DOI: 10.29252/ARIDBIOM.2026.4247

آزمون ناپارامتری تغییرات مکانی - زمانی بارندگی‌های استان اصفهان در سه دهه اخیر (۱۹۹۶-۲۰۲۵ میلادی)

(مقالهٔ پژوهشی)

۱- مهران فاطمی*، دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران.
yazdfatemi@meybod.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳

چکیده

بحران آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه پایدار در کشور است که متأثر از کمبود بارندگی، توزیع نامناسب مکانی و زمانی بارندگی‌ها، روند کاهشی بارندگی‌ها در دهه‌های اخیر و سایر عوامل می‌باشد. این پژوهش در صدد است که از بین عوامل موثر بر بروز بحران آب، به بررسی و تحلیل توزیع زمانی و مکانی بارندگی‌های استان اصفهان طی دوره آماری سی ساله اخیر (۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی؛ مصادف با ۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی) بپردازد. از این‌روی، ابتدا روند تغییرات بارندگی‌ها به کمک آزمون‌های ناپارامتری مَن‌کِندال و شیب سِن بررسی و سپس با تحلیل تغییرات رژیم بارندگی ماهانه ایستگاه‌های مختلف، نقشه توزیع مکانی روند تغییرات بارندگی (نقشه آماره Z) ترسیم و تفسیر شد. نتایج نشان داد که روند بارندگی‌ها طی دوره سی ساله مذکور نسبتاً ثابت بوده و مقدار آماره Z برای میانگین بارش‌های استان اصفهان ۰/۱۱ بوده است. اما پراکنش مکانی آماره Z نشان می‌دهد که نواحی شرقی، شمالی و جنوبی استان اصفهان، بیشتر تحت تاثیر پدیده تغییر اقلیم قرار داشته و روند کاهش بارش طی دوره آماری، شدیدتر از سایر مناطق اصفهان بوده است. همچنین مشخص شد که مقدار این آماره مستقل از میزان بارش سالانه درازمدت ایستگاه‌های هواشناسی استان اصفهان بوده و روند منفی بارندگی هم در مناطق پربارش و هم در مناطق کم‌بارش استان قابل مشاهده است. بررسی و مقایسه میانگین بارندگی استان اصفهان در ماه‌های مارس (مصادف با اسفند) و می (مصادف با اردیبهشت) با یکدیگر نشان داد که بارندگی‌های اسفندماه روند کاهشی و بارندگی‌های اردیبهشت‌ماه روند افزایشی دارد. بنابراین می‌توان از وجود نشانه‌های تغییر رژیم بارندگی ماهانه در استان اصفهان و مهاجرت بارش‌ها از فصل زمستان به فصل بهار سخن گفت که برای تأیید قطعی آن به دوره‌های آماری طولانی‌تری نیاز است. لیکن نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در بازنگری برنامه‌های مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم در استان اصفهان مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: آماره Z، مَن‌کِندال، شیب سِن، رژیم بارندگی، استان اصفهان.

مقدمه

بحران آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه پایدار در کشور است که بخش‌های مختلفی نظیر کشاورزی، صنعت، شرب، بهداشت و محیط‌زیست را تحت تاثیر خود قرار داده است. این پدیده متاثر از کمبود بارندگی و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، نیاز بالای تبخیری اتمسفر، توزیع نامناسب مکانی و زمانی بارندگی‌ها و روند کاهشی بارندگی‌ها به همراه سایر عوامل می‌باشد. براساس آمار موجود، میانگین درازمدت بارندگی کشور ۲۴۳ میلی‌متر و پتانسیل تبخیر در حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر می‌باشد که به‌ترتیب یک‌سوم و سه برابر میانگین جهانی است [۱] و این دو مساله سبب می‌شوند تا منابع آبی کشور همواره در معرض تهدید بوده و از پدیده تغییر اقلیم و به‌ویژه تغییر رژیم بارندگی‌ها آسیب ببینند. پژوهش‌های نوین بین‌المللی بر پایه مدل‌های گردش عمومی (AOGCM) نظیر سری‌های CMIP5 و CMIP6 نشان می‌دهند که سناریوهای مختلف انتشار (RCP و SSP) دلالت

بر تشدید نوسانات اقلیمی و کاهش بارش در عرض‌های جغرافیایی جنب‌حاره‌ای دارند [۱۱، ۱۳، ۱۴]. این تغییرات جهانی، در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی ایران نیز به شکل تغییر الگوی ریزش و بازتوزیع زمانی بارش‌ها خود را نشان می‌دهد [۴، ۶].

از این‌رو به‌نظر می‌رسد تحلیل مکانی و زمانی بارندگی‌های ماهانه و سالانه و بررسی تغییرات به‌وجود آمده در رژیم بارش‌های ماهانه یا فصلی هر منطقه از کشور حائز اهمیت بوده و نتایج آن‌ها بتواند در برنامه‌ریزی منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. یکی از روش‌های تحلیل روند سری‌های زمانی هیدرومتئورولوژیک نظیر بارندگی استفاده از آزمون‌های آماری می‌باشد. وجود روند در این سری‌های زمانی ممکن است ناشی از تغییرات تدریجی طبیعی، بروز پدیده تغییر اقلیم و یا ناشی از فعالیت‌های انسانی باشد و می‌تواند فرض رخداد پدیده تغییر اقلیم در آن منطقه را تقویت نماید. تاکنون روش‌ها یا آزمون‌های آماری متعددی برای تحلیل روند سری‌های زمانی ارائه شده است که این روش‌ها در دو دسته کلی شامل پارامتری و ناپارامتری قابل دسته‌بندی می‌باشند. چنانچه سری زمانی مورد نظر دارای توزیع آماری مشخصی باشد، از روش‌های پارامتری و چنانچه توزیع آماری مشخصی بر داده‌های سری زمانی مذکور قابل برازش نباشد و یا دارای چولگی یا کشیدگی زیادی باشد، از روش‌های ناپارامتری استفاده می‌شود. در واقع، روش‌های ناپارامتری براساس تفاوت بین داده‌های مشاهداتی عمل می‌کنند و مستقل از توزیع آماری مربوطه می‌باشند. به‌عنوان مثال، بارندگی یکی از عناصر اقلیمی تصادفی و تغییرپذیر است که تغییرات قابل توجهی در زمان و مکان داشته و از این‌رو، روش‌های ناپارامتری برای بررسی تغییرات آن قابل استفاده می‌باشد. از متداول‌ترین و پرکاربردترین آزمون‌های ناپارامتری، آزمون‌های مَن‌کِندال و تخمین شیب سِن می‌باشند که به‌صورت گسترده در تحلیل روند سری‌های زمانی تصادفی و تغییرپذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

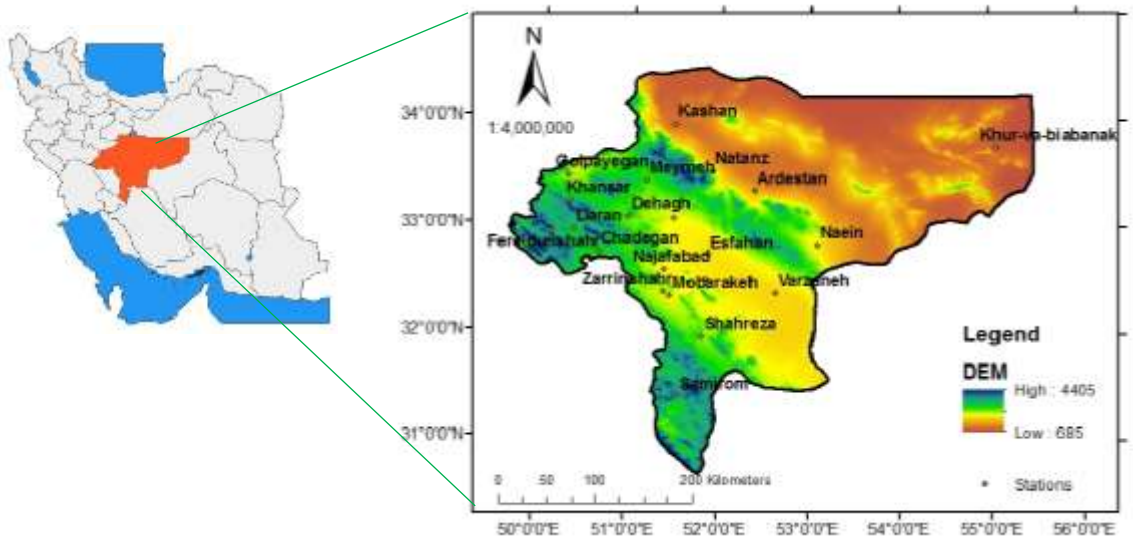
پژوهش حاضر تلاش دارد با بهره‌گیری از آزمون‌های ناپارامتری مَن‌کِندال و شیب سِن، ابتدا روند بارندگی ماهانه و سالانه ایستگاه‌های هواشناسی استان اصفهان طی سی سال اخیر را مورد بررسی قرار دهد و سپس با تحلیل تغییرات رژیم بارندگی ماهانه ایستگاه‌های مختلف، نقشه توزیع مکانی روند تغییرات بارندگی (نقشه آماره Z) را نیز ترسیم و تفسیر کند. در این زمینه پژوهش‌های مشابه و بعضاً قدیمی انجام شده که می‌توان به تحلیل روند بارش سالانه استان اصفهان در سال ۱۳۸۴ اشاره نمود که در آن از سری زمانی بارش سی‌ساله منتهی به سال ۲۰۰۰ میلادی استفاده شده است. در پژوهش مورد اشاره از الگوهای ARIMA برای مدل‌سازی روند بارش و GIS برای پهنه‌بندی به روش کریجینگ عام استفاده شد و نتایج آن معلوم کرد که دامنهٔ تغییرات بارش استان اصفهان از ۲ میلی‌متر تا ۴۶ میلی متر در نوسان بوده است و رابطه بسیار قوی بین بارش و مقدار تغییرات بارش (r=۰/۸۳۵) وجود دارد. همچنین بررسی آزمون‌های آماری نشان داد که کل یاخته‌های تولید شده به‌روش کریجینگ، حاوی روند سهمی بوده و از همین روند برای برازنده ترین الگوی ARIMA استفاده شده است [۴]. علاوه‌بر این، در سال ۱۳۹۸ پژوهشگران دیگری به‌تحلیل روند خشکسالی هواشناسی استان اصفهان با استفاده از آزمون‌های مَن‌کِندال، سِن و پتی پرداخته‌اند که از داده‌های بارندگی منتهی به سال ۲۰۱۷ میلادی استفاده شده است و تغییرات بارندگی را به‌صورت شاخص خشکسالی اقلیمی SPI و از روش‌های ناپارامتری تحلیل کرده‌اند. نتایج تحلیل روند بارش‌ها براساس آزمون پتی در ۷۵ درصد ایستگاه‌ها، براساس آزمون سن در ۶۰ درصد ایستگاه‌ها و براساس آزمون مَن‌کِندال در ۵۹ درصد ایستگاه‌ها روند معنی‌دار نزولی و در سطح خطای کمتر از ۵ درصد اثبات شد [۱۲]. در پژوهش حاضر نیز علاوه‌بر تحلیل روند زمانی بارندگی‌ها براساس جدیدترین آمار منتهی به سال ۲۰۲۵ میلادی و استفاده از آزمون‌های ناپارامتری مَن‌کِندال و شیب سِن، تغییرات رژیم ماهانه بارش و الگوی مکانی آماره Z در سطح استان اصفهان را بررسی کرده است تا پیامدهای تغییرات محتمل مکانی و زمانی

بارندگی‌ها به‌منظور مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییر اقلیم تبیین گردد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

این پژوهش در استان اصفهان واقع در ایران مرکزی انجام شده است. استان اصفهان بین عرض‌های جغرافیایی ۳۰ تا ۳۴ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۰ تا ۵۵ درجه شرقی قرار گرفته و از شمال به استان‌های قم و سمنان، از غرب به استان‌های چهارمحال و بختیاری و مرکزی، از جنوب به استان‌های فارس و کهگیلویه و بویراحمد و از شرق به استان یزد محدود است. وسعت استان اصفهان بالغ بر ۱۰۶ هزار کیلومترمربع بوده که معادل ۶/۴ درصد از مساحت کل کشور می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت قرارگیری استان اصفهان بر روی نقشه کشوری همراه با موقعیت مکانی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک بر روی نقشه مدل رقومی ارتفاعات (DEM)

پایگاه داده

به‌منظور تحلیل تغییرات مکانی و زمانی بارندگی، داده‌های بارش ماهانه و سالانه ۲۱ ایستگاه هواشناسی استان اصفهان طی یک دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی مصادف با ۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. در مواردی که نقص آماری محدودی در سری‌های زمانی وجود داشت، بازسازی داده‌های مفقود مابین ایستگاه‌های همگن از طریق تعیین بهترین رابطه رگرسیون خطی چندگانه با نزدیک‌ترین ایستگاه معتبر همجوار انجام شد و در نهایت پایگاه داده پیوسته بارش تهیه گردید.

روش پژوهش

ساختار ریاضی آزمون ناپارامتری مَن‌کِندال (Mann-Kendall Test)

آزمون مَن‌کِندال یک آزمون ناپارامتری و مستقل از توزیع آماری داده‌هاست که ابتدا توسط مَن (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط کِندال (۱۹۶۶) توسعه یافت. این آزمون بر مبنای تقابل فرض صفر (H0: تصادفی بودن و عدم وجود روند) و فرض یک (H1: وجود روند معنی‌دار) عمل می‌کند. برای محاسبه آماره آزمون، ابتدا پارامتر سنتی S براساس تفاضل زوج‌داده‌های متوالی از رابطه (۱) استخراج می‌شود:

رابطه (۱):

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

که در آن، xj و xk مقادیر عددی بارش در سال‌های j و k (k < j) و n تعداد کل داده‌های سری زمانی است.

تابع علامت[1] (sgn) به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌گردد:

رابطه (۲):

$$sgn(x)=\begin{cases}+1 & if \quad (x_j-x_k)>0\\ 0 & if \quad (x_j-x_k)=0\\ -1 & if \quad (x_j-x_k)<0\end{cases}$$

واریانس آماره S که تحت عنوان Var(S) شناخته می‌شود، برای سری‌های زمانی با تعداد مشاهدات بیش از ۱۰ داده (n>10) طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

رابطه (۳):

$$Var(s)=\begin{cases}\dfrac{n(n-1)(2n+5)-\sum_{i=1}^{m} t(t-1)(2t+5)}{18} & if \quad n>10\\ \dfrac{n(n-1)(2n+5)}{18} & if \quad n\le 0\end{cases}$$

در رابطه فوق، m تعداد سری‌هایی است که دارای حداقل یک داده تکراری (هم‌ارزش) هستند و ti فراوانی داده‌های هم‌ارزش در گروه iام است.

در نهایت، آماره استاندارد شده نرمال Z از رابطه (۴) بدست می‌آید:

رابطه (۴):

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{Var\,(s)}} & if \quad S>0\\ 0 & if \quad S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var\,(s)}} & if \quad S<0\end{cases}$$

مثبت بودن آماره Z نشان‌دهنده روند صعودی و منفی بودن آن مبیّن روند نزولی بارندگی است. جهت آزمون فرضیه عدم وجود روند (H_0)، قدرمطلق آماره محاسبه‌شده |Z| با مقدار بحرانی توزیع نرمال استاندارد دوطرفه مقایسه می‌شود:

رابطه (۵):

$$|Z| \le Z_{1-\alpha/2}$$

چنانچه رابطه (۵) برقرار باشد، فرض صفر (H_0) پذیرفته شده و داده‌ها فاقد روند ارزیابی می‌شوند. در غیر این صورت، فرض H_1 مبنی‌بر وجود روند معنی‌دار تایید می‌گردد. در این پژوهش، سطوح اطمینان ۹۵٪ (α=۰/۰۵) و ۹۹٪ (α=۰/۰۱) بررسی شده‌اند که مقادیر بحرانی آماره توزیع نرمال دوطرفه برای آن‌ها به‌ترتیب برابر با ۱/۹۶ و ۲/۵۸ است.

تخمین شیب سِن (Sen's Slope Estimator)

آزمون شیب سن یک روش ناپارامتری قوی برای برآورد نرخ تغییرات (میزان صعودی یا کاهشی بودن روند) در سری زمانی است. در این روش، شیب میانه برای تمامی زوج‌داده‌ها محاسبه شده و پارامترهای Q (شیب خط روند) و B (عرض از مبدا) استخراج می‌شوند. شیب سن (Q) به‌صورت حد بالا و حد پایین (Qmin و Qmax) در سطوح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ برآورد می‌گردد. اگر هر دو حد بالا و پایین Q مثبت باشند، روند افزایشی معنی‌دار و اگر هر دو منفی باشند، روند کاهشی معنی‌داری بدست آمده در آماره Z تایید می‌شود؛ درحالی‌که مغایرت در علامت حد بالا و پایین (یکی مثبت و دیگری منفی) به‌معنای عدم تائید روند معنی‌داری بدست آمده در آماره Z است. پردازش محاسباتی آزمون‌های مَن‌کِندال و شیب سِن در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار استاندارد MAKESENS انجام گرفته است.

تحلیل و پهنه‌بندی مکانی در محیط GIS

پس از اجرای آزمون من‌کندال و استخراج آماره Z برای تمامی ۲۱ ایستگاه مورد مطالعه، جهت تحلیل بازتوزیع مکانی و نمایش پهنه‌بندی روند تغییرات بارندگی در سطح استان اصفهان، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده شد. بدین منظور، نقشه‌های رقومی استان با استفاده از روش درون‌یابی وزنی معکوس فاصله ترسیم گردید.

نتایج و بحث

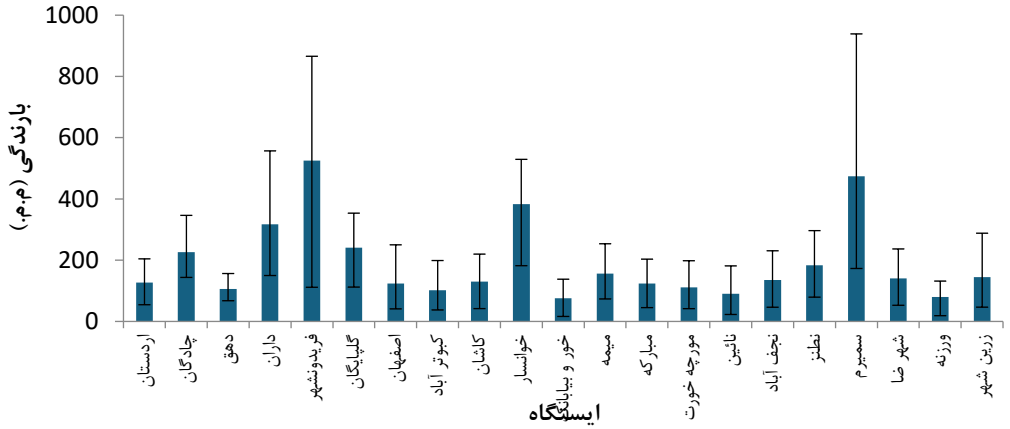
توزیع زمانی و مکانی بارندگی‌ها

بررسی داده‌های دیده‌بانی ایستگاه‌های هواشناسی استان اصفهان طی دوره آماری ۳۰ ساله اخیر (۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی مصادف با ۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی) نشان می‌دهد که میانگین بارندگی بلندمدت پهنه‌ای استان برابر با ۱۹۰ میلی‌متر است. این میانگین هیدرولوژیک دارای رفتار فضایی بسیار ناهمگن بوده و دامنه نوسان فراوانی را در مقیاس استانی نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که

[1]Sign function

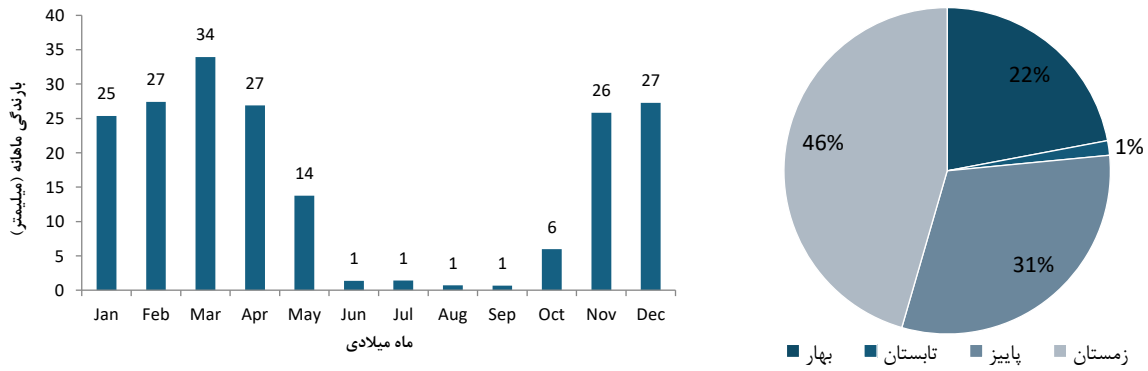
کمترین میزان بارش سالانه در ایستگاه خور و بیابانک (واقع در زون کویری شرق استان) به میزان ۷۶ میلی‌متر و بیشترین مقدار آن در ایستگاه فریدون‌شهر (واقع در زون کوهستانی غرب) به میزان ۵۲۵ میلی‌متر ثبت شده است.

در تحلیل مقادیر حدی[2] دوره آماری مذکور، حداقل بارندگی مطلق سالانه در سال ۲۰۱۶ میلادی (۱۳۹۵ شمسی) در ایستگاه خور و بیابانک به مقدار بحرانی ۱۶ میلی‌متر رخ داده که نشان‌دهنده یک خشکسالی اقلیمی حاد است. در نقطه مقابل، حداکثر بارندگی مطلق سالانه در سال ۲۰۰۴ میلادی (۱۳۸۳ شمسی) در ایستگاه سمیرم به میزان ۹۳۹ میلی‌متر به ثبت رسیده است (شکل ۲).



شکل ۲- میانگین بارندگی سالانه ایستگاه‌های هواشناسی استان اصفهان به‌همراه مقادیر حداقل و حداکثر بارش‌های مشاهده شده در هر ایستگاه در بازه زمانی سی ساله ۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی (مصادف با ۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی)

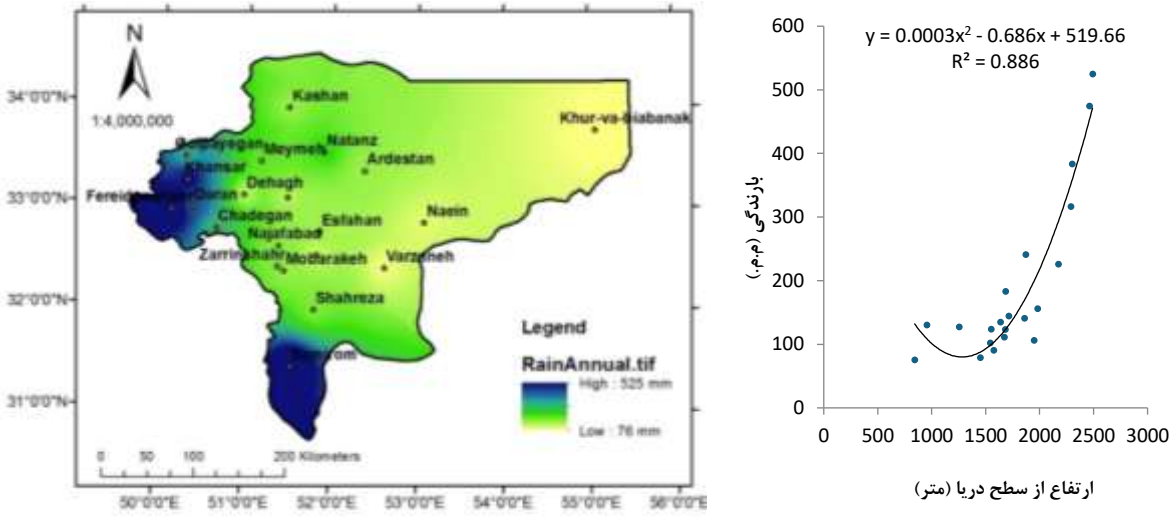
تحلیل رژیم فصلی و ماهانه بارش (شکل ۳) مبیّن آن است که فصل زمستان با تامین ۴۶ درصد از کل بارش سالانه، هیدرومورفیسم اصلی منطقه را کنترل می‌کند. پربارش‌ترین ماه سال، ماه مارس میلادی (مصادف با اسفند تا اوایل فروردین) با میانگین ۳۴ میلی‌متر است. در طرف مقابل، ماه‌های ژوئن، ژولای، آگوست و سپتامبر (مصادف با خرداد تا شهریور) با میانگین‌های نزدیک به یک میلی‌متر، خشک‌ترین فاز اقلیمی استان را تشکیل می‌دهند.



شکل ۳- توزیع ماهانه و فصلی بارندگی استان اصفهان طی بازه زمانی سی ساله ۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی (مصادف با ۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی)

[2] Extreme Events

پهنه‌بندی مکانی بارش بلندمدت براساس گرادیان بارش-ارتفاع و مدل رقومی ارتفاع (DEM) در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است که تمرکز هسته‌های بارشی را در زون‌های غربی (ایستگاه‌های فریدون‌شهر، داران و خوانسار) و جنوبی (ایستگاه سمیرم) و دشت‌های کم‌باران را در زون شرقی (ایستگاه خور و بیابانک) نشان می‌دهد.



الف- گرادیان بارندگی - ارتفاع

ب- نقشه بارندگی سالانه (میلی‌متر)

شکل ۴- نقشه توزیع مکانی بارندگی سالانه استان اصفهان براساس گرادیان بارش – ارتفاع

روند بارندگی‌های سالانه

نتایج حاصل از پیاده‌سازی آزمون ناپارامتری مَن‌کِندال و تخمین شیب سِن در جدول ۱ منعکس شده است. اگرچه آماره Z در مقیاس کل استان مقدار ۰/۱۱+ را نشان می‌دهد که گویای ثبات نسبی و عدم تغییر محسوس در میانگین بارش پهنه‌ای کل در نگاه کلی است (شکل ۶)، اما واکاوی فرین‌های ایستگاهی حاکی از رفتار متفاوتی است. از میان ۲۱ ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه، ۱۵ ایستگاه واجد سیگنال‌های منفی و روند نزولی در بارش سالانه هستند.

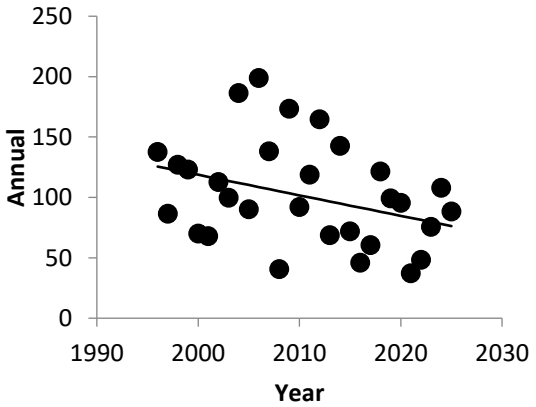
بیشترین نرخ کاهش و روند نزولی بارندگی در ایستگاه‌های ایستگاه‌های داران (Z=-۱/۰۰)، فریدون‌شهر (Z=-۱/۱۱)، نائین (Z=-۱/۱۸)، ورزنه (Z=-۱/۳۳)، ، نطنز (Z=-۱/۴۶)، و سمیرم (Z=-۱/۴۶) ثبت شده است. در این میان، روند نزولی بارش در ایستگاه‌های کبوترآباد (Z=-۱/۶۸)، کاشان (Z=-۱/۸۲)، و خور و بیابانک (Z=-۱/۸۶)، در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار گردیده است. همچنین ایستگاه مورچه‌خورت با آماره Z=-۲/۵۵ شدیدترین افت بارندگی را تجربه کرده که در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده و پس از تفسیر علائم مثبت و منفی Qmin و Qmax معنی‌داری مذکور مورد تائید قرار گرفته است (شکل ۵). تضاد میان روند ثابت کل استان و روند کاهشی ۱۵ ایستگاه منفرد، به تغییرات فضایی شدید و بازتوزیع رژیم‌های محلی بارش در فلات مرکزی مربوط می‌شود.

جدول ۱– نتایج آزمون ناپارامتریک من‌کندال برای ایستگاه‌های استان اصفهان و تعیین روند (Z)، شیب سِن (Q) و عرض از مبداء (B)

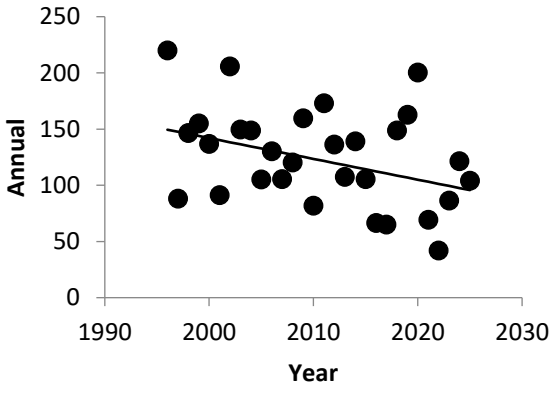
نام ایستگاه	مقدار Z	مقدار Q (شیب سِن)			مقدار B (عرض از مبداء)		
	(روند)	Q	Qmin	Qmax	B	Bmin	Bmax
اردستان	۰/۰۰	۰/۰	۲/۲	۲/۱	۱۲۹	۱۶۲	۱۰۲

چادگان	۰/۰۰	۰/۲	-۱۷/۶	۱۷/۱	۲۲۱	۶۰۷	-۱۹۴
دهق	۰/۱۸	۱/۰	-۹/۸	۱۰/۳	۷۵	۳۵۵	-۱۶۳
داران	-۱/۰۰	-۲/۲	-۶/۶	۱/۸	۳۳۴	۴۲۲	۲۸۲
فریدون‌شهر	-۱/۱۱	-۶/۷	-۱۶/۶	۷/۲	۶۷۳	۸۳۰	۴۲۷
گلپایگان	-۰/۱۴	-۰/۳	-۲/۷	۲/۴	۲۳۲	۲۶۴	۲۰۱
اصفهان	-۰/۷۱	-۰/۹	-۳/۰	۱/۲	۱۳۷	۱۶۲	۱۱۱
کبوترآباد	-۱/۶۸*	-۱/۷	-۳/۷	۰/۳	۱۲۶	۱۴۲	۸۹
کاشان	-۱/۸۲*	-۱/۹	-۳/۹	۰/۱	۱۴۹	۱۷۶	۱۲۴
خوانسار	-۰/۱۵	-۱/۱	-۸/۲	۸/۵	۴۱۵	۵۶۱	۲۵۰
خور و بیابانک	-۱/۸۶*	-۱/۰	-۲/۴	۰/۲	۹۳	۱۰۶	۶۷
میمه	-۰/۳۳	-۰/۴	-۳/۲	۲/۵	۱۵۴	۲۱۳	۱۲۷
مبارکه	۰/۰۰	۰/۲	-۴/۶	۵/۶	۱۱۹	۲۱۷	-۲
مورچه‌خورت	-۲/۵۵**	-۳/۱	-۵/۳	-۱/۱	۱۵۷	۱۹۳	۱۲۸
نائین	-۱/۱۸	-۱/۱	-۲/۷	۰/۷	۱۰۲	۱۳۱	۷۸
نجف‌آباد	-۰/۸۵	-۱/۷	-۵/۴	۱/۶	۱۶۶	۲۴۳	۹۵
نطنز	-۱/۰۷	-۱/۴	-۴/۳	۱/۲	۲۰۳	۲۴۱	۱۷۲
سمیرم	-۱/۴۶	-۶/۷	-۱۵/۴	۲/۶	۵۸۸	۷۳۴	۴۵۱
شهرضا	-۰/۰۷	-۰/۲	-۲/۲	۱/۶	۱۳۷	۱۵۹	۱۱۹
ورزنه	-۱/۳۳	-۲/۳	-۴/۷	۱/۷	۱۳۱	۱۸۲	۳۷
زرین‌شهر	-۰/۵۱	-۰/۹	-۶/۴	۳/۴	۱۵۷	۲۸۸	۶۳
کل استان	۰/۱۱	۰/۱	-۲/۴	۲/۲	۱۸۶	۲۲۴	۱۵۹

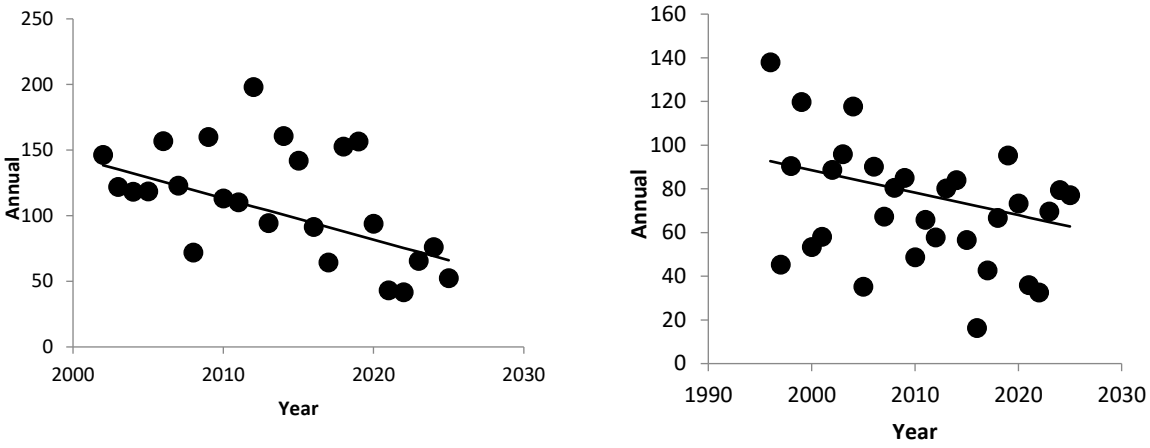
شکل ۵ نمودارهای آزمون ناپارامتریک من‌کندال برای ایستگاه‌های کبوترآباد، کاشان، خور و بیابانک و مورچه‌خورت را نشان می‌دهد. همانطور که اشاره شد، این ایستگاه‌ها دارای بیشترین روند منفی بارندگی طی بازه زمانی ۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی (۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی) بوده‌اند.



الف- کبوترآباد



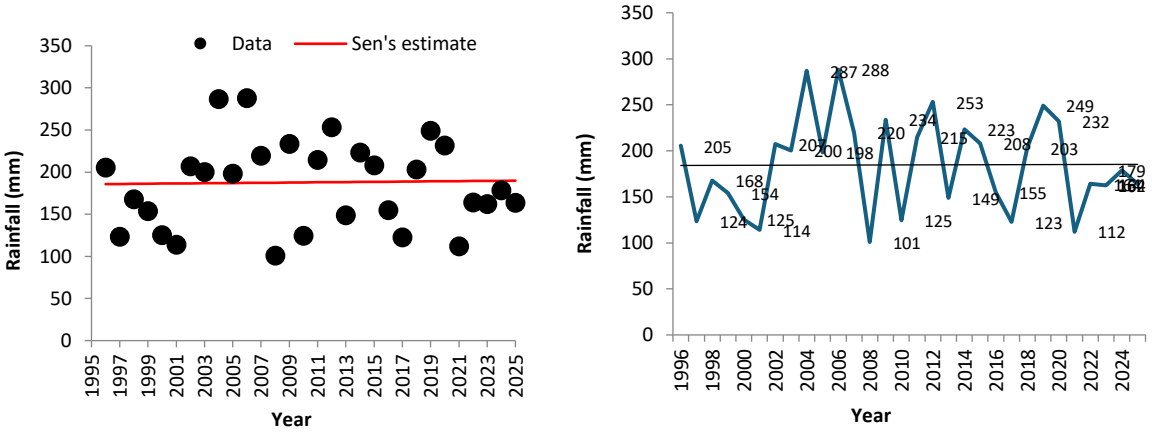
ب- کاشان



ج- خور و بیابانک د- مورچه‌خورت

شکل ۵- نتایج آزمون ناپارامتریک من‌کندال و ملاحظه روند نزولی تغییرات بارندگی سالانه ایستگاه‌های کبوترآباد، کاشان، خور و بیابانک و مورچه‌خورت در استان اصفهان

شکل ۶-الف تغییرات میانگین بارندگی سالانه استان اصفهان در دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی (۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی) را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر نوسانات بارندگی دوره آماری است؛ بطوریکه میانگین بارش در سه دهه اخیر یعنی دهه‌های ۸۴-۱۳۷۵، ۹۴-۱۳۸۵ و ۱۴۰۴-۱۳۹۵ به‌ترتیب برابر با ۱۷۸، ۲۰۲، ۱۷۴ و ۲۵۳ میلی‌متر بوده است. در یک نگاه کلی، روند ثابت بارندگی طی دوره سی ساله قابل مشاهده می‌باشد. شکل ۶-ب نتیجه آزمون من‌کندال برای میانگین بارندگی استان اصفهان در دوره آماری ۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی (۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی) را نشان می‌دهد. همان‌طوریکه ملاحظه می‌شود، شیب تغییرات میانگین بارندگی استان اصفهان نسبتاً ثابت بوده و روند بدون تغییر بارش طی سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۴۰۴ شمسی اتفاق افتاده است. براساس آزمون روند Z، مقدار آن برای میانگین بارش‌های استان اصفهان ۰/۱۱ بوده است.



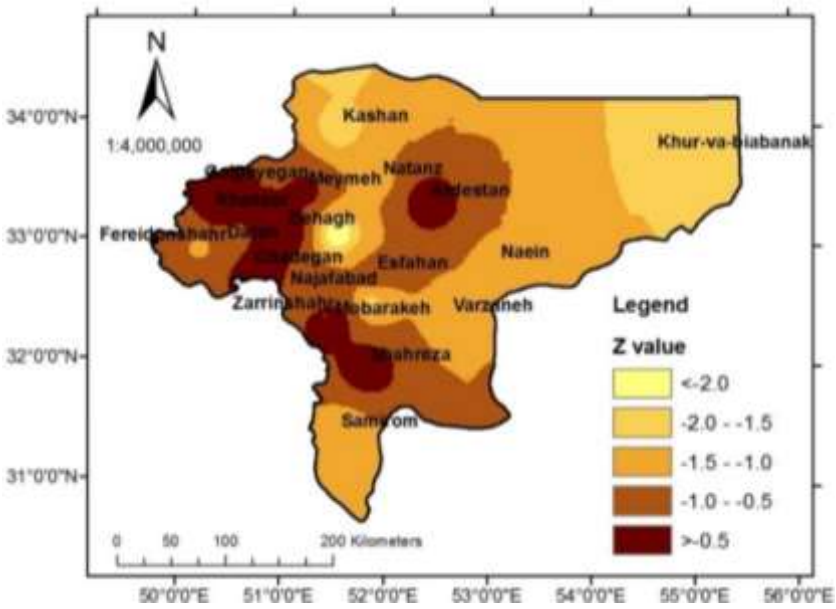
الف- تغییرات بارندگی سالانه ب- نتیجه آزمون من‌کندال

شکل ۶- تغییرات میانگین بارندگی سالانه و نتیجه آزمون من‌کندال برای میانگین بارندگی استان اصفهان طی دوره آماری ۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی

تحلیل فضایی آماره Z و عدم وابستگی به حجم بارش

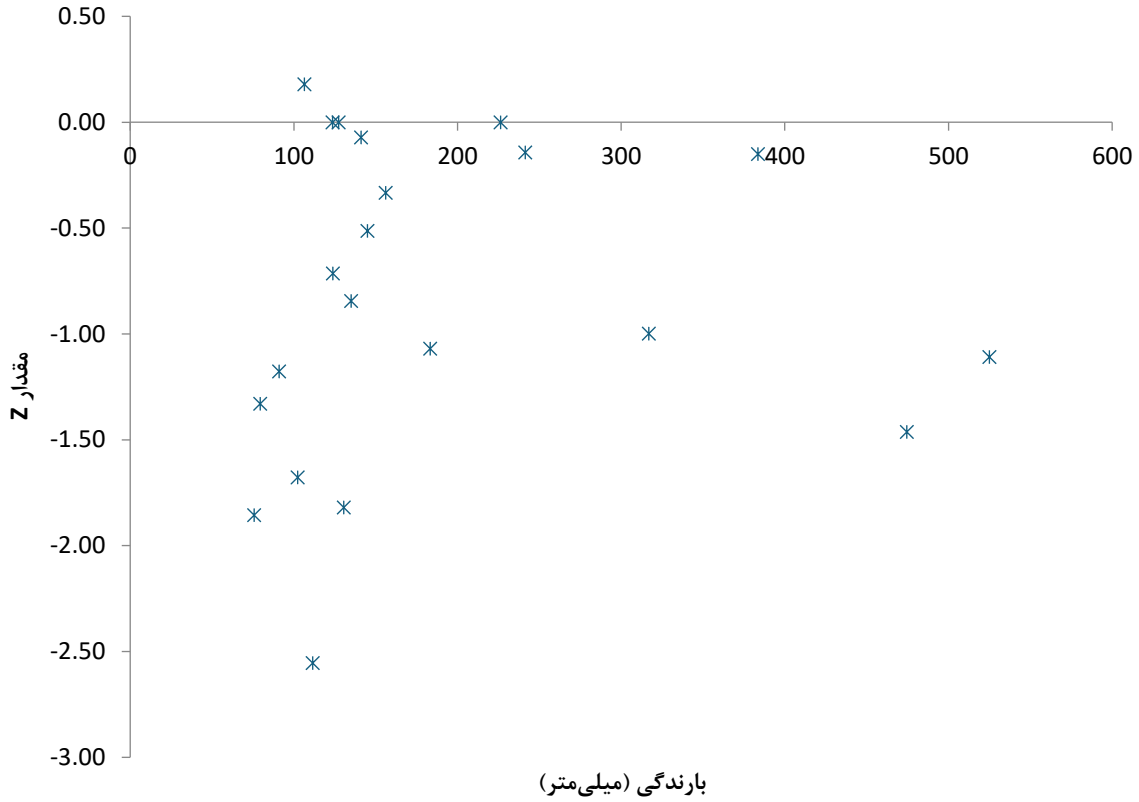
شکل ۷ نقشه توزیع مکانی آماره Z را در پهنه استان اصفهان نشان می‌دهد. این نقشه گویای آن است که پدیده تغییر اقلیم رفتار یکسانی در پهنه جغرافیایی استان نداشته است؛ نواحی شرقی، شمالی و جنوبی استان اصفهان بیشترین سیگنال‌های منفی و شدیدترین روند کاهش بارش را طی سه دهه اخیر تجربه کرده‌اند، درحالی‌که زون‌های غربی و مرکزی کمترین آسیب را از تکانه‌های اقلیمی دیده و روند تغییرات بارندگی در آن‌ها از شدت کمتری برخوردار بوده است.

یکی از یافته‌های کلیدی پژوهش حاضر، عدم وجود ارتباط آماری میان مقدار آماره Z (شدت روند کاهش) و میانگین بارش درازمدت ایستگاه‌ها است (شکل ۸). این تحلیل مکانی ثابت می‌کند که روند منفی بارندگی مستقل از توپوگرافی و حجم بارش مطلق منطقه است؛ به‌طوریکه هم در ایستگاه‌های پرباران مانند داران و سمیرم (با بارش‌های ۳۱۷ و ۴۷۴ میلی‌متر و آماره‌های ۱/۰۰- و ۱/۴۶-) و هم در ایستگاه‌های کم‌باران خشکی پسند نظیر نائین و ورزنه (با بارش‌های ۹۱ و ۷۹ میلی‌متر و آماره‌های ۱/۱۸- و ۱/۳۳-) روند نزولی به یک میزان و با شدت بالا فعال است.



شکل ۷– تشخیص شدت روند کاهشی بارندگی استان اصفهان طی دوره آماری ۱۴۰۴-۱۳۷۵ شمسی توسط نقشه پراکنش مکانی آماره Z

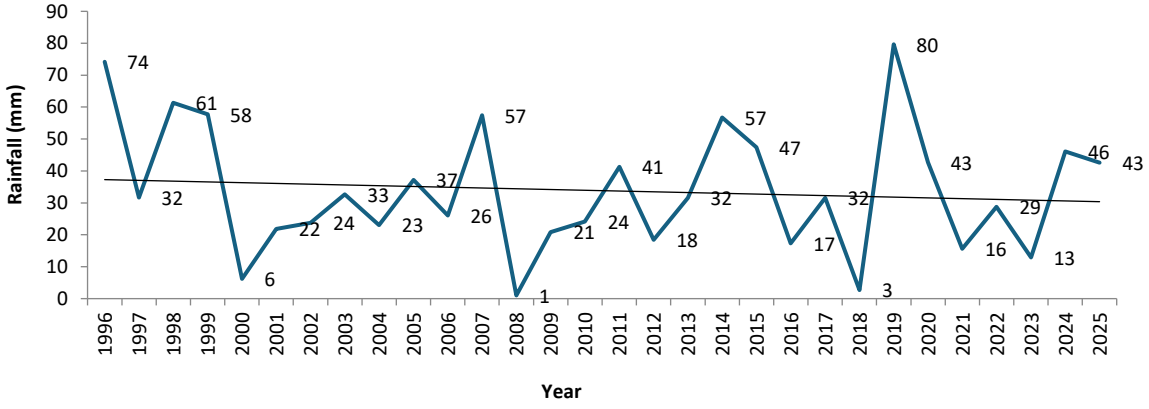
تحلیل مکانی آماره Z در استان اصفهان نشان می‌دهد، مقدار این آماره مستقل از میزان بارش سالانه درازمدت ایستگاه‌های هواشناسی بوده و روند منفی بارندگی هم در مناطق پربارش و هم در مناطق کم‌بارش استان مشاهده شده است. به‌عنوان مثال، مقدار Z در ایستگاه‌های پرباران نظیر داران و سمیرم با میانگین بارندگی‌های سالانه ۳۱۷ و ۴۷۴ میلی‌متر، به‌ترتیب برابر با ۱/۰۰- و ۱/۴۶- بوده است. از طرفی مقدار Z در ایستگاه‌های کم‌باران نظیر نائین و ورزنه با میانگین بارندگی‌های سالانه ۹۱ و ۷۹ میلی‌متر، به‌ترتیب برابر با ۱/۱۸- و ۱/۳۳- بوده است. عدم مشاهده ارتباط آماری بین مقدار Z و بارندگی سالانه ایستگاه‌های هواشناسی اصفهان در شکل ۸ نمایش داده شده است.



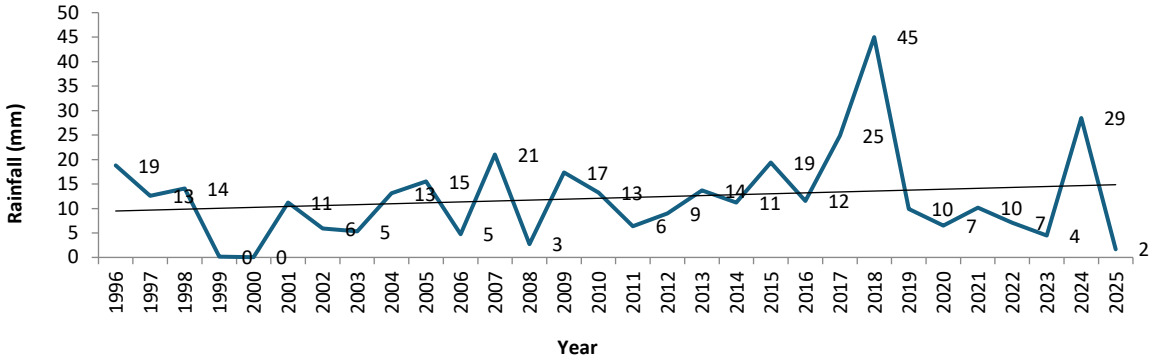
شکل ۸- عدم مشاهده ارتباط آماری بین مقدار Z و میانگین بارندگی سالانه ایستگاه‌های هواشناسی اصفهان

تغییر رژیم بارندگی ماهانه (مهاجرت بارش‌ها)

دلیل اصلی افت بارش در ۱۵ ایستگاه استان با وجود ثابت ماندن میانگین کل، در تغییر رژیم فصلی و ماهانه نهفته است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که سیستم‌های باران‌زا در حال جابه‌جایی زمانی و مهاجرت از اواخر فصل زمستان به اوایل فصل بهار هستند. شکل ۹ به مقایسه رفتار هیدرولوژیک ماه مارس (اسفند - زمستان) و ماه می (اردیبهشت - بهار) می‌پردازد. میانگین بارش این دو ماه به‌ترتیب ۳۴ و ۱۴ میلی‌متر است؛ اما نمودارهای سری زمانی مبیّن آن است که روند بارش در ماه مارس کاملاً نزولی (منفی) و در ماه می کاملاً صعودی (مثبت) پدیدار شده است.



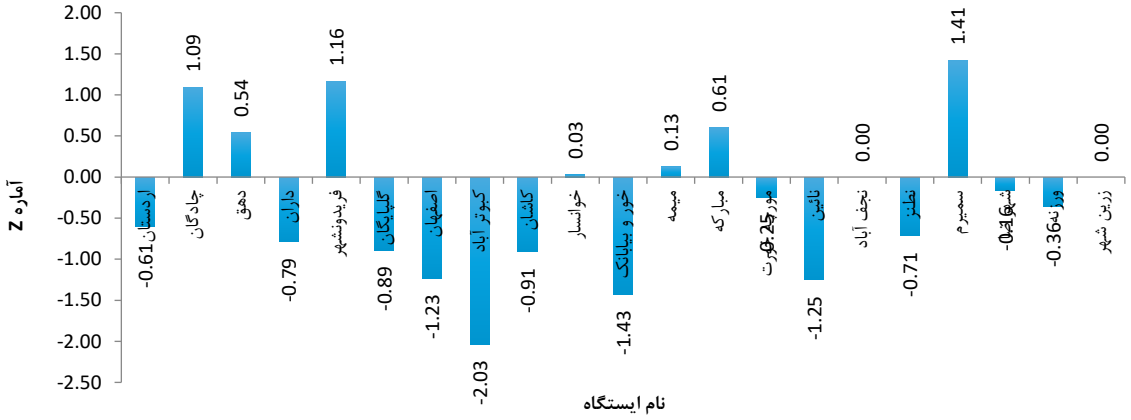
الف - ماه مارس (مصادف با اسفند)



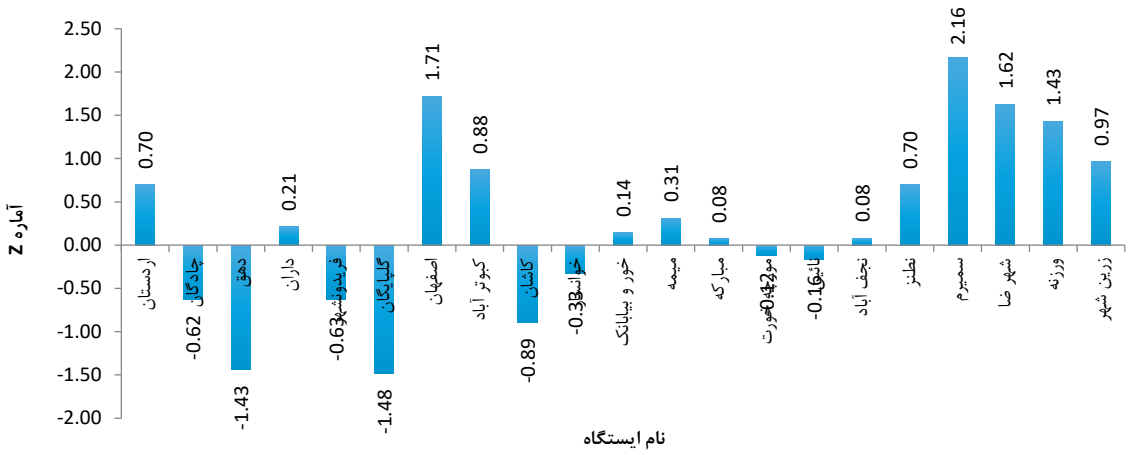
ب - ماه می (مصادف با اردیبهشت)

شکل ۹- تغییرات بارندگی استان اصفهان در ماه‌های مارس (مصادف با اسفند) و می (مصادف با اردیبهشت) طی بازه زمانی ۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی

این جابه‌جایی فصلی در مقیاس ایستگاهی نیز در شکل ۱۰ تایید می‌شود. در ماه مارس (شکل ۱۰-الف)، به جز چند ایستگاه محدود (چادگان، دهق، فریدون‌شهر، مبارکه و سمیرم)، روند بارندگی در تمامی ایستگاه‌های استان به‌شدت نزولی است. از آنجا که مارس پربارش‌ترین ماه استان است، هرگونه افت بارش در آن اثر مستقیمی بر منابع آب سطحی می‌گذارد. در نقطه مقابل، آماره Z در ماه می (شکل ۱۰-ب) در بیشتر ایستگاه‌ها رفتار معکوس (افزایشی) از خود نشان داده است. این نوسان متضاد رفتار ماهانه، اثبات‌کننده جابه‌جایی تقویم ریزش‌ها از زمستان به بهار زودرس در پهنه استان اصفهان است.



الف - ماه مارس (مصادف با اسفند)



ب - ماه می (مصادف با اردیبهشت)

شکل ۱۰- تغییرات آماره Z مربوط به بارندگی‌های‌ماه مارس (مصادف با اسفند) و می (مصادف با اردیبهشت) ایستگاه‌های سینوپتیک استان اصفهان طی بازه زمانی ۲۰۲۵-۱۹۹۶ میلادی

یکی از تبیین‌های احتمالی برای تغییرات مشاهده شده در رژیم زمانی بارش استان اصفهان، تغییر شرایط دمایی و در نتیجه تغییر فاز بخشی از بارش‌ها از جامد به مایع است. به‌طورکلی، افزایش دمای هوا می‌تواند ارتفاع خط برف و یخبندان را افزایش داده و احتمال وقوع بارش به‌صورت برف را در ارتفاعات و دوره‌های انتقالی کاهش دهد؛ در مقابل، احتمال وقوع بارش به‌صورت باران افزایش می‌یابد. گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) نیز نشان می‌دهد که گرمایش اقلیمی می‌تواند موجب تغییر سهم بارش از برف به باران، به‌ویژه در مناطق و فصل‌هایی شود که دمای هوا در نزدیکی آستانه گذار بین دو فاز قرار دارد. این ساز و کار در مطالعات انجام‌شده در ایران نیز مورد توجه قرار گرفته است؛ به‌طوری‌که کاهش ماندگاری پوشش برف و کوتاه‌شدن فصل برف در بخش‌هایی از کشور با افزایش دما مرتبط دانسته شده است. همچنین، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی می‌تواند زمان‌بندی فصل مرطوب را در ایران تغییر داده و در برخی مناطق، سهم بارش‌های زمستانه را به سمت فصل بهار سوق دهند. بنابراین، کاهش روند بارندگی در اسفندماه و افزایش آن در اردیبهشت‌ماه که در پژوهش حاضر مشاهده شد، می‌تواند در چارچوب تغییر رژیم زمانی بارش و تغییر شرایط دمایی منطقه تفسیر شود و احتمال تغییر بخشی از بارش‌های جامد به مایع نیز به‌عنوان یکی از ساز و کارهای احتمالی آن مطرح است. با این حال، از آنجا که برای مطالعه حاضر داده‌های تفکیک‌شده مربوط به نوع بارش (برف و باران) در دسترس نبوده است، فرضیه تغییر فاز بارش به‌صورت مستقیم آزمون نشده و این تفسیر باید با احتیاط در نظر گرفته شود. بررسی قطعی این تغییر مستلزم استفاده از داده‌های روزانه نوع بارش، دمای هوا و در صورت امکان ارتفاع برف یا پوشش برف و تحلیل همزمان روند آنها در دوره آماری خواهد بود.

نتیجه‌گیری

واکاوی پویایی‌های مکانی و زمانی بارندگی در پهنه جغرافیایی استان اصفهان طی دوره آماری ۳۰ ساله اخیر (۱۹۹۶-۲۰۲۵ میلادی مصادف با ۱۳۷۵-۱۴۰۴ شمسی) با بهره‌گیری از آزمون‌های ناپارامتری مَن‌کِندال و تخمین شیب سِن، به یافته‌های نوین و کلیدی در درک رفتار هیدرولوژیک و پیامدهای تغییر اقلیم در فلات مرکزی ایران منجر شد. تحلیل فضایی توزیع بارندگی بلندمدت نشان می‌دهد که توپوگرافی و الگوهای فرارفت مرطوب، کنترل‌کننده اصلی توزیع بارندگی در استان هستند؛ به‌طوری‌که بیشترین بارندگی‌های پهنه مطالعاتی به ارتفاعات غربی در ایستگاه‌های فریدون‌شهر، داران و خوانسار و نواحی مرتفع جنوبی در ایستگاه سمیرم اختصاص دارد، در حالی‌که کمترین میزان بارندگی در

زون کم‌عارضه و کویری شرقی در ایستگاه خور و بیابانک مشاهده می‌شود.

بررسی آماره‌های سالانه کلان مشخص ساخت که میانگین بارندگی پهنه‌ای کل استان اصفهان با آماره مَن‌کِندال برابر با ۰/۱۱ تغییرات محسوسی نداشته و روندی نسبتاً ثابت را طی سه دهه اخیر تجربه کرده است . اما در تضاد با این ثبات کلان، پراکنش مکانی آماره Z تایید می‌کند که نواحی شرقی، شمالی و جنوبی استان به‌شدت تحت تأثیر تکانه‌های اقلیمی قرار داشته و روند کاهش بارش سالانه در این مناطق بسیار شدیدتر و بحرانی‌تر از سایر مناطق استان اصفهان بوده است .تحلیل فضایی آماره Z همچنین نشان داد که مکانیسم کاهش بارندگی در این منطقه مستقل از میزان بارش سالانه درازمدت ایستگاه‌های هواشناسی بوده و روند منفی بارندگی به شکلی موازی هم در مناطق پربارش و هم در مناطق کم‌بارش استان مشاهده شده است.

کلیدی‌ترین دستاورد پژوهش حاضر، آشکارسازی نشانه‌هایی از جابه‌جایی تقویم ریزش‌ها و مهاجرت بارش‌های ماهانه از فصل زمستان به سمت فصل بهار است؛ چرا که بررسی و مقایسه میانگین بارندگی در ماه‌های مارس (اسفند) و می (اردیبهشت) نشان داد که روند بارش‌ها در اسفندماه نزولی (منفی) و در اردیبهشت‌ماه صعودی (مثبت) است، به‌طوری‌که در ماه مارس، به جز ایستگاه‌های چادگان، دهق، فریدون‌شهر، مبارکه و سمیرم، در سایر ایستگاه‌ها روند تغییرات بارندگی همگی به‌صورت نزولی بوده است. این دگرگونی رژیم هیدرولوژیک و جابه‌جایی زمانی سیستم‌های باران‌زا، از جهات مختلفی نظیر بخش کشاورزی و تامین نیاز آبی کشت‌های دیم (به دلیل نرخ تبخیر بالای بهاره و آسیب‌زایی رطوبت موثر خاک)، مدیریت آب شرب و تامین بهینه ذخایر سدها، پایداری اکولوژیک و تامین حقابه‌های زیست‌محیطی تالاب‌ها (به‌ویژه تالاب بین‌المللی گاوخونی) و همچنین پتانسیل خودپالایی اتمسفر بر تعدیل وضع هوای استان و کاهش آلودگی‌های محیطی بسیار حایز اهمیت بوده و این دگرگونی ساختاری ریزش‌ها پتانسیل تشدید چالش‌های هیدرولوژیک فلات مرکزی را به همراه دارد. البته علیرغم مشاهده نشانه‌های تغییر رژیم بارندگی ماهانه در استان اصفهان، پیشنهاد می‌گردد که برای تأیید قطعی این یافته، از دوره‌های آماری طولانی‌تر نیز استفاده شود. اما بطورکلی؛ نتایج مبیّن آن است که پدیده تغییر اقلیم در این پهنه خشک و نیمه‌خشک، خود را بیش از آنکه در تغییرات مقدار مطلق بارش سالانه نشان دهد، در بازتوزیع زمانی و دگرگونی رژیم ماهانه نمایان ساخته است؛ امری که بازنگری جدی در تقویم و الگوی کشت استان، امکان‌سنجی تامین نیاز آبی گیاهان از طریق بارش‌های بهاره، احتمال تغییرات در فرایند نفوذ آب در خاک و تغذیه منابع آب زیرزمینی ناشی از جایگزینی بارش‌های بهاره با زمستانه، ، تغییر فاز بخشی از بارش‌ها از جامد (برف) به مایع (باران) در اثر تغییر شرایط دمایی ناشی از جابجائی رژیم ماهانه بارندگی‌ها، اصلاح الگوهای سنتی ذخیره‌سازی مخزن سدها و بازتنظیم استراتژی‌های کلان مدیریت منابع آب استان اصفهان در بخش‌های کشاورزی، صنعت، شرب و بهداشت و فضای سبز را کاملاً الزامی و حیاتی می‌سازد.

References

[1]. Abbasi, F. and Abbasi, N. (2017). Water productivity in agriculture; Challenges and prospects. Journal of Water and Sustainable Development, 4(1), 141-144. doi: 10.22067/jwsd.v4i1.67121 (in Farsi).

[2]. Ahmadi, M. and Mohammadi Mehr, N. (2024). Forecasting of aerosols in southwest Asia based on SSP scenarios of CMIP 6 models. Researches in Earth Sciences, 15(1), 131-141. doi: 10.48308/esrj.2023.104050 (in Farsi).

[3]. Asadi, A and Sanaei Nejad, S H. (2025). Spatial Analysis of Observed Precipitation in Fars Province and its Projection Using CanESM5 Climate Model Output. Nivar, 49(128-129), 68-79. doi: 10.30467/nivar.2025.476368.1307 (in Farsi).

[4]. Asakereh, H. (2005). Tempo-spatial Change in Isfahan Province Precipitation Suring Recent Decades. Research Bulletin of Isfahan University (Humanities), 18(1), 91-116. (in Farsi).

[5]. Babaeian, I., Giuliani, G., Modirian, R. and Karimian, M. (2024). Projection of Iran's precipitation during 2026-2075 by dynamical downscaling by RegCM4.7 under SSP scenarios. Journal of Agricultural Meteorology, 12(1), 20-34. doi: 10.22125/agmj.2023.405388.1155 (in Farsi).

[6]. Babaeian, I., Karimian, M., Modirian, R. and Mirzaei, E. (2019). Future Climate Change Projection Over Iran Using CMIP5 Data During 2020-2100. Nivar, 43(104-105), 67-77. doi: 10.30467/nivar.2019.142745.1103 (in Farsi).

[7]. Hatami Bahman Beyglou, Khod Karam, & Khoushhal Dastjerdi, J. (2010). Climatic regions of Fars province. Geographical Space, 10(32), 135-150. (in Farsi).

[8]. Kaviani, M. R. (1988). A statistical analysis of Iran's rainfall regime. Growth of Geography Education, (13), 4-12. (in Farsi).

[9]. Leggett, J., Pepper, W. J., Swart, R. J., Edmonds, J., Meira Filho, L. G., Mintzer, I., ... & Wasson, J. (1992). Emissions scenarios for the IPCC: an update. Climate change, 1040, 75-95.

[10]. Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L., Lamarque, J. F., ... & Van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. Climatic change, 109(1), 213. DOI: 10.1007/s10584-011-0156-z.

[11]. Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., Vries, B. D., Fenhann, J., Gaffin, S., ... & Zhou, D. (2000). Special report on emissions scenarios. Cambridge University Press.

[12]. Qorbani, H., Vali, A.A., & ZaarePour, H. (2019). Analysis of the Climatological Drought Trend Variations Using Mann-Kendall, Sen and Pettitt Tests in Isfahan Province.

[13]. Roozbeh, S., Shahedi, K., Darabi, H., & Soleimani, K. (2016). Investigating the trend of changes in hydro-climatic conditions of Maharloo watershed using Mann-Kendall and Sen's slope tests [Paper presentation]. 11th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran, Participatory Development in Watershed Management, Yasuj University. (in Farsi).

[14]. Sobouti, Y., Darvishzadeh, R. and Naghavi Azad, A. (2015). Climate of Iran - Projection of Temperature and Precipitation until 2030. Science Cultivation, 5(2), 18-25. (in Farsi).

[15]. YoosefDoost, A., Sadeghian, M.S., NodeFarahani, M.,& Rasekhi, A. (2017). Comparison between performance of statistical and low cost ARIMA model with GFDL, CM2. 1 and CGM 3 atmosphere-ocean general circulation models in assessment of the effects of climate change on temperature and precipitation in Taleghan Basin. American Journal of Water Resources, 5(4), 92-99. doi:10.12691/ajwr-5-4-1.

[16]. Zarrin, A and Dadashi-Roudbari, A. (2022). Projection of precipitation intensity in Iran using NEX-GDDP by multi-model ensemble approach. Iranian Journal of Geophysics, 16(1), 47-68. doi: 10.30499/ijg.2021.300366.1353 (in Farsi).

Nonparametric Test of Spatio -Temporal Changes of Rainfalls in Isfahan Province During the Last Three Decades
(Research Paper)

1 -Mehran Fatemi*, Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Meybod, Meybod, Iran.

yazdfatemi@meybod.ac.ir

Received: 30 Jun. 2026
Accepted: 14 Sep. 2026

Abstract

The water crisis in Iran represents a critical environmental challenge, driven primarily by rainfall deficits, unfavorable spatiotemporal precipitation distribution, and a declining trend in recent decades. This study investigates the spatiotemporal distribution of rainfall across Isfahan province over a 30-year period (1996–2025). Rainfall trends were initially evaluated using the non-parametric Mann-Kendall and Sen's slope estimator tests. Subsequently, by analyzing shifts in monthly precipitation regimes across various stations, a spatial distribution map of rainfall trends (Z-statistic) was generated via GIS interpolation techniques. The findings indicate that while the overall provincial annual rainfall trend remained relatively stable with a baseline Z-statistic of 0.11, the spatial distribution of the Z-statistic reveals that the eastern, northern, and southern regions of Isfahan province are significantly more vulnerable to climate change, exhibiting a more severe decline in precipitation. Furthermore, the analysis demonstrates that the Z-statistic values operate independently of long-term annual rainfall volumes, with negative precipitation trends manifested across both high-rainfall and low-rainfall zones of the province. Crucially, a comparative analysis of monthly rainfall revealed opposing trends in March and May, which exhibit significant downward (negative) and upward (positive) trajectories, respectively. This structural shift highlights a critical alteration in Isfahan's precipitation regime, characterized by a seasonal migration of rainfall from winter to spring.

Keywords: Z-statistic, Mann-Kendall, Sen’s Line Slope, Rainfall Regime, Isfahan Province.