



Differential impact of precipitation trends on water security across Iran's heterogeneous climatic zones

Faeze Shoja¹ | Ali Reza Karbalaee Doree^{2✉} | Saeideh Ashrafi³ | Muhammad Kamangar⁴

1. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Teheran, Iran. E-mail: faeze.shoja@yahoo.com

2. Corresponding Author, Department of Climatology Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: karbalaee@khu.ac.ir

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. E-mail: s.ashrafi1984@yahoo.com

4. Department Remote Sensing and GIS, Faculty of Literature, Ferdowsi University, Mashhad, Iran. E-mail: mohamad.kamangar63@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 25 September 2025

Received in revised form 21 November 2025

Accepted 25 November 2025

Keywords:

Adaptive water management,
Climate change,
Köppen-Geiger classification,
Water security,
Water vulnerability.

ABSTRACT

In the context of arid and semi-arid regions characterised by pronounced climatic heterogeneity, such as Iran, ensuring water security is inherently complex. However, monolithic, national-scale assessments frequently fail to capture the differential responses of distinct climatic zones to hydrological changes. This study addresses this gap by conducting a differential analysis of the impact of precipitation trends from 1970 to 2021 on the Aqueduct 4.0 water security index across Iran's diverse climatic zones, as defined by the Köppen-Geiger classification. Following the detection of precipitation trends using the Mann-Kendall test, an Analysis of Covariance (ANCOVA) model was employed to test the moderating effect of climate type on the relationship between these two variables. The findings indicated a statistically significant interaction effect between precipitation trend and climate type ($p \approx 0.03$), thereby substantiating the central hypothesis of a heterogeneous water security response. In order to quantify the differential impact, a sensitivity index was calculated, which identified the Mediterranean (Csa), hot semi-arid (BSh), and hot desert (BWh) climates as the most vulnerable to precipitation variability, with sensitivity indices of 398, 190, and 185, respectively. Conversely, other climatic zones demonstrated minimal sensitivity, indicating enhanced resilience or the predominance of alternative factors, such as anthropogenic pressures, on the system. These findings emphasise the limitations of a universalised approach and underscore the necessity of formulating region-specific, climate-informed water management strategies to ensure sustainable water security in Iran.

Cite this article: Shoja, F., Karbalaee Doree, A.R., Ashrafi, S., & Kamangar, M. (2025). Differential impact of precipitation trends on water security across Iran's heterogeneous climatic zones. *Journal of Natural Environment*, 78 (4), 537-550.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.402103.2839>



تحلیل تفاضلی اثر روند بارشی بر امنیت آبی در اقلیم‌های ناهمگون ایران

فائزه شجاع^۱ | علیرضا کربلائی درئی^۲ | سعیده اشرفی^۳ | محمد کمانگر^۴

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: faeze.shoja@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، گروه اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران. رایانامه: karbalaee@khu.ac.ir
۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: s.ashrafi1984@yahoo.com
۴. گروه سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، دانشکده ادبیات، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران. رایانامه: mohamad.kamangar63@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴ کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری آبی، امنیت آبی، تغییر اقلیم، طبقه‌بندی کوپن-گایگر، مدیریت تطبیقی آب.	امنیت آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با اقلیم‌های ناهمگون مانند ایران، یک چالش چندبعدی است. با این حال، ارزیابی‌های کلان اغلب پاسخ‌های متفاوت مناطق اقلیمی به تغییرات هیدرولوژیک را نادیده می‌گیرند. این مطالعه با هدف پر کردن این خلأ، به تحلیل تفاضلی اثر روند بارش طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۲۱ بر شاخص امنیت آبی (Aqueduct 4.0) در پهنه‌های اقلیمی متمایز ایران براساس طبقه‌بندی کوپن-گایگر می‌پردازد. بنابراین، پس از آشکارسازی روندهای بارش با آزمون من-کندال، از مدل تحلیل کوواریانس (ANCOVA) برای آزمون اثر تعدیل‌گر اقلیم بر رابطه میان این دو متغیر استفاده شد. نتایج، یک اثر تعاملی آماری معنی‌دار بین روند بارش و نوع اقلیم را آشکار ساخت (۰/۰۳) (۰/۰۳)، که فرضیه اصلی تحقیق مبنی بر پاسخ ناهمگون امنیت آبی را تأیید می‌کند. در ادامه برای کمی‌سازی این تفاوت، یک شاخص حساسیت محاسبه گردید که نشان داد اقلیم‌های مدیترانه‌ای با تابستان گرم (Csa)، نیمه‌خشک گرم (BSh) و بیابانی گرم (BWh) با ثبت مقادیر حساسیت به‌ترتیب ۳۹۸، ۱۹۰ و ۱۸۵، آسیب‌پذیرترین مناطق در برابر نوسانات بارش هستند. در مقابل، سایر اقلیم‌ها حساسیت بسیار پایینی نشان دادند که حاکی از تاب‌آوری بیشتر یا غلبه عوامل دیگری چون مدیریت انسانی بر سیستم است. این یافته‌ها بر ناکارآمدی سیاست‌های یکپارچه تأکید کرده و ضرورت تدوین راهبردهای مدیریت منابع آب منطقه‌ای و مبتنی بر شواهد اقلیمی را برای تضمین امنیت آبی پایدار در ایران برجسته می‌سازد.

استناد: شجاع، فائزه؛ کربلائی درئی، علیرضا؛ اشرفی، سعیده؛ و کمانگر، محمد (۱۴۰۴). تحلیل تفاضلی اثر روند بارشی بر امنیت آبی در اقلیم‌های ناهمگون ایران.

محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۴)، ۵۵۰-۵۳۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.402103.2839>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

امنیت آبی، به معنای تضمین دسترسی پایدار به آب با کمیت و کیفیت کافی برای حفظ سلامت انسان، پایداری اکوسیستم‌ها و تداوم توسعه اقتصادی (Grey and Sadoff, 2007)، به یکی از محورهای اصلی چالش‌های پایداری در قرن بیست و یکم تبدیل شده است. این مفهوم در بطن خود، تعاملی پیچیده میان سیستم‌های طبیعی و انسانی را در بر می‌گیرد که تحت تأثیر فشارهای چندگانه و فزاینده‌ای قرار دارد. از یک سو، پیامدهای تغییر اقلیم با ایجاد دگرگونی در رژیم‌های هیدرولوژیک، به ویژه از طریق تغییر در الگوهای مکانی-زمانی بارش، در حال برهم زدن تعادل عرضه آب هستند (IPCC, 2021; Rawat et al., 2021). این تغییرات نه تنها میانگین دسترسی به منابع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه با افزایش فرکانس و شدت پدیده‌های حدی، عدم قطعیت و ریسک را در مدیریت منابع آب تشدید می‌کنند (Haddeland et al., 2014; Zhou et al., 2022). از سوی دیگر، عوامل انسانی شامل رشد جمعیت، توسعه شهری، و تقاضای روزافزون بخش‌های کشاورزی و صنعتی، فشار بر منابع محدود آب را به شکل بی‌سابقه‌ای افزایش داده‌اند (Paudel et al., 2021; Maja and Ayano, 2021). بنابراین، امنیت آبی یک متغیر ایستا نیست، بلکه یک وضعیت پویاست که از برآیند فشارهای اقلیمی، اجتماعی-اقتصادی و کارایی سیاست‌های مدیریتی شکل می‌گیرد (Qin et al., 2019). این چالش جهانی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند ایران، با شدت بیشتری نمود پیدا می‌کند. ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود در کمربند خشک جهانی، به طور طبیعی با محدودیت منابع آب مواجه است و در طبقه‌بندی‌های جهانی، در زمره کشورهای دارای تنش آبی شدید و کمبود مطلق آب قرار گرفته است (Madani, 2014). شواهد علمی مستدل نشان می‌دهند که این آسیب‌پذیری ذاتی در دهه‌های اخیر به دلیل روندهای منفی هیدروکلیمایی تشدید شده است. مطالعات متعدد، کاهش آماری معنی‌دار در میزان بارش و تعداد روزهای بارانی در پهنه‌های وسیعی از کشور را ثبت کرده‌اند (Alizadeh and Najafi, 2017; Torabi Poudeh et al., 2018; Asakereh et al., 2021). این روندها، همراه با افزایش دما و نرخ تبخیر و تعرق، منجر به کاهش منابع آب تجدیدپذیر و افت سطح آب‌های زیرزمینی شده و وضعیت امنیت آبی کشور را در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی در سطح "غیرقابل قبول" قرار داده است (Talebi, 2023; Azizi et al., 2024). در پاسخ به این بحران، جامعه علمی تلاش‌های گسترده‌ای را برای درک و ارزیابی ابعاد مختلف امنیت آبی صورت داده است. در سطح جهانی، تحقیقات از چارچوب‌های مفهومی که بر پیچیدگی، عدم قطعیت و ریسک‌های نوظهور ناشی از تعامل سیستم‌های انسانی و طبیعی تأکید دارند (Kumar, 2015; Wheater and Gober, 2015)، تا مرورهای جامعی که تحولات این مفهوم را در یک محیط در حال تغییر بررسی می‌کنند (Mishra et al., 2022)، گسترش یافته است. مبانی نظری مورد بحث در مطالعات کاربردی متعددی در سراسر جهان عملیاتی شده‌اند. برای مثال، محققان تأثیر تغییر اقلیم بر امنیت آبی در مناطق آسیب‌پذیری مانند دلتای نیل در مصر (Alkhawaga et al., 2022)، تأثیر ذوب یخچال‌ها بر منابع آب در آسیای مرکزی (Tang et al., 2022) و اثر افزایش تقاضا و تغییر اقلیم بر چندین حوضه آبریز در برزیل را مدل‌سازی کرده‌اند (Ballarin et al., 2023). این مطالعات به طور مشترک نشان می‌دهند که اگرچه محرک‌های بحران آب جهانی هستند، اما تأثیرات و پاسخ‌های آن کاملاً وابسته به زمینه و ویژگی‌های منطقه‌ای است.

در ایران نیز، ادبیات پژوهشی قابل توجهی در این زمینه شکل گرفته است. برخی مطالعات به ارزیابی وضعیت امنیت آبی در مقیاس استانی با استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند شاخص فقر آبی (Salami and Taheri, 2019) و روش‌های تحلیل چندمعیاره پرداخته‌اند که عموماً وضعیت بحرانی استان‌های واقع در نواحی مرکزی و شرقی را تأیید می‌کنند (Salemi Sarmast, 2021; Maleki and Zahraie, 2021). مطالعات پیشرفته‌تر با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و مدل‌سازی هیدرولوژیک، روند کاهشی قابل توجه ذخایر آب کل کشور را به صورت کمی تأیید کرده و سناریوهای نگران‌کننده‌ای از تشدید این روندها در آینده ارائه داده‌اند (Zarrin et al., 2023). با این حال، نقطه ضعف مشترک این پژوهش‌ها، عدم انطباق واحد تحلیل (مرزهای سیاسی-اداری) با واحد فرآیند (مرزهای طبیعی و اقلیمی) است؛ چرا که پدیده‌های هیدرولوژیک و اکوسیستمی در عمل به مرزهای طبیعی و اقلیمی محدود می‌شوند.

ایران کشوری با ناهمگونی اقلیمی چشمگیر است که طیف وسیعی از مناطق اقلیمی، از بیابان‌های داغ (BWh) تا اقلیم‌های قاره‌ای سرد (Dsa, Dsb)، را براساس طبقه‌بندی کوپن-گایگر در بر می‌گیرد. هر یک از این مناطق اقلیمی دارای دینامیک‌های

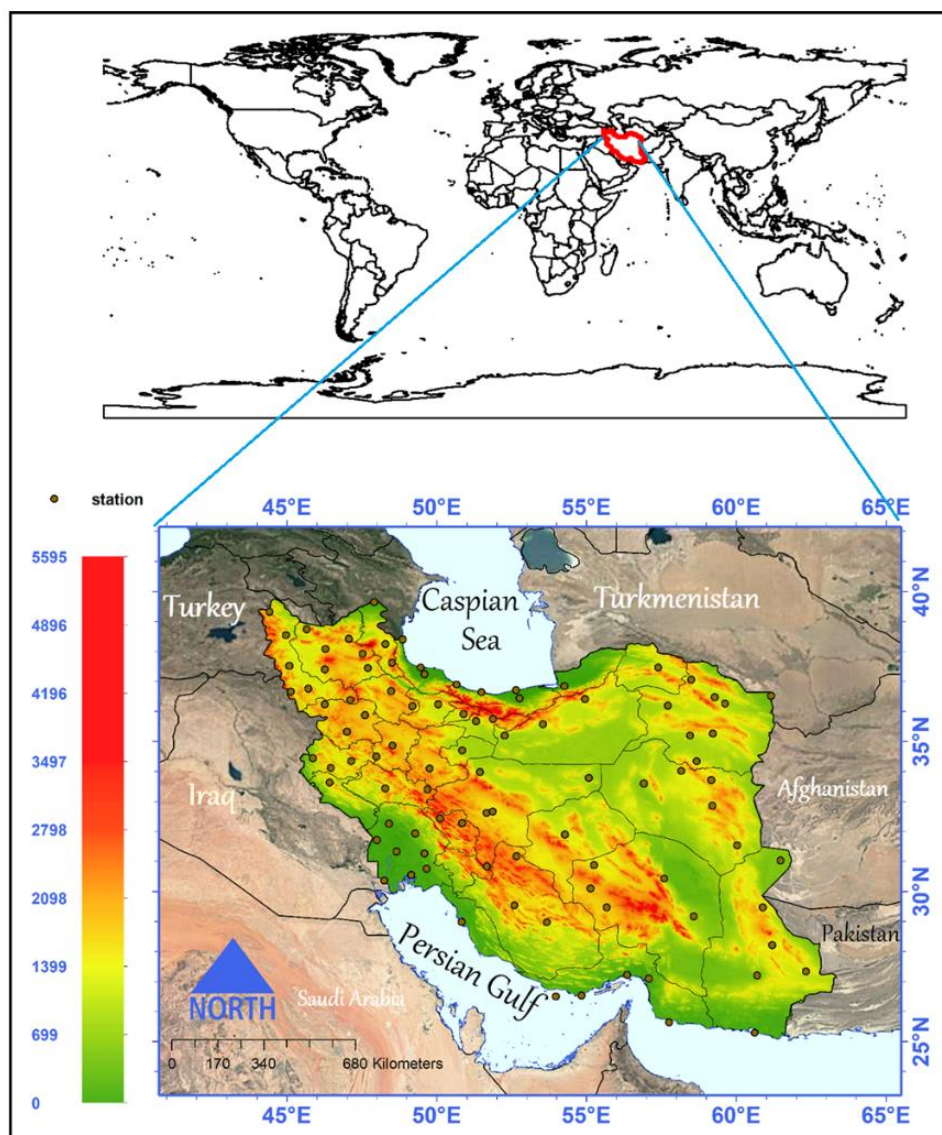
هیدرولوژیک، رژیم‌های بارش و آستانه‌های تاب‌آوری متفاوتی هستند. ناهمگونی ذکر شده، این فرضیه بنیادین را مطرح می‌کند که حساسیت امنیت آبی به یک محرک یکسان مانند روند بارش، نمی‌تواند در سراسر کشور ثابت باشد. نادیده گرفتن این تفاوت‌ها می‌تواند منجر به تدوین سیاست‌های مدیریتی ناکارآمدی شود که برای برخی مناطق بیش از حد محافظه‌کارانه و برای برخی دیگر ناکافی باشند (AghaKouchak et al., 2021).

براساس چارچوب حساسیت تفاضلی سیستم‌های اکولوژیک-اجتماعی به تنش‌های اقلیمی (IPCC, 2022)، تأثیر روند بارش بر امنیت آبی در مناطقی با ویژگی‌های اقلیمی متفاوت، یکسان نخواهد بود؛ زیرا اقلیم به‌عنوان یک عامل تعدیل‌کننده بنیادین عمل می‌کند و واکنش سیستم آبی به یک تغییر مشابه در بارش، تابعی از پارامترهای زمینه‌ای اقلیمی (مانند دما، تبخیر-تعرق بالقوه، و الگوی ذخیره/ذوب برف) است. این رویکرد تبیین می‌کند که چرا یک کاهش یکسان در بارش ممکن است در یک اقلیم خشک گرم (BWh) پیامدهای بحرانی‌تری نسبت به یک اقلیم نیمه‌خشک سرد (BSk) داشته باشد، و فرضیه اصلی پژوهش مبنی بر وجود تفاوت معنی‌دار در حساسیت امنیت آبی به روند بارش در میان اقلیم‌های مختلف را مستقیماً از مبنای نظری پشتیبانی می‌کند. با تعریف واحدهای تحلیل براساس مناطق اقلیمی (طبق طبقه‌بندی کوپن-گایگر)، می‌توان اثر مستقل روند بارش را در شرایطی که سایر عوامل ساختاری و محیطی اقلیمی کنترل شده‌اند، به‌صورت مقایسه‌پذیر و کمی ارزیابی کرد؛ پژوهش حاضر از این دیدگاه، تحلیلی سیستماتیک از رابطه علی «روند بارش-امنیت آبی» را در گروه‌های اقلیمی مجزا ارائه می‌دهد، که با بکارگیری روش‌های آماری مانند تحلیل واریانس (ANOVA) یا مدل‌های رگرسیونی با اثرات تعاملی (روند بارش و اقلیم)، قابل آزمون‌سازی است. در حالی که مطالعات متعددی رابطه کلی بارش و امنیت آبی را تأیید کرده‌اند، تحلیلی سیستماتیک از تفاوت در این رابطه در میان مناطق اقلیمی متمایز ایران هنوز انجام نشده است. بنابراین این پژوهش، فراتر از تأیید کیفی این ارتباط، به دنبال پاسخ به این پرسش است که: «آیا اثر روند بارش بر شاخص امنیت آبی در مناطق اقلیمی مختلف ایران براساس طبقه‌بندی کوپن-گایگر، از نظر آماری تفاوت معنی‌داری دارد و کدام مناطق اقلیمی بیشترین حساسیت را به تغییرات بارش از خود نشان می‌دهند؟» پرسشی که مستقیماً از خلأ شناسایی‌شده در ادبیات و پشتوانه نظری رویکرد حساسیت تفاضلی استنتاج شده است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه: محدوده جغرافیایی این پژوهش، کشور ایران است که در جنوب غربی آسیا بین عرض‌های جغرافیایی 25° تا 40° شمالی و طول‌های جغرافیایی 44° تا 63° شرقی واقع شده است (شکل ۱). موقعیت ایران عمدتاً در کمربند اقلیمی خشک و نیمه‌خشک جهانی قرار دارد (Alizadeh, 2009) که این ویژگی به‌خودی خود منجر به محدودیت ذاتی در منابع آب می‌شود. با این حال، ویژگی برجسته این منطقه، ناهمگونی فضایی شدید در متغیرهای اقلیمی است که عمدتاً توسط توپوگرافی پیچیده کشور کنترل می‌شود. دو سامانه کوهستانی اصلی، رشته کوه البرز با امتداد شرقی-غربی در شمال و رشته کوه زاگرس با امتداد شمال‌غربی به جنوب شرقی در غرب، به‌عنوان موانع اوروگرافیک اصلی عمل می‌کنند. این ساختارهای توپوگرافیک، یک گرادیان اقلیمی مشخص را در سراسر کشور به‌وجود می‌آورند. دامنه‌های بادگیر این رشته‌کوه‌ها، به‌ویژه سواحل جنوبی دریای خزر که بین دریا و رشته کوه البرز محصور شده‌اند، بیشترین میزان بارش سالانه را دریافت می‌کنند. در مقابل، نواحی وسیعی در فلات مرکزی و شرق کشور، مانند دشت کویر و دشت لوت، در منطقه سایه‌باران این سامانه‌های کوهستانی قرار گرفته و با اقلیم‌های فراخشک و کمبود شدید بارش مواجه هستند. دامنه‌های غربی و جنوب غربی رشته کوه زاگرس که تحت تأثیر سامانه‌های بارشی مدیترانه‌ای و دریای سرخ قرار دارند، دومین منطقه پربارش کشور را تشکیل می‌دهند. در عین حال، مناطق ساحلی جنوب در حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، علی‌رغم رطوبت نسبی بالا، بارش سالانه اندکی را تجربه می‌کنند (Kamali et al., 2020; Namroodi et al., 2021). این ناهمگونی شدید و وجود گرادیان‌های اقلیمی برجسته، از سواحل مرطوب خزری تا بیابان‌های مرکزی و کوهستان‌های سرد غربی، ایران را به یک آزمایشگاه طبیعی ایده‌آل برای مطالعه پاسخ‌های تفاضلی سیستم‌های هیدرولوژیک به تغییرات اقلیمی تبدیل می‌کند. وجود همزمان اقلیم‌های متعدد و متمایز در یک چارچوب سیاسی واحد، فرصتی منحصر به فرد برای ارزیابی این فرضیه فراهم می‌آورد که حساسیت امنیت آبی به روندهای بارشی، تابعی از ویژگی‌های اقلیمی

منطقه‌ای است. بنابراین، تحلیل داده‌ها در این محدوده جغرافیایی متنوع، امکان شناسایی و کمی‌سازی این پاسخ‌های متفاوت را مقدور می‌سازد.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

منابع داده و پیش‌پردازش: برای دستیابی به هدف این پژوهش، یعنی تحلیل تفاضلی اثر روند بارش بر امنیت آبی در اقلیم‌های ناهمگون ایران، یک چارچوب روش‌شناختی یکپارچه طراحی شد که شامل مراحل آماده‌سازی داده، تحلیل روند و مدل‌سازی آماری چندمتغیره است.

۱- داده‌های بارش: داده‌های پایه این پژوهش شامل سری زمانی بارش روزانه از ۴۱۱ ایستگاه سینوپتیک در سراسر ایران برای دوره آماری ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۱ است که از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. از آنجا که تحلیل نیازمند یک مجموعه داده مکانی پیوسته است، داده‌های ایستگاهی با استفاده از روش درونیابی کریجینگ همگانی به یک شبکه با سلول‌های منظم تبدیل شدند. روش ذکر شده براساس مطالعات پیشین که کارایی بالای آن را برای داده‌های بارش ایران تأیید کرده‌اند (Asakereh, 2008; Masoodian, 2016) و همچنین به دلیل ویژگی آن به عنوان بهترین برآوردگر خطی ناریب، انتخاب گردید. خروجی این مرحله، یک پایگاه داده مکانی-زمانی از بارش روزانه برای ۶۶۹۵ یاخته است که کل مساحت ایران را پوشش می‌دهد.

۲- داده‌های امنیت آبی: شاخص ریسک آب **Aqueduct**: برای ارزیابی کمی و استاندارد وضعیت امنیت آبی، از پایگاه داده اطلس جهانی ریسک آب (Aqueduct Global Water Risk Atlas) که توسط مؤسسه منابع جهانی (World Resources)

(Institute - WRI) توسعه یافته است، استفاده شد. این ابزار به عنوان یک مرجع معتبر و پرکاربرد در سطح جهانی، به شرکت‌ها، سرمایه‌گذاران، دولت‌ها و سایر کاربران کمک می‌کند تا درک دقیقی از مکان و چگونگی ظهور ریسک‌ها و فرصت‌های مرتبط با آب در سراسر جهان به دست آورند (WRI^۱, 2023).

اطلس Aqueduct با بهره‌گیری از بهترین داده‌های مکانی موجود، نقشه‌هایی با وضوح بالا و قابل سفارشی‌سازی از ریسک‌های آبی جهانی تولید می‌کند. هدف اصلی این پلتفرم، شناسایی و نقشه‌برداری از اطلاعات متن‌باز و قابل مقایسه در سطح جهانی در مورد ریسک‌های آبی متنوعی از جمله سیل، خشکسالی و تنش آبی است. این اطلس به کاربران اجازه می‌دهد تا مکان‌هایی را که با بالاترین ریسک‌های فیزیکی (کمیت و کیفیت آب)، نظارتی (Regulatory) و اعتباری (Reputational) مواجه هستند، شناسایی و اولویت‌بندی کنند.

در این پژوهش، از شاخص کلی ریسک آب که یک معیار ترکیبی است، به عنوان متغیر وابسته برای سنجش امنیت آبی استفاده شد. این شاخص جامع، چندین بُعد از ریسک‌های مرتبط با آب را در یک امتیاز واحد ادغام می‌کند و تصویری کلان از آسیب‌پذیری هر منطقه ارائه می‌دهد. سری زمانی این شاخص برای هر یک از ۶۶۹۵ سلول متناظر با شبکه بارش استخراج گردید تا امکان تحلیل رابطه بین این دو متغیر فراهم شود.

۳- داده‌های طبقه‌بندی اقلیمی: به منظور گروه‌بندی مناطق مورد مطالعه، از نقشه جهانی طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر استفاده شد. این طبقه‌بندی که براساس الگوهای دما و بارش استوار است، به طور گسترده در مطالعات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر یک از ۶۶۹۵ سلول شبکه براساس موقعیت مکانی خود به یکی از پهنه‌های اقلیمی اصلی ایران تخصیص داده شد. این متغیر طبقه‌ای (Categorical Variable) به عنوان عامل گروه‌بندی در تحلیل‌های آماری نهایی به کار گرفته شد. فرآیند تحلیلی برای پاسخ به سؤال تحقیق در چهار گام اصلی به شرح زیر طراحی گردید:

گام اول) کمی‌سازی روند بارش: برای هر یک از ۶۶۹۵ سلول، روند موجود در سری زمانی بارش سالانه طی دوره ۲۰۲۱-۱۹۷۰ با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال (Mann-Kendall Test) ارزیابی شد. خروجی این مرحله، یک نقشه از مقادیر آماره Z من-کندال است که جهت و معنی‌داری آماری روند بارش را در هر نقطه از ایران نشان می‌دهد. این مقادیر به عنوان متغیر مستقل اصلی در گام بعدی مورد استفاده قرار گرفتند.

گام دوم) آزمون اثر تفاضلی با تحلیل کوواریانس (ANCOVA): به منظور آزمون فرضیه اصلی تحقیق، از تحلیل کوواریانس استفاده شد. این روش آماری نشان می‌دهد آیا تأثیر روند بارش بر امنیت آبی، به نوع اقلیم بستگی دارد یا خیر. هدف اصلی در این گام، آزمون اثر تعاملی (Interaction Effect) بین روند بارش (متغیر پیوسته) و نوع اقلیم (متغیر عامل) است. یک اثر تعاملی معنی‌دار از نظر آماری بیانگر این است که شیب خط رگرسیون امنیت آبی بر روند بارش، در اقلیم‌های مختلف یکسان نیست. این همان «اثر تفاضلی» است که پژوهش حاضر به دنبال شناسایی آن می‌باشد.

گام سوم) تحلیل تفکیکی شیب رابطه در هر اقلیم: پس از آنکه وجود اثر تعاملی در گام دوم تأیید شد، برای بررسی دقیق‌تر ماهیت این تفاوت، مدل‌های رگرسیون خطی ساده به صورت جداگانه برای هر پهنه اقلیمی برازش داده شد. هدف از این گام، محاسبه ضریب شیب (β) و سطح معنی‌داری آماری (p -value) رابطه میان روند بارش و امنیت آبی در هر اقلیم به صورت مجزا بود.

گام چهارم) کمی‌سازی و مقایسه آسیب‌پذیری با شاخص حساسیت: در نهایت، به منظور کمی‌سازی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری نسبی پهنه‌های اقلیمی در مقابل تغییرات بارش یک شاخص حساسیت (Sensitivity Index) محاسبه گردید. این شاخص به صورت کمی نشان می‌دهد که به ازای یک واحد تغییر استاندارد در روند بارش، شاخص امنیت آبی به چه میزان تغییر می‌کند و امکان رتبه‌بندی اقلیم‌ها براساس میزان آسیب‌پذیری آنها به نوسانات بارش را فراهم می‌آورد. به منظور کمی‌سازی و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری نسبی پهنه‌های اقلیمی در برابر تغییرات روند بارش، شاخص حساسیت (Sensitivity Index, S) تعریف شد. این شاخص، میزان واکنش (تغییر استاندارد شده) در شاخص امنیت آبی را به ازای یک واحد تغییر استاندارد در روند بارش براساس

^۱World Resources Institute

آماره Z من-کندال (در هر پهنه اقلیمی منعکس می‌کند. براساس نتایج گام سوم، برای هر پهنه اقلیمی i ، شیب رگرسیون خطی β_i (ضریب تأثیر روند بارش بر امنیت آبی) و خطای استاندارد مربوطه ($SE(\beta_i)$) محاسبه شد. با توجه به همجنس‌سازی مقیاس‌ها و کاهش تأثیر خطای برآورد در مقایسه بین اقلیم‌ها، از ضریب تأثیر استاندارد شده به عنوان اندازه حساسیت در هر پهنه استفاده گردید (رابطه ۱):

$$xi = \frac{\beta_i}{SD(\beta)} \quad \text{رابطه ۱}$$

مشروط بر استانداردسازی متغیر مستقل قبل از رگرسیون $xi = \beta_i$ یا در صورت ترجیح برای وزن‌دهی به وسعت جغرافیایی پهنه‌های اقلیمی و دستیابی به شاخصی که نه تنها شدت حساسیت، بلکه اهمیت فضایی آن را نیز در نظر بگیرد، از سهم مساحتی هر پهنه در مجموع ایران به عنوان وزن استفاده شد:

$$wi = \frac{Ai}{\sum_{j=1}^k Aj} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن مساحت (تعداد سلول‌های شبکه‌ای) متعلق به پهنه اقلیمی و تعداد کل پهنه‌های اقلیمی است. در نهایت، شاخص حساسیت کلان‌مقیاس (برای کل کشور) به صورت میانگین وزنی شیب‌ها تعریف گردید:

$$S = \sum_{i=1}^k w_i \cdot x_i = \sum_{i=1}^k \left(\frac{A_i}{\sum_j A_j} \right) \cdot \beta_i \quad \text{رابطه ۳}$$

این شاخص امکان مقایسه نسبی پهنه‌های اقلیمی را فراهم می‌آورد؛ هرچه $S_i = \beta_i$ در صورت استفاده از نسخه استاندارد شده، x_i بزرگ‌تر باشد، حساسیت آن پهنه به تغییرات روند بارش بیشتر است. شاخص S نیز می‌تواند به عنوان معیاری برای اولویت‌بندی سیاست‌های سازگاری در سطح ملی به کار رود.

تکنیک‌های آماری مورد استفاده در تحقیق

رگرسیون خطی ساده: واژه رگرسیون به معنای بازگشت است و نشان می‌دهد که مقدار یک متغیر به متغیر دیگری برمی‌گردد (Azar and Momeni, 2005). در رگرسیون ساده خطی یک برآورد خطی از رابطه بین دو متغیر (X و Y) با کمترین مربعات خطا حاصل می‌شود. این خط در یک فضای دو بعدی نمایش داده می‌شود.

من-کندال: آزمون من-کندال، که توسط Mann (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط Kendall (۱۹۷۵) توسعه یافته است، به عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های آماری برای بررسی وجود روندهای معنی‌دار در سری‌های زمانی هیدرومتئورولوژیک شناخته می‌شود (Yue et al., 2002). در پژوهش حاضر از روش من-کندال استاندارد استفاده شده است.

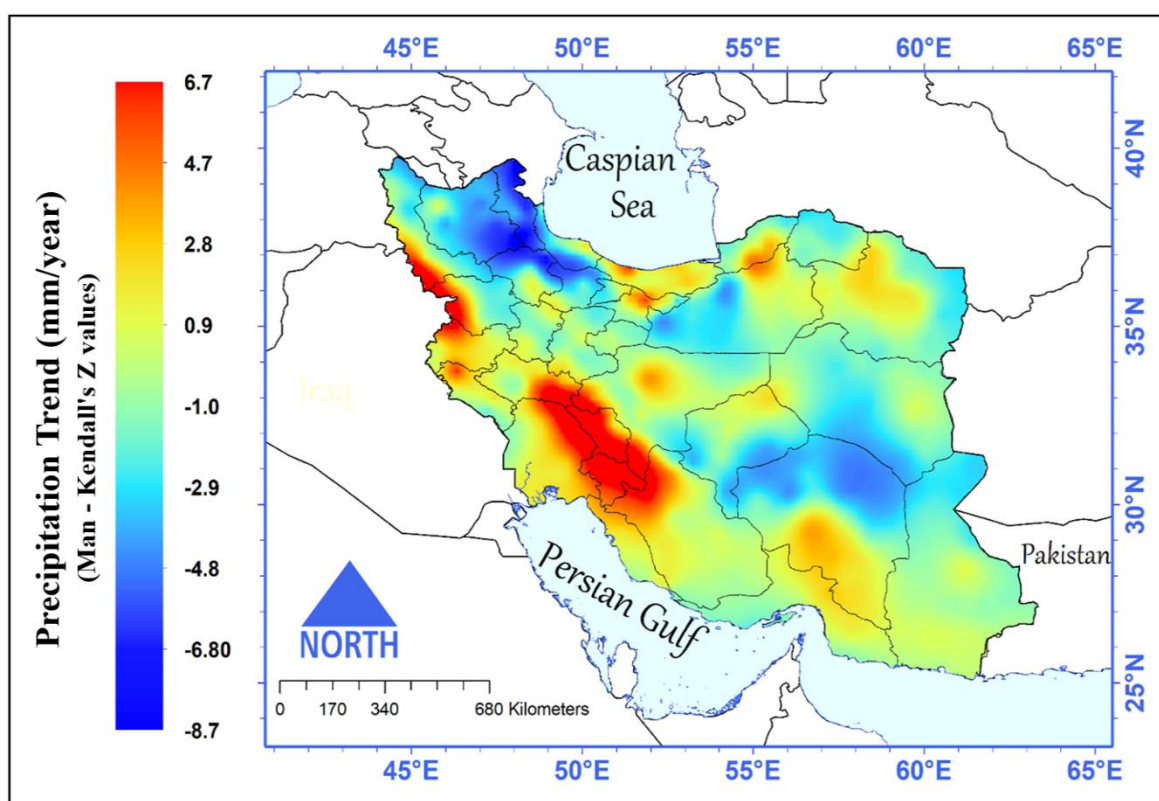
تحلیل کوواریانس (ANCOVA): روشی آماری است که تلفیقی از تحلیل واریانس و تحلیل رگرسیون محسوب می‌شود. این روش برای بررسی تفاوت میانگین متغیر وابسته در بین چند گروه (متغیر طبقه‌ای) استفاده می‌شود، در حالی که همزمان اثر یک یا چند متغیر کمی (کووریت یا متغیر کمکی) را که می‌توانند بر متغیر وابسته تأثیر بگذارند، کنترل می‌کند. هدف اصلی ANCOVA، حذف واریانس ناشی از کووریت‌ها است تا بتوان تأثیر واقعی گروه‌ها را دقیق‌تر برآورد کرد. در این تحقیق، تحلیل کوواریانس برای مقایسه شاخص امنیت آبی در گروه‌های مختلف اقلیمی به کار رفته، در حالی که اثر روند بارش به عنوان متغیر کمکی کنترل شده است. مدل عمومی ANCOVA استفاده شده در این مطالعه، به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_i(X_{ij} - \bar{X}) + \varepsilon_{ij} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این معادله، Y_{ij} : مقدار شاخص امنیت آبی برای مشاهده j در گروه اقلیمی i می‌باشد. μ میانگین کل امنیت آبی و τ_i اثر اصلی گروه اقلیمی i (تفاوت میانگین تعدیل شده گروه i با میانگین کل) است. β ضریب رگرسیون مشترک که نشان‌دهنده شیب کلی رابطه بین امنیت آبی و روند بارش می‌باشد، است. X_{ij} مقدار روند بارش برای مشاهده j در گروه اقلیمی i ، $\bar{X}$ میانگین کل میانگین کل روند بارش و ε_{ij} خطای تصادفی است.

یافته‌های پژوهش

آشکارسازی تغییرات مکانی بارش در منطقه: مطابق شکل ۲، تحلیل مکانی روند بارش سالانه در دوره ۱۹۷۰-۲۰۲۱ با استفاده از آزمون من-کندال، ناهمگونی فضایی قابل توجهی را در جهت و معنی‌داری روندها در سراسر ایران نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن آستانه معنی‌داری آماری در سطح اطمینان ۹۵٪، یک الگوی دوگانه مشخص در پهنه کشور مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که بخش‌های وسیعی از غرب و جنوب غرب ایران، به‌ویژه در دامنه‌های زاگرس، روندهای افزایشی قوی و معنی‌داری را تجربه می‌کنند که در برخی نواحی مقادیر آماره Z از ۶+ نیز فراتر رفته است. در مقابل، پهنه‌های گسترده‌ای در شمال غرب، مرکز، شرق و جنوب شرق کشور با روندهای کاهشی شدید و معنی‌دار مواجه هستند که مقادیر آماره Z در برخی از این مناطق به کمتر از ۶- رسیده است. در این میان، مناطق ساحلی دریای خزر و بخش‌های قابل توجهی از فلات مرکزی، فاقد روند آماری معنی‌دار هستند. این توزیع فضایی متمایز از روندهای بارش، که ورودی اصلی برای سنجش متغیر بارش در این پژوهش است، بر لزوم تحلیل‌های منطقه‌ای و تفکیک‌شده تأکید می‌کند.



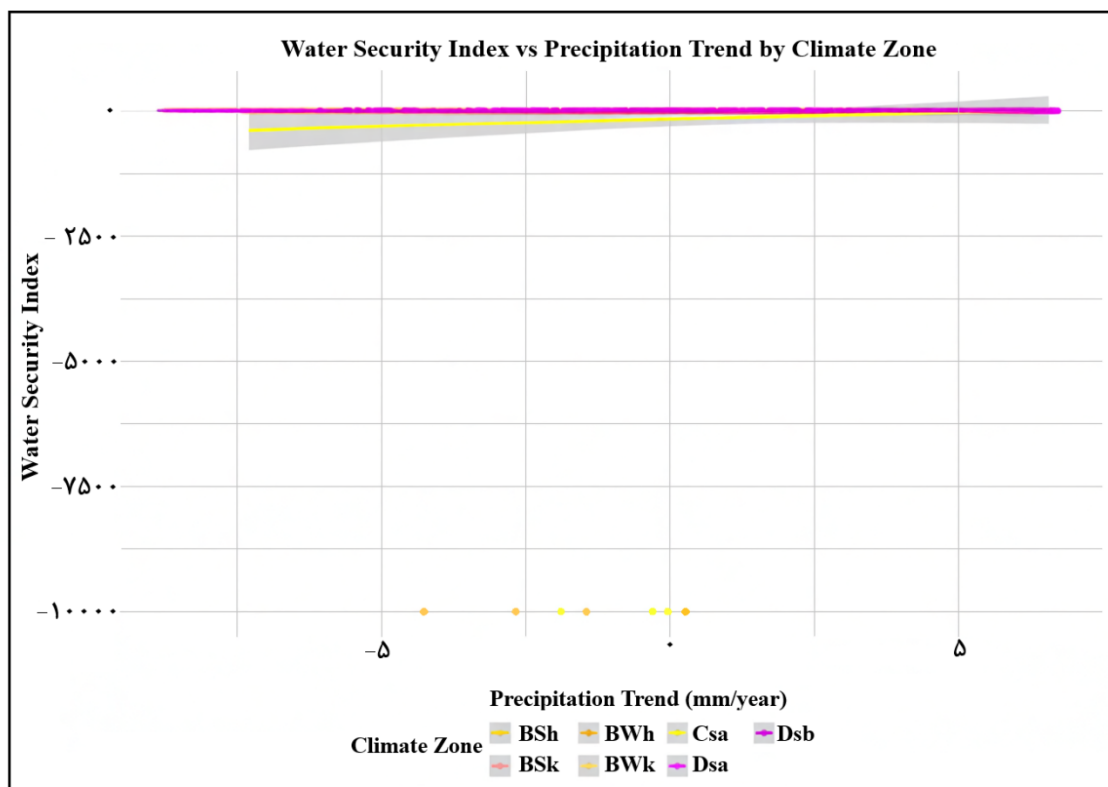
شکل ۲- الگوی مکانی تغییرات روند بارش سالانه ایران (۱۹۷۰-۲۰۲۱)

تحلیل اثر تفاضلی بارش بر امنیت آبی در اقلیم‌های مختلف: به‌منظور آزمون فرضیه اصلی تحقیق، مبنی بر تأثیر تعدیل‌گر نوع اقلیم بر رابطه میان روند بارش و امنیت آبی، از مدل ANCOVA استفاده شد. نتایج این مدل، سه یافته کلیدی و متمایز را نشان می‌دهد:

در گام نخست، بررسی اثر کلی متغیر مستقل (روند بارش) بیانگر این است که این رابطه در گستره مکانی کشور و بدون تفکیک اقلیمی، از نظر آماری معنی‌دار نیست ($p\text{-value} = ۰/۶۴۳$). این یافته اولیه، مؤید آن است که تحلیل‌های کلی‌نگر قادر به تبیین رابطه پیچیده میان بارش و امنیت آبی در یک پهنه جغرافیایی ناهمگون مانند ایران نمی‌باشند.

در گام دوم، اثر اصلی متغیر عامل (نوع اقلیم) بر شاخص امنیت آبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بخش، یک رابطه بسیار قوی و معنی‌دار را نشان می‌دهد ($p\text{-value} < 0/001$)، که این مهم بیانگر آن است که سطوح پایه امنیت آبی حتی پس از کنترل اثر روند بارش، در مناطق اقلیمی مختلف ایران به‌طور چشمگیری متفاوت می‌باشد.

در گام سوم و از طریق آزمون اثر تعاملی بین روند بارش و نوع اقلیم به‌دست آمد. این اثر تعاملی از نظر آماری کاملاً معنی‌دار است ($p\text{-value} = 0/0297$)؛ بنابراین نتیجه به‌صورت کمی اثبات می‌کند که شیب رابطه (یا به عبارت دیگر، حساسیت) میان روند بارش و شاخص امنیت آبی، در تمام اقلیم‌ها یکسان نبوده و به‌طور معنی‌داری به نوع اقلیم حاکم بستگی دارد. در ادامه برای بررسی دقیق‌تر ماهیت این اثر تعاملی، رابطه خطی میان روند بارش و امنیت آبی در هر یک از پهنه‌های اقلیمی به‌صورت مجزا مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۳). نتایج این تحلیل‌های تفکیکی نشان می‌دهد که حساسیت امنیت آبی به روند بارش، در اقلیم‌های مختلف به‌شدت متفاوت است. در اقلیم نیمه‌خشک سرد (BSk)، یک رابطه مثبت و معنی‌دار ($p\text{-value} < 0/001$) با شیب $0/11$ مشاهده شد. همچنین، در اقلیم قاره‌ای با تابستان خشک و گرم (Dsa) یک رابطه منفی و معنادار ($p\text{-value} < 0/001$) با شیب $-0/084$ و در اقلیم قاره‌ای با تابستان خشک و خنک (Dsb) یک رابطه مثبت و معنی‌دار ($p\text{-value} = 0/0047$) با شیب $0/086$ به‌دست آمد. در مقابل، رابطه ذکر شده در اقلیم بیابانی گرم (BWh)، بیابانی سرد (BWk) و نیمه‌خشک گرم (BSh) به ترتیب با شیب $1/45$ ، ($p\text{-value} = 0/685$)، $-0/097$ ، ($p\text{-value} = 0/565$) و $0/95$ ، ($p\text{-value} = 0/912$) از نظر آماری معنی‌داری خاصی را نشان نداد؛ در اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان گرم (Csa) نیز علی‌رغم شیب ظاهراً بزرگ ($22/27$)، این رابطه به دلیل واریانس بالا و حجم نمونه کمتر، از نظر آماری، معنی‌دار ارزیابی نشد ($p\text{-value} = 0/239$). یافته‌های به‌دست آمده از مطالعه، به‌صورت کمی تأیید می‌کنند که پاسخ امنیت آبی به تغییرات بارش در ایران یک پدیده کاملاً وابسته به مکان و نوع اقلیم است.

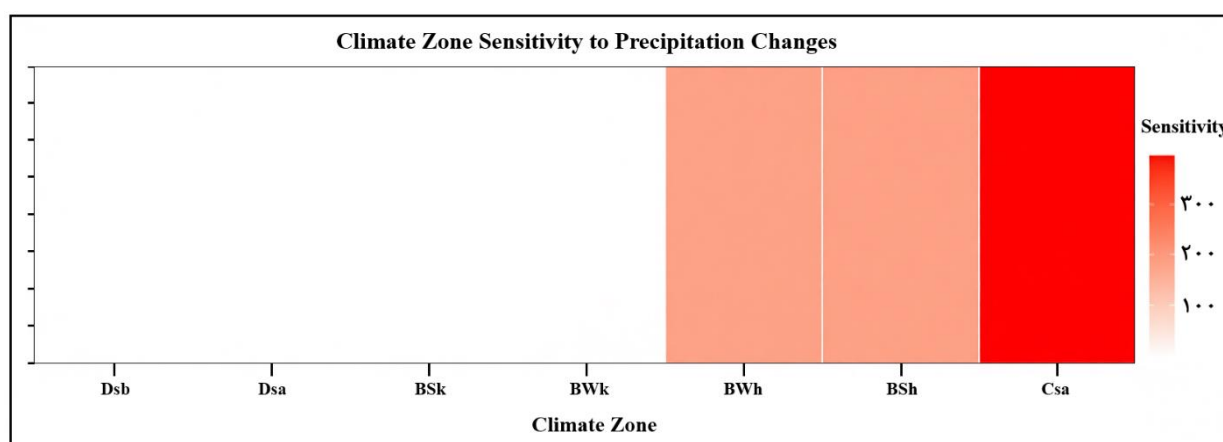


شکل ۳- رابطه خطی میان روند بارش و امنیت آبی در هر یک از پهنه‌های اقلیمی

جدول ۱- مقادیر p و عامل ها

تفسیر	مقدار p -value	عامل
اثر کلی روند بارش بر امنیت آبی در کل کشور معنی دار نیست.	۰/۶۴۳	اثر کلی روند بارش
تفاوت بسیار معنی دار بین اقلیم ها	* ۰/۰۰۱	اثر اقلیم (climate_zone)
اثر روند بارش در اقلیم های مختلف متفاوت است.	* ۰/۰۲۹۷	تفاعل روند بارش × اقلیم

رتبه بندی آسیب پذیری اقلیمی براساس شاخص حساسیت: در گام نهایی تحلیل، به منظور کمی سازی و مقایسه آسیب پذیری نسبی پهنه های اقلیمی، شاخص حساسیت برای هر منطقه محاسبه گردید. نتایج این شاخص، که در شکل ۴ نشان داده شده است، تفاوت های چشمگیری را در میزان واکنش پذیری امنیت آبی به روند بارش در میان اقلیم های مختلف ایران نشان می دهد. براساس این تحلیل، اقلیم مدیترانه ای با تابستان گرم (Csa) با ثبت مقدار ۳۹۸ برای شاخص حساسیت، به عنوان آسیب پذیرترین و حساس ترین پهنه اقلیمی کشور نسبت به تغییرات بارش شناسایی شد. پس از آن، اقلیم نیمه خشک گرم (BSH) و اقلیم بیابانی گرم (BWh) با شاخص حساسیت ۱۹۰ و ۱۸۵ به ترتیب در رتبه های دوم و سوم از نظر میزان حساسیت قرار گرفتند. مقادیر بالای این شاخص در سه اقلیم مذکور، بیانگر آن است که امنیت آبی در این مناطق بیشترین واکنش پذیری را به نوسانات روند بارش از خود نشان می دهد. در مقابل، سایر اقلیم های کشور مقادیر بسیار پایینی برای شاخص حساسیت (کمتر از ۱) را به ثبت رساندند. این یافته حاکی از تاب آوری نسبی بیشتر و واکنش پذیری کمتر امنیت آبی در این مناطق (شامل اقلیم های خزری، کوهستانی سرد و سایر پهنه ها) در برابر تغییرات روند بارش طی دوره مورد مطالعه است. این نتایج، یک الگوی فضایی مشخص از آسیب پذیری را نمایان می سازد که در آن، مناطق مدیترانه ای و خشک گرم، کانون های اصلی حساسیت به نوسانات هیدرولوژیک هستند.



شکل ۴- مقادیر شاخص حساسیت آسیب پذیری به تفکیک مناطق اقلیمی

بحث

پژوهش حاضر با هدف کشف پاسخ های تفاضلی امنیت آبی به روندهای بارش در پهنه های ناهمگون ایران انجام شد. یافته کلیدی تحقیق، تأیید وجود یک اثر تعاملی معنی دار میان روند بارش و نوع اقلیم بود که نشان می دهد حساسیت امنیت آبی در برابر تغییرات هیدرولوژیک، یک پدیده وابسته به مکان است. یافته های این پژوهش، که حساسیت بالای امنیت آبی را در اقلیم های مدیترانه ای (Csa) و نیمه خشک گرم (BSH) آشکار ساخت، فراتر از یک رابطه ساده اقلیمی، به تلاقی میان آسیب پذیری طبیعی و فشار شدید انسانی در این مناطق اشاره دارد. این پهنه ها که کانون های اصلی کشاورزی و جمعیتی کشور هستند، با پدیده ای مواجه اند که در ادبیات جهانی به عنوان تنش آبی در مناطق نیمه خشک شناخته می شود (Morante-Carballo et al., 2022). در چنین سیستم هایی، همان طور که مطالعات متعدد نشان داده اند، هر نوسان اقلیمی به سرعت به

بحران‌های اجتماعی-اقتصادی تبدیل می‌شود، زیرا ظرفیت تاب‌آوری سیستم از قبل به دلیل بهره‌برداری بیش از حد به چالش کشیده شده است (Mdemu, 2021; Gharib et al., 2023). این یافته‌ها با نتایج Liu و همکاران (۲۰۲۳) نیز همخوانی دارد که نشان دادند تغییرات بارش تأثیرات چشمگیری بر شاخص‌های امنیت آب در بخش کشاورزی دارد. در مقابل، عدم وجود رابطه آماری معنی‌دار در برخی دیگر از اقلیم‌ها، ما را به سمت تمایز مفهومی میان «خشکسالی» (یک پدیده طبیعی) و «کمبود آب» (یک پدیده ناشی از مدیریت انسانی) سوق می‌دهد (Van Loon and Van Lanen, 2013). به نظر می‌رسد در این مناطق، اثر فعالیت‌های انسانی آنچنان بر سیستم مسلط شده که تأثیر روند طبیعی بارش را در مدل آماری پنهان می‌کند. این موضوع با نتایج Heydarzadeh و همکاران (۲۰۲۵) در جنوب ایران هم‌راستاست که نشان دادند سهم عوامل انسانی در کاهش جریان سطحی بیش از دو برابر عوامل اقلیمی است. این یافته به معنای عدم وجود بحران نیست، بلکه نشان‌دهنده ورود این مناطق به یک بحران ساختاری ناشی از حکمرانی نامناسب آب است. علاوه بر این، مشاهده روند افزایشی بارش در بخش‌هایی از غرب کشور نیز باید با احتیاط تفسیر شود. تحقیقات حاکی از این است که تغییر اقلیم اغلب الگوی بارش را به سمت رخدادهای حدی و سیل‌آسا تغییر می‌دهد (Hedjazizadeh et al., 2020; Mozafari, 2017). Li و همکاران (۲۰۱۹) در چین نیز دریافتند که علی‌رغم کاهش بارش سالانه، فرکانس رخدادهای حدی افزایش یافته است. Eekhout و همکاران (۲۰۱۸) به شکل هوشمندانه‌ای توضیح می‌دهند که چرا این پدیده برای امنیت آبی مضر است: بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت، زمان کافی برای نفوذ به خاک را ندارند، که این امر منجر به کاهش رطوبت خاک (آب سبز) و افزایش رواناب سطحی، سیل و فرسایش خاک می‌شود. این فرآیند، هم کشاورزی دیم را تهدید می‌کند و هم با افزایش رسوب‌گذاری، عمر مفید زیرساخت‌های ذخیره‌سازی (آب آبی) مانند سدها را کاهش می‌دهد. بنابراین، افزایش کمیت بارش لزوماً به معنای بهبود کیفیت منابع آب و افزایش امنیت آبی نیست. یکی از محدودیت‌های این پژوهش، تفاوت در مقیاس زمانی داده‌های بارش و شاخص‌های Aqueduct است. داده‌های بارش به صورت سری زمانی ۵۰ ساله تحلیل شده‌اند، در حالی که شاخص‌های Aqueduct یک مقدار میانگین بلندمدت هستند و نوسانات سال‌به‌سال یا تغییرات بسیار اخیر را نشان نمی‌دهند. با این حال، بیشترین بخش دوره بارش با دوره مرجع Aqueduct هم‌پوشانی داشته و هدف این مطالعه نیز بررسی حساسیت نسبی اقلیم‌های مختلف به تغییرات بلندمدت بارش بوده است، نه برقراری رابطه دقیق سالانه. بنابراین ترکیب این داده‌ها همچنان برای تحلیل الگوهای کلی و مقایسه اقلیم‌ها معنی‌دار است. با وجود مزایای شاخص‌های Aqueduct 4.0 در ارائه ارزیابی‌های جهانی و قابل‌مقایسه از ریسک‌های کمی آب لازم است به محدودیت‌های شناخته‌شده این ابزار در کاربردهای درون‌کشوری، به‌ویژه در سرزمین‌هایی با ناهمگونی شدید اقلیمی و مدیریتی همچون ایران، توجه دقیق شود. شاخص‌های به‌کاررفته در این مطالعه از جمله Baseline Water Stress و Total Water Deficit نه تنها تابعی از عرضه طبیعی آب (بارش و رواناب) هستند، بلکه به شدت تحت تأثیر الگوهای تقاضای آب در بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شهری، شیوه‌های واقعی برداشت، و عوامل اقتصادی-اجتماعی قرار دارند؛ عواملی که در مدل هیدرولوژیک PCR-GLOBWB شبیه‌سازی می‌شوند. افزون بر این، این مدل قادر نیست انتقال‌های بین‌حوضه‌ای، برداشت غیرپایدار از آبخوان‌های فسیلی، و بخش مهمی از مداخلات محلی مدیریت آب در ایران را به‌طور جامع لحاظ کند (Madani, 2014; WRI, 2023). با توجه به تغییرات چشمگیر این عوامل طی دوره ۲۰۲۱-۱۹۷۰ از جمله رشد سریع جمعیت، گسترش اراضی کشاورزی، افزایش بی‌رویه حفاری چاه‌ها، و توسعه پروژه‌های بزرگ انتقال آب نمی‌توان تغییرات مشاهده‌شده در شاخص‌های Aqueduct را صرفاً ناشی از روندهای بارش دانست. از این رو، اثر تعاملی معنی‌دار مشاهده‌شده و مقادیر بالای شاخص حساسیت در اقلیم‌های Csa، BSh و BWh باید با احتیاط تفسیر شوند: این نتایج بیش از آنکه به تغییرات کلی امنیت آبی (که شدیداً تحت سلطه عوامل انسانی قرار دارد) اشاره داشته باشند، بیانگر آسیب‌پذیری بالاتر عرضه طبیعی آب در این رژیم‌های اقلیمی عمدتاً وابسته به بارش هستند. به بیان دیگر، در این اقلیم‌ها که بخش قابل‌توجهی از رواناب مستقیم از بارش منشأ می‌گیرد و ظرفیت ذخیره‌سازی و مدیریت مصنوعی محدود است، نوسانات بارش اثرات سریع و قابل‌ملاحظه‌ای بر شاخص‌های Aqueduct برجای می‌گذارد. در مقابل، در سایر اقلیم‌ها به‌ویژه نواحی کوهستانی مرطوب‌تر یا حوضه‌هایی با مدیریت شدیدتر نقش عوامل انسانی نظیر سدسازی، انتقال آب، و برداشت بیش از حد چنان غالب است که سیگنال بارش را تضعیف کرده یا حتی معکوس می‌کند. بنابراین، یافته‌های این پژوهش را نباید به‌منزله «علت‌یابی مستقیم» تغییرات امنیت آبی تعبیر کرد، بلکه باید آن‌ها را شواهدی از پاسخ ناهمگون

رژیم‌های اقلیمی ایران به تغییرات عرضه طبیعی آب در چارچوب یک شاخص استاندارد جهانی دانست. این محدودیت نه تنها از اعتبار نتایج حاضر نمی‌کاهد، بلکه بر ضرورت سیاست‌گذاری منطقه‌ای و اقلیم‌محور تأکید مجدد می‌کند. در اقلیم‌های حساس شناسایی شده نظیر اقلیم‌های مدیترانه‌ای و گرم-خشک حتی تغییرات اندک در بارش می‌تواند پیامدهای جدی به دنبال داشته باشد؛ بنابراین اتخاذ راهبردهای سازگاری ویژه مانند مدیریت تقاضا، احیای رواناب، و توسعه کشاورزی پایدار ضروری است. در سایر مناطق، اولویت اصلی باید بر اصلاح مدیریت منابع و کاهش برداشت غیرپایدار متمرکز باشد. مطالعات آتی نیز می‌توانند با به‌کارگیری داده‌های محلی از جمله آمار برداشت واقعی وزارت نیرو یا داده‌های GRACE-FO و نیز استفاده از مدل‌های بومی، دقت چنین تحلیل‌هایی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف اصلی واکاوی پاسخ‌های تفاضلی امنیت آبی به روندهای بارش در پهنه‌های اقلیمی ناهمگون ایران انجام پذیرفت. نتایج به‌دست آمده به‌طور قاطع نشان می‌دهد که تأثیر روند بارش بر امنیت آبی در ایران یک پدیده همگن نیست و به‌طور معنی‌داری توسط نوع اقلیم تعدیل می‌شود. اثبات وجود یک اثر تعاملی آماری معنی‌دار میان روند بارش و پهنه‌های اقلیمی، یافته کلیدی این مطالعه است. این یافته به این معناست که حساسیت و آسیب‌پذیری سیستم‌های آبی در برابر تغییرات هیدرولوژیک، در هر منطقه اقلیمی از یک منطق منحصربه‌فرد پیروی می‌کند. بر این اساس، امکان طبقه‌بندی مناطق کشور بر مبنای میزان واکنش‌پذیری آنها به نوسانات بارش فراهم آمد. تحلیل‌های تفکیکی نیز بیانگر این بود که اقلیم‌های مدیترانه‌ای و نیمه‌خشک گرم، حساس‌ترین مناطق مورد مطالعه هستند؛ مناطقی که در آنها یک پیوند مستقیم و قابل اتکا میان روند بارش و شاخص امنیت آبی وجود دارد. در مقابل، عدم معنی‌داری این رابطه در سایر مناطق، حاکی از غلبه عوامل دیگری همچون فشار ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه از منابع (کمبود آب انسان‌محور) یا پایداری ذاتی منابع (مانند ذخایر برفی) بر نوسانات اقلیمی است. بنابراین، این پژوهش تأیید می‌کند که امنیت آبی در ایران یک چالش چندوجهی است که از برهم‌کنش پیچیده میان متغیرهای اقلیمی، فشارهای انسانی و ظرفیت‌های اکولوژیک و اجتماعی شکل می‌گیرد. این مطالعه فراتر از یک روایت ساده از «خشکسالی» عمل کرده و نشان می‌دهد که درک «آسیب‌پذیری» نیازمند تحلیل‌های منطقه‌ای و تفکیک‌شده است. در نهایت، درک عمیق این ناهمگونی فضایی و شناسایی کانون‌های حساسیت، سنگ بنای گذار از سیاست‌گذاری‌های کلان و یکنواخت به سمت راهبردهای مدیریتی تطبیقی و مکان‌محور برای مقابله با بحران آب در کشور است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که هرگونه سیاست‌گذاری مؤثر، مستلزم شناخت دقیق دینامیک‌های حاکم بر هر پهنه اقلیمی و طراحی راهکارهایی متناسب با آن است.

بنابراین براساس نتایج به‌دست آمده و با توجه به ضرورت گذار از رویکردهای متمرکز به سمت حکمرانی تطبیقی و منطقه‌ای، پیشنهاد‌های سیاستی زیر ارائه می‌گردد:

تدوین بسته‌های سیاستی تفکیک‌شده براساس حساسیت اقلیمی: بدین ترتیب برای مناطق با حساسیت بالا (مانند Csa و BSh)، اولویت باید بر اجرای راهکارهای مدیریت آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری باشد. این اقدامات شامل افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی، اصلاح الگوی کشت، توسعه بیمه‌های کشاورزی و تقویت زیرساخت‌های ذخیره‌سازی آب است (Heydari, 2019). **تمرکز بر اصلاح حکمرانی آب در مناطق تحت فشار انسانی:** در مناطقی که بحران آب عمدتاً ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه است، تمرکز باید بر مدیریت قاطعانه تقاضا و اجرای قوانین باشد. این شامل کنترل شدید برداشت‌های غیرمجاز، بازنگری در تخصیص‌های آب و اجرای کامل طرح‌های تعادل بخشی آبخوان‌ها می‌شود.

توجه به موانع اجتماعی و ظرفیت‌سازی: اجرای موفقیت‌آمیز هرگونه سیاست فنی، نیازمند رفع موانع اجتماعی است. همان‌طور که Azadi و همکاران (۲۰۲۵) نیز اشاره کردند، درک پایین ذی‌نفعان می‌تواند بزرگترین مانع باشد. بنابراین، تمام برنامه‌های مدیریتی باید با اقدامات گسترده آموزشی، ترویجی و ظرفیت‌سازی برای جوامع محلی و کشاورزان همراه شوند تا مشارکت فعال‌ها در فرآیند سازگاری تضمین گردد.

References

- AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A., Wanders, N., 2021. Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities. *Reviews of Geophysics* 59, e2019RG000683.
- Alizadeh-Choozari, O., Najafi, M.S., 2017. Trends and changes in air temperature and precipitation over different regions of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics* 43(3), 569-584.
- Alkhawaga, A., Zeidan, B., Elshemy, M., 2022. Climate change impacts on water security elements of Kafr El-Sheikh governorate, Egypt. *Agricultural Water Management* 259(), 107217.
- Asakereh, H., 2008. Kriging Application in Climatic Element Interpolation A Case Study: Iran Precipitation in 1996.12.16. *Geography and Development* 6(12), 25-42.
- Asakereh, H., Masoodian, S.A., Tarkarani, F., 2021. Long term trend detection of annual precipitation over Iran in relation with changes in frequency of daily extremes precipitation. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 9(4), 123-143.
- Azadi, Y., Yaghoubi, J., Gholizadeh, H., Gholamrezai, S., Rahimi-Feyzabad, F., 2025. Social barriers to water scarcity adaptation: A grounded theory exploration in arid and semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 309, 109338.
- Azar, A., Momeni, M., 2005. *Statistics and Its Application in Management* (Vol. 2). Tehran: Samt Publications.
- Azizi, A., Shojaei, J., Mahmoudi, M.J., 2024. Comparative Study of Iran's Water Security by Using Water Security Index. (e208722). *Iranian Population Studies* e208722.
- Ballarin, A.S., Sousa Mota Uchoa, J.G., dos Santos, M.S., Almagro, A., Miranda, I.P., da Silva, P.G.C., Oliveira, P.T., 2023. Brazilian water security threatened by climate change and human behavior. *Water Resources Research* 59(7), e2023WR034914.
- Eekhout, J.P., Hunink, J.E., Terink, W., de Vente, J., 2018. Why increased extreme precipitation under climate change negatively affects water security. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(11), 5935-5946.
- Gharib, A.A., Blumberg, J., Manning, D.T., Goemans, C., Arabi, M., 2023. Assessment of vulnerability to water shortage in semi-arid river basins: The value of demand reduction and storage capacity. *Science of the Total Environment* 871, 161964.
- Grey, D., Sadoff, C.W., 2007. Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy* 9(6), 545-571.
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Wisser, D., 2014. Global water resources affected by human interventions and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(9), 3251-3256.
- Hedjazizadeh, Z., Halabian, A. H., Karbalaee, A., Toulabi, M., 2020. Detection of extreme values variations of precipitation over Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(23), 135-150.
- Heydari, N., 2019. Visions and Approaches for Adapting to Climate Change, from Agricultural Water Management and Food Security Aspects. *Water Management in Agriculture* 6(1), 23-36.
- Heydarzadeh, M., Ghashghaeizadeh, N., Kamali, H., Jamshidi, S., 2025. Effects of precipitation changes and human activities on surface flow in an arid Region of Southern Iran. *Groundwater for Sustainable Development* 29, 101434.
- IPCC., 2021: Climate change 2021-the physical science basis. *Interaction* 49(4), 44-45.
- Kamali, A.M., Kazemiha, M., Keshkarhesamabadi, B., Daneshvari, M., Zarifkar, A., Chakrabarti, P., Nami, M., 2021. Simultaneous transcranial and transcutaneous spinal direct current stimulation to enhance athletic performance outcome in experienced boxers. *Scientific Reports* 11(1), 19722.
- Kendall, M.G., 1945. On the analysis of oscillatory time-series. *Journal of the Royal Statistical Society* 108(1/2), 93-141.
- Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods* 4th edn (London: Charles Griffin).
- Kendall, M.G., 1975. Rank correlation methods. Griffin, London. *Journal of Economics* 13, 245-259.
- Kumar, P., 2015, Hydrocomplexity :Addressing water security and emergent environmental risks, *Water Resources Research* 51, 5827-5838.
- Li, C., Zhang, H., Gong, X., Wei, X., Yang, J., 2019. Precipitation trends and alteration in Wei River Basin: Implication for water resources management in the transitional zone between Plain and Loess Plateau, China. *Water* 11(11), 2407.
- Liu, J., Fu, Z., Liu, W., 2023. Impacts of precipitation variations on agricultural water scarcity under historical and future climate change. *Journal of Hydrology* 617, 128999.
- Madani, K., 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of Environmental Studies and Sciences* 4(4), 315-328.
- Maja, M.M., Ayano, S.F., 2021. The impact of population growth on natural resources and farmers' capacity to adapt to climate change in low-income countries. *Earth Systems and Environment* 5(2), 271-283.

- Maleki, N., Shakeri bostanabad, R., Salehi Komroudi, M., Seiedabadi, S., 2021. Investigating the Status of the Combined Water Security Index of Iranian Provinces in the Period of 2012-2017: Application of Multi-Criteria Analysis Methods. *Journal of Water and Sustainable Development* 8(2), 21-32.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 13, 245-259.
- Masoodian, S.A., Rayatpishe, F., Keykhosravi Kiani, M.S., 2016. Introducing the TRMM and Asfezariprecipitation database: A comparative study. (e33560). *Iranian Journal of Geophysics* 8(4), e33560
- Masoudian S A., 2008. On precipitation mapping in Iran, *Journal of Humanities* 30(2), 69-80
- Mdemu, M.V., 2021. Community's vulnerability to drought-driven water scarcity and food insecurity in central and northern semi-arid areas of Tanzania. *Frontiers in Climate* 3, 737655.
- Mishra, B. K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S., Gautam, A., 2021. Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. *Water* 13(4), 490.
- Morante-Carballo, F., Montalván-Burbano, N., Quiñonez-Barzola, X., Jaya-Montalvo, M., Carrión-Mero, P., 2022. What do we know about water scarcity in semi-arid zones? A global analysis and research trends. *Water* 14(17), 2685.
- Mozafari, G.A., Shafie, S., 2017. temporal-spatial analysis of rainfall days frequency trend of western iran regions. *Geographical Journal of Territory* 13(52), 77-94.
- Namroodi, M., Hamidianpour, M., Poodineh, M., 2021. Spatio-temporal analysis of changes in heat and cold waves across Iran over the statistical period 1966–2018. *Arabian Journal of Geosciences* 14(10), 857.
- Paudel, S., Kumar, P., Dasgupta, R., Johnson, B. A., Avtar, R., Shaw, R., Kanbara, S., 2021. Nexus between water security framework and public health: A comprehensive scientific review. *Water* 13(10), 1365.
- Qin, K., Liu, J., Yan, L., Huang, H., 2019. Integrating ecosystem services flows into water security simulations in water scarce areas: Present and future. *Science of the Total Environment* 670, 1037-1048.
- Rawat, A., Kumar, D., Khati, B. S., 2024. A review on climate change impacts, models, and its consequences on different sectors: a systematic approach. *Journal of Water and Climate Change*, 15(1), 104-12
- Salami, H., Taheri Rekandeh, O., 2019. Assessment of Water Security Status in the Provinces of Iran. *Journal of Agricultural Economics and Development (Agricultural Sciences and Industries)* 33(1), 75-94.
- Salemi Sarmast, S., Zahraie, B., 2021. Assessment of Water Security in Iran at Provincial Level Using a Hybrid Index. *Water and Irrigation Management*, 11(3), 617-632.
- Talebi, M., 2023. Water crisis in iran and its security consequences. *Journal of Hydraulic Structures* 8(4), 17-28.
- Tang, Q., Liu, X., Zhou, Y., Wang, P., Li, Z., Hao, Z., Luo, L., 2022. Climate change and water security in the northern slope of the Tianshan Mountains. *Geography and Sustainability* 3(3), 246-257.
- Torabi Poudeh, H., Izadijoo, F., Hamezade, P., 2018. The trend changing analysis of total and effective rainfall in Iran. *Iranian Water Researches Journal* 12(4), 1-10.
- Van Loon, A.F., Van Lanen, H.A., 2013. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research* 49(3), 1483-1502.
- Wheater, H.S., Gober, P., 2015. Water security and the science agenda. *Water Resources Research* 51, 5406-5424,
- World Resources Institute (WRI). 2023. *Aqueduct Water Risk Atlas*. Washington, DC: World Resources Institute
- Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G., 2002. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology* 259(1-4), 254-271
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A.A., 2023. Investigating the impacts of climate change on water security in Iran.
- Zhou, S., Williams, A.P., Lintner, B.R., Findell, K.L., Keenan, T.F., Zhang, Y., Gentine, P., 2022. Diminishing seasonality of subtropical water availability in a warmer world dominated by soil moisture–atmosphere feedbacks. *Nature Communications* 13(1), 5756.