


Synoptic Patterns of Atmospheric Circulation Affecting Widespread Monthly Droughts in the Cold Period of Iran

Sousan Heidari¹, Mostafa Karimi^{2*} , Ghasem Azizi³, AliAkbar Shamsipour⁴

1. PhD in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
 2. **Corresponding Author**, Associate Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran:
Email: Mostafakarimi.a@ut.ac.ir, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7820-6728>
 3. Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
 4. Associate Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received: 18 February 2025 Revised: 05 May 2025 Accepted: 23 May 2025 Published: 22 June 2026</p> <p>Keywords: Dry periods, Synoptic Patterns, Southwest Asia Cyclone, Subtropical Jet, Trough, Ridge.</p>	<p>Drought is among the most significant climatic challenges affecting arid and semi-arid regions such as Iran, typically triggered by specific atmospheric circulation patterns. This study aims to identify the atmospheric circulation patterns associated with widespread monthly droughts in Iran, using long-term data from 1979 to 2021 and the ZSI index. The dataset, sourced from the ERA5 reanalysis, includes geopotential height, specific humidity, meridional and zonal wind components, air temperature and monthly precipitation with a spatial resolution of 0.25 degrees. The analysis indicates that widespread droughts do not occur during September, June, July and August. Overall, nine atmospheric circulation clusters were identified with four dominant patterns accounting for over 77% of drought events, emerging as the primary synoptic systems responsible for these occurrences. These patterns include: (1) lower-level subtropical high combined with a mid-level subtropical ridge, (2) lower-level subtropical high integrated with the Siberian high-pressure system with a mid-level ridge, (3) subtropical ridge present at both lower and mid-levels, and (4) lower-level high-pressure system and anticyclone over land. The findings emphasise the significant role of anticyclonic centres, high-pressure systems, and subtropical ridges, mainly active between the Arabian Sea and the Arabian Peninsula, in driving widespread monthly droughts in Iran. The northward shift of these systems relative to the climatological mean results in a marked decrease in precipitation across Iran. Additionally, the spatial configuration of these systems interacts with broader regional and planetary circulation patterns, highlighting the necessity for further research to better understand both monthly and seasonal precipitation variability and the occurrence of extreme drought events.</p>
<p>Heidari, S. , Karimi, M. , Azizi, G. and Shamsipour, A. A. (2026). Synoptic Patterns of Atmospheric Circulation Affecting Widespread Monthly Droughts in the Cold Period of Iran. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (48), 19-44.</p>	
<p>© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan</p>	
<p> DOI: 10.22111/jneh.2025.50956.2105</p>	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Drought is one of the most significant climatic hazards, especially in arid and semi-arid regions such as Iran. Its intensity and extent have been increasing due to climate change and atmospheric circulation patterns. This natural phenomenon is directly linked to anomalies in mid- and upper-tropospheric atmospheric conditions. Synoptic phenomena such as cyclones, anticyclones, troughs, and ridges play a crucial role in the occurrence and severity of droughts. Studies by Pary et al. (2010) and Lutka et al. (2020) have demonstrated that high-pressure ridges and low-pressure troughs in the mid-troposphere can intensify drought conditions across extensive areas in Europe and its central regions. Both global and regional research have confirmed that synoptic systems influence pressure and wind anomalies, ultimately affecting precipitation patterns and contributing to the development and persistence of prolonged and severe droughts in various regions. Furthermore, identifying atmospheric patterns associated with drought occurrence at global and regional scale enables more effective forecasting and management of this hazard.

Domestic studies have emphasised that changes in atmospheric structures, particularly in mid- and upper-tropospheric pressure systems over West Asia and the Mediterranean, have a significant impact on Iran's droughts and widespread extreme events (Khoshakhlagh et al., 2012 & 2020; Mohammadi et al., 2012; Azizi & Alizadeh, 2014; Saghaei et al., 2023; Mashaikh et al., 2023; Vaziri et al., 2023). Although numerous studies have examined this hazard from various perspectives, especially from a synoptic standpoint, comprehensive research investigating both the spatial-temporal distribution and synoptic circulation patterns has been limited. The objective of this study is not only to identify the monthly synoptic circulation patterns associated with widespread droughts in Iran but also to analyse the atmospheric structure of these patterns. The findings of this study will provide a deeper understanding of the relationship between monthly circulation patterns and the occurrence of extensive droughts across Iran.

DATA AND METHODS

Widespread monthly droughts in Iran are primarily influenced by four major synoptic circulation patterns, represented by clusters 7, 8, 1, and 5. These clusters collectively account for over 77% of widespread drought occurrences, with clusters 7 and 8 alone contributing to more than 50% of these events (Table 1).

In autumn, clusters 7 and 5 play a dominant role in the occurrence of widespread droughts, while clusters 4, 5, and 6 are particularly active in October. During winter, cluster 8 is the most influential pattern in December, January, and February, with cluster 7 also contributing significantly in February. In spring, cluster 7 is prominent in March, cluster 1 in April, and both clusters 7 and 5 are influential in May.

These findings highlight the critical impact of specific synoptic patterns on Iran's drought conditions. A better understanding of these patterns can improve drought prediction and management, leading to more effective strategies to mitigate the impact of this climatic hazard.

Table 1: Temporal Distribution of Synoptic Circulation Clusters Related to Widespread Monthly Droughts (with an affected area greater than 80%)

Cluster	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	Total contribution	Percentage of total Frequency
1			2	1		1	8	2	14	14.4%
2		1	1	2	1	1	1		7	7.2%
3	2				1	3			6	6.2%
4	4							1	5	5.2%
5	6	2				1		3	12	12.4%
6	4								4	4.1%
7		8	2	1	5	6	3	4	29	29.9%
8		4	5	5	5	1			20	20.6%
Total Widespread Monthly Drought	16	15	10	9	12	13	12	10	97	100%

To identify the atmospheric patterns influencing widespread monthly droughts in Iran, ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) were utilized. These data include geopotential height, specific humidity, zonal and meridional wind components, and air temperature at five pressure levels (850, 700, 500, 300, and 200 hPa), as well as monthly precipitation from 1979 to 2021. These data, with a spatial resolution of 0.25 degrees and a monthly temporal resolution, cover atmospheric conditions over Iran and its surrounding regions. The accuracy of ERA5 precipitation data has been confirmed in various studies, and its use is recommended (Rahmatova et al., 2021; Taghizadeh et al., 2021; Heidari et al., 2024; Bahrami & Darand, 2024).

The ZSI index was employed to assess drought severity, categorizing drought occurrence into two distinct states: 0 (no drought) and 1 (drought). To distinguish between regional and widespread droughts, a drought event was considered widespread if more than 80% of Iran's land area was affected. The results indicated that widespread droughts occurred only in eight months of the year (October to May), with no widespread events recorded during the warm-season months. Climatologists use cluster analysis as a common method to identify homogeneous climatic regions (Masoudian & Ataei, 2005; Masoudian, 2012; Mohammadiarian et al., 2019; Gerami et al., 2023). In this study, hierarchical clustering with Ward's method and correlation distance was employed for synoptic pattern classification. Geopotential height data at the 500-hPa level were transformed into a similarity matrix, and clustering was performed on a monthly scale. The analysis identified eight circulation clusters associated with widespread droughts in Iran, each cluster representing distinct atmospheric patterns that contribute to or exacerbate drought conditions during specific periods.

The selection of key clusters for final analysis was based on the temporal distribution and frequency of drought events. This approach allows for a more precise identification of the atmospheric patterns driving droughts.

RESULTS AND DISCUSSION

Widespread droughts in Iran are primarily influenced by three key factors: the position of anticyclones at lower atmospheric levels, the presence of mid-level troughs and ridges, and the subtropical jet stream at upper levels. During drought periods, the southwest Asian (Arabian) anticyclone shifts westward and settles over the Arabian Peninsula. This displacement reduces moisture advection from southern seas, increases geopotential height, and enhances negative vorticity, ultimately intensifying drought conditions. Conversely, during wet years, the eastward shift and expansion of the anticyclone's eastern flank strengthen moisture transport and enhance precipitation.

In December, the combination of the subtropical high and the Siberian high-pressure system plays a crucial role in widespread droughts in Iran. The westward extension of the Siberian high-pressure system influences the country across the west. Variations in the Mediterranean trough and westerly winds are significant factors in determining whether droughts occur or precipitation increases. Analyses have shown that the formation of blocking patterns at mid-latitudes and changes in ridge axes, particularly their elongation, can impact drought severity.

Furthermore, the subtropical jet stream is another key factor in the development of widespread droughts. Changes in the location and speed of its core control mid-level atmospheric flow dictate the pathways of cyclones entering Iran. These findings indicate that for predicting and managing Iran's droughts, understanding the dynamics of atmospheric systems and their interactions with geographical features is essential.

CONCLUSION

Widespread monthly droughts in Iran are primarily influenced by specific atmospheric circulation structures, including subtropical anticyclones, mid-level troughs and ridges associated with westerly winds, and subtropical jet streams. During the cold season, the northwestward shift of the southwest Asian anticyclone prevents precipitation systems from entering and blocks moisture transport from southern seas, leading to drought. Conversely, its eastward movement creates favorable conditions for precipitation.

At mid-tropospheric levels (500 and 700 hPa), the establishment of an anticyclone over the Arabian Peninsula suppresses atmospheric instability and limits the deepening of Mediterranean troughs. Additionally, the presence of a lower-level (850-hPa) anticyclone can transport moisture from the Arabian Sea to Iran. The extension of ridges and the stabilization of the subtropical jet stream over southwestern Iran are other critical factors contributing to widespread droughts, as they hinder the penetration of precipitation systems into the country.

REFERENCES

References [in Persian]

- Azizi, G. and Alizadeh, T. (2014). The Relationship between Circulation Pattern Types in Sea Level Pressure and Precipitation in Iran. *Physical Geography Research*, pp 297-310. doi: 10.22059/jphgr.2014.52133. [In Persian]
- Bahrani, A. and Darand, M. (2024). Evaluation of Temporal-Spatial Accuracy of Precipitation Estimation of ERA-5 Database over Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 19(1), 27-46. doi: 10.30499/ijg.2024.455625.1599. [In Persian]
- Gerami, M. S., Karimi, M., Azizi, G. and Rafati, S. (2022). Synoptic analysis of precipitation and Widespread spring thunderstorm in North-West Iran. *Physical Geography Research*, 54(1), pp 95-110. doi: 10.22059/jphgr.2022.334160.1007659. [In Persian]
- Heidari, S., Karimi, M. and Beyranvand, A. (2024). Evaluate the performance of ERA5 reanalysis data in Iran's rainfall estimation and spatial analysis of the country's precipitation regime. *Research in Earth Sciences*, 15(2), pp 1-24. doi: 10.48308/esrj.2024.104225. [In Persian]
- Khoshakhlagh, F., Karimi Ahmad Abad, M., Jasemi, S. M., & Kaki, S. (2020). Statistical-Synoptic analysis on the climatic variability of the rainfall regime in the mid-west of Iran with emphasis on the occurrence of severe droughts. *Climate Change Research*, 1(1), pp 63-82. doi: [10.30488/ccr.2020.235986.1004](https://doi.org/10.30488/ccr.2020.235986.1004). [In Persian]
- Khoshakhlagh, F., Azizi, Q., & Rahimi, M. (2012). Synoptic patterns of drought and wet spells in southwestern Iran during winter. *Geographical Sciences*, 12(25), pp 57-77. [In Persian]
- Mashayekh, F., Lashkari, H., Daryabari, S. and Ranjbar, M. (2022). Analysis of the effectiveness of precipitation anomalies during the occurrence of extreme and extreme droughts in the south of Iran in the last three solar cycles. *Geography*, 20(74), pp 1-20. [http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1401.20.74.1.1](https://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1401.20.74.1.1) [In Persian]
- Masoudian, S. A. (2012). Identification of weather types in Isfahan. *Geographical Research*, 27(3), pp 65-86. [In Persian]
- Masoudian, S. A., & Ataei, H. (2005). Identification of rainy seasons in Iran using cluster analysis. *Humanities Journal of Isfahan University*, 18(1), pp 1-12. [In Persian]
- Mohamadyariyan M, Tavousi T, khosravi M, Hamidiyanpour M. Zoning of Iranian Heavy Precipitation Regime. *GeoRes* 2019; 34 (2), pp 183-192. Doi: 10.29252/geores.34.2.183. [In Persian]
- Mohammadi, H., Fattahi, E., Shamsipour, A., Akbari, M. (2012). Dynamic analysis of Sudanic systems and occurrence of heavy rainfall in southwestern Iran, *Journal of Applied Research in Geographical Sciences (JARGS)*, 12(24), pp 24-7. [In Persian]

Saghafi, M., Barati, G. R., Alijani, B., & Moradi, M. (2022). Comparative analysis of the mechanism of autumn and winter rainfalls in the southwest of Iran. *Research in Earth Sciences*, 13(2), pp 58-69. doi:[10.48308/esrj.2022.100930](https://doi.org/10.48308/esrj.2022.100930). [In Persian]

Vazirimehr, M. , Hamidianpour, M. , Khosravi, M. and Nazaripour, H. (2022). Atmospheric circulation types and winter extreme dry/wet spells in the southeast district of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(3), 641-656. doi:10.22059/jesphys.2022.327069.1007337. [In Persian]

References [in English]

Lhotka, O., Trnka, M., Kyselý, J., Markonis, Y., Balek, J. and Možný, M. (2020). Atmospheric circulation as a factor contributing to increasing drought severity in central Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18), p.e2019JD032269. <https://doi.org/10.1029/2019JD032269>

Parry, S., Prudhomme, C., Hannaford, J. and Lloyd-Hughes, B. (2010). Examining the spatio-temporal evolution and characteristics of large-scale European droughts. In *Proceedings of the BHS Third International Symposium* (pp. 135-142). British Hydrological Society. <http://www.ceg.ncl.ac.uk/bhs2010/>

Rakhmatova, N.; M. Arushanov, L. Shardakova, B. Nishonov, R. Taryannikova, V. Rakhmatova, and D.A. Belikov. (2021). Evaluation of the Perspective of ERA-Interim and ERA5 Reanalyses for Calculation of Drought Indicators for Uzbekistan. *Atmosphere*, 5: 527. doi.org/10.3390/atmos12050527

Taghizadeh, E.; F. Ahmadi-Givi, L. Brocca, and E. Sharifi. (2021). Evaluation of satellite/reanalysis precipitation products over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 9: pp 3474-3497. doi.org/10.1080/01431161.2021.1875508.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

الگوهای همدید گردش جو مؤثر بر خشکسالی‌های ماهانه فراگیر دوره سرد ایران

سوسن حیدری^۱، مصطفی کریمی^{۲*}، قاسم عزیزی^۳، علی اکبر شمسی پور^۴

۱. دانش آموخته دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

۲. دانشیار اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: Mostafakarimi.a@ut.ac.ir ; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7820-6728>

۳. استاد اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

۴. دانشیار اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>خشکسالی یکی از چالشی‌ترین پدیده‌های اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران است که تحت تأثیر الگوهای خاص گردش جوی رخ می‌دهد. این پژوهش به‌منظور شناسایی الگوهای گردش جوی خشکسالی‌های فراگیر ماهانه در ایران با استفاده از داده‌های بلندمدت (۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱) و شاخص ZSI انجام شده است. داده‌های مورد استفاده شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، نم و یخه، دما، باد مداری و نصف‌النهاری و بارش ماهانه از پایگاه داده ERA5 با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه می‌باشند. براساس نتایج، در ماه‌های سپتامبر، ژوئن، ژوئیه و آگوست هیچ‌گونه خشکسالی فراگیری مشاهده نشد. ۸ خوشه گردش جو برای خشکسالی‌های فراگیر ماهانه شناسایی شد. از میان این ۸ خوشه، ۴ خوشه با فراوانی بیش از ۷۷ درصد، الگوهای غالب گردش جو و سامانه‌های همدید مؤثر در وقوع خشکسالی‌های فراگیر شناسایی شدند. این ۴ الگوی جوی به‌ترتیب فراوانی شامل الف) پارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین همراه با پشته جنب‌حاره تراز میانی، ب) پارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین تلفیق‌شده با پرفشار سیبری همراه با پشته تراز میانی، ج) پشته پارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین و میانی و د) پارتفاع - واچرخند تراز زیرین مستقر بر خشکی می‌باشند. به‌طور کلی، مرکز واچرخندی، پارتفاع و پشته‌های جنب‌حاره که به‌طور متوسط در محدوده‌ای از دریای عرب تا شبه‌جزیره عربستان فعال هستند، نقش اساسی در رخداد خشکسالی‌های فراگیر ماهانه ایران ایفا می‌کنند. این پدیده‌های همدید با گسترش شمال‌سو نسبت به شرایط میانگین، باعث کاهش شدید بارش در ایران می‌شوند. همچنین، الگوی استقرار این پدیده‌ها در اندرکنش با سایر ساختارهای گردش جو منطقه و سیاره‌ای است. بنابراین، بررسی چرایی این تغییرات می‌تواند به درک تغییرپذیری بارش ماهانه و فصلی و رخدادهای شدید و فراگیر خشکسالی کمک قابل‌توجهی کند.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶</p> <p>واژه‌های کلیدی: دوره‌های خشک، الگوهای همدید، واچرخند جنوب‌غرب آسیا، جت جنب‌حاره، ناوه و پشته.</p>

استاد: حیدری، سوسن، کریمی، مصطفی، عزیزی، قاسم و شمسی پور، علی اکبر. (۱۴۰۵). الگوهای همدید گردش جو مؤثر بر خشکسالی‌های ماهانه فراگیر دوره سرد ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۸)، ۱۹-۴۴.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.50956.2105



مقدمه

خشکسالی یکی از مهم‌ترین ناهنجاری‌های جوی است که اثرات عمیقی بر اکوسیستم‌ها، کشاورزی و منابع آبی جوامع دارد. این مخاطره طبیعی در نتیجه تغییرات اقلیمی و نوسانات الگوهای گردش جو، به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک همچون ایران، تشدید نیز خواهد شد. تغییر در الگوهای جوی شامل چرخندها، واچرخندها و سامانه‌های همدید می‌شود، می‌تواند منجر به تغییرات شدیدی در اقلیم و بروز خشکسالی‌های طولانی و مداوم گردد. بنابراین، درک دقیق این الگوها و رابطه آن‌ها با تغییرپذیری بارش و رخداد مخاطره خشکسالی در هر منطقه‌ای، ضروری است. مطالعات جهانی نشان داده‌اند که ارتباط پیچیده‌ای میان الگوهای جوی و وقوع خشکسالی‌ها در مقیاس کلان وجود دارد؛ به‌طوری‌که این ارتباط می‌تواند به‌عنوان یک ابزار پیش‌بینی‌کننده مهم در مدیریت بحران‌های خشکسالی مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال، پژوهش‌هایی مانند مطالعه خشکسالی‌های ایالات متحده (نامیاس^۱، ۱۹۹۱)، گردش جو و خشکسالی‌های چانگما (بیون^۲، ۱۹۹۲، a, b) و علل خشکسالی‌های آمریکای شمالی (ترنبرث و برانستاتور^۳، ۱۹۹۲) نشان داده‌اند که بسیاری از خشکسالی‌ها به‌طور مستقیم با تغییرات در الگوهای گردش جو، به‌ویژه در ترازهای میانه و بالای جو مرتبط هستند. به‌ویژه در خشکسالی‌های مناطقی نظیر هاوایی (چو و همکاران^۴، ۱۹۹۳) کره (بیون^۵، ۱۹۹۶) و اروپای مرکزی (کرویتورو و همکاران^۶، ۲۰۱۱؛ برونر و چارتیه-رسکن^۷، ۲۰۲۴) مشاهده شده است که ناهنجاری‌های جوی در این ترازها می‌توانند الگوهای خشکسالی را تقویت یا تضعیف کنند. در این راستا، پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که ساختارهای خاص گردش جو، از جمله سامانه‌های واچرخند، ناوه‌ها و پشته‌ها، به‌طور قابل‌توجهی بر شدت و مدت زمان خشکسالی‌ها در مناطق مختلف تأثیرگذارند. برای مثال، پژوهش‌های ژیراردین^۸ و همکاران (۲۰۰۶) و بونتگن^۹ و همکاران (۲۰۱۰) بر تحلیل سینوپتیکی خشکسالی‌های کانادا و آلمان تأکید دارند که در این مناطق، پشته‌های بلند در تراز بالای جو و سامانه‌های فشاری در تراز میانه جو، نقش اصلی در گسترش خشکسالی‌ها ایفا می‌کنند. در همین راستا، مطالعات پاری^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۰) و لوتکا^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان داده‌اند که پشته‌های فشار بالا و ناوه‌های کم‌فشار در تراز میانه جو می‌توانند الگوهای جوی خشکسالی را در سطوح وسیع‌تری در اروپا و منطقه مرکزی آن تقویت کنند. علاوه بر این، نتایج پژوهش‌هایی مانند آنچه که توسط فاولر و آدامز^{۱۲} (۲۰۰۴) انجام شده، بر اهمیت تأثیرات دورپیوندهای اقیانوسی و جوی در پیش‌بینی خشکسالی‌ها تأکید دارند. نتایج کلی این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که خشکسالی‌ها نه‌تنها به‌واسطه ناهنجاری‌های بارشی بلکه به‌طور عمده از طریق تغییرات در گردش جوی و فشار سطح زمین بروز می‌کنند. سامانه‌های فشاری، پشته‌ها، ناوه‌ها و ناهنجاری‌های گردش جوی در ترازهای مختلف، به‌ویژه در تراز میانه و بالای جو، به‌عنوان عوامل کلیدی در تشدید

1 Namias

2 Byun

3 Trenberth & Branstator

4 Chu et al

5 Byun

6 Croitoru et al

7 Brunner & Chartier-Rescan

8 Girardin

9 Buntgen

10 Parry

11 Lhotka

12 Fowler and Adams

خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت شناخته شده‌اند. به‌علاوه، الگوهای جوی مانند تغییرات فصلی در موقعیت‌های پشته و ناوه می‌توانند به‌طور مؤثری زمان‌بندی و شدت خشکسالی‌ها را در سطح جهانی تعیین کنند.

پژوهش‌های داخلی نشان می‌دهد که خشکسالی در ایران به‌طور پیچیده‌ای تحت تأثیر الگوهای جوی و پدیده‌های همدید قرار دارد. خسروی (۱۳۸۳) روابط میان الگوهای چرخش جوی کلان‌مقیاس نیم‌کره شمالی و خشکسالی‌های سالانه سیستان و بلوچستان را بررسی کرده است. در پژوهش دیگری، مفیدی و زرین (۱۳۸۴) تأثیر سامانه‌های کم‌فشار سودانی را در ایجاد بارش‌های سیل‌زا در ایران مورد مطالعه قرار داده‌اند. این پژوهش‌ها نشان‌دهنده ارتباط تنگاتنگ الگوهای جوی با وقوع خشکسالی‌های منطقه‌ای است. درعین‌حال، پژوهش‌های دیگری مانند اردکانی و همکاران (۱۳۸۷) و رضیئی و همکاران (۱۳۸۸) بر تحلیل دینامیک همیدیدی بارش‌های شدید در مناطق مختلف، از جمله خراسان و خاورمیانه تأکید دارند. همچنین، جعفربیگللو و همکاران (۱۳۸۸) و خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۱) و (۱۳۹۹) به‌ویژه الگوهای همدید را که موجب ترسالی‌های غرب ایران و خشکسالی جنوب‌غرب ایران می‌شوند، مورد تحلیل قرار دادند. در این راستا، مطالعاتی مانند پژوهش‌های محمدی و همکاران (۱۳۹۱) و رنجبرسعادت‌آبادی و همکاران (۱۳۹۲) نشان می‌دهند که سامانه‌های خاص جوی نظیر سامانه‌های کم‌فشار سودانی و تغییرات فشاری می‌توانند عامل اصلی در وقوع خشکسالی‌های طولانی‌مدت و فراگیر در شمال و جنوب‌غرب ایران باشند. در مقابل، برخی پژوهش‌ها مانند پژوهش عزیززی و علیزاده (۱۳۹۳) و ثقفی و همکاران (۱۴۰۱) به تحلیل بی‌هنجاری‌های الگوهای فشاری و تأثیر آن‌ها بر بارش‌های فراگیر ایران و به‌خصوص در مناطق جنوب غرب ایران پرداخته‌اند. پژوهش‌های اخیر مانند گوهری و همکاران (۱۴۰۱)، مشایخ و همکاران (۱۴۰۱) و وزیرمهر و همکاران (۱۴۰۱) نیز به‌ویژه بر مکانیزم‌های جوی مؤثر بر ناهنجاری‌های شدید بارشی و ارتباط آن‌ها با خشکسالی‌های شدید و فوق‌شدید در جنوب و جنوب‌شرق ایران تأکید دارند.

پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که وردش گردش جو و تغییرپذیری الگوهای همدید، به‌ویژه پدیده‌های اصلی آن یعنی واچرخندها و چرخندهای فعال در منطقه، می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر وقوع خشکسالی‌های شدید اثر بگذارند. به‌طور خاص، واچرخندها همان‌گونه که در شرایط تشدید بارش نقش دارند، می‌توانند شرایط خشکی را در مناطق مختلف ایران تشدید کنند و موجب گسترش و افزایش شدت خشکسالی‌های منطقه‌ای شوند. در مجموع، بررسی مجموعه این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که الگوهای گردش جو و همدید، از جمله نحوه قرارگیری واچرخندها، چرخندهای و تغییرات الگوهای جریان باد، نقش بسیار مهمی در شکل‌گیری خشکسالی‌های نواحی مختلف ایران دارند. این پژوهش‌ها از یک‌سو بر اثر سامانه‌های خاص جوی مانند کم‌فشارهای سودانی و واچرخندها در ایجاد بارش‌های سنگین و ناهنجاری‌های بارشی تأکید دارند و از سوی دیگر، برخی به ارتباط تغییرات الگوهای فشاری با خشکسالی‌های مناطق مختلف ایران پرداخته‌اند.

باین‌حال، علی‌رغم این که پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده است، ولی همچنان چندین شکاف علمی نیز وجود دارد که نیاز است به آن‌ها پرداخته شود. اکثر پژوهش‌ها بر دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت متمرکز بوده و کمتر به تحلیل الگوهای جوی در سطح وسیع‌تر و در مقیاس‌های بلندمدت پرداخته‌اند. علاوه بر این، رویکردهای مطالعاتی بیشتر منطقه‌ای و حتی گاهی محلی بوده است. این پژوهش در صدد است تا با ارائه یک رویکرد جامع‌تر از نظر زمانی - مکانی و تمرکز بر خشکسالی‌های فراگیر (بر مبنای آستانه ۸۰ درصد مساحت کشور) در مقیاس ماهانه و تحلیل الگوهای همیدیدی موجب رخداد خشکسالی‌های فراگیر ملی را در سه لایه زیرین، میانی، بالا و نیم‌رخ جو، دیدی

روشن‌تر از اندک‌نش دو بخش اصلی سامانه اقلیمی، گردش جو و سطح زمین ارائه دهد. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه، شناسایی و تحلیل الگوهای ماهانه گردش جو موجب خشکسالی‌های فراگیر ماهانه ایران است. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند به بهبود پیش‌بینی‌های خشکسالی با استفاده از پیش‌بینی‌های فصلی داده‌های جوی که قابل استفاده در برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر منابع آبی و مقابله با بحران‌های آبی در کشور باشد، کمک کند.

داده‌ها و روش‌ها

برای بررسی الگوهای جوی اثرگذار بر خشکسالی‌های فراگیر ماهانه در ایران، داده‌های ماهانه بارش در محدوده سرزمین ایران و متغیرهای جوی شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، دمای هوا، بردار و سرعت باد و نم ویژه در محدوده‌ای از ۴۰ درجه غربی تا ۷۰ درجه شرقی و ۱۰ تا ۷۰ درجه شمالی مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها بازه زمانی ۴۳ ساله از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ را در بر می‌گیرند و با تفکیک زمانی ماهانه دریافت شده‌اند. تحلیل‌ها در پنج تراز مختلف شامل ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال انجام شده است. داده‌های یادشده، اطلاعات جامعی درباره شرایط جوی ارائه می‌دهند که صحت و دقت آن‌ها در مطالعات پیشین (مولایی و لشکری، ۱۳۹۹) مورد تأیید قرار گرفته است.

برای تهیه داده‌های بارش و جوی، از مجموعه داده‌های ERA5، یکی از پیشرفته‌ترین محصولات مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواشناسی اروپا (ECMWF) استفاده شد. این داده‌ها با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و تفکیک زمانی ماهانه، به صورت یکنواخت در فضا توزیع شده‌اند و خطاهای ناشی از درون‌یابی داده‌های ایستگاهی را کاهش می‌دهند. صحت داده‌های بارش ERA5 نیز در پژوهش‌های مختلف تأیید و استفاده از آن توصیه شده است (رحمتوا و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ تقی زاده و همکاران^۲، ۲۰۲۱؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۳؛ بهرامی و دارند، ۱۴۰۳).

در مرحله نخست، داده‌های بارش ماهانه در بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به صورت آرایه‌ای با ابعاد ۵۹×۷۸×۵۰۴ تشکیل شدند. در این آرایه، ۵۹×۷۸ تعداد گره‌ها با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و ۵۰۴ نشان‌دهنده تعداد ماه‌ها است که در قالب ماتریسی با ساختار (S) (زمان در سطر و مکان در ستون‌ها) سازمان‌دهی و سپس برای تحلیل‌های بعدی پردازش گردیدند.

سپس برای ارزیابی شدت خشکسالی، از شاخص ZSI استفاده شد که یک شاخص بدون بُعد مبتنی بر میانگین و انحراف معیار بارش است. این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$ZSI = \frac{X_i - \bar{X}}{\delta} \quad (1)$$

X_i ، \bar{X} و δ به ترتیب مقادیر بارش، میانگین بلندمدت و انحراف معیار بارش در دوره زمانی ماهانه می‌باشد (محمدی و همکاران^۳، ۲۰۱۹) که شدت‌های خشکسالی آن شامل ۴ طبقه (خشکسالی بسیار شدید (شاخص کمتر از -۱/۲۵)، شدید (-۱/۲۵ تا -۰/۸۴)، متوسط (-۰/۸۴ تا -۰/۵۲) و ضعیف (-۰/۵۲ تا -۰/۲۵) می‌باشد (مشاری و همکاران^۴،

1 - Rakhmatova et al

2 - Taghizadeh et al

3 - Mahmoudi et al

4 - Mashari et al

۲۰۱۴؛ اکوزوو و همکاران^۱، ۲۰۲۰). در اینجا لازم است به این نکته اشاره شود که هدف اصلی پژوهش، بررسی شدت خشکسالی نبوده است. به عبارت دیگر، تمرکز بر طبقه‌بندی خشکسالی‌ها از ضعیف تا بسیار شدید مدنظر نبوده، بلکه تنها وقوع یا عدم وقوع خشکسالی به‌عنوان دو وضعیت متمایز (صفر و یک) مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، تمامی انواع خشکسالی، از ضعیف‌ترین تا شدیدترین، به‌صورت کلی به‌عنوان یک وضعیت برای تحلیل در نظر گرفته شده‌اند.

در گام بعد، گستره خشکسالی ماهانه محاسبه گردید. درصد مساحت تحت تأثیر خشکسالی با رابطه زیر تعیین شد:

$$PDA = \frac{\sum_{i=1}^n g_n}{n} \times 100 \quad (2)$$

که در آن: PDA درصد گستره خشکسالی، g_n تعداد گره‌های تحت شرایط خشکسالی، n کل گره‌های واقع در محدوده‌ی ایران می‌باشد.

در این پژوهش، «خشکسالی فراگیر» به‌عنوان وضعیتی تعریف شده است که در آن بیش از ۸۰ درصد از مساحت جغرافیایی ایران تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته باشد. این مفهوم بر اساس طبقه‌بندی گستره خشکسالی به پنج بازه درصدی (۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰، ۴۰ تا ۶۰، ۶۰ تا ۸۰، و ۸۰ تا ۱۰۰) ارائه شده است. انتخاب آستانه ۸۰ درصد برای تعریف خشکسالی فراگیر، با هدف تمایز بین خشکسالی‌های منطقه‌ای و ناحیه‌ای صورت گرفته است. این آستانه نشان‌دهنده وضعیتی است که خشکسالی به‌شکل گسترده و همه‌جانبه، بخش عمده‌ای از پهنا کشور را در بر می‌گیرد. نتایج استخراج گستره‌های خشکسالی ماهانه نشان داد که در دوره مطالعاتی ۲۰۲۱-۱۹۷۹، ۹۷ خشکسالی ماهانه فراگیر رخ داده که توزیع آن در جدول ۱ آمده است.

براساس نتایج، ۴ ماه دوره گرم سال یعنی ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر در هیچ یک از این ماه‌ها خشکسالی در بیش از ۸۰ درصد مساحت کشور رخ نداده است. بنابراین، تحلیل خوشه‌ای بر روی داده‌های ۸ ماه اکتبر الی می انجام گرفته است.

جدول ۱: فراوانی رخداد خشکسالی فراگیر (بیش از ۸۰٪ مساحت کشور) ماهانه در ایران (منبع: نویسندگان)

ماه	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	آگوست
فراوانی خشکسالی فراگیر	۰	۱۶	۱۵	۱۰	۹	۱۲	۱۳	۱۲	۱۰	۰	۰	۰

در مرحله بعد، برای شناسایی خوشه‌های زمانی خشکسالی‌های فراگیر و الگوهای جوی مرتبط با آن‌ها، از تحلیل خوشه‌ای استفاده شد. تحلیل خوشه‌ای یک روش آماری است (مسعودیان، ۱۳۸۴). اقلیم‌شناسان از تحلیل خوشه‌ای برای شناسایی مناطق همگن اقلیمی استفاده می‌کنند (مسعودیان و عطایی، ۱۳۸۴؛ مسعودیان، ۱۳۹۱؛ محمدیاریان و همکاران، ۱۳۹۸؛ گرامی و همکاران، ۱۴۰۱). این روش یکی از الگوریتم‌های یادگیری بدون نظارت است که داده‌ها را بر اساس شباهت به گروه‌های مختلف دسته‌بندی می‌کند. روش‌های خوشه‌بندی به دو دسته اصلی شامل فازی (سرت و همکاران^۲، ۲۰۱۵؛ بونیس و اودوت^۱، ۲۰۱۸) و قطعی (دی کاروالیو و همکاران^۲، ۲۰۱۲؛ فریرا و همکاران^۲،

1 - Ekwezuo et al

2 - Sert et al

۲۰۱۶) می‌باشد. در این پژوهش، از روش سلسله‌مراتبی با فاصله همبستگی و ادغام وارد برای استخراج خوشه‌های زمانی در مقیاس ماهانه استفاده شد. ابتدا ماتریس داده‌های ارتفاع ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ ه.پ به ماتریس شباهت یا فاصله تبدیل و سپس با استفاده از روش سلسله‌مراتبی، خوشه‌بندی انجام شد (حسنعلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳). براساس این تحلیل، تعداد ۸ خوشه مختلف برای خشکسالی‌های فراگیر ماهانه ایران شناسایی شده است. بنابراین، فراوانی خوشه‌ها در هریک از ماه‌های دارای خشکسالی فراگیر استخراج و با در نظر گرفتن توزیع مناسب شماره خوشه و ماه مورد نظر، یکی از خوشه/ماه برای تحلیل و تفسیر گردش جو و الگوهای همدید از سطح زمین تا تراز بالا انتخاب و نقشه‌های ترکیبی متغییرهای جوی در نرم‌افزار گردس ترسیم گردید.

نتایج و بحث

توزیع ماهانه ۸ خوشه، بر اساس درصد گستره خشکسالی‌های ماهانه با گستره‌ای بیش از ۸۰ درصد، در جدول ۲ نمایش داده شده است. خوشه‌های ۷ و ۸ حدود ۵۰ درصد از الگوهای گردش جو مؤثر بر خشکسالی‌های فراگیر را توجیه می‌کنند که با خوشه‌های ۱ و ۵، این مقدار به بیش از ۷۷ درصد می‌رسد (جدول ۲). خوشه‌های ۷ و ۸ در ماه نوامبر غالب بوده‌اند، در حالی که خوشه‌های ۴، ۵ و ۶ در اکتبر نقش فعال‌تری داشته‌اند. به‌طور کلی، در پاییز خوشه‌های ۷ و ۵ نقش پررنگی در رخداد خشکسالی‌های فراگیر ایران دارند. در هر سه ماه فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه)، خوشه ۸ بیشترین سهم را داشته است که در ماه فوریه علاوه بر خوشه ۸، خوشه ۷ نیز با ۵ مورد جلب توجه می‌کند. در بهار، خوشه‌های ۷ و ۱ که در مارس خوشه ۷، در آوریل خوشه ۱ و در ماه می خوشه‌های ۷ و ۵ به‌طور مشخصی برجسته‌اند.

در مجموع، دو خوشه ۷ و ۸ با فراوانی بیش از ۵۰٪ (به ترتیب با ۲۹,۹ و ۲۰,۶ درصد) سهم بسیار محسوسی در رخداد خشکسالی‌های فراگیر ماهانه داشته‌اند. بعد از این دو، خوشه‌های ۱ و ۵ به ترتیب با ۱۴,۴ و ۱۲,۴ درصد در رتبه بعدی قرار دارند. بنابراین، ۴ خوشه ۷، ۸، ۱ و ۵ در مجموع بیش از ۷۷ درصد رخداد خشکسالی‌های فراگیر ماهانه ایران را توجیه می‌کنند. به عبارتی، الگوهای گردش جو و همدید معادل آنها موجب بیش از دو سوم خشکسالی‌های ماهانه فراگیر ایران بوده‌اند.

دو ماه اکتبر و مارس پراکندگی بیشتری در انطباق خوشه‌ها نشان می‌دهند. این می‌تواند ناشی از ویژگی اقلیمی این دو ماه، یعنی زمان گذار از تابستان به پاییز و زمستان به بهار که در آن گردش جو و سامانه‌های آن تغییرپذیری بالاتری دارند، باشد. همان‌طور که در بالا بیان شد، ماه‌های دوره گرم (ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر) درصد گستره خشکسالی در آن چهار ماه کمتر از ۸۰ درصد مساحت کشور بوده است. بنابراین، ماه‌های اشاره‌شده از تحلیل خوشه‌ای و استخراج الگوهای گردش جو کنار گذاشته شدند.

1 - Bonis & Oudot

2 - De Carvalho et al

3 - Ferreira et al

جدول ۲: توزیع زمانی خوشه‌های گردش جو رخداد خشکسالی‌های ماهانه با درصد گستره خشکسالی بیش از ۸۰ درصد (منبع: نویسندگان)

خوشه	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	جمع مشارکت خوشه	درصد از فراوانی کل
۱			۲	۱		۱	۸	۲	۱۴	۱۴,۴%
۲	۱		۱	۲	۱	۱	۱		۷	۷,۲%
۳	۲			۱	۳				۶	۶,۲%
۴	۴						۱		۵	۵,۲%
۵	۶	۲				۱		۳	۱۲	۱۲,۴%
۶	۴								۴	۴,۱%
۷	۸	۸	۲	۱	۵	۶	۳	۴	۲۹	۲۹,۹%
۸	۴	۴	۵	۵	۵	۱			۲۰	۲۰,۶%
جمع خشکسالی‌های فراگیر ماهانه	۱۶	۱۵	۱۰	۹	۱۲	۱۳	۱۲	۱۰	۹۷	۱۰۰%

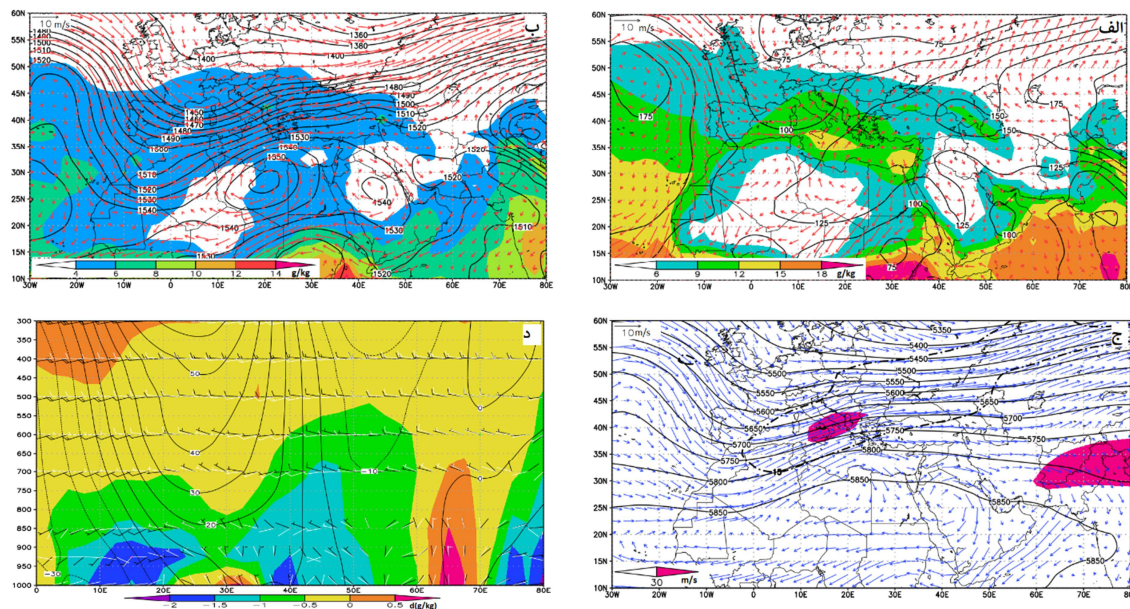
انتخاب خوشه‌ها و ماه‌های نمونه برای نمایش و تفسیر نقشه الگوهای گردش جو و سامانه همدید فعال در ماه انتخابی، بر اساس فراوانی مشارکت خوشه‌ها در رخداد خشکسالی‌های بالای ۸۰ درصد و تنوع در خوشه انتخابی ماه رخداد خشکسالی‌های فراگیر بوده است. نام‌گذاری الگوها نیز بر اساس ساختار اصلی و فعال گردش جو (مشایخ و لشکری، ۱۴۰۲) در رخداد خشکسالی در ترازهای زیرین و میانی بوده است.

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل الگوهای جوی مرتبط با رخداد‌های خشکسالی فراگیر، نقشه ترکیبی داده‌های جوی ترازهای ۱۰۰۰، ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ ه.پ و نیم‌رخ قائم ترسیم و تحلیل شدند. این نقشه‌ها شامل: الف) ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و نم ویژه تراز ۱۰۰۰ ه.پ، ب) ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و نم ویژه تراز ۸۵۰ ه.پ، ج) بردار باد تراز ۷۰۰ ه.پ، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ ه.پ و سرعت باد تراز ۳۰۰ ه.پ، د) نیم‌رخ قائم بی‌هنجاری نم ویژه و ارتفاع ژئوپتانسیل در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی به همراه مقایسه میانگین سرعت و جهت باد (رنگ سفید) با ماه خشک (رنگ تیره) می‌باشد.

اکتبر (۱۹۹۲) خوشه ۵ (پرار تفاع و واچرخند تراز زیرین مستقر بر خشکی)

زبانه پرفشار پیش‌آمده از شمال شرق ایران که تا شرق مدیترانه گسترش یافته، به‌همراه آشکار شدن واچرخند جنوب غرب آسیا بر روی شبه‌جزیره عربستان، در انتهای شرقی پرارتفاع جنب‌حاره در تراز ۸۵۰ ه.پ و واچرخند/پرارتفاع شمال آفریقا بر روی سواحل شمالی مدیترانه شرقی و ادغام آنها به شکل یک کمان شمال‌سو، باعث عدم تشکیل ناوه بر روی شرق مدیترانه شده است (شکل ۱، الف و ب). گرچه جریان باد بر روی دریای عرب شمال شرقی بوده، ولی قرارگیری واچرخند جنوب‌غرب آسیا بر روی خشکی در مسیر جریان‌های جنوبی انتقال‌دهنده رطوب باعث ایجاد جریان‌های شمالی تراز ۱۰۰۰ ه.پ و شمال غربی ۸۵۰ ه.پ و عدم تزریق رطوبت به سمت ایران شده است. این واچرخند که نقش اصلی در انتقال هوای گرم و مرطوب دریاهای جنوبی بر روی جنوب‌غرب آسیا و به‌ویژه ایران دارد با این موقعیت بیشتر نقش مانع در مسیر جریان‌های جنوبی داشته است. در تراز ۵۰۰ ه.پ جابه‌جایی جنوب‌سوی پرارتفاع جنب‌حاره مشهود است. اما این جابه‌جایی شرایط مساعدی در تشکیل موج مستقر بر دریای مدیترانه نداشته

است. در این ماه پشته ضعیفی در مرکز مدیترانه، جریان واچرخندی تراز ۷۰۰ در شمال غرب شبه جزیره عربستان و سرعت پایین باد و عدم مشاهده جت ترازهای بالای، باعث جریان‌های مداری غربی بر روی منطقه و ایران شده است (شکل ۱، ج). کاهش سرعت باد و رطوبت در منطقه و بر روی ایران و همچنین، افزایش ارتفاع (تشکیل پشته) در موقعیت مرکزی مدیترانه به وضوح در نقشه نیم‌رخ این ماه دیده می‌شود (شکل ۱، د). در نتیجه شرایط گردش جو گفته شده سامانه‌ها بارش‌زا فعالیت اندکی داشته و رخداد بارش ماه اکتبر سال ۱۹۹۲ ناچیز بوده است.

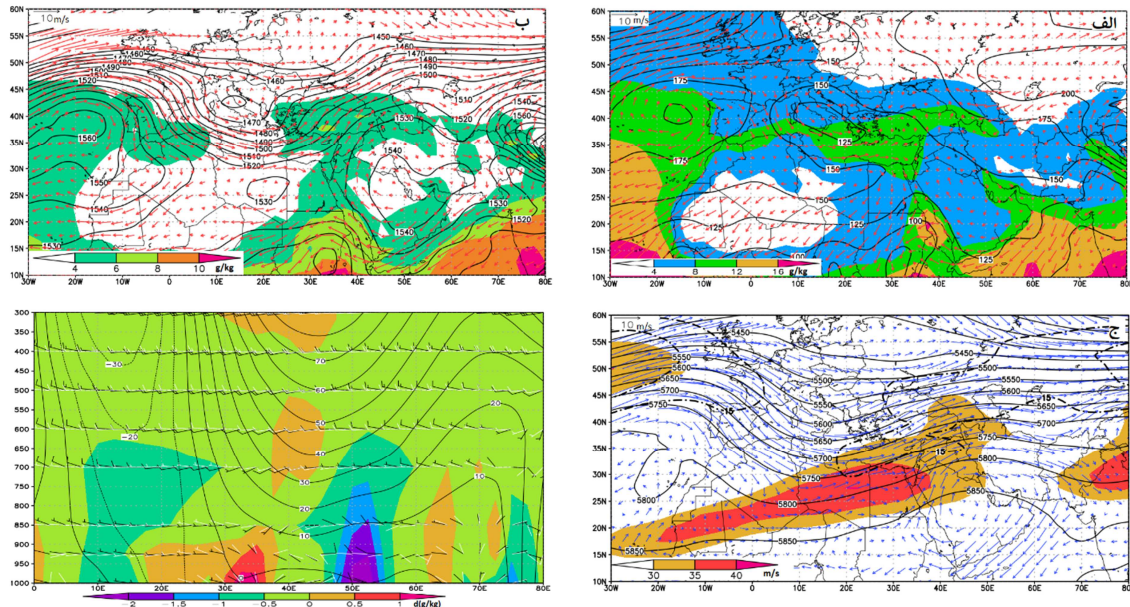


شکل ۱: الگوی گردش جو (خوشه ۵) در رخداد خشکسالی فراگیر (۸۲٪ مساحت کشور) اکتبر ۱۹۹۲، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

نوامبر (۱۹۹۸) خوشه ۷ (پراتفاح جنب‌حاره تراز زیرین همراه با پشته پراتفاح جنب‌حاره تراز میانی)

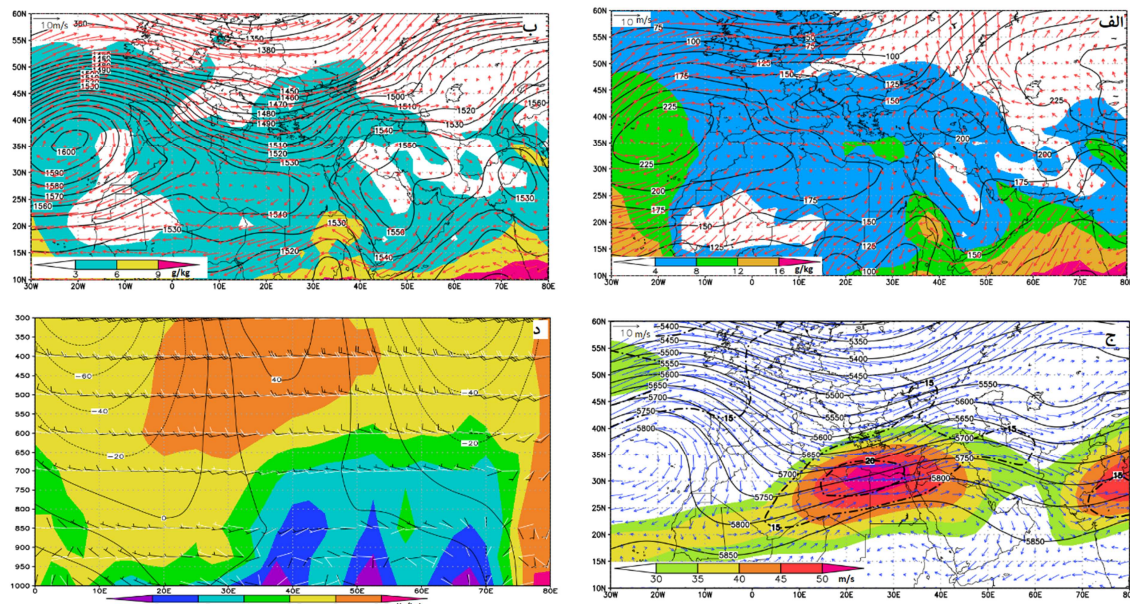
نقشه الگوی تراز ۱۰۰۰ ه.پ تاحدوی شبیه اکتبر ۱۹۹۲ است؛ با این تفاوت که پرفشار مستقر در شمال ایران به سمت شمال جابه‌جا شده و گسترش شرق‌سوی پرفشار آژورس بر روی اروپا و کم‌فشار/ارتفاع ضعیفی در مرکز مدیترانه تشکیل شده است (شکل ۲، الف). این شرایط جریان‌های شمال‌شرقی و جنوبی به ترتیب بر روی دریای عرب و شبه جزیره عربستان ایجاد نموده است. در تراز ۸۵۰ ه.پ نیز انتقال به جنوب واچرخند/پراتفاح شمال آفریقا و تشکیل کم‌فشار بریده و ناوه در مرکز مدیترانه مشاهده می‌شود. گرچه در ترازهای زیرین جریان باد بر روی دریای عرب و دریای سرخ مناسب بوده و جریان‌های جنوبی گرم و مرطوب در غرب منطقه تا سواحل دریای سیاه امتداد داشته‌اند؛ ولی قرارگیری هسته گسترده شده پراتفاح/واچرخند جنوب غرب آسیا بر روی خشکی‌ها از جنوب ایران تا مرکز شبه جزیره عربستان، مانع انتقال هوای گرم و مرطوب به سمت ایران شده و همچنین، گسترش شمال‌سوی این واچرخند ایجاد یک پشته نسبتاً قوی بر روی ایران نموده است (شکل ۲، ب). در ترازهای میانی ۷۰۰ و ۵۰۰ ه.پ برخلاف اکتبر ۱۹۹۲، در مرکز مدیترانه ناوه بلندی از مرکز اروپا تا شمال آفریقا استقرار یافته، استقرار این ناوه در این موقعیت و جریان واچرخندی تراز ۷۰۰ ه.پ بر روی شبه جزیره عربستان به همراه گسترش زبانه شمال‌سوی پراتفاح جنب‌حاره همانند تراز ۸۵۰ ه.پ باعث تشکیل پشته و به‌طور عمده جریان مداری و شمال‌غربی بر روی ایران شده

است. قرارگیری سمت راست خروجی جت جنب‌حاره در غرب، شمال‌غرب ایران شرایط پایداری را تقویت نموده است (شکل ۲، ج). کاهش محسوس رطوبت جو در نیم‌رخ قائم تا تراز میانی جو و در مقابل افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل تا ترازها بالایی در موقعیت ایران مشاهده می‌شود (شکل ۲، د).



شکل ۲: الگوی گردش جو (خوشه ۷) در رخداد خشکسالی فراگیر (۹۹٪ مساحت کشور) نوامبر ۱۹۹۸، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

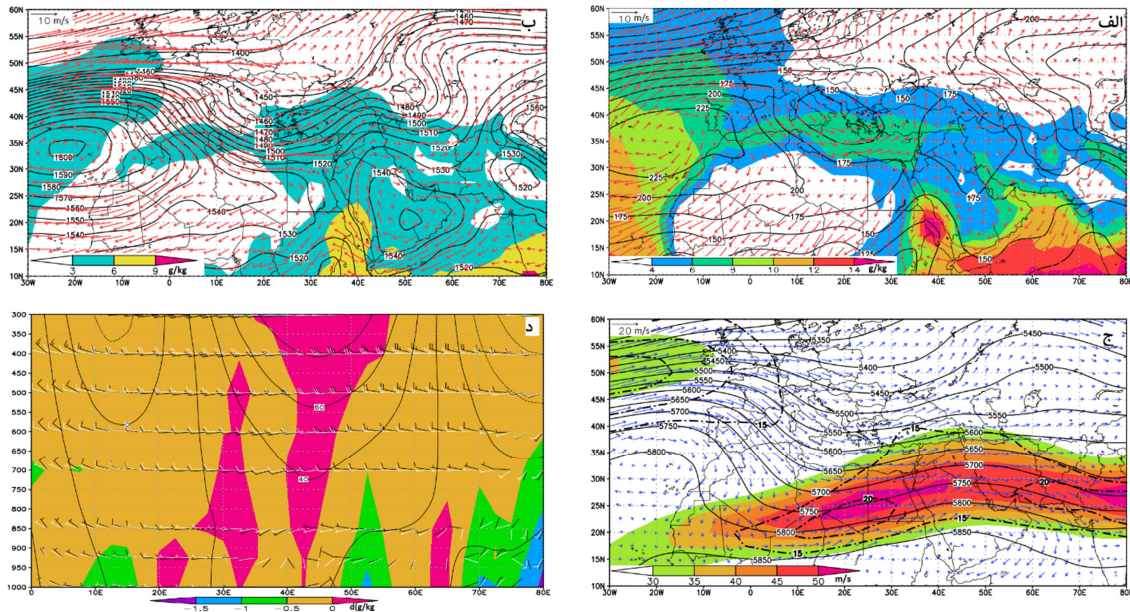
دسامبر (۲۰۱۷) خوشه ۸ (پرار ارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین تلفیق شده با پرفشار سیبری همراه با پشته تراز میانی) در این ماه، در دو تراز زیرین (۱۰۰۰ و ۸۵۰ ه.پ) وجود دو پرفشار - پرارتفاع که در تراز ۱۰۰۰ ه.پ از سمت شمال شرق با مرکز بسته‌ای در شمال‌غرب بر روی کشور گسترش یافته و در تراز ۸۵۰ ه.پ همان پرارتفاع جنوب غرب آسیا در مرکز و شمال شرق شبه‌جزیره عربستان مستقر شده است. گرچه این الگو ایجاد جریان‌های شمال شرقی بر روی دریاهای جنوبی نموده است، ولی با قرارگیری این پرفشار/پرارتفاع بر روی ایران جریان‌های جنوبی سمت غربی آنها خارج محدوده جغرافیایی ایران بوده و بنابراین، کشور بارش مناسبی دریافت نکرده و در این ماه خشکسالی فراگیر ایران را در برگرفته بوده است (شکل ۳، الف و ب). در ترازهای میانی الگوی تکرار پشته - ناوه از شرق اطلس (پشته تراز ۵۰۰ و واچرخند تراز ۷۰۰ ه.پ)، ناوه مرکز مدیترانه، پشته غرب ایران و ناوه شرق ایران دیده می‌شود. این الگو به همراه قرارگیری جت جنب‌حاره تراز ۳۰۰ ه.پ بر روی مصر ولی مداری و جریان واچرخندی تراز ۷۰۰ ه.پ بر روی شبه‌جزیره عربستان (شکل ۳، ج)، باعث شده علاوه بر عدم تزریق هوای گرم مرطوب در تراز زیرین که در نقشه نیم‌رخ با کاهش قابل توجه رطوبت بر روی منطقه و به‌خصوص ایران دیده می‌شود (شکل ۳، د)، شرایط صعود و ناپایداری فراهم نباشد.



شکل ۳: الگوی گردش جو (خوشه ۸) در رخداد خشکسالی فراگیر (۹۶٪ مساحت کشور) دسامبر ۲۰۱۷، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

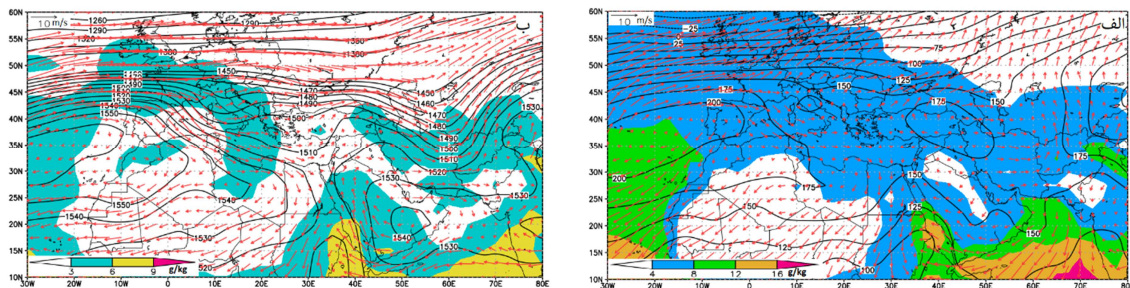
ژانویه (۱۹۹۵) خوشه ۸ (پرازتقاع جنب‌حاره تراز زیرین تلفیق شده با پرفشار سیبری همراه با پشته تراز میانی)

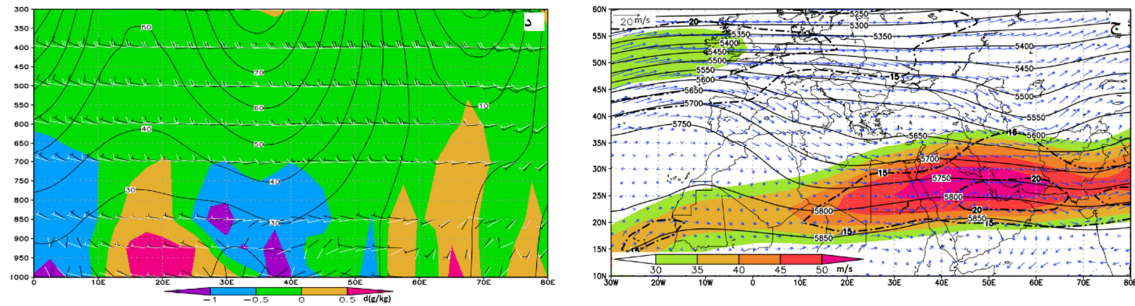
در ژانویه خشک ۱۹۹۵، در تراز ۰.۱۰۰۰ پ. پیشانی پرفشار گسترده شده از سمت شرق (زبانه پرفشار سیبری) بر روی ایران، تشکیل یک مرکز بسته وسیعی تا سواحل شرق مدیترانه داده است. همانند قبل جریان شمال شرقی با رطوبت بسیار بالا بر روی دریای عرب وجود داشته که با زبانه کم فشار سودانی تا عرض ۲۵ درجه همراه با جریان جنوبی تا مرکز دریای سرخ پیشروی نموده، اما این جریان مرطوب به عرض‌های بالاتر و به سمت ایران نفوذی نداشته است (شکل ۴، الف). این شرایط در تراز ۰.۸۵۰ پ. کمی پیچیده تر است. در این تراز با تمایل بخش شمالی پرازتقاع جنوب غرب آسیا به سمت عرض‌های بالا، مرکز بسته بیرونی آن تا ۳۰ درجه شمالی گسترش یافته که باعث تشکیل پشته در غرب ایران تا سواحل دریای سیاه گردیده است. این پشته در سمت شرقی خود ناوه موربی از شمال دریای خزر تا شرق ایران ایجاد کرده است (شکل ۴، ب). اگرچه حرکات و اچرخندی تراز ۰.۷۰۰ پ. به عرض‌های پایین تر منتقل شده، ولی قرارگیری آن در نصف‌النهار ۴۵ درجه شرقی به همراه پشته تراز ۰.۵۰۰ پ. در همین موقعیت و جریان جت بسیار قوی که از شمال آفریقا تا شبه جزیره هند که البته بخش چپ خروجی هسته غربی آن در شمال شبه جزیره عربستان استقرار داشته است، باعث جریان‌های مدری و شمال غربی ضعیفی بر روی ایران شده‌اند. مجموع شرایط از تراز زیرین تا بالای جو، شرایط مساعدی برای بارش بر روی ایران نبوده و در نتیجه ژانویه بسیار خشکی به وقوع پیوسته است.



شکل ۴: الگوی گردش جو (خوشه ۸) در رخداد خشکسالی فراگیر (۹۷٪ مساحت کشور) ژانویه ۱۹۹۵، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

فوریه (۲۰۰۲) خوشه ۸ (پرار ارتفاع جنب‌حاره نراز زیرین تلفیق شده با پرفشار سیبری همراه با پشته تراز میانی) با توجه به این که خوشه انتخابی فوریه ۲۰۰۲ با ماه ژانویه ۱۹۹۵ یکسان بوده است، الگوی همدید و شرایط گردش جو در تراز زیرین، میانی و بالایی شباهت زیادی به آن دارد (شکل ۵، الف و ب). در این ماه نیز پرفشار/ پرار ارتفاع تراز زیرین به ترتیب در شمال غرب ایران و شبه جزیره عربستان و جریان و اچرخند پشته تراز میانی به همراه جریان جت قوی در جنوب ایران دیده می‌شود. تفاوت اندک فوریه منتخب با ژانویه، بیشتر در تراز میانی و موقعیت و شکل جت جنب‌حاره قابل مشاهده است. در این ماه جت در موقعیت شرقی‌تر بر جنوب ایران و به شکل کاملاً مداری قرار گرفته است (شکل ۵، ج). همچنین، در تراز ۸۵۰ ه.پ، ناوه مستقر بر شرق کشور نیز عمیق‌تر بوده که به علت قرارگیری یال عقب آن بر روی ایران، باعث شکل‌گیری جریان‌ها شمال غربی محسوس‌تری از مرکز تا شرق کشور شده است.

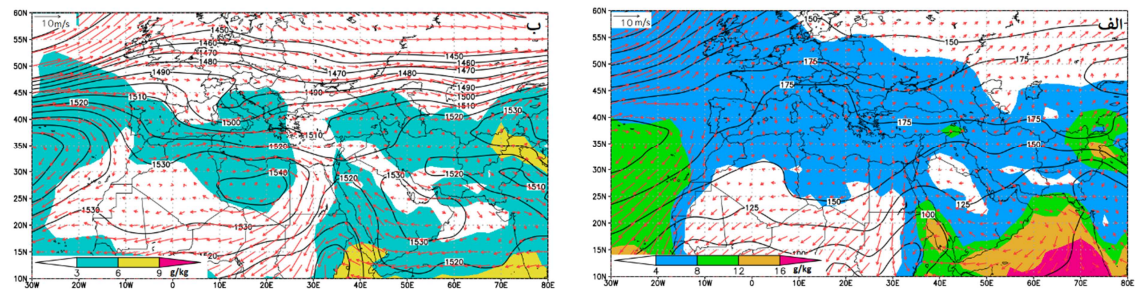


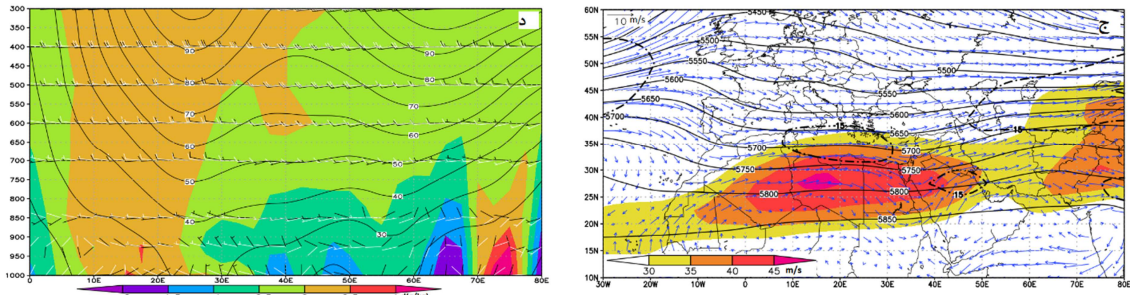


شکل ۵: الگوی گردش جو (خوشه ۸) در رخدادهای خشکسالی فراگیر (۸۵٪ مساحت کشور) فوریه ۲۰۰۲، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

مارس (۲۰۰۴) خوشه ۷ (پار ارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین همراه با پشته پار ارتفاع جنب‌حاره تراز میانی)

در مارس ۲۰۰۴، گسترش شرق‌سوی پرفشار سیبری و غرب‌سوی پرفشار آژورس و ادغام آن‌ها، باعث شکل‌گیری حوضه پرفشاری از جنوب ایران تا عرض‌های میانه از شرق اطلس تا آسیای میانه شده است. این شرایط فشاری بادهای شمالی بر روی ایران و به‌ویژه شرق مدیترانه ایجاد کرده است (شکل ۶، الف). در تراز ۸۵۰ ه.پ نیز پار ارتفاع جنوب غرب آسیا به سمت شمال تا جنوب عراق کشیده شده و شرق کشور نیز تحت پوشش زبانه پار ارتفاعی از شبه-جزیره هند می‌باشد. زبانه کم‌فشار سودانی تنها تا ۲۵ درجه، فقط در جهت شمالی بر روی دریای سرخ گسترش یافته است (شکل ۶، ب). جریان باد و الگوی ژئوپتانسیل ترازهای میانی تا حدودی متفاوت‌تر از دو ماه قبل است. به‌طوری‌که واچرخند تراز ۷۰۰ ه.پ در شرق نصف‌النهار ۵۰ درجه شرقی و عرض ۲۰ درجه شمالی و ناوه بسیار کم‌عمق تراز ۵۰۰ ه.پ در همسایه‌های غربی ایران قرار گرفته است. موقعیت جت جنب‌حاره نیز مناسب‌تر از دو ماه قبل است، اما شرایط نامساعد ترازهای زیرین، گردش تقریباً مناسب اما ضعیف تراز میانی و بالایی را خنثی نموده است. بنابراین، همراهی شرایط رخدادهای بارش در ضخامت مناسب جو وجود نداشته است (شکل ۶، ج). در نمودار نیم‌رخ نیز کاهش رطوبت و افزایش ارتفاع جو در این ماه نسبت به میانگین قابل مشاهده است (شکل ۶، د).

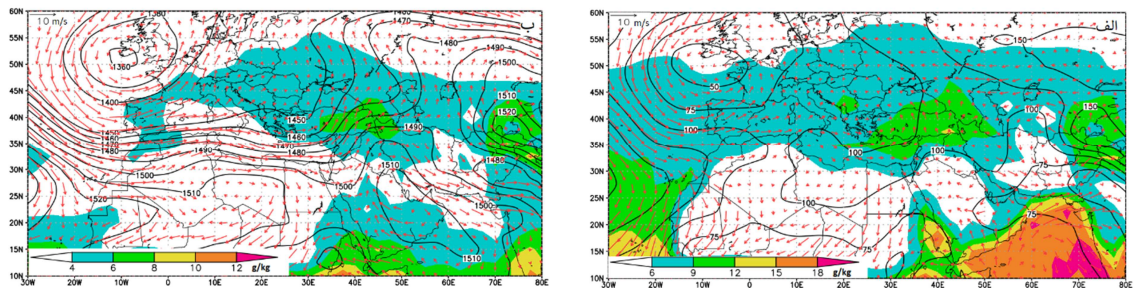


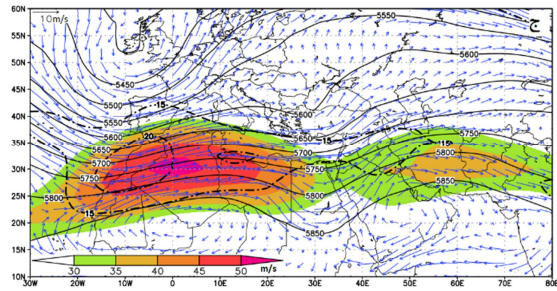
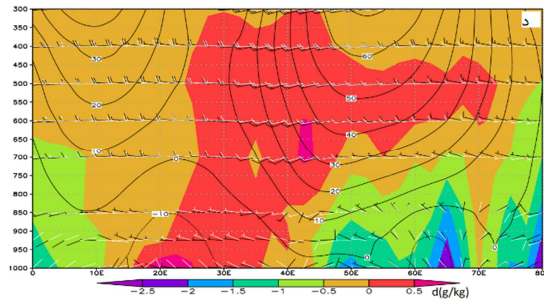


شکل ۶: الگوی گردش جو (خوشه ۷) در خرداد خشکسالی فراگیر (۷۵٪ مساحت کشور) مارس ۲۰۰۴، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

آوریل (۲۰۰۰) خوشه ۱ (پشته پرازتفاح جنب‌حاره تراز زیرین و میانی)

به‌طور متوسط از ماه آوریل با شروع گردش موسمی جنوب آسیا، الگوی جریان باد بر روی دریای عرب و فشار در جنوب و نیمه جنوبی و جنوب‌غرب آسیا متفاوت از دوره سرد شده، به‌طوری‌که در آن ناحیه کم‌فشاری و جریان‌های جنوب غربی حاکم می‌شود. در آوریل ۲۰۰۱ نیز چنین شرایط باد و فشاری در آن مناطق وجود داشته است (شکل ۷، الف). اما در تراز ۸۵۰ ه.پ قرارگیری شمال غرب - جنوب شرق سوی و اچرخند/پرازتفاح جنوب غرب آسیا ایجاد پشته بلند که تا سواحل دریای سیاه ادامه داشته بر روی ایران نموده است. اگرچه در شرق مدیترانه ناوه موربی حاصل گسترش زیانه کم‌ارتفاع مستقر بر شمال‌غرب اروپا مشاهده می‌شود، اما پشته یادشده مانع مهمی در حرکت شرق سوی آن به سمت ایران بوده است (شکل ۷، ب). در تراز میانی نیز ناوه تقریباً عمیقی در شرق مدیترانه تشکیل شده و جریان‌های جنوب غربی مساعدی بر روی منطقه تا غرب ایران مشاهده می‌شود. اما همان‌طور که در بالا بیان شد، به علت عدم حرکت شرق سوی مناسب، این الگو گردش جو، بارش مناسبی در این ماه برای ایران در پی نداشته و آوریل خشکی را شکل داده است (شکل ۷، ج). تضاد تراز زیرین و بالایی در نیم‌رخ جو تا حدودی قابل مشاهده است. در تراز زیرین بر روی ایران کاهش محسوس رطوبت، ولی در تراز میانی و بالا افزایش آن را مشاهده می‌کنیم (شکل ۷، د).

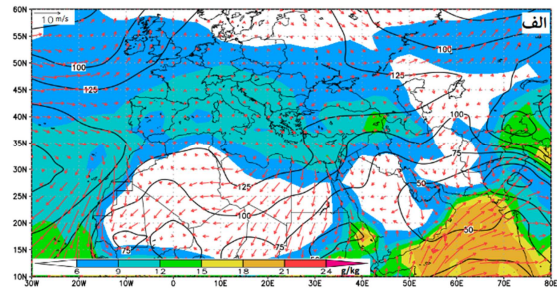
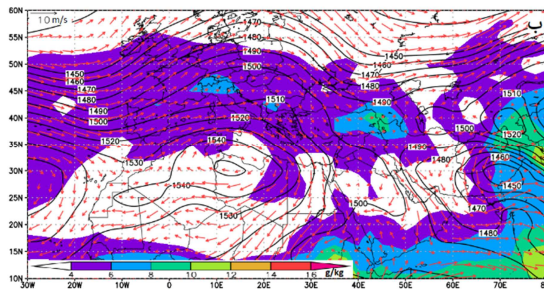


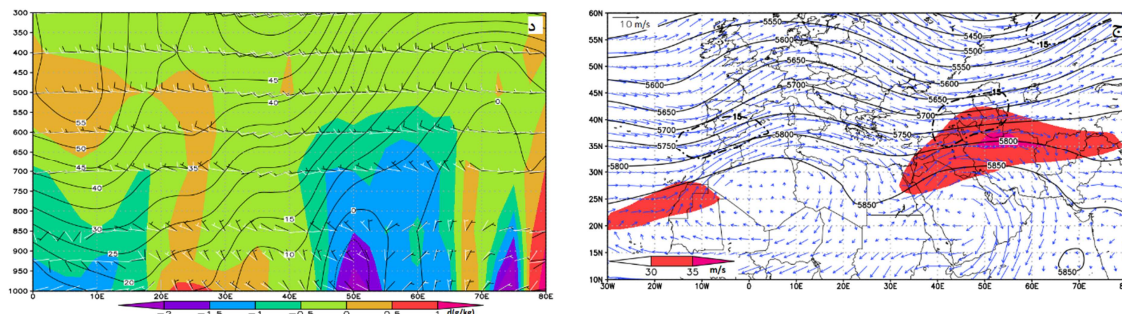


شکل ۷: الگوی گردش جو (خوشه ۱) در خرداد خشکسالی فراگیر (۹۹٪ مساحت کشور) آوریل ۲۰۰۰، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

می (۱۹۹۹) خوشه ۵ (پشته پرارتفاع جنب‌حاره تراز میانی)

گسترش زبانه‌های کشیده به سمت شرق از پرفشار جنب‌حاره‌ای آژورس بر روی دریای مدیترانه که تا دریای سیاه و خزر پیش آمده و زبانه کم فشار موسمی جنوب آسیا از سمت پاکستان بر روی خلیج فارس، شیب فشار شمالی - جنوبی عکس دوره سرد سال تشکیل داده و جریان‌های شمالی در منطقه و به‌ویژه ایران مسلط بوده‌اند. این جریان‌ها فقط در ناحیه شمال غرب و سواحل خزری می‌توانند منتقل کنند رطوبت به سمت ایران باشند که در شرایط مناسب تراز میانی منجر به تشکیل ابر و بارش شوند (شکل ۸، الف). همین شرایط در تراز ۸۵۰ ه.پ نیز دیده می‌شود با این تفاوت که مرکز پرارتفاع و واچرخند مستقل بر روی شمال آفریقا که زبانه‌های آن تا شبه‌جزیره عربستان گسترش یافته، جریان‌های قوی شمال غربی در جنوب غرب آسیا و غرب ایران، خلیج فارس ایجاد کرده است (شکل ۸، ب). در تراز میانی منطبق بر مرکز پرارتفاع تراز ۸۵۰ ه.پ، پشته ای در شمال آفریقا و در سمت راست آن ناوه موری که از مصر تا روسیه کشیده شده، مشاهده می‌شود. اما قرارگیری واچرخند تراز ۷۰۰ ه.پ در مرکز شبه‌جزیره عربستان و پشته تراز ۵۰۰ ه.پ بر روی ایران و قرارگیری محور جت بر روی سواحل جنوبی خزر که مشاهده آن در عرض جغرافیای بالا در این زمان از سال دور از انتظار است، اثر آن ناوه محدود به سواحل شرقی مدیترانه نموده و کشور شرایط مساعدی برای بارش نداشته است (شکل ۸، ج). نمودار نیم‌رخ جو نیز کاهش رطوبت این ماه نسبت به میانگین در محدوده جغرافیای ایران تا ترازهای بالا را نشان می‌دهد (شکل ۸، د).





شکل ۸: الگوی گردش جو (خوشه ۵) در رخداد خشکسالی فراگیر (۹۵٪ مساحت کشور) می ۱۹۹۹، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

تنوع زمانی و مکانی الگوهای گردش جوی در مقیاس منطقه‌ای، همراه با ویژگی‌های جغرافیایی در مقیاس محلی، منجر به تنوع اقلیمی چشمگیری در ایران شده است (مفیدی و همکاران، ۱۳۹۱). این تنوع اقلیمی به تغییر موقعیت سامانه‌های سینوپتیکی و تغییرات سال به سال در تعداد و اچرخندهای عبوری از منطقه وابسته است (مدرس و سیلوا، ۲۰۰۷). در خشکسالی‌های فراگیر شدید ایران، به جز فصل تابستان، سه مؤلفه جوی در سایر فصل‌ها نقش کلیدی ایفا می‌کنند: (۱) موقعیت و شکل گسترش و اچرخند در تراز زیرین، (۲) موقعیت ناوه و پشته در تراز میانی و (۳) موقعیت و شکل قرارگیری جت جنب‌حاره در تراز بالایی.

موقعیت و اچرخند در تراز زیرین در خشکسالی‌های فراگیر، معمولاً با جابه‌جایی به سمت غرب و قرارگیری بر روی شبه‌جزیره عربستان همراه است که این امر منجر به افزایش ارتفاع ژئوپتانسیلی، چرخندگی منفی و نزول هوا می‌شود. به علاوه، حاکمیت جریان‌های شمالی و کاهش جریان‌های صعودی از عوامل اصلی رخداد دوره‌های خشکی هستند (کیانین و همکاران، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۷). همان‌طور که حاج محمدی و همکاران (۱۳۹۳) نشان داده‌اند، سهم و اچرخندها در وقوع خشکسالی‌ها بیشتر از سایر الگوهاست. با حرکت و اچرخند به سمت شمال و استقرار آن روی شبه‌جزیره عربستان، نقش دریاهای جنوبی و غربی در فرارفت رطوبت به ایران کاهش می‌یابد. حجازی‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) نیز به این نتیجه رسیده‌اند که شدیدترین خشکسالی‌ها در ایران زمانی رخ می‌دهد که پراتفعا جنب‌حاره تا عرض ۳۰ درجه شمالی گسترش می‌یابد.

در مقابل، در سال‌های مرطوب، جابه‌جایی مرکز پراتفعا جنوب‌غرب آسیا (عربستان) به سمت شرق و قرارگیری بیشتر بر روی دریا منجر به کشیدگی مداری و افزایش گستره بازوی شرقی آن می‌شود. این تغییرات باعث تقویت جریان‌های شرقی - شمال‌شرقی بر روی دریای عرب و ایجاد ناوه عمیق‌تر در محور شرق - غرب بین پراتفعا جنوب‌غرب آسیا و شمال آفریقا می‌شود (کریمی و جعفری، ۱۳۹۴). بنابراین، موقعیت مکانی و اچرخند جنوب‌غرب آسیا در ترازهای زیرین و قرارگیری و اچرخند در دریای عرب نقش کلیدی در فرارفت رطوبت به ایران و افزایش رطوبت جو دارد (پژوه و جعفری، ۱۳۹۹؛ کیانی‌پور و همکاران، ۱۴۰۱؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ دلدازهی و همکاران، ۱۴۰۳). بیشتر رطوبت در گردش و اچرخندی پراتفعا جنوب‌غرب آسیا از روی دریاهای گرم عرب و عمان تأمین می‌شود (فرج‌زاده اصل و همکاران، ۱۳۸۸؛ کریمی و فرج‌زاده، ۱۳۹۰؛ لشکری و محمدی، ۱۳۹۴؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج برخی مطالعات بر اهمیت موقعیت مکانی و اچرخند جنوب‌غرب آسیا در ترازهای زیرین برای

تأمین رطوبت ایران تأکید دارند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۸). تغییرات در جابه‌جایی شرقی - غربی، شمالی - جنوبی و حتی کشیدگی هسته مرکزی واچرخند جنوب‌غرب آسیا، تأثیر بسزایی بر تزریق و انتقال رطوبت و به تبع آن بارش بر ایران دارد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۵؛ ۱۴۰۱؛ محمودی و همکاران، ۱۴۰۱).

نتایج تحلیل الگوهای خشکسالی فراگیر ماه دسامبر نشان می‌دهد که این الگوها تلفیقی از پرارتفاع جنب‌حاره در تراز زیرین و پرفشار سبیری هستند. خوش‌اخلاق (۱۳۷۶) نیز نشان داده است که در ماه‌های خشک دوره سرد سال، پرفشار سبیری تقویت شده و زبانه غربی آن با جهت شمال‌شرقی - جنوب‌غربی سرتاسر ایران را تحت سیطره خود قرار می‌دهد. موقعیت پرفشارهای جنب‌حاره‌ای آزورس و سبیری و نحوه پیکربندی آن‌ها نیز در وقوع خشکسالی‌ها مهم است (صادقی و همکاران، ۱۳۸۷؛ احمدی گیوی و همکاران، ۱۳۸۹). با این حال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که این الگو تنها در ماه دسامبر مشاهده می‌شود.

تغییرات در جریان بادهای غربی نیز می‌تواند از عوامل ایجاد دوره‌های خشکسالی فراگیر در ایران باشد (علیجانی و همکاران، ۱۴۰۰). ورود سامانه بارش‌زای مدیترانه‌ای از غرب باعث بارش باران یا برف در بسیاری از مناطق مرکزی و شرقی ایران می‌شود، درحالی‌که یک سیستم کم‌فشار جنوبی می‌تواند به بارش بیشتر منجر شود (کوثری و اسدی زارچ^۱، ۲۰۱۱). واچرخند عربستان در لایه میانی وردسپهر، نقش حیاتی در تعیین مسیر ورود سامانه‌ها، الگوی گسترش ناوه مدیترانه‌ای و طول مدت فعالیت سامانه‌های بارشی بر ایران دارد (مشایخ و لشکری، ۱۴۰۲). گسترش جنوب‌سوی ناوه مدیترانه‌ای و شار قائم بخار آب از دریاهای گرم جنوبی به جلو ناوه، نقش اصلی را در شدت بارش‌های فراگیر ایفا می‌کند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۵؛ کیخسروی و همکاران، ۱۴۰۱). در تراز میانی، غرب ایران در جلو پشته حاکم بر عراق، با افزایش پهنه زیر پوشش خشکسالی، کشیدگی پشته افزایش یافته و محور آن از حالت نسبتاً افقی به عمود تغییر می‌کند. بلاکینگ‌ها نیز می‌توانند با شکل‌گیری در طول ۵۰ تا ۹۰ درجه شرقی، باعث افزایش خشکسالی‌های فراگیر شوند (طولابی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۰). با این حال، برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که جابه‌جایی شرق‌سوی پشته می‌تواند پهنه زیر پوشش بارش سنگین را افزایش دهد (عزیزی و همکاران، ۱۳۸۸؛ عساکره و همکاران، ۱۳۹۳؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۳).

در نهایت، رودباد جنب‌حاره‌ای نیز در الگوهای همدید و ترمودینامیکی خشکسالی‌های فراگیر ایران نقش اساسی دارد. موقعیت و سرعت هسته جت جنب‌حاره بر روی خاورمیانه و امتداد محور آن در ترازهای فوقانی وردسپهر، ضمن کنترل گردش تراز میانی، مسیرهای ورود چرخندها به ایران را نیز کنترل می‌کند (مفیدی و زرین، ۱۳۸۴).

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رودباد جنب‌حاره‌ای نقشی اساسی در شکل‌گیری الگوهای همدید و ترمودینامیکی خشکسالی‌های فراگیر ایران ایفا می‌کند. این یافته‌ها با توجه به پژوهش‌های مفیدی و زرین (۱۳۸۴) که نشان دادند موقعیت و سرعت هسته جت جنب‌حاره‌ای در ترازهای فوقانی وردسپهر بر گردش تراز میانی و مسیرهای ورود چرخندها به ایران تأثیرگذار است، تأیید می‌شود. بنابراین، این پژوهش نشان‌دهنده اهمیت هسته جت جنب‌حاره‌ای در پیش‌بینی و تحلیل پدیده‌های خشکسالی در ایران می‌باشد.

همان‌طور که در مقدمه مطرح شد، براساس نتایج موجود و اصول حاکم بر گردش جو منطقه، فرض اصلی این بود که ساختارهای همدیدی نظیر واچرخند جنب‌حاره عربستان یا جنوب‌غرب آسیا، ناوه‌های مدیترانه‌ای، پشته‌های تراز

میانی و موقعیت جت جنب‌حاره‌ای می‌توانند عناصر کلیدی در بروز خشکسالی‌های فراگیر ایران باشند. نتایج تحلیل‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که این عناصر اصلی گردش جو منطقه نقش بسیار مهمی در رخداد دوره‌های خشک ماهانه البته در درجه اول با جابه‌جایی در موقعیت و آرایش با یک‌دیگر و همچنین تغییر در شدت و مسیر جریان باد دارند. الگوی ترکیبی واچرخندهای تراز زیرین با پشته‌های تراز میانی، در بیش از ۷۷ درصد از خشکسالی‌های فراگیر ماهانه کشور مشاهده شده است. همچنین، قرارگیری جت جنب‌حاره‌ای در موقعیت‌های نامساعد مداری، نقش مهمی در سرکوب ناپایداری و کاهش فراگیر بارش ایفا کرده است. از سوی دیگر، یافته‌های پژوهش می‌تواند پتانسیل بالایی برای استفاده در کنار پیش‌بینی مدل‌های فصلی و پیش‌آگاهی رخداد شرایط آبی خشکسالی داشته باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خشکسالی‌های فراگیر ماهانه در ایران، به‌طور عمده حاصل کنش و برهم‌کنش ساختارهای کلان‌مقیاس جو، از جمله واچرخندهای جنب‌حاره، پشته‌ها و ناوه‌های تراز میانی و جریان جت در تراز فوقانی جو هستند. تحلیل‌های همدید و دینامیکی انجام‌شده در این پژوهش حاکی از آن است که موقعیت، امتداد و شدت واچرخند جنوب‌غرب آسیا (عربستان)، به‌ویژه در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، در کنار نحوه استقرار ناوه مدیترانه‌ای و محور جت تراز بالا، نقش کلیدی در وقوع یا عدم وقوع خشکسالی‌های فراگیر ایفا می‌کنند. هنگامی که پراتفان جنوب‌غرب آسیا (عربستان) در موقعیتی غربی میانگین خود استقرار یابد، ضمن جلوگیری از تعمیق ناوه مدیترانه‌ای، فرارفت هوای گرم‌وخشک از شبه‌جزیره عربستان به دشت‌های بین‌النهرین و ایران را تشدید کرده و این شرایط سامانه‌های بارشی را با کمبود رطوبت مواجه کرده که علاوه بر کاهش بارش، می‌تواند رخداد‌های گردوخاک در منطقه را افزایش دهد. این الگو با گسترش شمال‌سوی خود، ساختاری پایدار در جو منطقه ایجاد می‌کند که مانع نفوذ سامانه‌های بارشی می‌شود. در مقابل، جابه‌جایی شرق‌سوی این سامانه همراه با تعمیق ناوه شرق مدیترانه، افزایش جریان‌های جنوب‌غربی و مداری و تحریک صعود رطوبت، موجب تقویت بارش‌ها و شکل‌گیری شرایط متفاوت و دوره ترسالی می‌گردد. چهار الگوی همدید شناسایی‌شده در این پژوهش، بیش از ۷۷ درصد از خشکسالی‌های فراگیر ماهانه را تبیین می‌کنند که اهمیت فوق‌العاده ساختارهای همدیدی در تبیین فراوانی، گستره و شدت خشکسالی‌ها را تأیید می‌نماید. بر این اساس، یافته‌های این پژوهش با فراهم کردن درکی نظام‌مند از دینامیک جوی مرتبط با خشکسالی، ظرفیت بالایی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی میان‌مدت و فصلی و تدوین راهبردهای کلان مدیریت منابع آب در مواجهه با بحران‌های خشکسالی در اختیار برنامه‌ریزان قرار می‌دهد. اما با این حال، با توجه به ساختار پیچیده اما نظام‌مند گردش جو و اثرپذیری گردش جو منطقه از گردش جو سیاره‌ای، لازم است در ادامه، عامل شکل‌گیری چنین الگوهایی در ارتباط با شاخص‌های دورپیوندی چون ENSO، NAO و حتی اندرکنش‌های بزرگ مقیاس و ردسپهر - پوشن سپهر به منظور شناخت دقیق‌تر سازوکارهای رخداد خشکسالی‌های فراگیر در ایران مطالعه گردد.

منابع

- احمدگیوی، فرهنگ؛ ایران‌نژاد، پرویز؛ محمدنژاد، علیرضا. (۱۳۸۹). اثر پرفشارهای جنب‌حاره و سیبری بر خشکسالی‌های غرب ایران، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- اردکانی، حسین؛ زمانیان، محمدتقی؛ هاشمی دوین، مه‌ری. (۱۳۸۷). مطالعه همدیدی و دینامیکی بیشترین بارش روی منطقه خراسان، فیزیک زمین و فضا، ۳۴(۲)، ۱۲۳-۱۰۷. Doi: [20.1001.1.2538371.1387.34.2.9.1](https://doi.org/10.1001/1.2538371.1387.34.2.9.1)
- بهرامی، اسرین؛ دارند، محمد. (۱۴۰۳). ارزیابی دقت زمانی - مکانی برآورد بارش پایگاه داده‌ی ERA5 بر روی ایران، ژئوفیزیک ایران، آماده انتشار. Doi: [10.30499/ijg.2024.455625.1599](https://doi.org/10.30499/ijg.2024.455625.1599)
- پژوه، فرشاد؛ جعفری، فرزانه. (۱۳۹۹). واكوی همدید بارش‌های سیل آسا و مخاطره‌آمیز غرب و جنوب‌غرب ایران در دهه اول فروردین ۱۳۹۸، اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۹(۱۱۴)، صص: ۱۶۵-۱۹۸۴. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.44600>
- ثقفی، مریم؛ براتی، غلامرضا؛ علیجانی، بهلول؛ مرادی، محمد. (۱۴۰۱). تحلیل تطبیقی سازوکار بارش‌های پاییز و زمستان جنوب‌غرب ایران، پژوهش‌های دانش زمین، ۱۳(۲)، ۵۸-۶۹. Doi: [10.48308/esrj.2022.100930](https://doi.org/10.48308/esrj.2022.100930)
- جعفری‌بگلو، منصور؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ اوجی، روح‌الله. (۱۳۸۸). موقعیت و فراوانی فصلی مسیرهای چرخندی در ترسالی‌های غرب میانی ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۱(۶۸)، صص: ۷۱-۸۴.
- حاجی محمدی، حسن؛ راستی، فاطمه؛ کرمی، مختار. (۱۳۹۳). بررسی همدیدی سامانه‌های واچرخندی و ارتباط آن با خشکسالی‌های استان فارس، دومین همایش ملی بیابان با رویکرد مدیریت مناطق خشک و بیابانی، اقلیم‌شناسی و روند خشکسالی در مناطق خشک، سمنان.
- حجازی‌زاده، زهرا؛ علیجانی، بهلول؛ سلیقه، محمد؛ نادى، ساناز؛ میرزایی، نبی. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات خشکسالی‌های ایران با رویکرد تغییر اقلیم. دگرگونی‌ها و مخاطرات آب‌وهوایی، ۲(۴)، صص: ۱-۲۳.
- حسنعلی‌زاده، نفسیه؛ مساعدی، ابوالفضل؛ ظهیری، عبدالرضا؛ بابانژاد، منوچهر. (۱۳۹۳). تعیین نواحی همگن توزیع بارش سالانه در سطح استان گلستان با استفاده از تحلیل خوشه‌ای و روس گشتاورهای خطی، آب‌و‌خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۸(۵)، صص: ۱۰۶۱-۱۰۷۱. <https://doi.org/10.22067/JSW.V010.26319>
- حیدری، سوسن؛ کریمی احمدآباد، مصطفی؛ عزیزی، قاسم؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر. (۱۴۰۳). اثر موقعیت ناه و پشته بادهای غربی بر گستره خشکسالی‌های ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۹۵(۳)، صص: ۱۶۱-۱۸۸. Doi: [10.22108/gep.2024.142104.1655](https://doi.org/10.22108/gep.2024.142104.1655)
- حیدری، سوسن؛ کریمی، مصطفی؛ بیرانوند، آذر. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل ERA5 در تخمین بارش ایران و واكوی فضایی رژیم بارشی کشور، پژوهش‌های دانش زمین، ۱۵(۲)، صص: ۱-۲۴. <https://doi.org/10.48308/esrj.2024.104225>
- خسروی، محمود. (۱۳۸۳). بررسی روابط بین الگوهای چرخش جوی کلان مقیاس نیم‌کره شمالی با خشکسالی‌های سالانه سیستان و بلوچستان، جغرافیا و توسعه، ۲(۳)، صص: ۱۶۷-۱۸۸. Doi: [10.22111/gdij.2004.3835](https://doi.org/10.22111/gdij.2004.3835)
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ عزیزی، قاسم؛ رحیمی، مجتبی. (۱۳۹۱). الگوهای همدیدی خشکسالی و ترسالی زمستانه در جنوب غرب ایران، علوم جغرافیایی، ۱۱۲(۲۵)، صص: ۵۷-۷۷.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ قائمی، هوشنگ؛ زاهدی، مجید؛ زاهدی، مجید. (۱۳۷۶). بررسی الگوهای ماهانه خشکسالی و ترسالی در ایران، تحقیقات جغرافیایی، ۱۲(۲)، صص: ۱۳۶-۱۵۴.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ کریمی احمدآباد، مصطفی؛ جاسمی، سیدمیثم؛ کاکي، سیف‌الله. (۱۳۹۹). واكوی آماری - همدید تغییرپذیری آب‌وهواشناختی رژیم بارش غرب میانی ایران با تأکید بر رخداد خشکسالی‌های شدید، پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی، ۱(۱)، صص: ۸۲-۶۳. Doi: [10.30488/ccr.2020.235986.1004](https://doi.org/10.30488/ccr.2020.235986.1004)
- دلدارزهی، زاهد؛ محمودی، پیمان؛ خسروی، محمود. (۱۴۰۳). سازوکارهای انتقال رطوبت دریای عرب در خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۵(۱)، صص: ۴۵-۷۲. Doi: [10.22108/gep.2023.136560.1571](https://doi.org/10.22108/gep.2023.136560.1571)
- رضیعی، طیب؛ مفیدی، عباس؛ زرین، آذر. (۱۳۸۸). مراکز فعالیت و الگوهای گردش جو زمستانه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روی خاورمیانه و ارتباط آنها بارش ایران ایران، فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۱)، صص: ۱۲۱-۱۴۱. Doi.org/10.22059/jesphys.2009.79975
- رنجبرسعادت‌آبادی، عباس؛ اسدی تلوکی، احمد؛ مرادی، محمد. (۱۳۹۳). تأثیر بی‌هنجاری‌های ماهانه الگوهای فشاری بر شرایط بارشی پاییزه در سواحل شمالی ایران، ژئوفیزیک ایران، ۸(۱)، صص: ۸۲-۱۰۱. Doi.org/20.1001.1.20080336.1393.8.1.7.8

- صادقی، سلیمان؛ علیجانی، بهلول؛ سلیقه، محمد؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ قهرودی تالی، منیژه. (۱۳۸۷). تحلیل هم‌دید و اچرخندها بر خشکسالی‌های فراگیر خراسان، جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، (۱۰)، صص: ۱۱۸-۱۰۵. <https://doi.org/10.22067/geography.v6i10.4272>
- طولابی‌نژاد، میثم؛ حجازی‌زاده، زهرا؛ آر لویو، آنتونی؛ سلیقه، محمد. (۱۴۰۰). پیوند بندال‌های اوراسیا - اطلس شمالی با ماه‌های تر و خشک فراگیر در ایران، جغرافیا و مخاطرات محیطی، (۳)۱۰، صص: ۱۰۴-۸۳. Doi: 10.22067/geoh.2021.70187.1054
- عزیزی، قاسم؛ علیزاده، تیمور. (۱۳۹۳). ارتباط بین تیپ الگوهای گردشی تراز دریا، با بارش‌های فراگیر در ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، (۳)۴۶، صص: ۳۱۰-۲۹۷. Doi: 10.22059/jphgr.2014.52133.
- عزیزی، قاسم؛ نیری، معصومه؛ رستمی جلیلیان، شیما. (۱۳۸۸). تحلیل سینوپتیک بارش‌های سنگین در غرب کشور (مطالعه موردی: بارش دوره ۴-۷ مارس ۲۰۰۵، ۱۶-۲۴ اسفند ۱۳۸۵)، جغرافیایی طبیعی، (۴)۱، صص: ۱۳-۱.
- عساکره، حسین؛ ترکارانی، فاطمه؛ سلطانی. (۱۳۹۳). میانگین الگوهای گردشی نوام با بارش‌های سنگین در شمال‌غرب ایران، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، (۱)۱، صص: ۸۵-۹۶. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2316-fa.html>
- علیجانی، بهلول؛ سلیقه، محمد؛ دارند، محمد؛ جاهدی، آرمان. (۱۴۰۰). تغییرات میانگین مداری و نصف‌النهاری بادهای غربی در دوره‌های تر و خشک غرب ایران، نیوار، (۱۱۲-۱۱۳)، صص: ۸۱-۹۵. Doi:10.30467/nivar.2021.276760.1183
- فرج‌زاده، منوچهر؛ کریمی احمدآباد، مصطفی؛ قائمی، هوشنگ؛ مباشری، محمدرضا. (۱۳۸۸). چگونگی انتقال رطوبت در بارش زمستانه غرب ایران (مطالعه موردی بارش ۳-۷ ژانویه ۱۹۹۶). کدرس علوم انسانی، (۱)۱۳، صص: ۲۱۷-۱۹۳. <http://hsmssp.modares.ac.ir/article-21-7869-fa.html>
- کریمی احمدآباد، مصطفی؛ جعفری، مهناز؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ بازگیر، سعید. (۱۳۹۸). نقش تغییرات رطوبت انتقال‌یافته در رخداد خشکسالی و ترسالی ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، (۴)۵۱، صص: ۵۶۲-۵۴۵. Doi: 10.22059/jphgr.2019.244445.1007134.545-562
- کریمی، مصطفی؛ جعفری، مهناز. (۱۳۹۴). بررسی نوسانات رطوبت ورودی به مناطق خشک ایران در رخداد‌های خشکسالی ترسالی، کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، (۲)۳، صص: ۱۴۳-۱۲۱. Doi:20.1001.1.2345332.1394.3.2.6.8
- کریمی، مصطفی؛ جعفری، مهناز؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ بازگیر، سعید. (۱۳۹۷). تغییرات رطوبت ورودی به جو ایران و ارتباط آن با دوره‌های مرطوب و خشک فصلی، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، (۵)۱۸، صص: ۱۳۱-۱۱۵. Doi: 10.29252/jgs.18.51.115
- کریمی، مصطفی؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ بازگیر، سعید؛ جعفری، مهناز. (۱۳۹۵). نقش گردش وردسپهر زیرین پرفشار عربستان در بارش ایران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، (۴)۴۸، صص: ۵۸۷-۵۶۹. Doi: 10.22059/jphgr.2016.60827.569-587
- کریمی، مصطفی؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ نوروزی، فهیمه. (۱۳۹۸). الگوهای گردشی پارتفاع گردشی پارتفاع جنب-حاره‌ای عربستان در تراز میانی و ارتباط آن با بارش ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی، (۶۹)۲۳، صص: ۲۵۵-۲۳۳.
- کریمی، مصطفی؛ فرج‌زاده، منوچهر. (۱۳۹۰). شار رطوبت و الگوهای فضایی - زمانی منابع تأمین رطوبت بارش‌های ایران، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، (۲۲)۱۱، صص: ۱۲۸-۱۰۹.
- کریمی، مصطفی؛ نوروزی، فهیمه؛ جعفری، مهناز؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر. (۱۴۰۰). هم‌زمانی تغییرات مکانی و اچرخند عربستان در تراز ۸۵۰ hPa با بارش‌های اکتبر تا مارس در ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، (۴)۵۳، صص: ۵۲-۵۰۹. Doi: 10.22059/jphgr.2022.330917.1007647
- کریمی، مصطفی؛ نوروزی، فهیمه؛ جعفری، مهناز؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر. (۱۴۰۱). مشخصه‌های جغرافیایی - هم‌دید و اچرخند عربستان در روزهای بارش سنگین بر روی ایران، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، (۱)۹، صص: ۱۶۸-۱۵۱. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3279-fa.html>
- کیانیان، محمدکیا؛ حاجی محمدی، حسن؛ کابلی، سیدحسن؛ مشکي، علیرضا؛ عسگری، حمیدرضا. (۱۳۹۷). مطالعه و شناسایی الگوهای دینامیکی هم‌دید مؤثر بر رخداد خشکسالی‌های استان سمنان، آمایش جغرافیایی فضا، (۲۸)۸، صص: ۳۲-۱۹.
- کیانیان، محمدکیا؛ صالح پورجم، امین؛ حاجی محمدی، حسن؛ رسولی، فهیمه. (۱۳۹۵). بررسی و ارتباط خشکسالی و ترسالی‌های غرب ایران با الگوهای سینوپتیکی جو، آمایش جغرافیایی فضا، (۲۲)۶، صص: ۱۹۲-۱۷۵.
- کیانی‌پور، منیژه؛ مسعودیان، ابوالفضل؛ عساکره، حسین. (۱۴۰۱). واکای پیوند آب بارش‌پذیر با فرارفت رطوبت در ایران زمین، جغرافیا و توسعه، (۶۶)۲۰، صص: ۱۳۰-۱۰۷. Doi: 10.22111/j10.22111.2022.6698.107-130

- کیخسروی، قاسم؛ شکیا، علیرضا؛ حمیدپور، پگاه. (۱۴۰۱). تحلیل الگوهای همدیدی و ترمودینامیک منجر به بارش‌های ابرسنگین و برآورد پهنه آبی حاصل از بارش‌ها در حوضه آبخیز کرخه، مطالعات نواحی ساحلی، ۳(۱)، صص: ۸۳-۱۰۰. Doi: 10.22124/gscj.2022.20667.1108
- گرامی، محمدصالح؛ کریمی، مصطفی؛ عزیزی، قاسم؛ رفعتی، سمیه. (۱۴۰۱). تحلیل همدیدی بارش‌های همراه با طوفان تندری فراگیر بهاره در شمال غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۴۵(۱)، صص: ۹۵-۱۱۰. Doi: 10.22059/jphgr.2022.334160.10076
- گوهری، فاطمه، حاجی محمدی، حسن؛ حاجی‌وند پایداری، سمیه. (۱۴۰۱). شناسایی مکانسیم جوی حاکم بر رخداد ناهنجاری‌های شدید بارشی ایران، پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی، ۳(۱۰)، صص: ۳۳-۴۶. Doi: 10.30488/ccr.2022.341170.1079
- لشکری، حسن؛ متکان، علی‌اکبر؛ آزادی، مجید؛ محمدی، زینب. (۱۳۹۶). تحلیل همدیدی نقش پرفشار جنب‌حاره‌ای عربستان و رودباد جنب‌حاره‌ای در خشکسالی‌های شدید جنوب و جنوب‌غرب ایران، پژوهش‌های دانش زمین، ۸(۳۰)، صص: ۱۶۳-۱۴۱.
- لشکری، حسن؛ محمدی، زینب. (۱۳۹۴). اثر موقعیت استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای عربستان بر سامانه‌های بارشی در جنوب و جنوب‌غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۴۷(۱)، صص: ۷۳-۹۰. Doi: 10.22059/jphgr.2015.53679.73-90
- محمدی، حسین؛ فتاحی، ابراهیم؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ اکبری، مه‌ری. (۱۳۹۱). تحلیل دینامیکی سامانه‌های سودانی و رخداد بارش‌های سنگین در جنوب‌غرب ایران، تحقیقات علوم جغرافیای (علوم جغرافیایی)، ۱۲(۲۴)، صص: ۲۴-۷.
- محمدیاریان، محترم؛ طاوسی، تقی؛ خسروی، محمود؛ حمیدیان‌پور، محسن. (۱۳۹۸). ناحیه‌بندی رژیم بارش‌های حدی ایران در دوره ۲۰ ساله، تحقیقات جغرافیایی، ۳۴(۲)، صص: ۱۸۳-۱۹۲. Doi: 10.29252/geores.34.2.183
- محمودی، پیمان؛ حمیدیان‌پور، محسن؛ سنایی، مهدی. (۱۴۰۱ الف). ویژگی‌های هم‌گرایی شار رطوبتی در زمان وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۱(۵۲)، صص: ۱۶۸-۱۴۳.
- محمودی، پیمان؛ طاوسی، تقی؛ کردی تمندانی، صابره. (۱۴۰۱ ب). شناسایی الگوهای ناهنجاری‌های همدیدی منجر به خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران، پژوهش‌های جغرافیایی، ۵۴(۱)، صص: ۱-۲۰. Doi: 10.22059/jphgr.2022.267431.1007286
- مسعودیان، سیدابوالفضل. (۱۳۸۴). شناسایی رژیم‌های بارش به روش تحلیل خوشه‌ای، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۷(۵۲)، صص: ۴۷-۵۹.
- مسعودیان، سیدابوالفضل. (۱۳۹۱). شناسایی گونه‌های هوای اصفهان، تحقیقات جغرافیایی، ۲۷(۳)، صص: ۸۶-۶۵.
- مسعودیان، سیدابوالفضل؛ عطایی، هوشمند. (۱۳۸۴). شناسایی فصول بارشی ایران به روش تحلیل خوشه‌ای، علوم انسانی دانشگاه اصفهان، ۱۱۸(۱)، صص: ۱۲-۱.
- مشایخ، فرناز؛ لشکری، حسن. (۱۴۰۲). تحلیل همدیدی ترسالی‌های شدید و فوق‌شدید در جنوب ایران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۵۵(۴)، صص: ۱-۲۵. Doi: 10.22059/jphgr.2024.356775.1007755
- مشایخ، فرناز؛ لشکری، حسن؛ دریاباری، سیدجمال‌الدین؛ رنجبر، محسن. (۱۴۰۱). تحلیل اثرپذیری ناهنجاری‌های بارش در زمان وقوع خشکسالی‌های شدید و فوق‌شدید در جنوب ایران در سه سیکل خورشیدی. جغرافیا، ۲۰(۷۴)، صص: ۱-۲۰. <http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1401.20.74.1.1>
- مفیدی، عباس، زرین، آذر؛ جانبارقبادی، غلامرضا. (۱۳۹۱). تبیین علل کاهش یافتن مقدار و شدت بارش‌های زمستانه در قیاس با بارش‌های پاییزه در سواحل جنوبی دریای خزر، فیزیک زمین و فضا، ۳۸(۱)، صص: ۱۷۷-۲۰۳. Doi: 10.22059/jesphys.2012.24842.177-203
- مفیدی، عباس؛ زرین، آذر. (۱۳۸۴). بررسی سینوپتیکی تأثیر سامانه‌های کم‌فشار سودانی در وقوع بارش‌های سیل‌زا در ایران. تحقیقات جغرافیایی، ۲۰(۲)، صص: ۱۳۶-۱۱۳.
- وزیری‌مهر، محدثه؛ حمیدیان‌پور، محسن؛ خسروی، محمود؛ نظری‌پور، حمید. (۱۴۰۱). الگوهای گردشی جو و دوره‌های فرین تر و خشک فصل زمستان در جنوب‌شرق ایران، فیزیک زمین و فضا، ۴۸(۳)، صص: ۶۴۱-۶۵۶. Doi: 10.22059/jesphys.2022.327069.1007337
- Bonis, T., & Oudot, S. (2018). A fuzzy clustering algorithm for the mode-seeking framework. *Pattern Recognition Letters*, 102, pp 43-73. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.11.019>
- Brunner, M.I. and Chartier-Rescan, C., 2024. Drought spatial extent and dependence increase during drought propagation from the atmosphere to the hydrosphere. *Geophysical Research Letters*, 51(6), p.e2023GL107918. <https://doi.org/10.1029/2023GL107918>
- Büntgen, U., Trouet, V., Frank, D., Leuschner, H.H., Friedrichs, D., Luterbacher, J. and Esper, J. (2010). Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. *Quaternary Science Reviews*, 29(7-8), pp.1005-1016. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.01.003>
- Byun, H.R. (1992a). A study on the atmospheric circulation during the dry period before the Changma. Part I: existence and characteristics. *J. Kor. Meteor. Soc.*, 28, pp.72-85.

- Byun, H.R. (1992b). A study on the atmospheric circulation during the dry period before the Changma. Part II: compared with those before and after the period. *J. Kor. Meteor. Soc.*, 28, pp.86-102.
- Byun, H.R. (1996). On the atmospheric circulation associated with the Korean drought. *J. Korean Meteor. Soc.*, 32, pp.455-469.
- Chu, P.S., Nash, A.J. and Porter, F.Y. (1993). Diagnostic studies of two contrasting rainfall episodes in Hawaii: Dry 1981 and wet 1982. *Journal of Climate*, 6(7), pp.1457-1462. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1457:DSOTCR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1457:DSOTCR>2.0.CO;2)
- Croitoru, A.E., Toma, F.M. and Dragota, C. (2011). Meteorological drought in the central Romanian plain (between the Olt and Argeş rivers). Case study: year 2000. *Riscuri si catastrofe*, 9, pp.113-120.
- De Carvalho, F.D.A., Lechevallier, Y., & De Melo, F.M. (2012). Partitioning hard clustering algorithms based on multiple dissimilarity matrices. *Pattern Recognition*, 45(1), pp 447-464. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2011.05.016>
- Ekwezu, C.S.; and J.C. Madu, (2020). Evaluation of Different Rainfall-based Drought Indices: Detection of Meteorological Drought Events in Imo State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 4: pp 713-717. doi: 10.4314/jasem.v24i4.25.
- Ferreira, M. R., de Carvalho, F. D. A., & Simões, E. C. (2016). Kernel-based hard clustering methods with kernelization of the metric and automatic weighting of the variables. *Pattern Recognition*, 51, pp 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.025>
- Fowler, A. and Adams, K. (2004). Twentieth-century droughts and wet periods in Auckland (New Zealand) and their relationship to ENSO. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(15), pp.1947-1961. <https://doi.org/10.1002/joc.1100>
- Girardin, M.P., Tardif, J.C., Flannigan, M.D. and Bergeron, Y. (2006). Synoptic-scale atmospheric circulation and boreal Canada summer drought variability of the past three centuries. *Journal of Climate*, 19(10), pp.1922-1947. <https://doi.org/10.1175/JCLI3716.1>
- Kousari, M. and Asadi Zarch, M. (2011). Minimum, maximum, and mean annual temperatures, relative humidity, and precipitation trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 4. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0113-6>
- Lhotka, O., Trnka, M., Kyselý, J., Markonis, Y., Balek, J. and Možný, M. (2020). Atmospheric circulation as a factor contributing to increasing drought severity in central Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18), p.e2019JD032269. <https://doi.org/10.1029/2019JD032269>
- Mahmoudi, P.; A. Rigi, and M.M. Kamak. (2019). A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 3: pp 3123-3138. doi.org/10.1007/s00704-019-02778-z.
- Mashari Eshghabad, S.; E. Omidvar, and K. Solaimani. (2014). Efficiency of some meteorological drought indices in different time scales (case study: Tajan Basin, Iran). *Ecopersia*, 1: pp 441-453. doi.org/20.1001.1.23222700.2014.2.1.3.0.
- Modarres, R. and da Silva, V.D.P.R. (2007). Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Environments*, 70(2), pp.344-355. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.12.024>
- Namias, J. (1991). Spring and summer 1988 drought over the contiguous United States—Causes and prediction. *Journal of Climate*, 4(1), pp.54-65. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0054:SASDOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0054:SASDOT>2.0.CO;2)
- Parry, S., Prudhomme, C., Hannaford, J. and Lloyd-Hughes, B. (2010). Examining the spatio-temporal evolution and characteristics of large-scale European droughts. In *Proceedings of the BHS Third International Symposium* (pp. 135-142). British Hydrological Society. <http://www.ceg.ncl.ac.uk/bhs2010/>
- Rakhmatova, N.; M. Arushanov, L. Shardakova, B. Nishonov, R. Taryannikova, V. Rakhmatova, and D.A. Belikov. (2021). Evaluation of the Perspective of ERA-Interim and ERA5 Reanalyses for Calculation of Drought Indicators for Uzbekistan. *Atmosphere*, 5: 527. doi.org/10.3390/atmos12050527
- Sert, S.A., Bagci, H., & Yazici, A. (2015). MOFCA: multi-objective fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 30, pp 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.11.063>.
- Taghizadeh, E.; F. Ahmadi-Givi, L. Brocca, and E. Sharifi. (2021). Evaluation of satellite/reanalysis precipitation products over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 9: pp 3474-3497. doi.org/10.1080/01431161.2021.1875508
- Trenberth, K.E. and Branstator, G.W. (1992). Issues in establishing the causes of the 1988 drought over North America. *Journal of Climate*, 5(2), pp.159-172. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0159:IEECOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0159:IEECOT>2.0.CO;2).