



Scientific Journal Quarterly of Middle East Studies

Vol 32. No 3. Autumn 2025

Received date: 2025.07.30

Acceptance date: 2026.01.24



مرکز پژوهش‌های علمی و
مطالعات استراتژیک خاورمیانه

Home page: www.cmess.sinaweb.net

Study of climate change in the Middle East based on analysis of precipitation changes in the last four decades

Chakavak Khajehamiri Khaledi¹



Abstract

The present study aimed to analyze the trend of precipitation changes in the Middle East during the period 1984–2023. In this research, annual precipitation data for 16 countries were extracted from the PERSIANN satellite-based database and validated against ground observations. To examine the temporal behavior of precipitation, statistical trend tests, abrupt change detection, and clustering methods were employed. The results revealed that most countries located in the southern and southwestern parts of the region, including Iraq, Saudi Arabia, Yemen, the United Arab Emirates, and Kuwait, experienced a decreasing trend in annual precipitation. In contrast, northern countries and Mediterranean areas such as Turkey, Lebanon, Syria, and Jordan showed an increasing or relatively stable trend. This heterogeneous pattern indicates that climate change has manifested unevenly across the Middle East. The decline in precipitation in southern and southwestern countries is likely to exacerbate water scarcity, reduce agricultural productivity, and increase climate-induced migration. Conversely, the increase or stability of precipitation in northern countries such as Turkey and Lebanon may intensify geopolitical tensions over the exploitation of shared water resources. Overall, the findings highlight that climate change in the region not only entails environmental and economic challenges but also generates significant social and political consequences. Therefore, it is essential for Middle Eastern countries to adopt cooperative strategies in water resource management, promote innovative technologies for improving water use efficiency and storage, and strengthen climate resilient infrastructure to mitigate vulnerabilities and ensure the sustainability of regional water resources.

Keywords: Climate Change, Annual Precipitation, Middle East, Remote Sensing, Water Resources Management.

1 - Assistant Professor and Director of the Oceanography Department, Faculty of Marine Sciences, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran.



مرکز پژوهش‌های علمی و
مطالعات استراتژیک خاورمیانه

فصلنامه علمی مطالعات خاورمیانه

سال ۳۲، شماره ۳، پیاپی (۱۲۱)، پاییز ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

Home page: www.cmess.sinaweb.net

نوع مقاله: پژوهشی

بررسی تغییر اقلیم در خاورمیانه مبتنی بر تحلیل تغییرات بارش چهار دهه اخیر

چکاوک خواجه امیری خالدی^۱



چکیده

پژوهش با هدف تحلیل روند تغییرات بارش در خاورمیانه طی دوره ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳ انجام گرفت. داده‌های بارش سالانه برای ۱۶ کشور منطقه خاورمیانه از پایگاه سنجش از دور PERSIANN استخراج و پس از صحت‌سنجی با داده‌های مشاهداتی، مورد پردازش قرار گرفت. به منظور بررسی رفتار زمانی بارش، آزمون‌های آماری روند و تغییر ناگهانی و همچنین روش‌های خوشه‌بندی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که بیشتر کشورهای جنوب و جنوب غرب منطقه، از جمله عراق، عربستان سعودی، یمن، امارات متحده عربی و کویت با روند کاهشی بارش در مقیاس سالانه مواجه بوده‌اند. این در حالی است که کشورهای شمالی‌تر و نواحی مدیترانه‌ای مانند ترکیه، لبنان، سوریه و اردن، عمدتاً روند افزایشی یا ثبات نسبی بارش را تجربه کرده‌اند. این الگوی ناهمگون بیانگر آن است که تغییر اقلیم در خاورمیانه به صورت نامتوازن بروز یافته است؛ به گونه‌ای که کاهش بارش، خطر تشدید بحران‌های آبی، افت تولیدات کشاورزی و افزایش مهاجرت‌های اقلیمی را به همراه دارد. در مقابل، افزایش یا پایداری بارش در کشورهای شمالی‌تر نظیر ترکیه و لبنان می‌تواند زمینه‌ساز بروز اختلافات ژئوپلیتیکی بر سر بهره‌برداری از منابع آب مشترک گردد. به طور کلی یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی در منطقه نه تنها چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی، بلکه پیامدهای اجتماعی و سیاسی قابل توجهی در پی خواهد داشت. بر این اساس، ضرورت دارد کشورهای منطقه با اتخاذ رویکردهای مشترک در مدیریت منابع آب، توسعه فناوری‌های نوین در زمینه افزایش بهره‌وری و ذخیره‌سازی آب، زمینه کاهش آسیب‌پذیری و تضمین پایداری منابع آبی را فراهم آورند.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، بارش سالانه، خاورمیانه، سنجش از دور، مدیریت منابع آب.

مقدمه

اقلیم زمین همواره تحت تأثیر تغییرات طبیعی و انسانی قرار داشته است (IPCC, 2021). در دهه‌های اخیر، افزایش سریع گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه رشد دی‌اکسید کربن، منجر به گرمایش جهانی و تغییرات گسترده در الگوهای اقلیمی شده است (Lelieveld et al., 2016). افزایش دمای جهانی اثر قابل توجهی بر پارامترهایی مانند بارش، تبخیر و پوشش گیاهی دارد (Gebrechorkos, 2025). منطقه خاورمیانه که در کمربند خشک و نیمه خشک جهانی واقع شده، به واسطه بارش کم، منابع آبی محدود و افزایش جمعیت، یکی از حساس‌ترین نواحی در برابر تغییرات اقلیمی به شمار می‌رود (UNEP, 2016). این منطقه از آسیب‌پذیرترین نقاط جهان در برابر پیامدهای تغییرات آب و هوایی است و با فشارهایی همچون دماهای بالا، افزایش سطح آب دریاها، خشکسالی، سیل، کمبود شدید آب و آلودگی هوا مواجه است (Lelieveld et al., 2016). مطالعات نشان می‌دهد که دمای خاورمیانه بین ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰، دو برابر سریع‌تر از میانگین جهانی افزایش یافته و این امر اختلالات شدیدی در میزان و حجم بارندگی ایجاد کرده است (Lelieveld et al., 2016; IPCC, 2021). بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۲، دما در سراسر خاورمیانه و شمال آفریقا به میزان ۰.۴۶ درجه سانتی‌گراد در هر دهه افزایش یافته، در حالی که میانگین جهانی تنها ۰.۱۸ درجه سانتی‌گراد در هر دهه بوده است (Lim et al., 2023). از سیل‌های ویرانگر در ایران و پاکستان گرفته تا خشکسالی در عراق و یمن، تأثیر گسترده تغییرات آب و هوایی را می‌توان مشاهده کرد. پیامدهای که این امر بر ساکنین و اقتصاد کشورها وارد می‌کند، در حال بدتر شدن است. در این راستا اغلب دولت‌های منطقه به طور نامتناسبی تحت تأثیر قرار می‌گیرند و درگیری‌ها و تنش تشدید می‌شود (Lelieveld et al., 2016; Cook et al., 2016).

کاهش بارش‌ها و افزایش دما سبب شده فشار بسیار سنگینی بر منابع آب و کشاورزی وارد شود که تهدیدی برای امنیت غذایی، اقتصادی و سیاسی آن است و باعث مهاجرت، فقر و درگیری‌های محلی شده است (UN ESCWA¹, 2015). روند کلی بارش در برخی مناطق خاورمیانه کاهش یافته و بارش‌های باقیمانده بیشتر رگباری و ناپایدار شده‌اند که پیامدهایی چون خسارت به زیرساخت‌ها را به دنبال دارد (Zittis et al., 2016; Bao et al., 2016).

این مطالعه با هدف بررسی روند بارش در کشورهای منتخب این منطقه انجام شده است. بررسی تغییرات روند بارش در این منطقه می‌تواند منجر به برنامه‌ریزی مطلوب برای مقابله با تنش‌های کمی آبی طی سالیان آتی منجر شود. در رابطه با بررسی روند بارش و تغییرات بارش محققان زیادی مطالعه کرده‌اند، در ایران از مهم‌ترین مطالعات در این خصوص می‌توان به مطالعات فرج‌زاده و فیضی (۱۳۹۱)، مسعودیان و دارند (۱۳۹۲)، ابراهیمی و کردوانی (۱۳۹۳)، دارند (۱۳۹۳)، ناظری و همکاران (۱۳۹۵)، قصاب فیض و اسلامی (۱۳۹۶)، باقرپور و همکاران (۱۳۹۶)، دین پژوه و صدیق‌پور (۱۳۹۸)، هرمزی و همکاران (۱۳۹۸) و میرزایی حسنلو و همکاران (۱۳۹۹)، می‌توان اشاره نمود که در ایستگاه‌های مختلف ایران وجود روندهای مثبت و منفی برای بارش طی دوره‌های زمانی مختلف را نشان دادند. از جمله مطالعات بین‌المللی نیز می‌توان به پژوهش دوهان و پاندی (۲۰۱۳) در خصوص تغییرات زمانی و مکانی بارش در منطقه مادهیا پارادش هندوستان، جین و همکاران (۲۰۱۳) تغییرات بلندمدت بارش و دمای شمال غرب هند، چن و همکاران (۲۰۱۴) روند تغییرات بارش، دما و رواناب حوضه ۱۹۵۵ آبریز یانگ تسه چین، ترائوره و همکاران (۲۰۱۷) ارزیابی روند تغییر بارندگی روزانه و شدت دما در باماكو و سگو مالی، باتلو و کاردونا (۲۰۲۰) روند بارش بر روی آلتی پلانو در جنوب آند، یاکوب و تافیور (۲۰۲۰) تحلیل روند بارش در موریتانی و لاسات و همکاران (۲۰۲۱) روند بارش همرفت در منطقه مدیترانه اسپانیا اشاره نمود که در این مطالعات نیز روندهای مثبت یا منفی برای بارش مشاهده گردید. نتایج مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهد که ظاهراً سرعت جابه‌جایی مسیر الگوهای بارش‌زا تحت تأثیر گرمایش جهانی شدت بیشتری پیدا کرده است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های جدید نشان داده‌اند که تغییر اقلیم در خاورمیانه نه تنها منجر به کاهش میانگین بارش سالانه در بسیاری از کشورها شده، بلکه الگوهای زمانی و مکانی بارش را نیز به طور چشمگیری دگرگون ساخته است. برای مثال، بررسی‌های اخیر حاکی از آن است که گرمایش سریع فصل‌های زمستان و بهار در برخی بخش‌های منطقه می‌تواند به تقویت بارش‌های تابستانه در مناطق هم‌جوار منجر شود که پیامدهای هیدرولوژیکی فرا مرزی دارد (Li et al., 2023). همچنین مطالعات جدید نشان داده‌اند که ساز و کارهای اتمسفری مانند رودخانه‌های جوی و تغییر در الگوهای همدیدی نقش مهمی در وقوع بارش‌های شدید و سیلاب‌های ناگهانی در شبه جزیره عربستان و جنوب غرب آسیا دارند (Massoud., 2022; Francis et al., 2024a).

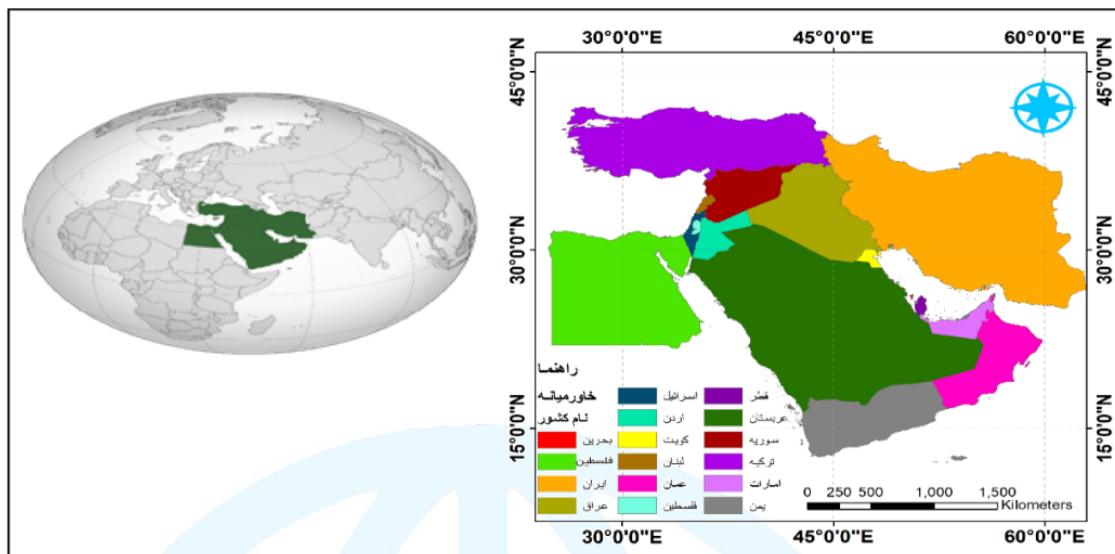
این یافته‌ها بیانگر آن است که حتی در شرایط کاهش بارش میانگین، فراوانی و شدت رویدادهای حدی رو به افزایش است و این مسئله خطر سیلاب و خسارت‌های زیربنایی را تشدید می‌کند. از سوی دیگر، مطالعات تلفیقی اخیر در بازه ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهند که منطقه MENA علاوه بر روند کلی خشک‌تر شدن در برخی نواحی، با افزایش احتمال وقوع «شوکه‌های بارشی» مواجه است. این تغییرات پیامدهای اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای به همراه دارد و ضرورت مدیریت هم‌زمان کاهش بارش میانگین و افزایش رویدادهای حدی را برجسته می‌سازد (Francis et al., 2024b). در همین راستا، گزارش‌های اخیر نسبت به نقش گرمایش جهانی در تشدید سیلاب‌های ویرانگر نیز هشدار داده‌اند؛ به طور نمونه، بارش‌های سیل‌آسای آوریل ۲۰۲۴ در امارات و عمان در مطالعات انتساب اقلیمی به طور مستقیم با اثر گرمایش جهانی مرتبط دانسته شد (World Weather Attribution, 2024).

بر این اساس، پیشینه علمی نشان می‌دهد که تحلیل تغییرات بارش در خاورمیانه باید هم‌زمان به روندهای بلندمدت، فراوانی رویدادهای حدی و پیامدهای اجتماعی-سیاسی توجه کند. افزون بر این، استفاده از داده‌های سنجش از دور در کنار بازتحلیل‌های اقلیمی و داده‌های زمینی می‌تواند در کاهش عدم قطعیت‌ها و تدوین راهبردهای سازگاری منطقه‌ای نقش کلیدی ایفا کند. پایش دقیق روندهای بارشی در این منطقه می‌تواند راهگشای سیاست‌گذاری‌های کلان در مدیریت منابع آب، امنیت غذایی و آمادگی در برابر تنش‌های آبی باشد. در سال‌های اخیر، استفاده از داده‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های تحلیل سری‌های زمانی، ابزار مناسبی برای تحلیل دقیق روندهای اقلیمی فراهم آورده است. در این پژوهش، روند بارش در ۱۶ کشور خاورمیانه طی چهار دهه گذشته (۱۹۸۴-۲۰۲۳) با بهره‌گیری از داده‌های PERSIANN تحلیل شده است. این مطالعه با هدف شناسایی نواحی دارای روندهای معنادار افزایشی یا کاهشی و نیز تعیین الگوهای تغییرات بارش در سطح منطقه‌ای انجام شده است.

داده‌ها و روش پژوهش

منطقه‌ای از آسیا که به نام خاورمیانه یا آسیای جنوب غربی شناخته شده را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود، یکی بخش شمالی شامل ترکیه و ایران و دیگری بخش جنوبی شامل شبه جزیره عربستان (عربستان سعودی، عمان، بحرین، امارات، یمن، قطر، کویت، عراق). این منطقه به سبب اینکه محل اتصال ۳ قاره آسیا، اروپا و آفریقا است و همچنین به سبب مخازن وسیع نفت از اهمیت ژئوپلیتیکی بسیار بالایی برخوردار است (شکل ۱).

شکل ۱- موقعیت استراتژیک خاورمیانه



(بر اساس داده‌های ویکی‌پدیا و ترسیم نگارنده در محیط GIS)

داده‌های بارش ماهیانه از داده‌های سنجش از دور پایگاه پرشین در بازه زمانی ۱۹۸۴-۲۰۲۳ برای ۱۶ کشور منطقه خاورمیانه تهیه شده است. ظهور فناوری‌های ماهواره‌ای و افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها (برای انجام محاسبات سنگین مدل‌سازی جو و اتصال آن به مدل‌های سطح زمین منجر به ارائه محصولات بارشی با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا شده است. این محصولات عمدتاً به صورت شبکه‌بندی هستند و اگرچه بر خلاف ایستگاه‌های باران‌سنجی زمینی، دارای مشکل عدم پیوستگی مکانی و زمانی نمی‌باشند، ولی عدم قطعیت‌هایی در تخمین بارش دارند که از جمله نقاط ضعف این پایگاه‌های داده محسوب می‌شوند (Steiner et al., 2003; Hong et al., 2006; AghaKouchak et al., 2009).

در پایگاه بارشی ارزشمند PERSIANN، از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی و تصاویر بازتابش شده مادون قرمز توسط ماهواره‌های زمین مرجع برای تخمین میزان بارندگی استفاده می‌شود. الگوریتم PERSIANN ابتدا بر اساس تصاویر مادون قرمز از ماهواره‌های زمین مرجع بود، سپس به نسخه جدید آنکه در حال حاضر استفاده می‌شود، داده‌های ماکروویو نیز اضافه شد که این داده‌های جدید برای کالیبراسیون و تنظیم پارامترهای الگوریتم به کار می‌روند. مطالعات اعتبارسنجی نشان می‌دهند که تخمین‌های بارش به طور قابل توجهی توسط تنظیم داده‌های به دست آمده از مادون قرمز با اطلاعات ماکروویو، بهبود یافته‌اند. الگوریتم برآورد بارش PERSIANN به طور کاربردی از سال ۱۹۸۳ با پوشش سراسر از ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی، در دسترس است.

آزمون من-کندال

دو آزمون من کندال و شیب سنس (Sen's Estimator) جزو متداولترین‌های ناپارامتری تحلیل روند سری‌های زمانی هیدرومئولوژیکی به شمار می‌روند. مطالعات مختلف انجام شده با استفاده از این دو روش حاکی از اهمیت و کاربرد فراوان آنها در تحلیل روند سری‌های زمانی می‌باشد. روش من-کندال ابتدا توسط من (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط کندال (۱۹۷۰) بسط و توسعه یافت. فرض صفر آزمون من-کندال بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. در این روش ابتدا اختلاف بین هر یک از مشاهدات با تمام مشاهدات پس از آن محاسبه شده و پارامتر S مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

که n تعداد مشاهدات سری، و X_k و X_j به ترتیب داده‌های z ام و k ام سری می‌باشند. تابع علامت sgn نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x_j - x_k) &= +1 & \text{for } (x_j - x_k) > 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= 0 & \text{for } (x_j - x_k) = 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= -1 & \text{for } (x_j - x_k) < 0 \end{aligned} \quad (2)$$

در مرحله بعد محاسبه واریانس S توسط یکی از روابط زیر محاسبه شد:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{for } n > 10 \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{for } n < 10 \quad (4)$$

که n و m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آنها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله (تعداد گره‌ها) می‌باشد. در نهایت نیز آماره Z به کمک یکی از روابط زیر استخراج می‌شود:

$$z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{for } S > 0 \quad (5)$$

$$z = 0 \quad \text{for } S = 0$$

$$z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{for } S < 0$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

$$|Z| < Z_{\alpha/2} \quad (6)$$

که α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α می‌باشد که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، $\alpha/2$ استفاده شده است. در بررسی حاضر این آزمون برای سطوح اعتماد ۹۵٪ و ۹۹٪ به کار گرفته شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۰).

آزمون تغییر ناگهانی

آزمون پتیت^۱ یکی از روش‌های آمار ناپارامتری برای شناسایی نقطه تغییر ناگهانی^۲ در یک سری زمانی است. این آزمون بررسی می‌کند که آیا در یک نقطه خاص از سری زمانی، تغییر معنی‌داری در میانگین یا روند داده‌ها اتفاق افتاده است یا خیر. کاربردهای آن شناسایی شروع خشکسالی یا ترسالی در داده‌های بارش، تشخیص تغییر ناگهانی در دما، دبی رودخانه، سطح آب‌های زیرزمینی و سایر متغیرهای اقلیمی یا محیطی و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم یا اقدامات انسانی بر الگوهای طبیعی است.

خوشه‌بندی^۳

گروه‌بندی کشورها بر اساس شباهت‌های بارش با استفاده از الگوریتم‌هایی مثل K-means یا خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای خوشه‌بندی کشورها بر اساس شباهت بارش سالانه در دوره ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳، می‌توان الگوریتم‌های K-means و خوشه‌بندی سلسله مراتبی را روی داده بارش اجرا و گروه‌ها را شناسایی نماییم. برای این کار در ابتدا داده‌های بارش کشورها به صورت ماتریس نمونه (سال‌ها به ردیف، کشورها به ستون) آماده‌سازی و نرمال‌سازی داده‌ها جهت مقایسه بهتر را انجام داد. سپس الگوریتم K-means برای تعیین خوشه‌ها با تعداد خوشه مناسب (مثلاً ۳ تا ۵ خوشه) و خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای مشاهده ساختار و سطح شباهت کشورها را اجرا نمود.

1 - Pettitt Test
2 - Change Point
3 - Clustering

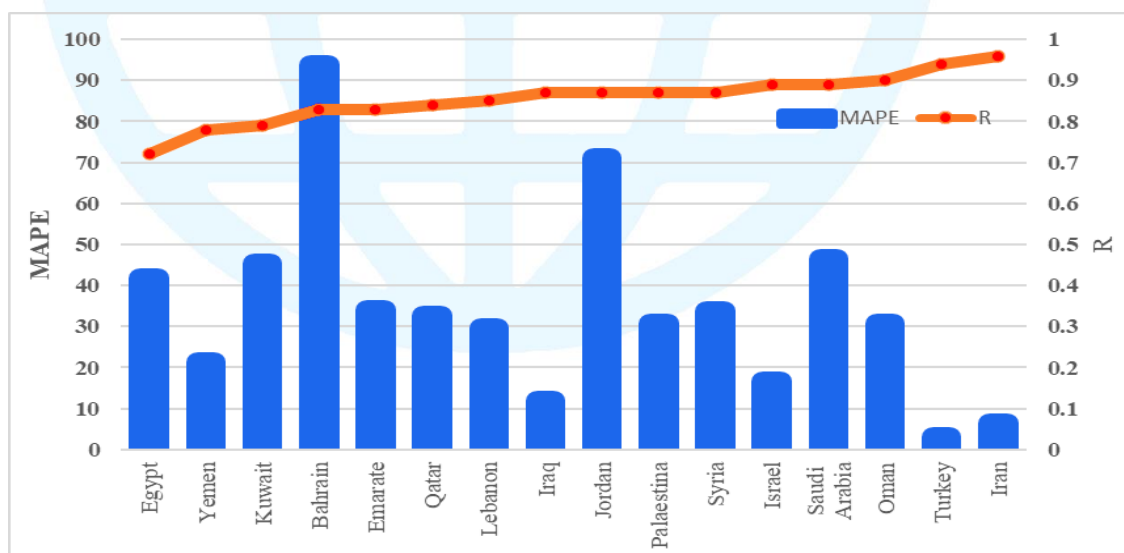
یافته‌های پژوهش

در جدول ۱، نتایج صحت‌سنجی داده‌های بارش پایگاه PERSIANN با داده‌های واقعی مشاهداتی سازمان جهانی هواشناسی در دوره گذشته با استفاده از شاخص‌های خطای آماری برای کشورهای مختلف منطقه ارائه شده است. بیشترین دقت مربوط به ایران ($R=0.96$ و $MAPE=6.4$) و ترکیه ($R=0.94$ و $MAPE=3.0$) است. کمترین دقت در لبنان ($MAD=171.2$ و $RMSE=183.1$) و فلسطین ($MAD=151.6$ و $RMSE=158.1$) مشاهده می‌شود، که احتمالاً ناشی از پیچیدگی‌های اقلیمی محلی یا کمبود داده‌های مشاهداتی است. در شاخص $MAPE$ ، برخی کشورها مثل ایران، ترکیه و عراق درصد خطای بسیار پایینی دارند، اما کشورهایی مثل بحرین (۹۳.۸٪) و اردن (۷۱.۲٪) خطای نسبی بالایی را نشان می‌دهند. در ضریب همبستگی (R) بیشترین مقدار برای ایران (۰.۹۶) و کمترین برای مصر (۰.۶۲) ثبت شده که بیانگر ضعف همبستگی داده‌های پایگاه با داده‌های واقعی در مصر است. داده‌های PERSIANN برای اکثر کشورها همبستگی نسبتاً بالایی با داده‌های واقعی دارند، اما در برخی مناطق با شرایط اقلیمی خاص یا پراکندگی ایستگاه‌های کم (مانند بحرین و مصر) دقت کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از این داده‌ها در مطالعات اقلیمی باید با در نظر گرفتن شرایط مکانی و ارزیابی محلی انجام گیرد.

جدول ۱- صحت سنجی داده‌های پایگاه PERSSIAN با داده‌های واقعی در دوره زمانی گذشته

	MAD	MSE	RMSE	MAPE	R(XY)
Bahrain	60.8	2600.7	68.2	93.8	0.83
Egypt	16.6	331.7	18.2	41.9	0.72
Emarate	43.1	2210.5	47.0	34.0	0.83
Iran	17.9	472.1	21.7	6.4	0.96
Iraq	24.5	990.9	31.5	11.9	0.87
Israel	35.6	1683.5	41.0	16.7	0.89
Jordan	53.8	3124.6	55.9	71.2	0.87
Kuwait	46.7	3218.4	56.7	45.3	0.79
Lebanon	171.2	2100.4	183.1	29.6	0.85
Oman	38.9	1758.9	41.9	30.7	0.90
Palaestina	151.6	1500.4	158.1	30.8	0.87
Qatar	50.4	2900.6	58.7	32.6	0.84
Saudi Arabia	29.2	1067.4	32.7	46.6	0.89
Syria	72.5	4110.4	80.2	33.8	0.87
Turkey	21.1	734.0	27.1	3.0	0.94
Yemen	29.4	980.7	36.0	21.4	0.78

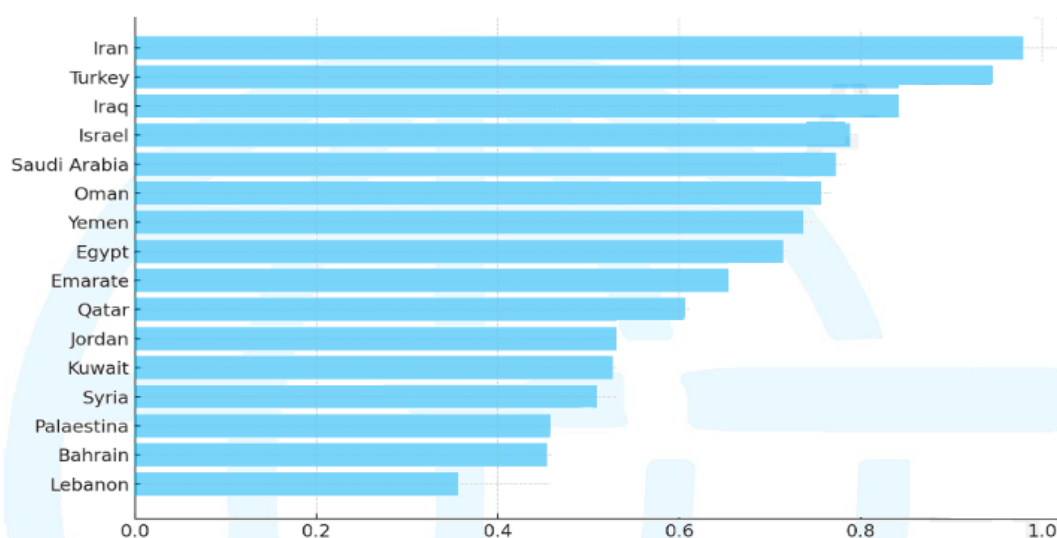
شکل ۲- نمودار مقایسه خطای درصدی MAPE و ضریب همبستگی داده‌ها در کشورهای مختلف



در نمودار شکل ۲، کشورها بر اساس ضریب همبستگی R خطی (ضریب همبستگی پیرسون r) بین داده‌های پایگاه PERSIANN و داده‌های واقعی مرتب شده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود: ایران و ترکیه بالاترین همبستگی (به ترتیب ۰.۹۶ و ۰.۹۴) و مصر و یمن کمترین همبستگی (به ترتیب ۰.۷۲

و ۰.۷۸) را دارند. همچنین در این نمودار، کمترین خطا مربوط به ترکیه، ایران و عراق است. بیشترین خطا مربوط به بحرین و لبنان می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که در برخی کشورها، حتی با وجود همبستگی نسبتاً خوب، خطای نسبی بسیار بالا است که می‌تواند ناشی از نوسانات شدید بارش یا محدودیت داده‌های مشاهداتی باشد.

شکل ۳- رتبه‌بندی ترکیبی کشورها بر اساس بیشترین همبستگی پیرسون r و کمترین میزان خطای آماری نسبت به داده‌های واقعی



این نمودار (شکل ۳)، رتبه‌بندی ترکیبی کشورها را بر اساس بیشترین ضریب همبستگی و کمترین میزان خطا نشان می‌دهد که ایران و ترکیه در بالاترین جایگاه قرار دارند.

تحلیل آماری بارش خاورمیانه

طبق جدول ۲، میانگین بارش سالانه در کشورهای نمونه بین ۱۱ تا ۷۰۰ میلی‌متر متغیر است. بیشترین بارش متوسط مربوط به ترکیه (میانگین ۶۹۹ میلی‌متر) و لبنان (میانگین ۵۷۳ میلی‌متر) است. کمترین میانگین‌ها مربوط به مصر (۱۱ میلی‌متر) و امارات (۴۵ میلی‌متر) می‌باشد. پراکندگی (انحراف معیار) بارش سالانه در کشورها تابع شرایط اقلیمی و جغرافیایی است، ترکیه و لبنان و عمان جزو متغیرترین مناطق هستند.

جدول ۲- شاخص‌های آماری دوره ۱۹۸۴-۲۰۲۳

	Min	Max	Mean	Variance	Std. Deviation
Bahrain	8.6	161.2	63.0	161.2	8.6
Egypt	5.7	26.9	10.6	26.9	5.7
Emarate	9.3	142.7	45.7	142.7	9.3
Iran	171.4	389.2	276.7	389.2	171.4
Iraq	92.5	365.3	205.4	365.3	92.5
Israel	113.2	283.3	200.9	283.3	113.2
Jordan	37.3	119.8	75.5	119.8	37.3
Kuwait	34.1	265.1	132.2	265.1	34.1
Lebanon	357.2	815.9	573.8	815.9	357.2
Oman	7.6	141.3	49.9	141.3	7.6
Palaestina	175.9	462.9	311.8	462.9	175.9
Qatar	9.0	180.5	64.1	180.5	9.0
Saudi Arabia	34.7	112.1	62.5	112.1	34.7
Syria	119.4	356.0	218.7	356.0	119.4
Turkey	541.1	823.4	699.5	823.4	541.1
Yemen	94.6	214.5	148.9	214.5	94.6

سال‌هایی مانند ۱۹۹۰ و ۲۰۲۱ دارای کمترین بارش و سال‌هایی مانند ۱۹۸۸ و ۱۹۹۷ بیشترین بارش را تجربه کرده‌اند. برای تحلیل‌های دقیق‌تر می‌توان روند هر کشور را جداگانه بررسی، مدل‌سازی و مشکلات احتمالی کم‌آبی یا خشکسالی را پیش‌بینی کرد.

برای تحلیل آماری داده‌های بارش سالانه کشورهای خاورمیانه از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳، موارد زیر قابل بیان است: داده‌ها نشان‌دهنده میانگین بارش سالانه در هر کشور به تفکیک سال هستند. میانگین بارش سالانه در این منطقه دارای نوسان است ولی به طور کلی روند کمی نزولی دارد (ضریب همبستگی بین سال و میانگین بارش حدود -۰.۱۹ است). بیشترین میانگین بارش مربوط به ترکیه و لبنان و کمترین میانگین بارش مربوط به مصر و کشورهای کویری مانند بحرین است. از نظر تغییرات بین سال‌ها، بارش در برخی سال‌ها بسیار کم (مثلاً سال ۲۰۲۱) و در برخی سال‌ها به شکل قابل توجهی افزایش داشته است (مثلاً سال‌های ۱۹۸۸، ۱۹۹۷).

آزمون تغییر ناگهانی

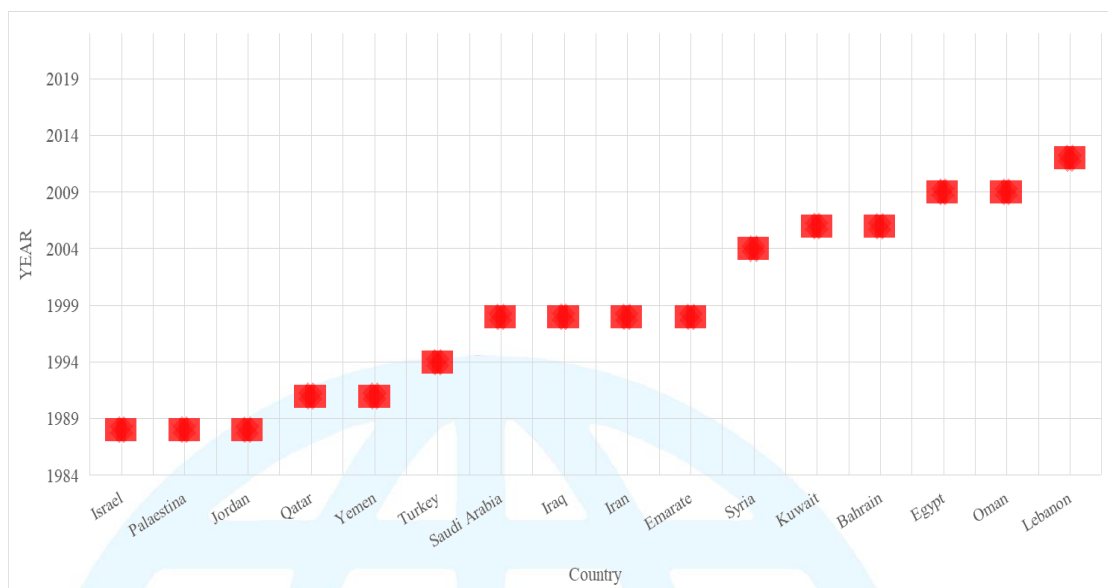
جدول ۳- نتایج آزمون تغییر ناگهانی برای کشورهای مختلف خاورمیانه با گزارش مقدار p ، آماره

آزمون u و سال وقوع تغییر

رتبه		مقدار احتمال (p-value)	آماره آزمون (U)	سال تغییر ناگهانی
1	Egypt	0.0014	292.0	2009
2	Saudi Arabia	0.0037	272.0	1998
3	Kuwait	0.0162	238.0	2006
4	Iraq	0.0439	212.0	1998
5	Syria	0.3604	142.0	2004
6	Iran	0.5079	127.0	1998
7	Oman	0.7422	108.0	2009
8	Israel	0.7977	104.0	1988
9	Palestine	0.7977	104.0	1988
10	Turkey	0.7977	104.0	1994
11	Bahrain	0.8261	102.0	2006
12	Emirate	0.8842	98.0	1998
13	Qatar	0.8842	98.0	1991
14	Lebanon	0.9139	96.0	2012
15	Jordan	1.0667	86.0	1988
16	Yemen	1.1610	80.0	1991

جدول ارائه شده شماره ۳، نتایج آزمون تغییر ناگهانی برای کشورهای مختلف خاورمیانه را نشان می‌دهد. کشورهایمانند مصر، عربستان سعودی، کویت و عراق با مقدار احتمال کمتر از ۰.۰۵ دارای تغییر ناگهانی معنادار در اقلیم یا بارش هستند. سایر کشورها با $p > 0.05$ نشان‌دهنده تغییر ناگهانی معنادار نیستند یا تغییرات آنها در سطح اطمینان ۹۵٪ قابل تأیید نیست. بیشترین تغییرات معنادار در اواخر دهه ۱۹۹۰ و دهه ۲۰۰۰ مشاهده می‌شود. برای مصر (۲۰۰۹) و کویت (۲۰۰۶) تغییرات دیرتر رخ داده، در حالی که برای عربستان و عراق (۱۹۹۸) تغییرات زودتر آشکار شده است. کشورهایمانند ایران، سوریه، عمان، ترکیه، فلسطین، اسرائیل، لبنان و اردن تغییرات اقلیمی معنادار ناگهانی نداشته‌اند ($p > 0.05$). کشورهای واقع در بخش‌های خشک‌تر (مانند مصر، عربستان، کویت و عراق) تغییرات ناگهانی قابل توجهی را تجربه کرده‌اند. کشورهای با اقلیم متنوع‌تر (مانند ترکیه، ایران، لبنان) تغییرات معنی‌داری در این آزمون نشان نداده‌اند. به طور کلی، نتایج حاکی از آن است که بخش‌های جنوبی و مرکزی خاورمیانه (به‌ویژه عربستان، کویت، عراق و مصر) نسبت به تغییرات اقلیمی ناگهانی حساس‌تر بوده‌اند و این تغییرات بیشتر در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ رخ داده است (شکل ۴).

شکل ۴- نمودار سال‌های وقوع تغییرات ناگهانی (Break Points) در کشورهای مختلف



خوشه‌بندی

خوشه‌بندی کشورها به شرح جدول شماره ۴ می‌باشد (هر کشور به یکی از ۴ خوشه اختصاص یافته):

جدول ۴- خوشه‌بندی کشورها

Country	Clustering
Egypt	0
Bahrain	1
Emirate	
Oman	
Qatar	
Saudi Arabia	
Kuwait	
Yemen	
Iran	2
Iraq	
Israel	
Jordan	
Palestine	
Syria	3
Turkey	
Lebanon	

- خوشه ۰: مصر تنها کشور این خوشه است، با الگوی بارش بسیار متفاوت (بارش کم و ایستا).
- خوشه ۱: بیشتر کشورهای خلیج فارس مانند بحرین، امارات، کویت، قطر، عمان و عربستان و یمن که بارش کمتری دارند.
- خوشه ۲: کشورهایی با بارش متوسط مانند ایران، عراق، اسرائیل، فلسطین، اردن.
- خوشه ۳: کشورهایی با بارش نسبتاً زیاد و نوسان بیشتر، مانند لبنان، سوریه و ترکیه.

آزمون من-کندال و شیب سن

برای کلیه سری‌های زمانی مورد مطالعه آماره‌های دو آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن^۱ محاسبه گردید که نتایج حاصله در جدول شماره ۵ مشاهده می‌شود.

جدول ۵- مقادیر آماره کندال (T) و آماره بحرانی $t(T)$ و شیب سن (Sen's estimate) برای داده‌های بارش سالیانه کشورهای خاورمیانه، سطوح اطمینان ۹۹٪ و ۹۵٪

کشور	Index						
	Test Z	Sen's estimate	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95	B
Bahrain	0.65	0.2848	-0.274	0.41	-0.172	0.34	7.76
Egypt	2.36	0.3631	-0.002	0.046	0.003	0.038	0.36
Emirate	-0.15	-0.0519	-0.301	0.2	-0.247	0.142	6.4
Iran	-0.18	-1.0617	-0.656	0.583	-0.475	0.462	30.62
Iraq	-0.4	-1.8378	-0.902	0.62	-0.681	0.489	27.64
Israel	0.48	-0.2292	-0.267	0.321	-0.187	0.257	7.01
Jordan	0.54	0.0507	-0.207	0.322	-0.115	0.246	4.63
Kuwait	0.18	-1.8274	-0.609	0.516	-0.355	0.43	13.91
Lebanon	-0.45	-1.5147	-0.697	0.462	-0.536	0.343	25.35
Oman	0.15	0.5247	-0.286	0.354	-0.191	0.246	5.94
Palestine	0.47	-0.2302	-0.267	0.321	-0.187	0.257	6.9
Qatar	0.26	0.5931	-0.289	0.389	-0.196	0.303	7.47
Saudi Arabia	-1.16	-0.9138	-0.723	0.287	-0.602	0.188	17.79
Syria	-1.1	-0.9694	-0.715	0.438	-0.577	0.252	30.46
Turkey	-1.32	2.5157	-1.21	0.514	-0.985	0.238	72.74
Yemen	-1.68	0.0478	-1.204	0.335	-0.968	0.124	28.79

شاخص B بیانگر نوسان یا واریانس مقیاس یافته داده‌ها (اغلب به صورت شاخص بر اساس آزمون کندال یا شیب سن) می‌باشد.

این شاخص در بسیاری از منابع به عنوان میزان پراکندگی یا دامنه تغییرات نسبی شیب روند در بازه زمانی مطالعه معرفی می شود. در عمل، B می تواند معیاری از قدرت یا شدت روند باشد؛ به این معنا که هرچه مقدار B بزرگتر باشد، دامنه تغییرات بارش یا حساسیت داده ها به تغییر اقلیم بیشتر است. مقادیر B در کشورهای مختلف بسیار متفاوت است. برای مثال:

ترکیه (۷۲/۷۴) و ایران (۳۰/۶۲) دارای بالاترین مقادیر هستند که نشان دهنده نوسانات زیاد و شدت بالای تغییرات بارش در این کشورهاست. کشورهای مانند مصر (۰/۳۶) و اردن (۴/۶۳) مقادیر پایینی دارند که نشان دهنده ثبات نسبی بیشتر در روند بارش است. این اختلاف بیانگر آن است که تغییر اقلیم در منطقه خاورمیانه اثرات ناهمگنی بر کشورها داشته و در برخی نقاط تغییرات بارش بسیار چشمگیرتر بوده است.

نتایج آماره من کندال (T) و شیب سن برای کشورهای خاورمیانه نشان می دهد که:

- ۱- بحرین: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۰/۲۸ میلی متر افزایش داشته است.
- ۲- مصر: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۰/۳۶ میلی متر افزایش داشته است.
- ۳- امارات: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار ناچیز حدودی ۰/۰۵ میلی متر کاهش داشته است.
- ۴- ایران: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۱/۰۶ میلی متر کاهش داشته است.
- ۵- عراق: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار قابل توجه ۱/۸۷ میلی متر کاهش داشته است.
- ۶- اسرائیل: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۰/۲۳ میلی متر کاهش داشته است.
- ۷- اردن: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار ناچیز حدودی ۰/۰۵ میلی متر افزایش داشته است.
- ۸- کویت: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار قابل توجه ۱/۸ میلی متر کاهش داشته است.
- ۹- لبنان: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار قابل توجه ۱/۵ میلی متر کاهش داشته است.
- ۱۰- عمان: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۰/۵ میلی متر کاهش داشته است.
- ۱۱- فلسطین: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۰/۲۳ میلی متر کاهش داشته است.
- ۱۲- قطر: بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۰/۵۹ میلی متر افزایش داشته است.

۱۳- عربستان: بارش سالانه طی سال‌های گذشته به مقدار قابل توجه ۰/۹۱ میلی‌متر کاهش داشته است.

۱۴- سوریه: بارش سالانه طی سال‌های گذشته به مقدار قابل توجه ۰/۹۶ میلی‌متر کاهش داشته است.

۱۵- ترکیه: بارش سالانه طی سال‌های گذشته به مقدار قابل توجه ۲/۵۲ میلی‌متر افزایش داشته است.

۱۶- یمن: بارش سالانه طی سال‌های گذشته به مقدار ناچیز حدودی ۰/۰۵ میلی‌متر افزایش داشته است.

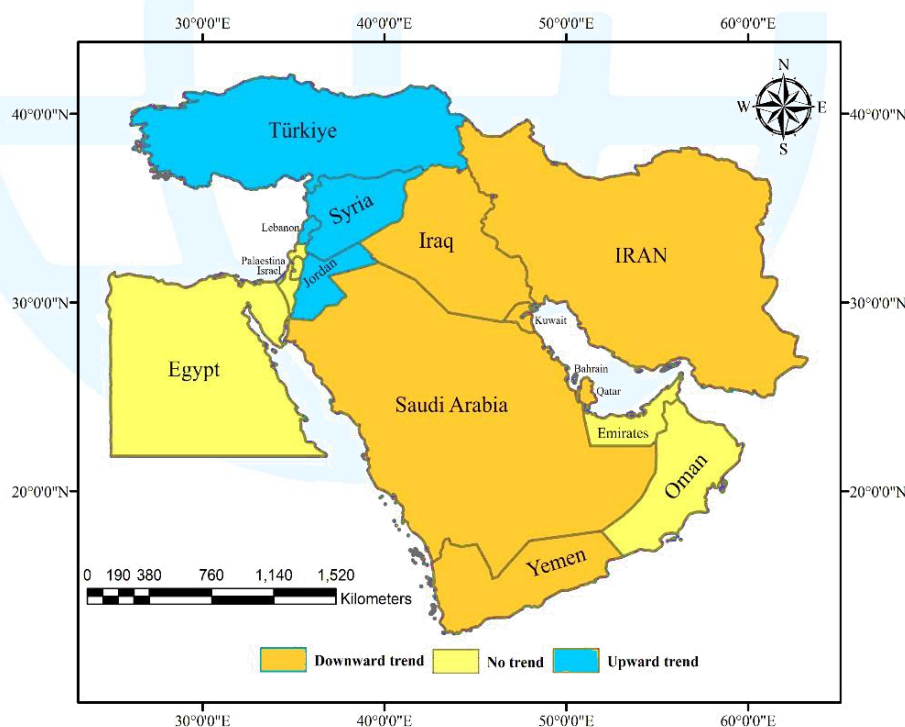
شکل ۵- نقشه سه شاخص اصلی کشورهای خاورمیانه

Bahrain	0.65	0.28	7.76
Egypt	2.36	0.36	0.36
Emarate	-0.15	-0.05	6.40
Iran	-0.18	-1.06	30.62
Iraq	-0.40	-1.84	27.64
Israel	0.48	-0.23	7.01
Jordan	0.54	0.05	4.63
Kuwait	0.18	-1.83	13.91
Lebanon	-0.45	-1.51	25.35
Oman	0.15	0.52	5.94
Palaestina	0.47	-0.23	6.90
Qatar	0.26	0.59	7.47
Saudi Arabia	-1.16	-0.91	17.79
Syria	-1.10	-0.97	30.46
Turkey	-1.32	2.52	72.74

جدول ارائه شده (شکل ۵) نتایج آزمون من-کندال (آماره Z) و شیب سن را برای روند بارش سالانه در کشورهای خاورمیانه خلاصه می‌کند. مقدار Z مثبت نشان‌دهنده روند صعودی، Z منفی نزولی است و $|Z| > 1.96$ نشان‌دهنده معناداری در سطح اطمینان (۹۵ درصد - $P < 0.05$). شیب سن مقدار متوسط تغییر (میلی‌متر در سال) را تخمین می‌زند. دوره ۴۰ ساله (۱۹۸۴-۲۰۲۳) با گرم شدن جهانی همخوانی دارد و نتایج عمدتاً غیر معنادار هستند که با الگوی ثبات شکننده در نقشه سازگار است. ترکیه شاهد قوی‌ترین افزایش بوده که می‌تواند به نفوذ بیشتر جبهه‌های اقیانوسی نسبت داده شود. مطالعه‌ای بر روی ترکیه (۱۹۸۰-۲۰۱۹) با استفاده از من-کندال، نشان می‌دهد که افزایش در ۵۸ ایستگاه از ۸۱ تأیید شده

اما این روند به تنهایی معنادار نیست (یتیک و همکاران^۱، ۲۰۲۳). چهار دهه گذشته خشک‌سالی‌های اخیر در ایران و عراق این یافته را تأیید می‌کند. برای عراق و ایران، روندهای زمستانی منفی سال در داده‌های ERA-5 (دوره زمانی ۲۰۲۲-۱۹۸۰) تأیید می‌شود (مغربی و همکاران^۲، ۲۰۲۳). ثبات بیشتر موارد $|Z| < 1$ و غیر معنادار، مانند امارات و عمان، نشان‌دهنده نوسانات بدون روند پایدار است. الگوی شمال-جنوب نقشه (SEASAW) با این جدول تأیید می‌شود، هرچند معناداری کم (تنها ۶٪ موارد) شکنندگی داده‌ها را برجسته می‌کند (فرانچیز و همکاران^۳، ۲۰۲۴). از عوامل مهم این تغییرات می‌توان به شرایط اقلیمی منطقه اشاره کرد. صعود در شمال به نوسانات NAO و افزایش رطوبت اتمسفری مرتبط است؛ نزول در جنوب به جابه‌جایی قطبی ITCZ و Hadley Cell (خشک‌تر شدن subtropical) دوره ۱۹۸۴-۲۰۲۳ با افزایش دما (۱.۱°C) در منطقه هم‌پوشانی دارد، که تبخیر را افزایش می‌دهد (فرانچیز و همکاران، ۲۰۲۴). عوامل محلی مانند توپوگرافی (کوهستان‌ها بارش را افزایش می‌دهند) و عوامل انسانی (کشاورزی ناپایدار در عراق و ایران) نقش تشدیدکننده دارند.

شکل ۶- نقشه روند تغییرات اقلیمی بارش در کشورهای خاورمیانه



- 1 - Yetik, A. K et al, 2023
- 2 - Maghrabi et al, 2023
- 3 - Francis et al, 2024

نقشه ارائه شده (شکل ۶)، روند تغییرات بارش سالانه در منطقه خاورمیانه را برای دوره ۱۹۸۴ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. نقشه الگوی شمال-جنوب را نشان می‌دهد که با ویژگی‌های توپوگرافی و الگوهای گردش جوی همخوانی دارد. روند صعودی عمدتاً در شمال و شمال غرب منطقه مشاهده می‌شود. ترکیه به طور کامل آبی است، که نشان‌دهنده افزایش بارش سالانه (حدود ۵-۱۰ میلی‌متر در دهه در برخی استان‌ها) است. سوریه، لبنان، اردن و بخش‌هایی از فلسطین نیز روند صعودی دارند، به‌ویژه در مناطق کوهستانی مانند ارتفاعات شمال سوریه. این افزایش‌ها اغلب در نواحی مرتفع (بالای ۱۰۰۰ متر) متمرکز است و می‌تواند به دلیل نفوذ بیشتر جبهه‌های غربی (مرتبط با نوسانات اقیانوس اطلس شمالی-NAO) باشد. روند نزولی بخش عمده جنوب و شرق منطقه را پوشش می‌دهد. عراق، ایران، عربستان سعودی و یمن کاملاً نارنجی هستند، که بیانگر کاهش بارش است. این روند در دشت‌های مرکزی عراق، فلات ایران و شبه جزیره عربستان برجسته است و با خشکسالی‌های مکرر همخوانی دارد. بدون روند عمدتاً در حاشیه‌ها دیده می‌شود، مانند مصر (دلتا نیل و صحرای غربی)، امارات متحده عربی و عمان. این مناطق ثبات نسبی نشان می‌دهند، هر چند نوسانات فصلی (مانند سیل‌های ناگهانی در عمان) وجود دارد.

در خصوص عوامل آن می‌توان مواردی را ذکر کرد. عوامل اقلیمی جهانی: تغییرات آب و هوایی باعث افزایش تبخیر و خشکی در جنوب خاورمیانه شده، در حالی که شمال (مانند ترکیه) از افزایش رطوبت اتمسفری^۱ سود برده است. ویژگی‌های محلی: در ایران، روندهای منفی در غرب (کنار زاگرس) غالب است، در حالی که شمال (دریای خزر) مثبت‌تر است، اما کلیت کشور روند کاهشی را نشان می‌دهد. در ترکیه، زمستان‌ها بیشترین تغییر را نشان می‌دهند. عوامل انسانی مانند شهرنشینی و کشاورزی ناپایدار نیز نقش تشدیدکننده دارند. دوره زمانی: دوره ۱۹۸۴-۲۰۲۳ با گرم شدن سراسری جهان (۱.۴۳° بالاتر از میانگین قرن ۲۰ در ۲۰۲۳) هم‌پوشانی دارد، که بارش را نامنظم‌تر کرده است. روند نزولی در عربستان، یمن و عراق (که ۷۰٪ جمعیت منطقه را پوشش می‌دهد) خطر خشکسالی را افزایش می‌دهد و منابع آب زیرزمینی را تحت فشار قرار می‌دهد. در مقابل، افزایش در ترکیه و سوریه ممکن است سیل‌های فصلی را بیشتر کند. کشورهای بدون روند (مانند مصر) افزایش دما تقاضای آب را بالا می‌برد. در کل، این الگوها امنیت غذایی را تهدید می‌کند، به‌ویژه در مناطق بیابانی. این تحلیل بر اساس نقشه و داده‌های

علمی معتبر استوار است و نشان‌دهنده ثبات نسبی اما شکننده در منطقه است. برای جزئیات بیشتر، می‌توان به مدل‌های پیش‌بینی CMIP6 مراجعه کرد.

بحث و نتیجه

این مطالعه با هدف بررسی روند تغییرات بارش کشورهای خاورمیانه انجام شد. در این مطالعه از داده‌های پایگاه سنجش از دور پرشین در بازه زمانی ۲۰۲۳-۱۹۸۴ برای ۱۶ کشور منطقه خاورمیانه استفاده شد. داده‌های سنجش از دور نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از کشورهای حوزه خلیج فارس و جنوب غرب آسیا (عراق، عربستان، یمن، امارات، کویت) روند کاهشی بارش داشته‌اند. در مقابل، کشورهای شمالی‌تر و حوزه مدیترانه (ترکیه، لبنان، سوریه، اردن) روند افزایشی یا باثباتی را تجربه کرده‌اند. میانگین بارش سالانه از حدود ۱۱ میلی‌متر (مصر) تا بیش از ۶۹۹ میلی‌متر (ترکیه) متغیر بوده است. کشورهایی مانند ترکیه و لبنان بارش بالاتر و نوسانات بیشتری داشته‌اند، در حالی که کشورهای حاشیه خلیج فارس و مصر بارش اندک و الگوی تقریباً ثابت‌تری نشان داده‌اند. خوشه‌بندی داده‌ها چهار گروه بارشی را مشخص کرد. مصر با الگوی خاص و بارش بسیار کم، کشورهای خلیج فارس و یمن با بارش اندک، کشورهای با بارش متوسط (ایران، عراق، فلسطین، اردن، اسرائیل) و کشورهای با بارش بالا و نوسان‌پذیر (ترکیه، لبنان، سوریه). آزمون Pettitt نشان داد که کشورهایی مانند مصر، عربستان، کویت و عراق تغییرات ناگهانی و معنادار در بارندگی داشته‌اند. سایر کشورها یا روند تغییر ناگهانی نداشته‌اند یا تغییرات آنها کمتر معنادار بوده است. بیشترین کاهش بارش سالانه در ایران (حدود ۱۰۶- میلی‌متر در سال)، عراق (۱۸۷- میلی‌متر در سال) و کویت (۱۸۲- میلی‌متر در سال) ثبت شد. افزایش بارش قابل توجه در ترکیه (۲۰۵ میلی‌متر در سال) دیده شده است. برخی کشورها تغییرات جزئی داشته‌اند که چندان معنادار نبوده است. جنوب و جنوب غرب خاورمیانه با کاهش بارش روبه‌رو است که تهدیدی جدی برای منابع آب، کشاورزی و امنیت غذایی است. شمال و حوزه مدیترانه شرایط پایدارتری داشته‌اند و حتی در برخی مناطق بارش افزایش یافته است. این ناهمگنی تأکید می‌کند که تغییر اقلیم اثرات متفاوتی در خاورمیانه دارد و سیاست‌های مدیریت منابع آب باید منطقه محور و متناسب با الگوی هر کشور تدوین شود. ادامه روندهای کاهشی در ایران، عراق و شبه جزیره عربستان می‌تواند به تنش‌های آبی، مهاجرت اقلیمی و بی‌ثباتی اجتماعی منجر شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که الگوی تغییرات بارش در منطقه خاورمیانه طی چهار دهه اخیر دارای ناهمگنی قابل توجهی است. کشورهای واقع در بخش‌های جنوبی و جنوب غرب منطقه از جمله عراق،

عربستان سعودی، یمن و کویت، کاهش معنادار بارش سالانه را تجربه کرده‌اند؛ در حالی که کشورهای شمالی‌تر و حوزه مدیترانه شامل ترکیه، لبنان و سوریه عمدتاً روند افزایشی یا باثباتی را نشان داده‌اند. این کاهش، که از اهمیت حیاتی برای تأمین منابع آب سطحی و زیرزمینی برخوردار است، می‌تواند تهدیدی جدی برای امنیت آبی، کشاورزی و پایداری زیست‌محیطی کشورهای جنوب منطقه محسوب شود. در مقابل، افزایش بارش در بخش‌های شمالی احتمالاً ناشی از تغییر در مسیر و شدت سامانه‌های بارشی و جابه‌جایی الگوهای گردش جوّی است که در ارتباط مستقیم با فرایندهای گرمایش جهانی تفسیر می‌شود. بررسی آزمون‌های آماری نشان داد که تغییرات ناگهانی در بارش سالانه در کشورهایی مانند مصر، عربستان، کویت و عراق با سطح اطمینان بالا تأیید شده است. این امر بیانگر آن است که تغییر اقلیم علاوه بر ایجاد روندهای تدریجی، می‌تواند سبب بروز نوسانات شدید و غیر خطی در رژیم بارشی منطقه شود. نتایج آزمون من-کندال و شیب سن نیز آشکار ساخت که بیشترین کاهش بارش در ایران و عراق مشاهده شده و بیشترین افزایش در ترکیه رخ داده است. چنین یافته‌هایی بر وجود الگوهای متضاد و ناهمگون درون منطقه‌ای دلالت دارد که در تحلیل پیامدهای اقلیمی و اتخاذ راهبردهای سازگاری باید مد نظر قرار گیرد. از منظر اعتبار داده‌ها، تحلیل‌ها نشان داد که پایگاه بارش PERSIANN در کشورهایی مانند ایران و ترکیه از همبستگی بالایی با داده‌های زمینی برخوردار است، در حالی که در کشورهایی با اقلیم خشک یا تعداد ایستگاه محدود (مانند لبنان و بحرین) دقت کمتری مشاهده می‌شود. این مسئله تأکید می‌کند که مطالعات مبتنی بر داده‌های سنجش از دور باید همواره با ارزیابی محلی و تلفیق داده‌های زمینی همراه شوند تا قابلیت اتکای نتایج افزایش یابد. به طور کلی، الگوی غالب در خاورمیانه نشان‌دهنده کاهش بارش در نواحی جنوبی و افزایش نسبی یا پایداری در نواحی شمالی است. این الگو می‌تواند تبعات فراوانی در حوزه منابع آب مشترک، امنیت غذایی و پایداری اجتماعی به دنبال داشته باشد. به‌ویژه کاهش بارش در ایران، عراق و شبه جزیره عربستان، که هم‌زمان با رشد جمعیت و افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی همراه است، خطر تشدید بحران‌های آبی و مهاجرت‌های اقلیمی را افزایش می‌دهد. در مقابل، افزایش بارش در ترکیه و لبنان، که به‌عنوان منابع اصلی رودخانه‌های بین‌المللی مطرح هستند، می‌تواند زمینه‌ساز بروز چالش‌های ژئوپلیتیکی و اختلافات منطقه‌ای در بهره‌برداری از منابع آب شود. بنابراین، یافته‌های این پژوهش ضرورت اتخاذ رویکردی منطقه‌ای و بین‌دولتی در مدیریت منابع آب را آشکار می‌سازد. توسعه فناوری‌های ذخیره‌سازی و افزایش بهره‌وری آب، ارتقای زیرساخت‌های سازگاری اقلیمی، و تقویت سامانه‌های پایش و هشدار

زود هنگام می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری کشورهای منطقه ایفا نماید. همچنین، پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی با بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی اقلیم و تحلیل‌های چند متغیره (مانند دما، تبخیر-تعرق و تغییرات کاربری زمین) در مقیاس‌های محلی و حوضه‌ای انجام گیرد تا زمینه لازم برای سیاست‌گذاری‌های علمی و پایدار فراهم گردد.

از نظر پراکندگی تغییرات روند بارش کشورهای محدوده دریای مدیترانه شرایط نرمال و باثبات‌تری را نسبت به سایر کشورها طی ۴ دهه اخیر تجربه کرده‌اند و تغییرات بارش در آنها عمدتاً مثبت یا بدون روند معنادار بوده‌اند. این در حالی است که در کشورهای ایران، عراق، عربستان، یمن و تا حدودی امارات شرایط بارش مطلوب نبوده و این کشورها، به‌ویژه ایران و عراق را با چالش‌های کم‌آبی نیز روبه‌رو کرده است. هرچند که بخش عمده کم‌آبی ناشی از سیاست‌گذاری‌های غلط توسعه در این کشورها بوده است. نتایج این پژوهش بر پایه داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که طی سه دهه گذشته، منطقه خاورمیانه با تغییرات محسوسی در الگوی بارش مواجه بوده است. بخش عمده‌ای از کشورهای واقع در جنوب و جنوب غرب منطقه کاهش بارش را تجربه کرده‌اند، که می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای در حوزه منابع آب، امنیت غذایی و پایداری زیست‌محیطی به همراه داشته باشد. در مقابل، کشورهای شمالی‌تر و حوزه مدیترانه، افزایش یا پایداری نسبی بارش را نشان داده‌اند. با توجه به وابستگی شدید کشورهای منطقه به منابع آب سطحی و زیرزمینی، تداوم این روندهای کاهش می‌تواند چالش‌های جدی در زمینه تنش آبی، مهاجرت اقلیمی و ناپایداری اجتماعی ایجاد کند. لذا توصیه می‌شود برنامه‌ریزی جامع و بین‌دولتی در راستای مدیریت منابع آب، توسعه فناوری‌های ذخیره و بهره‌وری آب و نیز تقویت زیرساخت‌های هشدار و تاب‌آوری اقلیمی صورت گیرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از مدل‌های پیش‌بینی اقلیم و تحلیل‌های چند متغیره در ارتباط با سایر شاخص‌های جوی استفاده شده و تحلیل‌ها در مقیاس‌های کوچک‌تر منطقه‌ای نیز انجام شود تا زمینه برای تصمیم‌سازی دقیق‌تر فراهم گردد.

علاوه بر تحلیل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، یافته‌های این پژوهش اطلاعات مهمی نیز در ابعاد اجتماعی-سیاسی ارائه می‌دهد. برای کشورهای واقع در بخش‌های جنوبی خاورمیانه مانند ایران، عراق و عربستان سعودی، کاهش بارش تهدیدی برای امنیت آب و غذا، مانند امکان مهاجرت ناشی از تغییرات اقلیمی، تشدید نارضایتی و فشار بر زیرساخت‌های شهری به شمار می‌آید. این شرایط ممکن است نابرابری‌های اجتماعی-اقتصادی را افزایش داده، فقر را عمیق‌تر کرده و موجب بی‌ثباتی سیاسی درون

مرزی شود. از طرفی، وضعیت‌های اقلیمی در همین دوره زمانی ممکن است به کشورهای واقع در بخش‌های شمالی، به‌ویژه ترکیه و لبنان، این امکان را بدهد که سطوح بارش‌های خود را تثبیت و افزایش دهند که با توجه به موقعیت ژئو-استراتژیک آنها به‌عنوان کشورهای بالادست در حوضه‌های رودخانه‌های بین‌المللی، ممکن است بر توازن ژئوپلیتیکی منطقه تأثیر بگذارد. بهره‌برداری نامتوازن از این منابع مشترک زمینه‌ساز اختلافات منطقه‌ای بوده و حتی ممکن است به ابزاری برای اعمال فشار سیاسی و اقتصادی بدل گردد.

بهره‌برداری نابرابر از منابع در نظر گرفته شده، وابستگی به اختلافات ژئوپلیتیکی و آب به‌عنوان ابزاری برای اجبار سیاسی و اقتصادی را نشان می‌دهد. شرایط هیدرولوژیکی و اقلیمی نابرابر منطقه باید بر روابط بین‌الملل تمرکز کرده و یک چارچوب دینامیک جدید از اقلیم، نظریه سیستم‌های مرتبط هیدرولوژی و نظریه سیستم‌های آب سیاسی را پیشنهاد دهند. این انتقال‌ها باید برای منطقه، منطقه ژئوپلیتیکی فراهم کنند. سیستم‌های سیاسی منسجم در منطقه بین‌المللی، صلح و امنیت نیاز به سیستم‌های هنجاری اقلیمی و هیدرولوژیکی دارند. بنابراین، تنوع اقلیمی سیستم‌های بین‌المللی منجر به زیرساخت‌های هیدرولیکی متصل به شدت می‌شود. ناهمگونی تغییرات اقلیمی در منطقه، ضرورت تقویت همکاری‌های منطقه‌ای و ایجاد ساز و کارهای دیپلماسی آب را برجسته می‌سازد. فقدان چنین همکاری‌هایی می‌تواند رقابت منفی میان کشورها را تشدید کرده و ثبات سیاسی و امنیت جمعی منطقه را با چالش مواجه سازد. بر این اساس، رویکردهای سازگاری با تغییر اقلیم باید علاوه بر مدیریت فنی و زیست محیطی منابع آب، ابعاد اجتماعی، امنیتی و ژئوپلیتیکی را نیز در بر گیرند تا بتوانند به کاهش آسیب‌پذیری و تضمین پایداری آینده خاورمیانه کمک کنند.

فهرست منابع

منابع فارسی

- ۱- ابراهیمی، ه. و کردوانی، پ (۲۰۱۴). مطالعه تغییر اقلیم در تالاب بین‌المللی انزلی به روش من-کندال. نشریه اکویولوژی تالاب (تالاب)، ۶(۲۱)، ۵۹-۷۱.
- ۲- باقرپور، م؛ سیدیان، س؛ فتح‌آبادی، ا. و امین‌محمدی، ا (۲۰۱۷). بررسی کارایی آزمون من-کندال در شناسایی روند سری‌های دارای خودهمبستگی. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱(۳۶)، ۱۱-۲۱.
- ۳- دارند، م (۲۰۱۴). روند تغییرات بارش ایران زمین به کمک داده‌های شبکه‌ای مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی. در همایش ملی تغییرات اقلیم و مهندسی توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی، همدان، ایران.

- ۴- دین پژوه، ی.، و صدیق پور، ر (۲۰۱۹). تحلیل روند پنج مشخصه مهم بارش های روزانه در حوضه دریاچه ارومیه. *مجله پژوهش آب ایران*، ۱۳(۴)، ۶۳-۷۲.
- ۵- فرج زاده، م.، و فیضی، و (۲۰۱۲). آشکارسازی تغییرهای زمانی-مکانی عناصر دما و بارش در ایران. *برنامه ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)*، ۱۶(۴)، ۴۹-۶۶.
- ۶- قصاب فیض، م.، و اسلامی، ح (۲۰۱۷). ارزیابی روند تغییرات بارندگی با روش من-کندال و رگرسیون خطی در استان خوزستان. *فصلنامه مهندسی آب*، ۵(۲)، ۱۱۳-۱۲۱.
- ۷- مسعودیان، ا.، و دارند، م (۲۰۱۳). شناسایی و بررسی تغییرات نمایه های بارش فرین ایران طی دهه های اخیر. *جغرافیا و توسعه ناحیه ای*، ۲۰(۲)، ۲۳۹-۲۵۷.
- ۸- میرزایی حسنلو، ا.؛ عبقری، ه.، و عرفانیان، م (۲۰۲۰). تحلیل روند بارندگی و شاخص تمرکز بارش در ایستگاه های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه. *جغرافیا و توسعه*، ۱۸(۵۹)، ۲۱-۴۰.
- ۹- ناظری تهرودی، م.؛ خلیلی، ک.، و احمدی، ف (۲۰۱۶). تحلیل روند تغییرات ایستگاهی و منطقه ای بارش نیم قرن اخیر کشور ایران. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۳۰(۲)، ۶۴۳-۶۵۴.
- ۱۰- هرمزی، ه.؛ برنا، ر.، و ظهوریان پردل، م (۲۰۱۹). بررسی روند تغییرات بارش در استان خوزستان و تأثیر آن بر تالاب شادگان. *اکویولوژی تالاب (تالاب)*، ۱۱(۴۱)، ۱۰۳-۱۱۷.

منابع غیر فارسی

- 1- AghaKouchak, A., Nasrollahi, N., & Habib, E. (2009). Accounting for uncertainties of the TRMM satellite estimates. *Remote Sensing*, 1(3), 606-619.
- 2- Bao, H., Koike, T., Yang, K., Wang, L., Shrestha, M., & Lawford, P. (2016). Development of an enthalpy-based frozen soil model and its validation in a cold region in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(10), 5259-5280.
- 3- Batlló, J. T., & Martí-Cardona, B. (2020). Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018. *Journal of Hydrology*, 590, Article 125485.
- 4- Chen, J., Wu, X., Finlayson, B., Webber, M., Wei, T., & Li, M. (2014). Variability and trend in the hydrology of the Yangtze River, China: Annual precipitation and runoff. *Journal of Hydrology*, 513, 403-412.
- 5- Cook, B. I., Anchukaitis, K. J., Touchan, R., Meko, D. M., & Cook, E. R. (2016). Spatiotemporal drought variability in the Mediterranean over the last 900 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(5), 2060-2074. **Doi:10.1002/2015JD023929**
- 6- Duhan, D., & Pandey, A. (2013). Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901-2002 at Madhya Pradesh, India. *Atmospheric Research*, 122, 136-149.
- 7- Francis, D., & Fonseca, R. (2024). Recent and projected changes in climate patterns in the Middle East and North Africa (MENA) region. *Scientific Reports*, 14(1), Article 10279.
- 8- Francis, D., Almazroui, M., & Lelieveld, J. (2024b). Recent and projected changes in climate patterns in the Middle East and North Africa region. *Scientific Reports*, 14, Article 4521. **Doi:10.1038/s41598-024-51568-7**
- 9- Francis, D., Ge, F., & Almazroui, M. (2024a). Atmospheric river rapids and their role in the extreme precipitation events over the Middle East. *Geophysical Research Letters*, 51(3), Article e2023GL104875. **Doi:10.1029/2023GL104875**

- 10- IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Cambridge University Press.
- 11- Jain, S. K., Kumar, V., & Saharia, M. (2013). Analysis of rainfall and temperature trends in northeast India. *International Journal of Climatology*, 33(4), 968–978.
- 12- Lelieveld, J., Proestos, Y., Hadjinicolaou, P., Tanarhte, M., Tyrllis, E., & Zittis, G. (2016). Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century. *Climatic Change*, 137(1–2), 245–260.
Doi:10.1007/s10584-016-1665-6
- 13- Li, B., Zhou, W., & Zhang, Y. (2023). Middle East warming in spring enhances summer rainfall. *Nature Communications*, 14, Article 3207. **Doi:10.1038/s41467-023-38768-5**
- 14- Lim, J., Abillama, N., & D’Adamo, C. (2023). Climate Resilience Is Key to Energy Transitions in the Middle East and North Africa. IEA: Paris, France
- 15- Llasat, M. C., Moral, A., Cortès, M., & Rigo, T. (2021). Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 257, Article 105581.
- 16- Maghrabi, A. H., Alamoudi, H. A., & Alruhaili, A. S. (2023). Long-term rainfall trends in south west Asia—Saudi Arabia. *American Journal of Climate Change*, 12(1), 204–217.
- 17- Massoud, E. (2022). Atmospheric rivers and precipitation in the Middle East and North Africa (MENA): Impacts and projections. Oak Ridge National Laboratory (ORNL/IMPACT Report).
- 18- Touré, H., Traoré, K., & Kyei-Baffour, N. (2017). Assessment of changing trends of daily precipitation and temperature extremes in Bamako and Ségou in Mali from 1961–2014. *Weather and Climate Extremes*, 18, 8–16.
- 19- United Nations Economic and Social Commission for Western Asia (UNESCWA). (2017). Climate change and the SDGs in the Arab region.
<https://www.unescwa.org/publications/climate-change-sdgs-arab-regio>
- 20- United Nations Environment Programme (UNEP). (2016). Climate change in the Arab region: Recent trends and recommendations for adaptation.
- 21- University of California, Irvine. (n.d.). RainSphere. Retrieved October 20, 2025, from <http://rainsphere.eng.uci.edu>
- 22- World Weather Attribution. (2024). Extreme rainfall in Oman and the UAE, April 2024, made more likely by human-induced climate change.
<https://www.worldweatherattribution.org>
- 23- Yacoub, E., & Tayfur, G. (2020). Spatial and temporal variation of meteorological drought and precipitation trend analysis over whole Mauritania. *Journal of African Earth Sciences*, 163, Article 103761.
- 24- Yetik, A. K., Arslan, B., & Şen, B. (2024). Trends and variability in precipitation across Turkey: A multimethod statistical analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 473–492. **Doi:10.1007/s00704-023-04645-4**
- 25- Zittis, G., Hadjinicolaou, P., & Lelieveld, J. (2016). Projected changes in heat waves, heavy precipitation, and dry spells in the eastern Mediterranean and the Middle East. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(15), 8601–8611.
Doi:10.1002/2016JD025519