

Analysis of Cloudiness Characteristics Associated with Heavy Precipitation Events in Northwest Iran Using Era5 Reanalysis Data

Bromand Salahi¹   Ali Shahi² 

1. Corresponding author, Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. **E-mail:** Salahi@uma.ac.ir
 2. Ph. D of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. **E-mail:** ali.shahi@uma.ac.ir

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Keywords Cloudiness Era5 Reanalysis Data Heavy Rainfall Northwest of Iran	This study aimed to analyze the cloudiness cover characteristics associated with heavy precipitation events in northwest Iran. For this purpose, daily precipitation data from 19 synoptic stations located in the study area over a 20-year period (2000–2019) were used. In order to evaluate the cloud cover characteristics, ERA5 reanalysis data were obtained and for the analysis of heavy precipitation events, days that met the criteria of intensity (99th percentile of precipitation) and spatial extent (coverage of at least 30% of stations) were identified. For each identified event, three cloud cover indices were calculated, including cloud cover intensity (TCC), cloud spatial extent based on the area of the region with ($TCC \geq 0.7$), and also the spatial pattern of the cloud cover center of mass. The results of the validation of ERA5 using MERRA-2 data showed that this database has a good performance in representing the cloud cover characteristics associated with heavy precipitation events. Based on the analysis, in 50% of the heavy precipitation events, the center of mass of the spatial pattern of clouds was located southeast of Tabriz station, and in the same proportion, the cloud spatial extent ($TCC \geq 0.7$) was recorded as 1 and complete cloud cover (100%). The maximum cloud spatial coverage among the 16 heavy precipitation events was related to the event of 03/02/2006, while the minimum cloud spatial extent of 0.43 was observed in the event of 03/03/2018. Event-based analysis of cloudiness can provide a more accurate understanding of the role of the spatial structure of cloud systems in the formation of heavy precipitation in the region. The coincidence of the maximum extent of cloudiness with intense heavy precipitation events indicates the importance of continuous cloud cover in intensifying precipitation.
Article History: Received: 18 Ma 2026 Received in revised form: 20 Ju 2026 Accepted: 20 Au 2026 Available online: 23 Au 2026	

Citation: Salahi, B., & Shahi, A. (2026). Analysis of Cloudiness Characteristics Associated with Heavy Precipitation Events in Northwest Iran Using Era5 Reanalysis Data. *Geography*, 24 (89), 107-127.

 <http://doi.org/10.22034/jiga.2026.2084974.1481>



© The Author (s). Publisher: Iranian Geographical Associati This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Extended Abstract

Introduction

Clouds are fundamental components of the Earth's climate system, playing a critical role in precipitation distribution, radiative energy balance, and the hydrological cycle. The physical and microphysical properties of clouds—including cloud-top height, temperature, optical thickness, and cloud fraction—significantly influence precipitation intensity and spatial distribution. This study aims to analyze cloudiness characteristics associated with Heavy Precipitation Events (HPEs) in Northwest Iran. Examining the spatiotemporal variations of clouds and their relationship with extreme precipitation provides valuable insights for weather forecasting, water-resource management, and climate-change impact assessment. The analysis of observational and reanalysis data serves as a robust tool for extracting cloudiness patterns and understanding their linkage to precipitation extremes. Identifying the spatial extent and persistence of cloud cover during HPEs also improves the interpretation of precipitation-generating systems and supports regional early-warning, disaster-risk management, and adaptation planning efforts.

Methodology

The study area covers Northwest Iran, encompassing the provinces of West Azerbaijan, East Azerbaijan, and Ardabil (35°–40° N, 43°–49° E). Daily precipitation data from 19 synoptic stations were obtained from the Iran Meteorological Organization (IRIMO) for the period 2000–2019. Total Cloud Cover (TCC) reanalysis data were extracted from the ERA5 dataset. Hourly Total Cloud Cover data for the identified HPE days were retrieved and converted into daily averages. For validation purposes, three selected events were compared against the MERRA-2 dataset. Heavy Precipitation Events were identified based on a combined criterion of intensity (99th percentile and above) and spatial extent (at least 30% of stations and a minimum of five stations recording ≥ 20.4 mm). The spatial contribution of stations to these events was mapped using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method in a GIS environment. Cloudiness characteristics, including intensity, spatial extent, and Total Cloud Cover patterns for 16 Heavy Precipitation Events, were analyzed using ERA5. For each event, the daily mean Total Cloud Cover, the percentage of area with TCC ≥ 0.7 , and the center of mass of cloud cover were calculated. In addition, spatial maps were produced to illustrate the distribution and extent of cloud cover during each event across the study region. The performance of ERA5 for three selected events was evaluated using Willmott's Index of Agreement (d), Root Mean Square Error (RMSE), and Bias.

Results and Discussion

A total of 16 Heavy Precipitation Events were identified during the study period, forming the basis for analyzing cloudiness characteristics and evaluating reanalysis-data performance. The analysis detailed the spatial coverage of Heavy Precipitation Events, the stations recording maximum precipitation, and the peak precipitation values for each event. Sardasht station recorded the maximum precipitation in 10 out of 16 events (62.5%), highlighting it as a hotspot for precipitation extremes in the region. The highest recorded precipitation reached 185 mm on 3 February 2006 at this station. Validation of ERA5 against MERRA-2 using Willmott's d, RMSE, and Bias demonstrated that ERA5 performs reliably in representing cloudiness features associated with Heavy Precipitation Events in Northwest Iran. Pixel-based Total Cloud Cover patterns for the 16 events revealed that, although cloud intensity and extent varied across events, high Total Cloud Cover values were predominantly concentrated in the southwestern half of the region, aligning with areas of high station participation. This spatial correspondence indicates a close association between extensive cloud cover and the occurrence of widespread heavy precipitation across the monitoring network. The gradient from minimum to maximum Total Cloud Cover values indicates variations in cloud-system intensity; more intense events were associated with larger spatial clusters of high Total Cloud Cover. This recurring pattern suggests that the spatial structure of cloud cover during Heavy Precipitation Events in this region follows a relatively stable configuration.

Conclusion

The maximum spatial extent of Heavy Precipitation Events was observed on 18 February 2018, when 10 stations simultaneously recorded heavy precipitation, consistent with the extensive cloud cover shown in the pixel maps. The validation results indicated reduced error and optimal statistical performance of ERA5 during high-intensity Heavy Precipitation Events. In 50% of the events, the center of mass of cloud cover was located southeast of Tabriz station, with a spatial cloud extent (TCC ≥ 0.7) of 1, indicating 100% cloud cover. The maximum spatial cloud coverage among the 16 events occurred on 3 February 2006, whereas the minimum value (0.43) was recorded on 30 March 2018.

Ethical Considerations

The authors have complied with all ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this has been approved by all authors.

Author Contributions

First author: Research design, supervision of research stages, review and control of results, correction, revision and finalization of the article.

Second author: Data collection, initial calculations, statistical analysis of data, interpretation of information and results, preparation of draft article.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest regarding the authorship or publication of this article.

Funding

This research received no external funding.

Acknowledgments

The honorable reviewers are appreciated.

References

- Akbary, M. & Sayad, V. (2021). Analysis of climate change studies in Iran. *Physical Geography Research*, 53(1), 37-74. [doi: 10.22059/jphgr.2021.301111.1007528](https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.301111.1007528) [Persian]
- Alijani, B., Khosravi, M., Mahmood, & Esmailnejad, M. (2011). A synoptic analysis of January 6, 2008 heavy precipitation in the southeast of Iran. *Journal of Climate Research*, 1(3-4), 3-14. <https://sid.ir/paper/213093/en> [Persian]
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S., Sherwood, S., Stevens, B., & Zhang, X. (2013). Clouds and aerosols. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 571-657). Cambridge University Press.
- Eskandari Damane, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarnivand, H. & Barati, A. A. (2020). Simulation and forecasting of climatic components of temperature and precipitation in arid regions (Case study: Minab plain). *Geography*, 18(66), 110-128. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1399.18.3.7.6> [Persian]
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 923-1054). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
- Ghadami, F., Hejazizadeh, Z. & Alijani, B. (2018). Identifying the circulation systems of Ward Sepehr in relation to hazardous rainfall in the Karkheh catchment area. *Geography*, 16(58), 21-32. https://mag.iga.ir/article_253444.html?lang=en [Persian]
- Ghavidel, F., R. Banafsheh, M. & Mohammadi, G. H. (2024). Analysis of the temporal and spatial distribution of clouds in the basin of the Urmia Lake. *Journal of Hydrogeomorphology*, 11(39), 40-19. [doi: 10.22034/hyd.2024.59481.1714](https://doi.org/10.22034/hyd.2024.59481.1714) [Persian]
- Gholami, A., Jalali, M., Mirmousavi, H. & Raipour, K. (2024). Review and Analysis of Annual Cloudiness Cycles in Iran (1991-2021). *Climate Change Research*, 5(19), 1-18. [doi: 10.30488/ccr.2024.442999.1201](https://doi.org/10.30488/ccr.2024.442999.1201) [Persian]
- Halimi, M., Rezaei, M., Mohammadi, C., & others. (2017). Association between cloudiness and rainfall over Fars province in Iran. *Russian Meteorology and Hydrology*, 42(10), 671-676. <https://doi.org/10.3103/S1068373917100077>

- Hedjazizadeh, Z., Karbalaee, A. & Kazemiazarr, M. (2025). Investigating the Impact of Climate Change on Extreme Precipitation Events in East Azerbaijan Province. *Geography*, 22(83), 1-20. [doi: 10.22034/jiga.2025.2048574.1363](https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2048574.1363) [Persian]
- Huang, H., Wang, Q., Liu, C., & Zhou, C. (2024). Optimal estimation of cloud properties from thermal infrared observations with a combination of deep learning and radiative transfer simulation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(12), 7129–7141. <https://doi.org/10.5194/amt-17-7129-2024>
- Huang, X., Cole, J. N. S., He, F., Potter, G. L., Oreopoulos, L., Lee, D., Suarez, M., & Loeb, N. (2013). Longwave band-by-band cloud radiative effect and its application in GCM evaluation. *Journal of Climate*, 26(2), 405–467. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00535.1>
- Mishra, A. K. (2019). On the linkage between changes in cloud cover and precipitation extremes over Central India. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 86, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2019.05.002>
- Mostafaii, H., Alijani, B., & Saligheh, M. (2015). Synoptic analysis of widespread heavy rains in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 2(4), 65–76. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.4.65> [Persian]
- Muthiah, K., Arunya, K. G., Sridhar, V., & Patakamuri, S. K. (2025). Heavy Rainfall Impact on Agriculture: Crop Risk Assessment with Farmer Participation in the Paravandar Coastal River Basin. *Water*, 17(5), 658. <https://doi.org/10.3390/w17050658>
- Naghavi, M., Alijani, B., Akbari, M. & Fattahi, I. (2021). Relationship between topographic indices and inclusive rainfall in Alborz mountainous region (research article). *Geography*, 19(68), 51-67. https://mag.iga.ir/article_245414.html?lang=en [Persian]
- Nasiri, D., Borna, R., & Zohourian Pordel, M. (2024). Detection of the effect of cloud microphysical structure on precipitation in Khuzestan province using MODIS cloud products. *Journal of Geographical Studies*, 24(72), 25. <https://doi.org/10.52547/jgs.24.72.471> [Persian]
- Raispour, K. & Razmi, R. (2020). Estimation of Cloud Fraction in the Atmosphere of Iran Using Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR). *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 257-271. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.3.18.6> [Persian]
- Sadeghi, A., pazhoh, F. & Rezaei, M. (2023). Identification and analysis of sea level pressure patterns of heavy and pervasive precipitation autumn season in the western part of Iran. *Geography*, 21(76), 211-237. <https://dor.isc.ac/dor/http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1402.21.76.10.1> [Persian]
- Salahi, B. & Shahi, A. (2025). Assessment of Uncertainty of Reanalyzed Snow Depth in Northwestern Iran Using Era5-Land and Merra-2. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 1(15), 132-152. [doi: 10.22067/geoh.2025.95012.1604](https://doi.org/10.22067/geoh.2025.95012.1604) [Persian]
- Shadpour, A. & Lashgari, H. (2020). Synoptic-Satellite Analysis of Heavy Snow Occurrence in Guilan Province (Case Study on January 13, 2008). *Geography*, 17(63), 60-75. https://mag.iga.ir/article_246005.html?lang=en [Persian]
- Shahi, A. & Salahi, B. (2025). Spatial and Temporal Assessment of the Accuracy of Precipitation Estimates from the ERA5-Land Reanalysis Database in Isfahan Province over the Past Two Decades. *Geography*, 23(86), 43-69. [doi: 10.22034/jiga.2025.2066496.1426](https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2066496.1426) [Persian]
- Shahi, A. & Salahi, B. (2025). Tracking moisture sources and analysis of instability indicators leading to heavy rains in Northwest Iran. *Researches in Earth Sciences*, 16(1), 128-151. [doi: 10.48308/esri.2025.235940.1225](https://doi.org/10.48308/esri.2025.235940.1225) [Persian]
- Stathopoulos, S., Gemitzi, A., & Kourtidis, K. (2024). Statistical downscaling of remote sensing precipitation estimates using MODIS cloud properties data over Northeastern Greece. *Remote Sensing in Earth Systems Science*, 7(2), 113–122. <https://doi.org/10.1007/s41976-024-00107-1>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2025). How will climate change affect extreme precipitation across the United States? Retrieved from <https://www.epa.gov/climatechange-science/extreme-precipitation>
- Wu, Y., Gao, J., & Zhao, A. (2024). Cloud properties and dynamics over the Tibetan Plateau—A review. *Earth-Science Reviews*, 248, 104633. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104633>
- Xie, X., Ma, L., Yao, J., & Mao, W. (2025). Spatiotemporal Variability of Cloud Parameters and Their Climatic Impacts over Central Asia Based on Multi-Source Satellite and ERA5 Data. *Remote Sensing*, 17(15), 2724. <https://doi.org/10.3390/rs17152724>
- Yao, B., Teng, S., Lai, R., Xu, X., Yin, Y., Shi, C., & Liu, C. (2020). Can atmospheric reanalyses (CRA and ERA5) represent cloud spatiotemporal characteristics?. *Atmospheric Research*, 244, 105091. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105091>
- Zhou, C., Zelinka, M., & Klein, S. (2016). Impact of decadal cloud variations on the Earth's energy budget. *Nature Geoscience*, 9(12), 871–874. <https://doi.org/10.1038/ngeo2828>



تحلیل ویژگی‌های ابرناکی مرتبط با رخدادهای بارش سنگین در شمال غرب ایران با استفاده از داده‌های بازکاوی ERA5

برومند صلاحی^۱، علی شاهی^۲

۱. نویسنده مسئول، استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

E: Salahi@uma.ac.ir

۲. دکترای آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

E: ali.shahi@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله چکیده

واژگان کلیدی

کریدور
ژئوپلیتیک صلح
ایران
ترکیه
محورهای مواصلاتی

این مطالعه با هدف تحلیل ویژگی‌های ابرناکی مرتبط با رخدادهای بارش سنگین در شمال غرب ایران انجام شد. برای این منظور، داده‌های روزانه بارش از ۱۹ ایستگاه همدیدی واقع در منطقه مطالعه طی دوره ۲۰ ساله (۲۰۱۹-۲۰۰۰) به کار گرفته شد. به منظور ارزیابی ویژگی‌های ابرناکی، داده‌های بازکاوی ERA5 دریافت و برای تحلیل رخدادهای بارش سنگین، روزهایی که معیارهای شدت (صدک ۹۹ بارش) و گستردگی مکانی (پوشش حداقل ۳۰ درصد ایستگاه‌ها) را برآورده می‌کردند، شناسایی شدند. برای هر رخداد شناسایی شده، سه شاخص ابرناکی شامل شدت پوشش ابر (TCC)، گستردگی فضایی ابر بر اساس مساحت منطقه با $(TCC \geq 0.7)$ و همچنین الگوی فضایی مرکز جرم پوشش ابر محاسبه شد. نتایج اعتبارسنجی ERA5 با استفاده از داده‌های MERRA-2 نشان داد که این پایگاه عملکرد مناسبی در بازنمایی ویژگی‌های ابرناکی مرتبط با رخدادهای بارش سنگین دارد. بر اساس تحلیل‌ها، در ۵۰ درصد از رخدادهای بارش سنگین، مرکز جرم الگوی فضایی ابرها در جنوب شرق ایستگاه تبریز قرار داشت و در همان نسبت، گستردگی فضایی ابر $(TCC \geq 0.7)$ برابر با یک و پوشش ابری کامل (۱۰۰ درصد) ثبت شد. بیشینه پوشش مکانی ابر در میان ۱۶ رخداد بارش سنگین مربوط به رخداد ۲۰۰۶/۰۲/۰۳ بود، در حالی که کمینه گستردگی فضایی ابر برابر با ۰/۴۳ در رخداد ۲۰۱۸/۰۳/۳۰ مشاهده شد. تحلیل رخدادمحور ابرناکی می‌تواند درک دقیق‌تری از نقش ساختار فضایی سامانه‌های ابری در شکل‌گیری بارش‌های سنگین منطقه فراهم کند. هم‌زمانی بیشینه گستردگی ابرناکی با رخدادهای بارش سنگین شدید، بیانگر اهمیت پوشش ابری پیوسته در تشدید بارش‌هاست.

تاریخ دریافت

۱۴۰۴/۱۲/۲۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۵/۲۹

تاریخ چاپ:

۱۴۰۵/۰۶/۰۱

استناد: صلاحی، برومند؛ شاهی، علی. (۱۴۰۵). تحلیل ویژگی‌های ابرناکی مرتبط با رخدادهای بارش سنگین در شمال غرب ایران با استفاده از داده‌های بازکاوی ERA5، جغرافیا، ۲۴(۸۹)، ۱۰۷-۱۲۷.

doi <http://doi.org/10.22034/jiga.2026.2084974.1481>

صاحب امتیاز: انجمن جغرافیایی ایران

© نویسندگان



مقدمه و پیشینه

بارش‌های سنگین و رخداد‌های حدی نه تنها باعث سیلاب‌های مخرب می‌شوند بلکه خسارت‌های اقتصادی چشمگیری را به بخش‌های کشاورزی و منابع آب وارد می‌کنند، به گونه‌ای که کاهش محصول، فرسایش خاک و ناپایداری منابع آب از پیامدهای بارش شدید گزارش شده‌اند (موتیا^۱ و همکاران، ۲۰۲۵: ۱). بنا بر شواهد، افزایش بارش‌های سنگین در چند دهه اخیر با تغییر اقلیم مرتبط بوده و مدیریت منابع آب را با چالش مواجه ساخته است (اکبری و صیاد، ۱۴۰۰: ۳۷). همچنین، بارش‌های شدید می‌توانند زیرساخت‌ها را تخریب و خدمات عمومی را مختل کنند که این امر نیاز به تحلیل دقیق و پایش رخداد‌های بارش شدید را در سطح منطقه‌ای، به ویژه در نواحی آسیب‌پذیر مانند شمال غرب ایران، ضروری می‌سازد (EPA^۲, 2025). بارش‌های سنگین در مناطق کوهستانی شمال غرب ایران، عمدتاً تحت تأثیر سامانه‌های سینوپتیکی و فرایندهای صعود دینامیکی رخ می‌دهند (شاهی و صلاحی، ۱۴۰۴: ۸).

حلیمی^۳ و همکاران (۲۰۱۷) در استان فارس رابطه مجموع بارش با ویژگی‌های ابری را برای سه نوع بارش سبک (چهار میلی‌متر)، متوسط (۱۷ میلی‌متر) و سنگین (۶۲ میلی‌متر) بررسی کردند. ویژگی‌های ابری شامل دمای رأس ابر، فشار رأس ابر، ضخامت نوری ابر و مسیر آب ابری از داده‌های ماهواره‌ای MODIS استخراج شد و بارش سه‌ساعته نیز از TRMM دریافت شد. آن‌ها با استفاده از مدل رگرسیون چندمتغیره توانستند پراکنش مکانی بارش را پیش‌بینی کنند. نتایج نشان داد که بین ویژگی‌های ابری و بارش سنگین یک رابطه مثبت و معنی‌دار قوی وجود دارد، در حالی که برای بارش سبک چنین رابطه‌ای مشاهده نشد. مدل توسعه‌یافته به ترتیب ۶۴ درصد، ۴۷ درصد و ۲۴ درصد از واریانس مکانی بارش سنگین، متوسط و سبک را تبیین کرد و مشخص شد که مسیر آب ابری بیشترین نقش را در تعیین پراکنش مکانی بارش دارد.

میشرا^۴ (۲۰۱۹) در هند مرکزی و طی دوره موسمی تابستان (۲۰۱۵-۱۹۹۸) با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای، ارتباط میان تغییرات بارش‌های حدی و پوشش ابری را بررسی کرد. در این پژوهش، ابرهای سیروس بدون بارش حذف شدند. نتایج نشان داد که بارش‌های سنگین (۶۰ میلی‌متر و بیشتر در روز) عمدتاً با ابرهای دارای رأس بسیار سرد (۲۲۰ کلون و کمتر)، بارش‌های متوسط (۲۰ تا ۶۰ میلی‌متر در روز) با ابرهای میانی (۲۲۰ تا ۲۴۵ کلون) و بارش‌های ضعیف (کمتر از ۲۰ میلی‌متر در روز) با ابرهای کم‌ارتفاع (بیشتر از ۲۴۵ کلون) همراه هستند. همچنین، افزایش در صدک‌های بالای بارش سنگین (صدک‌های ۹۰، ۹۵، ۹۹ و ۹۹/۹) به‌طور معنی‌داری با افزایش پوشش ابرهای همرفتی عمیق و بسیار عمیق مرتبط بود و قوی‌ترین همبستگی در صدک ۹۵ مشاهده شد. از سوی دیگر، کاهش در بارش‌های ضعیف با کاهش پوشش ابرهای کم‌ارتفاع رابطه داشت. این نتایج نشان داد که رفتار بارش‌های حدی به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر تغییرات ویژگی‌های ابری و تغییر اقلیم قرار می‌گیرد.

یاو^۵ و همکاران (۲۰۲۰) پوشش ابری دو داده بازکاوی ERA5 و CRA را با استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای MODIS ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که هر دو داده الگوهای زمانی و مکانی ابر را به‌طور کلی بازنمایی می‌کنند، اما ERA5 بر فراز خشکی تطابق دقیق‌تری با MODIS دارد و بر فراز اقیانوس حدود ۱۰ درصد کمتر برآورد می‌کند. CRA نیز حدود ۲۰ درصد پوشش ابری جهانی را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند و این کم‌برآوردی در نواحی کم‌ابر و خشک عرض‌های پایین و میانی برجسته‌تر است. همچنین هر دو محصول بازکاوی توانستند تغییرات بین‌ساله پوشش ابری مرتبط با ENSO را ثبت کنند، هرچند ERA5 عملکرد دقیق‌تری داشت.

کیم^۶ و همکاران (۲۰۲۳) ویژگی‌های ابرهای همرفتی استوایی را بررسی کردند تا احتمال وقوع بارش سنگین پیش‌بینی شود. با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم‌های خوشه‌بندی SOM و شبکه عصبی، مشخص شد که ابرهای دارای دمای رأس کمتر از ۲۳۰ کلون و شعاع مؤثر قطرات ۲۰ میکرومتر و بیشتر، بیشترین احتمال بارش، بیش از ۷۰ درصد، را دارند. این شرایط در

1. Muthiah
2. Environmental Protection Agency
3. Halimi
4. Mishra
5. Yao
6. Kim

مناطق و دوره‌های مختلف ثابت بود و می‌تواند برای پیش‌بینی سریع بارش‌های استوایی کاربرد داشته باشد. هانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۴) روش ترکیبی مبتنی بر شبیه‌سازی RTM و الگوریتم یادگیری ماشین برای بازیابی ویژگی‌های ابری از داده‌های مادون‌قرمز MODIS ارائه کردند. این روش نسبت به الگوریتم‌های مستقل OE یا یادگیری ماشین عملکرد بهتری دارد و هم فرآیندهای فیزیکی را صریح لحاظ می‌کند و هم از اطلاعات آماری پیشین بهره می‌برد. یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند اثربخشی روش‌های سنتی سنجش از دور را افزایش دهند.

استاسوپولوس^۲ و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از ویژگی‌های ابری MODIS شامل COT، CER و CWP، داده‌های بارش IMERG را از وضوح ۰/۱ درجه به ۰/۰۱ درجه ریزمقیاس کردند. نتایج نشان داد که رگرسیون چندمتغیره همراه با اصلاح باقیمانده‌ها دقت برآوردهای ریزمقیاس را افزایش داده و با داده‌های ایستگاهی باران‌سنج همبستگی بالاتری دارد که این روش را به ابزاری مؤثر برای مقیاس‌کاهی داده‌های سنجش از دور با وضوح پایین تبدیل می‌کند. شی^۳ و همکاران (۲۰۲۵) در آسیای مرکزی با استفاده از داده‌های بازکاوی و سنجش از دور ویژگی‌های فضایی-زمانی ابرها را بررسی کردند و نشان دادند که پوشش ابری از جنوب غرب به شمال شرق افزایش می‌یابد و ابرهای میانی و پایین در مناطق بلندمرتبه غالب هستند. یافته‌ها نشان داد که همه انواع ابرها در دوره ۲۰۲۰-۱۹۸۱ روند کاهشی داشته‌اند و کاهش بیشینه پوشش ابری در تابستان (بر اساس داده‌های ماهواره‌ای) و در بهار (بر اساس داده‌های بازکاوی) مشاهده شد. نتایج نشان داد که تغییرات پوشش ابری از طریق مکانیسم‌های تابشی، اقلیم محلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بارش با پوشش ابری همبستگی مثبت دارد. ترکیب فاز ابری عمدتاً از آب مایع تشکیل شده و بیش از ۴۰ درصد را شامل می‌شود که چرخه هیدرولوژیکی منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

قدمی و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه آبریز کرخه، با استفاده از داده‌های روزانه ۳۳ ایستگاه طی دوره ۱۹۶۷-۲۰۱۲ و اعمال صدک ۹۵ درصد، ۳۱۰ روز بارش سنگین را شناسایی کردند. سپس با تحلیل مؤلفه‌های اصلی (آرایه T با چرخش پرومکس) بر روی داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل اخذشده از NCEP/NCAR، چهار الگوی همدیدی استخراج شد. نتایج نشان داد بارش‌های سنگین منطقه عمدتاً ناشی از استقرار ناوه‌های عمیق، سردچال‌های بریده و الگوهای بندالی دوقطبی، امگا و رکس بوده است. شادپور و لشگری (۱۳۹۸) در استان استان گیلان، با رویکرد همدیدی-ماهواره‌ای به تحلیل برف سنگین (مطالعه موردی ۱۳ ژانویه ۲۰۰۸) پرداختند. داده‌های بارش، عمق برف و دمای روزانه دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۶ اخذ و بر اساس صدک ۹۹ روزهای برفی شاخص انتخاب شد. سپس با تحلیل عاملی (واریمکس) الگوی همدیدی تعیین و با نقشه‌های دمای سطح زمین و شاخص بررسی گردید. نتایج نشان داد تشدید نسیم دریا، چینش قائم شدید و شرایط سلونوئیدی (ناواگرا) همراه با تأمین رطوبت از روی دریای مازندران عامل اصلی برف سنگین بوده و ماندگاری سامانه نیز تحت تأثیر بلوکی‌نگ امگایی بر فراز دریای سیاه و اروپای شرقی شکل گرفته است.

رئیس پور و رزمی (۱۳۹۹) توزیع مکانی و میانگین بلندمدت ابرناکی در جو ایران را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MISR طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۱ بررسی کردند. داده‌ها با گام‌های مکانی ۰/۵ درجه $\times$ ۰/۵ درجه و زمانی ماهانه استخراج و با داده‌های ۴۴ ایستگاه سینوپتیک صحت‌سنجی شدند. نتایج نشان داد که میانگین درصد ابرناکی در ایران حدود ۲۵ درصد است، کمتر از میانگین جهانی (۵۰ درصد) و بیش‌ترین ابرناکی در سواحل دریای خزر، نواحی مرتفع آذربایجان، زاگرس و خراسان و کمترین آن در ایران مرکزی، شرق و جنوب شرق مشاهده شد. از منظر فصلی، بیشترین ابرناکی در زمستان و کمترین در تابستان و در مقیاس ماهانه بیش‌ترین/کم‌ترین مربوط به فوریه/سپتامبر بود. همچنین روند کلی درصد ابرناکی در طول دوره مورد مطالعه کاهش داشته که با گرمایش جهانی و تغییر اقلیم مرتبط است.

اسکندری دامنه و همکاران (۱۳۹۹) در ایستگاه‌های سینوپتیک بندرعباس و میناب، تغییرات دما و بارش ماهانه را برای دو دوره آینده (۲۰۱۵-۲۰۴۴ و ۲۰۴۵-۲۰۷۴) بر اساس خروجی مدل گردش عمومی CanESM2 و سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 و RCP8.5 بررسی کردند. مقیاس‌کاهی با مدل SDSM انجام و روندها با آزمون من-کندال تحلیل شد. نتایج نشان داد دما در همه

1. Huang

2. Stathopoulos

3. Xie

4. Normalized Difference Snow Index

سناریوها به‌ویژه RCP8.5 افزایش می‌یابد، در حالی که بارش عمدتاً روند کاهشی دارد (به‌جز افزایش محدود در RCP2.6). بیشترین کاهش بارش مربوط به ایستگاه میناب بوده و در مجموع بر ضرورت مدیریت سازگار منابع آب در آینده تأکید شده است. نقوی و همکاران (۱۴۰۰) در رشته‌کوه البرز، با استفاده از داده‌های ۱۲۹ روز بارش فراگیر در سه فصل و ۲۴ شاخص توپوگرافی، رابطه بارش و ناهمواری را با آزمون همبستگی پیرسون بررسی کردند. نتایج در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد بیشترین روابط معنادار مربوط به بهار و کمترین مربوط به زمستان است. همچنین اختلاف ارتفاع بلوک‌های ۵۰ کیلومتری مهم‌ترین شاخص مؤثر شناخته شد و در مجموع ۲۲ شاخص دارای رابطه خطی معنادار با بارش بودند.

صادقی و همکاران (۱۴۰۲) الگوهای فشار تراز دریا و شرایط همدید و ترمودینامیک روزهای بارش ابرسنگین در نیمه غربی ایران را بررسی و نشان دادند که ناهوهای عمیق و استقرار آن بر روی منابع رطوبتی شرایط را برای تزریق رطوبت به نیمه غربی ایران را فراهم کرده‌اند.

غلامی و همکاران (۱۴۰۳) چرخه‌ها و رفتارهای زمانی ابرناکی در ایران را با استفاده از داده‌های روزانه ۳۰ ایستگاه طی ۳۱ سال بررسی کردند. روند داده‌ها با آزمون ناپارامتری شیب سن تحلیل شد و نتایج نشان داد که در ۱۶ ایستگاه کاهش معنادار و در سه ایستگاه افزایش معنادار ابرناکی رخ داده است و سایر ایستگاه‌ها فاقد روند معنادار بودند. تحلیل طیفی برای استخراج چرخه‌های معنادار انجام شد و نمودارهای دوره‌نگار با فاصله اطمینان ۹۵ درصد ترسیم شد. یافته‌ها نشان داد که ایستگاه‌های تک‌چرخه‌ای بیشترین فراوانی را در مناطق جنوب، مرکز، شرق و شمال شرق و ایستگاه‌های چندچرخه‌ای با فراوانی کمتر در شمال، شمال غرب و جنوب غرب قرار دارند. همچنین بیشترین سهم واریانس مربوط به همساز چهاردهم و بیشترین دوره‌های بازگشت برای دوره‌های دو-پنج ساله با احتمال رخداد ۳۲ درصد و کمترین برای دوره‌های بیش از ۱۰ سال با احتمال شش درصد بوده است.

نصیری و همکاران (۱۴۰۳) ارتباط بین ساختار میکروفیزیکی ابرناکی و توزیع فضایی بارش در استان خوزستان را با استفاده از داده‌های MODIS (محصول MOD06) بررسی کردند. در این پژوهش، سه رخداد بارش فراگیر شامل بارش‌های سنگین، متوسط و سبک انتخاب شد و ویژگی‌های میکروفیزیکی ابرها شامل دما، فشار، ارتفاع قله، ضخامت اپتیکی و نسبت ابرناکی استخراج گردید. نتایج نشان داد که بارش‌های سنگین و متوسط با ابرهای تکامل‌یافته، نسبت ابرناکی بالا (بیش از ۷۵ درصد)، گسترش عمودی شش تا نه کیلومتر و ضخامت اپتیکی ۴۰ تا ۵۰ همراه بوده‌اند؛ در حالی که بارش سبک با ابرهای پراکنده، نسبت ابرناکی کمتر از ۱۰ درصد و ارتفاع قله سه تا پنج کیلومتر رخ داده است. تحلیل همبستگی فضایی نیز تأیید کرد که متغیرهای میکروفیزیکی ابرها با بارش ثبت‌شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد، رابطه معنی‌داری دارند.

قویدل و همکاران (۱۴۰۳) تغییرات زمانی و توزیع مکانی پوشش کلی ابرناکی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را با استفاده از داده‌های مشاهداتی پنج ایستگاه و محصول ماهواره‌ای MODIS (CFFCM) بررسی کردند. داده‌ها بر اساس استاندارد ICAO به پنج کلاس آسمان تقسیم و تغییرات ابرناکی تحلیل شد. نتایج نشان داد که آسمان اغلب صاف یا کمی ابری است و کلاس‌های نیمه‌ابری و تمام ابری روند کاهشی دارند. پوشش ابرناکی با بارش سالانه رابطه مستقیم و با دما، تبخیر و ساعات آفتابی رابطه معکوس دارد. همچنین پراکندگی مکانی ابرناکی فصلی با جریان‌های همدیدی و توپوگرافی منطقه تطابق دارد.

حجازی‌زاده و همکاران (۱۴۰۳) اثرات تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی بارش‌های شدید در آذربایجان شرقی را مورد مطالعه قرار دادند. داده‌های بارندگی روزانه از شش ایستگاه هواشناسی در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ گردآوری و تحلیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که در آینده، شدت و فراوانی بارش‌های شدید به‌طور قابل‌توجهی افزایش و هم‌زمان در برخی مناطق کاهش خواهد یافت. افزایش شدت و فراوانی بارش‌های شدید می‌تواند پیامدهای جدی از جمله افزایش خطر سیل، فرسایش خاک، خسارات به زیرساخت‌ها و تأثیرات منفی بر کشاورزی و منابع آب را در پی داشته باشد. صلاحی و شاهی (۱۴۰۴) دقت تخمین عمق برف دو پایگاه بازکاوی ERA5-Land و MERRA-2 را در شمال غرب ایران با استفاده از داده‌های ۱۰ ایستگاه همدیدی و در دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۴-۲۰۲۳) ارزیابی کردند. داده‌های مشاهداتی از سازمان هواشناسی ایران و داده‌های بازکاوی از پایگاه‌های کوپرنیکس و ناسا دریافت شد. به‌منظور تصحیح اریبی داده‌ها از روش نگاشت چارکی (Quantile Mapping) استفاده گردید و عملکرد دو

پایگاه با شاخص های آماری KGE^1 ، $RMSE^2$ ، ضریب همبستگی پیرسن و نمودار تیلور در مقیاس ماهانه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که ERA5-Land در بازنمایی عمق برف، به ویژه در فصل زمستان، عملکرد بهتری نسبت به MERRA-2 داشته و بیشترین دقت آن در ایستگاه های غربی و مرکزی منطقه مشاهده شده است؛ در حالی که عدم قطعیت داده ها به سمت شرق منطقه افزایش می یابد.

شاهی و صلاحی (۱۴۰۴) ارزیابی مکانی و زمانی دقت تخمین بارش پایگاه بازکاوی ERA5-Land استان اصفهان (ایران) در دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۳ انجام دادند. داده های ایستگاه زمینی از سازمان هواشناسی ایران و داده های مربوط به بازکاوی ERA5-Land از درگاه اینترنتی کوپرنیکس دریافت شد. مقایسه بارش های برآورد شده بازکاوی با ایستگاه های هواشناسی همدیدی زمینی در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از نمودار تیلور و شاخص های آماری کلیدی نظیر $RMSE$ ، NSE ، میانگین خطا، $BIAS$ و شاخص ویلموت انجام گرفت. برای افزایش دقت برونداد پایگاه بازکاوی از روش تصحیح اریبی نگاشت چارک استفاده گردید. یافته ها حاکی از آن است که بهترین عملکرد پایگاه ERA5-Land در فصول زمستان و پاییز است و همچنین بیشینه و کمینه اختلاف داده های بارش بین دو پایگاه داده، به ترتیب در غرب و شمال منطقه مورد مطالعه رؤیت شده است.

بارش های سنگین در شمال غرب ایران منجر به خسارات اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی می شوند. داده های ایستگاهی بارش پوشش مکانی کافی ندارند و مطالعات موجود به طور کامل نمی توانند تغییرپذیری رخدادهای شدید را بازنمایی کنند. از آنجا که ابرها نقش اصلی در تولید بارش و انتقال رطوبت و انرژی دارند، تحلیل ویژگی های ابر و ارتباط آن ها با رخدادهای بارش سنگین، ضرورت علمی و عملی این مطالعه را مشخص می سازد.

نوآوری این مطالعه در تمرکز رخدادمحور بر بارش های سنگین شمال غرب ایران، استفاده همزمان از داده های ERA5 و MERRA-2 و تحلیل ویژگی های ماکروفیزیکی و ریزفیزیکی ابر است. چنین رویکردی، چارچوبی علمی برای شناسایی شاخص های ابر مرتبط با بارش سنگین فراهم می کند و می تواند به بهبود پیش بینی و مدل سازی هیدرولوژیکی کمک کند. هدف این پژوهش، تحلیل و تبیین ویژگی های ابرناکی همراه با رخدادهای بارش سنگین در شمال غرب ایران است؛ به گونه ای که با شناسایی شاخص های کمی پوشش ابر و بررسی ساختار فضایی آن ها، زمینه درک بهتر سازوکارهای مؤثر بر بارش های حدی منطقه فراهم شود.

مبانی نظری

ابرها که بیش از ۶۵ درصد سطح زمین را می پوشانند، یکی از عناصر کلیدی سامانه زمین-جو به شمار می روند و به طور مستقیم و غیرمستقیم بر تکامل سامانه های جوی، چرخه آب، بودجه تابشی و در نهایت بر رفتار اقلیم اثر می گذارند (هانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۳: ۴۰۶؛ بوچر^۴ و همکاران، ۲۰۱۳: ۵۷۲). ابرها از طریق الگوی مکانی-زمانی خود، تأثیر چشمگیری بر تعادل تابشی، چرخه هیدرولوژیکی و تغییر اقلیم منطقه ای اعمال می کنند (ژئو^۵ و همکاران، ۲۰۱۶: ۸۷۱). ویژگی های ابرها به دو دسته کلان فیزیکی و ریزفیزیکی تقسیم می شوند. ویژگی های کلان فیزیکی شامل پوشش ابری، ارتفاع رأس ابر و ارتفاع پایه ابر (CBH) است، در حالی که ویژگی های ریزفیزیکی شامل مجموع ستونی آب مایع ابر (TCLW)، مجموع ستونی آب یخ ابر (TCIW) و شعاع مؤثر ذرات ابری می باشد. بر اساس این ویژگی های کلان فیزیکی و ریزفیزیکی، ابرها را می توان به انواع مختلفی طبقه بندی کرد (وو^۶ و همکاران، ۲۰۲۴). ویژگی های کلان فیزیکی و ریزفیزیکی ابرها در واکنش به تغییرات ترکیب شیمیایی جو و گرمایش سطحی جهانی دچار تغییر می شوند و به طور قابل ملاحظه ای عدم قطعیت موجود در برآوردهای تغییر اقلیم را تشدید می کنند (فارستر^۷ و همکاران، ۲۰۲۱: ۹۴۵).

1. Kling-Gupta Efficiency
2. Root Mean Square Error
3. Huang
4. Boucher
5. Zhou
6. Wu
7. Forster

روش پژوهش

در این پژوهش، از داده‌های بارش روزانه ۱۹ ایستگاه همدیدی واقع در شمال غرب ایران برای دوره زمانی (۲۰۱۹-۲۰۰۰) استفاده شد که از سازمان هواشناسی ایران (IRIMO)^۱ دریافت گردید. همچنین، داده‌های بازکاوی مربوط به ویژگی‌های ابرناکی از پایگاه کوپرنیکس^۲ و مجموعه داده ERA5 استخراج شد. داده‌های TCC^۳ از ERA5 برای هر روز رخداد بارش سنگین شناسایی شده در تحقیق، به صورت ساعتی^۴ دریافت و مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور اعتبارسنجی بروندادهای ERA5 در مقیاس رخداد، داده‌های متناظر مربوط به سه رخداد منتخب از پایگاه ناسا^۵ و مجموعه داده MERRA-2 مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که هدف این مطالعه بررسی پوشش کل ابر در مقیاس سطحی و مقایسه مستقیم آن با داده‌های ERA5 است، استفاده از داده‌های تک سطحی و دوبعدی ضروری بود. سایر محصولات MERRA-2 عمدتاً شامل متغیرهای انتگرال گیری شده عمودی، آئروسول‌ها، مؤلفه‌های شیمیایی یا شبیه‌سازی‌های ماهواره‌ای هستند که به طور مستقیم بیانگر کل پوشش ابر نمی‌باشند. بر این اساس، محصول tavg1_2d_csp_Nx انتخاب شد که داده‌ای دوبعدی، تک سطحی و ساعتی بوده و متغیر CLDTOT^۶ (کل پوشش ابر) را ارائه می‌دهد (جدول ۱).

جدول (۱). مشخصات داده‌های بازکاوی ERA5 و MERRA-2 در برآورد پوشش ابر

ویژگی	MERRA-2	ERA5
نوع داده	بازکاوی	بازکاوی
تولیدکننده	NASA-GMAO	ECMWF
متغیر مربوط به ابر	CLDTOT	TCC
واحد	بدون واحد (نسبت پوشش ابر، بین ۰ تا ۱)	بدون واحد (نسبت پوشش ابر، بین ۰ تا ۱)
وضوح مکانی	با تفکیک مکانی $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ (تقریباً $50^\circ \times 66^\circ$ کیلومتر).	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (تقریباً ۳۱ کیلومتر)
وضوح زمانی	ساعتی (دارای محصولات روزانه و ماهانه)	ساعتی (قابل تجمع به روزانه و ماهانه)
بازه زمانی	۱۹۸۰ تاکنون	۱۹۸۰ تاکنون
پوشش جغرافیایی	جهانی (Global)	جهانی (Global)
فرمت داده	NetCDF (nc4)	NetCDF (nc)
منبع دریافت	NASA GES DISC	CDS-Copernicus

منبع: (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۵)^۷

با وجود وضوح مکانی بالای داده‌های ERA5-Land، به دلیل نبود متغیر پوشش ابر (Cloud Cover) در این محصول، در این مطالعه از داده‌های ERA5 استفاده شد. ERA5 امکان ارائه داده‌های ساعتی پوشش کل ابر در مقیاس جهانی را فراهم می‌کند و قابلیت تحلیل الگوهای مکانی و گستره فضایی سامانه‌های ابری را دارد که آن را به یکی از منابع بازکاوی قوی برای مطالعه ویژگی‌های ابرناکی مرتبط با رخدادها بارش سنگین تبدیل می‌کند. استفاده از ERA5 امکان استخراج دقیق شاخص‌های شدت، گستردگی و الگوی فضایی ابر را فراهم ساخته و تحلیل پوشش ابری در مقیاس رخداد با دقت بالا را ممکن می‌سازد. در حالی که محصول MODIS به دلیل وضوح فضایی بسیار بالا برای شناسایی پوشش ابری در زمان واقعی شناخته شده است،

1. www.irimo.ir

2. https://cds.climate.copernicus.eu/

3. Total Cloud Cover

4. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present

5. https://disc.gsfc.nasa.gov/

6. Cloud Total

7. NASA's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) / European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

ماهواره‌ای بودن و تفکیک زمانی متفاوت آن باعث می‌شود هم‌زمانی و تجمیع رخدادمحور برای مقایسه آماری با ERA5 دشوار باشد؛ بنابراین، برای اعتبارسنجی محدود داده‌های ERA5 در رخدادهای منتخب بارش سنگین، از پایگاه بازکاوی MERRA-2 استفاده شد، زیرا این پایگاه نیز داده‌های شبکه‌ای و ساعتی ارائه می‌دهد و امکان محاسبه شاخص‌های آماری مقایسه‌ای مانند RMSE، Bias و Wilmott D-index در مقیاس رخداد محور را فراهم می‌کند.

در این مطالعه، داده‌های ERA5 به جای محصول ماهواره‌ای MODIS به‌عنوان منبع اصلی پوشش ابری انتخاب شد. هرچند MODIS دارای وضوح فضایی بسیار بالا و توانایی شناسایی پوشش ابر در زمان واقعی است، ماهواره‌ای بودن آن، محدودیت‌های هم‌زمانی داده‌ها و عدم امکان تجمیع رخدادمحور در تحلیل‌های طولانی‌مدت، استفاده مستقیم از آن برای استخراج شاخص‌های رخداد محور شدت، گستردگی و الگوی فضایی پوشش ابر را دشوار می‌سازد. در مقابل، ERA5 با ارائه داده‌های شبکه‌ای و ساعتی در سطح جهانی، امکان تحلیل آماری و مکانی رخداد محور را با دقت بالا فراهم می‌کند و برای اهداف این پژوهش مناسب‌تر است.

در گام نخست، رخدادهای بارش سنگین طی دو دهه شناسایی شدند. در این پژوهش، رخدادهای بارش سنگین بر اساس دو معیار شدت بارش و فراگیری مکانی بارش شناسایی شدند. شدت بارش با استفاده از صدک^۱ ۹۹ و مقادیر بالاتر تعریف گردید و فراگیری مکانی بر مبنای مساحت تحت پوشش بارش سنگین، معادل حداقل ۳۰ درصد از ایستگاه‌های هواشناسی منطقه، در نظر گرفته شد (صادقی و همکاران، ۱۴۰۲؛ ۱۴). مصطفائی و همکاران، ۱۳۹۴؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۸۹). به‌منظور تعیین آستانه شدت بارش، صدک ۹۹ بارش‌های ثبت‌شده طی دوره ۲۰ ساله (۲۰۱۹-۲۰۰۰) در شمال غرب ایران محاسبه شد (رابطه ۱) که بر اساس آن، مقدار آستانه ۲۰/۴ میلی‌متر به دست آمد. در نهایت، با اعمال هم‌زمان دو شرط صدک و فراگیری مکانی، روزهایی که در آن‌ها حداقل پنج ایستگاه به‌طور هم‌زمان در منطقه مورد مطالعه بارشی برابر یا بیش از ۲۰/۴ میلی‌متر ثبت کرده بودند، به‌عنوان رخدادهای بارش سنگین شناسایی شدند. مشارکت ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در دوره مورد نظر، بر اساس حضور آن‌ها در رخدادهای بارش سنگین، در محیط GIS و با استفاده از روش درون‌یابی معکوس فاصله وزنی (IDW) پهنه‌بندی (Zoning) شد.

$$P = \frac{aN}{100} + \frac{1}{2} \quad (۱) \quad \text{رابطه}$$

N تعداد داده‌ها:

و ۹۹ = a

در گام بعدی، داده‌های پوشش ابر که در قالب NetCDF (nc) دریافت شده بودند، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار R به میانگین روزانه تبدیل و سپس نقشه‌های TIFF برای هر روز ترسیم شدند (به لایه‌های رستری دوبعدی ژئورفرنس‌شده تبدیل شدند تا امکان انجام تحلیل‌های مکانی فراهم شود؛ درحالی‌که خروجی‌ها صرفاً به‌صورت تصاویر PNG برای نمایش ارائه گردیدند). در این پژوهش، داده‌های بازکاوی ERA5 متغیر (TCC) به‌عنوان منبع اصلی برای استخراج ویژگی‌های ابرناکی شامل شدت، گستره فضایی و الگوی مکانی پوشش ابر در ۱۶ رخداد بارش سنگین طی دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. برای اعتبارسنجی محدود، داده‌های MERRA-2 (CLDTOT) تنها برای سه رخداد منتخب بکار گرفته شدند. داده‌های ERA5 ساعتی و شبکه‌ای در سطوح منفرد فراهم شد تا امکان تحلیل الگوهای مکانی و محاسبه گستره فضایی پوشش ابر فراهم گردد. برای هر رخداد بارش سنگین، میانگین روزانه پوشش کلی ابر (TCC) محاسبه شد و درصد مساحت منطقه با $TCC \geq 0.7$ به‌عنوان شاخص گستره پوشش ابر مؤثر استخراج گردید. همچنین الگوی فضایی پوشش ابری برای هر رخداد بارش سنگین از طریق تحلیل نقشه‌های میانگین روزانه TCC بررسی شد. علاوه بر این، مرکز جرم پوشش ابری برای هر رخداد محاسبه گردید و تحلیل آن در محیط نرم‌افزار R انجام شد. نتایج به‌صورت نقشه‌های مکانی ارائه شده‌اند تا الگوی فضایی پوشش ابر و تغییرات مکانی آن به‌وضوح نمایش یابد. شاخص‌های گزارش‌شده در این مطالعه شامل میانگین TCC، نسبت مساحت تحت پوشش با

$TCC \geq 0.7$ و میدان کامپوزیت میانگین TCC برای ۱۶ رخداد بارش سنگین هستند. به منظور اعتبارسنجی، علاوه بر مقایسه نقشه‌های پوشش ابر در سه رخداد توسط دو پایگاه داده، عملکرد ERA5 با بهره‌گیری از سه شاخص آماری Wilmott D-index، Bias و RMSE (ریشه دوم میانگین مربعات خطا) مورد ارزیابی قرار گرفت.

به منظور حفظ سازگاری مفهومی و ساختاری با میدان‌های پوشش ابر ERA5، آستانه $TCC \geq 0.7$ برای پوشش ابری انتخاب شد. این آستانه به منظور تفکیک ابرهای پراکنده از سامانه‌های ابری پیوسته و گسترده تعیین شده است که معمولاً با رخدادهای بارش سنگین مرتبط هستند. شایان ذکر است که این مقدار نشان‌دهنده پوشش افقی ابر است و مستقیماً معرف ضخامت یا محتوای آب ابر نمی‌باشد. با توجه به ماهیت منطقه‌ای رخدادهای بارش سنگین شناسایی شده و شرط هم‌زمانی بارش در چند ایستگاه، این آستانه به عنوان نماینده پوشش ابری مؤثر انتخاب شد و امکان شناسایی گستره فضایی سامانه‌های بارشی را فراهم می‌کند، بدون آنکه بخش‌هایی از ابرناکی مرتبط با رخدادهای بارش گسترده حذف شوند.

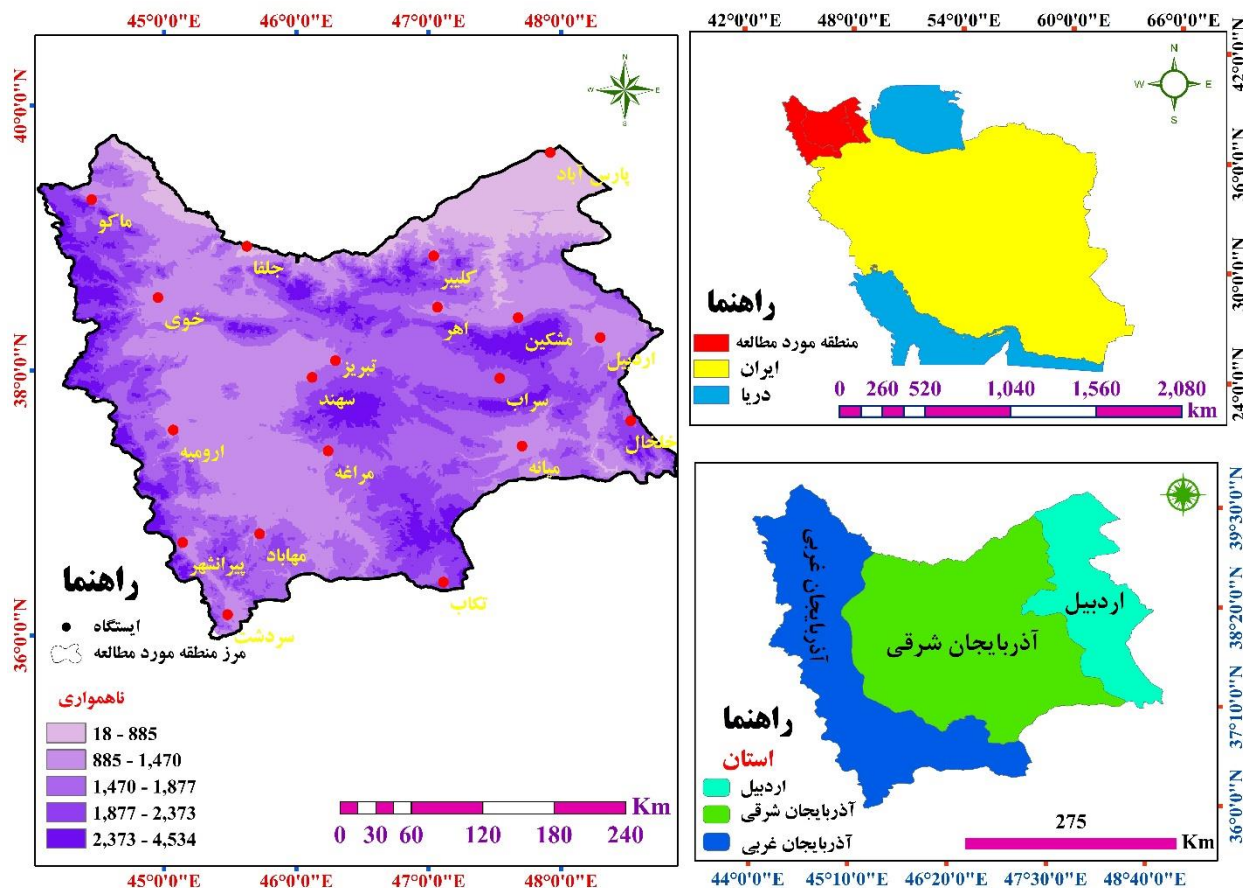
شدت ابرناکی (TCC): میزان پوشش افقی ابر در هر پیکسل را نشان می‌دهد و به صورت عددی بین صفر و یک (درصد) بیان می‌شود؛ مقدار بالاتر نشان‌دهنده پوشش بیشتر آسمان توسط ابر است.

گستره فضایی پوشش ابر: نسبت مساحت منطقه‌ای است که توسط سامانه‌های ابری پیوسته پوشیده شده است، به گونه‌ای که $TCC \geq 0.7$ در آن نواحی برقرار باشد. این شاخص نشان‌دهنده وسعت پوشش ابری در مقیاس منطقه‌ای است.

الگوی فضایی پوشش ابری: نشان‌دهنده تمرکز، پراکندگی و توزیع مکانی ابرها در سطح منطقه است و می‌تواند اطلاعاتی درباره مکان‌های دارای پوشش ابری بیشتر و الگوی تجمع یا پراکندگی ابرها ارائه دهد. با توجه به رویکرد رخدادمحور و تمرکز بر ساختار فضایی ابرها، تحلیل همدیدی در چارچوب اهداف این پژوهش قرار نگرفته است. این نتایج می‌تواند مبنایی برای مطالعات آینده با رویکرد همدیدی-ریزفیزیکی باشد.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، شمال غرب ایران را در بر می‌گیرد و در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۳ تا ۴۹ درجه شرقی واقع شده است. این پهنه شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و اردبیل بوده و موقعیت جغرافیایی آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱). موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منبع: (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۵)

بحث و یافته‌ها

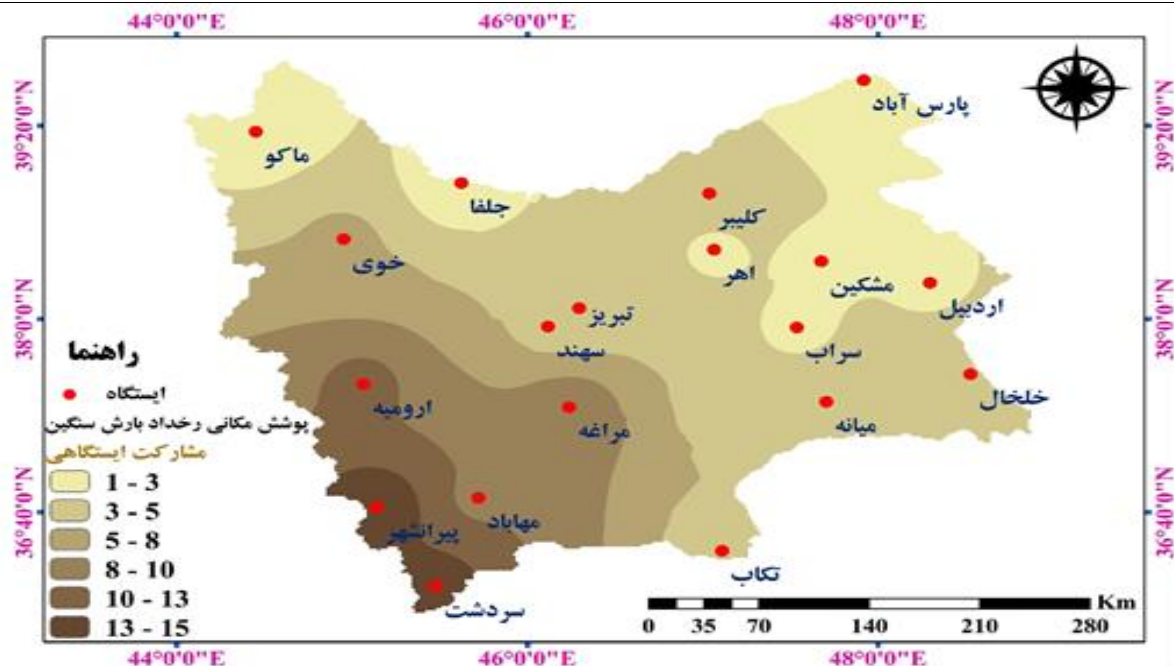
مطابق معیارهای تعریف‌شده در بخش روش‌شناسی، ۱۶ رخداد بارش سنگین در دوره مطالعه شناسایی شدند که مبنای تحلیل‌های بعدی پژوهش، شامل بررسی ویژگی‌های ابرناکی و ارزیابی عملکرد داده‌های بازکاوی، قرار گرفت (جدول ۲). بر اساس جدول (۲)، پوشش مکانی رخدادهای بارش سنگین، ایستگاه‌های دارای بیشینه بارش سنگین در هر رخداد و مقدار بیشینه بارش سنگین در روز رخداد ارائه شده است. طبق داده‌های جدول، ایستگاه سردشت با ثبت بیشینه بارش سنگین در ۱۰ رخداد، بیشترین تعداد رخدادهای بارش با بیشینه بارش را در میان ایستگاه‌های منطقه داشته است (۶۲/۵ درصد). همچنین، این ایستگاه در رخداد ۲۰۰۶/۰۲/۰۳ بیشترین مقدار بارش سنگین را در بین ایستگاه‌های دارای بارش سنگین با رقم ۱۸۵ میلی‌متر ثبت کرده است.

جدول (۲). رخدادهای بارش سنگین شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه

ردیف	روز وقوع رخداد بارش سنگین	گسترده‌گی مکانی رخدادهای بارش سنگین	ایستگاه با بیشینه بارش سنگین در روز رخداد	مقدار بیشینه بارش سنگین (میلی متر)
۱	۲۰۰۰/۰۳/۲۴	۶	میانه	۴۷
۲	۲۰۰۱/۱۱/۱۸	۵	سردشت	۵۷
۳	۲۰۰۳/۰۳/۲۶	۶	سردشت	۵۰
۴	۲۰۰۴/۱۱/۲۳	۵	سردشت	۴۶
۵	۲۰۰۶/۰۲/۰۳	۹	سردشت	۱۸۵
۶	۲۰۰۹/۱۱/۱۸	۶	ارومیه	۳۰
۷	۲۰۱۲/۱۱/۱۲	۶	خوی	۴۹
۸	۲۰۱۳/۱۱/۰۹	۵	سردشت	۵۸
۹	۲۰۱۴/۰۳/۳۰	۵	سردشت	۵۲
۱۰	۲۰۱۴/۱۰/۰۳	۹	ارومیه	۵۴
۱۱	۲۰۱۴/۱۰/۲۰	۹	پیرانشهر	۸۰
۱۲	۲۰۱۶/۱۲/۰۲	۶	سردشت	۴۶
۱۳	۲۰۱۸/۰۲/۱۸	۱۰	سردشت	۹۲
۱۴	۲۰۱۸/۰۳/۳۰	۷	سردشت	۵۱
۱۵	۲۰۱۹/۰۱/۲۸	۹	سردشت	۱۰۰
۱۶	۲۰۱۹/۰۳/۲۵	۶	پیرانشهر	۶۵

منبع: (یافته های نگارندگان)

با توجه به شکل (۲)، نقشه نشان دهنده میزان مشارکت هر ایستگاه در رخدادهای بارش سنگین شناسایی شده طی ۲۰ سال است. رنگ نقاط بیانگر تعداد رخدادهایی است که هر ایستگاه در آن‌ها دارای بارش سنگین بوده است، به گونه‌ای که نقاط تیره‌تر نشان دهنده مشارکت بالاتر ایستگاه‌ها در رخدادها می‌باشند. بر اساس نقشه پهنه‌بندی در شمال غرب ایران، مشارکت ایستگاه‌ها در رخدادهای بارش سنگین در ۱۹ ایستگاه طی ۱۶ رخداد در دو دهه مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد با حرکت به سمت جنوب غرب منطقه مورد مطالعه، میزان مشارکت ایستگاه‌ها در رخدادهای بارش سنگین افزایش می‌یابد، به‌طوری که بیشینه مشارکت در ایستگاه‌های پیرانشهر و سردشت مشاهده شد. کمینه مشارکت ایستگاهی نیز در نیمه شمالی منطقه، در ایستگاه‌های ماکو، جلفا و پارس‌آباد ثبت گردید. این الگوی مکانی مشارکت ایستگاه‌ها با ویژگی‌های ابرناکی مرتبط است؛ به‌طوری که شدت پوشش ابری (TCC)، گسترده‌گی ابرها و الگوی فضایی مرکز جرم پوشش ابری در رخدادهای با مشارکت بالاتر، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند و مناطق با مشارکت کمتر، پوشش ابری کمتری را تجربه کرده‌اند.

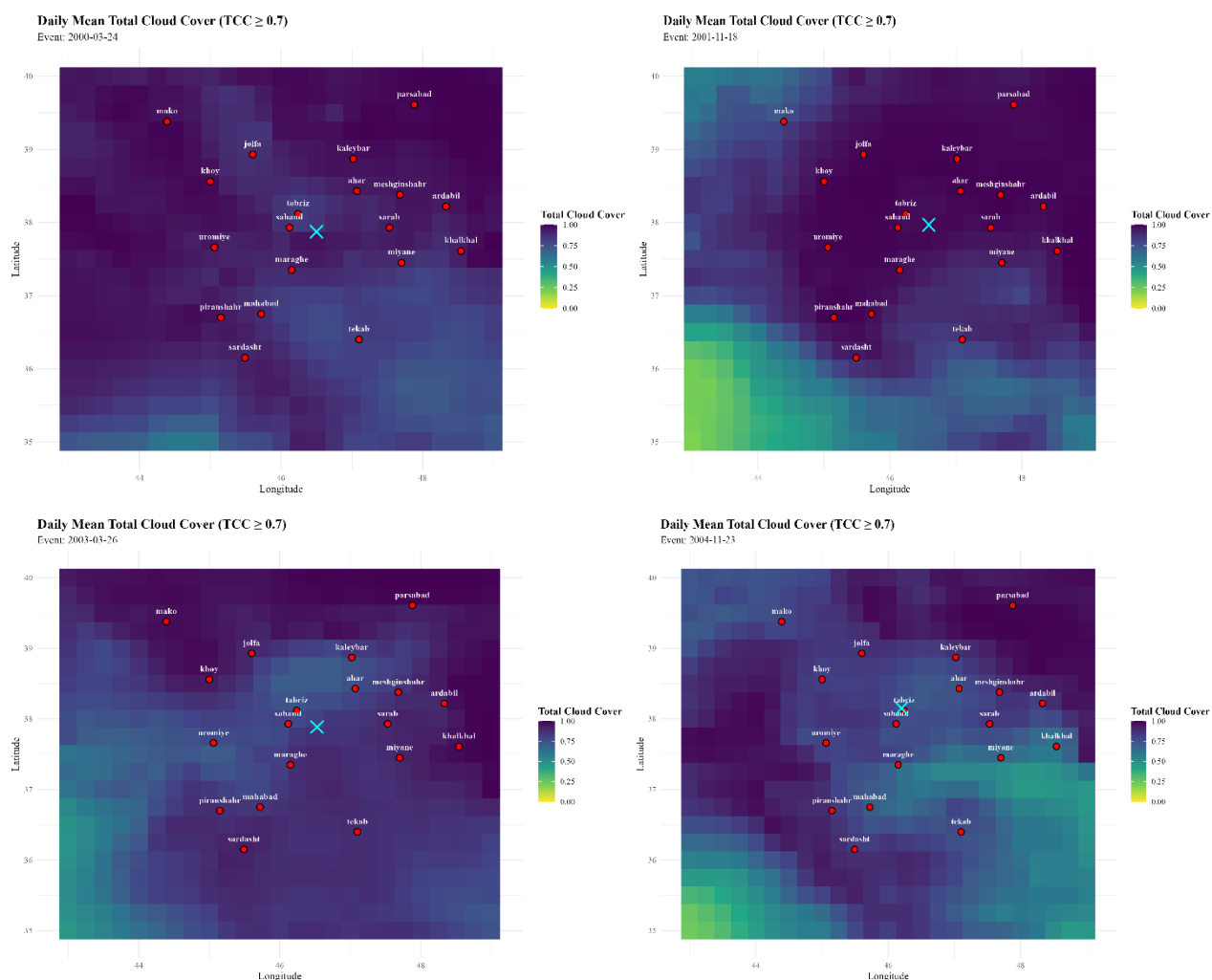


شکل (۲). مشارکت ایستگاه‌ها در رخدادهای بارش سنگین در شمال غرب ایران طی دوره ۲۰ ساله

منبع: (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۵)

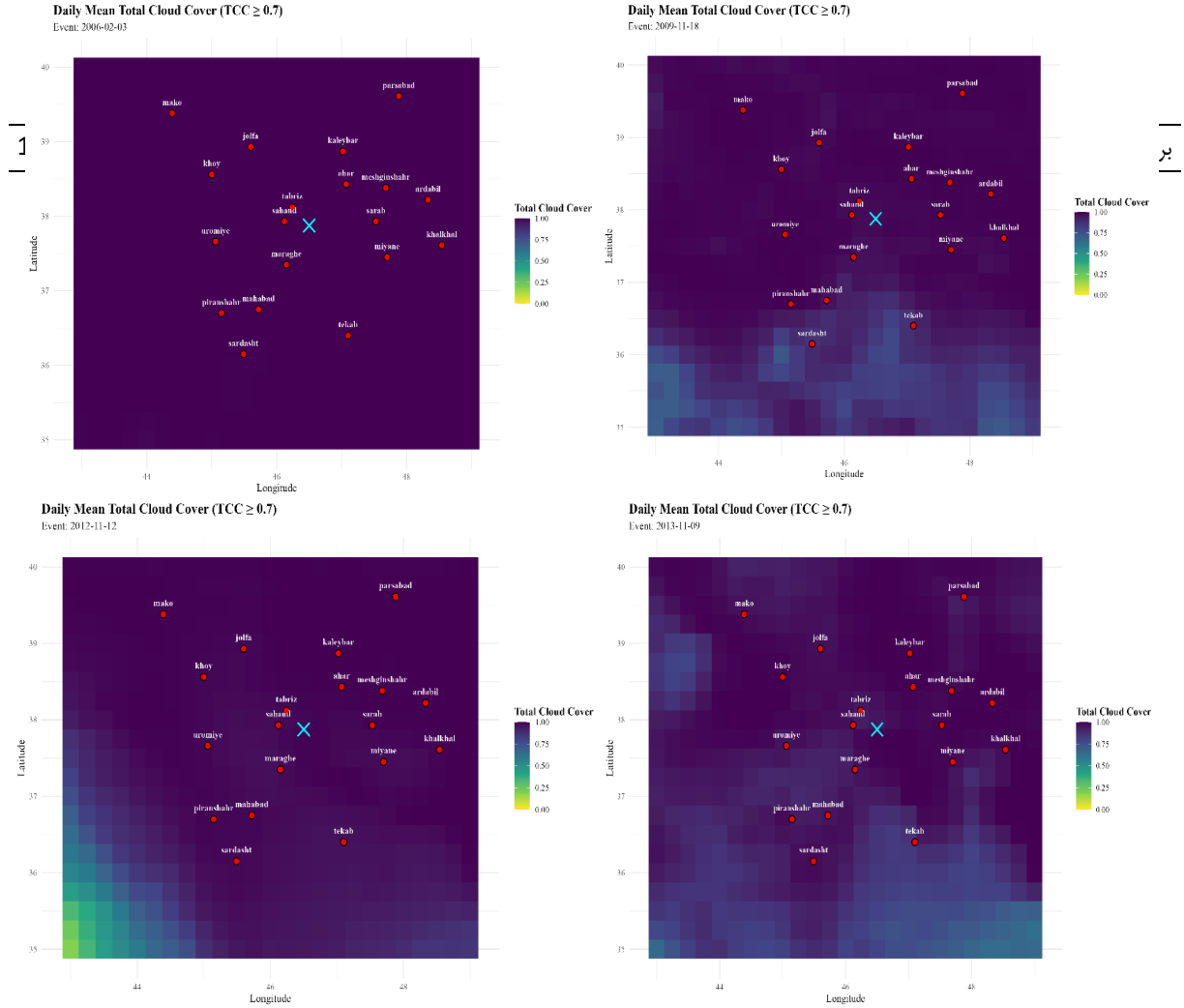
نقشه‌های TCC نشان‌دهنده‌ی گسترش پیوسته و منسجم پوشش ابری با شدت بالا هم‌زمان با رخدادهای بارش سنگین هستند که بیانگر نقش ساختار مکانی ابرها در تشدید بارش است. برای تحلیل‌های کمی و مکانی پوشش ابر، از فایل‌های GeoTIFF استفاده شد، درحالی‌که نقشه‌های PNG صرفاً به‌منظور نمایش بصری و نشان دادن انطباق مکانی الگوهای پوشش ابر با موقعیت ایستگاه‌ها طی رخدادهای بارش سنگین تولید شدند. در شکل‌های (۳، ۴، ۵ و ۶) مقادیر پیکسلی پوشش ابری (TCC) و گستردگی سامانه‌های ابری ($TCC \geq 0.7$) و موقعیت مرکز جرم ابرها برای ۱۹ ایستگاه در رخدادهای بارش سنگین؛ طیف رنگی از آبی (زیاد) تا زرد (کم) نمایانگر شدت پوشش ابری است. TCC شدت ابرناکی محلی است، گستره فضایی ابر ویژگی سینوپتیکی سامانه ابری است. در این پژوهش، گستره فضایی ابر به‌عنوان یک شاخص ناحیه‌ای برای هر رخداد بارش سنگین محاسبه شد، درحالی‌که شدت ابرناکی (TCC) به‌صورت موضعی و به‌طور جداگانه برای هر ایستگاه استخراج گردید. جابجایی مرکز جرم ابرها نشان‌دهنده تغییر الگوی فضایی سامانه‌های مولد بارش سنگین در رخدادهای مختلف است. مرکز جرم مکان غالب ابرهای سنگین در کل منطقه را نشان می‌دهد، نه موقعیت تمام ابرها یا شدت بارش ایستگاه‌ها. به عبارتی، این نقطه نماینده الگوی فضایی کلی است. در شکل‌های (۳ تا ۶) در نقشه‌های ترسیم‌شده، موقعیت مرکز جرم الگوی پوشش ابری هر رخداد با علامت ضربدر سبز مشخص شده است. همچنین، توزیع مکانی ابرناکی بر اساس طیف رنگی نمایش داده شده به‌گونه‌ای که مقادیر بیشینه پوشش ابر با رنگ آبی و مقادیر کمینه با رنگ زرد نشان داده می‌شوند.

اشکال (۳) تا (۶) الگوهای پیکسلی پوشش کلی ابر (TCC) را برای ۱۶ رخداد بارش سنگین شناسایی‌شده در شمال غرب ایران نشان می‌دهد. اگرچه شدت و گستره پوشش ابری بین رخدادهای متفاوت است، اما در اغلب رخدادهای تمرکز مقادیر بالای TCC در نیمه جنوب غربی منطقه و هم‌راستایی آن با نواحی دارای مشارکت بالای ایستگاهی مشاهده می‌شود. تغییرات طیف رنگی از مقادیر کمینه به بیشینه، بیانگر تفاوت در شدت و گستردگی سامانه‌های ابری میان رخدادهاست، به‌طوری‌که رخدادهای شدیدتر با گسترش فضایی وسیع‌تر نواحی با TCC بالا همراه بوده‌اند. این الگوی تکرارشونده نشان می‌دهد که ساختار فضایی پوشش ابری در رخدادهای بارش سنگین منطقه از الگوی نسبتاً پایداری تبعیت می‌کند.

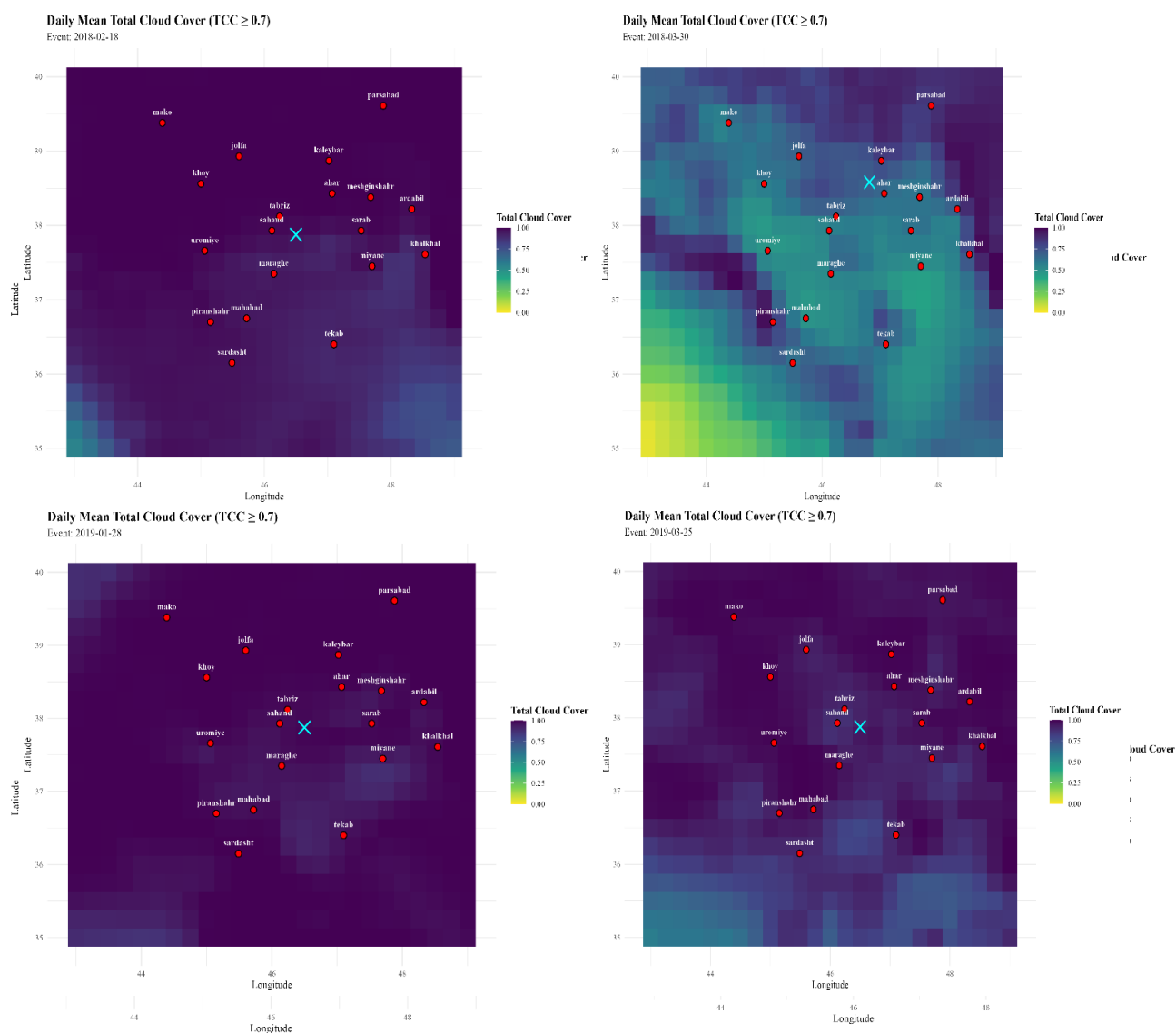


شکل (۳). نقشه پیکسلی پوشش ابری (TCC)، گستردگی سامانه‌های ابری ($TCC \geq 0.7$) و مرکز جرم ابرها در رخدادهای بارش سنگین

منبع: (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۵)



شکل (۴). پوشش ابری، گستردگی و مرکز جرم ابرها در رخدادهای بارش سنگین (Pixel-based)
منبع: (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۵)



شکل (۵). نمای پیکسلی پوشش ابری (TCC)، محدوده سامانه‌های ابری متراکم ($TCC \geq 0.7$) و موقعیت مرکز جرم ابرها در رخدادهای بارش سنگین
 منبع: (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۵)

مطابق جدول (۳)، ویژگی‌های فضایی پوشش ابرناکی استخراج شده از داده‌های بازکاوی ERA5 برای رخدادهای بارش سنگین ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هشت رخداد از مجموع رخدادهای شناسایی شده، گستره فضایی پوشش ابرناکی^۱ معادل ۱۰۰ درصد منطقه مورد مطالعه بوده است. افزون بر این، در همین هشت رخداد، مرکز جرم الگوی فضایی پوشش ابری در مختصات میانگین طول جغرافیایی ۴۶/۵ درجه و عرض جغرافیایی ۳۷/۸ درجه متمرکز شده است. مقایسه نتایج جدول (۳) با اطلاعات ارائه شده در جدول (۲) بیانگر آن است که در رخدادهایی که بارش سنگین از نظر

فراگیری مکانی و شدت بارش به مقادیر بیشینه رسیده است، پوشش ابرناکی نیز به صورت کامل منطقه مورد مطالعه را، شامل تمام ۱۹ ایستگاه، در بر گرفته و موقعیت مرکز جرم پوشش ابری نیز به مختصات یادشده متمایل است. این همزمانی بیانگر ارتباط معنادار میان گستردگی فضایی سامانه های ابری و رخداد های بارش سنگین گسترده در منطقه شمال غرب ایران است.

جدول (۳). گستره فضایی و مختصات مرکز جرم پوشش ابری (TCC) بر اساس داده های ERA5 در رخدادهای بارش سنگین

مختصات عرض جغرافیایی مرکز جرم ابر	مختصات طول جغرافیایی مرکز جرم ابر	گستره فضایی پوشش ابر	رخداد بارش سنگین
۳۷/۸۸	۴۶/۵	۱	۲۰۰۰/۰۳/۲۴
۳۷/۹۷	۴۶/۵۹	۰/۹۳	۲۰۰۱/۱۱/۱۸
۳۷/۸۹	۴۶/۵۳	۰/۹۹	۲۰۰۳/۰۳/۲۶
۳۸/۱۵	۴۶/۲	۰/۸	۲۰۰۴/۱۱/۲۳
۳۷/۸۸	۴۶/۵	۱	۲۰۰۶/۰۲/۰۳
۳۷/۸۸	۴۶/۵	۱	۲۰۰۹/۱۱/۱۸
۳۷/۸۸	۴۶/۵	۱	۲۰۱۲/۱۱/۱۲
۳۷/۸۸	۴۶/۵	۱	۲۰۱۳/۱۱/۰۹
۳۷/۹۳	۴۶/۵۸	۰/۹۶	۲۰۱۴/۰۳/۳۰
۳۸/۴۷	۴۶/۸۲	۰/۶۵	۲۰۱۴/۱۰/۰۳
۳۷/۸۹	۴۶/۴۹	۰/۹۹	۲۰۱۴/۱۰/۲۰
۳۷/۵۱	۴۶/۴۷	۰/۵۳	۲۰۱۶/۱۲/۰۲
۳۷/۸۸	۴۶/۵	۱	۲۰۱۸/۰۲/۱۸
۳۸/۵۸	۴۶/۸۲	۰/۴۳	۲۰۱۸/۰۳/۳۰
۳۷/۸۸	۴۶/۵	۱	۲۰۱۹/۰۱/۲۸
۳۷/۸۸	۴۶/۵	۱	۲۰۱۹/۰۳/۲۵

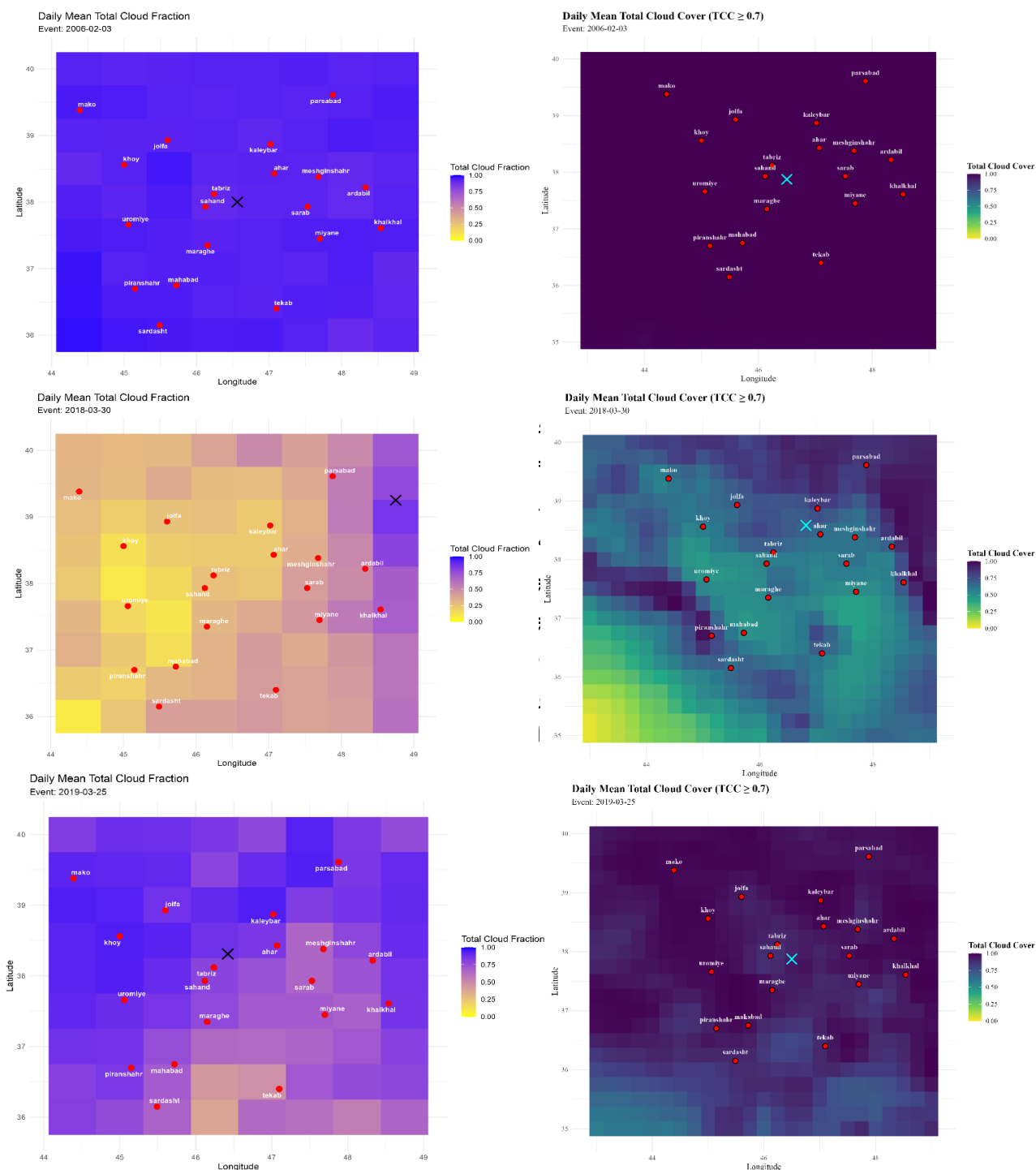
منبع: (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۵)

اگرچه ERA5 نسبت به MERRA-2 از تفکیک مکانی بالاتری برخوردار است، اما MERRA-2 به دلیل سامانه همگون سازی مستقل و فیزیک مدل متمایز خود، به منظور اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت و به عنوان یک مرجع قوی و بدون سوگیری برای ارزیابی عملکرد ERA5 عمل می کند. به منظور انجام یک اعتبارسنجی محدود از الگوهای پوشش ابر در داده های ERA5، سه رخداد شاخص بارش سنگین با سطوح شدت متفاوت (شدید، متوسط و ضعیف) انتخاب شدند.

میدان های متناظر پوشش ابر از پایگاه MERRA-2 استخراج و تحلیل گردیدند و سپس به صورت آماری و کیفی با نتایج ERA5 مقایسه شدند. رخداد ۲۰۰۶/۰۲/۰۳ به عنوان نماینده بارش های سنگین شدید، رخداد ۲۰۱۸/۰۳/۳۰ به عنوان نماینده بارش های سنگین ضعیف و رخداد ۲۰۱۹/۰۳/۲۵ به عنوان نماینده بارش های سنگین با شدت متوسط، از میان ۱۶ رخداد شناسایی شده در شمال غرب ایران انتخاب شدند. مبنای این تفکیک، ترکیبی از شدت بارش ثبت شده در ایستگاه ها و میزان گستردگی مکانی بارش سنگین در سطح منطقه مورد مطالعه بوده است. (شکل ۷) و (جدول ۴).

مطابق شکل (۷)، مقایسه بصری پوشش ابری (TCC) در سه رخداد منتخب بارش سنگین بین دو پایگاه بازکاوی ERA5 و MERRA-2 (نقشه های سمت چپ برای پایگاه MERRA-2 و نقشه های سمت راست پایگاه ERA5) نشان دهنده میزان قابل قبولی از همخوانی فضایی و الگوی مکانی پوشش ابر است. در رخداد ۲۰۰۶/۰۲/۰۳ به عنوان نماینده بارش های سنگین شدید، پوشش ابری در خروجی هر دو پایگاه تقریباً کامل بوده و موقعیت مرکز جرم الگوی فضایی ابرناکی در هر دو داده در مکان یکسانی قرار گرفته است. در رخداد ۲۰۱۸/۰۳/۳۰ (بارش سنگین ضعیف)، هر دو تصویر بیانگر پوشش ابری محدودتر نسبت به رخداد شدید هستند؛ با این حال، در این رخداد اختلاف مکانی در موقعیت مراکز جرم الگوی ابری بین دو پایگاه مشاهده می شود. در رخداد ۲۰۱۹/۰۳/۲۵ به عنوان نماینده بارش های سنگین با شدت متوسط، الگوی فضایی و میزان پوشش

ابری در هر دو پایگاه مشابه بوده و مراکز جرم با اختلافی جزئی نسبت به یکدیگر قرار دارند. به طور کلی، نتایج حاصل از مقایسه بصری نشان می‌دهد که داده‌های ERA5 توانایی مناسبی در بازنمایی الگوی فضایی، شدت نسبی و گستره پوشش ابر در رخدادهای بارش سنگین منطقه مورد مطالعه داشته و از قابلیت اعتماد مطلوبی برخوردار است.



شکل (۶). پوشش ابری (TCC)، گستردگی سامانه‌های ابر $\leq 7^\circ$ و مرکز جرم ابرها در رخدادهای بارش سنگین
منبع: (ترسیم: نگارندگان، ۱۴۰۵)

موقعیت مرکز جرم به طور کمی و کیفی توصیف شد و عملکرد داده های ERA5 در مقایسه با MERRA-2 مورد ارزیابی قرار گرفت. این یافته ها پایه ای برای جمع بندی نهایی و نتیجه گیری درباره قابلیت اعتماد داده های بازکاوی در مطالعات رخدادمحور بارش سنگین فراهم می کند.

نتیجه گیری

نتایج مطالعه نشان داد که بیشینه مشارکت ایستگاهی در رخداد های بارش سنگین در جنوب غرب منطقه شمال غرب ایران رخ داده است؛ به گونه ای که ایستگاه پیرانشهر در ۱۵ رخداد از ۱۶ رخداد کل (معادل ۹۴ درصد) حضور داشته است. بیشینه ابرناکی نیز در ایستگاه های جنوب غربی منطقه، بر اساس شاخص های TCC و گستردگی ابر، مشاهده شد. همچنین بیشینه بارش سنگین در ایستگاه سردشت با ۶۲/۵ درصد رخدادها (۱۰ رخداد از ۱۶ رخداد کل منطقه) ثبت گردید، در حالی که کمینه بارش سنگین در نیمه شمالی منطقه، در ایستگاه های ماکو، جلفا و پارس آباد، تنها شش درصد بوده و الگوی ابرناکی نیز این روند را تأیید می کند. بیشینه گستردگی مکانی رخداد های بارش سنگین مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۰۲/۱۸ بود که در آن ۱۰ ایستگاه به طور همزمان دارای بارش سنگین بودند و نقشه های پیکسلی نیز گستردگی بالای پوشش ابر را نشان دادند. اعتبارسنجی عملکرد پایگاه ERA5 در مقایسه با MERRA-2 نشان دهنده کاهش خطا و بهینه بودن شاخص های آماری در رخداد های بارش شدید بود. در ۵۰ درصد از رخداد های بارش سنگین، مرکز جرم الگوی فضایی ابرناکی در جنوب شرق ایستگاه تبریز قرار داشت و در همان نسبت، گستردگی فضایی ابر ($TCC \geq 0.7$) معادل یک و پوشش ابری کامل (۱۰۰ درصد) ثبت شد. بیشینه پوشش مکانی ابر در بین ۱۶ رخداد بارش سنگین مربوط به رخداد ۲۰۰۶/۰۲/۰۳ بوده و کمینه مقدار گستردگی فضایی نیز برابر با ۰/۴۳ در رخداد ۲۰۱۸/۰۳/۳۰ مشاهده شد. نتایج این تحقیق با نتایج مطالعه یاو و همکاران (۲۰۲۰) در زمینه عملکرد مطلوب پایگاه بازکاوی ERA5 در بازنمایی پوشش ابری همسو است. نتایج این مطالعه با نتایج کارهای حلیمی و همکاران (۲۰۱۷)؛ میسرا (۲۰۱۹)؛ شی و همکاران (۲۰۲۵) از بابت اینکه بارش با پوشش ابری و ویژگی های ابرناکی رابطه مستقیم و مثبت دارد در یک راستا است.

حامی مالی

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سهام نویسندگان

نویسنده اول: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله
نویسنده دوم: گردآوری داده ها، انجام محاسبات اولیه، تجزیه و تحلیل آماری داده ها، تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می دارند، هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از همه افرادی که در تهیه و انتشار این پژوهش همکاری داشته اند، سپاسگزاری می کنند.

منابع

(۱) اسکندری دامنه، حامد؛ زهتابیان، غلامرضا؛ خسروی، حسن؛ آذرنبوند، حسین و براتی، علی اکبر. (۱۳۹۹). شبیه سازی و پیش بینی مؤلفه های اقلیمی دما و بارش در مناطق خشک (مطالعه موردی: دشت میناب). جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)، ۱۸(۶۶)، ۱۱۰-۱۲۸

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1399.18.3.7.6>

- ۲) اکبری، مه‌ری و صیاد، وحیده. (۱۴۰۰). تحلیل مطالعات تغییر اقلیم در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱)، ۳۷-۷۴. [doi: 10.22059/jphgr.2021.301111.1007528](https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.301111.1007528)
- ۳) حجازی زاده، زهرا، کربلایی دربی، علیرضا و کاظمی آذر، مهسا. (۱۴۰۳). واکاوی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی در استان آذربایجان شرقی. جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)، ۸۳(۲)، ۱-۲۰. [doi: 10.22034/jiga.2025.2048574.1363](https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2048574.1363)
- ۴) رئیس پور، کوهزاد و رزمی، رباب. (۱۳۹۹). برآورد ابرناکی در جو ایران با استفاده از فرآورده‌های ابر پرتوسنج طیفی تصویربرداری چندزاویه‌ای (MISR). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶(۳)، ۲۵۷-۲۷۱. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.3.18.6>
- ۵) شادپور، آرش و لشگری، حسن. (۱۳۹۸). تحلیل همدیدی - ماهواره ای وقوع برف سنگین استان گیلان (مطالعه موردی روز ۱۳ ژانویه ۲۰۰۸). جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)، ۱۷(۶۳)، ۶۰-۷۵. https://mag.iga.ir/article_246005.html
- ۶) شاهی، علی و صلاحی، برومند. (۱۴۰۴). ارزیابی مکانی و زمانی دقت برآورد بارش پایگاه بازکای ERA5-Land در استان اصفهان طی دو دهه اخیر. جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)، ۸۶(۳)، ۴۳-۶۹. [doi: 10.22034/jiga.2025.2066496.1426](https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2066496.1426)
- ۷) شاهی، علی و صلاحی، برومند. (۱۴۰۴). ردیابی منابع رطوبتی و تحلیل شاخص‌های ناپایداری منجر به بارش‌های سنگین شمال غرب ایران. پژوهش‌های دانش زمین، ۱۶(۱)، ۱۲۸-۱۵۱. [doi: 10.48308/esri.2025.235940.1225](https://doi.org/10.48308/esri.2025.235940.1225)
- ۸) صادقی، علی، پژوه، فرشاد و رضایی، محمد. (۱۴۰۲). شناسایی و تحلیل الگوهای فشار تراز دریای بارش‌های سنگین و فراگیر فصل پاییز نیمه غربی ایران. جغرافیا (فصلنامه علمی انجمن جغرافیایی ایران)، ۲۱(۷۶)، ۲۱۱-۲۳۷. <https://dor.isc.ac/dor/http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1402.21.76.10.1>
- ۹) صلاحی، برومند و شاهی، علی. (۱۴۰۴). ارزیابی عدم قطعیت عمق برف بازتحلیل شده در شمال غرب ایران با استفاده از ERA5-Land و MERRA-2. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۱۵)، ۱۳۲-۱۵۲. [doi: 10.22067/geoh.2025.95012.1604](https://doi.org/10.22067/geoh.2025.95012.1604)
- ۱۰) علیجانی، بهلول، خسروی، محمود، و اسماعیل نژاد، مرتضی. (۱۳۸۹). تحلیل همدیدی بارش سنگین ششم ژانویه ۲۰۰۸ در جنوب شرق ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۱(۳-۴)، ۳-۱۴. [SID. https://sid.ir/paper/213093/fa](https://sid.ir/paper/213093/fa)
- ۱۱) غلامی، آوا، جلالی، مسعود، میرموسوی، سیدحسین و رئیس پور، کوهزاد. (۱۴۰۳). بررسی و تحلیل چرخه‌های ابرناکی سالانه در ایران (۱۹۹۱-۲۰۲۱). پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۵(۱۹)، ۱-۱۸. [doi: 10.30488/ccr.2024.442999.1201](https://doi.org/10.30488/ccr.2024.442999.1201)
- ۱۲) قدمی، فردین، حجازی زاده، زهرا و علیجانی، بهلول. (۱۳۹۷). شناسایی سامانه های گردشی ورد سپهر در ارتباط با بارش های مخاطره آمیز حوضه آبریز کرخه. جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)، ۱۶(۵۸)، ۲۱-۳۲. https://mag.iga.ir/article_253444.html
- ۱۳) قویدل، فاطمه؛ رضایی بنفشه، مجید و محمدی، غلام حسن. (۱۴۰۳). تحلیل توزیع زمانی و مکانی ابرناکی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. هیدروژئومورفولوژی، ۱۱(۳۹)، ۱۹-۴۰. <https://doi.org/10.22034/HYD.2024.59481.1714>
- ۱۴) مصطفائی حسن، علیجانی بهلول و سلیقه محمد. (۱۳۹۴). تحلیل سینوپتیکی بارش‌های شدید و فراگیر در ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۴)، ۶۵-۷۶. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.4.65>
- ۱۵) نصیری دانش، برنا رضا، و ظهوریان پردل، منیژه. (۱۴۰۳). آشکارسازی تأثیر ساختار میکروفیزیکی ابرناکی در بارش‌های استان خوزستان با استفاده از محصولات ابر سنجنده MODIS. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۴(۷۲)، ۴۷۱-۴۸۶. <https://doi.org/10.52547/jgs.24.72.471>
- ۱۶) نقوی، مریم، علیجانی، بهلول، اکبری، مه‌ری و فتحی، ابراهیم. (۱۴۰۰). ارتباط بین شاخص های توپوگرافی با بارش های فراگیر منطقه کوهستانی البرز. جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)، ۱۹(۶۸)، ۵۱-۶۷. https://mag.iga.ir/article_245414.html

- 17) Akbary, M. & Sayad, V. (2021). Analysis of climate change studies in Iran. Physical Geography Research, 53(1), 37-74. [doi: 10.22059/jphgr.2021.301111.1007528](https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.301111.1007528) [Persian]
- 18) Alijani, B., Khosravi, M., Mahmood, & Esmailnejad, M. (2011). A synoptic analysis of January 6, 2008 heavy precipitation in the southeast of Iran. Journal of Climate Research, 1(3-4), 3-14. <https://sid.ir/paper/213093/en> [Persian]
- 19) Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S., Sherwood, S., Stevens, B., & Zhang, X. (2013). Clouds and aerosols. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 571-657). Cambridge University Press.

- 20) Eskandari Damane, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarnivand, H. & Barati, A. A. (2020). Simulation and forecasting of climatic components of temperature and precipitation in arid regions (Case study: Minab plain). *Geography*, 18(66), 110-128. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1399.18.3.7.6> [Persian]
- 21) Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2021). The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 923–1054). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
- 22) Ghadami, F., Hejazizadeh, Z. & Alijani, B. (2018). Identifying the circulation systems of Ward Sepehr in relation to hazardous rainfall in the Karkheh catchment area. *Geography*, 16(58), 21-32. https://mag.iga.ir/article_253444.html?lang=en [Persian]
- 23) Ghavidel, F., R. Banafsheh, M. & Mohammadi, G. H. (2024). Analysis of the temporal and spatial distribution of clouds in the basin of the Urmia Lake. *Journal of Hydrogeomorphology*, 11(39), 40-19. [doi: 10.22034/hyd.2024.59481.1714](https://doi.org/10.22034/hyd.2024.59481.1714) [Persian]
- 24) Gholami, A., Jalali, M., Mirmousavi, H. & Raispour, K. (2024). Review and Analysis of Annual Cloudiness Cycles in Iran (1991-2021). *Climate Change Research*, 5(19), 1-18. [doi: 10.30488/ccr.2024.442999.1201](https://doi.org/10.30488/ccr.2024.442999.1201) [Persian]
- 25) Halimi, M., Rezaei, M., Mohammadi, C., & others. (2017). Association between cloudiness and rainfall over Fars province in Iran. *Russian Meteorology and Hydrology*, 42(10), 671–676. <https://doi.org/10.3103/S1068373917100077>
- 26) Hedjazizadeh, Z., Karbalaee, A. & Kazemiazar, M. (2025). Investigating the Impact of Climate Change on Extreme Precipitation Events in East Azerbaijan Province. *Geography*, 22(83), 1-20. [doi: 10.22034/jiga.2025.2048574.1363](https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2048574.1363) [Persian]
- 27) Huang, H., Wang, Q., Liu, C., & Zhou, C. (2024). Optimal estimation of cloud properties from thermal infrared observations with a combination of deep learning and radiative transfer simulation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(12), 7129–7141. <https://doi.org/10.5194/amt-17-7129-2024>
- 28) Huang, X., Cole, J. N. S., He, F., Potter, G. L., Oreopoulos, L., Lee, D., Suarez, M., & Loeb, N. (2013). Longwave band-by-band cloud radiative effect and its application in GCM evaluation. *Journal of Climate*, 26(2), 405–467. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00535.1>
- 29) Mishra, A. K. (2019). On the linkage between changes in cloud cover and precipitation extremes over Central India. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 86, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2019.05.002>
- 30) Mostafaei, H., Alijani, B., & Saligheh, M. (2015). Synoptic analysis of widespread heavy rains in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 2(4), 65–76. [doi: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.4.65](https://doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.2.4.65) [Persian]
- 31) Muthiah, K., Arunya, K. G., Sridhar, V., & Patakamuri, S. K. (2025). Heavy Rainfall Impact on Agriculture: Crop Risk Assessment with Farmer Participation in the Paravandar Coastal River Basin. *Water*, 17(5), 658. <https://doi.org/10.3390/w17050658>
- 32) Naghavi, M., Alijani, B., Akbari, M. & Fattahi, I. (2021). Relationship between topographic indices and inclusive rainfall in Alborz mountainous region (research article). *Geography*, 19(68), 51-67. https://mag.iga.ir/article_245414.html?lang=en [Persian]
- 33) Nasiri, D., Borna, R., & Zohourian Pordel, M. (2024). Detection of the effect of cloud microphysical structure on precipitation in Khuzestan province using MODIS cloud products. *Journal of Geographical Studies*, 24(72), 25. <https://doi.org/10.52547/jgs.24.72.471> [Persian]
- 34) Raispour, K. & Razmi, R. (2020). Estimation of Cloud Fraction in the Atmosphere of Iran Using Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR). *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 257-271. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.3.18.6> [Persian]
- 35) Sadeghi, A., pazhoh, F. & Rezaei, M. (2023). Identification and analysis of sea level pressure patterns of heavy and pervasive precipitation autumn season in the western part of Iran. *Geography*, 21(76), 211-237. <https://dor.isc.ac/dor/http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1402.21.76.10.1> [Persian]
- 36) Salahi, B. & Shahi, A. (2025). Assessment of Uncertainty of Reanalyzed Snow Depth in Northwestern Iran Using Era5-Land and Merra-2. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 1(15), 132-152. [doi: 10.22067/geoe.2025.95012.1604](https://doi.org/10.22067/geoe.2025.95012.1604) [Persian]
- 37) Shadpour, A. & Lashgari, H. (2020). Synoptic-Satellite Analysis of Heavy Snow Occurrence in Guilan Province (Case Study on January 13, 2008). *Geography*, 17(63), 60-75. https://mag.iga.ir/article_246005.html?lang=en [Persian]

- 38) Shahi, A. & Salahi, B. (2025). Spatial and Temporal Assessment of the Accuracy of Precipitation Estimates from the ERA5-Land Reanalysis Database in Isfahan Province over the Past Two Decades. *Geography*, 23(86), 43-69. [doi: 10.22034/jiga.2025.2066496.1426](https://doi.org/10.22034/jiga.2025.2066496.1426) [Persian]
- 39) Shahi, A. & Salahi, B. (2025). Tracking moisture sources and analysis of instability indicators leading to heavy rains in Northwest Iran. *Researches in Earth Sciences*, 16(1), 128-151. [doi: 10.48308/esrj.2025.235940.1225](https://doi.org/10.48308/esrj.2025.235940.1225) [Persian]
- 40) Stathopoulos, S., Gemitzi, A., & Kourtidis, K. (2024). Statistical downscaling of remote sensing precipitation estimates using MODIS cloud properties data over Northeastern Greece. *Remote Sensing in Earth Systems Science*, 7(2), 113–122. <https://doi.org/10.1007/s41976-024-00107-1>
- 41) U.S. Environmental Protection Agency. (2025). How will climate change affect extreme precipitation across the United States? Retrieved from <https://www.epa.gov/climatechange-science/extreme-precipitation>
- 42) Wu, Y., Gao, J., & Zhao, A. (2024). Cloud properties and dynamics over the Tibetan Plateau—A review. *Earth-Science Reviews*, 248, 104633. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104633>
- 43) Xie, X., Ma, L., Yao, J., & Mao, W. (2025). Spatiotemporal Variability of Cloud Parameters and Their Climatic Impacts over Central Asia Based on Multi-Source Satellite and ERA5 Data. *Remote Sensing*, 17(15), 2724. <https://doi.org/10.3390/rs17152724>
- 44) Yao, B., Teng, S., Lai, R., Xu, X., Yin, Y., Shi, C., & Liu, C. (2020). Can atmospheric reanalyses (CRA and ERA5) represent cloud spatiotemporal characteristics?. *Atmospheric Research*, 244, 105091. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105091>
- 45) Zhou, C., Zelinka, M., & Klein, S. (2016). Impact of decadal cloud variations on the Earth's energy budget. *Nature Geoscience*, 9(12), 871–874. <https://doi.org/10.1038/ngeo2828>