




Investigation drought in Iran and of Evaluation of its Relationship with Global Carbon Dioxide Concentration and Sunspot Frequency

Mahdi Shojaei^{1✉}  | Alireza Entezari² | Mohammad Baaghideh³

1. Corresponding author, Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Khorasan Razavi, Iran. mahdi_shojaei@modares.ac.ir
2. Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Khorasan Razavi, Iran. entezari@hsu.ac.ir
3. Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Khorasan Razavi, Iran. mabaaghideh2005@yahoo.com

Article Information

Research Paper

Vol: 17
No: 63
P: 66-91
Received: 2025-05-07
Revised: 2025-07-04
Accepted: 2025-07-04
Published: 2026-05-01

Keywords:

- Drought
- Carbon Dioxide
- Sunspots
- Cross-wavelet transform
- Iran

Cite this Article:

Shojaei, Mahdi., Entezari, Alireza., Baaghideh, Mohammad. (2026). Investigation of drought in Iran and Evaluation of its Relationship with Global Carbon Dioxide Concentration and Sunspot Frequency. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 17(63): 66-91.

Publisher: Hakim Sabzevari University

The Author(s) retain the copyright and full publishing rights.



 [10.22034/jargs.2025.521654.1200](https://doi.org/10.22034/jargs.2025.521654.1200)

Abstract

Aim: This research investigates drought in Iran and evaluates its relationship with global CO₂ (GCO₂) concentration and monthly sunspot frequency (MSSF). It examines the interplay between natural factors and human influences on this climatic phenomenon.

Material & Method: Data were obtained from 31 synoptic stations across Iran for the period 1961–2023. The 12-month Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI-12) was used as the drought metric. Relationships among SPEI-12, GCO₂, and MSSF were examined using Pearson's correlation and Cross Wavelet Transform (XWT).

Findings: The study found that minimum SPEI-12 values occurred at Bushehr (airport), Bandarabbas, Arak, Abadan, and Orumiyeh, maximum values were recorded at Bushehr (airport), Isfahan, Kermanshah, Torbat-E-Heydariyeh, and Khoy. All stations, except Shahrekord, exhibited a significant downward trend in SPEI-12, confirmed by trend tests such as Mann-Kendall, Sen's slope and Mann-Kendall mutation test. Shahrekord uniquely experienced an upward shift around 1970. Pearson's analysis revealed a strong negative correlation between SPEI-12 and GCO₂. Although the correlation with MSSF was less pronounced, But the XWT results highlight the out-of-phase patterns, especially in the 128-month periods.

Conclusion: Based on the findings, the persistent decline in SPEI-12 indicates intensifying drought conditions across Iran. The inverse relationship with GCO₂ underscores the impact of climate change on water resources and calls for updated water management policies to address shifting precipitation patterns.

Innovation: By integrating time series trend analysis, XWT, and correlation tests, the study introduces an innovative methodology for refining climate models and guiding strategic water management. Therefore, the results of this study can be regarded as a valuable example for similar studies in other arid regions.

Extended Abstract

1. Introduction

Drought is a climatic phenomenon with high fluctuations and widespread impacts on economic dimensions and social development. This phenomenon, unlike other natural disasters, with a gradual growth, affects the entire hydrological cycle; in such a way that its effects are evident even after the end of the drought period. Droughts are mainly classified into meteorological, agricultural, hydrological, and socio-economic subgroups based on their drivers and impacts. According to the IPCC report, drought refers to a prolonged period of reduced precipitation that can lead to water scarcity and an imbalance in the hydrological cycle. Its impacts have been intensified by global warming, such that since 1970, its severity, extent, and critical range have been increasing worldwide, having a greater economic impact than other disasters. The increasing concentration of greenhouse gases has accelerated the global warming trend. The role of solar activities, as a factor in atmospheric dynamics, is also important in climate studies. Given the importance of drought, its timely detection and accurate assessment are vital for crisis management. Therefore, the present study aimed to calculate the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) at 31 synoptic stations in Iran, identify its trends and change points, and evaluate the relationship of this index with global Atmospheric carbon dioxide concentration (GCO_2) (an anthropogenic factor) and monthly sunspot frequency (MSSF) (a natural factor).

2. Materials and Methods

The required data included daily mean temperature and precipitation for these 31 stations from the Iran Meteorological Organization (IRIMO) for 1961-2023, monthly GCO_2 data from NOAA, and monthly MSSF data from SIDC Belgium were collected and analyzed. The SPEI-12 index, which is based on the Standardized Precipitation Index (SPI) and also uses potential evapotranspiration (PET) (calculated by the Thornthwaite method), was computed. To examine trends and identify change points, non-parametric Mann-Kendall and Sen's slope tests were used, and for linear correlation, Pearson correlation was applied. Cross-wavelet transform (XWT), using the Morlet wavelet, were employed to reveal common power and relative phase between time series in the time-frequency domain.

3. Results and Discussion

The results of the Mann-Kendall and Sen's slope tests showed that, except for Shahrekord station (negligible upward trend), other stations experienced a significant decreasing trend in the SPEI-12 index. The most substantial decrease was observed in Yazd, Bam, Kerman, Tabriz, and Zahedan. Mann-Kendall mutation test analysis also indicated significant changes at 9 stations, including an upward shift in Shahrekord and significant downward shifts in Ramsar, Kermanshah, Shiraz, Bushehr, Bandarabbas, Birjand, Babolsar, and Khorramabad. These findings emphasize the necessity of water resource management and drought monitoring in Iran's arid and semi-arid climate. Pearson correlation between SPEI-12 and GCO_2 showed an inverse correlation at most stations, especially in Bam, Yazd, Kerman, Mashhad, Khoy, Tabriz, Zahedan, and Shahrud, which is consistent with drought intensification due to global warming; however, a strong correlation between MSSF and SPEI-12 was not observed. Cross-wavelet analysis between SPEI-12 and GCO_2 showed negligible signal strength, but out-of-phase cycles were observed in the 32 to 128-month periods (approximately 2.67 to 10.67 years), indicating the complexity of relationships and the delayed or non-linear effect of GCO_2 on drought dynamics. In contrast, cross-wavelet analysis between SPEI-12 and MSSF revealed a stronger relationship. Out-of-phase signals in the 64 to 128-month cycles (5.33 to 10.67 years), particularly in the 1977-2010 period, were evident. These out-of-phase cycles predominated in the 128-month cycle. In-phase signals in the 32-month cycle (approximately 2.67 years) were also observed at some stations. These results are consistent with studies suggesting the role of solar activities in decadal climate changes and show that wavelet analysis can reveal hidden frequency and phase correlations.

4. Conclusion

The present study showed that drought in Iran is intensifying, and most stations (except Shahrekord) have a decreasing and significant trend in SPEI-12. This trend is more prominent in Yazd, Bam, Kerman, Tabriz, and Zahedan. The presence of downward change points also indicates sudden and long-term changes in regional drought conditions. The findings confirm the probable impact of global warming through increased GCO_2 on drought intensification in Iran, which was identified by an inverse linear correlation. Although the signal strength of this relationship in cross-wavelet analysis was weak, the existence of out-of-phase cycles emphasizes the complexity of the relationship. Cross-wavelet analysis revealed a stronger

relationship and distinct out-of-phase cycles between MSSF and SPEI-12. This indicates that solar activities, although they may not have a strong linear effect, influence drought dynamics at specific frequency scales. Overall, this research emphasizes the importance of comprehensive and multi-factorial approaches in drought studies and shows that in addition to climate factors related to global warming, the role of natural phenomena such as solar activities, albeit with more complex mechanisms, should also be considered. These results can be useful for long-term water resource management and adaptation to climate change in Iran.

5. Acknowledgments

The authors sincerely thank the Iran Meteorological Organization (IRIMO) for providing essential meteorological data for this research.

6. Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

بررسی خشکسالی در ایران و ارزیابی ارتباط آن با غلظت جهانی کربن دی اکسید و فراوانی لکه‌های خورشیدی

مهدی شجاعی^۱، علیرضا انتظاری^۲، محمد باعقیده^۳

- ۱- نویسنده مسئول، گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. mahdi_shojaei@modares.ac.ir
- ۲- گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. entezari@hsu.ac.ir
- ۳- گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. mhaaghidh2005@yahoo.com

چکیده

هدف: پژوهش حاضر با هدف بررسی خشکسالی در ایران و ارزیابی ارتباط آن با غلظت جهانی گاز کربن دی‌اکسید (GCO_2) و فراوانی ماهانه لکه‌های خورشیدی (MSSF) سعی در تحلیل پیوند میان عوامل طبیعی و انسانی در بروز این پدیده اقلیمی دارد.

روش و داده: در این مطالعه، داده‌های دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۲۳ از ۳۱ ایستگاه همدیدی ایران جمع‌آوری شد. مقیاس ۱۲ ماهه شاخص بارش-تبخیر و تعرق معیار شده (SPEI-12) به عنوان معیار خشکسالی به کار گرفته شده و رابطه آن با GCO_2 و MSSF از طریق آزمون همبستگی پیرسون و تبدیلات موجک متقاطع (XWT) بررسی گردید.

یافته‌ها: نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که کمینه‌های SPEI-12 در ایستگاه‌های بوشهر (فروگاه)، بندرعباس، اراک، آبادان و ارومیه دیده می‌شوند؛ مقادیر بیشینه نیز در ایستگاه‌های بوشهر (فروگاه)، اصفهان، کرمانشاه، تربت‌حیدریه و خوی ثبت شده‌اند. بررسی سری‌های زمانی، به جز ایستگاه شهرکرد، روند نزولی معناداری را به اثبات رسانده است؛ آزمون‌های روند مبتنی بر من‌کندال، جهش من‌کندال و شیب سین کاهش قابل توجه شاخص را در اکثر ایستگاه‌ها تأیید می‌کنند، در حالی که شهرکرد روند صعودی را در حوالی سال ۱۹۷۰ تجربه نموده است. همچنین، آزمون همبستگی پیرسون رابطه معکوس قوی میان SPEI-12 و GCO_2 را نشان داد؛ اگرچه ارتباط با MSSF از نظر آماری ضعیف‌تر گزارش شده است؛ اما نتایج XWT الگوهای ناهم‌فاز به ویژه در دوره‌های ۱۲۸ ماهه را برجسته می‌سازد.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌های به دست آمده، کاهش پیوسته شاخص SPEI-12 در اکثر ایستگاه‌ها بیانگر تشدید خشکسالی در اقلیم ایران است. تحلیل‌های روند و موجک متقاطع نشان می‌دهد تغییرات در الگوهای خشکسالی، چالش‌های جدی در وضعیت منابع آب کشور را به همراه داشته و رابطه معکوس مشهود میان خشکسالی و غلظت دی‌اکسید کربن، نشانه‌ای از اثرات تغییرات اقلیمی محسوب می‌شود. این شواهد بر نیاز به بازنگری و به‌روزرسانی سیاست‌های آبی کشور در مواجهه با تغییرات الگوهای بارش تأکید دارد.

نوآوری، کاربرد نتایج: به کارگیری همزمان تحلیل روند سری‌های زمانی، تبدیلات موجک متقاطع و آزمون‌های همبستگی نوآورانه بوده و می‌تواند به بهبود مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی و تدوین راهبردهای مدیریتی در حوزه آب و هوای ایران کمک کند. از این رو نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان نمونه‌ای برای مطالعات مشابه در سایر مناطق خشک ارزشمند قلمداد شود.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره:	۱۷
دوره:	۶۳
صفحه:	۶۶-۹۱
تاریخ دریافت:	۱۴۰۴/۰۲/۱۷
تاریخ ویرایش:	۱۴۰۴/۰۴/۱۳
تاریخ پذیرش:	۱۴۰۴/۰۴/۱۳
تاریخ انتشار:	۱۴۰۵/۰۲/۱۱

کلیدواژه‌ها:

- خشکسالی
- دی‌اکسید کربن
- لکه‌های خورشیدی
- تبدیل موجک متقاطع
- ایران

نحوه ارجاع به این مقاله:

شجاعی، مهدی، انتظاری، علیرضا، باعقیده، محمد. (۱۴۰۵). بررسی خشکسالی در ایران و ارزیابی ارتباط آن با غلظت جهانی کربن دی‌اکسید و فراوانی لکه‌های خورشیدی. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۷(۶۳): ۶۶-۹۱.

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



نویسنده(گان) حق نشر و حقوق انتشار کامل را حفظ می‌کنند.

۱- مقدمه

خشکسالی، به عنوان یکی از برجسته‌ترین پدیده‌های اقلیمی، با نوسانات بالا، طولانی مدت و تأثیرات گسترده‌ای شناخته می‌شود که ابعاد اقتصادی و توسعه اجتماعی را نیز تحت الشعاع قرار می‌دهد (Van Loon et al., 2016). این پدیده برخلاف سایر بلایای طبیعی نظیر سیل، توفان، زلزله یا فوران آتشفشان، رشدی آرام و خزنده دارد و تمام چرخه آب‌شناسی^۱ را درگیر می‌کند، به نحوی که حتی پس از پایان یافتن آن، پیامدهای گذار آن قابل مشاهده است (Vogt et al., 2011). اگرچه اطلاعات هواشناسی کوتاه‌مدت، به ویژه در بخش کشاورزی، اهمیت بالایی دارند؛ اما با توجه به شروع آهسته خشکسالی، پیش‌بینی‌های مربوط به آن اغلب در مقیاس‌های فصلی یا بلندمدت‌تر انجام می‌شوند (Potop et al., 2012). خشکسالی‌ها عمدتاً بر اساس محرک‌ها و اثراتشان به زیرگروه‌های هواشناسی، کشاورزی، آب‌شناسی و اجتماعی-اقتصادی تقسیم‌بندی می‌شوند (Mishra & Singh, 2010). این طبقه‌بندی‌ها به تفاوت نقش عوامل اقلیمی مانند بارش، تبخیر-تعرق و رواناب در ایجاد خشکسالی اشاره دارند. به عنوان مثال، خشکسالی کشاورزی به کمبود رطوبت در حدود یک متر بالایی خاک (منطقه ریشه) که بر محصولات تأثیر می‌گذارد، اشاره دارد؛ خشکسالی هواشناسی عمدتاً به معنای کاهش طولانی مدت بارش‌ها است و خشکسالی آب‌شناسی با جریان رودخانه‌ها، سطح دریاچه‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی کمتر از حد نرمال مرتبط است. خشکسالی می‌تواند هر ساله حدود ۴۲ درصد بیشتر از سایر بلایای طبیعی، اقتصاد جهانی را تحت تأثیر قرار دهد (Han et al., 2021). تأثیرات این پدیده به واسطه سناریوهای گرمایش جهانی نیز تشدید می‌شود، به طوری که از سال ۱۹۷۰ میلادی شدت، گستردگی و محدوده بحرانی آن در مناطق مختلف جهان به طور فزاینده‌ای افزایش یافته است. به طور کلی، بر اساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۲ (IPCC)، خشکسالی عبارت است از عدم بارش یا کاهش چشمگیر بارندگی در طولانی مدت که می‌تواند منجر به کمبود آب، کاهش منابع آبی و در نهایت، بر هم خوردن تعادل آب‌شناسی شود. افزایش گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر به افزایش دمای سیاره زمین سرعت بخشیده است و اغلب راهکارهای مقابله با تغییرات اقلیمی بر کاهش سطح انتشار این گازها متمرکز هستند (Change, 2007). علاوه بر این، در مطالعات آب و هوایی باید نقش فعالیت‌های خورشیدی را نیز به عنوان مهم‌ترین عامل پویایی جو در نظر گرفت. بر همین اساس ادی به فقدان لکه‌های خورشیدی و افزایش کربن-۱۴ در حلقه‌های درختان در اواخر قرن هفدهم اشاره کرد که همزمان با سردترین بخش عصر یخبندان کوچک^۳ در اروپا بود (Eddy, 1976). کلی نیز نشان داد که در خلال ۱۸۷۴ تا ۱۹۷۴ میلادی، فشارهای سطحی فصل زمستان در اقیانوس اطلس شمالی با یک چرخه ۱۱ ساله نوسان اقیانوس اطلس شمالی^۴ (NAO) نوسان داشته و این نوسان در بیشتر آن زمان با تعداد لکه‌های خورشیدی هم فاز بوده؛ اما این رابطه در حدود سال‌های ۱۸۸۰ تا ۱۹۲۰ ضعیف یا معکوس بوده است (Kelly, 1977). به هر روی ورودی‌های متغیر خورشیدی مانند: تابش^۵، ذرات انرژیزا^۶، میدان‌های الکتریکی ناشی از باد خورشیدی و تغییرات جریان پرتوهای کیهانی کهکشانی^۷، در فرآیندهای مختلف جو^۸ از جمله شیمی و دینامیک لایه استراتوسفر^۹، تشکیل هواویزه‌ها^{۱۰} و الکتروسیسته جو^{۱۱} نقش دارند. اگرچه اثرات آن کوچک و در نتایج آماری به صورت نامنظم ظاهر می‌شوند، شواهد قوی درباره واکنش ابرها به تغییرات بالقوه یونوسفری^{۱۲} که ناشی از جریان‌های الکتریکی روزانه و تغییرات ناشی از فعالیت‌های رعد و برق است، وجود دارد. با وجود این یافته‌ها، مدل جامع و کمی برای توضیح دقت تغییرات میکروفیزیکی^{۱۱} ناشی از بار الکتریکی در ابرها هنوز ارائه نشده و تفکیک دقیق اثرات فعالیت‌های مختلف خورشیدی در مقیاس‌های زمانی متفاوت همچنان چالش برانگیز به شمار می‌آید (Tinsley, 2023).

در پژوهشی با اتکا به داده‌های ۲۰۰ سال بارش روزانه و با استفاده از تکنیک تبدیل موجک^{۱۲}، به بررسی تناوب‌های خشکسالی در سئول به منظور یافتن نشانه‌ای از رابطه میان خشکسالی در شبه جزیره کره و فعالیت‌های خورشیدی پرداخته شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که شاخص خشکسالی مؤثر^{۱۳} (EDI) در دوره‌های بلندمدت در حدود ۵۵ و ۱۲۰ سال ممکن است مرتبط با چرخه‌های گلیسبرگ^{۱۴} باشد. اگرچه تناوبی مشابه با چرخه ۱۱ ساله خورشیدی در داده‌های شاخص یاد شده و سری‌های زمانی ساخته شده یافت نشد (Park & Chang, 2013).

1. Hydrology
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
3. Little Ice Age
4. North Atlantic Oscillation (NAO)
5. Irradiance
6. Energetic particles
7. Galactic cosmic ray flux

8. Stratospheric
9. Aerosols
10. Ionospheric
11. Microphysics
12. Wavelet Transform
13. Effective Drought Index (EDI)
14. Gleissberg cycles

لی و همکاران در پژوهشی با بررسی فعالیت لکه‌های خورشیدی، رویدادهای سرد و گرم و وقایع خشکسالی و سیلاب در دشت مرکزی چین در دوران سلسله سونگ شمالی و با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته‌ای شامل آزمون من-کندال، تحلیل موجک مورلت^۱، تحلیل R/S^۲ و تحلیل فرکانسی چنین عنوان شد که فعالیت لکه‌های خورشیدی شامل ۱۵ سال اوج و ۱۶ سال کمینه با دوره‌ای بین ۸ تا ۱۴ سال (میانگین ۱۱ سال) بوده و علاوه بر این، تحلیل فرکانسی رابطه نزدیک میان تغییرات دمایی و وقایع خشکسالی و سیلاب با فعالیت لکه‌های خورشیدی را نشان داده‌اند (Li et al., 2019).

محققان چینی در مطالعه‌ای به بازسازی سری‌های داده‌های تاریخی خشکسالی و سیلاب در حوزه بالایی رودخانه ویهه^۳ در غرب چین با استفاده از اطلاعات محیطی تاریخی و شاخص معیار شده بارش^۴ (SPI) و روش‌های تشخیصی آماری پرداخته شد و نتایج آن نشان داد که بازسازی‌های صورت گرفته به خوبی وضعیت خشکسالی و سیلاب از سال ۱۸۰۰ تا ۲۰۱۶ را منعکس می‌کنند، از سوی دیگر تحلیل‌های انجام شده نشان دادند که چرخه نوسانات جنوبی ال نینو^۵ (ENSO) و فعالیت لکه‌های خورشیدی به طور قابل توجهی با تغییرات خشکسالی و سیلاب مرتبط بوده و به ویژه اثر تجمعی ENSO در بازه ۱۵ ساله و چرخه ۱۰۲ ساله لکه‌های خورشیدی از عوامل اصلی تغییرات در وقوع پدیده‌های مذکور محسوب می‌شوند (Liu et al., 2022).

در پژوهشی دیگر به مطالعه ویژگی‌ها و روند تغییرات خشکسالی در حوزه رودخانه هایه^۶ چین با اتکا به داده‌های هواشناسی روزانه در یک دوره ۶۰ ساله پرداخته شد. این پژوهش با به کارگیری شاخص بارش-تبخیر و تعرق معیار شده^۷ (SPEI) به همراه روش‌های ضریب همبستگی پیرسون^۸ و تحلیل موجک متقاطع^۹ اثرات عوامل اقلیمی از جمله گرمایش جهانی، تغییر تعداد نقاط خورشیدی و شاخص‌های چرخش جو را بررسی شد. یافته‌های به دست آمده از این پژوهش بیانگر آن بودند که گرمایش جهانی عوامل افزایش خشکسالی را فراهم نموده به نحوی که این تغییرات به صورت منطقه‌ای، به ویژه در ناحیه مرکزی این حوزه آبریز، مشهود است. همچنین، وجود رابطه منفی میان SPEI و تعداد نقاط خورشیدی نشان می‌دهد که افزایش نقاط خورشیدی با شدت بیشتر خشکسالی همراه است. علاوه بر این، پژوهش تصریح نمود که خشکسالی بیشترین حساسیت را نسبت به ال نینو-جنوبی (ENSO) و نوسان چند دهه اقیانوس اطلس^{۱۰} (AMO) داشته و شاخص‌هایی نظیر AO، PDO، NAO، PNA و WP تأثیرات کمتری را در کنترل آن دارند (Ling et al., 2023).

در رابطه با خشکسالی در ایران، نصرتی در مطالعه‌ای به بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش-تبخیر و تعرق معیار شده و مقایسه آن با شاخص بارش معیار شده حاصل از محاسبه داده‌های بارش و دمای ماهانه ۱۰ ایستگاه هواشناسی همدیدی ایران پرداخت. نتایج پژوهش نام برده نشان داد که شاخص SPI و شاخص SPEI دارای همبستگی معنی‌دار بوده اما شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده، پاسخ سریع‌تری نسبت به خشکسالی داشته است. علاوه بر این با افزایش مقیاس زمانی شاخص‌های یاد شده، تدام خشکسالی نیز شدت بیشتری خواهد یافت (Nosrati, 2014).

در پژوهشی دیگر به بررسی اثرات خشکسالی به عنوان عامل اصلی بیابان‌زایی در ایران پرداخته شد. در این مطالعه از شاخص‌های خشکسالی به دست آمده از داده‌های بلندمدت دما و بارش برای نمایش وقوع خشکسالی‌های بلندمدت در مناطق اقلیمی مختلف (مناطق کوهستانی و بیابانی) استفاده گردید. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که در دهه‌های اخیر خشکسالی‌های هواشناسی شدید و بسیار شدید رخ داده‌اند و شاخص خشکی دِ مارتون^{۱۱} (IDM) و تغییرپذیری بارش^{۱۲} (PVI) روند نزولی پیوسته‌ای را به اثبات رساندند (Emadodin et al., 2019).

قویدل و همکاران در پژوهشی با استفاده از روش‌های آماری متنوع از جمله تحلیل روند، آزمون من-کندال و تحلیل موجک مورلت به بررسی فراوانی روزهای دارای توفان‌های تندری^{۱۳} (FTD) و ارتباط آن با فراوانی لکه‌های خورشیدی^{۱۴} (SF) و غلظت جهانی دی‌اکسید کربن جو^{۱۵} (GACDC) در ایستگاه همدیدی تبریز در دوره آماری ۶۸ ساله ۲۰۱۸-۱۹۵۱ پرداختند. در این پژوهش

1. Morlet Wavelet Analysis

2. Rescaled Range Analysis (R/S)

3. Weihe

4. Standardized Precipitation Index (SPI)

5. El Niño–Southern Oscillation (ENSO)

6. Haihe

7. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

8. Pearson correlation coefficient

9. Cross wavelet analysis

10. Atlantic multidecadal oscillation (AMO)

11. De Martonne Aridity Index

12. Precipitation Variability Index (PVI)

13. Frequency of Thunderstorm Days (FTD)

14. Sunspots Frequency (SF)

15. Global Atmospheric Carbon Dioxide Concentration (GACDC)

این چنین اظهار داشته‌اند که از نظر توزیع زمانی، در فصل بهار بیشترین و در زمستان کمترین فراوانی را مشاهده نمودند. نتایج تحلیل موجک آنان نیز نشان داد که FTD همانند لکه‌های خورشیدی دارای چرخه‌های دوره‌ای در وقوع بوده و تحلیل موجک متقاطع رابطهای منفی و ناهم‌فازی میان SF و FTD را نشان می‌دهد، در حالی که هیچ رابطه معناداری میان GACDC و FTD در پژوهش نامبردگان یافت نشد (Ghavidel et al., 2021).

صرفزایی و همکاری با استفاده از شبیه‌سازی داده‌های دما از مدل CanESM2 و داده‌های بارش از مدل HadCM3 به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر مخاطرات جوی منطقه سیستان با کمک ریزگردانی آماری پرداختند. آنان پس از صحت‌سنجی مدل‌ها، یخبندان، امواج گرمایی، بارش‌های حدی و خشکسالی را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که امواج گرمایی و خشکسالی در آینده تهدیدات اصلی منطقه یاد شده محسوب می‌شوند؛ به طوری که تحت سناریوی RCP2.6، در سال ۲۰۲۱ پیش‌بینی ۳۲ موج گرما و بیش از ۵ موج گرما در سال رخ خواهد داد و بیشترین فراوانی خشکسالی را در سال ۲۰۲۰، تحت سناریوی A1B اعلام کردند (Safarzaei et al., 2022).

یوسفی و همکاران در مطالعه‌ای با استفاده از ۴۱ مدل چرخش عمومی^۱ (GCM) به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های انسانی بر منابع آب ایران پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین بارش سالانه بلندمدت در ایران با شیب افزایشی از شمال به جنوب به ویژه در نواحی مستعد حوادث شدید افزایش می‌یابد. در تحلیل دو متغیره فرکانس نیز عنوان داشته‌اند که وقوع خشکسالی‌ها در آینده افزایش قابل‌ملاحظه‌ای خواهند داشت (Yousefi et al., 2024).

بنابراین با توجه به اهمیت بالای مسأله خشکسالی و پیامدهای وسیع آن بر منابع آب، کشاورزی، توسعه اقتصادی و همچنین با در نظر داشتن این مسأله که خشکسالی با تغییرات اقلیمی و افزایش دما مواجهه روزافزون داشته و اثرات آسیب‌زای آن می‌تواند به تخریب سامانه‌های آبی و اقتصادی منجر شود، تشخیص به موقع و ارزیابی دقیق این شاخص اهمیت ویژه‌ای در تدوین راهبردهای مقابله و مدیریت بحران خواهد داشت. از همین روی در پژوهش حاضر تلاش شد تا شاخص بارش-تبخیر و تعرق معیار شده (SPEI) به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در بررسی خشکسالی، در ۳۱ ایستگاه هم‌دیدگی از سراسر ایران محاسبه و روند تغییرات و نقاط جهش احتمالی آن به دقت شناسایی گردد. علاوه بر این، پس از اتمام محاسبات مذکور، ارزیابی ارتباط میان این شاخص و دو شاخص زیست محیطی از جمله میزان غلظت جهانی گاز دی اکسید کربن جو^۲ (GCO₂) به عنوان عامل کلیدی انسانی تغییرات اقلیمی و فراوانی ماهانه لکه‌های خورشیدی^۳ (MSSF) به عنوان عامل طبیعی تأثیرگذار در تمامی سامانه‌های اقلیمی سیاره زمین با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون و تبدیلات موجک متقاطع^۴ (XWT) انجام گردید تا بتوان به درک جامع‌تری از تعاملات میان عوامل اقلیمی و زیست محیطی نائل آمد.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

ایران کشوری پهناور با مساحتی حدوداً ۱,۶۴۸,۱۹۵ کیلومتر مربع است که در عرض جغرافیایی بین ۲۵ درجه شمالی تا ۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۵ درجه شرقی تا ۶۵ درجه شرقی قرار دارد. کمترین ارتفاع ایران مربوط به نوار ساحلی دریای خزر با ارتفاع (۲۸-) متر و مرتفع‌ترین نقطه آن قله دماوند با حدود ارتفاعی ۵,۶۱۰ متر است که در رشته کوه البرز قرار دارد. این رشته کوه از شمال غرب تا شمال شرق ایران امتداد یافته است. از دیگر ارتفاعات شاخص ایران رشته کوه زاگرس است که از شمال غرب تا جنوب غرب امتداد دارد. چنین عوارض زمین‌شناسی منجر به این شده‌اند که حدود ۸۸٪ از ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار گیرد (Vaghefi et al., 2019). همچنین باید به این نکته توجه داشت که بیابان لوت و دشت کویر در فلات مرکزی ایران قرار گرفته‌اند. بیابان لوت با وسعت ۱۱,۰۰۰ کیلومتر مربعی خود به بزرگ‌ترین شهر خالی از سکنه نیز شهرت جهانی پیدا کرده است (Khoshkam & Zand, 2010). از همین روی می‌توان این چنین عنوان داشت که مسأله مدیریت منابع آبی و پایش خشکسالی‌ها در ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بدین ترتیب با توجه به ضرورت مطالعه خشکسالی در این منطقه و با در نظر داشتن مسأله

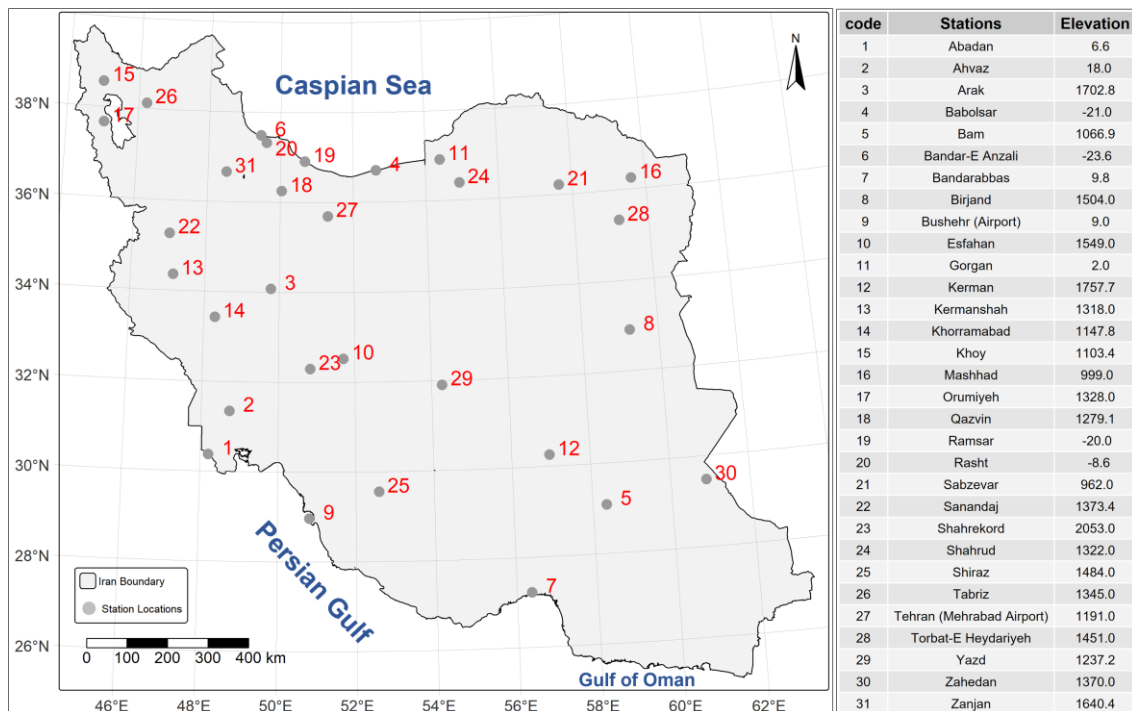
1. General Circulation Model (GCM)

2. Global Atmospheric Carbon Dioxide Concentration (GCO₂)

3. Monthly Sunspots Frequency (MSSF)

4. Cross-Wavelet Transform (XWT)

یکنواخت بودن طول دوره آماری در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه همانگونه که در شکل ۱ قابل مشاهده است، ۳۱ ایستگاه همدیدی در سراسر پهنه ایران انتخاب شدند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب

داده‌ها

- باتوجه به اهداف این پژوهش داده‌های مورد نیاز با استفاده از منابع زیر گردآوری و مورد بررسی قرار گرفتند:
- در این پژوهش با استفاده از داده‌های روزانه میانگین‌های دما و بارش ۳۱ ایستگاه همدیدی اخذ شده از سازمان هواشناسی ایران، تلاش شد تا در بازه زمانی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۳ میلادی شاخص خشکسالی SPEI محاسبه و مورد ارزیابی قرار گیرند.
- داده‌های ماهانه غلظت جهانی گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن از تارنمای آزمایشگاه نظارت جهانی^۱ (GML)، اداره ملی اقیانوسی و جوی^۲ (NOAA)، ایالات متحده آمریکا برای بازه زمانی یاد شده اخذ شدند.
- داده‌های ماهانه فراوانی لکه‌های خورشیدی نیز از تارنمای مرکز تجزیه و تحلیل داده‌های خورشیدی^۳ (SIDC) وابسته به رصدخانه سلطنتی بلژیک^۴ دریافت شدند.

۲-۲- روش پژوهش

شاخص خشکسالی SPEI

این شاخص در سال ۲۰۱۰ میلادی بر پایه شاخص بارش معیار شده (SPI)، معرفی شد؛ اما با این تفاوت که در این شاخص علاوه بر داده‌های میانگین بارش از تبخیر و تعرق پتانسیل نیز برای تعیین خشکسالی و ترسالی استفاده می‌شود (Vicente-Serrano et al., 2010). در پژوهش حاضر به دلیل محدودیت‌های دیده‌بانی داده‌های هواشناسی در ایران برای محاسبه

1. The Global Monitoring Laboratory (GML): <https://gml.noaa.gov>

2. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

3. Solar Influences Data Analysis Center (SIDC): <https://www.sidc.be>

4. The Royal Observatory of Belgium

تبخیر و تعرق پتانسیل^۱ از روش تورنت وایت استفاده شد (Thorntwaite, 1948). پس از آن شاخص یاد شده با توجه به فرمول‌های زیر محاسبه شد:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (۱)$$

به دلیل آن که شاخص SPEI، مبتنی بر ترازمندی اقلیمی آب^۲ است در این معادله D_i تراز آبی، P_i برابر با میزان بارش ماهانه PET_i تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه بر حسب میلی‌متر است. پس از آن همانند شاخص SPI، مقادیر توالی D_i در پنجره‌های زمانی مختلف محاسبه می‌شود. اگر x سری تجمعی D_i ، در پنجره زمانی معین باشد، می‌تواند یک توزیع احتمال مناسبی بر سری x برازش یابد. در این صورت توزیع لوگ-لجستیک^۳ سه پارامتری مطابق با تابع زیر، در مدل‌سازی سری x کارآمد خواهد بود.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (۲)$$

در تابع فوق β مقیاس، α شکل و γ مبدأ هستند. متغیرهای این تابع نیز با استفاده از روش L-گستاور که در ادامه عنوان شدند محاسبه می‌شوند (Hosking, 1990):

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (۳)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (۴)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (۵)$$

در معادلات بالا، w_0, w_1, w_2 گشتاورهای وزنی احتمال و $\Gamma(\cdot)$ تابع گاما هستند. مقادیر گشتاوری یاد شده از طریق معادله (۶)، قابل محاسبه هستند. در این معادله F_i تابع توزیع تجربی بر حسب شماره ردیف در داده‌های مرتب‌سازی شده صعودی، N تعداد داده‌ها و مقدار s مرتبه گشتاور است که برابر با (۰، ۱ و ۲)، لحاظ می‌شود. با توجه به معادله (۷)، مقدار F با روش تابع تجربی قابل محاسبه است (Hosking, 1990).

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i \quad (۶)$$

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \quad (۷)$$

پس از محاسبه مقادیر پارامترهای توزیع، نیاز است که تابع تجمعی لوگ-لجستیک x نیز محاسبه شود:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (۸)$$

در این مرحله می‌توان مقادیر تجمعی x با توجه به سطوح هم احتمال توزیع لوگ-لجستیک $F(x)$ ، به توزیع هنجار مقیاس‌پذیر، با میانگین صفر و وردایی یک تبدیل نمود. اگر $P = 1 - F(x)$ و $P \leq 0/5$ از معادله (۹) و اگر $P > 0/5$ باشد از معادله (۱۰)، استفاده خواهد شد:

$$W = \sqrt{2 - \ln(P)} \quad (۹)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln(1 - P)} \quad (10)$$

سپس با استفاده از تقریب (Abramowitz & Stegun, 1965)، معادله شاخص SPEI مطابق معادله (۱۱)، خواهد بود و ضرایب ثابت $C_0 = 2/515517$ ، $C_1 = 0/802853$ ، $C_2 = 0/010328$ ، $d_1 = 1/432788$ ، $d_2 = 0/189269$ و $d_3 = 0/001308$ ، اعمال خواهند شد.

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (11)$$

لازم به ذکر است که شاخص SPEI، دارای ویژگی چند مقیاسی است. محاسبه در مقیاس زمانی ۳ ماهه آن می‌تواند بازگوکننده وضعیت خشکسالی فصلی بوده و به ترتیب مقیاس ۱۲ ماهه و ۲۴ ماهه نیز می‌تواند منعکس کننده خشکسالی در مقیاس سالانه و بلند مدت باشند (Tang et al., 2021). بنابر موارد یاد شده در این پژوهش شاخص SPEI، در مقیاس ۱۲ ماهه مورد بررسی قرار گرفت که از SPEI-12، برای نمایندگی آن استفاده گردید.

▪ آزمون روند و جهش من-کندال

آزمون روند من-کندال آزمونی ناپارامتریک است که برای بررسی روند خطی یا غیرخطی سری‌های زمانی مناسب است (Güçlü, 2020). بنابراین از جمله مزیت‌های این آزمون عدم نیاز به فرض نرمال بودن داده‌ها و حساسیت کم آن به شکست‌های ناگهانی ناشی از سری‌های زمانی ناهمگن است (Jaagus, 2006). در این پژوهش برای بررسی آزمون روند و جهش من-کندال به ترتیب نسخه ۲.۲.۱ بسته Kendall و از نسخه ۱.۲ بسته نرم‌افزاری Trendchange زبان برنامه‌نویسی R، استفاده شد. در این بسته یک سری بر اساس رتبه‌های سری اصلی بازآرایی می‌شود. نمودارهای سری‌های پیشرونده^۱ و پسرونده^۲ مطابق با روش (Sneyers, 1991) تولید می‌شوند. نقطه‌ای که این دو سری (پیشرونده و پسرونده) یکدیگر را قطع می‌کنند، می‌توان گفت که نشان‌دهنده نقطه تغییر احتمالی در سری زمانی مدنظر خواهد بود در مواردی نیز که روند مشخصی در داده‌ها وجود نداشته باشد، این سری‌ها در نقاط مختلفی یکدیگر را قطع خواهند کرد. در این پژوهش سری‌های پیشرونده و پسرونده به ترتیب با نمادهای UF و UB مشخص شدند. اگر مقدار UF بیشتر از صفر باشد نمایانگر روند بالاسو و در غیر این صورت روند به سمت پایین خواهد بود. بهتر است به این نکته اشاره شود که تقاطع UF و UB تنها زمانی معنادار است که در محدوده سطوح بحرانی $\alpha = 0/05$ ، که برابر با $\pm 1/96$ است، قرار گیرد. لازم به ذکر است که در این پژوهش برای اطمینان از روند سری‌های زمانی شیب سن^۳ نیز به وسیله نسخه ۱.۱.۶ بسته trend زبان برنامه‌نویسی R، محاسبه شد.

▪ همبستگی پیرسون

روش همبستگی پیرسون، یکی از متداول‌ترین روش‌های بررسی همبستگی میان متغیرهای کمی است. این روش برای بررسی همبستگی خطی میان دو سری زمانی که توزیع هنجار دارند می‌تواند از دقت بالایی برخوردار باشد از همین روی می‌تواند برای بررسی‌های اقلیمی گزینه مناسبی باشد (Marau & Kurths, 2004). در این پژوهش پس از محاسبه همبستگی پیرسون، ماتریس همبستگی میان متغیرهای مورد مطالعه در بازه ۱۲ ماهه شاخص خشکسالی SPEI، محاسبه و ترسیم شد. لازم به ذکر است که در این ماتریس صرفاً همبستگی‌هایی درج شدند که دارای سطح معناداری $0/05$ و بالاتر از آن بودند.

▪ تحلیل موجک

غالباً روش‌های ریاضی سنتی که دوره‌های تناوب فرکانسی را بررسی می‌کنند، مانند تحلیل فوریه، به طور ضمنی فرض را بر این مینمایند که فرآیندهای زیربنایی در مقیاس زمان ایستا^۴ هستند. در حالی که، تبدیلات موجک به واسطه آن که سری‌های زمانی را به فضای زمان-فرکانس گسترش می‌دهند، می‌توانند دوره‌های تناوب، گذرا و متناوب را شناسایی کنند. به طور کل تبدیلات موجک در دو دسته قرار دارند: تبدیل موجک پیوسته^۵ (CWT) و معادل گسسته آن، یعنی تبدیل موجک گسسته^۶ (DWT). DWT، به طور

1. Prograde
2. Retrograde
3. Sen's slope

4. Stationary
5. Continuous Wavelet Transform (CWT)
6. Discrete Wavelet Transform (DWT)

ویژه برای کاهش نویز و فشرده‌سازی داده‌ها مفید است، در حالی که CWT، برای استخراج ویژگی‌ها مناسب‌تر است. همچنین از آنجا که اغلب سری‌های زمانی مرتبط با علوم زمین^۱، از توزیع هنجار پیروی نمی‌کنند استفاده از این روش، توصیه می‌شود. در ادامه از تلاقی دو تبدیل موجک پیوسته، تبدیل موجک متقاطع (XWT)، ایجاد می‌شود که قدرت مشترک فاز نسبی آن‌ها را در بعد زمان-فرکانس آشکار می‌کند. علاوه بر موارد یاد شده، همدوسی موجک^۲ (WTC) می‌تواند همدوسی معناداری را حتی در شرایطی که قدرت مشترک میان دو تبدیل موجک پیوسته پایین است، شناسایی کند (Grinsted et al., 2004). این نکته نیز قابل ذکر است که موجک متقاطع اجازه می‌دهد تا فرکانس‌های مختلف میان دو سری زمانی فیلتر شوند و همچنین اجازه عبور سیگنال‌های فرکانسی که در هر دو سری زمانی مشابه هستند را نیز می‌دهد. با توجه به موارد یاد شد در این پژوهش از نسخه ۱.۱ بسته WaveletComp، زبان برنامه نویسی R، در محیط توسعه یکپارچه^۳ RStudio، استفاده شد. WaveletComp توانایی تحلیل سری‌های زمانی تک متغیره^۴ و دو متغیره^۵ را با استفاده از موجک مورلت دارا است. به هر روی در WaveletComp موجک مورلت شامل جز اصلی به نام موجک مادر^۶ است که به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega t} + e^{-t^2/2} \quad (12)$$

در معادله فوق ω فرکانس زاویه‌ای موجک یا نرخ چرخش برحسب رادیان بر واحد زمان و t ، متغیر زمان هستند. $\omega = 6$ ، مقداردهی می‌شود؛ چرا که موجک مورلت را تقریباً به شکل تحلیلی، حل‌پذیر می‌کند و نوسانی برابر با 2π (رادیان) دارد. بنابراین، دوره تناوب (یا معکوس فرکانس) که برحسب واحدهای زمان اندازه‌گیری می‌شود، برابر با $2\pi/6$ است.

$$Wave(\tau, s) = \sum_t x_t \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) \quad (13)$$

در معادله فوق x_t ، سری زمانی، τ انتقال زمانی (موقعیت مرکز موجک در محور زمان)، s مقیاس و ψ^* مزدوج مختلط موجک مادر است. در تبدیل موجک مورلت، سری زمانی x_t به صورت درهم‌پیچی^۷ از موجک‌های دختر^۸ تولید می‌شود که این موجک‌ها از طریق انتقال زمانی τ و تنظیم مقیاس s از موجک مادر استخراج می‌شوند که هر چه فرکانس پایین‌تر باشد مقدار مقیاس s بیشتر خواهد شد. لازم به ذکر است که برای حفظ قدرت موجک در مقیاس‌های مختلف از $\frac{1}{\sqrt{s}}$ استفاده می‌شود. استفاده از مزدوج مختلط ψ^* نیز امکان محاسبه دقیق حاصل ضرب داخلی را فراهم می‌آورد که در سنجش همبستگی میان سیگنال و موجک مؤثر است. موقعیت موجک دختر در محدوده زمان، توسط مکان پارامتر زمانی τ تعیین می‌شود به نحوی که با افزایش زمانی معادل Δt جابه‌جا شده است. مجذور دامنه نیز به عنوان چگالی انرژی موجک زمانی-فرکانسی (زمانی-دوره‌ای) تفسیر می‌شود که تحت عنوان طیف توان موجک^۹ شناخته می‌شود (Carmona et al., 1998).

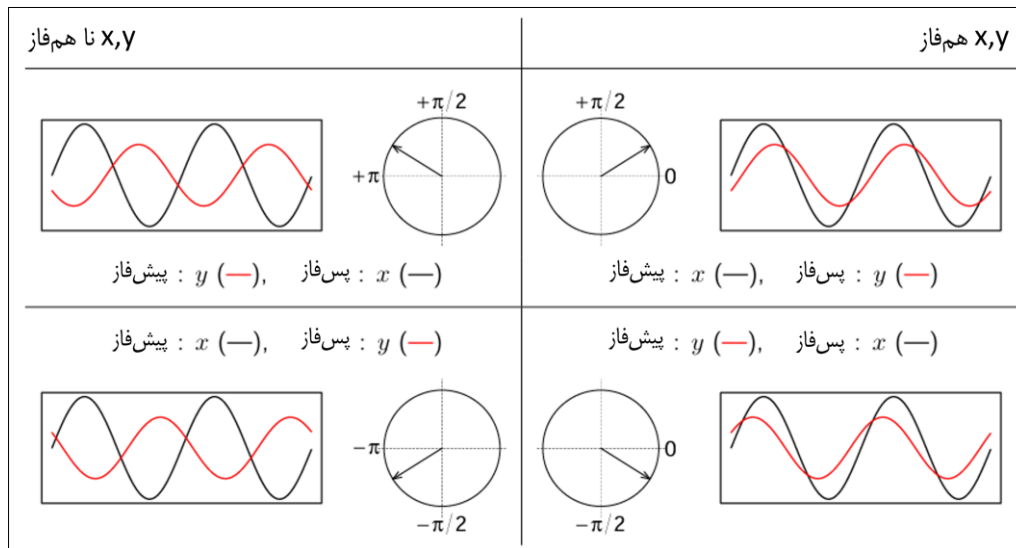
$$Power(\tau, s) = \frac{1}{s} |Wave(\tau, s)|^2 \quad (14)$$

به طور کلی WaveletComp طیف توان موجک (موجک متقاطع) را مطابق با (Liu et al., 2007)، در حالت تک‌متغیره و طبق رهنمود (Veleda et al., 2012)، در حالت دو متغیره تصحیح می‌کند تا از نتایج سوگیرانه در حدگذاری و برآورد فرکانس‌های بالا، یا به عبارتی در برآورد تغییرپذیری با دوره‌های کوتاه در سری‌های زمانی، جلوگیری شود که در معادله (۱۴) به آن اشاره شده است. در مورد نویز سفید^{۱۰}، همان‌گونه که در معادله (۱۴) عنوان شده است انتظارات آن در هر زمان و مقیاس معادل واریانس سری (با ضریب تناسب $\frac{1}{s}$ در این نسخه اصلاح‌شده از توان موجک) است. WaveletComp توان طیف موجک (موجک متقاطع) را بر اساس تحقیق (Veleda et al., 2012) اصلاح می‌کند. علاوه بر این، گزینه‌های پیاده‌سازی شده برای تعدیل در دوره زمانی و یا جهت، به منظور

1. Geophysical
2. Wavelet Coherence (WTC)
3. Integrated Development Environment (IDE)
4. Univariate
5. Bivariate

6. Mother wavelet
7. Convolution
8. Wavelet daughters
9. Wavelet power spectrum
10. White noise

انجام محاسبه با استفاده از روش موجک‌های همدوسی^۱ به همراه مضارب آن، ضروری هستند (Liu, 1994). علاوه بر این، این بسته R قادر است روابط هم‌فاز و ناهم‌فاز میان دو سری را در نمودارهای طیف توان موجک متقاطع با روی هم قرار دادن فلش‌ها و خطوط کانتور نشان دهد؛ پیکان‌ها^۲، که از اختلاف فازهای محلی محاسبه می‌شوند، نشان می‌دهند که آیا سری‌ها به صورت هم‌زمان (هم‌فاز) یا از طریق جهت‌گیری و بزرگی آن‌ها آشکار می‌کنند که مخالف (غیر هم‌فاز) است یا آن که مخالف (غیر هم‌فاز) است (بیشتر از $\pi/2$ است) حرکت می‌کنند و روابط پیش‌فاز-پس‌فاز^۳ را از طریق جهت‌گیری و بزرگی آن‌ها آشکار می‌کنند که شرح آن در شکل ۲ نمایش داده شده است، در حالی که خطوط پربند^۴ بر اساس آزمایش‌های شبیه‌سازی، مناطقی از تناوب مشترک معنی‌دار از نظر آماری را مشخص می‌کنند. علاوه بر این محدوده مخروط تأثیر^۵ نیز نمایانگر منطقه اثرات لبه^۶ است (Rösch & Schmidbauer, 2018) که در این مطالعه این محدوده در نمودارهای مربوطه به رنگ سفید شفاف نمایانگر شده است.



شکل ۲. محدوده اختلاف فازهای ممکن و نحوه تفسیر آن‌ها میان دو سری زمانی (Rösch & Schmidbauer, 2018).

۳- یافته‌ها

۳-۱- آزمون روند سری زمانی و جهش من-کندال SPEI-12

همانگونه که در جدول ۱ و شکل ۲، ملاحظه می‌شود مقادیر حدی و روند تغییرات شاخص معیار شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) در مقیاس ۱۲ ماهه در ۳۱ ایستگاه همدیدی ایران مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش تحلیل روند تغییرات با استفاده از آزمون من-کندال و شیب سن، جدول ۱ مشخص گردید که بجز ایستگاه شهرکرد که روند صعودی داشته است، سایر ایستگاه‌ها روندی کاهشی و معناداری را تجربه کرده‌اند. بر این اساس، به ترتیب ایستگاه‌های یزد، بم، کرمان، تبریز، و زاهدان بیشترین روند کاهشی را داشته‌اند. نتایج تحلیل مقادیر حدی (شکل ۲)، نیز نشان می‌دهد که کمینه‌های SPEI-12 به ترتیب در ایستگاه‌های بوشهر (فرودگاه)، بندرعباس، اراک، آبادان و ارومیه رخ داده‌اند. از سوی دیگر، بیشینه‌های SPEI-12 در ایستگاه‌های بوشهر (فرودگاه)، اصفهان، کرمانشاه، تربت‌حیدریه، و خوی ثبت شده‌اند.

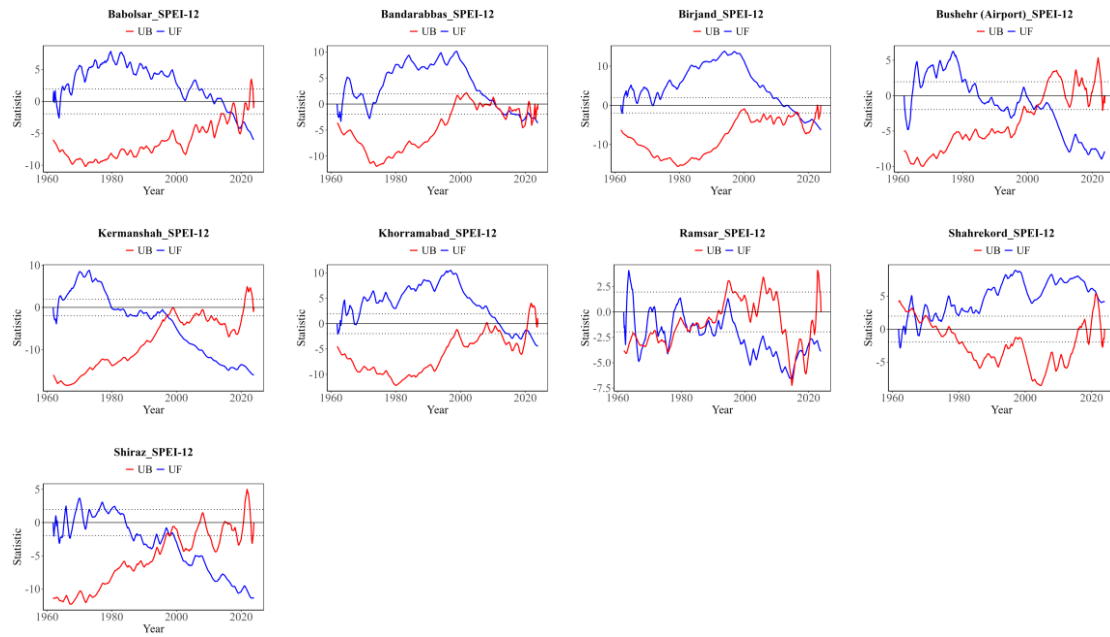
1. Coherence wavelets
2. Arrows
3. Lead-lag

4. Contour lines
5. Cone of influence
6. Edge effects

جدول ۱. مقادیر کمینه و بیشینه SPEI-12 و نتایج بررسی روند (من-کندال و شیب سن)

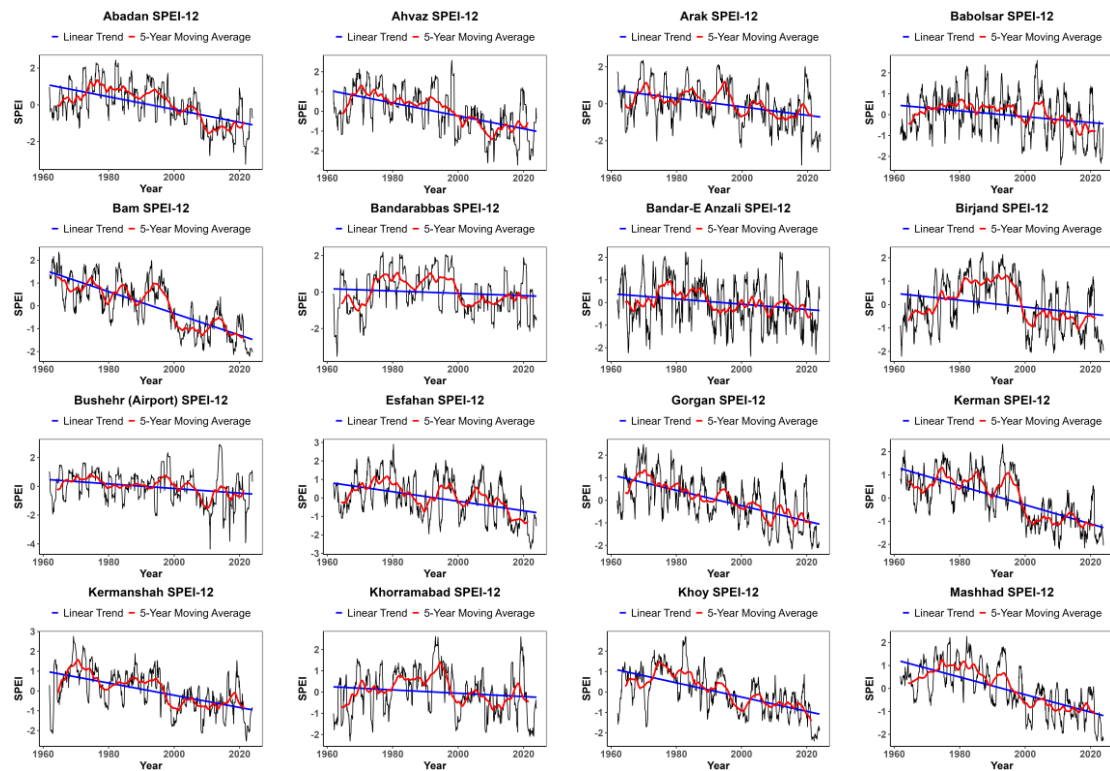
ایستگاه	MK_Tau	MK_P-value	Sen_Slope	Sen_P-value	کمینه	بیشینه
آبادان	-0.3733	<0.001	-0.00297	<0.001	-3.233	2.429
اهواز	-0.3629	<0.001	-0.00283	<0.001	-2.724	2.574
اراک	-0.2552	<0.001	-0.00195	<0.001	-3.324	2.348
بابلسر	-0.1468	<0.001	-0.00113	<0.001	-2.419	2.598
بیم	-0.5594	<0.001	-0.00404	<0.001	-2.210	2.355
بندر انزلی	-0.1475	<0.001	-0.00107	<0.001	-2.377	2.229
بندرعباس	-0.0896	<0.001	-0.00077	<0.001	-3.523	2.191
بیرجند	-0.1544	<0.001	-0.00125	<0.001	-2.211	2.241
بوشهر (فرودگاه)	-0.1931	<0.001	-0.00149	<0.001	-4.361	2.914
اصفهان	-0.2699	<0.001	-0.00215	<0.001	-2.769	2.897
گرگان	-0.4097	<0.001	-0.00302	<0.001	-2.163	2.479
کرمان	-0.4794	<0.001	-0.00348	<0.001	-2.203	2.316
کرمانشاه	-0.3934	<0.001	-0.00287	<0.001	-2.530	2.753
خرم‌آباد	-0.1095	<0.001	-0.00089	<0.001	-2.308	2.620
خوی	-0.4357	<0.001	-0.00314	<0.001	-2.406	2.722
مشهد	-0.4482	<0.001	-0.00316	<0.001	-2.294	2.267
ارومیه	-0.2066	<0.001	-0.00165	<0.001	-2.992	2.176
قزوین	-0.1350	<0.001	-0.00108	<0.001	-2.209	2.230
رامسر	-0.0938	<0.001	-0.00073	<0.001	-2.518	2.109
رشت	-0.2211	<0.001	-0.00163	<0.001	-2.734	2.265
سبزوار	-0.3984	<0.001	-0.00303	<0.001	-2.131	2.610
سنندج	-0.4109	<0.001	-0.00301	<0.001	-2.350	2.411
شاهرود	-0.4196	<0.001	-0.00310	<0.001	-2.354	2.455
شهرکرد	0.1005	<0.001	0.00077	<0.001	-2.183	2.370
شیراز	-0.2798	<0.001	-0.00208	<0.001	-2.319	2.197
تبریز	-0.4537	<0.001	-0.00323	<0.001	-2.585	2.371
تهران (فرودگاه مهرآباد)	-0.3069	<0.001	-0.00244	<0.001	-2.159	2.627
تربت حیدریه	-0.1972	<0.001	-0.00152	<0.001	-2.349	2.753
یزد	-0.5762	<0.001	-0.00416	<0.001	-2.162	2.176
زاهدان	-0.4513	<0.001	-0.00332	<0.001	-2.223	2.254
زنجان	-0.2857	<0.001	-0.00215	<0.001	-2.411	2.664

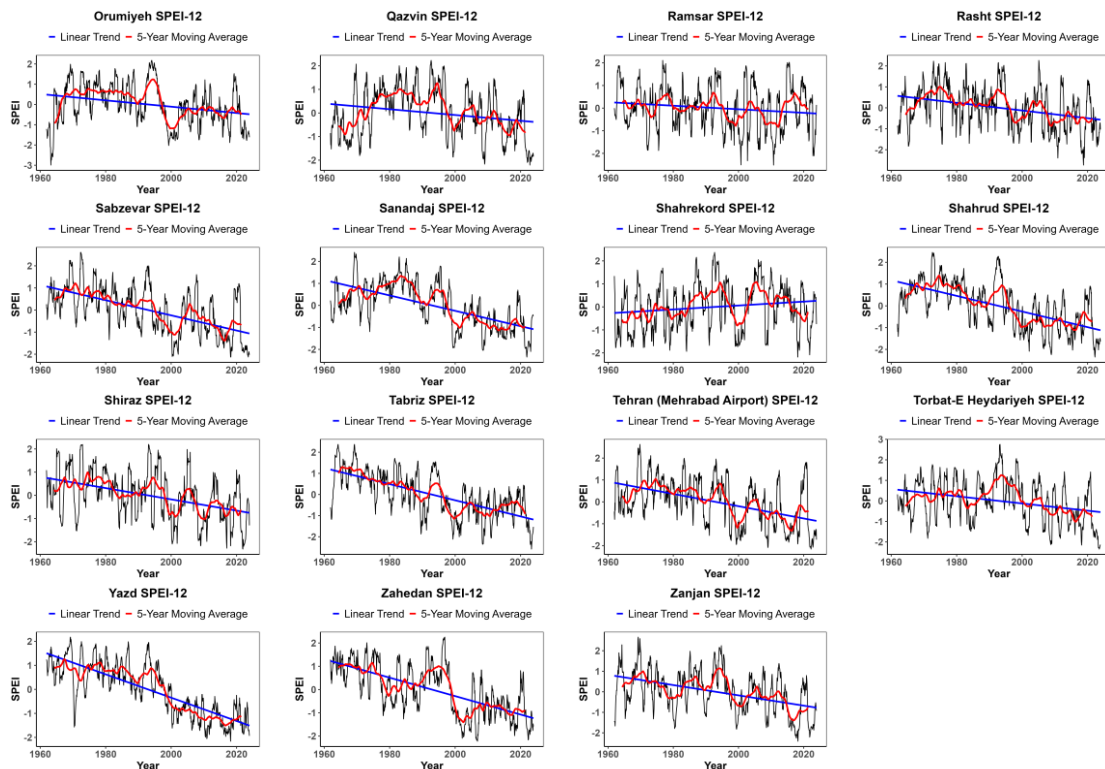
در ادامه با توجه به نمودارهای آزمون جهش من-کندال ارائه شده در شکل ۳، مشخص می‌شود که خطوط پیشروند و پسرونده تنها در ۹ ایستگاه مورد بررسی در محدوده معناداری $\pm 1/96$ قرار دارند. در میان این ایستگاه‌ها، تنها ایستگاه شهرکرد دارای جهش روند صعودی است که تقریباً شامل سال ۱۹۷۰ گردیده است؛ در حالی که سایر ایستگاه‌ها الگوی جهش نزولی معنادار را نشان می‌دهند. تاریخ وقوع جهش‌ها به ترتیب به این شرح است: رامسر در سال ۱۹۸۵، کرمانشاه در سال ۱۹۹۵، شیراز در سال ۱۹۹۸، بوشهر (فرودگاه) در سال ۲۰۰۱، بندرعباس که در سال‌های متوالی ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۹ جهش نزولی معنادار داشته است، بیرجند در سال ۲۰۱۱، بابلسر در سال ۲۰۱۴ و نهایتاً خرم‌آباد در حدود سال ۲۰۲۰ که مطابق با آزمون جهش من-کندال تغییر روند نزولی را ثبت کرده است.



شکل ۳. نمودارهای آزمون جهش من-کندال شاخص SPEI-12، در ۳۱ ایستگاه منتخب.

همانگونه که در نمودارهای سری زمانی نوسانات شاخص SPEI شکل (۴)، قابل مشاهده است، می‌توان این چنین عنوان نمود که در اغلب ایستگاه‌های منتخب روند کلی نزولی در شاخص‌های خشکسالی رخ داده است و صرفاً در ایستگاه شهرکرد می‌توان شاهد روند صعودی ناچیز بود. بیشترین روند نزولی را می‌توان به ترتیب در ایستگاه‌های یزد، بم، کرمان، مشهد، تبریز و زاهدان مشاهده نمود، این در حالی است که در ایستگاه‌های بندرعباس، خرم‌آباد، رامسر، بندر انزلی و قزوین این روند نزولی ناچیز است.





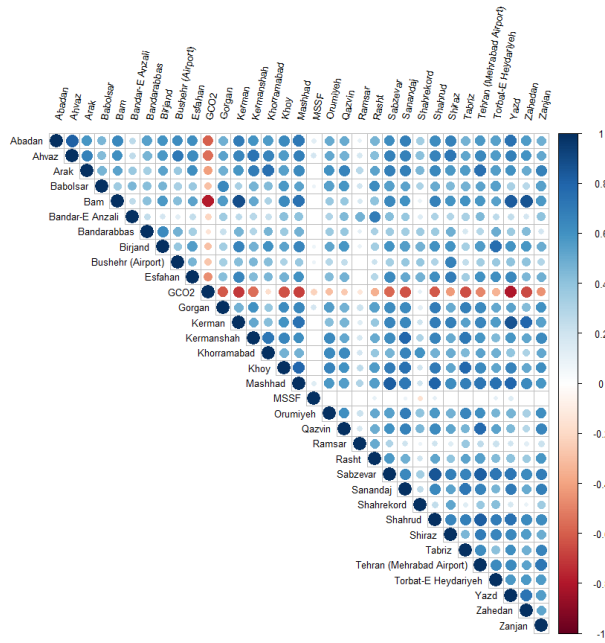
شکل ۴. نمودارهای سری زمانی شاخص SPEI-۱۲، در ۳۱ ایستگاه منتخب.

۳-۲- همبستگی میان شاخص SPEI-12 با GCO_2 و MSSF

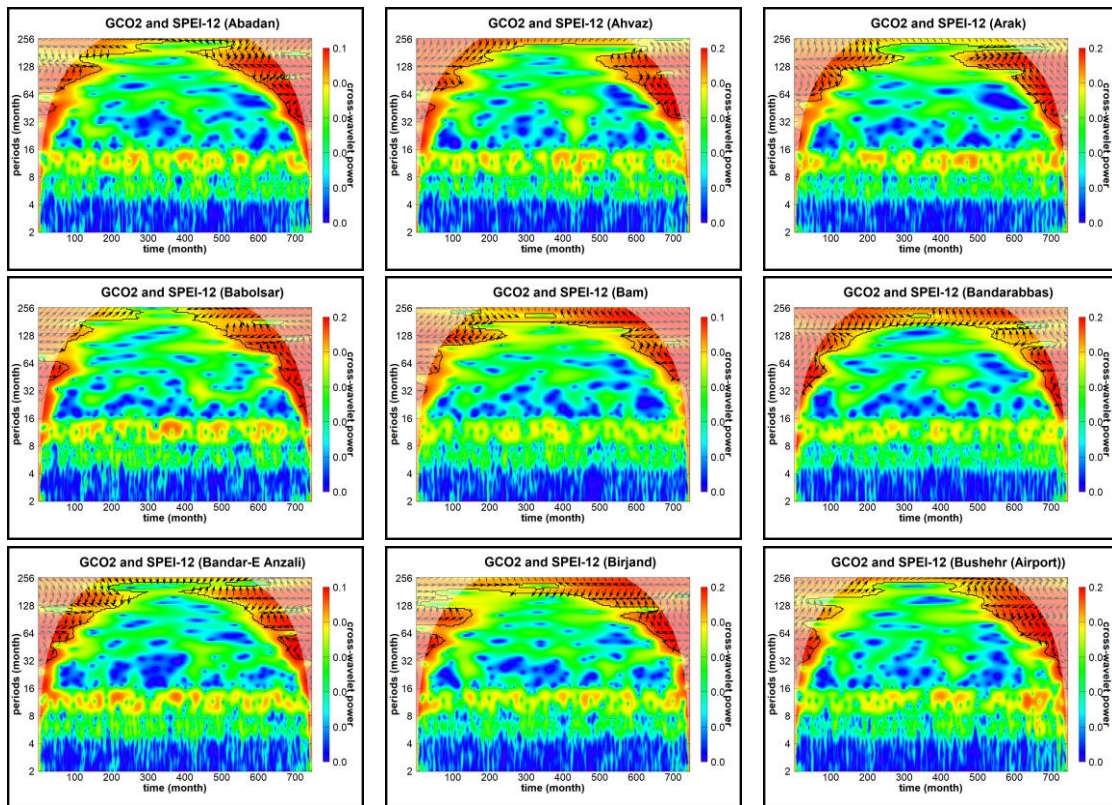
مطابق با شکل ۵ که نمایانگر همبستگی پیرسون میان متغیرهای مورد مطالعه در این پژوهش است، این گونه می‌توان عنوان کرد که غلظت ماهانه جهانی گاز دی اکسید کربن در بیشتر موارد توانسته است همبستگی معکوسی را با محدوده ۱۲ ماهه شاخص SPEI-12، داشته باشد که در میان ایستگاه‌های منتخب، به ترتیب ایستگاه‌های بم، یزد، کرمان، مشهد، خوی، تبریز، زاهدان و شاهرود قابل تصور است. نکته قابل توجه عدم وجود همبستگی قوی با درجه اهمیت بالا میان MSSF با شاخص یاد شده است، اگرچه برخی از ایستگاه‌ها نظیر آبادان، اهواز و گرگان همبستگی‌های خفیفی قابل مشاهده است؛ اما در مقایسه با GCO_2 ، این نوع از همبستگی ضعیف‌تر است.

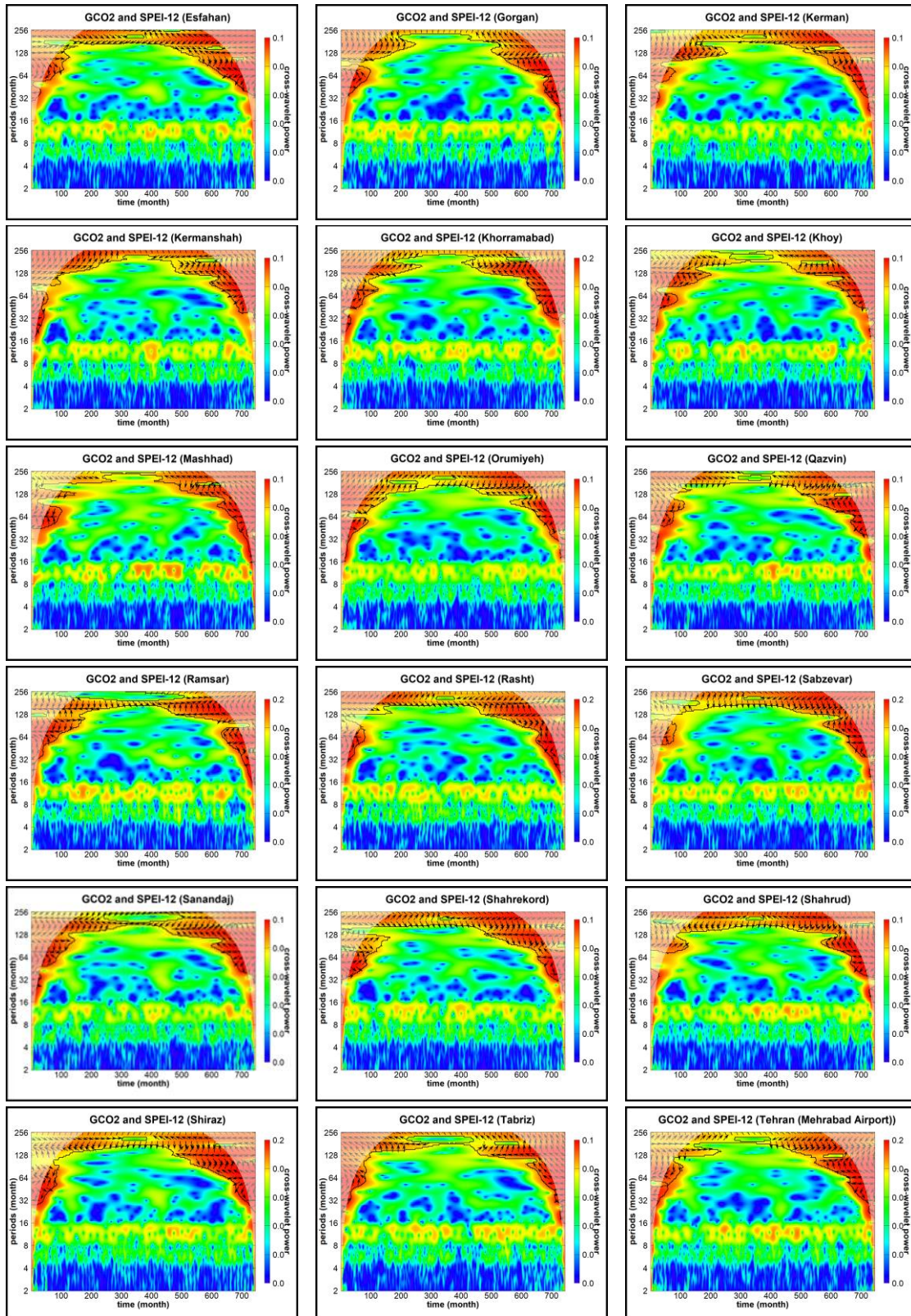
۳-۳- تحلیل موجک متقاطع میان شاخص SPEI-12 با GCO_2

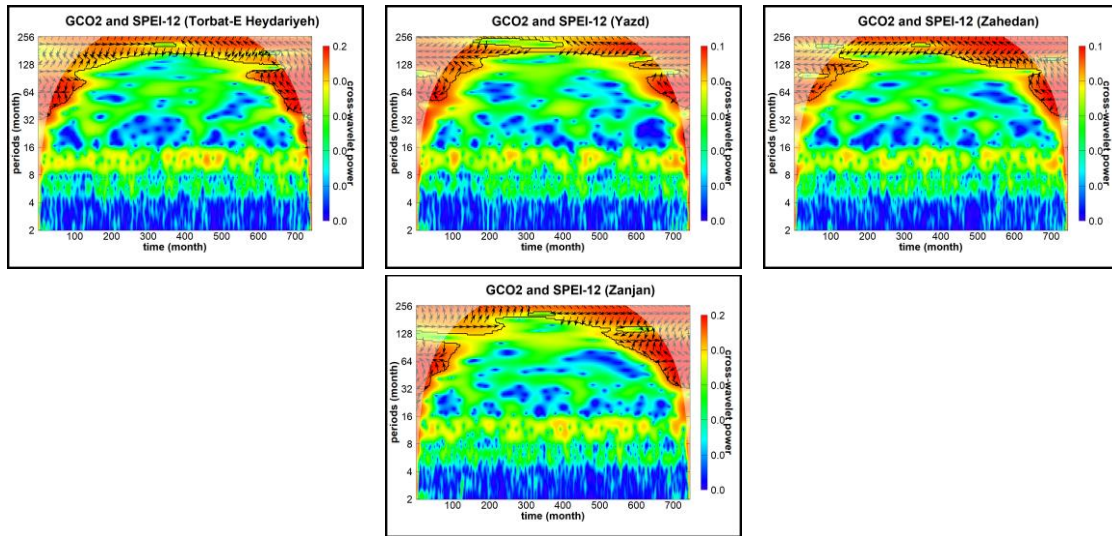
همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، موجک متقاطع از ترکیب دو فرکانس موجک پیوسته ایجاد می‌شود و همین امر این اجازه را می‌دهد تا این دو فرکانس از نظر هم‌فاز یا ناهم‌فاز بودن بررسی شوند؛ لذا در شکل (۶)، به تحلیل موجک متقاطع میان GCO_2 و SPEI-12، پرداخته می‌شود. با توجه به نمودارهای مندرج در شکل مذکور، می‌توان اظهار داشت که قدرت سیگنال میان این دو پدیده ناچیز بوده و مقدار بیشینه آن در تمامی ایستگاه‌های منتخب، ۰/۱ یا ۰/۲ است. اگرچه این قدرت سیگنالی ناچیز است؛ اما در تمامی ایستگاه‌ها چرخه سیگنال‌ها در دوره ۳۲ تا ۱۲۸ ماهه ($\approx 2/67$ تا $10/67$ سال) و در ایستگاه‌های بم، کرمان، سبزوار، شاهرود، تربت حیدریه، یزد، زاهدان و زنجان چرخه‌های ناهم‌فاز تا دوره ۲۵۶ ماهه ($\approx 21/33$ سال) نیز گسترش دارد و البته یک چرخه هم‌فاز ۱۲۸ ماهه در ایستگاه رامسر در محدوده ماه‌های ۴۰۰ ام تا ۶۰۰ ام (≈ 1995 تا 2010)، به عبارتی تقریباً در ۱۶ سال قابل رؤیت است. این ناهم‌فازی‌ها برای دوره ۳۲ تا ۶۴ ($\approx 5/33$ سال) ماهه در ایستگاه‌های منتخب غالباً در حدود ماه‌های ۶۰۰ ام (≈ 2010) تا آخرین ماه‌ها در اوج قدرت خود قرار دارند و اگر این بازه را گسترده‌تر در نظر بگیریم، در دوره بازگشت ۳۲ ماهه تا ۱۲۸ ماهه ($\approx 2/67$ تا $10/67$ سال) این قدرت سیگنال کمتر شده و در عین حال بازه زمانی گسترده‌تری را از حدود ماه ۵۰۰ ام (\approx سال ۲۰۰۲) تا آخرین ماه‌ها را شامل می‌شود.



شکل ۵. ماتریس همبستگی پیرسون میان شاخص SPEI-12 در ۳۱ ایستگاه منتخب با غلظت جهانی گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن و فراوانی لکه‌های خورشیدی.

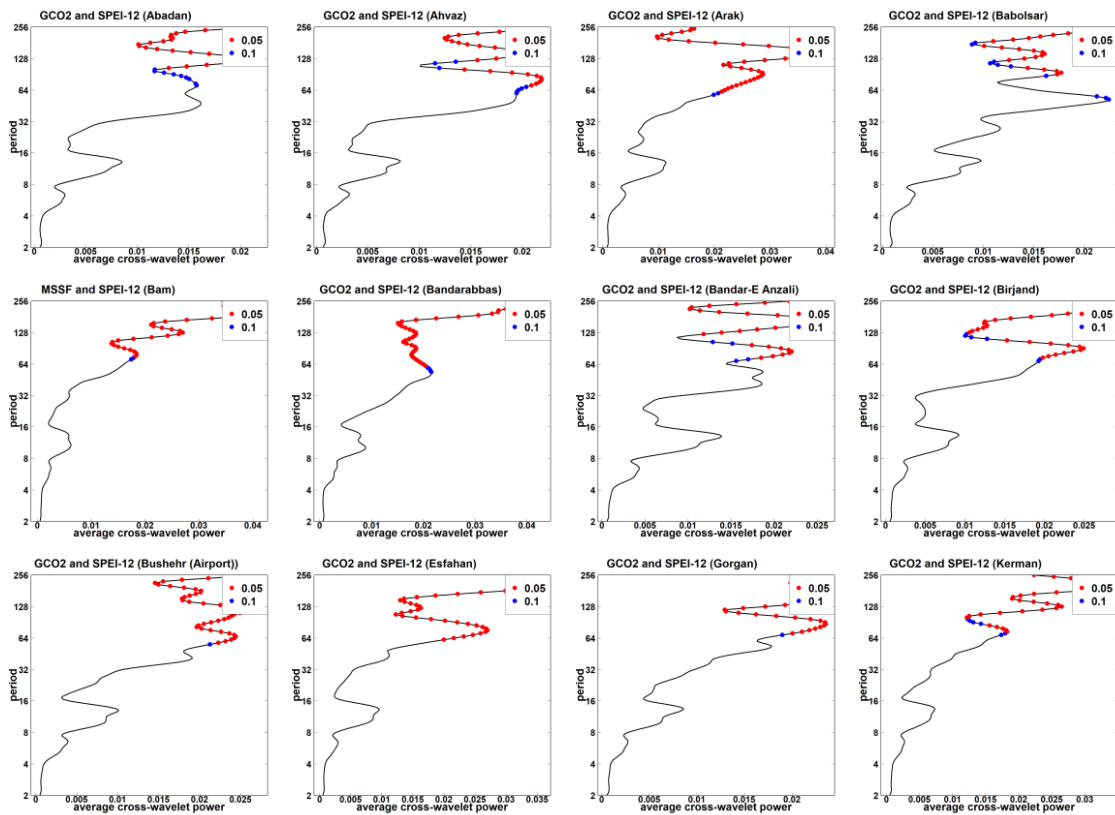


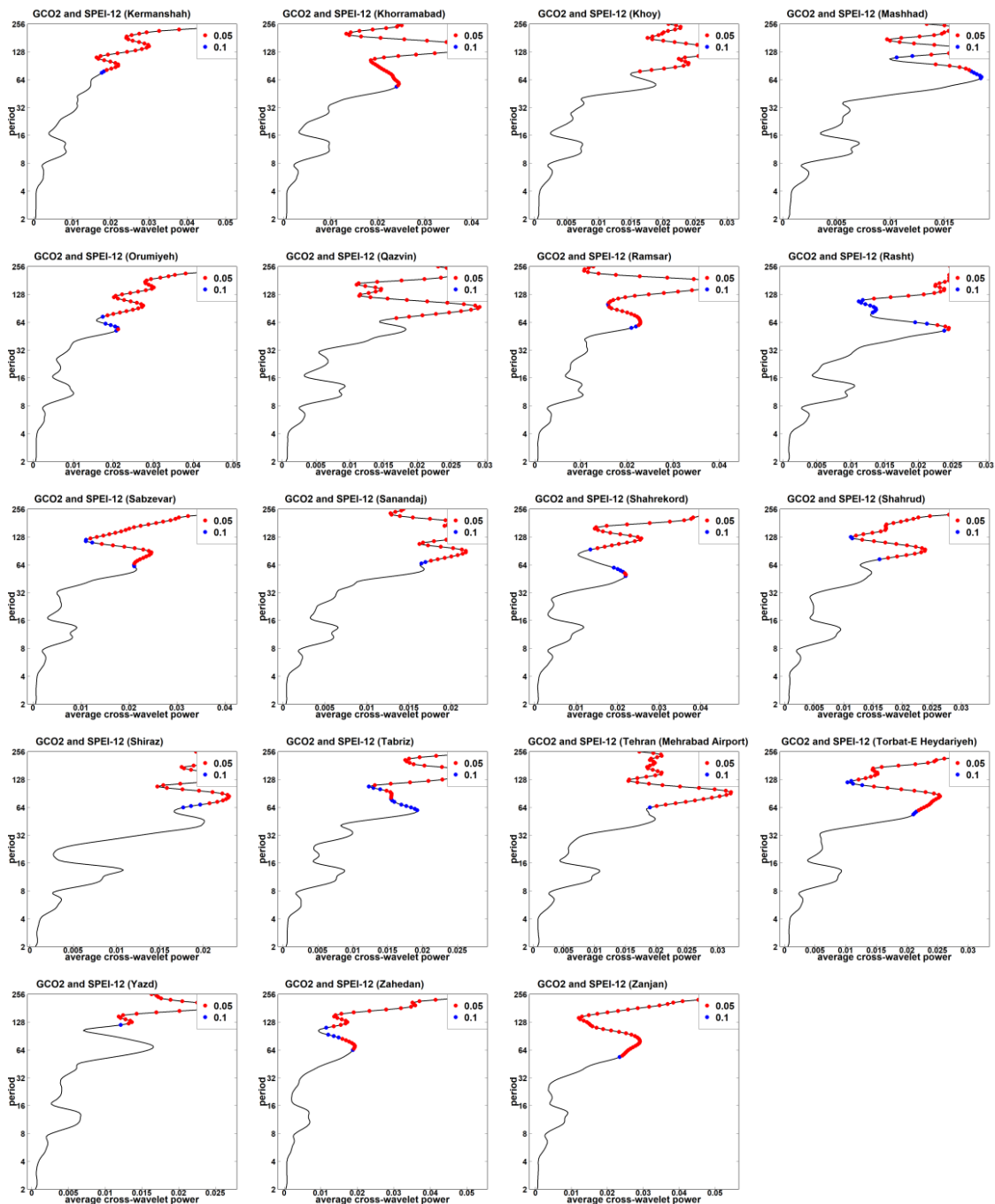




شکل ۶. طیف توان موجک متقاطع میان GCO₂ و SPEI-12 در ۳۱ ایستگاه منتخب.

در ادامه به بررسی میانگین توان موجک متقاطع میان پدیده‌های ذکر شده پرداخته می‌شود که نمودارهای مربوط به هریک از ایستگاه‌های منتخب در شکل (۷)، درج شدند. در این نمودارها میزان معناداری میانگین توان هر چرخه در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۱ یا به بیان دیگر، میزان معناداری به ترتیب ۹۵ و ۹۰ درصدی آن‌ها قابل ملاحظه است. اگرچه میانگین توان موجک میان دو پدیده یاد شده در تمامی ایستگاه‌های منتخب بسیار خفیف است؛ اما چرخه‌های دارای معناداری ۰/۰۵ عموماً ۶۴ تا ۲۵۶ ماهه ($\approx 5/33$ تا $21/33$ سال) هستند و چرخه‌های ۱۲۸ تا ۲۵۶ ماهه ($\approx 10/67$ تا $21/33$ سال) در این سطح از معناداری با افزایش میزان میانگین توان موجک همراه است.



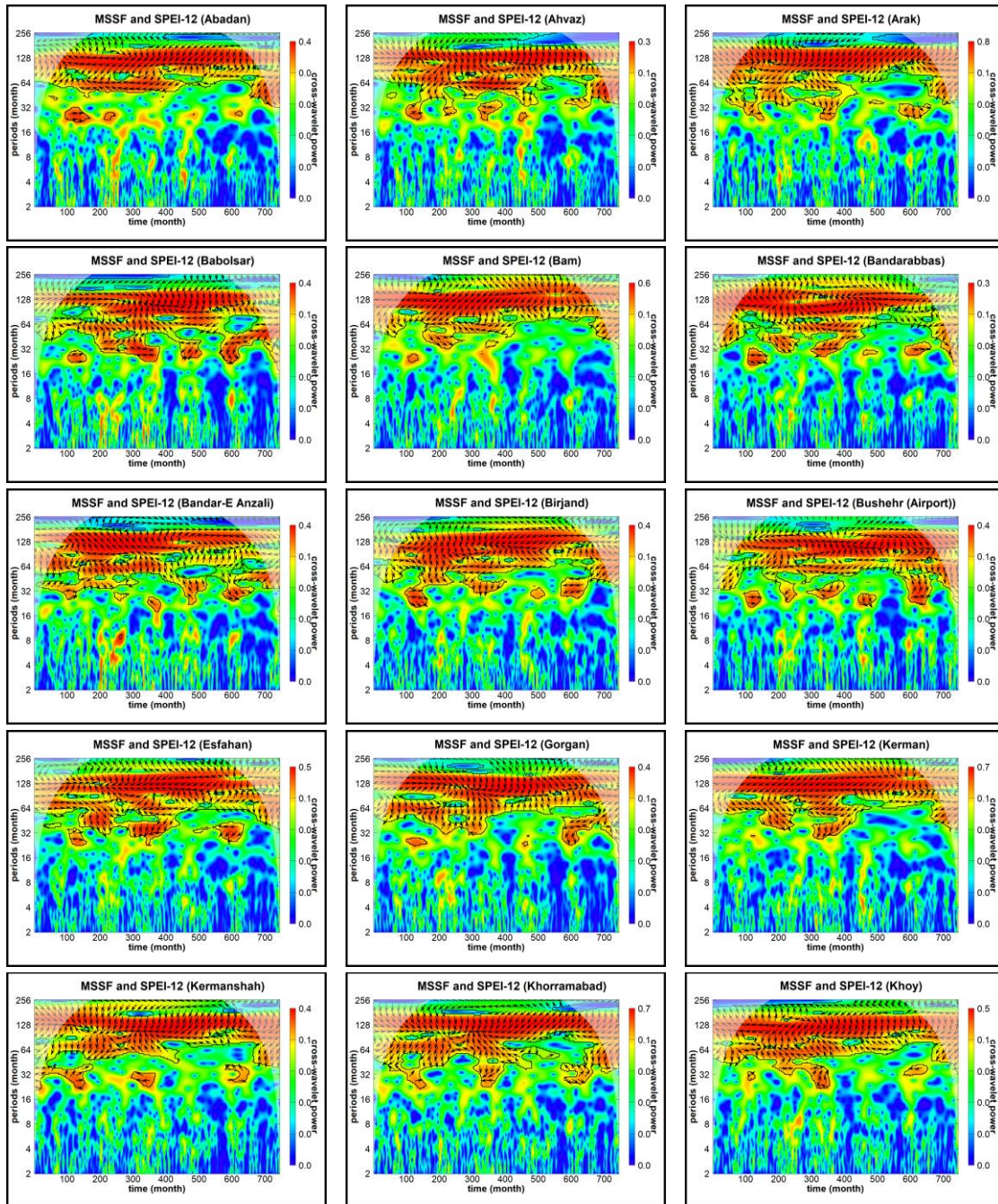


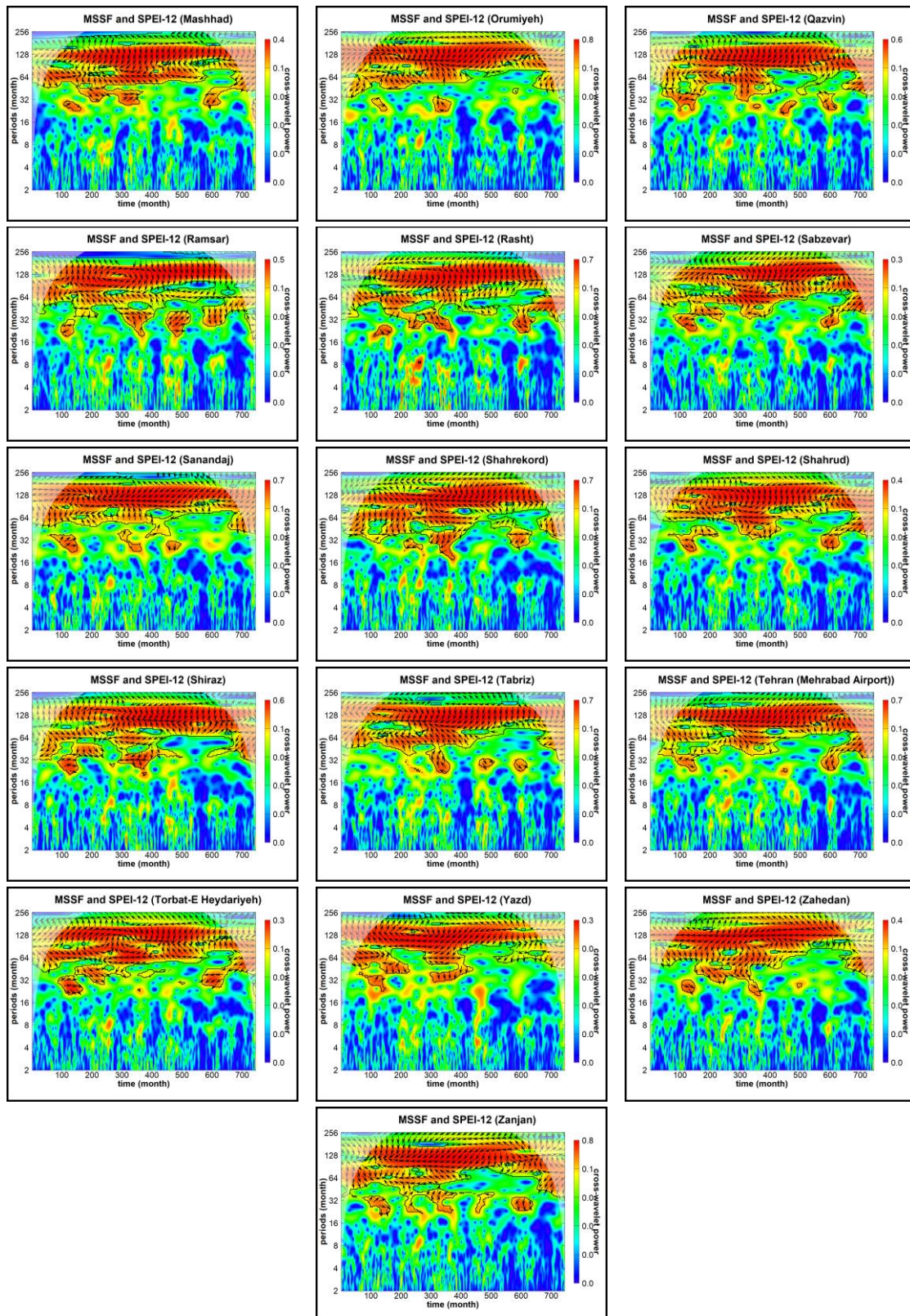
شکل ۷. میانگین توان موجک متقاطع میان GCO_2 با SPEI-12 در ۳۱ ایستگاه مورد مطالعه.

۳-۴- تحلیل موجک متقاطع میان شاخص SPEI-12 با MSSF

در ادامه و با توجه به اهداف این پژوهش به بررسی موجک متقاطع میان SPEI-12 با فراوانی ماهانه لکه‌های خورشیدی پرداخته می‌شود که در شکل ۸، نمودارهای مربوط به آن قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل مذکور می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در مقایسه با شکل ۵، ارتباط به مراتب قوی‌تری وجود دارد و البته مشابه با آن در کلیه ایستگاه‌های منتخب ناهم‌فازی در سیگنال‌ها از وضوح بیشتری برخوردار است. این امر بیشتر در چرخه ۶۴ تا ۱۲۸ ماهه ($\approx 5/33$ تا $10/67$ سال) و به طور خاص در چرخه ۱۲۸ ماهه ($\approx 10/67$ سال) و در بازه زمانی حدود ماه‌های ۲۰۰ تا ۶۰۰ ام (≈ 1977 تا ۲۰۱۰) مشهود است؛ اما در ایستگاه‌های آبادان، بم، یزد و زاهدان این بازه از ماه ۱۰۰ (≈ 1969) تا انتهای دروه زمانی نیز قابل تفسیر است. البته به طور مقطعی و خفیف در بازه

۳۲ تا ۶۴ ماهه ($\approx 2/67$ تا $5/33$ سال) نیز می‌توان این ناهم‌فازی را مشاهده کرد. همچنین می‌توان هم‌فاز بودن دو سیگنال را در چرخه ۳۲ ماهه ($\approx 2/67$ سال) و در حدود بازه ماه‌های ۱۰۰ ام تا ۲۰۰ ام (≈ 1969 تا 1977) را در ایستگاه‌های: آبادان، اهواز، اصفهان، بابلسر، بندرعباس، بیرجند، بوشهر (فرودگاه)، گرگان، کرمانشاه، مشهد، سبزوار، سنندج، شاهرود، شیراز، تربت حیدریه، زاهدان و زنجان نیز به طور مقطعی مشاهده کرد. در مجموع بیشترین سطح توان موجک متقاطع در ایستگاه‌های اراک، ارومیه و زنجان به میزان $0/8$ و کمترین حد آن در ایستگاه‌های اهواز، بندر عباس، سبزوار، تربت حیدریه و یزد به میزان $0/3$ قابل ملاحظه است.

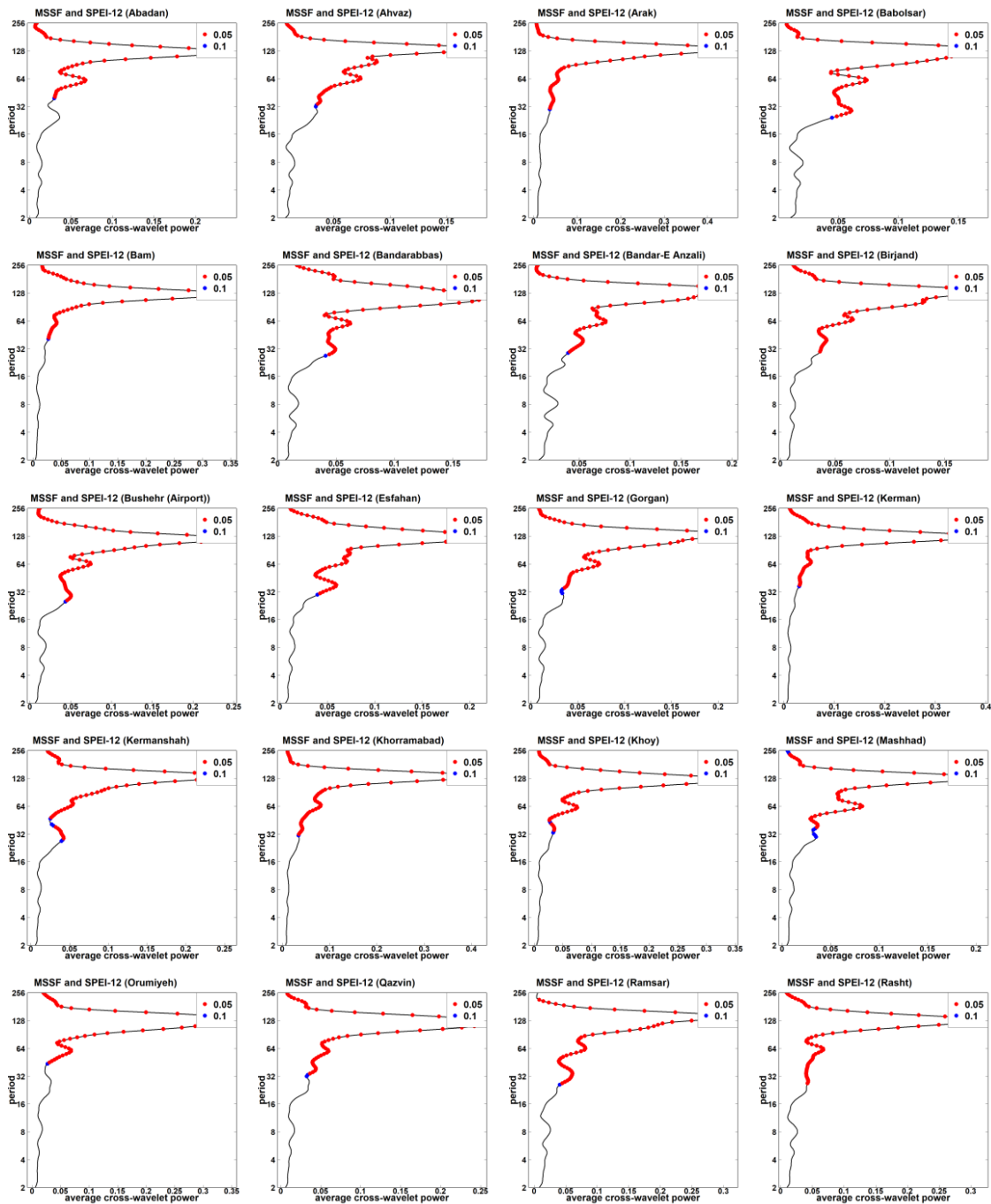


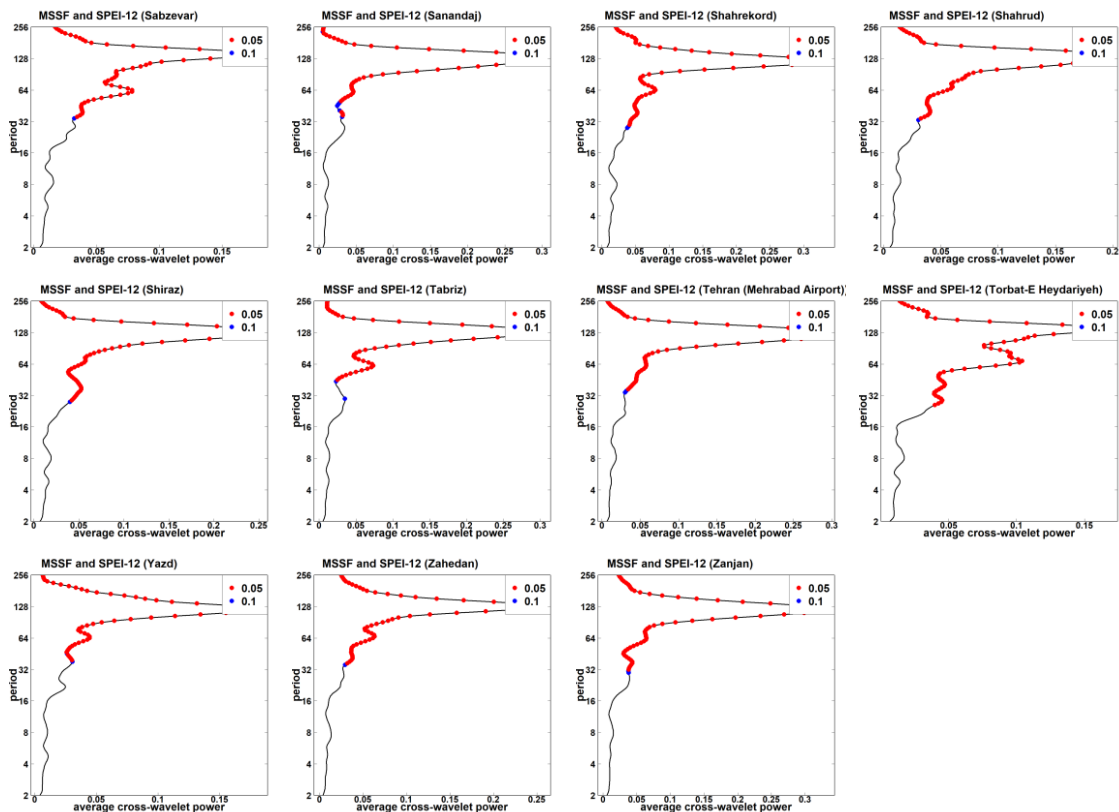


شکل ۸. طیف توان موجک متقاطع میان MSSF و SPEI-12 در ۳۱ ایستگاه منتخب.

در ادامه بررسی موجک متقاطع میان فراوانی MSSF و SPEI-12، به تحلیل میانگین توان این موجکی پرداخته می‌شود؛ بنابراین در شکل ۹، نمودارهای مربوط به میانگین توان قرارگرفته‌اند که با توجه به آن‌ها اینچنین می‌توان عنوان کرد که اغلب چرخه‌ها در

دوره ۳۲ تا حدود ۶۴ ماهه ($\approx ۲/۶۷$ تا $۵/۳۳$ سال)، ۶۴ تا حدود ۱۲۸ ماهه ($\approx ۵/۳۳$ تا $۱۰/۶۷$ سال) و فراتر از چرخه ۱۲۸ ماهه تا ۲۵۶ ماهه ($\approx ۱۰/۶۷$ تا $۲۱/۳۳$ سال) قابل ملاحظه هستند و در سطح معناداری ۰/۰۵ قرار دارند. در مجموع قدرتمندترین این چرخه‌ها فراتر از چرخه ۶۴ ماهه ($\approx ۵/۳۳$ سال) و نزدیک به محدوده ۱۲۸ ماهه ($\approx ۱۰/۶۷$ سال) به وقوع پیوسته‌اند که اوج آن نیز در محدوده چرخه ۱۲۸ ماهه مشهود است.





شکل ۹. میانگین توان موجک متقاطع میان MSSF و SPEI-12 در ۳۱ ایستگاه منتخب.

۴- بحث و نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که خشکسالی به عنوان یک پدیده اقلیمی با نوسانات بالا و طولانی‌مدت، تأثیرات گسترده‌ای بر ابعاد اقتصادی و توسعه اجتماعی دارد. این مطالعه با بررسی شاخص بارش-تبخیر و تعرق معیار شده (SPEI) در ۳۱ ایستگاه همدیدی ایران طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۳، روندهای معنادار و نقاط جهش را در این شاخص آشکار ساخته است. نتایج آزمون من-کندال و شیب سن حاکی از روند کاهشی معنادار در SPEI-12 در اکثر ایستگاه‌ها است، به طوری که ایستگاه‌های یزد، بم، کرمان، تبریز و زاهدان بیشترین روند کاهشی را تجربه کرده‌اند و تنها ایستگاه شهرکرد است که روند صعودی ناچیزی را نشان می‌دهد. این امر، با توجه به قرارگیری ۸۸ درصد از مساحت ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و وجود بیابان‌های لوت و دشت کویر، ضرورت مدیریت منابع آبی و پایش خشکسالی را دوچندان می‌سازد. تحلیل نقاط جهش من-کندال نیز نشان داد که در ۹ ایستگاه، تغییرات معناداری در روند SPEI-12 رخ داده است؛ در حالی که ایستگاه شهرکرد جهش صعودی داشته، ایستگاه‌هایی مانند رامسر، کرمانشاه، شیراز، بوشهر (فرودگاه)، بندرعباس، بیرجند، بابلسر و خرم‌آباد جهش نزولی معناداری را تجربه کرده‌اند. این تغییرات می‌تواند پیامدهای قابل توجهی برای برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای و مدیریت بحران خشکسالی در این مناطق داشته باشد. بررسی همبستگی پیرسون میان SPEI-12 با غلظت جهانی دی‌اکسید کربن نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها به ویژه در ایستگاه‌هایی نظیر بم، یزد، کرمان، مشهد، خوی، تبریز، زاهدان و شاهرود، همبستگی معکوس مشاهده می‌شود. این یافته با گزارش‌های پیشین مبنی بر تشدید تأثیرات خشکسالی به واسطه سناریوهای گرمایش جهانی و افزایش گازهای گلخانه‌ای همخوانی دارد. با این حال، مطالعه حاضر عدم وجود همبستگی با درجه اهمیت بالا میان تعداد ماهانه لکه‌های خورشیدی (MSSF) و شاخص SPEI-12 را نشان داد. این نتیجه با برخی پژوهش‌های پیشین مانند پژوهش (Tinsley, 2023) که ارتباط میان فعالیت لکه‌های خورشیدی و تغییرات اقلیمی را کوچک و مقطعی می‌دانستند، سازگار است. تحلیل موجک متقاطع (XWT) نیز میان SPEI-12 و GCO_2 ، قدرت سیگنال ناچیزی (حداکثر ۰/۱ یا ۰/۲) را نشان داد. با این وجود، چرخه‌های ناهم‌فاز در دوره‌های ۳۲ تا ۱۲۸ ماهه (تقریباً ۲/۶۷ تا ۱۰/۶۷ سال) و در برخی ایستگاه‌ها تا ۲۵۶ ماهه (تقریباً ۲۱/۳۳ سال) مشاهده شد. این چرخه‌ها، به ویژه در ایستگاه‌هایی نظیر بم، کرمان، سبزوار، شاهرود، تربت حیدریه، یزد، زاهدان و زنجان، در بازه‌های زمانی اخیر قدرت بیشتری یافتند. این ناهم‌فازی می‌تواند نشان‌دهنده پیچیدگی روابط میان افزایش دی‌اکسید

کربن و دینامیک خشکسالی باشد که ممکن است با تأخیر یا به صورت غیرخطی خود را نشان دهد. در مقابل، تحلیل موجک متقاطع میان SPEI-12 و MSSF، ارتباط قوی‌تری را در مقایسه با GCO_2 آشکار ساخت. در اکثر ایستگاه‌ها، ناهم‌فازی سیگنال‌ها در چرخه‌های ۶۴ تا ۱۲۸ ماهه (۵/۳۳ تا ۱۰/۶۷ سال) و به خصوص در بازه زمانی ۱۹۷۷ تا ۲۰۱۰ مشهود بود. در این میان چرخه‌های ناهم‌فاز ۱۲۸ ماهه (تقریباً ۱۰/۶۷ سال) از دوام بیشتری برخوردار بوده‌اند. همچنین، هم‌فاز بودن دو سیگنال در چرخه ۳۲ ماهه (تقریباً ۲/۶۷ سال) در برخی ایستگاه‌ها مشاهده شد. این یافته‌ها، اگرچه با نتیجه همبستگی پیرسون مبنی بر عدم ارتباط قوی میان MSSF و SPEI-12 تا حدی متفاوت به نظر می‌رسند؛ اما با مطالعاتی که نقش فعالیت‌های خورشیدی در تغییرات اقلیمی را در مقیاس‌های دهه‌ای مطرح می‌کنند، نظیر پژوهش‌های (Li et al., 2019)، (Ghavidel et al., 2021) و به ویژه (Ling et al., 2023) همسو است. این تفاوت در نتایج می‌تواند ناشی از توانایی تحلیل موجک در شناسایی همبستگی‌های فرکانسی و فازی پنهان باشد که در روش‌های همبستگی خطی سنتی ممکن است آشکار نشوند.

در مجموع، پژوهش حاضر با هدف بررسی روند، جهش و ارتباط شاخص بارش-تبخیر و تعرق معیار شده (SPEI-12) با غلظت جهانی دی اکسید کربن و فراوانی ماهانه لکه‌های خورشیدی (MSSF) در ۳۱ ایستگاه همدیدی ایران انجام شد. نتایج نشان داد که خشکسالی در ایران به عنوان یک پدیده غالب اقلیمی در حال تشدید است؛ اکثر ایستگاه‌ها به جز شهرکرد روند کاهشی و معناداری در SPEI-12 را نشان می‌دهند که بیانگر افزایش خشکسالی است. این روند کاهشی به ویژه در ایستگاه‌های یزد، بم، کرمان، تبریز و زاهدان چشمگیرتر است. وجود نقاط جهش نزولی معنادار در ایستگاه‌های مختلف نیز حاکی از تغییرات ناگهانی و طولانی مدت در وضعیت خشکسالی این مناطق است. یافته‌ها مؤید این نکته است که غلظت افزایش یافته دی اکسید کربن جهانی، همبستگی خطی معکوسی با شاخص SPEI-12 دارد که نشان‌دهنده تأثیر احتمالی گرمایش جهانی بر تشدید خشکسالی در ایران است. اگرچه قدرت سیگنال این ارتباط در تحلیل موجک متقاطع به شدت ضعیف بود؛ اما وجود چرخه‌های ناهم‌فاز در مقیاس‌های چند ساله تا چند ده ساله، بر پیچیدگی و پویایی این رابطه تأکید دارد. در مقابل، به طور کلی همبستگی خطی قابل توجهی میان MSSF و SPEI-12 مشاهده نشد، اگرچه در برخی از ایستگاه‌ها نظیر آبادان، اهواز و گرگان همبستگی‌های خفیفی قابل مشاهده است. همچنین تحلیل موجک متقاطع ارتباط قوی‌تر و چرخه‌های ناهم‌فاز مشخصی را در بازه‌های زمانی مختلف میان این دو پدیده آشکار ساخت. این نکته می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که فعالیت‌های خورشیدی، اگرچه ممکن است تأثیر خطی قوی نداشته باشند؛ اما در مقیاس‌های فرکانسی خاص، بر دینامیک خشکسالی تأثیرگذار هستند. به طور کلی، این پژوهش بر اهمیت رویکردهای جامع و چندعاملی در مطالعه خشکسالی تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که علاوه بر عوامل اقلیمی مرتبط با گرمایش جهانی، نقش پدیده‌های طبیعی مانند فعالیت‌های خورشیدی نیز، هرچند با سازکارهای پیچیده‌تر، باید در نظر گرفته شود. این نتایج می‌تواند برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی در ایران مفید باشد. همچنین می‌توان امیدوار بود که در مطالعات آتی با در نظر گرفتن عوامل و متغیرهای مؤثر انسانی و طبیعی دخیل در اقلیم سیاره زمین به دیدگاه جامع‌تری در خصوص ارتباط آن‌ها با پدیده‌های شاخصی نظیر خشکسالی دست یافت.

۵- سپاس‌گزاری

بدین وسیله، نویسندگان صمیمانه از سازمان هواشناسی ایران (IRIMO) و کارشناسان پرتلاش آن، بابت حمایت‌های بی‌دریغ در ارائه داده‌های هواشناسی لازم برای این پژوهش، قدردانی نموده و توفیقات روزافزون را از خداوند متعال برای این سازمان آرزومندند.

References

- Abramowitz, M., & Stegun, I. A. (1965). *Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables* (Vol. 55). Courier Corporation.
- Carmona, R., Hwang, W.-L., & Torresani, B. (1998). *Practical Time-Frequency Analysis: Gabor and wavelet transforms, with an implementation in S* (Vol. 9). Academic Press.
- Change, I. P. O. C. (2007). Climate change 2007: the physical science basis. *Agenda*, 6(07), 333.
- Eddy, J. A. (1976). The Maunder Minimum: The reign of Louis XIV appears to have been a time of real anomaly in the behavior of the sun. *Science*, 192(4245), 1189-1202. <https://doi.org/10.1126/science.192.4245.1189>
- Emadodin, I., Reinsch, T., & Taube, F. (2019). Drought and desertification in Iran. *Hydrology*, 6(3), 66. <https://doi.org/10.3390/hydrology6030066>

- Ghavidel, Y., Shojaei, M., & Farajzadeh, M. (2021). Temporal variations in the frequency of thunderstorm days in Tabriz and its relationship with sunspots frequency and global atmospheric Co2 concentration. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1591-1601. <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00832-y>
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear processes in geophysics*, 11(5/6), 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- Güçlü, Y. S. (2020). Improved visualization for trend analysis by comparing with classical Mann-Kendall test and ITA. *Journal of Hydrology*, 584, 124674. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124674>
- Han, Y., Liu, B., Xu, D., Yuan, C., Xu, Y., Sha, J., Li, S., Chang, Y., Sun, B., & Xu, Z. (2021). Temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the Haihe River Basin under the influence of climate change. *Water*, 13(12), 1664. <https://doi.org/10.3390/w13121664>
- Hosking, J. R. (1990). L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 52(1), 105-124. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>
- Jaagus, J. (2006). Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation. *Theoretical and Applied Climatology*, 83, 77-88. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0161-0>
- Kelly, P. (1977). Solar influence on North Atlantic mean sea level pressure. *Nature*, 269(5626), 320-322. <https://doi.org/10.1038/269320a0>
- Khoshkam, M., & Zand, F. (2010). The capabilities of dessert klutes of shahdad as a geo-park in the central part of Iran. *Asian Journal of Development Matters*, 4(3). <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ajdm&volume=4&issue=3&article=021>
- Li, G., Zhang, J., Ding, S., Wu, P., & Wang, W. (2019). Reconstruction of sunspot activity, cold and warm events, and drought and flood events in the central plain of China during the northern Song Dynasty using historical documents. *Quaternary International*, 525, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.09.003>
- Ling, M., Guo, X., Zhang, Y., Yu, L., & Xia, Q. (2023). Drought evolution in the Haihe River basin during 1960–2020 and the correlation with global warming, sunspots, and atmospheric circulation indices. *Journal of Water and Climate Change*, 14(1), 369-386. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.510>
- Liu, P. C. (1994). Wavelet spectrum analysis and ocean wind waves. In *Wavelet analysis and its applications* (Vol. 4, pp. 151-166). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-052087-2.50012-8>
- Liu, Y., San Liang, X., & Weisberg, R. H. (2007). Rectification of the bias in the wavelet power spectrum. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(12), 2093-2102. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHO511.1>
- Liu, Y., Wen, Y., Zhao, Y., & Hu, H. (2022). Analysis of drought and flood variations on a 200-Year scale based on historical environmental information in western China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 2771. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052771>
- Maraun, D., & Kurths, J. (2004). Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls. *Nonlin. Processes Geophys.*, 11(4), 505-514. <https://doi.org/10.5194/npg-11-505-2004>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Nosrati, K. (2014). Assessment of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) for Drought Identification in Different Climates of IranK. *Environmental Sciences*, 12(4), -. https://envs.sbu.ac.ir/article_97468_c78ddd24a33bb281b2c9ba3a1504e6d6.pdf [in Persian]
- Park, J.-H., & Chang, H.-Y. (2013). Drought over Seoul and its association with solar cycles. *Journal of astronomy and space sciences*, 30(4), 241-246. <https://doi.org/10.5140/JASS.2013.30.4.241>
- Potop, V., Možný, M., & Soukup, J. (2012). Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.002>
- Rösch, A., & Schmidbauer, H. (2018). WaveletComp 1.1: A guided tour through the R package. http://www.hs-stat.com/projects/WaveletComp/WaveletComp_guided_tour.pdf
- Safarzaei, N., Entezari, A., Karami, M., & Khammar, G. (2022). Analysis and study of Future atmospheric hazards in Sistan region. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 22(66), 395-410. <https://doi.org/10.52547/jgs.22.66.395> [in Persian]
- Sneyers, R. (1991). *On the statistical analysis of series of observations*. <https://doi.org/full/10.5555/19912451385>

- Tang, H., Wen, T., Shi, P., Qu, S., Zhao, L., & Li, Q. (2021). Analysis of characteristics of hydrological and meteorological drought evolution in Southwest China. *Water*, 13(13), 1846. <https://doi.org/10.3390/w13131846>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Tinsley, B. A. (2023). Solar Activity, Weather, and Climate: The Elusive Connection. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104(12), E2171-E2191. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0065.1>
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>
- Van Loon, A. F., Gleeson, T., Clark, J., Van Dijk, A. I., Stahl, K., Hannaford, J., Di Baldassarre, G., Teuling, A. J., Tallaksen, L. M., & Uijlenhoet, R. (2016). Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience*, 9(2), 89-91. <https://doi.org/10.1038/ngeo2646>
- Veleda, D., Montagne, R., & Araujo, M. (2012). Cross-wavelet bias corrected by normalizing scales. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(9), 1401-1408. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00140.1>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vogt, J., Safriel, U., Von Maltitz, G., Sokona, Y., Zougmore, R., Bastin, G., & Hill, J. (2011). Monitoring and assessment of land degradation and desertification: towards new conceptual and integrated approaches. *Land Degradation & Development*, 22(2), 150-165. <https://doi.org/10.1002/ldr.1075>
- Yousefi, H., Ahani, A., Moridi, A., & Razavi, S. (2024). The future of droughts in Iran according to CMIP6 projections. *Hydrological Sciences Journal*, 69(7), 951-970. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2348720>