

Temporal-Statistical Analysis of Groundwater Changes and Its Relationship with Precipitation and Temperature Variables in Western Iran Using Grace-Mascon and ERA5-L and Data

Hamidreza Sadeghi¹, Amanollah Fathniya^{2*} , Ehsan Sharifi³

1. PhD student of Climatology, Geography Department, University of Razi, Kermanshah, Iran

2. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Physical Geography, University of Razi, Kermanshah, Iran

Email: a_fathnia@razi.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8754-1624>

3. Assistant Professor, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germany

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 28 November 2025 Revised: 11 July 2026 Accepted: 14 August 2026 Published: 22 December 2026 Keywords: LWE, Mascon, Precipitation, Temperature, Western Iran.	In this study, temporal variations of terrestrial water storage (LWE) in western Iran were examined using GRACE/GRACE-FO Mascon data, along with precipitation and temperature from the ERA5-Land reanalysis for 2002–2023. Area-averaged LWE, precipitation, and temperature were extracted, and monthly anomalies were calculated. Linear regression was used for trend analysis, and Pearson correlation with a 0.05 significance level assessed relationships among variables. Lag correlations with delays of zero to three months evaluated groundwater response to climatic factors. Results showed a regular seasonal LWE cycle, with near-zero or slightly positive values in winter and early spring, and strongly negative values in summer and autumn. LWE had a significant decreasing trend at all scales: about –0.8 cm per year annually and –0.8 to –1 cm per season. Precipitation and temperature showed no significant trends. At the monthly scale, correlations of LWE with precipitation and temperature were about 0.47 and –0.38; seasonally, 0.48 and –0.36, respectively, all significant. Maximum correlation with precipitation occurred at a one-month lag and with temperature at zero lag, indicating a relatively rapid groundwater response. The Mascon data showed that the significant LWE decline, despite no trend in precipitation or temperature, is mainly driven by human pressures on groundwater resources.
How to Cite: Sadeghi, H. , Fathniya, A. and Sharifi, E. (2026). Temporal-Statistical Analysis of Groundwater Changes and Its Relationship with Precipitation and Temperature Variables in Western Iran Using Grace-Mascon and ERA5-L and Data. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 133-154.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2026.54022.2146	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Groundwater is one of the most vital water resources in arid and semi-arid regions, such as Iran, and a significant decline in many aquifers has been reported in recent decades. Western Iran, heavily reliant on groundwater for drinking, industrial, and agricultural purposes, is facing a continuous decline in groundwater levels. The development of GRACE and GRACE-FO satellites, as well as reanalysis data such as ERA5, has made it possible to monitor long-term changes in groundwater storage. Given the scarcity of ground stations and the lack of continuous data in many regions, utilizing these data is essential. The objective of this study is to analyze the temporal trends of groundwater equivalent thickness (LWE) changes and examine their relationship with precipitation and temperature in western Iran from 2002 to 2023 using GRACE-Mascon and ERA5 data.

DATA AND METHODOLOGY

In this study, monthly LWE data from the GRACE/GRACE-FO Mascon mission and precipitation and temperature data from ERA5 with a monthly time resolution were used. The study area includes five provinces: Hamadan, Kurdistan, Kermanshah, Ilam, and Lorestan. After extracting the regional averages of the variables, monthly anomalies were calculated based on the long-term average for each month to eliminate the seasonal cycle from the main signal. Temporal trends were analyzed at monthly, seasonal, and annual scales using Ordinary Least Squares (OLS) linear regression. A t-test was performed to evaluate the significance of the slope at a 95% confidence level. To analyze the relationship between LWE and climate change, Pearson's correlation coefficient was calculated for both raw data and anomalies. Additionally, lag-correlation analysis at delays of 0 to 3 months was conducted to assess the aquifer's response time to precipitation. All data preparation and processing were done in Google Earth Engine.

RESULTS AND DISCUSSION

The results showed that LWE in western Iran exhibits a very regular seasonal cycle, with peaks generally observed in winter and spring, and minima in late summer and fall. Despite this natural cycle, the long-term trend of LWE at all scales is decreasing and statistically significant. The slope of LWE reduction at monthly and annual scales was estimated to be between -0.8 cm and -0.9 cm per year, indicating a cumulative decrease of about 17 cm in groundwater storage over 21 years. At the annual scale, LWE decreased from positive or near-zero values in the early years (2003–2007) to significantly negative values in recent years, with 2022 being the driest year with approximately -22.6 cm of groundwater storage. In contrast, precipitation and temperature did not show significant linear trends at any scale. Precipitation, despite considerable year-to-year fluctuations, had no significant slope, and temperature did not show a consistent and reliable upward trend (Figure 1).

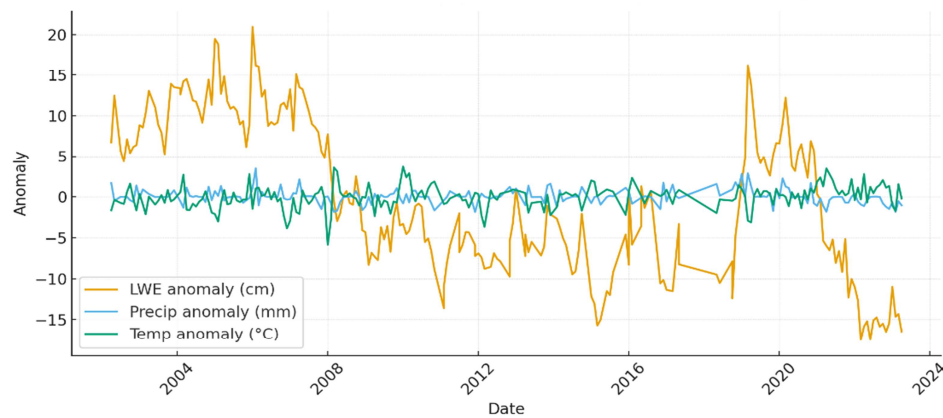


Figure 1: Trend chart of monthly anomalies of LWE, precipitation, and temperature in western Iran

Correlation analysis revealed a moderate positive correlation (0.47) between LWE and precipitation and a negative correlation (-0.38) between LWE and temperature. The highest correlation with precipitation occurred at a one-month lag, indicating that aquifer recharge reaches its peak about one month after precipitation. Even after removing the seasonal cycle (using anomalies), the correlations remained significant, though their strength decreased. Seasonal findings showed that LWE decline occurred in all seasons, meaning even wet seasons could not fully recover the aquifer (Figure 2). This highlights that the decline in groundwater storage cannot solely be explained by climatic changes, and excessive extraction, irrigated agriculture development, and poor water resource management play key roles in the long-term decline of aquifers in western Iran.

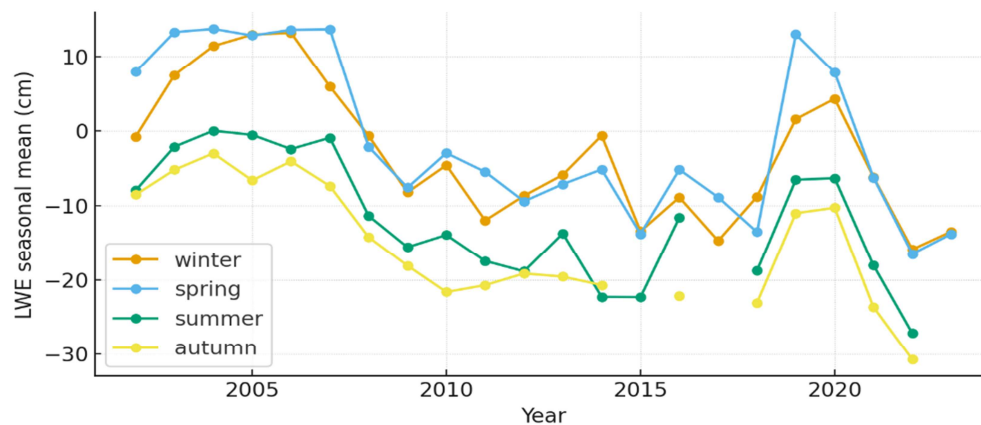


Figure 2: Seasonal trend chart of LWE changes in western Iran.

CONCLUSION

The results of the study indicate a severe and continuous decline in groundwater storage over the past two decades in western Iran. While precipitation and temperature do not show significant trends, LWE has experienced significant declines at all time scales. This inconsistency suggests that non-climatic factors, particularly over-exploitation of aquifers, are the main cause of groundwater depletion in the region. The use of new-generation GRACE-Mascon data along with ERA5 data can serve as an efficient tool for continuous monitoring, early warning, and sustainable water resource management planning. These results emphasize the need for a reassessment of water extraction patterns, the

improvement of crop cultivation methods, and better management of artificial recharge and water use efficiency.

REFERENCES

References (in Persian)

- Asakereh, H. (2007). Spatio-Temporal Changes of Iran Inland Precipitation during Recent Decades. *Geography & Development*, 5(10), 145–164. <https://doi.org/10.22111/GDIJ.2007.3669>. [In Persian]
- Badkoubeh-Hazaveh, M., Najarchi, M., Jalali, M. R., Mazaheri, H., & Shabankolayi, S. (2024). Predicting variations in groundwater equivalent thickness using satellite data and a combination of optimization algorithms and artificial intelligence. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(4), 569-586. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.367628.669601>. [in Persian]
- Bazian, S., & Emadi, S. R. (2024). Assessment of underground water resources in western Iran using GRACE and GRACE-FO satellite observations from 2002 to 2021. *Hydrophysics*, 9(2), 81-88. <https://doi.org/10.1001/1.24767131.1402.9.2.7.4>. [in Persian]
- Faraji, Z., Kaviani, A., & Ashrafzadeh, A. (2017). Assessment of GRACE satellite data for estimating the groundwater level changes in Qazvin province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(2), 463–476. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.61482>. [in Persian]
- Hedayat, S., Ebrahimi Khoshfi, M., Omidvar, K., & Sharifi Pichon, M. (2023). *Investigating the factors affecting changes in surface and groundwater resources using satellite products: A case study of Kabul, Afghanistan*. *Journal of Water and Soil Dynamics*, 11(1), 2312-1291. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i1.2312-1291>. [in Persian]
- Haidari, S., Karimi, M., & Biranvand, A. (2024). Evaluation of ERA5 reanalysis data performance in estimating precipitation in Iran and spatial analysis of the country's precipitation regime. *Earth Science Research Journal*, 2024. <https://doi.org/10.48308/esrj.2024.104225>. [in Persian]
- Issazadeh, V., & Argany, M. (2021). Changes in water surface of aquifers using GRACE satellite data in the Google Earth Engine: A study of the Urmia Lake Watershed from 2002 to 2017. *Journal of Town & Country Planning*, 13(1), 193-214. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.304748.670127>. [in Persian]
- Kazemi Azar, F., Khaleeli, K., Rezaei, H., & Mirabbasi Najafabadi, R. (2025). Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis data performance in estimating monthly precipitation of the upstream watershed of Zayanderood dam [Research article]. *Journal of Irrigation and Drainage of Iran*, 19(1), 75-87. [in Persian]
- Noboui, S. N., & Alizadeh, A. (2020). Evaluation of groundwater resources using satellite gravity data: A case study of Khorasan Razavi Province. *Journal of Geographical Research*, 14(3), 11-8. <https://doi.org/10.1001/1.20087942.1399.14.3.11.8>. [in Persian]
- Rafiei, M., & Zarei Teymouri, M. (2023). Relationship between groundwater quality and precipitation in Saveh Plain from 2017 to 2019. *Journal of Hydrology and Environment*, 11(1). <https://doi.org/10.22037/jhf.v11i1.42590>. [in Persian]
- Raziei, T., & Sotoudeh, F. (2017). Investigation of the accuracy of the European Center for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) in forecasting observed precipitation in different climates of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(1), 133–147. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2017.57958>. [In Persian]

References (in English)

- Hassler, B., & Lauer, A. (2021). Comparison of reanalysis and observational precipitation datasets including ERA5 and WFDE5. *Atmosphere*, 12(11), 1462. <https://doi.org/10.3390/atmos12111462>
- Safaei, V., Zarrin, A., Mosaedi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2025). Intensifying droughts and their relationship with temperature and precipitation extremes in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05663-0>.
- Wiese, D. N., Yuan, D.-N., Boening, C., Landerer, F. W., & Watkins, M. M. (2023). JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height JPL RL06.3Mv04 (Version RL06.3Mv04). PO.DAAC. <https://doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ634>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۴، دی ۱۴۰۵

تحلیل زمانی-آماري تغييرات آب زیرزمینی و ارتباط آن با متغیرهای بارش و دما در غرب ایران با استفاده از داده‌های GRACE-Mascon و ERA5-L

حمیدرضا صادقی^۱، امان اله فتح نیا^{۲*} , احسان شریفی^۳

۱. دانشجوی دکتری آب وهواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۲. دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: a_fathnia@razi.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8754-1624>

۳. استادیار، موسسه فناوری کارلسروهه (KIT)، کارلسروهه، آلمان

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: LWE، Mascon، بارش، دما، غرب ایران	در این پژوهش، تغییرات زمانی ذخیره‌ی آب زیرزمینی (ضخامت معادل آب) در غرب ایران با بهره‌گیری از نسل جدید داده‌های ماهواره‌ای GRACE/GRACE-FO موسوم به Mascon و مؤلفه‌های اقلیمی بارش و دمای باز تحلیل شده ERA5-Land، طی دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا میانگین ناحیه‌ای LWE حاصل از محصولات Mascon، به-همراه بارش و دما، در محدوده غرب ایران استخراج و سپس آنومالی‌های ماهانه بر اساس کسر میانگین بلندمدت هرامه تقویمی محاسبه شد تا نوسانات غیر فصلی از چرخه سالانه تفکیک گردد. برای تحلیل روند از رگرسیون خطی حداقل مربعات و برای بررسی ارتباط بین متغیرها از ضریب همبستگی پیرسون و آزمون t متناظر با سطح معنی‌داری ۰/۰۵ استفاده شد. همچنین، به‌منظور ارزیابی زمان پاسخ ذخیره آب زیرزمینی نسبت به عناصر اقلیمی، همبستگی‌های lag با تأخیر صفر تا سه‌ماهه بین آنومالی LW، بارش و دما محاسبه گردید. نتایج نشان داد سری‌های زمانی LWE دارای چرخه فصلی منظم با مقادیر نزدیک به صفر یا اندکی مثبت در زمستان و اوایل بهار و مقادیر قابل‌توجه منفی در تابستان و پاییز هستند. درعین حال، LWE در همه مقیاس‌های زمانی روند نزولی معنی‌داری دارد؛ به‌طوری‌که شیب روند سالانه LWE حدود ۰/۸ سانتی‌متر کاهش در سال برآورد شد و روند فصلی LWE در هر چهار فصل نیز با شیبی در حدود ۰/۸ تا ۱ سانتی‌متر در سال و با معنی‌داری آماری بالا به‌دست آمد. درحالی‌که بارش و دما در هیچ‌یک از مقیاس‌های زمانی روند خطی معنی‌داری نشان ندادند. در مقیاس ماهانه، همبستگی بین LWE و بارش حدود ۰/۴۷ و بین LWE و دما حدود ۰/۳۸- و در مقیاس فصلی به ترتیب حدود ۰/۴۸ و ۰/۳۶- برآورد شد که همگی در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار بودند. حداکثر همبستگی آنومالی LWE با بارش در lag یک‌ماهه و آنومالی LWE با دما در lag صفر مشاهده شد که بیانگر پاسخ نسبتاً سریع ذخیره آب زیرزمینی به تغییرات اقلیمی است. به‌طورکلی، استفاده از داده‌های نسل جدید Mascon ضمن فراهم کردن برآورد دقیق‌تر ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس حوضه‌ای، نشان داد که کاهش چشمگیر و معنی‌دار LWE در غرب ایران با وجود فقدان روند در بارش و دما، بیشتر ناشی از فشارهای انسان‌ساخت بر منابع آب زیرزمینی است و ضرورت بازنگری در الگوی بهره‌برداری و مدیریت پایدار منابع آب منطقه را برجسته می‌کند.

استناد: صادقی، حمیدرضا، فتح نیا، امان اله و شریفی، احسان (۱۴۰۵). تحلیل زمانی-آماري تغییرات آب زیرزمینی و ارتباط آن با متغیرهای

بارش و دما در غرب ایران با استفاده از داده‌های GRACE-Mascon و ERA5-L. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۵۰)، ۱۵۴-۱۳۳.

مقدمه

آب زیرزمینی، یکی از حیاتی‌ترین منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله ایران است. طی دهه‌های اخیر، افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در بسیاری از آبخوان‌های کشور گزارش شده است. غرب ایران به دلیل اتکال شدید به آب زیرزمینی برای مصارف شرب، صنعتی و کشاورزی با روند نزولی پیوسته در ذخیره آب زیرزمینی مواجه است. منابع آب زیرزمینی بعد از یخچال‌ها دومین منبع آب شیرین در جهان می‌باشند. در کشور ما با توجه به نوع اقلیم، منابع آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب موردنیاز برای بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب اهمیت زیادی دارد (رفیعی و تیموری، ۲۰۲۳). در ایران که با اقلیم خشک و نیمه‌خشک مواجه است، آب زیرزمینی نقش اساسی در تأمین نیازهای آبی ایفا می‌کند. با این حال، در سال‌های اخیر، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق کشور مشاهده شده است که ناشی از عواملی همچون مصرف بی‌رویه، تغییرات اقلیمی و کاهش بارش‌ها است. بارش به‌عنوان عنصری بسیار تغییرپذیر و به‌عنوان عاملی اساسی در موازنه آبی، همیشه موردتوجه اقلیم‌شناسان و آب‌شناسان بوده است (عساکره، ۱۳۸۶). این متغیر، در مقیاس‌های زمانی و مکانی، بیشترین نوسان را دارد (رضیئی و ستوده، ۱۳۹۶). یکی از روش‌های مؤثر در ارزیابی تغییرات آب زیرزمینی، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های اقلیمی است. توسعه ماهواره‌های GRACE و GRACE-FO و داده‌های باز تحلیل همچون ERA5، امکان پایش بلندمدت تغییرات ذخیره آب زیرزمینی را فراهم کرده است. کاظمی آذر و همکاران (۲۰۲۵) طی مطالعه‌ای به ارزیابی دقت داده‌های باز تحلیل ERA5 و ERA5-Land در تخمین بارش ماهانه، در حوضه آبریز بالادست سد زاینده‌رود پرداخته‌اند. نتیجه‌گیری این پژوهش نشان داد که هر دو مجموعه داده ERA5 و ERA5-Land در تخمین بارش ماهانه، در حوضه آبریز سد زاینده‌رود دقت بالایی دارند. با این حال، ERA5-Land که دارای تفکیک مکانی بالاتری است، عملکرد بهتری نسبت به ERA5 در برخی ماه‌ها نشان داد. حیدری و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به ارزیابی عملکرد داده‌های باز تحلیل ERA5 در تخمین بارش در ایران و تحلیل فضایی رژیم بارشی کشور پرداخته‌اند. آنان از داده‌های بارش ماهانه پایگاه داده ERA5 برای سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که داده‌های ERA5 در برآورد بارش ماهانه ایران از دقت بالایی برخوردار هستند. در ماه‌های اکتبر تا می، همبستگی بالایی (بیش از ۰/۵) میان داده‌های ERA5 و مشاهدات ایستگاه‌ها مشاهده شد و در این ماه‌ها بیش از ۹۵ درصد ایستگاه‌ها شاخص توافق ویلموت بالای ۰/۵ را نشان دادند. با این حال، در ماه‌های آگوست، سپتامبر، اکتبر و جولای، بیشترین کم برآوردی داده‌ها گزارش شد. از نظر فضایی، بارش در ایران بیشتر از سپتامبر تا می ادامه دارد و اوج بارش در مناطق سواحل دریای خزر و نواحی رشته‌کوه‌های زاگرس مشاهده می‌شود. همچنین، رژیم بارشی اصلی کشور در فصل زمستان قرار دارد که تقریباً ۴۴/۵ درصد از کل بارش سالانه کشور را به خود اختصاص می‌دهد. طبق این مطالعه، روند تغییرات بارش در طی ۴۲ سال گذشته، کاهش بارش در فصول بهار (۸/۲ میلی‌متر) و زمستان (۲۶/۲۸ میلی‌متر) و افزایش بارش در فصل پاییز (۱۷/۵ میلی‌متر) را نشان می‌دهد. این تغییرات به‌طور تدریجی باعث تغییر در رژیم بارشی کشور از زمستان و بهار به سمت پاییز شده است. فرجی و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای برآورد تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی در استان قزوین پرداختند. آنان از داده‌های بارش، رواناب‌های سطحی و زیرسطحی، رطوبت خاک و مدل GLDAS بهره بردند. نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های ماهواره‌ای GRACE توانایی زیادی در شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی دارند. نبوی و همکاران (۲۰۲۰) طی مطالعه‌ای به ارزیابی منابع آب زیرزمینی استان خراسان رضوی از ۲۰۰۲ تا

۲۰۱۶ پرداختند. در این مطالعه، از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و مدل GLDAS استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بازه زمانی مورد بررسی، کاهش قابل توجهی در ذخیره آب زیرزمینی استان مشاهده شده است. این کاهش بیشتر ناشی از برداشت‌های بی‌رویه آب و کاهش بارش‌ها بوده است. این پژوهش به‌ویژه بر اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در پایش منابع آب زیرزمینی تأکید کرده و نشان می‌دهد که این داده‌ها می‌توانند به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌کار گرفته شوند. هدایت و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از محصولات ماهواره‌ای در منطقه کابل افغانستان پرداختند. در این پژوهش، از داده‌های ماهواره‌ای سامانه^۱ GEE برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ و داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های زمینی در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۱ استفاده شد. این داده‌ها شامل پارامترهایی نظیر تبخیر-تعرق، شاخص پوشش گیاهی (EVI)، محصولات جهانی پهنه‌های آب سطحی، داده‌های ماهواره‌ای GRACE، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و Landsat 7 و همچنین داده‌های دما، رطوبت و بارندگی بودند. نتایج پژوهش نشان داد که در اکثر ماه‌های سال، روند تغییرات سطح آب زیرزمینی به‌طور معنی‌داری کاهشی بوده است. همچنین، کاهش مساحت پهنه‌های آب سطحی در این منطقه به‌دلیل عوامل طبیعی و انسانی مختلفی نظیر کاهش بارندگی، افزایش دما، افزایش تبخیر-تعرق، تغییرات در پوشش گیاهی و گسترش مناطق شهری، به‌ویژه در شهر کابل، قابل تبیین است. این عوامل به‌همراه افزایش جمعیت بهره‌بردار از منابع آبی، نقش مهمی در کاهش منابع آبی منطقه ایفا کرده‌اند. عیسی زاده و ارگانی (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات سطح آب سفره‌های آب زیرزمینی در حوضه دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE باند‌های JPL، GFZ و CSR پرداختند. نتایج حکایت از کاهش جدی سطح آب در سفره‌های زیرزمینی شمال و شمال شرق حوضه را دارد. بازیان و عمادی (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به ارزیابی تغییرات ماهانه ذخیره آب زیرزمینی در غرب ایران پرداختند. آنان از مشاهدات ماهواره‌ای GRACE و GRACE-FO از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی در این منطقه با نرخ متوسط سالانه منفی ۱،۱۷ سانتی‌متر کاهش یافته و همچنین کاهش سالانه ذخیره کل منابع آب (شامل آب‌های سطحی، زیرزمینی، معادل برف و رطوبت خاک) حدود ۱/۲۸- سانتی‌متر بوده است. بادکوبه‌هزاه و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی نوسانات ضخامت معادل آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی و هوش مصنوعی برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای GRACE طی بازه زمانی آوریل ۲۰۰۲ تا مارس ۲۰۱۷ استفاده شده است. برای مدل‌سازی نوسانات ضخامت معادل آب زیرزمینی، از مدل‌های ترکیبی الگوریتم‌های بهینه‌سازی GA-ANN، ICA-ANN و PSO-ANN استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل ICA-ANN بهترین عملکرد را در پیش‌بینی ضخامت معادل آب زیرزمینی دارد. با توجه به مطالعات صورت‌گرفته، داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند ابزار موثری برای مطالعه در سطح ایران باشند. این پژوهش به‌دنبال بررسی ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و بارش در ایران است. از نسخه جدید داده‌های ماهواره‌ای GRACE-Mascon برای ارزیابی روند تغییرات آب زیرزمینی و از داده‌های باز تحلیل‌شده ERA5 برای تحلیل بارش‌ها استفاده شده است. هدف ما از این مطالعه، تحلیل تغییرات ضخامت معادل آب زیرزمینی^۲ در غرب ایران با استفاده از نسل جدید داده‌های ماهواره‌ای GRACE به نام Mascon و داده‌های باز تحلیل‌شده بارش و دما است. ما به‌دنبال ارتباط متغیرهای اقلیمی بارش و دما و نقش آنها در کاهش یا افزایش روند

^۱ . Google Earth Engine

^۲ . Liquid Water Equivalent

تغییرات آب زیرزمینی برای این منطقه بودیم. گفتنی است که داده‌های LWE حاصل از GRACE/GRACE-FO، نشان‌دهنده کل ذخیره آب زمینی در یک منطقه است که شامل آب زیرزمینی، رطوبت خاک، آب‌های سطحی (رودخانه‌ها و دریاچه‌ها) و برف/یخ می‌باشد. با این حال، در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند غرب ایران که پوشش برفی محدود، آب‌های سطحی اندک و رطوبت خاک نسبتاً ثابت است، تغییرات LWE بیشتر ناشی از نوسانات ذخیره آب زیرزمینی بوده و می‌توان آن را به‌عنوان نماینده برای ارزیابی وضعیت آب زیرزمینی به کار برد. نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارتند از:

- استفاده از نسل جدید داده‌های GRACE-Mascon (RL06.3) که برآورد دقیق‌تری از تغییرات ذخیره آب زیرزمینی در مقیاس حوضه‌ای ارائه می‌دهد؛
- تحلیل lag-correlation با تأخیرهای ۰ تا ۳ ماهه برای تعیین زمان پاسخ آبخوان به بارندگی و دما که در مطالعات پیشین در این منطقه به‌ندرت بررسی شده است؛
- ارزیابی همزمان داده‌های ERA5-Land با GRACE برای بررسی دقیق‌تر ارتباط متغیرهای اقلیمی با تغییرات آب زیرزمینی؛
- تحلیل در مقیاس‌های زمانی چندگانه (ماهانه، فصلی و سالانه) برای درک جامع‌تر رفتار آبخوان؛
- تحلیل روند بلندمدت تعیین میزان اثرگذاری عوامل اقلیمی (بارش و دما) در مقابل فشارهای انسانی بر این روند است.

داده‌ها و روش‌ها

در دهه‌های گذشته، داده‌های باز تحلیل آب‌وهوا به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها مانند پیش‌بینی بارش، پیش‌بینی دما، پایش رطوبت خاک، پایش اقیانوس‌ها و حفاظت از محیط‌زیست مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این داده‌ها با استفاده از قوانین فیزیک برای ترکیب داده‌های مدل با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در سراسر جهان به منظور ایجاد یک مجموعه داده جهانی کامل به‌کار گرفته شده‌اند. داده‌های باز تحلیل از ترکیب نتایج شبیه‌سازی‌های کوتاه‌مدت مدل‌های شبیه‌سازی عددی و وضعیت هوا با داده‌های مشاهداتی زمینی به‌دست می‌آیند. این داده‌ها با وضوح مکانی-زمانی بالا می‌توانند به‌طور مؤثری کمبود مشاهدات مستقیم بارش زمینی را جبران کنند (حیدری و همکاران، ۲۰۲۴). مطالعه هاسلر و لور (۲۰۲۱) نشان داد که داده‌های ERA5 پیشرفت‌های چشمگیری در دقت مدل‌سازی‌های جوی دارند. طبق مطالعه آنان، داده‌های ERA5 توانسته‌اند نتایج دقیق‌تری در برآورد بارش برای مناطق خشک ارائه دهد و این داده‌ها به‌طور خاص در پیش‌بینی متغیرهای جوی از دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های باز تحلیل‌شده بارش ERA5 با مقیاس ۰/۱ درجه و داده‌های ماهواره Mascons با مقیاس ۳ درجه است. ERA5، یکی از شناخته‌شده‌ترین مجموعه داده‌های باز تحلیل^۱ است که توسط مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت هوا^۲ منتشر می‌شود. این داده‌ها با ترکیب مشاهدات ماهواره‌ای، ایستگاهی و مدل‌های پیشرفته هواشناسی، تصویری یکپارچه و با کیفیت بالا از وضعیت جو، سطح زمین و اقیانوس‌ها ارائه می‌کنند. یکی از متغیرهای مهم در ERA5، داده‌های بارش ماهانه است. ماهواره GRACE^۳، یکی از

^۱. Reanalysis

^۲. ECMWF

^۳. Gravity Recovery and Climate Experiment

مهم‌ترین منابع داده‌ای برای مطالعه تغییرات جرم زمین، به‌ویژه تغییرات ذخایر آب است. این مأموریت توسط ناسا و مرکز هوافضای آلمان (DLR) انجام شد و از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ فعال بود. سپس نسخه جدیدتری با نام GRACE-FO (Follow-On) از سال ۲۰۱۸ تا امروز ادامه دارد. نسخه جدید داده‌های GRACE موسوم به Mascons در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های GRACE/GRACE-FO Mascon تولیدشده توسط JPL بر اساس نسخه پردازشی RL06.3Mv04 استفاده شد. این مجموعه داده شامل ناهنجاری‌های ماهانه ذخیره جرم آب جهانی است که در قالب ضخامت معادل آب^۱ (cm) و به‌صورت یک فایل netCDF ارائه می‌شود. روش Mascon تغییرات ماهانه میدان گرانش و ناهنجاری‌های جاذبه را بر روی یک شبکه هم مساحت ۳ درجه‌ای تخمین می‌زند (اما در قالب شبکه ۵/۰ درجه منتشر می‌شوند) و به‌دلیل اعمال قیود ژئوفیزیکی، بر خلاف روش هارمونیک‌های کروی، نیاز به فیلترهای هموارسازی یا حذف همبستگی ندارد (Wiese et al. 2023). در این پژوهش، با توجه به شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه (خشک و نیمه‌خشک با بارش محدود و فاقد پوشش برف/یخ قابل توجه)، تغییرات LWE بیشتر منعکس‌کننده تغییرات آب زیرزمینی تلقی می‌شود.

روش کار

داده‌های بارش ERA5 از وب سایت ECMWF و داده‌های LWE از تارنمای GRACE به‌صورت ماهانه و با فرمت NC در بازه زمانی آوریل ۲۰۰۲ تا سپتامبر ۲۰۲۳ دریافت و پردازش‌ها در سه مقیاس ماهانه، سالانه و فصلی انجام شد. همچنین، برای تبیین رفتار زمانی سیستم و بررسی تأخیر واکنش ذخیره آب زیرزمینی نسبت به بارش و دما، همبستگی lag بین آنومالی LWE در ماه t و آنومالی بارش و دما در ماه‌های پیشین محاسبه شد. با توجه به متفاوت بودن قدرت تفکیک مکانی محصولات ماهواره‌ای مورد استفاده و تلفیق نشدن آنها در فرآیند این پژوهش، ابعاد پیکسل‌ها همسان‌سازی نشد و ابعاد پیکسل استاندارد محصول، برای محاسبه میانگین ماهانه و یا سالانه آن محصول در کل منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد. متغیرهای LWE، بارش و دما به‌صورت میانگین ناحیه‌ای بر روی محدوده غرب ایران استخراج شده‌اند. علاوه بر مقادیر خام، آنومالی‌های ماهانه (بر اساس کسر میانگین بلندمدت هرمه تقویمی) برای جداسازی نوسانات غیر فصلی محاسبه شده است. برای ارزیابی معنی‌داری آماری، در تمامی موارد از آزمون‌های فرض کلاسیک با سطح معنی‌داری $\alpha=0.05$ معادل سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده شده است؛ بدین ترتیب که برای ضرایب همبستگی پیرسون، فرض صفر و برای روندها، فرض صفر slope در چارچوب رگرسیون خطی حداقل مربعات (OLS) آزمون شده است. در هر دو حالت، آزمون t متناظر برای پارامتر مورد نظر محاسبه و بر اساس مقدار p در مورد رد یا عدم رد فرض صفر تصمیم‌گیری شده است؛ مقادیر $p<0.05$ به‌عنوان معنی‌دار تلقی شده‌اند. تمامی پردازش‌ها در محیط GEE^۲ و به‌صورت کد نویسی انجام گردید.

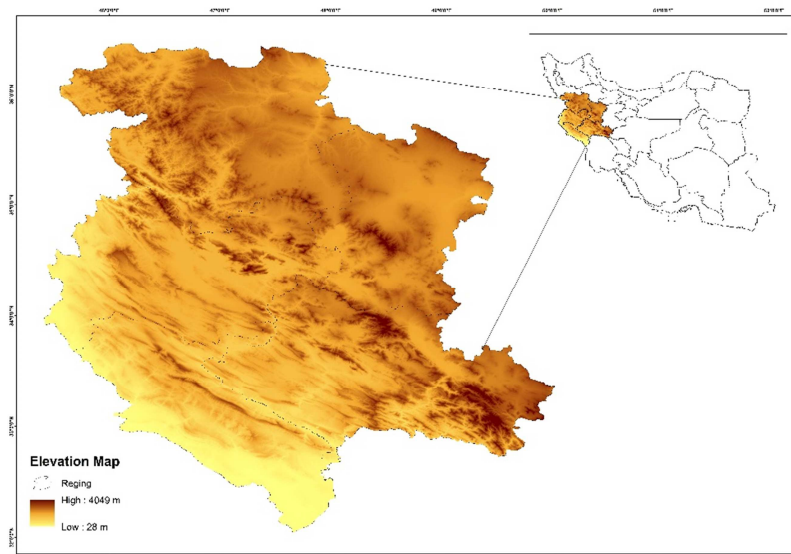
منطقه مورد مطالعه:

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش (شکل ۱) پنج استان کرمانشاه، همدان، کردستان، لرستان و ایلام است. وسعت این منطقه در حدود ۱۲۱۰۰۰ کیلومتر مربع است و در بین عرض‌های جغرافیایی ۳۱ درجه و ۵۱ دقیقه تا ۳۶ درجه

^۱ . Thickness of Liquid Water Equivalent

^۲ . Google Earth Engine

و ۲۸ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴ دقیقه شرقی واقع شده است. از ویژگی‌های اقلیمی این منطقه، وجود دوره گرمای خشک طولانی است که تا حدود ۷ ماه از سال را در بر می‌گیرد. میزان بارش سالانه در این منطقه بین ۳۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر متغیر است. این منطقه یکی از قطب‌های تولید محصولات کشاورزی (گندم، جو، باغات) در ایران است. بیش از ۷۰٪ تأمین آب شرب و بیش از ۶۰٪ آب کشاورزی در این منطقه از آبخوان‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. مطالعات هیدروژئولوژی شرکت آب منطقه‌ای و سازمان آب و برق خوزستان، افت سالانه بیش از ۵۰ سانتی‌متر در بسیاری از آبخوان‌های منطقه را گزارش کرده‌اند.



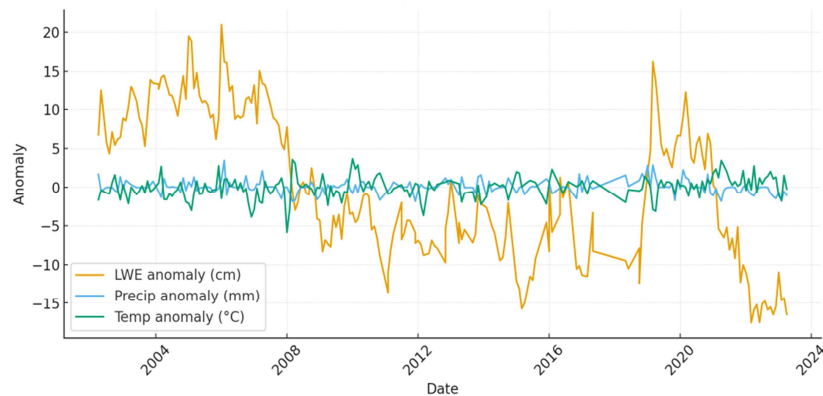
شکل (۱): نقشه منطقه مورد مطالعه (منبع: نویسندگان)

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل ماهانه

در مقیاس ماهانه، علاوه بر مقادیر اولیه، آنومالی‌های متناظر LWE، بارش و دما نیز محاسبه شده‌اند. این آنومالی‌ها با کسر میانگین بلندمدت همان ماه تقویمی به‌دست آمده و بنابراین نوسانات غیر فصلی را نمایش می‌دهند. تحلیل آمار توصیفی نشان می‌دهد که میانگین کلی LWE، در دوره ۲۰۰۲-۲۰۲۳، حدود ۷/۰۲- سانتی‌متر نسبت به سطح مرجع با انحراف معیار ۱۱/۴۴ سانتی‌متر است. حداقل مقدار ثبت شده حدود ۳۲/۳۲- سانتی‌متر و حداکثر مقدار حدود ۲۰/۹۲+ سانتی‌متر است. به بیان دیگر، در مرطوب‌ترین ماه‌ها حجم کل آب ذخیره شده در حوضه (شامل آب زیرزمینی، رطوبت خاک، ذخیره برف و آب‌های سطحی) تا حدود ۲۰ سانتی‌متر بالاتر از مقدار مرجع و در خشک‌ترین ماه‌ها تا حدود ۳۰ سانتی‌متر کمتر از مقدار مرجع بوده است. میانگین بارش ماهانه حدود ۱/۴۱ میلی‌متر با دامنه‌ای از ۰/۰۰۱ تا ۶/۱۶ میلی‌متر است که بیانگر تمرکز بارش در ماه‌های سرد و خشکی شدید در فصل تابستان است. میانگین دمای ماهانه نیز ۱۴/۱ درجه سانتی‌گراد با دامنه ۵/۵- تا ۲۹/۲ درجه به‌دست آمده است. میانگین آنومالی‌های سه متغیر نزدیک صفر و انحراف معیار آن‌ها به ترتیب ۹/۳۳ سانتی‌متر (LWE)، ۰/۸۶ میلی‌متر (بارش) و ۱/۳۷ درجه (دما) است. بنابراین، آنومالی‌های در محدوده ± 10 سانتی‌متر برای LWE و ± 1 میلی‌متر برای بارش

نشان‌دهنده انحراف‌های قابل‌توجه نسبت به شرایط نرمال هستند. تحلیل چرخش فصلی با میانگین‌گیری بر اساس شماره ماه نشان می‌دهد که اقلیم ناحیه، الگوی مدیرانه‌ای-کوهستانی دارد. میانگین LWE در ماه‌های زمستان و اوایل بهار مثبت یا نزدیک به صفر است. به‌طور مثال میانگین ماهانه در فوریه $+2/1$ سانتی‌متر، در مارس $+2/6$ سانتی‌متر و در آوریل $+0/7$ سانتی‌متر برآورد شده است. از ماه مه، روند کاهش آغاز و در ماه‌های تابستان و اوایل پاییز تشدید می‌شود؛ به‌طوری‌که میانگین LWE در ژوئیه، اوت، سپتامبر و اکتبر به‌ترتیب حدود $-11/7$ ، $-14/2$ ، $-16/4$ و $-16/3$ سانتی‌متر است. این رفتار نشان می‌دهد که سامانه ذخیره آب زیرزمینی در فصل سرد تغذیه شده و در فصل گرم تحت تأثیر تبخیر-تعرق و جریان پایه تخلیه می‌شود. بارش نیز چرخه‌ای مشابه، ولی با دامنه کوچک‌تر دارد: میانگین بارش ماهانه در ژانویه تا آوریل بین $2/2$ تا $2/7$ میلی‌متر بوده و در ماه‌های ژوئن تا اوت به مقادیر بسیار ناچیز $0/3$ تا $0/7$ میلی‌متر می‌رسد. دما نیز مطابق انتظار در ژانویه نزدیک صفر، در فوریه و دسامبر حدود 2 درجه، در مارس حدود 7 درجه و در اوج تابستان (ژوئیه) حدود $28/2$ درجه است. همزمانی مقادیر بالای بارش و LWE در نیمه سرد سال و مقادیر پایین هر دو در نیمه گرم سال، نشان‌دهنده ارتباط مستقیم ذخیره آب زیرسطحی با چرخه اقلیمی است. برای بررسی روندهای بلندمدت، زمان به‌عنوان متغیر مستقل در یک مدل رگرسیون خطی ساده استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که شیب روند LWE برابر $-0/87$ سانتی‌متر در سال است؛ به این معنا که ذخیره آب زیرزمینی در غرب ایران طی دو دهه اخیر سالانه حدود $0/87$ سانتی‌متر کاهش یافته است (معادل $8/7$ سانتی‌متر در دهه). این مقدار با مقدار ضریب همبستگی ($LWE-time$) برابر با $-0/479$ در سری ماهانه سازگار است و روند را قابل‌اعتنا می‌کند. از سوی دیگر، همبستگی LWE سالانه با مقدار p ($0/0015$) از نظر آماری بسیار معنی‌دار است. در مقابل، شیب روند بارش تقریباً $-0/0014$ میلی‌متر در سال و از نظر آماری نا معنی است و برای دما نیز شیب سالانه $-0/019$ درجه در سال بوده که تغییر محسوسی محسوب نمی‌شود؛ بنابراین، کاهش ذخیره آب زیرزمینی ناشی از روند اقلیمی بارش یا دما نیست. تحلیل روابط بین متغیرها نشان می‌دهد که در مقیاس ماهانه ضریب همبستگی بین LWE و بارش $+0/473$ ، بین LWE و دما $-0/383$ و بین بارش و دما $-0/764$ است. این بدان معناست که ماه‌های پربارش معمولاً دارای LWE بالاتر و ماه‌های گرم معمولاً دارای LWE کمتر هستند. با این حال، چون همبستگی‌ها متوسط هستند، تنها بخشی از واریانس LWE را توضیح می‌دهند و نقش عوامل غیراقلیمی (برداشت چاه‌ها، تغییر کاربری اراضی، تنظیم مخازن و...) همچنان قابل‌توجه است (شکل ۲ و جدول ۱). برای حذف اثر چرخه فصلی، همبستگی آنومالی‌ها نیز محاسبه شد. ضریب همبستگی بین آنومالی LWE و آنومالی بارش $+0/27$ ، بین آنومالی LWE و آنومالی دما $-0/29$ و بین آنومالی بارش و آنومالی دما $-0/33$ است. این مقادیر با وجود کوچک‌تر بودن نسبت به همبستگی‌های اولیه (خام) نشان می‌دهند که حتی پس از حذف مؤلفه فصلی نیز ماه‌های مرطوب‌تر از نرمال تمایل به افزایش LWE و ماه‌های گرم‌تر از نرمال تمایل به کاهش LWE دارند.



شکل (۲): نمودار روند آنومالی ماهانه، بارش و دما LWE در غرب ایران

جدول (۱): همبستگی ماهانه داده‌های اولیه بارش، دما و LWE در طول دوره آماری

pair	var1	var2	r	p_value	سطح رابطه
lwe_pr	lwe	pr	۰/۴۷	1×10^{-13}	معنی‌دار
lwe_temp	lwe	temp	-۰/۳۸	$3/9 \times 10^{-9}$	معنی‌دار
pr_temp	pr	temp	-۰/۷۶	$1/7 \times 10^{-43}$	معنی‌دار

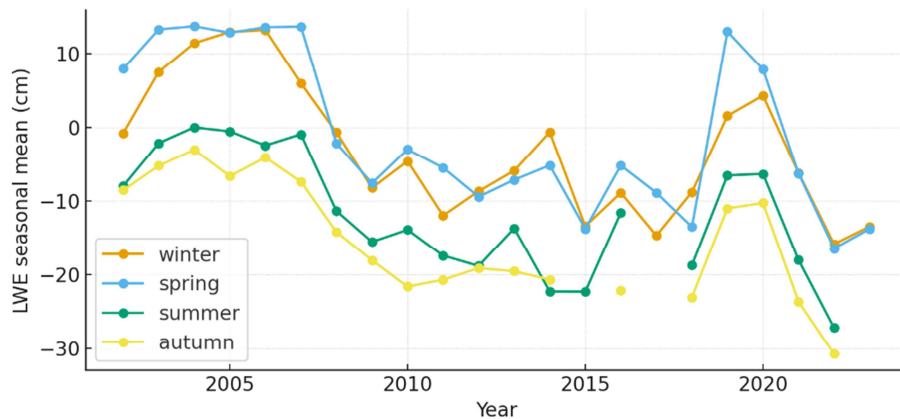
جدول (۲): همبستگی آنومالی ماهانه (بعد از حذف میانگین فصلی همراه) در طول دوره آماری

pair	var1	var2	r	p_value	سطح رابطه
lwe_pr	lwe_anom	pr_anom	۰/۲۷	۰/۰۰۰۰۴	معنی‌دار
lwe_temp	lwe_anom	temp_anom	-۰/۲۹	۰/۰۰۰۰۱	معنی‌دار
pr_temp	pr_anom	temp_anom	-۰/۳۳	$5/5 \times 10^{-7}$	معنی‌دار

تجزیه و تحلیل فصلی

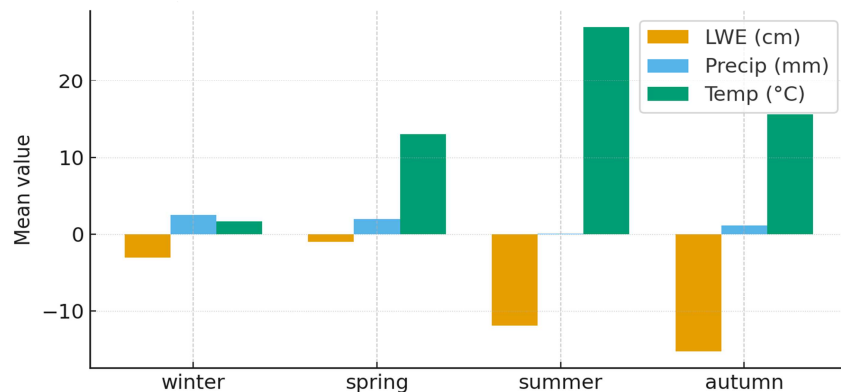
در دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ در هر سال چهار رکورد متناظر با زمستان، بهار، تابستان و پاییز ثبت شد و در مجموع ۸۳ فصل در مجموعه داده وجود دارد. اقلیم فصلی استخراج شده از این داده‌ها، نشان‌دهنده رفتار کاملاً فصلی سامانه هیدرولوژیک است. میانگین LWE فصلی در زمستان حدود ۳- سانتی‌متر، در بهار حدود ۱- سانتی‌متر، در تابستان حدود ۱۱/۹- سانتی‌متر و در پاییز حدود ۱۵/۳- سانتی‌متر است (جدول ۳). به بیان دیگر، در نیمه سرد سال (زمستان و به‌ویژه بهار) ذخیره آب زیرزمینی به مقادیر نزدیک به صفر و حتی در برخی سال‌ها به مثبت نزدیک می‌شود، در حالی که در نیمه گرم سال، به‌خصوص در پاییز، به مقادیر بسیار منفی و کم می‌رسد. این الگو با تقویم بارش منطقه سازگار است. میانگین بارش فصلی حدود ۲/۵ میلی‌متر در زمستان، ۱/۹ میلی‌متر در بهار، ۱/۱ میلی‌متر در پاییز و تنها حدود ۰/۰۵ میلی‌متر در تابستان است؛ یعنی فصل تابستان تقریباً بدون بارش است (شکل ۳). همزمان، دمای فصلی از حدود ۱/۷ درجه سلسیوس در زمستان به ۱۳ درجه در بهار، ۱۵/۶ درجه در پاییز و ۲۶/۹ درجه در تابستان افزایش می‌یابد. ترکیب «بارش بالا و دمای پایین» در زمستان و اوایل بهار و «بارش ناچیز و دمای

بالا» در تابستان و پاییز، توضیح می‌دهد که چرا LWE در فصول سرد نسبتاً بازیابی می‌شود و در فصول گرم کاهش شدید ذخیره را نشان می‌دهد.



در غرب ایران LWE شکل (۳): نمودار روند تغییرات فصلی

تحلیل همبستگی بین مقادیر فصلی نشان می‌دهد که بین ذخیره آب زیرزمینی و بارش رابطه متوسط تا نسبتاً قوی برقرار است؛ ضریب همبستگی پیرسون بین LWE فصلی و بارش فصلی حدود $0/48$ است. این مقدار نشان می‌دهد که فصل‌های پر بارش‌تر عموماً با مقادیر منفی کمتر (حتی مثبت) LWE همراه‌اند و فصل‌های کم‌بارش به‌طور میانگین ذخیره آب زیرزمینی کمتری دارند. در مقابل، همبستگی بین LWE و دمای فصلی منفی و حدود $-0/36$ است؛ یعنی فصل‌های گرم‌تر معمولاً با کاهش ذخیره آب زیرزمینی همراه‌اند که با نقش دما در تشدید تبخیر-تعرق و کاهش رطوبت خاک و آب زیرزمینی سازگار است. قوی‌ترین رابطه بین بارش و دما مشاهده می‌شود؛ ضریب همبستگی بین بارش فصلی و دمای فصلی حدود $-0/81$ است که نشان‌دهنده ویژگی اقلیم مدیترانه‌ای-کوهستانی منطقه است: فصل‌های سرد پر بارش و فصل‌های گرم به‌شدت کم‌بارش‌اند. این ساختار همبستگی تأیید می‌کند که نوسانات فصلی LWE تا حد زیادی تحت کنترل الگوی فصلی بارش و دماست، هرچند بخشی از واریانس آن نیز به فرآیندهای هیدروژئولوژیک و انسان‌ساخت نسبت داده می‌شود (شکل ۴ و جدول ۳).



شکل (۴): نمودار آنومالی فصلی، بارش و دما LWE در غرب ایران

جدول ۳. مقادیر تجزیه و تحلیل همبستگی میانگین‌های فصلی در طول دوره آماری

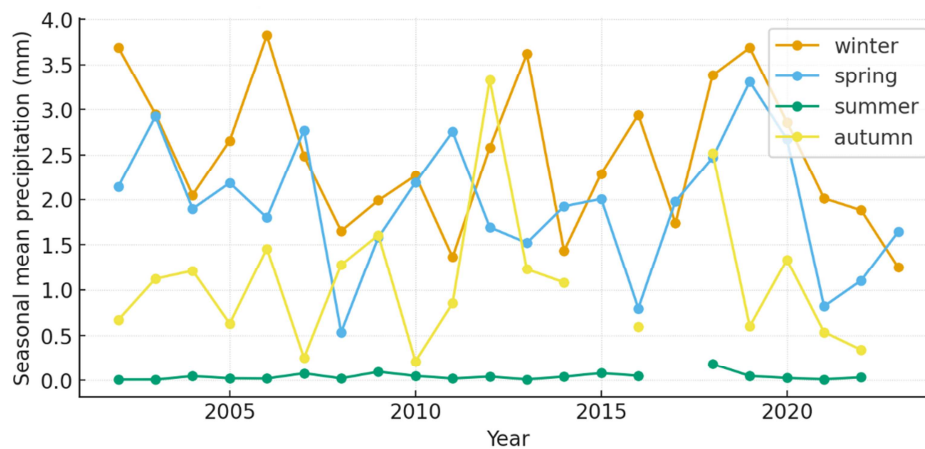
pair	var1	var2	r	p_value	نوع رابطه
lwe_pr	lwe_seasonal	pr_seasonal	۰/۴۸	$3/74 \times 10^{-6}$	معنی‌دار
lwe_temp	lwe_seasonal	temp_seasonal	-۰/۳۶	۰/۰۰۰۹۴	معنی‌دار
pr_temp	pr_seasonal	temp_seasonal	-۰/۸۱	$8/2 \times 10^{-21}$	معنی‌دار

برای بررسی روندهای بلندمدت، برای هر فصل یک مدل رگرسیون خطی بین مقدار فصلی و سال تقویمی برازش داده شد. نتایج نشان می‌دهد که در هر چهار فصل، LWE دارای روند نزولی معنادار است ($p < 0.003$). شیب روند در زمستان حدود $-0/9$ سانتی‌متر در سال، در بهار حدود $-1/04$ سانتی‌متر در سال، در تابستان حدود $-0/83$ سانتی‌متر در سال و در پاییز حدود $-0/89$ سانتی‌متر در سال است (شکل ۳). این مقادیر نشان می‌دهند که کاهش ذخیره آب زیرزمینی در همه فصول با شدتی مشابه حدود $0/8$ تا 1 سانتی‌متر در سال رخ می‌دهد. باین‌حال، مقدار R^2 برای رگرسیون LWE در تمام فصل‌ها بسیار کوچک ($0/00$) است که نشان‌دهنده وجود روند نزولی قوی در کنار نوسانات زیاد بین سالانه است؛ این نوسانات باعث می‌شود مدل خطی تنها بخش اندکی از تغییرات فصلی را توضیح دهد (جدول ۴).

جدول (۴): مقادیر تجزیه و تحلیل روندهای فصلی در طول دوره آماری

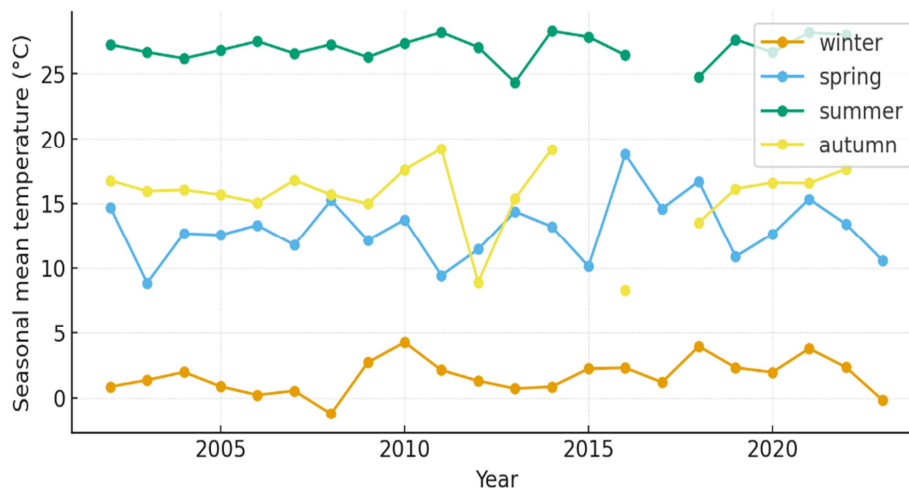
season	variable	slope_per_year	p_value_slope	R^2
autumn	lwe_seasonal	-۰/۸۹	۰/۰۰۰۷۵	۰
autumn	Pr_seasonal	۰	۰/۹۷۵	۰/۹۸
autumn	temp_seasonal	-۰/۰۳	۰/۷۸۵	۰/۷۹
spring	lwe_seasonal	-۱/۰۴	۰/۰۰۱۸	۰
spring	Pr_seasonal	-۰/۰۲	۰/۴۱۶	۰/۴۲
spring	temp_seasonal	۰/۰۶	۰/۴۷۱	۰/۴۷
summer	lwe_seasonal	-۰/۸۳	۰/۰۰۳	۰
summer	Pr_seasonal	۰	۰/۳۱۱	۰/۳۱
summer	temp_seasonal	۰/۰۲	۰/۵۹۷	۰/۶
winter	lwe_seasonal	-۰/۹	۰/۰۰۱۴	۰
winter	Pr_seasonal	-۰/۰۳	۰/۲۸۶	۰/۲۹
winter	temp_seasonal	۰/۰۶	۰/۱۶۳	۰/۱۶

در مقابل، روندهای فصلی بارش و دما الگوی منظم و معنی‌داری نشان نمی‌دهند. شیب‌های بارش فصلی در زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب حدود $-0/03$ ، $-0/02$ ، $+0/02$ و $+0/01$ میلی‌متر در سال هستند (شکل ۵) و همه دارای ($p > 0.28$) و R^2 پایین یا غیر معنی‌دار هستند؛ بنابراین، بارش فصلی فاقد روند خطی پایدار است.



شکل (۵): نمودار روند تغییرات فصلی بارش در غرب ایران

برای دمای فصلی نیز شیب‌ها کوچک (چند صدم درجه در سال) و همگی معنی‌دار ($p > 0.16$) هستند، هرچند نوسانات بین سالانه محسوس است (شکل ۶). بنابراین، درحالی‌که LWE فصلی در هر چهار فصل روند نزولی قوی و معنی‌داری دارد، بارش و دما در مقیاس فصلی بیشتر حول میانگین‌های بلندمدت خود نوسان می‌کنند و فاقد روند قابل توجه‌اند.



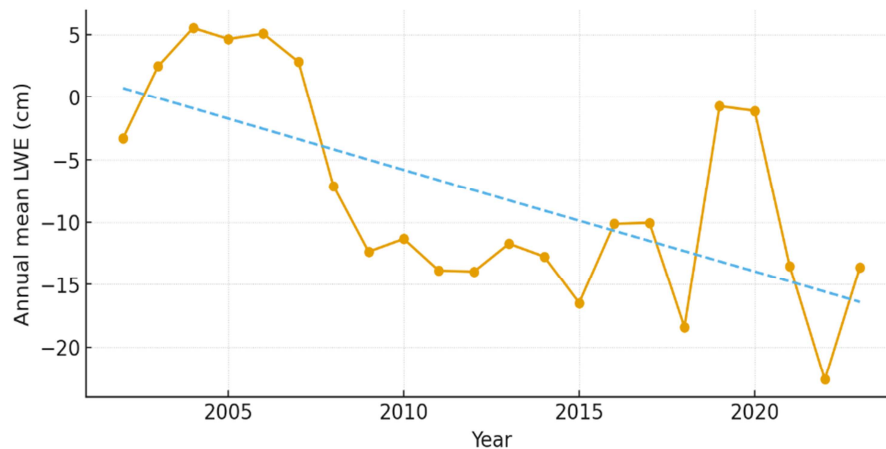
شکل (۶): نمودار روند تغییرات فصلی دما در غرب ایران

تجزیه و تحلیل سالانه

مقدار LWE سالانه متوسط کل ذخیره آب زیرزمینی (شامل آب زیرزمینی، رطوبت خاک، برف و آب‌های سطحی) را نسبت به سطح مرجع LWE نشان می‌دهد، به‌طوری‌که مقادیر مثبت معرف سال‌های پرآب‌تر و مقادیر منفی بیانگر کمبود ذخیره نسبت به شرایط مرجع است. آمار توصیفی نشان می‌دهد که میانگین LWE سالانه در این بازه حدود $7/5$ سانتی‌متر است و انحراف معیار آن حدود $8/3$ سانتی‌متر به‌دست آمده است؛ حداقل مقدار سالانه LWE در سال

۲۰۲۲ برابر ۲۲/۶- سانتی‌متر و حداکثر آن در سال ۲۰۰۴ حدود ۵/۵+ سانتی‌متر است. به بیان دیگر، در تر سال‌ترین سال‌ها سطح ذخیره آب زیرزمینی حوضه حدود ۵-۶ سانتی‌متر بالاتر از مرجع و در خشک‌ترین سال‌ها بیش از ۲۰ سانتی‌متر پایین‌تر از آن قرار گرفته است که نمایانگر دامنه بسیار بزرگ نوسان ذخیره در مقیاس حوضه‌ای است. بارش سالانه که به‌صورت میانگین بارش ماهانه هر سال محاسبه شده و مقدار متوسط آن حدود ۱/۴۵ میلی‌متر با انحراف معیار ۰/۳۸ میلی‌متر است؛ کمترین مقادیر بارش سالانه در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ به‌ترتیب حدود ۰/۸۵ و ۰/۸۴ میلی‌متر و بیشترین مقدار در سال ۲۰۱۸ حدود ۲/۲۶ میلی‌متر مشاهده می‌شود که تفاوت مشخص بین سال‌های خشک و تر را نشان می‌دهد. دمای متوسط سالانه نیز میانگین حدود ۱۳/۸ درجه و انحراف معیار تقریباً ۲/۴ درجه دارد و بین حدود ۱۲-۱۷ درجه نوسان می‌کند؛ مقدار انگار بسیار پایین سال ۲۰۲۳ (حدود ۵/۲ درجه) می‌تواند ناشی از ناقص بودن سری در این سال و تمرکز بر ماه‌های سرد باشد و در تحلیل روند دما باید با احتیاط در نظر گرفته شود. بررسی روابط بین متغیرها در مقیاس سالانه نشان می‌دهد که همبستگی بین LWE سالانه و بارش سالانه حدود ۰/۱۶+ و بین LWE سالانه و دمای سالانه حدود ۰/۱۱+ است، درحالی‌که بین بارش و دما یک رابطه منفی ضعیف تا متوسط با ضریب همبستگی حدود ۰/۳۲- مشاهده می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه سال‌های پربارش‌تر و نسبتاً خنک‌تر در مجموع با مقادیر بالاتر LWE همراه هستند، اما در مقیاس سالانه تنها بخش کوچکی از واریانس LWE توسط میانگین بارش و دما توضیح داده می‌شود و عوامل دیگری نظیر توزیع فصلی بارش در داخل سال، ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی منطقه و به‌ویژه برداشت انسان ساخت از آب زیرزمینی نیز نقش مهمی در نوسان ذخیره آب زیرزمینی دارند. برای شناسایی مؤلفه بلندمدت، بر مقادیر سالانه متغیرها یک مدل رگرسیون خطی بر حسب سال برازش داده شد. شیب روند LWE سالانه حدود ۰/۸۱- سانتی‌متر در سال با ضریب تعیین ۰/۴ و مقدار p (۰/۰۱۵) به‌دست آمد. بنابراین، تقریباً ۴۰ درصد از تغییرات بین سالانه ذخیره آب زیرزمینی را می‌توان با یک روند خطی نزولی ساده توضیح داد و این روند از نظر آماری در سطح بالایی معنی‌دار است. این شیب به این معناست که طی دوره مورد مطالعه، ذخیره آب زیرزمینی در غرب ایران در مجموع چیزی در حدود ۱۷/۱۱ سانتی‌متر کاهش یافته است؛ رقمی که از دیدگاه هیدروژئولوژیکی، نشانه تخلیه قابل‌توجه ذخایر آب زیرزمینی و کاهش ظرفیت ذخیره در کل سامانه هیدروژئولوژیک منطقه است. در مقابل، شیب روند بارش سالانه حدود ۰/۰۶+ میلی‌متر در سال است و ضریب تعیین آن تنها حدود ۰/۰۱ بوده و مقدار p مربوط به شیب حدود ۰/۶۳ است. بنابراین، شواهد آماری قانع‌کننده‌ای برای وجود روند خطی یکنواخت در بارش دیده نمی‌شود و نوسانات بین سالانه بارش بیشتر حول یک میانگین نسبتاً ثابت اتفاق افتاده است. برای دما نیز شیب خط حدود ۰/۱۲- درجه در سال با ضریب تعیین ۰/۱۱ و مقدار p (۰/۱۴) برآورد شده است که این روند از نظر آماری معنی‌دار نیست؛ ضمن اینکه مقدار غیرعادی سال ۲۰۲۳ (به‌علت ناقص بودن سال) می‌تواند بر برآورد شیب تأثیر گذاشته باشد. بررسی سال‌های حدی شواهد کیفی بیشتری در مورد رفتار سامانه آب زیرزمینی فراهم می‌کند. در اوایل دوره، سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ با مقادیر مثبت یا نزدیک به صفر LWE سالانه مشخص می‌شوند. برای مثال در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ مقادیر LWE سالانه به ترتیب حدود ۵/۵+ و ۵/۱+ سانتی‌متر است که معرف ذخیره بالاتر از مرجع و شرایط نسبتاً مرطوب است. از سال ۲۰۰۸ به بعد، مقادیر سالانه LWE به‌طور عمده منفی می‌شود؛ به‌ویژه در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴، مقادیر بین حدود ۷- تا ۱۴- سانتی‌متر قرار دارند که یک دوره طولانی و خشک‌تر از نرمال را نشان می‌دهد. سال ۲۰۱۵ با مقدار حدود ۱۶/۵- سانتی‌متر و سال ۲۰۱۸ با مقدار حدود ۱۸/۴- سانتی‌متر، دوره‌های خشک‌سالی شدیدتری را نشان می‌دهند. جالب آنکه در سال ۲۰۱۸ علی‌رغم بیشترین بارش سالانه ثبت‌شده در کل دوره، LWE همچنان منفی و بزرگ است که

احتمالاً ناشی از اثرات تجمعی خشک‌سالی‌های سال‌های قبل و برداشت زیاد از آبخوان‌ها است. در انتهای دوره، سال ۲۰۲۲ با مقدار حدود ۲۲/۶- سانتی‌متر به‌عنوان خشک‌ترین سال از نظر ذخیره آب زیرزمینی ظاهر می‌شود و همزمان یکی از کم‌بارش‌ترین و نسبتاً گرم‌ترین سال‌ها نیز هست؛ این همزمانی نشان می‌دهد که ترکیب بارش بسیار کم و دمای بالا در کنار برداشت مستمر، سامانه آب زیرزمینی را به وضعیت کمبود شدید رسانده است. در مجموع، نتایج سالانه نشان می‌دهد که اگرچه اقلیم (بارش و دما) در مقیاس بین سالانه بر ذخیره آب زیرزمینی اثر دارد، روند بلندمدت کاهش LWE در غرب ایران بیشتر مستقل از یک روند مشابه در بارش است. نبود روند معنادار در بارش سالانه و عدم وجود شواهد محکم برای گرمایش یکنواخت در این سری خاص، در کنار کاهش شدید و معنی‌دار LWE (شکل ۷)، به‌روشنی حاکی از آن است که علاوه بر نوسانات اقلیمی، عوامل انسان‌ساخت نظیر افزایش برداشت از آبخوان‌ها، توسعه کشاورزی آبی و تغییر کاربری اراضی می‌تواند نقش اصلی را در تخلیه تدریجی ذخایر آب زیرزمینی طی دو دهه اخیر ایفا کرده باشد. این نکته در تبیین نتایج و ارائه پیشنهادهاى مدیریتی برای استفاده پایدار از منابع آب حوضه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

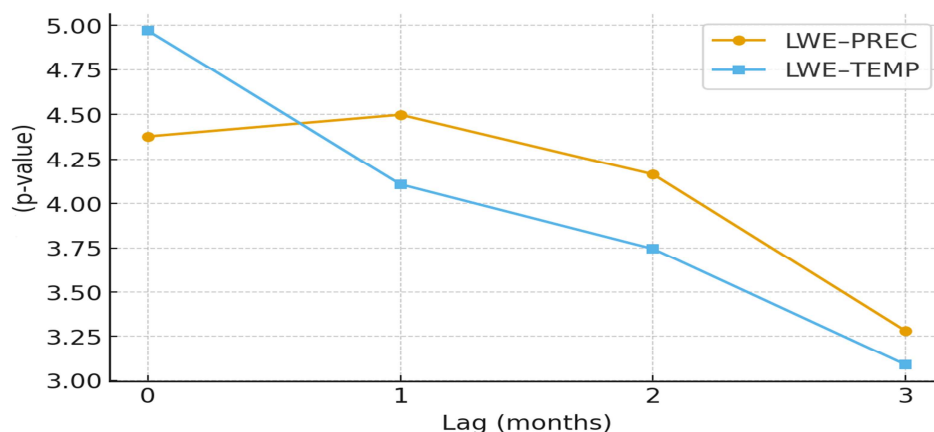


شکل (۷): نمودار آنومالی سالانه LWE در غرب ایران

تجزیه و تحلیل همبستگی lag با بارش و دما

برای تبیین رفتار زمانی سیستم و بررسی تأخیر واکنش ذخیره آب زیرزمینی نسبت به بارش، همبستگی lag بین آنومالی LWE در ماه t و آنومالی بارش در ماه‌های پیشین محاسبه شد. بیشترین ضریب همبستگی بین LWE و بارش در lag یک‌ماهه، با مقدار حدود ۰/۲۸+ و سطح معنی‌داری (۰/۰۰۰۳) به‌دست آمد. در lag دو‌ماهه، ضریب همبستگی به حدود ۰/۲۷+ و سطح معنی‌داری (۰/۰۰۰۶) کاهش یافت و در lag سه‌ماهه به حدود ۰/۲۳+ با سطح معنی‌داری (۰/۰۰۰۵) رسید (شکل ۸ و جدول ۵). مقایسه این مقادیر با همبستگی بدون lag حدود ۰/۲۷+ نشان می‌دهد که واکنش ذخیره آب زیرزمینی نسبت به بارش، بیشتر در همان ماه وقوع بارش و با تأخیری در حدود یک ماه رخ می‌دهد و بارش‌های یک ماه قبل همچنان سهم محسوسی در تعیین مقدار LWE دارند؛ اما با گذشت دو تا سه ماه، شدت این تأثیر کاهش می‌یابد. این رفتار حاکی از آن است که زمان نفوذ، تغذیه آب زیرزمینی و تنظیم مخازن آب سطحی و زیرسطحی در این حوضه بیشتر در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت (چند هفته تا چند ماه) عمل می‌کند و بارش‌های بسیار قدیمی‌تر نقش کمتری در نوسانات جاری ذخیره آب زیرزمینی دارند. بررسی همبستگی

lag بین آنومالی LWE و دما نیز الگوی منسجمی را نشان می‌دهد. در lag صفر، ضریب همبستگی حدود $-0/29$ بود و با افزایش lag تا یک، دو و سه ماه به ترتیب به حدود $-0/26$ ، $-0/25$ و $-0/23$ کاهش یافت؛ همه این ضرایب دارای مقادیر p کمتر از $(0/001)$ هستند و از نظر آماری معنی‌دار به‌شمار می‌آیند. بزرگ‌ترین قدر مطلق همبستگی در lag صفر مشاهده شده است، به این معنا که LWE بیشترین ارتباط را با دمای همان ماه نشان می‌دهد و با فاصله گرفتن زمانی از رخداد دما، نقش آن در توضیح تغییرات LWE ضعیف‌تر می‌شود. این نتیجه با ماهیت فرآیندهای تبخیر-تعرق و تبادل آب بین سطح زمین و جو هماهنگ است؛ زیرا این فرایندها بیشتر در مقیاس زمانی روزانه تا ماهانه فعال بوده و تغییرات دما معمولاً در همان ماه بر میزان اتلاف آب و در نتیجه بر ذخیره آب زیرزمینی اثر می‌گذارند و اثر دماهای ماه‌های گذشته به‌صورت تدریجی کم می‌شود. به‌طورکلی، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که نوسانات ذخیره آب زیرزمینی در غرب ایران به‌طور همزمان تحت تأثیر بارش و دما قرار دارد. بارش از طریق تأمین ورودی سامانه و دما از طریق کنترل خروجی تبخیر-تعرق اثرگذار است. با وجود آنکه ضرایب همبستگی به لحاظ عددی در حد ضعیف تا متوسط هستند، سطح بالای معنی‌داری آماری آن‌ها نشان می‌دهد که نقش اقلیم در شکل‌دهی به سیگنال LWE قابل چشم‌پوشی نیست؛ هرچند برای تبیین کامل نوسانات LWE لازم است اثر عوامل انسان‌ساخت و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی حوضه نیز در کنار متغیرهای اقلیمی در نظر گرفته شود.



شکل (۸): نمودار همبستگی LWE با lag بارش و دما در غرب ایران

جدول (۵): مقادیر تجزیه و تحلیل همبستگی lag با LWE، دما و بارش در طول دوره آماری

pair	kind	lag	correlation	p_value
lwe_pr	anomaly	۰	۰/۲۷	۰/۰۰۰۰۴
lwe_temp	anomaly	۰	-۰/۲۹	۰/۰۰۰۰۱
pr_temp	anomaly	۰	-۰/۳۳	۰/۰۰۰۰
lwe_pr	lag	۱	۰/۲۸	۰/۰۰۰۰۳
lwe_pr	lag	۲	۰/۲۷	۰/۰۰۰۰۷
lwe_pr	lag	۳	۰/۲۳	۰/۰۰۰۵۲
lwe_temp	lag	۱	-۰/۲۶	۰/۰۰۰۰۸
lwe_temp	lag	۲	-۰/۲۵	۰/۰۰۰۱۸
lwe_temp	lag	۳	-۰/۲۳	۰/۰۰۰۸۱

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که ذخیره آب زیرزمینی در غرب ایران به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است، به‌طوری‌که روند نزولی LWE در تمامی مقیاس‌ها (ماهانه، سالانه و فصلی) به‌طور معنی‌داری تأیید شده است. به‌طور خاص، میانگین روند کاهش LWE در سال‌های اخیر حدود $0/8$ سانتی‌متر در سال بوده است که بیانگر کاهش تجمعی حدود $17/10$ سانتی‌متر در طی ۲۱ سال است. طبق مطالعه عمادی و بازیان (۱۴۰۲)، برای بخشی از ایران که با منطقه مورد مطالعه ما هم‌پوشانی دارد، از سال ۲۰۰۸ کاهش شدیدی در روند تغییرات آب زیرزمینی به‌وجود آمده است که این موضوع با نتایج مطالعه ما برای پنج استان همدان، کردستان، کرمانشاه، ایلام و لرستان همخوانی دارد. بررسی نتایج نشان داد در اوایل دوره، سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ مقادیر سالانه LWE مثبت یا نزدیک به صفر است. برای مثال در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ مقادیر به ترتیب حدود $5/5+$ و $5/1+$ سانتی‌متر است که معرف ذخیره بالاتر از مرجع و شرایط نسبتاً مرطوب است. از سال ۲۰۰۸ به بعد، مقادیر سالانه به‌طور عمده منفی می‌شود؛ به‌ویژه در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴، مقادیر بین حدود $7-$ تا $14-$ سانتی‌متر قرار دارند که یک دوره طولانی و خشک‌تر از نرمال را نشان می‌دهد. سال ۲۰۱۵ با مقدار حدود $16/5-$ سانتی‌متر و سال ۲۰۱۸ با مقدار حدود $18/4-$ سانتی‌متر، دوره‌های خشک‌سالی شدیدتری را نشان می‌دهند. جالب آن‌که در ۲۰۱۸ علی‌رغم بیشترین بارش سالانه ثبت‌شده در کل دوره، LWE همچنان منفی و بزرگ است که احتمالاً ناشی از اثرات تجمعی خشک‌سالی‌های سال‌های قبل و برداشت زیاد از آبخوان‌ها است. در انتهای دوره، سال ۲۰۲۲ با مقدار حدود $22/6-$ سانتی‌متر، به‌عنوان خشک‌ترین سال از نظر ذخیره آب زیرزمینی ظاهر می‌شود و همزمان یکی از کم‌بارش‌ترین و نسبتاً گرم‌ترین سال‌ها نیز هست؛ این هم‌زمانی نشان می‌دهد که ترکیب بارش بسیار کم و دماهای بالا در کنار برداشت مستمر، سامانه آب زیرزمینی را به وضعیت کمبود شدید رسانده است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که اگرچه اقلیم (بارش و دما) در مقیاس بین سالانه بر ذخیره آب زیرزمینی اثر دارد، روند بلندمدت کاهش آب زیرزمینی در غرب ایران بیشتر مستقل از یک روند مشابه در بارش است. نبود روند معنادار در بارش سالانه و عدم وجود شواهد محکم برای گرمایش یکنواخت در این سری خاص، در کنار کاهش شدید و معنی‌دار LWE، به‌روشنی حاکی از آن است که علاوه بر نوسانات اقلیمی، عوامل انسان‌ساخت نظیر افزایش برداشت از آبخوان‌ها، توسعه کشاورزی آبی و تغییر کاربری اراضی می‌تواند نقش اصلی را در تخلیه تدریجی ذخایر آب زیرزمینی طی دو دهه اخیر ایفا کرده باشد؛ این نکته در تبیین نتایج و ارائه پیشنهادها مدیریتی برای استفاده پایدار از منابع آب حوضه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مقیاس فصلی، ذخایر آب زیرزمینی در فصل‌های سرد (زمستان و بهار) به‌طور نسبی بازیابی می‌شود، اما در فصل‌های گرم (تابستان و پاییز)، کاهش ذخیره به‌شدت افزایش می‌یابد. درحالی‌که بارش و دما در هیچ یک از مقیاس‌های زمانی روند خطی معنی‌داری نداشتند، این مطالعه نشان می‌دهد که کاهش ذخایر آب زیرزمینی بیشتر به‌دلیل فشارهای انسان‌ساخت است. در نهایت، این پژوهش بر لزوم بازنگری در الگوی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و اهمیت مدیریت پایدار منابع آب در غرب ایران تأکید می‌کند. نسل جدید داده‌های ماهواره‌ای مانند Mascon می‌تواند ابزار مفیدی برای نظارت و مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد.

منابع

- بادکوبه هزاوه، مهتاب؛ نجارچی، محسن؛ جلالی، محمدرضا؛ مظاهری، حسین؛ شعبانلو، سعید. (۱۴۰۳). پیش‌بینی نوسانات ضخامت معادل آب زیرزمینی با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای و ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی بهینه‌سازی و هوش مصنوعی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۴)، صص: ۵۶۹-۵۸۶. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.367628.669601>
- حیدری، سوسن؛ کریمی، مصطفی؛ بیرانوند، آذر. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد داده‌های باز تحلیل ERA5 در تخمین بارش ایران و واکاوی فضایی رژیم بارشی کشور. *پژوهش‌های دانش زمین*، ۱۵ (۲)، صص: ۱-۲۴. <https://doi.org/10.48308/esrj.2024.104225>
- رضی، طیب؛ ستوده، فاطمه. (۱۳۹۶). بررسی دقت مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی (ECMWF) در پیش‌بینی بارش مناطق گوناگون اقلیمی ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۳ (۱)، صص: ۱۳۳-۱۴۷. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2017.57958>
- عساکره، حسین. (۱۳۸۶). تغییرات زمانی-مکانی بارش ایران‌زمین طی دهه‌های اخیر. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*، ۵ (۱۰)، صص: ۱۴۵-۱۶۴. <https://doi.org/10.22111/GDIJ.2007.3669>
- عیسی زاده، وحید؛ ارگانی، میثم. (۱۴۰۰). تغییرات سطح سفره آب‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE در موتور گوگل ارث (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷). *مجله علمی آمایش سرزمین*، ۱۳ (۱)، صص: ۱۹۳-۲۱۴. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2020.304748.670127>
- فرجی، زهره؛ کاویانی، عباس؛ اشرف‌زاده، امین. (۱۳۹۶). ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای GRACE در برآورد تغییرات سطح آب زیرزمینی در استان قزوین. *مجله اکوهیدرولوژی*، ۴ (۲)، صص: ۴۶۳-۴۷۶. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.61482>
- فرجی، زهره؛ کاویانی، عباس؛ اشرف‌زاده، افشین. (۱۳۹۶). ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای GRACE در برآورد تغییرات سطح آب زیرزمینی در استان قزوین. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۳ (۱)، صص: ۱۳۳-۱۴۷. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.61482>
- کاظمی‌آذر، فراهم؛ خلیلی، کیوان؛ رضایی، حسین؛ میرعباسی نجف‌آبادی، رسول. (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد داده‌های باز تحلیل ERA5 و ERA5-Land در تخمین بارش ماهانه حوضه آبریز بالادست سد زاینده‌رود. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۹ (۱)، صص: ۷۵-۸۷.
- محمودی، پیمان؛ فتاحی، ابراهیم؛ حیدری، محسن؛ ریگی، اله‌بخش؛ انصاری، عاطفه؛ قائمی، علیرضا؛ رضائی، جبار. (۲۰۲۵). تحلیل روند نمایه‌های فرین بارشی در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان در جنوب ایران. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۳ (۶)، صص: ۲۳-۴۲. <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.48651.2043>
- نبوی، سیدنوید؛ علیزاده، امین؛ فریدحسینی، علیرضا. (۱۳۹۹). ارزیابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های ثقل‌سنجی ماهواره‌ای GRACE (مطالعه موردی: خراسان رضوی). *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴ (۳)، صص: ۸۵۵-۸۶۶. <https://doi.org/20.1001.1.20087942.1399.14.3.11.8>
- هدایت، سیدجواد؛ ابراهیم خوسفی، محسن؛ امیدوار، کمال؛ شریفی‌پیچون، محمد. (۱۴۰۳). بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از محصولات ماهواره‌ای (مطالعه موردی: کابل-افغانستان). *فصلنامه آب و توسعه پایدار*، ۱۱ (۱)، صص: ۱۳-۲۴. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i1.2312-1291>
- Hassler, B., & Lauer, A. (2021). Comparison of reanalysis and observational precipitation datasets including ERA5 and WFDE5. *Atmosphere*, 12(11), 1462. <https://doi.org/10.3390/atmos12111462>
- Safaei, V., Zarrin, A., Mosaedi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2025). Intensifying droughts and their relationship with temperature and precipitation extremes in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05663-0>
- Wiese, D. N., Yuan, D.-N., Boening, C., Landerer, F. W., & Watkins, M. M. (2023). JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height JPL RL06.3Mv04 (Version RL06.3Mv04). PO.DAAC. <https://doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ634>