

Spatio-Temporal Dynamics of Drought along a Climatic Gradient in Zagros Forests: A Multi-Scale Assessment Using IDSPI and SPEI

Forough Soheili¹, Marzban Faramarzi², Mehdi Heydari¹, Hamid Reza Naji^{1*}

- 1- Department of Forest Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Ilam, Iran.
- 2- Rangeland and Watershed Management Group, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ilam University, Ilam, Iran.

* **Corresponding Author:** h.naji@ilam.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Severe droughts across the Zagros region emerge from the concurrent interaction of declining precipitation, rising temperatures, and intensified evapotranspiration, imposing unprecedented physiological stress on oak forests and, through self-reinforcing feedback loops such as soil-moisture depletion and expanding dust generation, accelerating the progressive decline of these stands. To quantify this phenomenon, the SPI has been the most widely applied index owing to its computational simplicity; however, it neglects the role of temperature, whereas the SPEI, by incorporating temperature and evapotranspiration effects, proves more accurate for warm and semi-arid environments such as the Zagros. Nonetheless, reliable forecasting of future drought remains challenging, as distinct drought types interact across multiple temporal scales. In this respect, the IDSPI offers a substantial advantage by quantifying the intensity and duration of events simultaneously, given that the duration of water stress is frequently as decisive as its intensity in defining the threshold of ecological resilience. The Zagros range, extending approximately 1,600 km in length and 240 km in width, sustains vital oak-dominated forests of high biodiversity across a broad climatic gradient from humid to dry conditions, with aridity periods of 4 to 6 months, and has experienced rising temperatures, declining forest health, and shifts in species composition in recent decades. Nevertheless, forest responses have been markedly non-uniform, with different sites exhibiting contrasting degrees of vulnerability or stability, a spatial heterogeneity attributable to climatic gradients, local site conditions, and intraspecific genetic capacity, thereby underscoring the necessity of multi-scale drought analysis in this region for devising adaptation strategies and enhancing the resilience of oak forests.

Materials and Methods

This study was conducted in the two provinces of Ilam and Kurdistan as part of the Zagros forests, characterized by pronounced climatic, topographic, and vegetation heterogeneity. The climatic gradient was defined as a continuous spectrum from dry to humid based on the De Martonne aridity index, classifying the region into five climatic classes. Annual precipitation and temperature data were collected from fourteen meteorological stations, and statistical gaps were reconstructed through regression and validation methods; climatic maps were then generated using the inverse distance weighting method, and ombrothermic diagrams were prepared to analyze seasonal water-energy dynamics, with differences among climates tested by non-parametric statistical tests. To assess drought, the multi-scale Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was applied at 3-, 6-, 12-, and 24-month scales, and trends were evaluated using the Mann–Kendall test; the analyses focused on severe droughts while quantifying their frequency and cumulative severity. Finally, the Integrated Drought Severity and Persistence Index (IDSPI) was applied at four time scales across the five climatic regions to simultaneously evaluate the severity and duration of events.

Results and Discussion

Trend analysis revealed that the semi-arid climate, exhibiting a significant decreasing trend at the 3-, 6-, and 12-month scales, experienced the highest crisis intensity and frequency of very severe droughts (cumulative severity approaching -30 , with short-term minima of approximately -2.81 and -3.03 during 2021–2022), whereas the arid climate, despite low precipitation and high evapotranspiration, recorded the lowest frequency and cumulative severity, with no very severe events at the 12- and 24-month scales (intensity ≈ -2.33), underscoring the dominance of short-term droughts in this region. Owing to its winter-concentrated precipitation regime, the Mediterranean climate proved sensitive to disruptions in winter rainfall and temperature; its decreasing trend was significant at the 6-, 12-, and 24-month scales but non-significant at three months, and it experienced events such as the severe 2008 anomaly (a widespread

hydrological drought), the prolonged stress period of 1999–2009, and the acute short-term drought of 2021. The sub-humid climate, with a significant decreasing trend across all scales, exhibited its greatest cumulative severity at the 24-month scale and recorded its most severe anomaly in 2021 (≈ -2.88), persisting into 2022 below -2.16 and signifying an unprecedented two-year drought. By contrast, the very humid climates, despite a significant decreasing trend, maintained relative hydrological stability owing to high precipitation, with the frequency and cumulative severity of very severe droughts at long-term scales remaining close to zero; nevertheless, the 2021 event, with a historical short-term minimum of approximately -3.18 , demonstrated that short-term extreme anomalies acquire particular significance in these regions. Overall, drought impact constitutes a dynamic function of climate type and event severity over time, and multi-scale monitoring is therefore essential, particularly for identifying emerging climatic hazards in humid regions. IDSPI was calculated across five climates and four time scales. At short scales, moderate droughts occurred simultaneously in almost all climates (1999, 2008, 2021), reflecting large-scale drivers; at long scales, they shifted toward humid and Mediterranean regions in 2021–2022. Severe droughts persisted in sub-humid and Mediterranean climates, showing weakened moderating capacity of humid zones. At very severe levels ($\text{SPEI} \leq -2.0$), the semi-arid climate was most vulnerable, while hydrological drought propagated into more humid regions. Overall, drought impact depends on climate type and event severity, requiring revised monitoring with emphasis on long-term scales.

Conclusion

This study, employing a multi-scale approach, revealed the changing pattern of drought in the Zagros forests. Findings based on the IDSPI index demonstrated that during 2021–2022, the persistence of long-term droughts in the sub-humid and Mediterranean regions increased sharply, and the moderating capacity of these areas was weakened. Furthermore, the synchrony of extreme events in 1999, 2008, and 2021 highlighted the role of large-scale climatic drivers in steering regional dynamics. Ultimately, the results demonstrate that drought has expanded from a phenomenon confined to arid regions into a form of hydrological propagation into humid areas. This transformation necessitates a revision of water resource management and oak forest conservation strategies. Therefore, the design of early warning systems tailored to climatic regions, along with an emphasis on long-term monitoring in humid areas, is recommended to prevent irreversible environmental degradation.

Keywords: Hydroclimatic variability, trend analysis, extreme events, ecosystem resilience, Zagros.

پویایی مکانی - زمانی خشکسالی در طول یک گرادیان اقلیمی در جنگل‌های زاگرس: ارزیابی چندمقیاسی با استفاده از IDSPI و SPEI

فروغ سهیلی^۱، مرزبان فرامرزی^۲، مهدی حیدری^۱، حمیدرضا ناجی^{۱*}

۱- گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
۲- گروه مدیریت مراتع و آب‌خیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: h.naji@ilam.ac.ir

چکیده

این مطالعه به بررسی تحلیل مکانی - زمانی پویایی‌های خشکسالی در طول یک گرادیان اقلیمی در جنگل‌های زاگرس طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۳-۲۰۲۲) می‌پردازد. به منظور تحلیل دقیق، منطقه به پنج منطقه اقلیمی (خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب و بسیار مرطوب) تفکیک شد و از شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در چهار مقیاس زمانی مختلف استفاده گردید. همچنین، شاخص یکپارچه شدت و پایداری خشکسالی (IDSPI) برای ارزیابی هم‌زمان شدت، تداوم و پایداری رویدادهای حدی تعریف شد. نتایج نشان داد که روند کاهشی بارش‌ها در تمامی اقلیم‌ها معنادار است. اقلیم نیمه‌خشک با بیشترین شدت تجمعی، بحرانی‌ترین وضعیت را تجربه کرده است. با این حال، تحلیل‌های IDSPI نشان داد که در سال‌های پایانی دوره (۲۰۲۱-۲۰۲۲)، خشکسالی‌های شدید $SPEI \leq -2.0$ از مناطق خشک به سمت اقلیم‌های مدیترانه‌ای و مرطوب گسترش یافته است. این پدیده نشان‌دهنده کاهش تاب‌آوری اکوسیستم‌های مرطوب در برابر شوک‌های هیدروکلیماتیک بلندمدت است. در نهایت، نتایج حاضر تأیید می‌کند که خشکسالی در جنگل‌های زاگرس از یک پدیده محلی در مناطق خشک به یک بحران گسترده تبدیل شده که مناطق مرطوب را نیز در بر گرفته است. این یافته‌ها اهمیت بازنگری در برنامه‌های مدیریت منابع آب در مناطق مرطوب زاگرس را برجسته می‌سازد.

کلمات کلیدی: تغییرپذیری هیدروکلیماتیک، تحلیل روند، رویدادهای حدی، تاب‌آوری اکوسیستم، زاگرس.

مقدمه

خشکسالی از پیامدهای مهم و تأثیرگذار تغییر اقلیم به شمار می‌رود (Ramezani Etedali et al., 2025). خشکسالی‌های شدید فراتر از کاهش ساده بارندگی بوده و نتیجه برهم‌کنش هم‌زمان کاهش نزولات جوی، افزایش دما و تشدید تبخیر و تعرق هستند؛ فرایندی که در نهایت به اعمال تنش‌های فیزیولوژیک کم‌سابقه بر درختان منجر می‌شود (Hernández-Lambrano et al., 2019; López-Sánchez et al., 2019; Macháčová et al., 2022). این دگرگونی در الگوی اقلیمی، به‌طور مستقیم زمینه را برای تشدید سایر مخاطرات اکولوژیک فراهم می‌کند. از یک سو، کاهش پوشش گیاهی ناشی از خشکسالی، گسترش کانون‌های فرسایش بادی و تولید ریزگردها را تسریع می‌کند (Kumar et al., 2013) که این پدیده‌ها با کاهش بیشتر رطوبت خاک (Zarafshar et al., 2020) و محدود کردن تبادلات گازی برگ‌ها، چرخه تضعیف تدریجی درختان را تشدید می‌نمایند (Soheili et al., 2023). خشکسالی به‌طور کلی در چهار حالت خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی - اجتماعی دسته‌بندی شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Miralizadeh et al., 2023). برای کمی‌سازی این پدیده، شاخص‌های متعددی توسعه یافته‌اند. شاخص بارش استاندارد شده (SPI) به دلیل سادگی محاسبه و قابلیت مقایسه در مقیاس‌های زمانی مختلف، پرکاربردترین شاخص است، اما محدودیت آن در نظر نگرفتن دما و تبخیر و تعرق می‌باشد (McKee et al., 1993; Helmi and Shahidi, 2023). در مقابل، شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) با ادغام اثر دما در محاسبات، برای بررسی خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم و مناطق گرم و نیمه‌خشک مانند زاگرس، شاخصی مناسب‌تر و دقیق‌تر است (Vicente-Serrano et al., 2010). مطالعات تجربی، کارایی ویژه SPEI را در دوره‌هایی که روندهای بارندگی و تبخیر و تعرق از هم فاصله می‌گیرند (زمانی که تقاضای آب اتمسفری مستقل از کمبود بارش تشدید می‌شود) نشان داده‌اند؛ امری که این شاخص را به‌ویژه برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی کارآمد می‌سازد (Berhail and Katipoğlu, 2023). همانند SPI، شاخص SPEI نیز شناسایی و پایش انواع مختلف خشکسالی

را در طیفی از مقیاس‌های زمانی امکان‌پذیر می‌سازد (Berhail et al., 2021) که این امر به کاربرد گسترده آن در تحلیل‌های مکانی و زمانی خشکسالی کمک کرده است (Zhang et al., 2023a, 2023b). با این وجود، ارائه پیش‌بینی‌های عینی و قابل اعتماد از شدت خشکسالی در آینده همچنان یک چالش بزرگ باقی مانده است. این پیچیدگی ناشی از تعاملات چندمقیاسی میان انواع خشکسالی است که از ناهنجاری‌های هواشناسی کوتاه‌مدت تا تغییرات بلندمدت در چرخه هیدرولوژیکی را در بر می‌گیرد (Vicente). (Serrano et al., 2025) برای مقابله با این چالش، مطالعه حاضر از SPEI برای بررسی ویژگی‌های مکانی - زمانی خشکسالی در دوره‌های تجمع مختلف استفاده می‌کند تا بدین ترتیب، پویایی کمبود رطوبت را از بازه‌های کوتاه‌مدت تا بلندمدت پایش نماید. پژوهش‌های پیشین اغلب به تحلیل خشکسالی در یک چارچوب کم‌بعد، با بررسی مجزای روندهای زمانی و الگوهای مکانی پرداخته‌اند (Wen et al., 2020). چنین مطالعاتی، تغییرات منطقه‌ای در فراوانی، شدت و تداوم خشکسالی (Deng et al., 2022)، و همچنین توزیع مکانی در مقیاس وسیع و تغییرپذیری زمانی را روشن کرده‌اند (Fu and Wang, 2022). به‌طور هم‌زمان، ارزیابی‌های جهانی افزایش شدت و وسعت خشکسالی‌های هواشناسی را در دهه‌های اخیر مستند کرده‌اند (Moravec et al., 2021).

شاخص تلفیقی شدت و تداوم خشکسالی (IDSPI)، با کمی‌سازی هم‌زمان شدت و تداوم رویدادهای خشکسالی، مزیت قابل توجهی نسبت به شاخص‌های سنتی خشکسالی دارد (Cavus and Aksoy, 2019). برخلاف شاخص SPEI که عمدتاً شدت خشکسالی را در مقیاس‌های زمانی خاص می‌سنجد، IDSPI تداوم زمانی را نیز ادغام می‌کند و پژوهشگران را قادر می‌سازد تا دوره‌های طولانی خشکسالی را شناسایی کنند؛ دوره‌هایی که ممکن است در تحلیل‌های کوتاه‌مدت شدید به نظر نرسند، اما ریسک تجمعی قابل توجهی را برای اکوسیستم‌ها ایجاد می‌کنند. این رویکرد دوبعدی به‌ویژه برای برنامه‌ریزی منابع آب و حفاظت از جنگل‌ها حیاتی است، زیرا در این موارد، تداوم تنش‌های آبی اغلب به اندازه شدت آن‌ها در تعیین آستانه تاب‌آوری اکولوژیک نقش دارد.

بهره‌گیری از چنین شاخص‌های جامعی برای ارزیابی مناطق آسیب‌پذیری مانند رشته‌کوه‌های زاگرس در غرب ایران ضروری است. این رشته‌کوه با امتدادی در حدود ۱۶۰۰ کیلومتر در جهت شمال غربی به جنوب شرقی و پهنای تقریبی ۲۴۰ کیلومتر، میزبان جنگل‌های حیاتی با غالبیت بلوط است که از تنوع زیستی بالایی حمایت کرده و خدمات اکوسیستمی ضروری را ارائه می‌دهند (Kolahi-Azar and Golriz, 2018). از نظر اقلیمی، این منطقه دارای ناهمگونی عمیقی است و بر اساس شاخص خشکی دومارتن، طیفی متنوع از پهنه‌های مرطوب تا خشک را در بر می‌گیرد (De Martonne, 1926; Sagheb-Talebi et al., 2014). در حالی که مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب معمولاً دوره‌های خشکی ۴ تا ۵ ماهه را تجربه می‌کنند، مناطق مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک با خشکسالی‌های طولانی‌تر ۴ تا ۶ ماهه مواجه هستند (Jazirehi & Ebrahimi Rostaghi, 2003). در دهه‌های اخیر، روند ملموس افزایش دما و کاهش بارش مشاهده شده است (Darvishi Boloorani et al., 2020) که منجر به تشدید تنش‌های وارده بر اکوسیستم، کاهش سلامت جنگل‌ها، تغییر در ترکیب گونه‌ها و افزایش آسیب‌پذیری این جنگل‌ها در برابر تخریب‌های ناشی از خشکسالی شده است.

با این حال، شواهد میدانی نشان می‌دهد که پاسخ جنگل‌ها به این تهدیدها یکنواخت نبوده و رویگاه‌های مختلف در پهنه زاگرس درجات متفاوتی از آسیب‌پذیری یا پایداری را بروز می‌دهند. این ناهمگونی فضایی در پاسخ‌ها احتمالاً ناشی از تفاوت‌های مکانی در شرایط اقلیمی (نظیر گرادیان‌های رطوبتی و دمایی) (Bohner and Diez, 2021; Kueppers et al., 2017)، ویژگی‌های محلی رویشگاه (مانند جهت دامنه و عمق خاک) (Vilà-Cabrera et al., 2013) و حتی تفاوت‌های درون‌گونه‌ای مرتبط با ظرفیت‌های ژنتیکی باشد.

این پژوهش با هدف تحلیل روند خشکسالی در منطقه حساس زاگرس طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۲، از رویکرد چندمقیاسی SPEI و شاخص IDSPI^۱ در پنج منطقه اقلیمی استفاده کرده است. محور اصلی این مطالعه، پاسخ به این پرسش‌هاست که: (۱) آیا دوره‌های انباشت SPEI (۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه) روندهای متفاوتی از خشکسالی را نشان می‌دهند؟ (۲) کدام مناطق شدیدترین یا تکرار شونده‌ترین خشکسالی‌ها را تجربه کرده‌اند؟ و (۳) شاخص IDSPI چگونه ارزیابی خشکسالی‌های متوسط تا شدید را در مناطق

مختلف بهبود می‌بخشد؟ یافته‌های این تحقیق با تبیین رابطه بین نوع اقلیم و مقیاس زمانی خشکسالی، مبنایی برای تدوین استراتژی‌های سازگاری و مدیریت پایدار منابع آب و خاک فراهم می‌کند که به‌ویژه برای افزایش تاب‌آوری جنگل‌های بلوط در برابر سناریوهای اقلیمی آینده ضروری است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

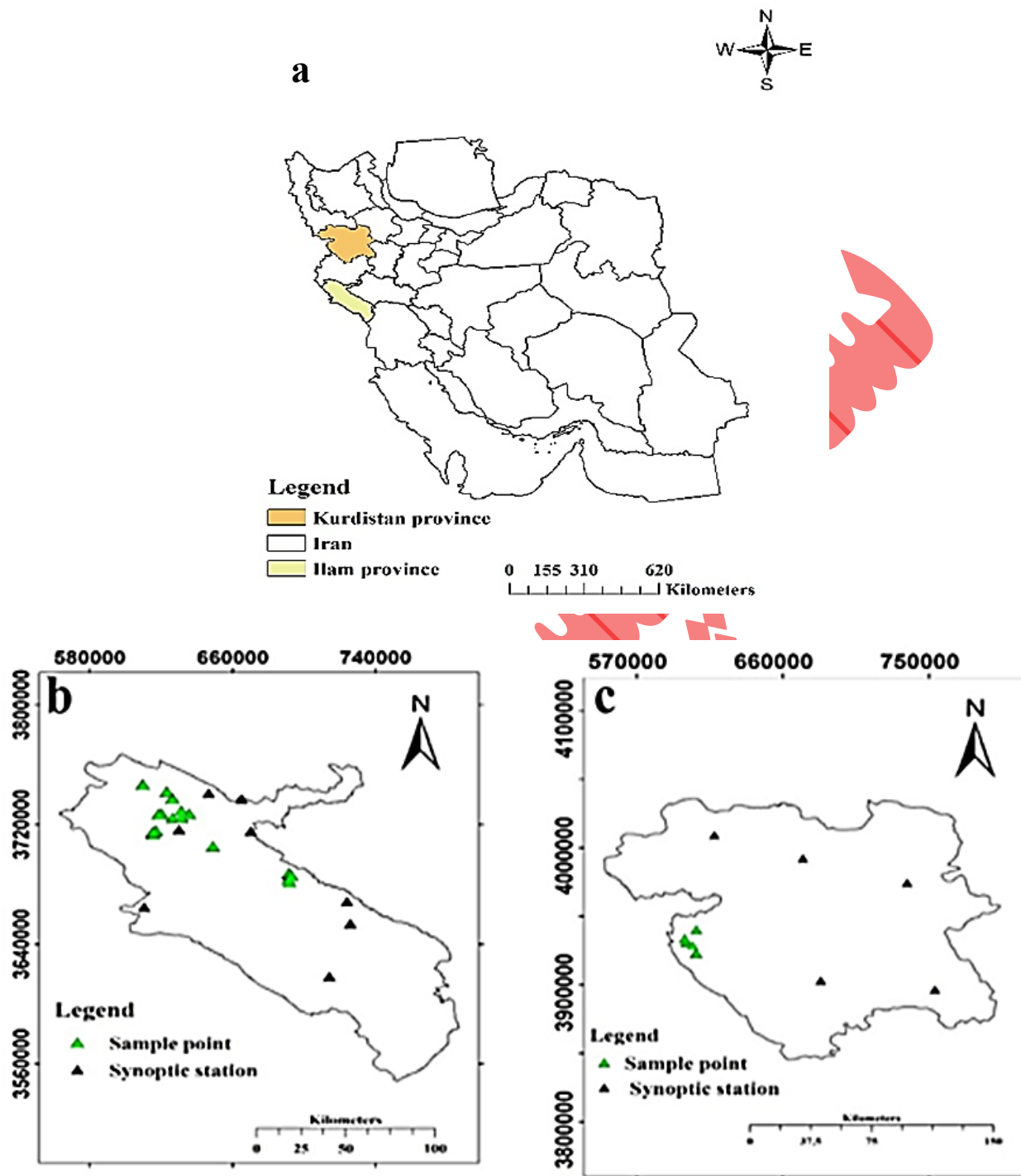
این پژوهش در دو استان ایلام با طول جغرافیایی ۲۴° و ۴۶° و عرض جغرافیایی ۳۸° و ۳۳° و کردستان، با طول جغرافیایی ۱۰° و ۴۷° و عرض جغرافیایی ۲۴° و ۳۵°، در سال ۱۴۰۲ انجام شد (شکل ۱). این دو استان بخشی از جنگل‌های زاگرس را پوشش می‌دهند و دارای مناطقی کوهستانی با همگونی آشکار اقلیمی، توپوگرافیک و پوشش گیاهی هستند. استان ایلام از اراضی پست گرم و خشک تا ارتفاعات نسبتاً مرطوب گسترش یافته، در حالی که استان کردستان شرایط سردتر و مرطوب‌تری را تجربه می‌کند (Kiani et al., 2019).

جمع‌آوری داده‌های هواشناسی و طبقه‌بندی اقلیمی

در این پژوهش، گرادیان اقلیمی به عنوان یک طیف از شرایط خشک به مرطوب تعریف گردید. این گرادیان بر اساس مقادیر عددی شاخص خشکی دومارتن (IdM) ایجاد شد، به گونه‌ای که شرایط اقلیمی سراسر منطقه مورد مطالعه در پنج طبقه متمایز (از خشک‌ترین تا مرطوب‌ترین) طبقه‌بندی گردید (جدول ۱) که توزیع مکانی آن‌ها در شکل‌های (1 b and c) نمایش داده شده است. این رویکرد اجازه داد تا پویایی خشکسالی نه به صورت نقاط مجزا، بلکه به عنوان یک تغییر تدریجی در طول طیف اقلیمی زاگرس ارزیابی شود. محاسبه این طبقه‌بندی با استفاده از شاخص خشکی دومارتن (De Martonne, 1926) به شرح زیر مطابق با رابطه (۱) انجام شد:

$$IdM = MAP / (MAT + 10) \quad (1)$$

که در آن: IdM: شاخص خشکی دومارتن، MAP: میانگین بارش سالانه، MAT: میانگین دمای سالانه. برای دستیابی به این نتایج، داده‌های سالانه بارش و دمای ۱۴ ایستگاه هواشناسی (جدول ۲) از سازمان‌های هواشناسی استان‌های ایلام و کردستان اخذ گردید. همچنین، شکاف‌های آماری در سه منطقه (حداکثر پنج سال فقدان داده) با استفاده از رگرسیون با ایستگاه‌های مجاور بازسازی شدند و صحت آن‌ها از طریق تحلیل باقی‌مانده‌ها و نمودار جنگل تصادفی تأیید گردید (جدول ۳).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه. موقعیت ایران با استان‌های منتخب کردستان و ایلام در غرب ایران (a). نقشه‌های تفصیلی مناطق مورد مطالعه: نقاط نمونه‌برداری و ایستگاه‌های هواشناسی در استان ایلام (b); نقاط نمونه‌برداری و ایستگاه‌های هواشناسی در استان کردستان (c).

Fig 1. Geographic location of the study area: (a) Map of Iran highlighting the selected provinces of Kurdistan and Ilam in western Iran; (b) Detailed map showing sampling points and meteorological stations in Ilam province; (c) Detailed map showing sampling points and companion stations in Kurdistan province.

جدول ۱. طبقه‌بندی اقلیمی بر اساس شاخص خشکی دومارتن (Gebremedhin et al., 2018).

Table 1. Climatic classification based on the De Martonne aridity index (Gebremedhin et al., 2018).

IdM محدوده	نوع اقلیم
IdM Range	Climate Classification
$5 \leq IdM < 10$	خشک Arid
$10 \leq IdM < 20$	نیمه خشک Semi-arid
$20 \leq IdM < 24$	مدیترانه‌ای Mediterranean
$24 \leq IdM < 28$	نیمه مرطوب Sub-humid
$35 \leq IdM < 55$	خیلی مرطوب Very humid

نقشه‌های مکانی شاخص خشکی دومارتن با استفاده از روش وزندهی عکس فاصله (IDW) با توان ۳ تولید شدند (شکل ۲) که این روش در مناطق نیمه‌خشک از دقت مناسبی برخوردار است (Hadi and Tombul, 2018). داده‌های اقلیمی هر ایستگاه از این سطوح استخراج شد (جدول ۲؛ شکل ۱). نمودارهای آمبروترمیک که بارش ماهانه را در مقابل دمای ماهانه ترسیم می‌کنند، برای دوره ۱۹۹۳-۲۰۲۲ تهیه شد تا پویایی‌های فصلی آب - انرژی ترسیم و دوره‌های مستعد خشکسالی شناسایی شوند (شکل ۳). تفاوت میان اقلیم‌ها با استفاده از آزمون ناپارامتری پومان - ویتنی و پس از تأیید عدم نرمالیتی داده‌ها با آزمون شاپیرو - ویلک مورد آزمون قرار گرفت (جدول ۲).

جدول ۲. ویژگی‌های پایه مکان و طبقه‌بندی‌های اقلیمی پنج اقلیم مورد مطالعه.

Table 2. Basic site characteristics and climatic classifications of the five studied climatic zones.

مجموع	ارتفاع از	استان‌ها	سایت‌های
شاخص خشکی	سطح دریا	Province	نمونه‌برداری
دومارتن	Altitude (m)		Sampling Site
IdM			
متوسط دمای			
ماهانه			
MAT (°C)			
بارش			
سالانه			
MAP (mm)			
طبقه‌بندی اقلیمی	موقعیت		
Climate Classification	Geographical Location		
	626373	ایلام	سراب ایوان
	3724526	Ilam	Sarab Eyvan
	622981	ایلام	چالانچی ایوان
	3741849	Ilam	Chalanchi Eyvan
	623045	ایلام	خوران ایوان
	3741868	Ilam	Khoran Eyvan
	648987	ایلام	دالاب
	3705545	Ilam	Dalab
	620395	ایلام	ششدار
	3727248	Ilam	Sheshdar
	631560	ایلام	گچان
	3724586	Ilam	Gachan
	615204	ایلام	ریکا صالح‌آباد
	3714801	Ilam	Rika Saleh Abad
	615457	ایلام	تخت خان صالح‌آباد
	3713701	Ilam	Takht-khan Saleh Abad

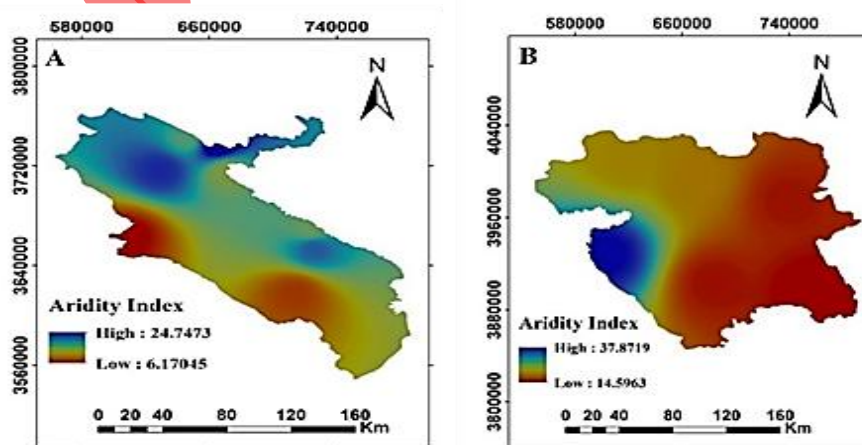
				617053		ایلام	بانروشان صالح آباد
				3715918	1091	Ilam	Banroshan Saleh Abad
				691791		ایلام	پشته بدره
				3681233	1050	Ilam	Peshteh Badreh
14.67	22	469.3	نیمه خشک	692990		ایلام	آبهر بدره
			Semi-arid	3685752	1010	Ilam	Aab har Badreh
				691350		ایلام	بدره
				3687000	1041	Ilam	Badreh
				606244		کردستان	کال مریوان
				3922848	1309	Kurdistan	Kaal Marivan
37.87	13.40	886.3	خیلی مرطوب	600356		کردستان	دره تفی
			Very humid	3930949	1300	Kurdistan	Dareh Tafi Marivan
				606732		کردستان	سیف مریوان
				3940264	1580	Kurdistan	Seif Marivan

MAT (°C): Mean annual temperature; MAP (mm): Mean annual precipitation; IdM: De Martonne aridity index.

جدول ۳. ارزیابی مدل‌های رگرسیون و جنگل تصادفی برای بازسازی داده‌های اقلیمی مفقود در سه منطقه اقلیمی.

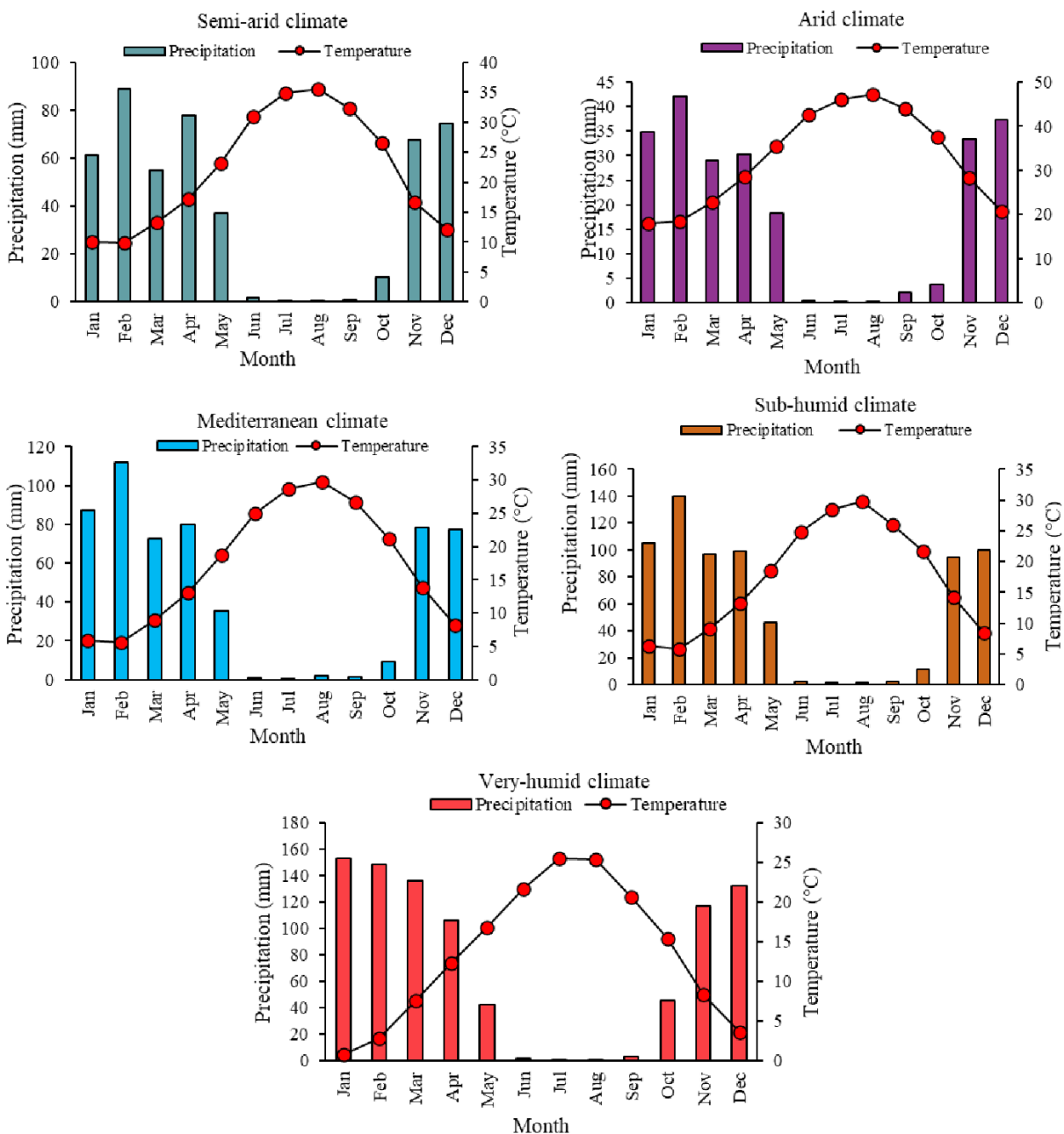
Table 3. Evaluation of regression and random forest models for missing climatic data reconstruction in three regions.

Random Forest Model		Regression Model		Climates اقلیم‌ها
مدل جنگل تصادفی		مدل رگرسیون		
Temp دما	Pre بارش	Temp دما	Pre بارش	
R ²		R ²		
0.99	0.5	0.99	0.7	Arid climate منطقه اقلیمی خشک
0.98	0.82	0.96	0.87	Sub-humid climate منطقه اقلیمی نیمه مرطوب
0.98	0.76	0.93	0.72	Semi-arid climate منطقه اقلیمی نیمه خشک



شکل ۲. نقشه‌های توزیع مکانی شاخص خشکی دومارتن در استان ایلام (A) و استان کردستان (B).

Fig 2. Spatial distribution of De Martonne Aridity Index maps for Ilam province (A) and Kurdistan province (B).



شکل ۳. نمودارهای آمبروترمیک پنج منطقه اقلیمی جنگل‌های زاگرس (۱۹۹۳–۲۰۲۲)

Fig 3. Ombrothermic diagrams of five climatic zones in the Zagros forests (1993–2022).

محاسبه شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

جهت ارزیابی دینامیک‌های خشکسالی در دوره ۱۹۹۳–۲۰۲۲، از شاخص چندمقیاسی SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010) در مقیاس‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه استفاده شد تا اثرات کوتاه‌مدت (هواشناسی/کشاورزی) و بلندمدت (هیدرولوژیکی/بوم‌شناختی) پوشش داده شوند. در این راستا، ابتدا مقدار تبخیر - تعرق بالقوه (PET) به روش Thornthwaite (1948) برآورد گردید. سپس، بیلان آبی ماهانه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$Di = Pi - PETi$$

(۲)

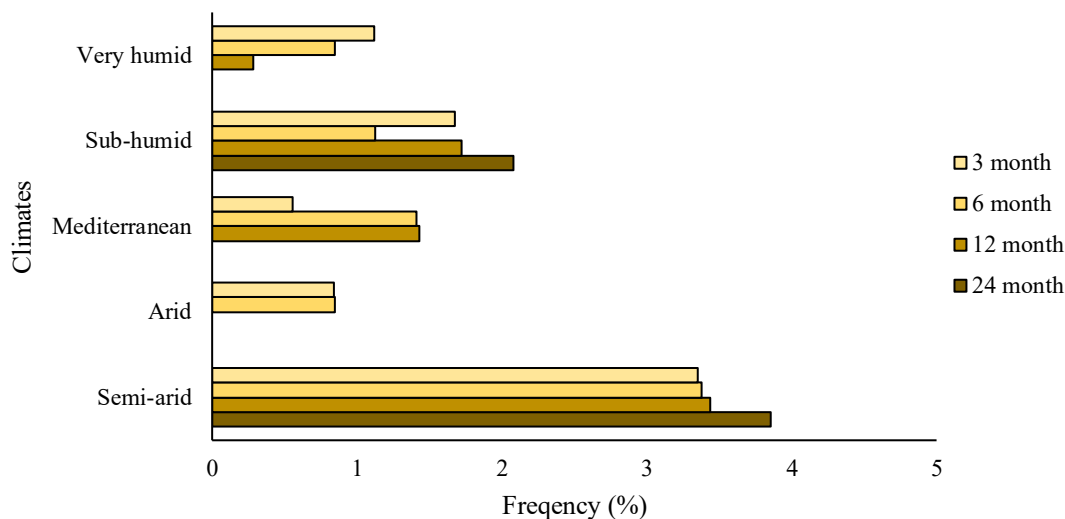
در این رابطه، Di تراز رطوبتی ماهانه، Pi مقدار بارش و $PETi$ مقدار تبخیر - تعرق بالقوه در ماه i است. در مرحله بعد، مقادیر بیلان آبی طی دوره‌های زمانی مشخص تجمیع گردید و برای استانداردسازی نهایی، از توزیع لگ - لجیستیک استفاده شد. داده‌های ۱۴ ایستگاه مورد تحلیل قرار گرفت و برای شناسایی روند تغییرات، از آزمون من - کندال با سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ استفاده گردید (Mann, 1945; Kendall, 1975) (جدول ۴).

جدول ۴. معناداری روندهای زمانی در سری‌های SPEI بر اساس آزمون من - کندال در پنج اقلیم.

Table 4. Significance of temporal trends in SPEI series based on the Mann-Kendall test across five climatic zones.

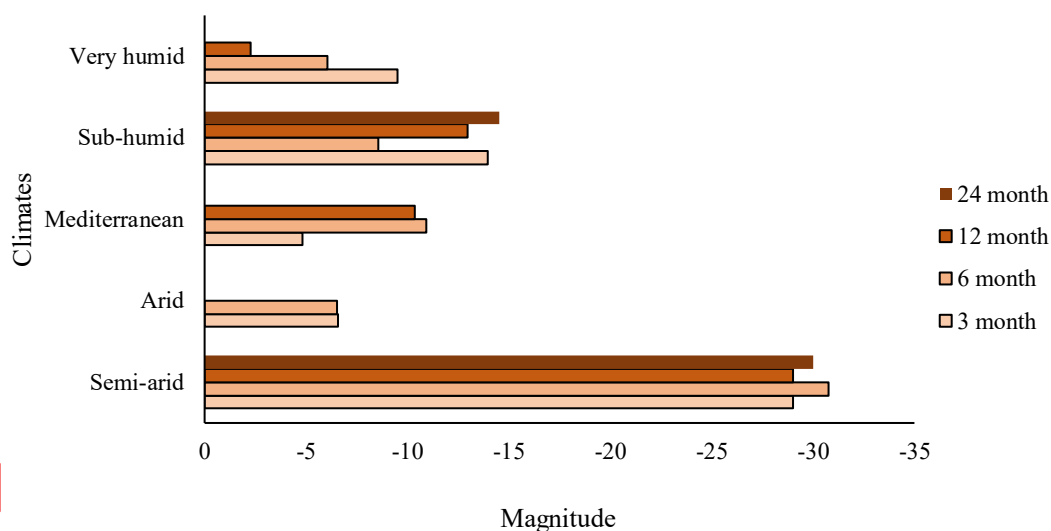
Significance	P Value	Mann-Kendall من کندال	SPEI شاخص SPEI Index	Climates اقلیم‌ها
Significant	0.0323	-0.078	SPEI_3	نیمه‌خشک Semi-arid
Significant	0.0283	-0.080	SPEI_6	
Significant	0.0357	-0.077	SPEI_12	
Not Significant	0.1654	-0.051	SPEI_24	
Significant	0.0000	-0.152	SPEI_3	خشک Arid
Significant	0.0001	-0.142	SPEI_6	
Significant	0.0130	-0.091	SPEI_12	
Significant	0.0046	-0.103	SPEI_24	
Not Significant	0.0528	-0.071	SPEI_3	مدیترانه‌ای Mediterranean
Significant	0.0366	-0.076	SPEI_6	
Significant	0.0008	-0.123	SPEI_12	
Significant	0.0155	-0.088	SPEI_24	
Significant	0.0000	-0.166	SPEI_3	نیمه‌مرطوب Sub-humid
Significant	0.0001	-0.141	SPEI_6	
Significant	0.0000	-0.168	SPEI_12	
Significant	0.0008	-0.122	SPEI_24	
Significant	0.0001	-0.140	SPEI_3	خیلی مرطوب Very-humid
Significant	0.0002	-0.135	SPEI_6	
Significant	0.0000	-0.174	SPEI_12	
Significant	0.0000	-0.196	SPEI_24	

طبقه‌بندی وضعیت رطوبتی بر اساس آستانه‌های Wang و همکاران (۲۰۱۴) به شرح زیر تعریف گردید: بسیار مرطوب ($SPEI \geq 2.00$)، به شدت مرطوب ($2.00 \geq SPEI \geq 1.50$)، نسبتاً مرطوب ($1.50 \geq SPEI \geq 1.00$)، نرمال ($1.00 \geq SPEI \geq -1.00$)، نسبتاً خشک ($-1.00 \leq SPEI \leq -1.50$)، به شدت خشک ($-1.50 \leq SPEI \leq -2.00$) و بسیار خشک ($SPEI \leq -2.00$). در این پژوهش، تمرکز تحلیل‌ها بر خشکسالی‌های شدید ($SPEI \leq -2$) بود. از نظر فراوانی (درصد ماه‌ها) و شدت تجمعی مجموع مقادیر ($SPEI \leq -2$) برای هر اقلیم و هر مقیاس زمانی کمی‌سازی شد (شکل‌های ۴ و ۵).



شکل ۴. فراوانی درصد رویدادهای خشکسالی بسیار شدید ($SPEI \leq -2$) در پنج منطقه اقلیمی جنگل‌های زاگرس طی سال‌های ۱۹۹۳-۲۰۲۲.

Fig 4. Frequency (%) of extreme drought events ($SPEI \leq -2$) across five climatic zones in the Zagros forests (1993-2022).



شکل ۵. بزرگی رویدادهای خشکسالی بسیار شدید ($SPEI \leq -2$) در پنج منطقه اقلیمی جنگل‌های زاگرس (۱۹۹۳-۲۰۲۲).

Fig 5. Magnitude of extreme drought events ($SPEI \leq -2$) across five climatic zones in the Zagros forests (1993-2022).

شاخص یکپارچه شدت و پایداری خشکسالی (IDSPI)

به منظور تحلیل جامع خشکسالی در ۵ منطقه اقلیمی طی بازه ۱۹۹۳-۲۰۲۲، شاخص یکپارچه شدت و پایداری (IDSPI) در چهار مقیاس زمانی (۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه) به کار گرفته شد. طبق متدولوژی Hayes و همکاران (۱۹۹۹) و Vicente-Serrano و همکاران (۲۰۱۰)، مقیاس‌های کوتاه‌تر (۳ و ۶ ماهه) برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی و مقیاس‌های بلندتر (۱۲ و ۲۴ ماهه) برای ارزیابی تأثیر بر دسترسی به منابع آب و پایداری آب‌های زیرزمینی به کار گرفته شدند. در این رویکرد، رخدادها ابتدا به سه سطح شدت

(متوسط، شدید و بسیار شدید) رده‌بندی شدند. سپس برای هر سطح، سه مؤلفه کلیدی اندازه‌گیری گردید: شدت (S) به‌عنوان میانگین قدر مطلق SPEI و تداوم (D) به‌عنوان حداکثر تداوم زمانی ماه‌های متوالی (Cavus and Aksoy, 2019) و همچنین پایداری (P) به‌عنوان نسبت تداوم رخداد به کل طول دوره زمانی (Mishra et al., 2009). در نهایت، شاخص ترکیبی IDSPI برای هر طبقه خشکسالی (d)، منطقه اقلیمی (c) و مقیاس زمانی (t)، از طریق ادغام ضربی مقادیر میانگین بلندمدت سه بُعد مؤلفه‌ای آن (شدت، تداوم و پایداری) محاسبه می‌شود:

$$IDSPI_{ctd} = S_{ctd} \times D_{ctd} \times P_{ctd} \quad (3)$$

نتایج و بحث

اقلیم نیمه‌خشک (Semi-arid)

نتایج آزمون من - کندال در اقلیم نیمه‌خشک، روندی کاهشی و معنادار را در مقیاس‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه تأیید کرد که با حساسیت بالای این منطقه نسبت به تغییرپذیری‌های هیدروکلیماتیک کوتاه‌مدت همسو است (Scholes 2020). تحلیل شکل‌های ۶ تا ۹ نشان می‌دهد که این اقلیم با مقادیر تجمعی نزدیک به ۳۰-، بالاترین شدت بحران را در تمامی مقیاس‌ها تجربه کرده و بیشترین فراوانی خشکسالی‌های بسیار شدید را به خود اختصاص داده است، به‌طوری که با افزایش مقیاس زمانی (به‌ویژه ۲۴ ماهه)، شدت این فراوانی افزایش یافته است. در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۲۱، شدت خشکسالی به شکلی بی‌سابقه رکوردشکنی کرد؛ به‌طوری که کمترین مقادیر ثبت شده در مقیاس‌های ۳ و ۶ ماهه به ترتیب ۲۰۸۱- و ۳۰۰۳- گزارش شد. این وضعیت بازتاب‌دهنده پاسخ‌های سریع شاخص‌های کوتاه‌مدت به کمبود بارش و افزایش دما است که با یافته‌های Legesse and Suryabagavan (۲۰۱۴) و Patel and Patel (۲۰۲۴) در مورد اثرات دمایی بر خشکسالی همخوانی دارد. تداوم این تنش رطوبتی در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه، با روندهای مشاهده شده در مناطق جنوبی حوضه دریاچه ارومیه شباهت دارد که در آن آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت بیشتر گزارش شده است (Samaei and Alijani, 2025).

اقلیم خشک (Arid)

در اقلیم خشک، نتایج آزمون من - کندال در تمامی مقیاس‌های زمانی، یک روند کاهشی معنادار را تأیید نمود. این منطقه که با بارش سالانه بسیار کم (کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر) و تبخیر - تعرق (PET) بالا شناخته می‌شود، نسبت به ناهنجاری‌های جزئی هیدروکلیماتیک بسیار حساس است (Abedrabboh et al., 2025). با این حال، در تحلیل رویدادهای حدی $SPEI \leq -2.0$ ، این اقلیم کمترین فراوانی و شدت تجمعی را داشت و در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه هیچ رویداد بسیار شدیدی ثبت نشد. با این حال، در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۱، شدت خشکسالی در این منطقه به مقدار بحرانی ۲/۳۳- رسید. این الگو با روندهای منطقه‌ای در هند و شمال چین همسو است که در آن خشکسالی‌های کوتاه‌مدت بر مناطق مرکزی حاکم است و در مقیاس‌های بلندمدت شدت کمتری دارد (Bera et al., 2025) و با تجربه ۴۷ خشکسالی بزرگ در شمال چین طی شش دهه نیز همخوانی دارد (Zhang et al., 2024).

اقلیم مدیترانه‌ای (Mediterranean)

تحلیل روند در اقلیم مدیترانه‌ای، معناداری روند کاهشی را در مقیاس‌های ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه تأیید کرد، در حالی که در مقیاس ۳ ماهه این روند غیرمعنادار بود. این اقلیم به دلیل رژیم بارش‌های متمرکز زمستانی، به‌طور ویژه‌ای در برابر اختلالات بارش زمستانه و دما حساس است (Conacher and Conacher, 1998). نتایج شدت تجمعی نشان داد که خشکسالی‌های بسیار شدید در این اقلیم با فراوانی کمتر اما تأثیرگذاری بالا رخ می‌دهند. برای مثال، در سال ۲۰۰۸، این اقلیم به‌طور هم‌زمان با مناطق نیمه‌مرطوب و بسیار مرطوب، ناهنجاری شدیدی را تجربه کرد که نشان‌دهنده یک خشکسالی هیدرولوژیک گسترده است. همچنین، وقوع خشکسالی‌های

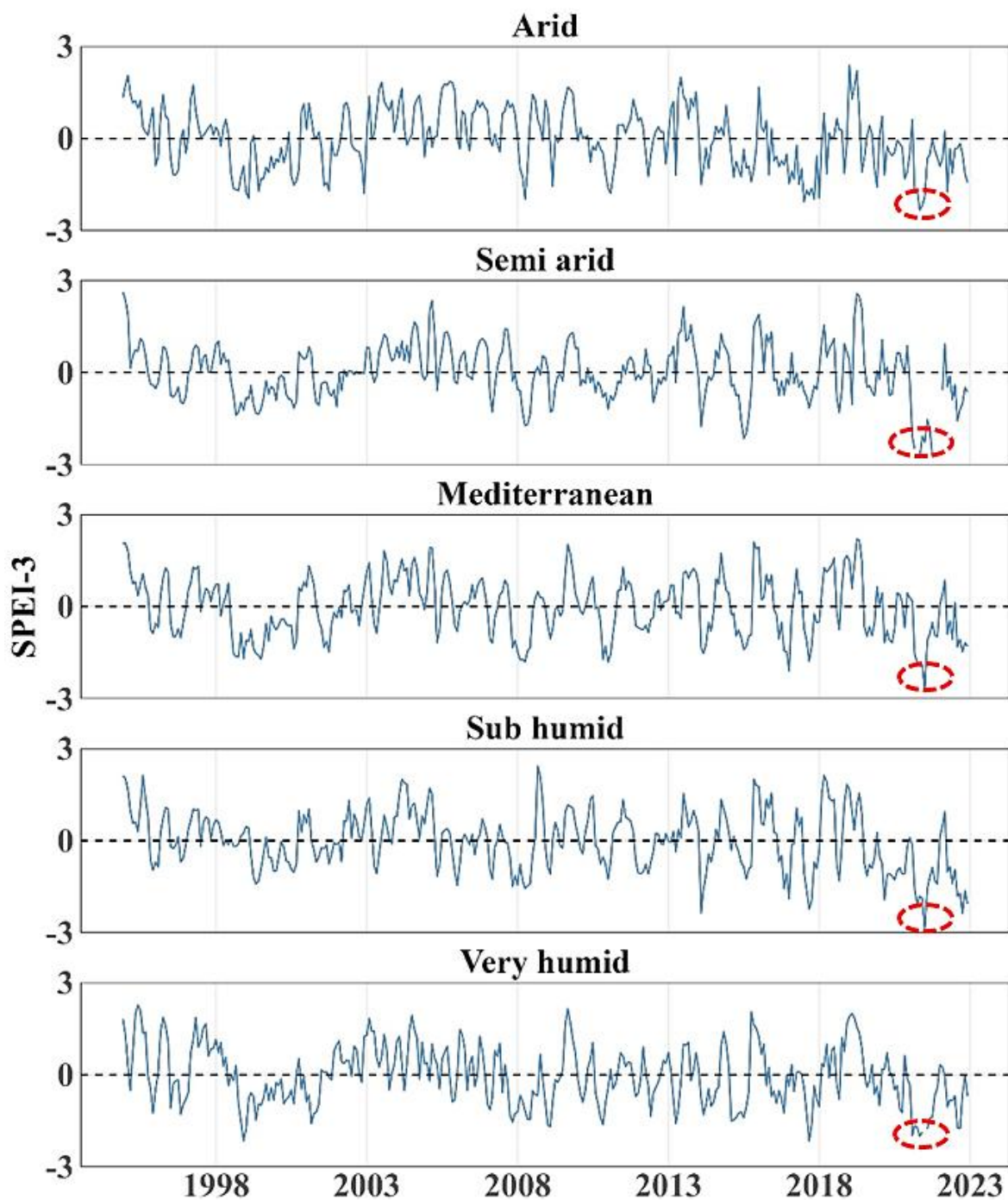
شدید در حوالی سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۹۹، آغاز یک دوره تنش طولانی تا سال ۲۰۰۹ بود. این یافته با نتایج Hertig و Trambalay (۲۰۱۸) که وقوع خشکسالی‌های بلندمدت در مدیترانه را عمدتاً در فصل زمستان گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد. در سال ۲۰۲۱، خشکسالی‌های حاد کوتاه‌مدت تحت تأثیر کاهش بارش‌های زمستانی و دمای بالای بهاری پدیدار گشتند (Raymond et al., 2016). اگرچه در مقیاس ۲۴ ماهه رویداد بسیار شدیدی ثبت نشد، اما کمبودهای چندساله در دوره‌های ۲۰۰۹-۲۰۰۰ و ۲۰۲۱-۲۰۲۲ بر تاب‌آوری اکوسیستم فشار وارد کرده است (Bussotti and Pollastrini, 2020) که با افزایش دما و تشدید موج‌های گرما ناشی از فعالیت‌های انسانی مرتبط است (Seneviratne et al., 2021).

اقلیم نیمه‌مرطوب (Sub-humid)

در اقلیم نیمه‌مرطوب، نتایج آزمون من - کندال در تمامی مقیاس‌ها روند کاهشی معناداری را نشان داد. تحلیل فراوانی و شدت تجمعی در این اقلیم یک الگوی افزایشی با افزایش مقیاس زمانی را به تصویر می‌کشد، به‌طوری‌که بیشترین شدت تجمعی در مقیاس بلندمدت (۲۴ ماهه) مشاهده شد. سال ۲۰۲۱ شاهد شدیدترین و گسترده‌ترین ناهنجاری در این اقلیم بود که در مقیاس ۳ ماهه به ۲/۸۸- رسید و تا سال ۲۰۲۲ با ماندگاری زیر ۲/۱۶- تداوم یافت که بازتاب‌دهنده ترکیب کمبود بارش‌های طولانی‌مدت و افزایش دما است (Chen et al., 2020). همچنین، در مقیاس ۱۲ ماهه مقدار ۲/۲۹- و در مقیاس ۲۴ ماهه مقدار ۲/۲۰- ثبت شد که نشان‌دهنده یک خشکسالی بی‌سابقه و پایدار دو ساله است. این یافته‌ها با روندهای خشکسالی حدی در شمال چین از دهه ۱۹۹۰ (Zhang et al., 2019) هم‌راستا است و بر آسیب‌پذیری فزاینده مناطق نیمه‌مرطوب در برابر خشکسالی‌های مداوم تأکید دارد و اهمیت تحلیل‌های چندمقیاسی SPEI را برای مدیریت منابع آب برجسته می‌سازد.

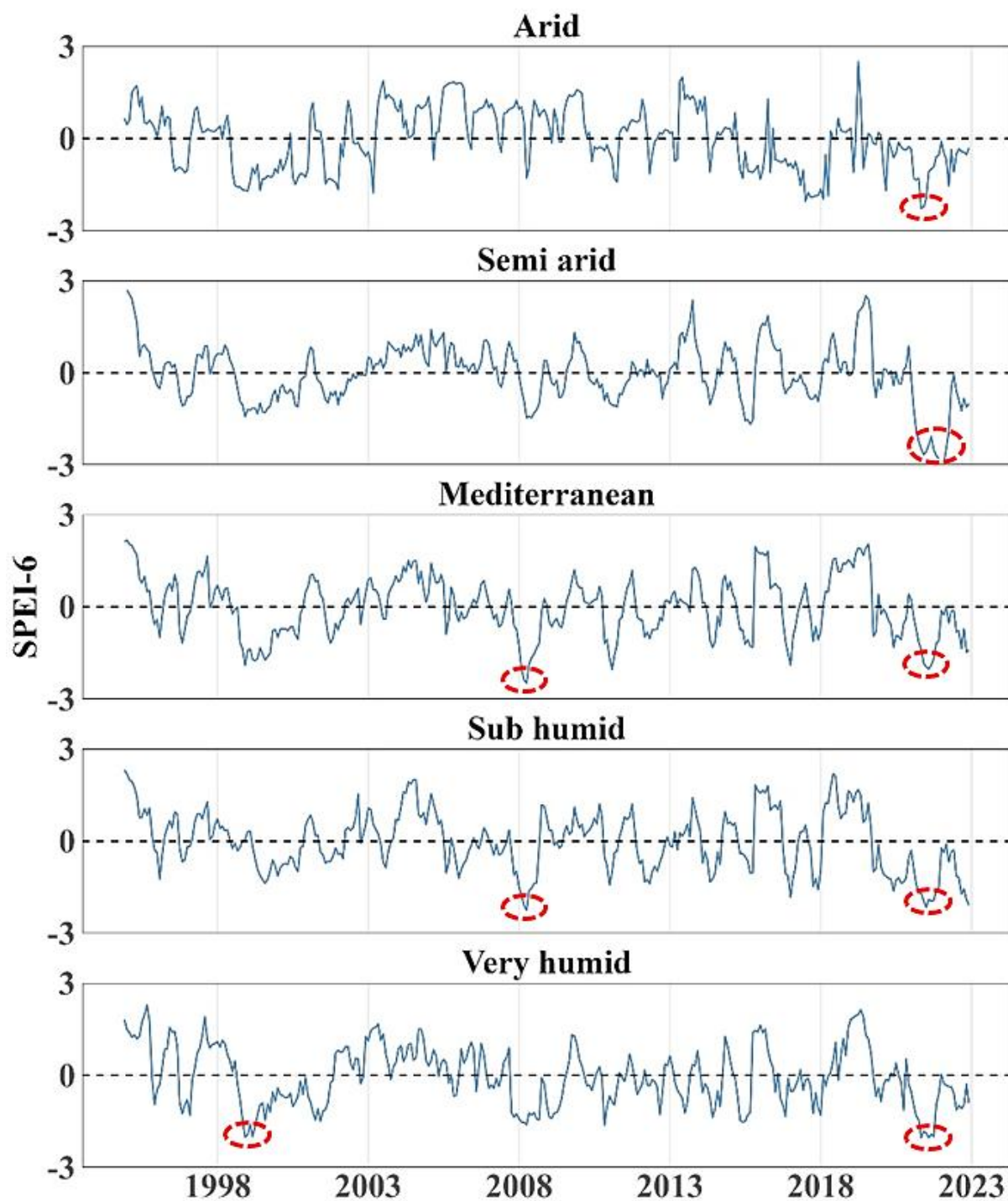
اقلیم بسیار مرطوب (Very-humid)

اقلیم‌های بسیار مرطوب علی‌رغم روند کاهشی معنادار در تمامی مقیاس‌های من - کندال، به دلیل بارش‌های بالا و ظرفیت تعدیل‌کنندگی قوی، عموماً شرایط هیدرولوژیکی پایداری را نشان می‌دهند (Trumbore et al., 2015). در این اقلیم، فراوانی و شدت تجمعی خشکسالی‌های بسیار شدید در مقیاس‌های بلندمدت (به‌ویژه ۲۴ ماهه) تقریباً صفر است. با این حال، در سال ۲۰۰۸ این منطقه به‌طور هم‌زمان با اقلیم‌های مدیترانه‌ای و نیمه‌مرطوب، ناهنجاری شدیدی را تجربه کرد. همچنین، سال ۲۰۲۱ یک شوک هیدروکلیماتیک بی‌سابقه را رقم زد که طی آن شاخص SPEI-3 به حداقل تاریخی ۳/۱۸- سقوط کرد. اگرچه در مقیاس ۲۴ ماهه شدت این ناهنجاری به ۱/۸۲- تعدیل شد، اما وقوع چنین رویداد حدی در مناطق مرطوب، مشابه رویدادهای گزارش شده در حوضه آمازون است (Marengo et al., 2024). این نتایج تأکید می‌کند که اگرچه خشکسالی‌های طولانی‌مدت در این مناطق غیرمعمول هستند، اما وقوع ناهنجاری‌های کوتاه‌مدت و حدی، ضرورت پایش چندمقیاسی SPEI برای شناسایی مخاطرات نوظهور اقلیمی را به اثبات می‌رساند (Otkin et al., 2018).



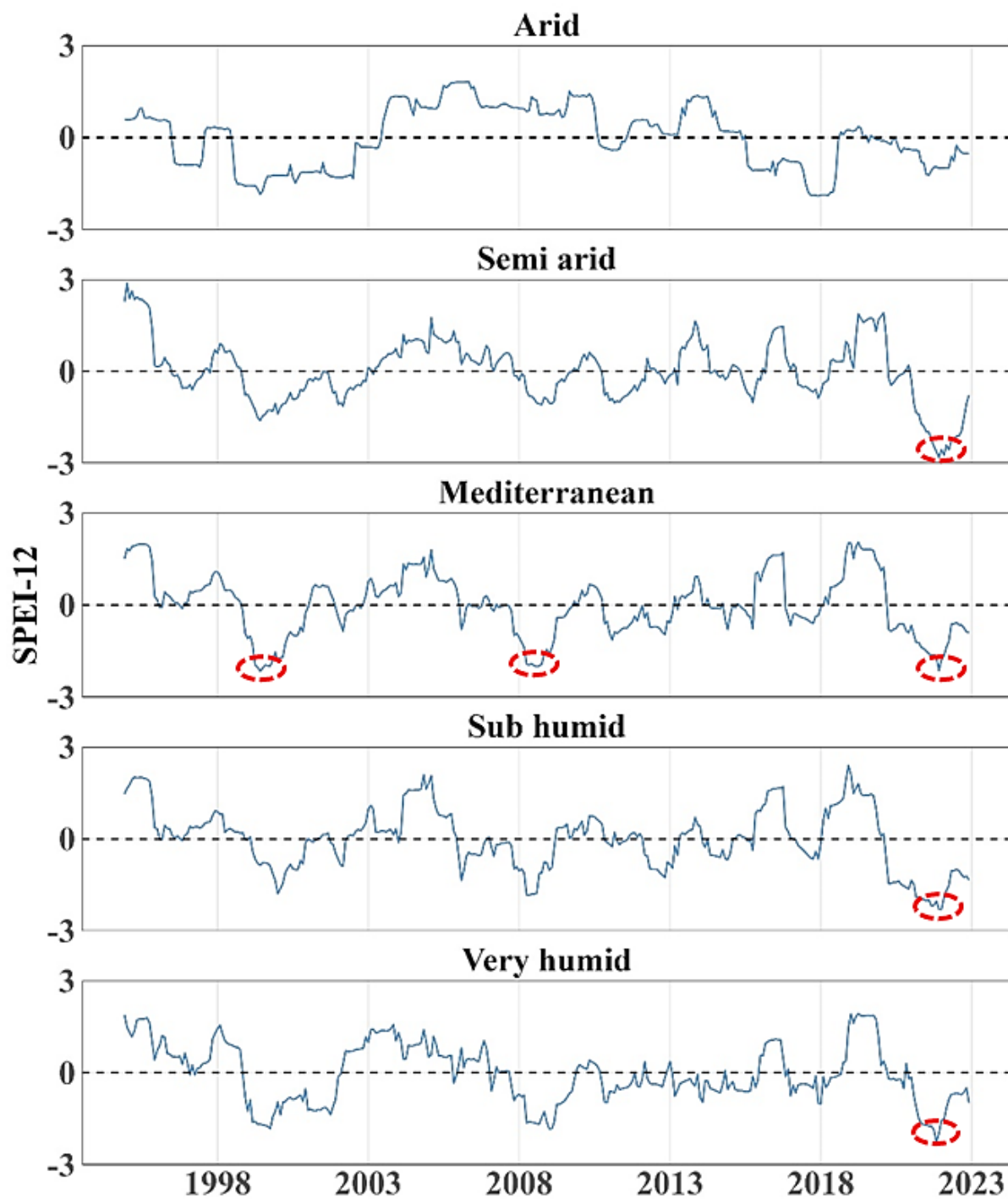
شکل ۶. نوسانات شاخص SPEI سه ماهه (SPEI-3) در پنج منطقه اقلیمی جنگل‌های زاگرس (۱۹۹۳-۲۰۲۲).

Fig 6. Temporal variations of the 3-month SPEI (SPEI-3) across five climatic zones in the Zagros forests (1993-2022).



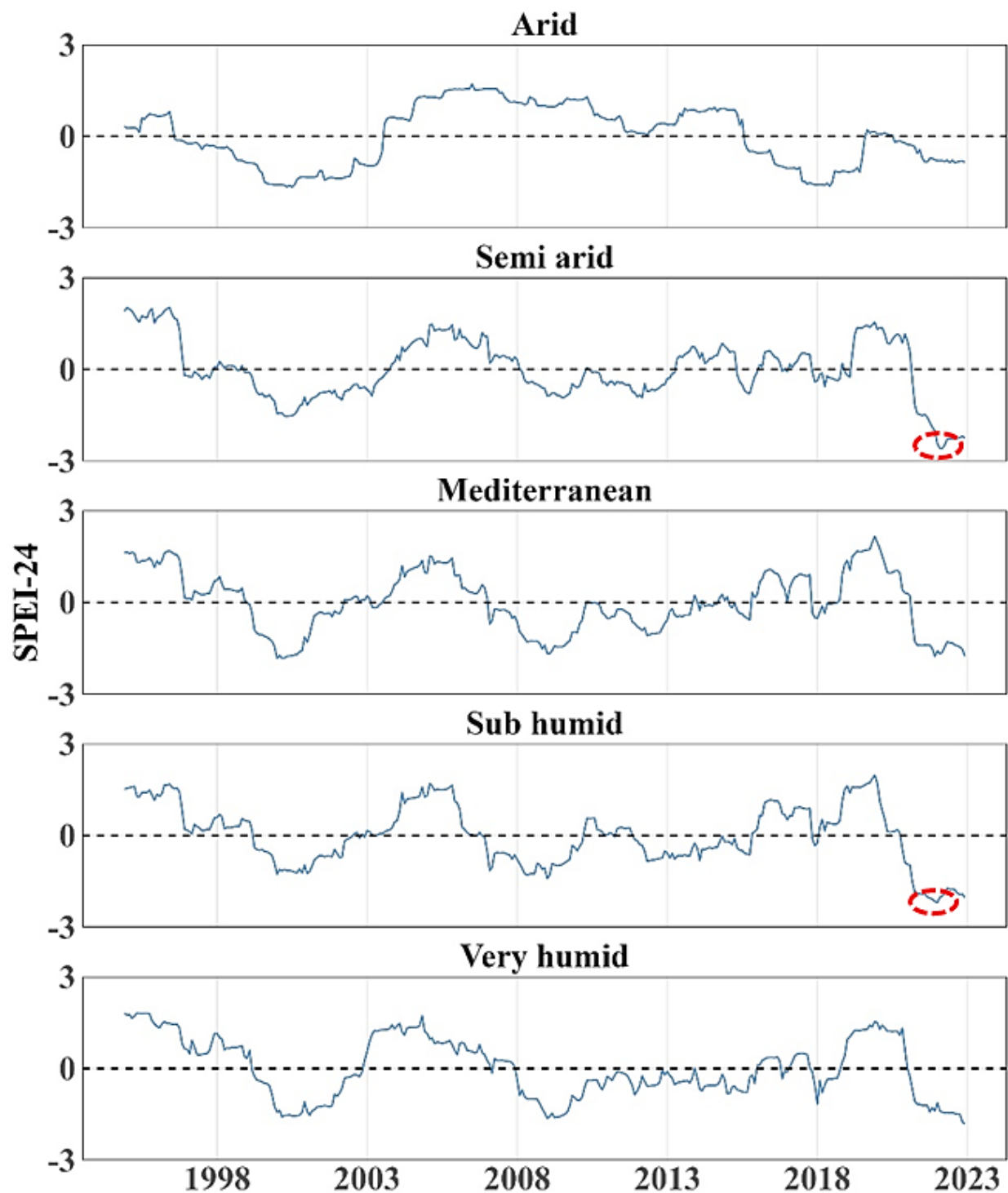
شکل ۷. نوسانات شاخص SPEI شش ماهه (SPEI-6) در پنج منطقه اقلیمی جنگل‌های زاگرس (۱۹۹۳-۲۰۲۲).

Fig 7. Temporal variations of the 6-month SPEI (SPEI-6) across five climatic zones in the Zagros forests (1993-2022).



شکل ۸. نوسانات شاخص SPEI دوازده ماهه (SPEI-12) در پنج منطقه اقلیمی جنگل‌های زاگرس (۱۹۹۳-۲۰۲۲).

Fig 8. Temporal variations of the 12-month SPEI (SPEI-12) across five climatic zones in the Zagros forests (1993-2022).



شکل ۹. نوسانات شاخص SPEI بیست و چهار ماهه (SPEI-24) در پنج منطقه اقلیمی جنگل‌های زاگرس (۱۹۹۳-۲۰۲۲).

Fig 9. Temporal variations of the 24-month SPEI (SPEI-24) across five climatic zones in the Zagros forests (1993-2022).

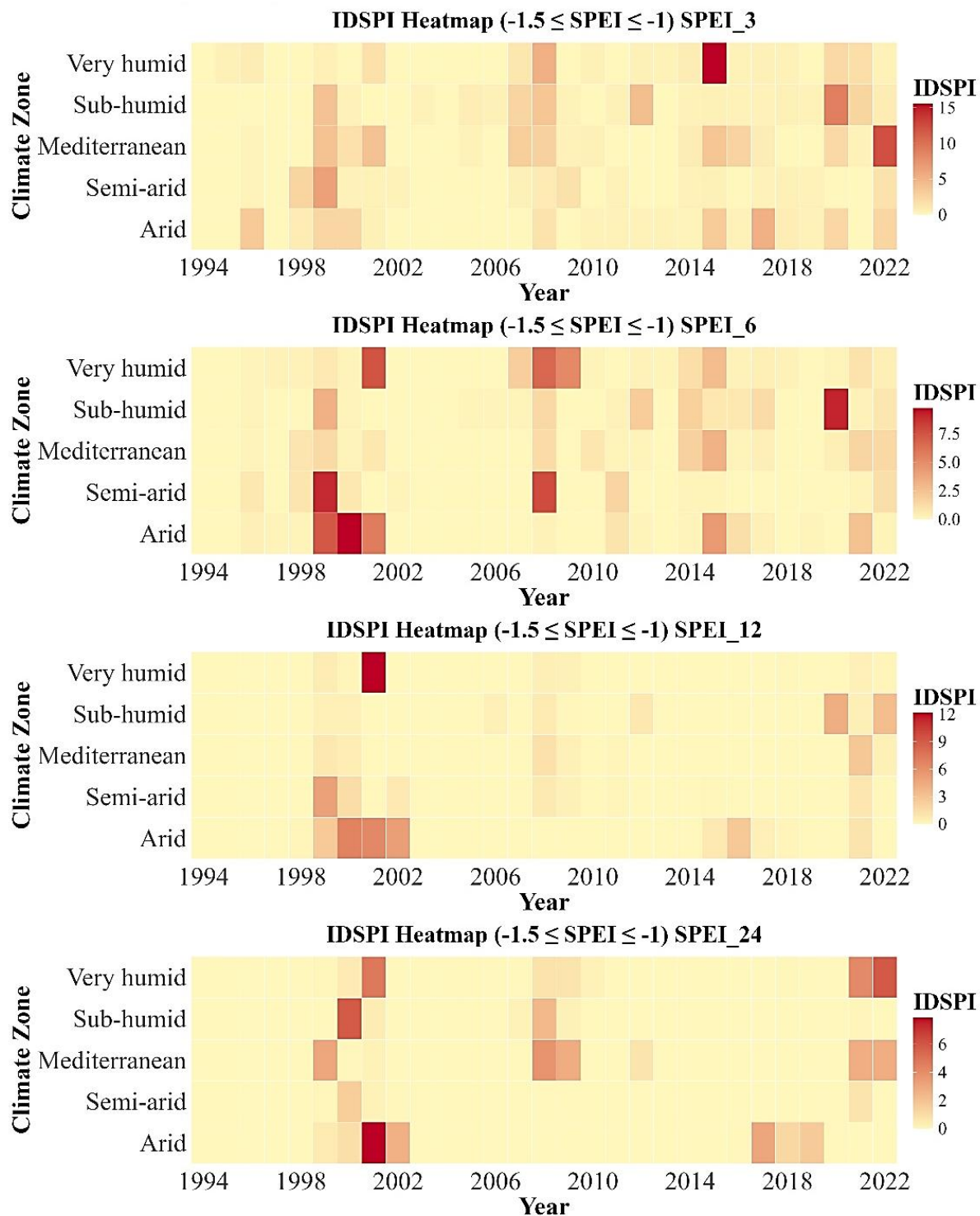
محاسبات IDSPI در پنج منطقه اقلیمی و چهار مقیاس زمانی مختلف

تحلیل‌های مربوط به خشکسالی‌های متوسط ($-1.0 \leq \text{SPEI} < -1.5$) در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (SPEI-3 و SPEI-6) نشان داد که در سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱، سیگنال‌های خشکسالی به‌طور هم‌زمانی در تقریباً تمامی اقلیم‌ها (از بسیار مرطوب تا خشک) ظاهر شده‌اند. این هم‌زمانی گسترده در مقیاس‌های کوتاه‌مدت، بیانگر نقش محرک‌های اقلیمی در مقیاس بزرگ است که بر کل منطقه اثر گذاشته‌اند (Yang et al., 2025). با این حال، رفتار این شاخص در مقیاس‌های بلندمدت (SPEI-12 و SPEI-24) متفاوت است؛ به‌طوری که در اواخر دوره آماری (۲۰۲۱-۲۰۲۲)، تمرکز خشکسالی‌های متوسط به‌طور محسوسی به سمت مناطق مرطوب و مدیترانه‌ای تغییر یافت (شکل ۱۰). این تغییر الگو، برخلاف دیدگاه‌های سنتی که بر تمرکز خشکسالی در اقلیم‌های خشک تأکید داشتند (Gu et al., 2022)، نشان‌دهنده گسترش ماهیت تجمعی خشکسالی به مناطق مرطوب‌تر در سال‌های اخیر است. این یافته با تصورات پیشین مبنی بر اینکه اقلیم‌های مرطوب عمدتاً تنها با نوسانات کوتاه‌مدت روبرو هستند (Guo et al., 2018)، در تضاد است و نشان‌دهنده یک تغییر فاز اقلیمی در اواخر دوره آماری است.

در سطح خشکسالی‌های شدید ($-1.5 \leq \text{SPEI} < -2.0$)، سیگنال‌های هم‌زمانی در سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ به‌ویژه بین اقلیم‌های خشک و مدیترانه‌ای در مقیاس‌های ۳ و ۶ ماهه بسیار مشهود بود. در حالی که در اواسط دهه ۲۰۰۰، اقلیم‌های مرطوب ظرفیت تعدیل‌کنندگی بیشتری از خود نشان دادند، اما در سال‌های پایانی دوره (۲۰۲۱-۲۰۲۲)، پایداری خشکسالی شدید به‌طور غیرمنتظره‌ای در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و مدیترانه‌ای تثبیت شد (شکل ۱۱). این نتیجه با دیدگاه‌های پیشین که تداوم خشکسالی شدید را عمدتاً محدود به اقلیم‌های خشک می‌دانستند (Bera et al., 2025)، در تضاد است. این وضعیت حاکی از آن است که ظرفیت تعدیل‌کنندگی اقلیم‌های مرطوب که در مطالعات گذشته (Deng et al., 2014) مورد تأکید بود، در مواجهه با خشکسالی‌های اخیر به‌شدت تضعیف شده است.

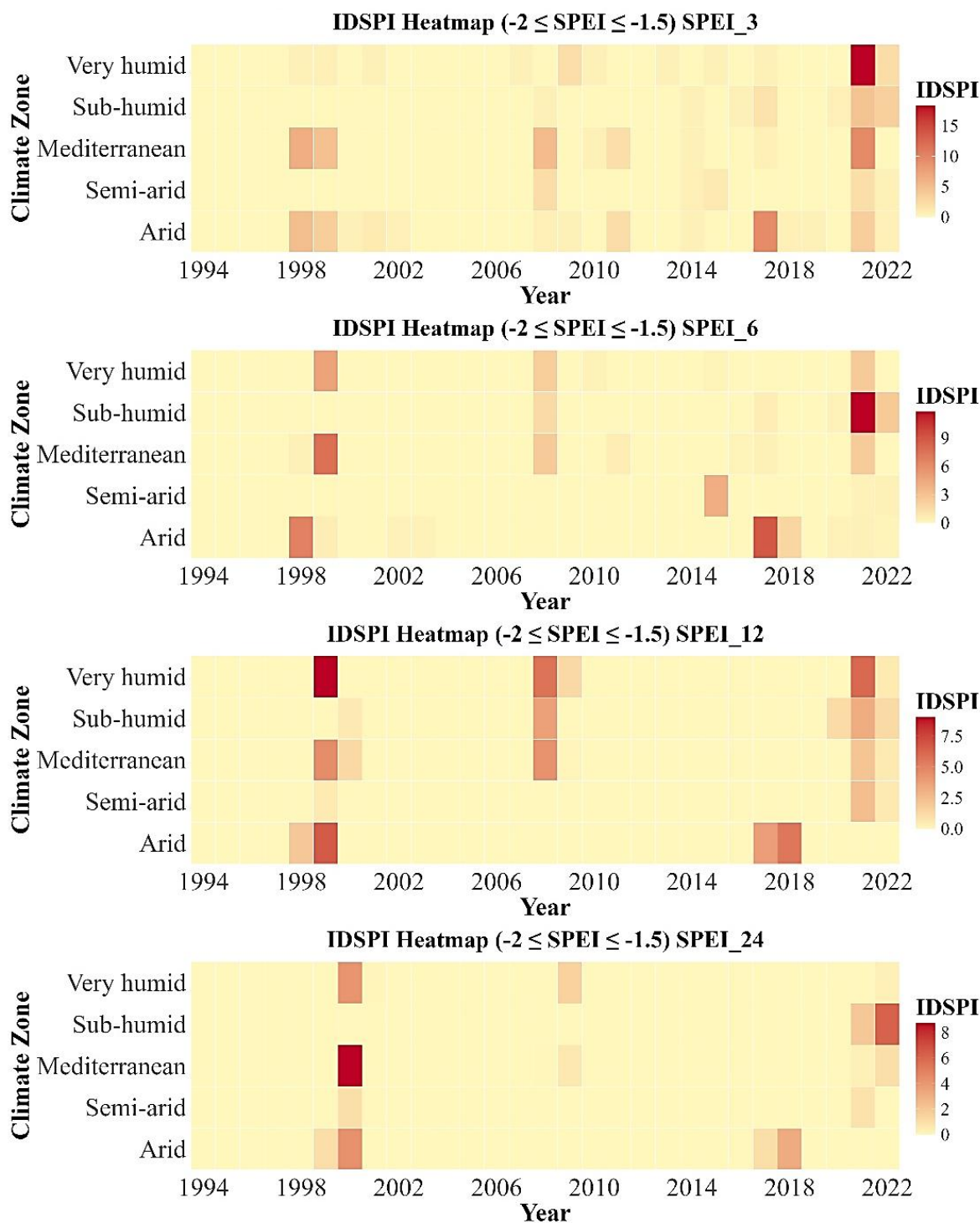
تحلیل شدت شاخص IDSPI در سطوح بسیار شدید ($\text{SPEI} \leq -2.0$) نشان داد که اقلیم نیمه‌خشک آسیب‌پذیرترین اقلیم در تمامی مقیاس‌های زمانی است و بیشترین شدت شاخص را به خود اختصاص داده است مشخص شده با رنگ قرمز تیره در (شکل ۱۲). این یافته، تفاوت معناداری با نتایج Safaei و همکاران (۲۰۲۵) دارد که این شدت را منحصرأ متعلق به مناطق خشک می‌دانستند. نتایج حاضر نشان می‌دهد که مناطق نیمه‌خشک به دلیل قرارگیری در نواحی انتقالی، پتانسیل بالاتری برای تجربه تنش‌های اکولوژیکی شدید دارند. همچنین، تحلیل مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه در اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و بسیار مرطوب نشان داد که در سال‌های اخیر، لکه‌های رنگی مربوط به خشکسالی شدید در این اقلیم‌ها گسترش یافته است که نشان‌دهنده سرایت خشکسالی‌های هیدرولوژیک و بلندمدت به مناطق مرطوب‌تر است (شکل ۱۲). این امر اثبات می‌کند که حتی مناطق مرطوب نیز در برابر سرایت خشکسالی‌های بلندمدت مصون نیستند.

الگوهای مشاهده‌شده در این پژوهش اثبات می‌کند که تأثیر خشکسالی، تابعی پویا از نوع اقلیم و شدت رویداد در طول زمان است. در حالی که در اقلیم‌های مرطوب، خشکسالی‌های متوسط (D1) در دهه‌های گذشته ماهیتی گذرا داشتند (Romero and Alfaro, 2025)، اما ظهور سیگنال‌های D3 (بسیار شدید) در این اقلیم‌ها در سال‌های پایانی، نشان‌دهنده عبور از آستانه‌های بحرانی است. این تحول در رفتار اقلیمی، ضرورت بازنگری در سیستم‌های پایش سنتی و اتخاذ رویکردهای مدیریت ریسک متناسب با تغییرات رفتاری جدید در هر اقلیم را، به‌ویژه با تأکید بر مقیاس‌های زمانی بلندمدت، دوچندان می‌کند (Guo et al., 2018).



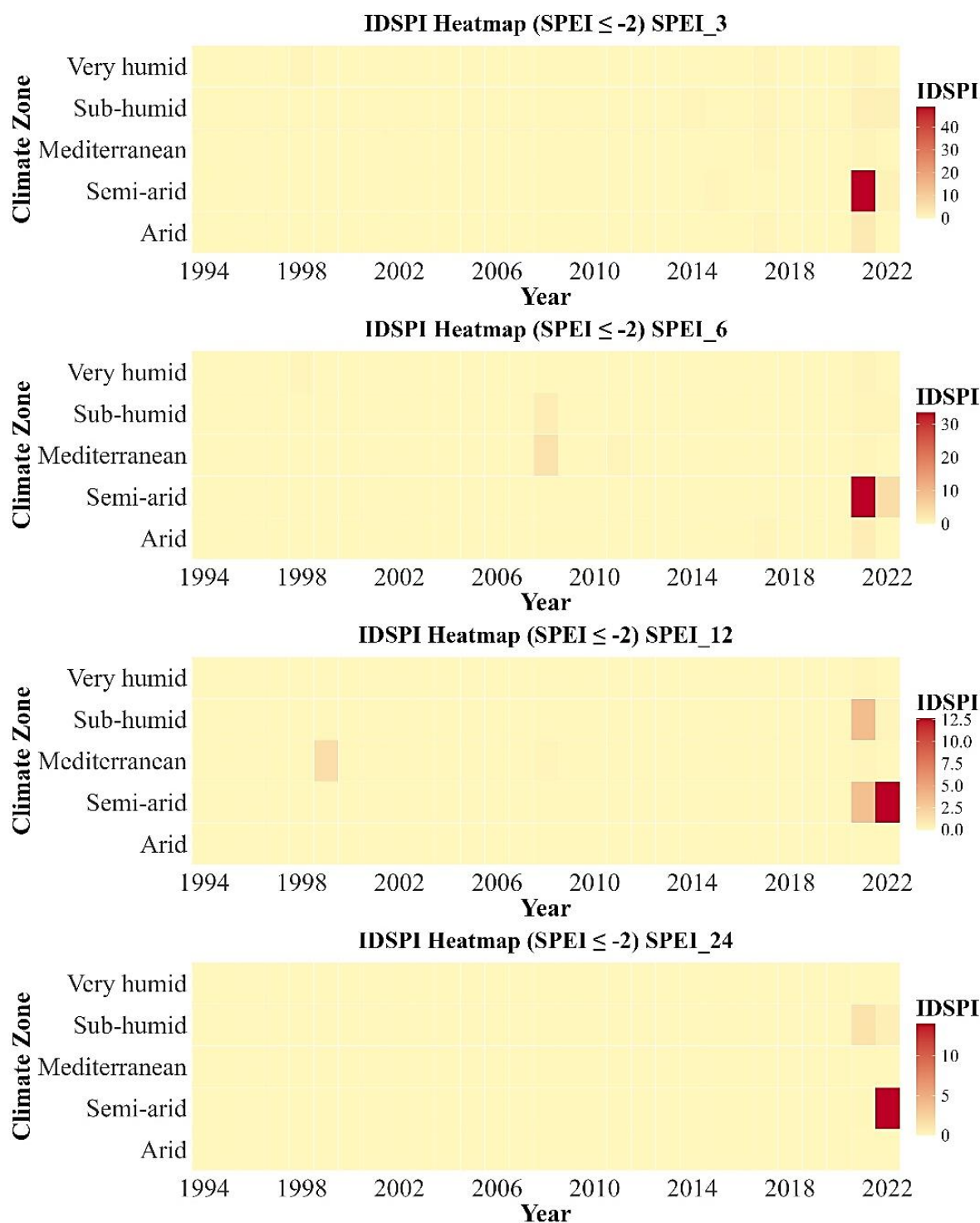
شکل ۱۰. نقشه حرارتی شاخص یکپارچه شدت، تداوم و پایداری خشکسالی (IDSPI) برای رویدادهای خشکسالی متوسط در پنج منطقه اقلیمی و چهار مقیاس زمانی (۳ تا ۲۴ ماهه) جنگل‌های زاگرس ۱۹۹۳-۲۰۲۲.

Fig 10. Heatmap of the Integrated Drought Severity-Persistence Index (IDSPI) for moderate drought events across five climatic zones and four temporal scales (3 to 24 months) in the Zagros forests (1993-2022).



شکل ۱۱. نقشه حرارتی شاخص IDSPI برای رویدادهای خشکسالی شدید در پنج منطقه اقلیمی و چهار مقیاس زمانی (۳ تا ۲۴ ماهه) جنگل‌های زاگرس ۱۹۹۳-۲۰۲۲.

Fig 11. Heatmap of IDSPI for severe drought events across five climatic zones and four temporal scales (3 to 24 months) in the Zagros forests (1993-2022).



شکل ۱۲. نقشه حرارتی شاخص IDSPI برای رویدادهای خشکسالی بسیار شدید در پنج منطقه اقلیمی و چهار مقیاس زمانی (۳ تا ۲۴ ماهه) جنگل‌های زاگرس ۱۹۹۳-۲۰۲۲.

Fig 12. Heatmap of IDSPI for extreme drought events across five climatic zones and four temporal scales (3 to 24 months) in the Zagros forests (1993-2022).

نتیجه‌گیری

این پژوهش با رویکردی چندمقیاسی، تغییر الگوی خشکسالی در جنگل‌های زاگرس را آشکار کرد. یافته‌های مبتنی بر شاخص IDSPI نشان داد که در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۲۲، پایداری خشکسالی‌های بلندمدت در مناطق نیمه‌مرطوب و مدیترانه‌ای به‌شدت افزایش یافته و ظرفیت تعدیل‌کنندگی این مناطق تضعیف شده است. همچنین، هم‌زمانی رویدادهای حدی در سال‌های ۱۹۹۹، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱، نقش محرک‌های اقلیمی کلان را در هدایت پویایی‌های منطقه برجسته نمود. در نهایت، نتایج اثبات می‌کند که خشکسالی از یک پدیده محصور در مناطق خشک، به شکل سرایت هیدرولوژیک به مناطق مرطوب گسترش یافته است. این تحول، بازنگری در استراتژی‌های مدیریت منابع آب و حفاظت از جنگل‌های بلوط را ضروری می‌سازد؛ لذا، طراحی سیستم‌های هشدار زودهنگام منطبق با مناطق اقلیمی و تأکید بر پایش بلندمدت در مناطق مرطوب، برای جلوگیری از تخریب‌های برگشت‌ناپذیر زیست‌محیطی توصیه می‌شود.

منابع

- Abedrabboh, O., Alfarra, M. R., Al-Ansari, T. & Fountoukis, C. (2025). Enhancing human thermal comfort in hot arid cities: A systematic review of urban heat island observations and mitigation strategies, *Building and Environment*, 283, 113398. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113398>
- Bera, D., Dutta, D., Poddar, S., & Kundu, A. (2025). Meteorological drought dynamics and climatic interactions in the arid and semi-arid regions of western India. *Journal of Environmental Management*, 387, 125836. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125836>
- Berhail, S., et al. (2021). Geostatistical assessment of meteorological drought in the context of climate change: case of the Macta basin (Northwest of Algeria), *Models and Earth Systems and Environment*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01055-7>
- Berhail, S. & Katipoğlu, O. M. (2023). Comparison of the SPI and SPEI as drought assessment tools in a semi-arid region: case of the Wadi Mekerra basin (northwest of Algeria), *Theoretical and Applied Climatology*, 154, 1373–1393. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04601-2>
- Bohner, T. & Diez, J. (2021). Tree resistance and recovery from drought mediated by multiple abiotic and biotic processes across a large geographic gradient, *Science of the Total Environment*, 789, 147744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147744>
- Bussotti, F. & Pollastrini, M. (2020). Opportunities and threats of Mediterranean evergreen sclerophyllous woody species subjected to extreme drought events, *Applied Sciences*, 10, 8458. <https://doi.org/10.3390/app10238458>
- Cavus, Y. & Aksoy, H. (2019). Critical Drought Severity/Intensity-Duration-Frequency Curves based on Precipitation Deficit, *Journal of Hydrology*, 580, 124312. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124312>
- Chen, Z., Zhou, T., Zhang, W., Li, P., & Zhao, S. (2020). Projected changes in the annual range of precipitation under stabilized 1.5°C and 2.0°C warming futures, *Earth's Future*, 8, e2019EF001435. <https://doi.org/10.1029/2019EF001435>
- Conacher, A. J. & Conacher, J. (1998). Introduction, Land Degradation in Mediterranean Environments of the World (eds. Conacher, A. J. & Sala, M.), *John Wiley & Sons*, New York, 1-10.
- Darvishi Boloorani, A., Kiavarz, M., Soltani, A. & Ranjbar, S. (2020). Spectral behavior of Persian oak under compound stress of water deficit and dust storm, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88, 102082. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102082>
- De Martonne, E. (1926). L'indice d'aridité, *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 3, 3–5.
- Deng, H. J., Chen, Y. N., Shi, X. & Li, W. H. (2014). Dynamics of temperature and precipitation extremes and their spatial variation in the arid region of northwest China, *Atmospheric Research*, 138, 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.12.001>
- Deng, S. M., Tan, X. Z., Liu, B. J., Yang, F., & Yan, T. (2022). A reversal in global occurrences of flash drought around 2000 identified by rapid changes in the standardized evaporative stress ratio, *Science of the Total Environment*, 848, 157427. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157427>
- Fu, K., & Wang, K. (2022). Quantifying flash droughts over China from 1980 to 2017, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD037152. <https://doi.org/10.1029/2022JD037152>
- Gebremedhin, M. A., Kahsay, G. H., & Fanta, H. G. (2018). Assessment of spatial distribution of aridity indices in Raya Valley, northern Ethiopia, *Applied Water Science*, 8, 229. <https://doi.org/10.1007/s13201018-0868-6>

Gu, X. Z., Ye, L., Xin, Q., Zhang, C., Zeng, F. Z., Nerantzaki, S. D. & Papalexiou, S. M. (2022). Extreme precipitation in China: A review on statistical methods and applications, *Advances in Water Resources*, 163, 104144. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104144>

Guo, H., Bao, A., Ndayisaba, F., Liu, T., Jiapaer, G., El-Tantawi, A. M., & De Maeyer, P. (2018). Space-time characterization of drought events and their impacts on vegetation in Central Asia, *Journal of Hydrology*, 564, 1165–1178. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.081>

Hadi, S. J. & Tombul, M. (2018). Comparison of spatial interpolation methods of precipitation and temperature using multiple integration periods, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46, 1187–1199. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0783-1>

Hayes, M., Wilhite, D.A., Svoboda, M., Vanyarkho, O. (1999). Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 429–438.

Helmi, M., & Shahidi, A. (2023). The use of SPI and SPEI indices in evaluating the effect of drought on the quality of surface water resources (case study: Kashafrud River). *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1), 83-96. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6023.1008>

Hernández-Lambrano, R. E., de la Cruz, D. R. & Sánchez-Agudo, J. Á. (2019). Spatial oak decline models to inform conservation planning in the Central-Western Iberian Peninsula, *Forest Ecology and Management*, 441, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.028>

Jazirehi, M. H. & Ebrahimi Rostaghi, M. (2003). Silviculture in Zagros, University of Tehran Press, Tehran

Kendall, M. G. (1975). Rank Correlation Methods, Charles Griffin & Company, London.

Kiani, M., Lashkari, H. H. & Ghaemi, H. (2019). The effect of Zagros Mountains on rainfall changes of Sudanese low-pressure system in western Iran, *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 1769–1779. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00636-5>

Kolahi-Azar, A. P. & Golriz, S. (2018). Multifractal topography: A tool to measure tectonic complexity in the Zagros Mountain Range, *Mathematical Geosciences*, 50, 431–445. <https://doi.org/10.1007/s11004-0179720-z>

Kueppers, L. M., Conlisk, E., Castanha, C., Moyes, A. B., Germino, M. J., de Valpine, P., Torn, M. S. & Mitton, J. B. (2017). Warming and provenance limit tree recruitment across and beyond the elevation range of subalpine forest, *Global Change Biology*, 23, 2383–2395. <https://doi.org/10.1111/gcb.13561>

Legesse, K. V. & Suryabhagavan, K. V. (2014). Remote sensing and GIS-based agricultural drought assessment in East Shewa Zone, Ethiopia, *Tropical Ecology*, 55, 349–363. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13500>

López-Sánchez, A., et al. (2019). Spatio-temporal variation of biotic and abiotic stress agents determines seedling survival in assisted oak regeneration, *Journal of Applied Ecology*, 56, 2663–2674. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13500>

Macháčová, M., et al. (2022). Oak decline caused by biotic and abiotic factors in Central Europe: A case study from the Czech Republic, *Forests*, 13, 1223. <https://doi.org/10.3390/f13081223>

Mann, H. B. (1945). Non-parametric test against trend, *Econometrica*, 13, 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>

Marengo, J., Cunha, A., Espinoza, J., Fu, R., Schöngart, J., Jimenez, J., Costa, M., Ribeiro, J., Wongchuig, S., & Zhao, S. (2024). The drought of Amazonia in 2023–2024, *American Journal of Climate Change*, 13, 567–597. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2024.133026>

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*, Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, Boston, 179–183.

Miralizadeh, A., Hejabi, S. and Kouchakzadeh, M. (2023). Investigation of the hydrological drought of groundwater using HDMI index in Urmia plain. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(3), 57-72. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6432.1025>. (In Persian)

Mishra, A. K., Singh, V. P. & Desai, V. R. (2009). Drought characterization: a probabilistic approach, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23, 41–55. <https://doi.org/10.1007/s00477-007-0194-2>

Moravec, V., Markonis, Y., Rakovec, O., Svoboda, M., Trnka, M., Kumar, R., & Hanel, M. (2021). Europe under multi-year droughts: how severe was the 2014–2018 drought period? *Environmental Research Letters*, 16, 034062. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe828>

Otkin, J. A., Svoboda, M., Hunt, E. D., Ford, T. W., Anderson, M. C., Hain, C., & Basara, J. B. (2018). Flash droughts: a review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99, 911–919. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0149.1>

Patel, R. & Patel, A. (2024). Evaluating the impact of climate change on drought risk in semi-arid region using GIS technique, *Results in Engineering*, 21, 101957. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101957>

Kumar, R. S., Arumugam, T., Anandakumar, C. R., Balakrishnan, S. & Rajavel, D. S. (2013). Use of plant species in controlling environmental pollution—a review. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 2, 52–63.

- Ramezani Etedali, H. & Koohi, S. (2025). Investigating the impact of climate change on aridity in Iran with a population exposure approach. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(1), 17-38. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079>. (In Persian)
- Raymond, F., Ullmann, A., Camberlin, P., Drobinski, P., & Chateau-Smith, C. (2016). Extreme dry spell detection and climatology over the Mediterranean Basin during the wet season, *Geophysical Research Letters*, 43, 7196–7204. <https://doi.org/10.1002/2016GL069758>
- Romero, D. & Alfaro, E. J. (2025). Systematic Biases in Tropical Drought Monitoring: Rethinking SPI Application in Mesoamerica's Humid Regions, *Meteorology*, 4, 18. <https://doi.org/10.3390/meteorology4030018>
- Safaei, V., Zarrin, A., & Mosaedi, A. (2025). Intensifying droughts and their relationship with temperature and precipitation extremes in Iran, *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 465. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05663-0>
- Sagheb-Talebi, K., Pourhashemi, M. & Sajedi, T. (2014). Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7371-4>
- Samaci, S. & Alijanian, M. (2025). A comprehensive spatiotemporal and risk reduction drought assessment study utilizing the SPEI index for Urmia Lake Basin, Iran, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102203. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102203>
- Scholes, R. J. (2020). The future of semi-arid regions: A weak fabric unravels, *Climate*, 8, 43. <https://doi.org/10.3390/cli8030043>
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M. & Zhou, B. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 1513–1766. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- Soheili, F., Heydari, M., Woodward, S., & Naji, H. R. (2023). Adaptive mechanism in *Quercus brantii* Lindl. leaves under climatic differentiation: morphological and anatomical traits, *Scientific Reports*, 13, 3580. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30762-1>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review*, 38, 55–94.
- Tramblay, Y. & Hertig, E. (2018). Modelling extreme dry spells in the Mediterranean region in connection with atmospheric circulation, *Atmospheric Research*, 202, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.015>
- Trumbore, S., Brando, P., & Hartmann, H. (2015). Forest health and global change, *Science*, 349, 814–818.
- Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F., Beguería, S., El Kenawy, A., Gimeno-Sotelo, L., Franquesa, M., Azorín-Molina, C., Andrés-Martín, M. & Halifa-Marín, A. (2025). Atmospheric drought indices in future projections, *Nature Water*, 3, 374–387. <https://doi.org/10.1038/s44221-025-00416-9>
- 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, 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vilà-Cabrera, A., Martínez-Vilalta, J., Galiano, L. & Retana, J. (2013). Patterns of Forest decline and regeneration across Scots pine populations, *Ecosystems*, 16, 323–335.
- Wang, Q., Wu, J., Lei, T., He, B., Wu, Z., Liu, M., Mo, X., Geng, G., Li, X., Zhou, H., & Liu, D. (2014). Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale, *Quaternary International*, 349, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.021>
- Wen, X., Tu, Y. H., Tan, Q. F., Li, W. Y., Fang, G. H., Ding, Z. Y., & Wang, Z. N. (2020). Construction of 3D drought structures of meteorological drought events and their spatio-temporal evolution characteristics, *Journal of Hydrology*, 590, 125539. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125539>
- Yang, Y., Sun, H. G., Zhang, Y., Yu, Z., Gu, H. & Gu, X. (2025). Regional patterns and long-term persistence of extreme precipitation in China (1959–2015), *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 6, 102625. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102625>
- Zarafshar, M., Neghdar, S., Jahanbazi Gojani, H., Pourhashemi, M., & Abbasi. (2020). Drying of pure masses of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.) in the forests of South Zagros, Koohmoreh Sorkhi region of Fars province, *Iranian Forest Journal*, 12, 291-303.
- Zhang, H. S., Yang, X. L. & Ren, L. L. (2024). Response of typical large-scale persistent drought events in China to atmospheric circulation, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 40, 124–132.
- Zhang, J. H., Chen, Q. & Zhang, Q. (2019). Extreme drought in the recent two decades in northern China resulting from Eurasian warming, *Climate Dynamics*, 52, 2885–2902. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4312-2>

Zhang, Q., Shi, R., Singh, V. P., Xu, C. Y., Yu, H., Fan, K. & Zhang, Z. (2023a). Spatiotemporal characteristics and forecasting of short-term meteorological drought in China, *Journal of Hydrology*, 624, 129924. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129924>

Zhang, R., Chen, X. Y., Zhang, Z., & Shi, P. (2023b). The first high spatial resolution multi-scale daily SPI and SPEI raster dataset for drought monitoring and evaluation over China from 1979 to 2018, *Big Earth Data*, 7, 860–885. <https://doi.org/10.1080/20964471.2022.2148331>

مجله دانش آب و خاک