحی مرتفع و کوهستانی سلسله جبال زاگرس و البرز می‌باشد. از جمله دلایل بیشترین احتمال رخداد در این منطقه می‌توان، به عاملی از قبیل کوهستانی بودن منطقه، که محل عبور توده‌های متعدد آب و هوا و نابرابری در توزیع تابش انرژی خورشیدی بر دامنه‌های آفتاب‌گیر بوده که خود منجر به شکل‌گیری ناپایداری و صعود هوای گرم و مرطوب ناشی از همرفت دامنه‌ای در برخی از ایام سال است. نیمه غربی ایران و به ویژه ناحیه شمال‌غرب ایران، در دوره سرد سال محل عبور توده‌های هوای متعددی از جمله بادهای غربی، چرخندهای مدیترانه‌ای و امواج کوتاه همراه آنها به درون کشور می‌باشد که شرایط را برای ایجاد ناپایداری و وقوع پدیده رعدوبرق فراهم می‌کند. بدین ترتیب طبق نظر علیجانی (Alijani, 1995) همه عوامل یاد شده در ایجاد رعدوبرق در این نواحی مؤثر هستند. پس از این ناحیه، ناحیه شمالی ایران نیز به دلیل دسترسی به رطوبت دریای خزر و ارتفاعات قابل ملاحظه و تأثیرپذیری این ناحیه از توده‌های آب و هوای متعددی از جمله توده هواهای مهاجر غربی از یک سو و پرفشار سبیری از سوی دیگر، شرایط را برای ایجاد رخداد پدیده رعدوبرق فراهم می‌آورد. یافته‌های عساکره و همکاران (Asakereh, Khosravi, Doostkamian & Solgimoghaddam, 2020) این موضوع را تأیید کرده است.

علاوه بر نواحی جغرافیایی مذکور، نواحی پراکنده دیگری از جمله شمال شرق و جنوب ایران از در اولویت‌های احتمالاتی بعدی قرار می‌گیرند. در ناحیه شمال شرقی ایران وجود کوه‌های نسبتاً مرتفعی از جمله کپه داغ و هزار مسجد شرایط را برای صعود اجباری توده هواهای عبوری از این منطقه، شرایط وقوع رعدوبرق را فراهم می‌آورد. در نواحی شرقی ایران گره‌های کوهستانی پراکنده‌ای اشاره نمود که به دلیل قرارگیری مسیر توده هوای غرب و ایجاد ناپایداری در مقیاس محلی فراهم نموده و منجر به افزایش میزان وقوع پدیده مذکور در این نواحی می‌شود. نتایج این بخش در پژوهش عساکره و همکاران (Asakereh et al., 2020) ذکر شده است. در نواحی جنوبی ایران به دلیل همجواری با پهنه‌های وسیع رطوبتی (از جمله خلیج فارس و دریای عمان) از یک سو و تأثیرپذیری از شرایط آب و هوای متعددی از جمله جریانات غربی و جریانات جنوبی و جنوب‌شرقی (نظیر سامانه‌های موسمی) در هنگام برخورد با ارتفاعات پراکنده این نواحی، منجر به مهیایی شرایط برای رخداد پدیده رعدوبرق می‌شود. بعد از ارتفاعات شمال‌غرب، ارتفاعات جنوب‌شرقی به خصوص منطقه سراوان از بیشترین میزان احتمال وقوع پدیده رعدوبرق برخوردار است. براساس این نقشه فراوانی

احتمال پدیده رعدوبرق با نتایج تحقیقات دکتر علیجانی (Alijani, 2004) منطبق است همان‌طور که ایشان اشاره کردند، بیشینه رعدوبرق ایران در شمال غرب و جنوب شرق رخ می‌دهد.

در مناطق مرکزی ایران به دلیل فقدان ارتفاع قابل ملاحظه در مسیر توده‌های مهاجر غربی و شمالی از یک سو و از سوی دیگر به دلیل این‌که توده‌های هوایی مهاجر بخش اعظم رطوبت خود را در طی مسیر رسیدن به این ناحیه از دست می‌دهند، احتمال وقوع پدیده رعدوبرق به خوبی مهیا نبوده و به همین دلیل این ناحیه هم به لحاظ فراوانی وقوع و هم احتمال وقوع پدیده رعدوبرق به کم‌ترین مقدار ممکن می‌رسد. (Ghaedi, 2021) در پژوهش خود این نتیجه را تأیید کرده است.

توزیع مکانی انحراف معیار احتمال رخداد رعدوبرق نشان می‌دهد مناطقی که از بیشترین انحراف معیار برخوردار است، منطبق بر نواحی توأم با بیشترین احتمال وقوع است. از این قبیل می‌توان به نواحی شرقی کشور اشاره نمود. این امر بر این واقعیت دلالت دارد که واداشتهای رعدوبرق در این نواحی، واداشتهای ثابت یا منظمی نیستند. از این‌رو قطعیت احتمالات ارائه شده همچون میزان احتمالات کم است. به عبارت دیگر، تغییرات اندک در واداشتهای مورد بحث، نتایج احتمالات را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهند. در نواحی نظیر ایران مرکزی که مقدار انحراف معیار پایین است، گواهی بر ثبات در کمبود پدیده رعدوبرق و ثبات نسبی در تمام ایام سال دارد. بنابراین حاکمیت این شرایط باعث می‌گردد که مقدار انحراف معیار پدیده رعدوبرق در این ناحیه کم باشد.



شکل ۴- احتمال وقوع رعدوبرق (پس‌زمینه رنگی) و انحراف معیار داده‌ها (خطوط هم‌مقدار)

Fig.4. Lightning occurrence probability (colored background) and data standard deviation (Contour lines)

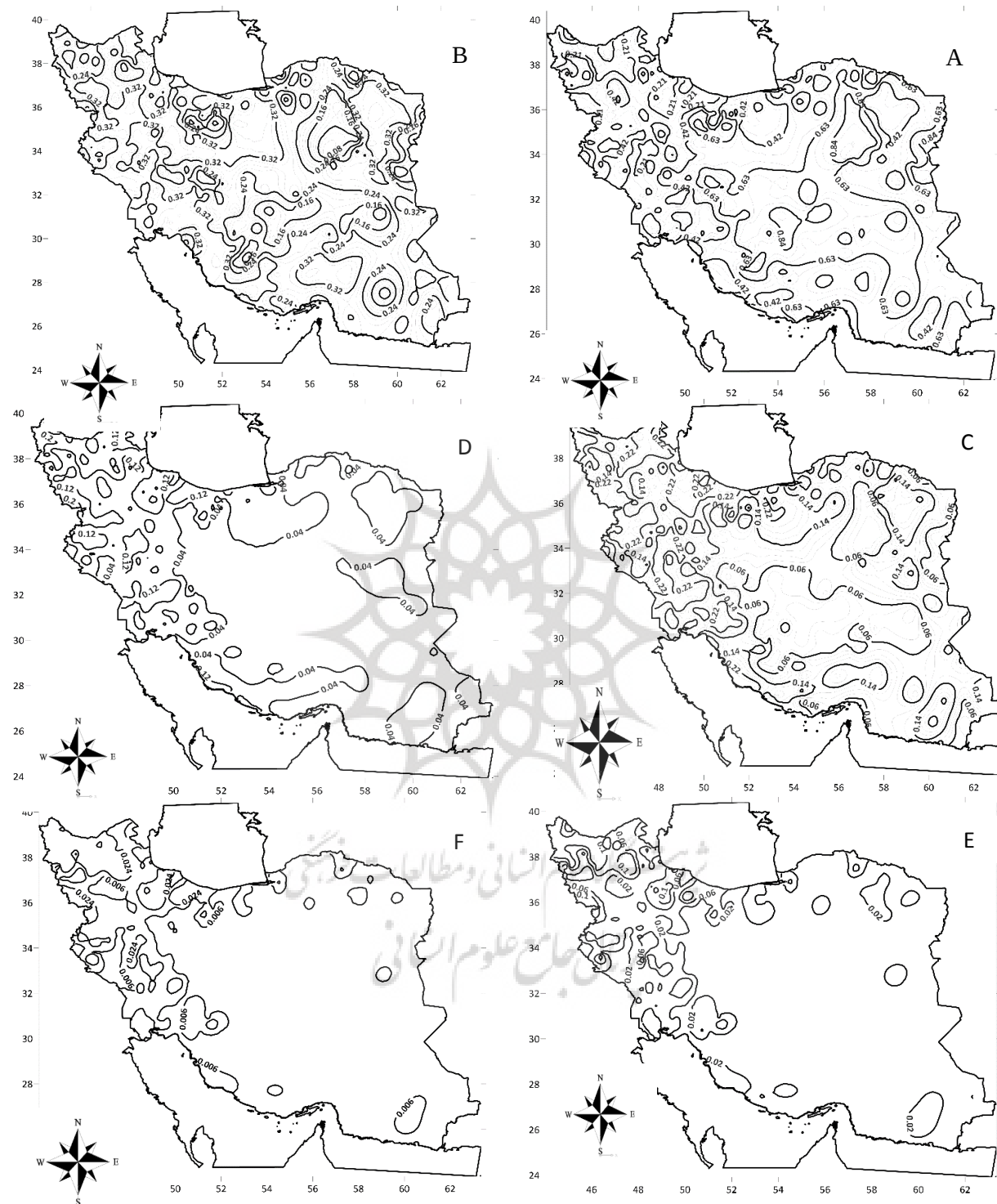
نقشه‌های اشکال شماره ۵ A تا F احتمال تداوم روزهای بدون رعدوبرق و روزهای توأم با ۱ روز تا ۵ روز رعدوبرق در طی ۳۰ روز متوالی (یک ماه) را نشان می‌دهد، به‌عنوان مثال همان‌طور که در شکل شماره ۴ (A) مربوط به احتمال ۳۰ روز متوالی بدون رخداد پدیده رعدوبرق مشاهده می‌شود، در نواحی بیابانی احتمال عدم وقوع رعدوبرق در ۳۰ روز متوالی بسیار بالا و حدود ۸۴ درصد است. در نواحی مرکزی این احتمال تا ۶۳ درصد و نواحی جنوبی و جنوب‌غربی نیز تا حدود ۴۲ درصد کاهش می‌یابد. نواحی شمال غربی

و ساحلی دریای خزر این احتمال تا حدود ۲۱ درصد مشخص می‌شود. با افزایش تعداد روزهای توأم با رعدوبرق در طی ۳۰ روز، اگرچه احتمال رخداد کاهش می‌یابد، اما الگوی فضایی تغییر قابل توجهی نشان نمی‌دهد. به عبارت دیگر، مطابق شکل ۵ (B)، احتمال وقوع دست کم یک رعدوبرق در یک ماه، در نواحی شمال غرب، شمال و شمال شرقی کشور، به دلیل شرایط آب و هوایی مناسبی که شامل ظهور و گذر سامانه‌های ناپایداری جوی فراوان و تشکیل ابرهای کولونیموس، بیشینه (حدوداً ۳۲ درصد) است. در نواحی مرکزی و جنوب شرقی کشور، احتمال وقوع حداقل یک رعدوبرق در سی روز حدوداً ۲۴ درصد است. در نواحی بیابانی کشور، کمترین میزان احتمال وقوع یک رعدوبرق در ماه (حدوداً ۱۶ درصد) است.

مطابق شکل ۵ (C)، احتمال وقوع دو روز توأم با رعدوبرق در ۳۰ روز متوالی در نواحی ارتفاعات البرز و زاگرس بیشینه (حدوداً ۲۴ درصد) است. در نواحی مرکزی، جنوبی، جنوب شرقی و شمال شرقی کشور، احتمال وقوع رعدوبرق، حدوداً ۱۴ درصد است که کم‌تر از مناطق مرتفع است. در نواحی بیابانی کشور، کم‌ترین احتمال وقوع دو روز توأم رعدوبرق در طی یک ماه تا حدوداً ۶ درصد برآورد شد. مطابق شکل ۵ (D)، احتمال وقوع ۵ روز توأم با رعدوبرق در ۳۰ روز متوالی، با درصد بسیار پایین نزدیک به ۰/۰۱ در نواحی زاگرس مرتفع و غرب دریای خزر بیشینه مقادیر احتمالاتی قابل مشاهده است و در دیگر مناطق کشور احتمال بسیار نزدیک به صفر است.

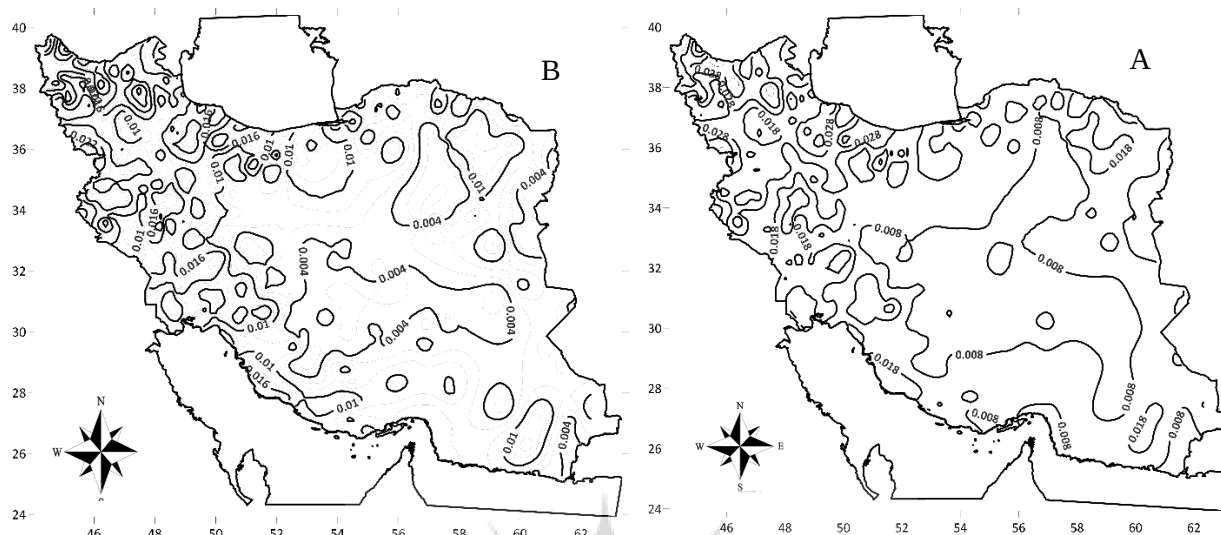
شکل ۶ (A) و (B) به ترتیب شبیه‌سازی داده‌های احتمال وقوع رعدوبرق برای ۲۳ سال آینده (۲۰۲۳-۲۰۴۶) و ۴۶ سال آینده (۲۰۶۹-۲۰۲۷) به شرط ثابت بودن احتمال وقوع‌های کنونی را نشان می‌دهند. براساس شکل ۶ (A) (توزیع مکانی احتمال به شبیه سازی ۲۳ سال آینده)، احتمال وقوع رعدوبرق برای مناطق شمال غرب و نوار غربی سواحل دریای خزر ۰/۰۲۸ است. بنابراین پیش‌بینی می‌شود که در آینده، بیشترین احتمال وقوع پدیده رعدوبرق در این ناحیه باشد. احتمال وقوع حاصل از شبیه سازی مربوط به نواحی جنوبی و شمال شرق و جنوب شرقی ۰/۰۱۸ می‌باشد. در نواحی ایران مرکزی، منطبق بر بیابان‌های داخلی نیز احتمال وقوع رعدوبرق به ۰/۰۰۸ می‌رسد.

در شکل ۶ (B)، شبیه‌سازی داده‌های احتمال وقوع رعدوبرق برای دو برابر دوره آماری (۲۰۶۹-۲۰۴۷) نشان می‌دهد، در آینده نواحی زاگرس و شمال غرب، ۰/۰۲۲ احتمال وقوع رعدوبرق وجود دارد. در نواحی شمالی و جنوب غربی ۰/۰۱۶ و در نواحی ایران مرکزی نیمه شرقی کشور حدوداً ۰/۰۰۴ احتمال رخداد رعدوبرق مورد انتظار است.



شکل ۵- (A) احتمال عدم وقوع رعدوبرق و احتمال وقوع دست کم (B) یک روز (C) دو روز (D) سه روز (E) چهار روز و (F) پنج روز متوالی رعدوبرق در ۳۰ روز

Fig.5. A) Probability of no lightning and probability of at least B) one day, C) two days, D) three days, E) four days, and F) five consecutive days of lightning in 30 days.



شکل ۶- شبیه‌سازی داده‌های رعدوبرق برای طول دوره‌های آینده

Fig.6. Lightning data simulation for future periods

تحلیل و الگوسازی روابط

جدول ۳ ضریب همبستگی بین مختصات مکانی - ارتفاع با میانگین و ضریب تغییرات سالانه فراوانی رعدوبرق در گستره ایران زمین را نشان می‌دهد. براساس این جدول اگرچه تمامی روابط خطی بین متغیرهای مورد بررسی به لحاظ آماری معنی‌دار است، اما میزان همبستگی خطی بسیار کم است. به عنوان مثال بیشترین رابطه (معکوس) بین میانگین سالانه فراوانی رخدادهای رعدوبرق و طول جغرافیایی حدود -0.328 بود. یعنی با افزایش طول جغرافیایی میانگین سالانه داده‌های رعدوبرق کاهش می‌یابد بر این اساس و براساس ضریب تعیین تنها حدود ۱۱ درصد تغییرات سالانه فراوانی رعدوبرق به وسیله طول جغرافیایی توجیه می‌شود. بنابر نظر علیجانی و هرمان (Alijani & Harman, 1985) اقلیم ایران، به‌ویژه نیمه غربی آن به دلیل واقع شدن در نزدیکی جبال زاگرس و کوهستان‌های البرز و نیز مجاورت با بیابان‌های همجوار، نظیر صحرای عربستان، و ایران مرکزی به طور معمول تحت تأثیر توده هوای گوناگون است، به طوری که این ناحیه محل برخورد توده‌های گرم و خشک با توده‌های هوای سرد است. بنابراین، با توجه به تأثیر توده‌های هوایی مختلف و جبهه‌های هوا، اقلیم نیمه غربی ایران دارای شرایط هواشناسی متنوع و پویا است که ممکن است منجر به وقوع پدیده‌های هواشناسی گوناگون، نظیر رعدوبرق، گردد. اما در نیمه شرقی کشور این شرایط کاهش می‌یابد؛ در نتیجه شرایط برای ایجاد رعدوبرق به سختی فراهم می‌شود. رابطه ضریب تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق ایران و طول جغرافیایی نیز مثبت اما بسیار ضعیف و فاقد معنی آماری است. این ارتباط ضعیف بر تصادفی بودن ضریب تغییرات فراوانی رعدوبرق دلالت دارد. از این رو، این رابطه نمی‌تواند به صورت قاطع برای پیش‌بینی یا توصیف تغییرات در وقوع رعدوبرق مورد استناد قرار گیرد.

ضریب همبستگی مثبت بین میانگین سالانه رعدوبرق ایران و عرض جغرافیایی نشان‌دهنده وجود یک رابطه مثبت بین این دو متغیر است. بدین مفهوم که با افزایش عرض جغرافیایی میانگین سالانه رعدوبرق افزایش پیدا می‌کند. بنابر نظر عساکره و رزمی قلندری (Asakere & Razmi Qalandari, 2014)، الگوهای بارشی در منطقه شمال غرب ایران (عرض‌های جغرافیایی بالا) نشان می‌دهد که در این منطقه، رژیم بارش به صورت یکنواخت‌تر و پایدارتر است. این مناطق دارای کم‌ترین ضریب تغییرات و بیشترین یکنواختی بارش هستند، که نشان از وجود الگوهای بارشی یکنواخت و پایدار در این مناطق دارند. این ویژگی‌ها می‌توانند نشان‌گر فعالیت مستمر و پایدار سامانه‌های باران‌زا در این نواحی باشد. همچنین بنابر نظر علیجانی و هرمان (Alijani & Harman, 1985)

مناطق غرب و شمال غرب به جهت نزدیکی به منابع رطوبتی و گذر فراوان بادهای غربی در این منطقه از همگنی مناسبی برخوردار هستند. رابطه ضریب تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق ایران با عرض جغرافیایی با مقدار معکوس و بسیار کم ($-0/2$) مشخص می‌شود. براساس علامت این همبستگی، با افزایش عرض جغرافیایی، ضریب تغییرات سالانه رعدوبرق ایران کاهش می‌یابد. بنابر نظر اسماعیلی محمودآبادی و صادقی (Esmaeili Mahmoudabadi & Sadeghi, 2023)، این رابطه به دلیل تغییر الگوهای باد و توپوگرافی است. با افزایش عرض جغرافیایی، پایداری در الگوهای بارش افزایش یافته و بر رویدادهای هیدروالکتریک از جمله پدیده رعدوبرق تأثیر می‌گذارد.

از سوی دیگر ضریب همبستگی بین میانگین سالانه رعدوبرق ایران و ارتفاع نشان دهنده یک ارتباط بسیار ضعیف بین این دو متغیر است. بدین صورت که افزایش ارتفاع تأثیر بسیار کمی بر روی تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق دارد و نمی‌توان به طور قطعی از وجود رابطه قوی بین آن‌ها سخن گفت. به عبارت دیگر، این ضریب همبستگی نشان می‌دهد که هرچند ممکن است یک ارتباط ملموس بین این دو متغیر وجود داشته باشد، اما این ارتباط در قالب ارتباط خطی از قطعیت بالایی برخوردار نیست. بنابر نظر عساکره و همکاران (Asakereh et al., 2020)، عوامل بیرونی به طور قابل توجهی بر بارش‌های ایران و به ویژه نواحی شمال غربی کشور تأثیر دارند، در حالی که نواحی حاشیه‌ای از جمله کوه‌های زاگرس، سواحل خزر، و مرزهای شرقی ایران، بیشتر از عوامل درونی تأثیر می‌پذیرند. بنابر نظر رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2018)، با بررسی رابطه فراوانی رعدوبرق‌ها با ارتفاع نشان دادند که بیشینه فراوانی رعدوبرق‌ها در دامنه‌های جنوبی و قبل از رسیدن به قله اصلی و در ارتفاع بین ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ متر رخ خواهند داد. بنابراین اگرچه ارتفاعات نقش مهمی در توزیع مکانی بارش ایفا می‌کنند؛ اما از آن‌جا که ارتفاعات در نواحی غربی و شمالی کشور متمرکز شده‌اند، مطالعه آنها در مقیاس ملی این نقش را نهان می‌سازد. از این‌رو تمرکز این تأثیرات متناسب با تمرکز ارتفاعات (شکل ۳ - a) است. با توجه به همبستگی بسیار ضعیف میان ضریب تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق ایران با ارتفاع که ($0/04$)، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب تغییرات میانگین سالانه رعدوبرق ایران با افزایش ارتفاع ایران تغییر چندانی پیدا نمی‌کند.

جدول ۳- ماتریس همبستگی خطی مشخصات سالانه رعدوبرق میانگین و ضریب تغییرات) با مختصات جغرافیایی - ارتفاع

Table 3- Linear correlation matrix of annual lightning characteristics (mean and coefficient of variation) with geographic coordinates - altitude

متغیرها Variables	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع Height	میانگین فراوانی Average frequency	ضریب تغییرات فراوانی Frequency coefficient of variation
طول جغرافیایی Longitude	1				
عرض جغرافیایی Latitude	-0.4010	1			
ارتفاع Height	-0.1229	0.1747	1		
میانگین داده‌ها Average data	-0.3280	0.2212	0.0520	1	
ضریب تغییرات Coefficient of variation	0.0931	-0.2011	0.0437	0.1993	1

به منظور واریس وجود رابطه غیرخطی بین متغیرها، متغیرهای مورد اشاره در جدول ۳ برای تمام حالات ممکن و به وسیله تبدیل شبه نرمال باکس - کاکس اعمال شد. بالاترین میزان همبستگی به ازای مقادیر λ مختلف استخراج شد. نتایج این بررسی در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول میزان λ برای هر دو متغیر، که در آن بالاترین همبستگی حاصل گردید، ارائه گردیده است. همان گونه که مشاهده می شود، بهترین برآورد ضریب همبستگی میانگین سالانه رعدوبرق با طول جغرافیایی که در روش خطی $0/32$ - بوده است در روش غیرخطی به $0/45$ - ارتقاء یافت. اما در بقیه موارد میزان همبستگی تغییرات چندانی نیافت. به عنوان مثال برای عرض جغرافیایی این عدد در روش خطی $0/22$ و در روش غیرخطی $0/32$ و میانگین سالانه با متغیر ارتفاع در روش خطی $0/05$ و در روش غیر خطی $0/06$ حاصل آمد. برای ضریب تغییرات داده ها با طول جغرافیایی نیز در روش خطی $0/09$ و در روش غیر خطی $0/10$ ، با عرض جغرافیایی در روش خطی $0/20$ - و در روش غیر خطی $0/19$ - و برای ارتفاع در روش خطی $0/04$ و در روش غیر خطی $0/06$ برآورد شد.

جدول ۴- بالاترین متوسط همبستگی عوامل جغرافیایی و میانگین فراوانی سالانه رعدوبرق و ضریب تغییرات آن

Table 4- Highest average correlation between geographical factors and average annual lightning frequency and its coefficient of variation

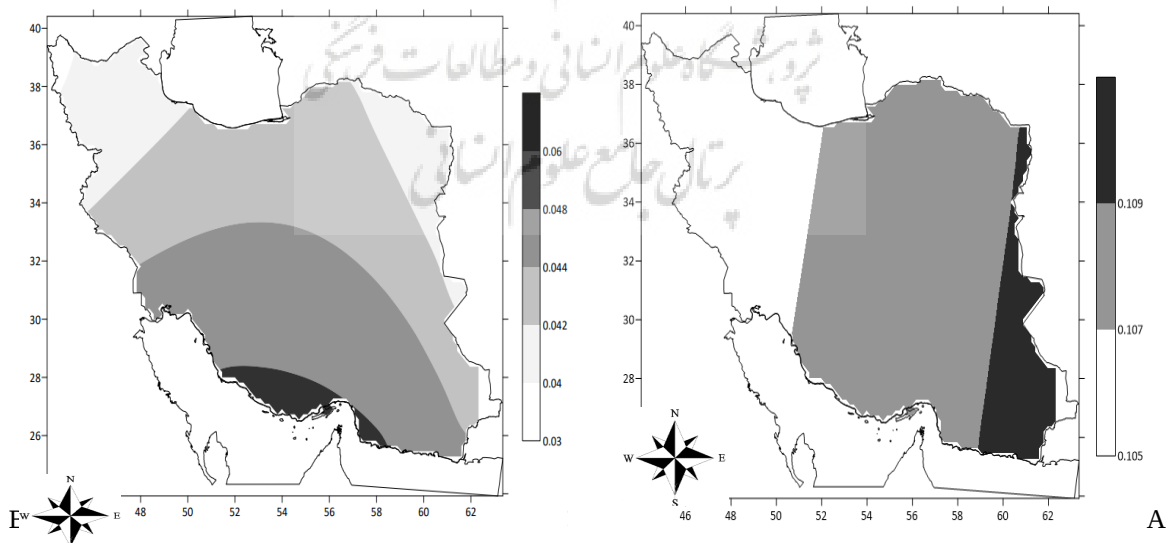
	طول جغرافیایی Longitude		عرض جغرافیایی Latitude		ارتفاع Height	
	λ	ضریب همبستگی Correlation coefficient	λ	ضریب همبستگی Correlation coefficient	λ	ضریب همبستگی Correlation coefficient
میانگین فراوانی	0.2	3	-0.45			
رخداد رعدوبرق	0.2		3	0/32		
Average frequency of lightning occurrence	1/8				1/6	0.06
ضریب تغییرات	0.8	3	0/1			
Coefficient of variation	0.7		3	-0.19		
	0.1				2/2	0.60

با عنایت به آن چه که گفته شد و با توجه به ضریب همبستگی کم، نمی توان رابطه ای قطعی و تأثیرگذار بین این متغیرها استنباط نمود. این عدم قطعیت، را می توان به عوامل مختلفی نسبت داد. به عنوان مثال فقدان تراکم ایستگاهی در طیف های ارتفاعی مختلف در این زمره است؛ در مناطق شمال غربی کشور، تعداد ایستگاه سینوپتیک از تمرکز بالای برخوردار می باشد در حالی که در مناطق مرکزی و شرقی تعداد آن ها به شدت کاهش می یابد. حال آن که علاوه بر مختصات جغرافیایی - ارتفاع، عواملی احتمالی متعددی نظیر موقعیت جغرافیایی ارتفاعات، جهت گیری ارتفاعات، قرارگیری آن ها در مسیر توده هواهای عبوری و نیز میزان برخورداری از رطوبت و نیز میزان دما بر فراوانی پدیده رعدوبرق اثرگذار است. این توزیع نامتوازن امکان پایش دقیق را محدود می سازد. علاوه بر این، وجود خلاءهای آماری در داده های ایستگاه های همدید و نیز بی نظمی در رخداد رعدوبرق را می توان از محدودیت های قابل تأمل برشمرد. برای بررسی اثر توأم مختصات جغرافیایی - ارتفاع بر میانگین فراوانی سالانه رعدوبرق و نیز ارائه دیداری از الگوی فضایی این رابطه، از رگرسیون جغرافیایی موزون استفاده شد. در این زمینه دو نقشه تهیه شد. در نقشه اول (شکل ۷ A) توزیع مکانی ضریب

تعیین دو متغیر طول جغرافیایی - ارتفاع با متوسط فراوانی رخداد رعدوبرق و در نقشه دوم (شکل ۷ B) توزیع مکانی ضریب تعیین دو متغیر عرض جغرافیایی - ارتفاع با متوسط سالانه رخداد رعدوبرق ارائه شد.

همان گونه که در شکل ۷ A) مشخص است، آستانه همبستگی از ۰/۱ تا ۰/۱۱ متغیر است. این مقادیر فاقد معنی آماری هستند. با این وجود، میزان ضریب تعیین از غرب به سمت شرق به طور نسبی افزایش می‌یابد، به طوری که بیشترین میزان ضریب تعیین در شرق و جنوب شرق کشور (مناطق مرتفع سراوان و کوه‌های مکران) دیده می‌شود. به نظر می‌رسد ارتفاعات موجود در شرق کشور به دلیل هم‌جواری با منابع رطوبتی جنوب ایران و تعامل توده‌های موسمی با ارتفاعات، شرایط نسبتاً مناسبی برای رخداد پدیده رعدوبرق در این نواحی فراهم می‌آورد. بنابر نظر علیجانی و هرمان (Alijani & Harman, 1985)، و رضایی و همکاران (Rezaei, Ahmadi & Mohamadi, 2019) در مطالعات خود نشان دادند که، شرق و جنوب‌شرقی ایران به دلیل توده‌های هوایی گرم و مرطوب از سمت جنوب و جنوب‌شرق، سامانه‌های همرفتی محلی ناشی از تابش شدید خورشید و جبهه‌های هوایی سرد از سمت شمال و شمال‌غرب می‌توانند شرایط را برای ایجاد ناپایداری هوا و بارش‌های رگباری یا رعدوبرق در این مناطق مهیا سازند. ارتفاعات موجود در این مناطق باعث ایجاد سامانه‌های همرفتی محلی می‌شوند که در اثر تابش شدید خورشید در طول روز شکل می‌گیرند. همچنین این سامانه‌های همرفتی محلی می‌توانند باعث ابرناکی و ناپایداری‌های توام با بارش‌های رگباری در برخی ساعات روز شوند.

در شکل ۷ B) توزیع مکانی ضریب تعیین عرض جغرافیایی - ارتفاع با پدیده رعدوبرق طی دوره آماری ۲۳ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۲) را نشان می‌دهد، همان طوری که می‌توان دید حداکثر مقدار ضریب تعیین ۰/۰۶ است. همین مقدار ضریب تعیین که به لحاظ آماری معنی دار نیست در جنوب بیشتر و به سمت عرض‌های شمالی کاهش می‌یابد. این ویژگی را می‌توان به برخورد رطوبت ناشی از آب‌های گرم سواحل جنوبی به ارتفاعات در عرض‌های شمال‌یتر و تکوین شرایط برای همرفت‌های ناگهانی و رخداد رعدوبرق نسبت داد. بنابر نظر رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2019)، توده‌های هوای مرطوب که از دریای عرب و خلیج فارس به جنوب ایران وارد می‌شوند، نقش مهمی در افزایش رطوبت نسبی و بارش‌های موسمی در فصول انتقالی بهار و پاییز ایفا می‌کنند. همچنین، تداخل و برخورد توده‌های سرد و گرم، شرایط آب و هوایی متغیر و ناپایدار را در جنوب ایران ایجاد می‌کند و منجر به بروز پدیده‌های جوی ناگهانی و شدید از جمله، رگبارهای شدید و طوفان‌های محلی می‌شود. این تغییرات سریع در شرایط آب و هوایی، نوسانات شدید دمایی و رطوبتی را در این مناطق به دنبال دارد.



شکل ۷- ضریب تعیین حاصل از مدل رگرسیون موزون برازنده بر A) طول جغرافیایی و ارتفاع و B) عرض جغرافیایی و ارتفاع

Fig.7. Coefficient of determination resulting from the weighted regression model fitted to A: (longitude and altitude) and B: (latitude and altitude)

نتیجه‌گیری

پدیده‌ی رعدوبرق یکی از پدیده‌های طبیعی است که در سطح جهان، به ویژه در مناطق با اقلیم متغیر، مانند ایران، رخ می‌دهد. با بررسی ویژگی‌های عمومی این پدیده در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۲ در محدوده ایران زمین با استفاده از روش‌های آماری مشخص شد. مختصات جغرافیایی و ارتفاع در پراکندگی و فراوانی رعدوبرق تأثیر خطی قابل توجهی بر جای نمی‌گذارند. همچنین با بررسی نقشه ضریب تغییرات داده‌های رعدوبرق، نتایج دال بر بی‌نظمی وقوع پدیده‌ی رعد و برق و گویای تفاوت‌های شدید سالانه این پدیده در ایران است. بررسی همبستگی بین مختصات جغرافیایی - ارتفاع و فعالیت رعدوبرق در ایران نشان می‌دهد که ارتباطات معنی داری خطی کم است. با این وجود عرض جغرافیایی با میانگین فعالیت رعدوبرق رابطه ضعیفی دارد، اما همین رابطه کم در عرض‌های شمالی‌تر، افزایش می‌یابد. همچنین، طول جغرافیایی با میانگین رعدوبرق رابطه منفی و متوسطی دارد، به طوری که با افزایش طول (به سمت شرق کشور)، میانگین سالانه رعدوبرق کاهش پیدا می‌کند.

بررسی توزیع احتمال دوجمله‌ای بر داده‌های رعدوبرق در ایران نتایج نشان می‌دهد، که مناطق مختلف ایران، احتمال وقوع رعدوبرق متفاوتی دارند که با عواملی همچون جغرافیا و شرایط آب و هوایی مرتبط است. مناطقی مانند شمال غرب و جنوب شرق ایران بیشترین میزان وقوع را دارند، در حالی که مناطق دیگر در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند.

به نظر می‌رسد که پدیده رعدوبرق در گستره ایران زمین یک پدیده تصادفی بوده و به لحاظ فضایی ارتباط خطی معنی‌داری با مختصات جغرافیایی - ارتفاع نشان نمی‌دهند. بنابراین، اگرچه مختصات جغرافیایی و ارتفاع در مقیاس محلی می‌توانند بر پدیده رعدوبرق اثرگذار باشند، اما تأثیر آنها به طور خطی و ساده قابل مشاهده نیست. از این رو با تغییر طول و عرض جغرافیایی و همچنین ارتفاع، تأثیر قطعی بر فراوانی و شدت رخداد رعدوبرق مشاهده نمی‌شود. عوامل دیگری مانند شرایط جوی، پوشش ابری و زمینه‌های محلی می‌توانند نقش مؤثرتری در بروز این پدیده داشته باشند.

مطالعات پرشماری از جمله رسولی و همکاران (Rasuli et al., 2018)، علیجانی (Alijani, 1995)، عساکره و رزمی (Asakereh & Razmi Qalandari, 2014)، عساکره و همکاران (Asakereh et al., 2020)، قاضی (Ghaedi, 2021)، صادقی (Esmaeili Mahmoudabadi & Sadeghi, 2023) این یافته‌ها را تأیید می‌کنند. امروزه پایش‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و توسعه مراکز پیش‌بینی و مدل‌سازی رویدادهای اقلیمی، امکان دسترسی به داده‌های تقریباً به هنگام و دقیق را فراهم کرده‌است. داده‌های ماهواره‌ای از جمله داده‌های سنجنده LIS ماهواره TRMM در کنار داده‌های ایستگاهی و یا بعضاً در مکان‌های فاقد داده مورد استفاده قرار می‌گیرد که در پژوهش‌های مختلف اعتبار این داده‌ها مورد بررسی و تأیید قرار گرفته‌است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی از داده‌های ماهواره‌ای استفاده گردد. زیرا داده‌های ماهواره‌ای به دلیل پوشش زمانی - مکانی مناسب، نقاط ضعف داده‌های ایستگاهی را پوشش داده و ضمن برآورد دقیق‌تری از توزیع زمانی و مکانی پدیده رعدوبرق، شناخت جامع‌تری از ویژگی‌های این پدیده، در اقلیم مختلف ایران ارائه خواهد داد.

References

- Adhikari, P. B. (2023). Different Measurement System of Lightning. *European Journal of Applied Physics*, 5(3), 26-30. <https://10.24018/ejphysics.2023.5.3.264>
- Alijani, B., & Harman, J. R. (1985). Synoptic climatology of precipitation in Iran. *Annals of the Association of American Geographers*, 75(3), 404-416. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1985.tb00075.x>
- Alijani, B. (1995). *Iranian Meteorology*. Tehran: Payam-Noor Publication. [In Persian]
- Alijani, B. (2004). *Iran's Climate*. Tehran: Payam-Noor University Publications. [In Persian]
- Alizadeh-Chooabari, O., & Najafi, M. S. (2018). Extreme weather events in Iran under a changing climate. *Climate Dynamics*, 50(1), 249-260. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3602-4>
- Asakere, H., & Razmi Qalandari, R. (2014). Temporal distribution and precipitation regime in northwest Iran. *Geographical Research*, 29(1), 145-160. [In Persian] <http://georesearch.ir/article-1-421-en.html>
- Asakere, H., & Seifipour, Z. (2012). Spatial modeling of annual precipitation in Iran. *Geography and Development*, 10(29), 15-30. [In Persian] https://gdij.usb.ac.ir/article_117.html
- Asakereh, H. (2011). *Fundamentals of Statistical Climatology*. Zanjan: Zanjan University Press. [In Persian]
- Asakereh, H., Khosravi, Y., Doostkamian, M., & Solgimoghaddam, M. (2020). Assessment of spatial distribution and temporal trends of temperature in Iran. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56(4), 549-561. <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00150-9>
- Asakereh, H., Masoodian, S. A., & Tarkarani, F. (2021). Variation in the spatial factors affecting precipitation in relation to the decadal changes of annual precipitation in Iran. *Geography and Environmental Planning*, 32(3), 129-146. [In Persian] https://gep.ui.ac.ir/article_25816_en.html
- Asakereh, H., Tarkarani, F., & Soltani, S. (2014). Circulation Patterns of Heavy Rains in the North West of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 1(1), 85-96. [In Persian] <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2316-fa.html>
- Esmaeili Mahmoudabadi, A., & Sadeghi, F. (2023). Spatial-statistical analysis of lightning events in Iran. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2786331/v1>
- Fattahi, E., & Hejazizadeh, Z. (2006). Temporal and spatial analysis of air masses and its application in monitoring dry and wet periods in southwestern basins of Iran. *Geographical Research*, 21(2), 99-119. [In Persian]
- Fischer, J., Groenemeijer, P., Holzer, A., Feldmann, M., Schröer, K., Battaglioli, F., ... & Antonescu, B. (2024). Invited perspectives: Thunderstorm Intensification from Mountains to Plains. *EGUsphere*, 2024, 1-41. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2798>
- Gao, Z. Y., Chen, Q. X., Gao, P., Huang, C. L., Yuan, Y., & Tan, H. P. (2022). Global flash clustering and infrared radiance characteristics: Analysis of TRMM/LIS data. *Infrared Physics & Technology*, 123, 104202. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2022.104202>
- Ghaedi, S. (2021). Anomalies of precipitation and drought in objectively derived climate regions of Iran. *Hungarian Geographical Bulletin*, 70(2), 163-174. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.70.2.5>
- Goodman, S. J., Blakeslee, R. J., Koshak, W. J., Mach, D., Bailey, J., Buechler, D., ... & Stano, G. (2013). The GOES-R geostationary lightning mapper (GLM). *Atmospheric Research*, 125, 34-49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006>
- Javan, K., & Azizzade, M. R. (2018). Spatial-Temporal Modeling of Thunderstorm Occurrence in the Northwest Iran. *Physical Geography Research*, 50(1), 87-100. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.229988.1007027>
- Kaplan, J. O., & Lau, K. H. K. (2021). The WGLC global gridded lightning climatology and time series. *Earth System Science Data*, 13(7), 3219-3237. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3219-2021>

- Kaplan, J. O., & Lau, K. H. K. (2022). World wide lightning location network (WWLLN) global lightning climatology (WGLC) and time series, 2022 update. *Earth System Science Data*, 14(12), 5665-5670. <https://doi.org/10.5194/essd-14-5665-2022>, 2022
- Kaviani, M. R., & Alijani, B. (2004). *Fundamentals of Meteorology*. Tehran: Samt Publications. [In Persian]
- Khorshiddoust, A. M., Rasouly, A. A., & Fakhari Vahed, M. (2017). Spatio-temporal Distribution of Lightning Phenomenon in Iran Using TRMM Lightning Image Sensor (LIS) Data. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(1), 89-107. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v6i1.53347>
- Kilinc, M., & Beringer, J. (2007). The spatial and temporal distribution of lightning strikes and their relationship with vegetation type, elevation, and fire scars in the Northern Territory. *Journal of Climate*, 20(7), 1161-1173. <https://doi.org/10.1175/JCLI4039.1>
- Lashkari, H. (2011). *Principles and foundations of preparation and interpretation of climatic maps and diagrams*. Tehran: Shahid Beheshti University Publications. [In Persian]
- Lu, B., Charlton, M., Harris, P., & Fotheringham, A. S. (2014). Geographically weighted regression with a non-Euclidean distance metric: a case study using hedonic house price data. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(4), 660-681. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.865739>
- Mofokeng, D. O., Adelabu, A. S., Adepoju, K., & Adam, E. (2019). Spatio-temporal analysis of lightning distribution in golden gate highlands national park (gghnp) using geospatial technology. Paper presented at the Proceedings of IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium In IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8897912>
- Moradi, H. R. (2004). The role of Caspian Sea in the precipitation of northern coasts of Iran. *Journal of Marine Technics and Sciences of Iran, second periods* (2-3), 77-88. [In Persian]
- Price, C. (2009). *Thunderstorms, lightning and climate change*. In *Lightning: Principles, instruments and applications: Review of modern lightning research*. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0_24
- Rafi, M. H., & Mostafa, M. G. (2022). Global lightning phenomena and time series model of lightning flash radiance. Paper presented at the Proceedings of the 2022 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICEPE56629.2022.10044878>
- Rahman, M. S., Yang, R., & Di, L. (2018). Clustering Indian Ocean tropical cyclone tracks by the standard deviational ellipse. *Climate*, 6(2), 39. <https://doi.org/10.3390/cli6020039>
- Rasuli, A. A., Khorshiddoust, A. M., & Fakhari Vahed, M. (2018). Investigating the frequency distribution of lightning and its relation with elevation in Southeast of Iran. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 27(106), 169-178. [IN Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.32340>
- Shindo, T., Matsubara, H., Suda, T., & Miki, T. (2012). Development of a lightning risk assessment program (LIRAP). *IEEE Transactions on Power and Energy*, 132(8), 747-753. <https://dx.doi.org/10.1541/ieejpes.132.747>
- Taszarek, M., Allen, J., Púčik, T., Groenemeijer, P., Czernecki, B., Kolendowicz, L., ... & Schulz, W. (2019). A climatology of thunderstorms across Europe from a synthesis of multiple data sources. *Journal of Climate*, 32(6), 1813-1837. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0372.1>
- Thomson, E. M. (1980). The dependence of lightning return stroke characteristics on latitude. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 85(C2), 1050-1056. <https://doi.org/10.1029/JC085iC02p01050>
- Vahidi Asl, M. S. (2011). *Characteristics of Statistics and Probability in Geography*. Tehran: Payam-e-Noor University. [In Persian]
- Wong, D. W., & Wang, F. (2018). Spatial Analysis Methods. In *Comprehensive geographic information systems*. Oxford: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09598-1>