

واکاوی آماری بارش‌های زمستانه در حوضه آبریز دز

محمد ناظری تهرودی^۱

۱. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: nazeri.mh@lu.ac.ir

چکیده

این پژوهش به بررسی تغییرات توزیع و کمیت بارش زمستانه در ۱۸ ایستگاه واقع در حوضه آبریز دز، غرب ایران طی دوره ۲۰۲۴-۱۹۷۵ پرداخته است. نتایج حاصل از آزمون من-کندال اصلاح شده نشان می‌دهد که ۵۰ درصد ایستگاه‌ها (۹ ایستگاه از جمله تخت دره، کشور، و تنگ پنج) روند کاهشی معناداری در سطح ۵ درصد داشته‌اند. بر اساس شیب سن، شدیدترین کاهش‌ها (بیش از ۳ میلی‌متر در سال) در ایستگاه‌های تنگ پنج بختیاری، تله‌زنگ و کشور رخ داده که در مجموع به کاهشی بیش از ۱۵۰ میلی‌متر در طول دوره مطالعه منجر شده است. تغییرات زمانی عمدتاً در دو مقطع ۱۹۹۰ و ۲۰۰۶ متمرکز بوده که نشان‌دهنده تأثیر عوامل بزرگ‌مقیاس اقلیمی است. علاوه بر این، تحلیل توزیع آماری داده‌ها قبل و بعد از زمان تغییر روند، نشان‌دهنده تغییر در نوع توزیع (مانند تغییر از ویبل به لاگ-نرمال بر اساس آماره کلموگروف-اسمیرنف) و تغییرات قابل توجه در شاخص‌های آماری مانند واریانس و چولگی در بسیاری از ایستگاه‌ها بوده است. این یافته‌ها همسو با پیش‌بینی‌های گزارش‌های IPCC و مطالعات منطقه‌ای دیگر است و نشان می‌دهد کاهش بارش زمستانه یک چالش بزرگ‌مقیاس با پیامدهای جدی برای منابع آب منطقه است. همچنین نتایج نشان‌دهنده تغییرات فرم تابع توزیع و تغییرات شدید چولگی در زیربازه بعد از زمان تغییر روند است.

کلیدواژه‌ها: تغییرپذیری، توسعه اقلیمی، الگوی بارش، مقادیر حدی.

۱. مقدمه

تغییرات اقلیمی به‌ویژه تغییر در الگوهای بارش، یکی از چالش‌های اصلی قرن حاضر است که اثرات مستقیمی بر منابع آب، کشاورزی، امنیت غذایی و محیط‌زیست دارد. در حوضه‌های آبریز، بارش اصلی‌ترین منبع تأمین آب است و هرگونه تغییر در توزیع زمانی و مکانی آن می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای داشته باشد. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که نه تنها مقدار کل بارش، بلکه توزیع آماری آن نیز در حال تغییر است (ناظری تهرودی، ۲۰۲۵). این تغییرات شامل افزایش فراوانی و شدت بارش‌های حدی، کاهش بارش‌های متوسط و افزایش دوره‌های خشکی است. چنین تغییراتی می‌تواند منجر به افزایش سیلاب‌های ناگهانی، کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی، تشدید خشکسالی و در نهایت تهدید پایداری سیستم‌های آب و محیط‌زیست شود. درک تغییرات الگوهای بارش و توزیع آن برای مواجهه با چالش‌های کشاورزی، مدیریت منابع آب و پایداری زیست‌بومی حیاتی است.

بر اساس گزارشات IPCC¹، تغییرات در توزیع بارش، مستقیماً میزان آب قابل دسترس برای شرب، کشاورزی و صنعت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش بارش‌های حدی و کوتاه‌مدت ممکن است منجر به افزایش رواناب سطحی و کاهش نفوذ آب به خاک شود که در نهایت باعث کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌گردد (Milly *et al.*, 2005).

از آنجا که کشاورزی به طور مستقیم به بارش وابسته است، تغییر در توزیع بارش می‌تواند دوره‌های رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و منجر به کاهش محصولات کشاورزی شود. افزایش دوره‌های خشکی و کاهش بارش‌های مؤثر می‌تواند امنیت غذایی را به خطر بیندازد (IPCC, 2022).

از طرفی افزایش بارش‌های حدی می‌تواند باعث افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها شود که خسارات جانی و مالی به دنبال دارد. طراحی سازه‌های کنترل سیلاب مانند سدها و آب‌بندها نیازمند درک دقیق از تغییرات توزیع بارش است (Kundzewicz *et al.*, 2014). تغییرات بارش می‌تواند تنوع زیستی و سلامت اکوسیستم‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. گونه‌های گیاهی و جانوری که به شرایط خاص آبی عادت کرده‌اند ممکن است با تغییرات سریع سازگار نشوند (Walther *et al.*, 2002).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی باعث تغییر در توزیع آماری بارش شده است. به طور خاص، بارش‌های حدی در بسیاری از مناطق جهان در حال افزایش است، در حالی که بارش‌های متوسط کاهش یافته‌اند (Westra *et al.*, 2013). این تغییرات نه تنها بر مقدار کل بارش، بلکه بر زمان‌بندی و توزیع فصلی آن نیز تأثیر گذاشته است.

اهمیت مجموعه داده‌ها در درک پویایی‌های بارش در چندین مطالعه مورد بررسی قرار گرفته و تأکید شده است. Yatagai *et al.* (2012) یک مجموعه داده روزانه شبکه‌ای بلندمدت بارش برای آسیا توسعه داده‌اند که به منبعی ضروری برای اقلیم‌شناسان و هیدرولوژیست‌ها تبدیل شده است. به طور مشابه، Ashouri *et al.* (2015) مجموعه داده PERSIANN-CDR را معرفی کردند که یک ثبت داده آب‌وهوایی روزانه بارش از مشاهدات چند ماهواره‌ای است و بیش‌های ارزشمندی برای مطالعات هیدرولوژیکی و آب‌وهوایی فراهم می‌کند. این مجموعه داده‌ها به پژوهشگران امکان تحلیل روندهای بلندمدت و تغییرپذیری بارش را داده و مدل‌سازی و پیش‌بینی آب‌وهوا را بهبود می‌بخشد.

در حوضه‌های آبریز، تغییرات توزیع بارش می‌تواند منجر به تغییر در رژیم هیدرولوژیک شود. برای مثال، در حوضه‌های مدیترانه، کاهش بارش‌های زمستانه و افزایش بارش‌های پاییزه مشاهده شده است که بر میزان آب قابل دسترس در فصل تابستان تأثیر منفی گذاشته است (Giorgi and Lionello, 2008).

از جمله روش‌های متداول برای تحلیل تغییرات توزیع بارش، استفاده از آزمون‌های آماری مانند من-کندال و آزمون پتیت است. این آزمون‌ها به شناسایی روندها و نقاط تغییر در سری‌های زمانی کمک می‌کنند (Hamed and Rao, 1998). همچنین، برازش توزیع‌های

آماري مختلف و مقايسه آنها در دوره‌هاي مختلف زماني مي‌تواند تغييرات در پارامترهاي بارش را نشان دهد. تغييرات بارش مي‌تواند بر اقتصاد مناطق مختلف تأثير بگذارد. براي مثال، در مناطق خشک و نيمه‌خشک، کاهش بارش مي‌تواند منجر به کاهش توليدات کشاورزي و افزايش مهاجرت از روستاها به شهرها شود (Fischer *et al.*, 2005).

Piao *et al.* (2010) بر تأثير قابل توجه تغييرات آب‌وهوايي بر منابع آب و کشاورزي در چين تاکيد مي‌کند و نشان مي‌دهد که تغييرات الگوهاي بارش مي‌تواند به دسترسي متفاوت به آب منجر شده و مستقيماً بر بهره‌وري کشاورزي تأثير بگذارد. اين مطالعه پايه‌اي، درک اوليه‌اي از چگونگي تغيير چشماندازهاي کشاورزي بر اثر جابه‌جايي‌هاي توزيع بارش ارائه مي‌دهد، به‌ويژه در مناطقي که شديداً به بارش پايدار براي برداشت محصول متکي هستند.

Hawkins and Sutton (2011) نيز به بررسي امکان کاهش عدم قطعيت‌ها در پيش‌بيني‌هاي بارش منطقه‌اي مي‌پردازند که براي بهبود مدل‌هاي آب‌وهوايي ضروري است. اين کار بر ضرورت پالايش مستمر مدل‌هاي پيش‌بيني براي افزايش دقت آنها در پيش‌بيني تغييرات بارش منطقه‌اي تاکيد مي‌کند. تغييرپذيري بارش در مناطق خاص به طور عميقي مورد کاوش قرار گرفته است. در يک نمونه در ساحل غربي آفريقا Nicholson (2013) رژيم بارندگي را مرور کرده و بر تعاملات پيچيده بين سامانه‌هاي گردش جوي و تغييرپذيري بارندگي تاکيد مي‌کند. درک اين پويايي‌ها براي پيش‌بيني الگوهاي آبي بارش و توسعه روش‌هاي مؤثر کشاورزي در اين منطقه حياتي است.

Ray *et al.* (2015) نيز بر نقش تغييرپذيري بين‌ساله آب‌وهوا در تأثيرگذاري بر عملکرد محصولات در سطح جهاني تاکيد مي‌کنند. آنان گزارش مي‌دهند که حدود يک‌سوم تغييرپذيري مشاهده‌شده در عملکرد محصولات را مي‌توان به عوامل آب‌وهوايي از جمله تغييرات بارش نسبت داد. چنين يافته‌هايي نياز به سياست‌هاي کشاورزي هدفمندی را نشان مي‌دهد که تأثيرات خاص تغيير الگوهاي بارش بر توليد محصولات، به‌ويژه در مناطق آسيب‌پذير، را در نظر مي‌گيرند.

پيامدهاي زيست‌بومي تغيير الگوهاي بارش قابل توجه است. در مطالعه‌اي Schneider *et al.* (2016) چگونگي تأثير رژيم‌هاي تغيير يافته بارش را بر اکوسيستم‌هاي مانگرو مورد بحث قرار داده و نشان دادند که تغييرات بارش مي‌تواند بر تنوع زيستي و تاب‌آوري تأثير بگذارد. اين مسئله درهم‌تنيدگي تأثيرات تغييرات آب‌وهوايي در اکوسيستم‌هاي مختلف و اهميت رويکردهاي يکپارچه در پژوهش را برجسته مي‌سازد.

افزايش تناوب و شدت رويدادهاي بارش حدي يکي از نگراني‌هاي متأثر از تغييرات اقليمي است. Tabari (2020) چگونگي تشديد چرخه هيدرولوژيکي ناشي از گرمائش جهاني را که منجر به بارش‌ها و سيلاب‌هاي شديدتر مي‌شود، مورد بحث قرار مي‌دهد. اين مطالعه بر نياز فوري به پژوهش بيشتري در مورد ابعاد مکاني و فصلي دسترسي به آب در ارتباط با رويدادهاي شديد آب‌وهوايي که به دليل تغييرات آب‌وهوايي شايع‌تر مي‌شوند، تاکيد مي‌کند.

Papalexiou and Montanari (2019) یک تحلیل جهانی از بارش‌های حدی ارائه می‌دهند و نشان می‌دهند که افزایش بارش‌های شدید در سطح جهانی و منطقه‌ای هر دو به تغییرات آب‌وهوایی گره خورده است. یافته‌های آنان الگوهای مکانی قابل توجهی در این تغییرات را نشان می‌دهد و بر ضرورت مطالعات محلی شده برای اطلاع‌رسانی به راهبردهای انطباق منطقه‌ای در کشاورزی و مدیریت بحران تأکید می‌کند.

Salameh (2024) با مطالعه رفتار بارش در خاورمیانه (۲۰۱۸-۱۹۷۰) نشان دادند که این منطقه از نظر تمرکز بارش به سه بخش تقسیم می‌شود: جنوب فلسطین و شرق اردن بسیار نامنظم، مرکز/شمال فلسطین و شرق سوریه نامنظم و سواحل سوریه نیمه منظم می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند که تمرکز بارش در پاییز کاهش معناداری داشته، درحالی‌که توزیع بارش زمستانی و بهاری یکنواخت‌تر شده است. Nazeri Tahroudi (2025) به بررسی الگوهای جهانی بارش از ۲۰۱۹-۱۸۹۱ پرداخته و نشان دادند که ۳۲٪ از مناطق جهان افزایش و ۲۱٪ کاهش بارش معنادار آماری داشته‌اند. بیشترین افزایش بارش در عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی مشاهده شد. تغییرات رژیم زمانی بارش عمدتاً در بازه ۱۹۸۷-۱۹۵۵ رخ داده و ۷۸٪ از مناطق رفتار غیرایستا نشان دادند.

بررسی تغییرات توزیع بارش در حوضه‌های آبریز نه تنها از جنبه علمی حائز اهمیت است، بلکه کاربردهای عملی زیادی در مدیریت آب، کشاورزی، مدیریت ریسک بلایای طبیعی و برنامه‌ریزی محیط‌زیست دارد. این پژوهش با به‌کارگیری روش‌های آماری پیشرفته، می‌تواند به درک بهتری از تغییرات الگوهای بارش کمک کرده و ابزار مناسبی برای تصمیم‌گیری در مواجهه با تغییرات اقلیمی ارائه دهد. هدف اصلی این تحقیق بررسی تغییرات آماری بارش‌های زمستانه در حوضه آبریز دز از دیدگاه تغییرات توزیع آن می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دز در جنوب غربی ایران در استان‌های خوزستان، لرستان، چهارمحال و بختیاری واقع شده است که بخشی از حوضه آبریز کارون بزرگ تلقی می‌شود. مساحت این حوضه آبریز حدود ۲۱۷۰۰ کیلومتر مربع بوده که رودخانه اصلی آن رودخانه دز (با طول تقریبی ۵۱۵ کیلومتر) است که از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و به رودخانه کارون می‌پیوندد. ارتفاع این حوضه از بیش از ۴۰۰۰ متر در ارتفاعات زاگرس تا حدود ۵۰ متر در دشت خوزستان متفاوت است. در این مطالعه از داده‌های بارش زمستان ایستگاه‌های منتخب در حوضه آبریز دز در دوره آماری ۲۰۲۴-۱۹۷۵ (۵۰ سال) استفاده شده است. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب به صورت شکل ۱ و خصوصیات آماری داده‌های مورد بررسی به صورت جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

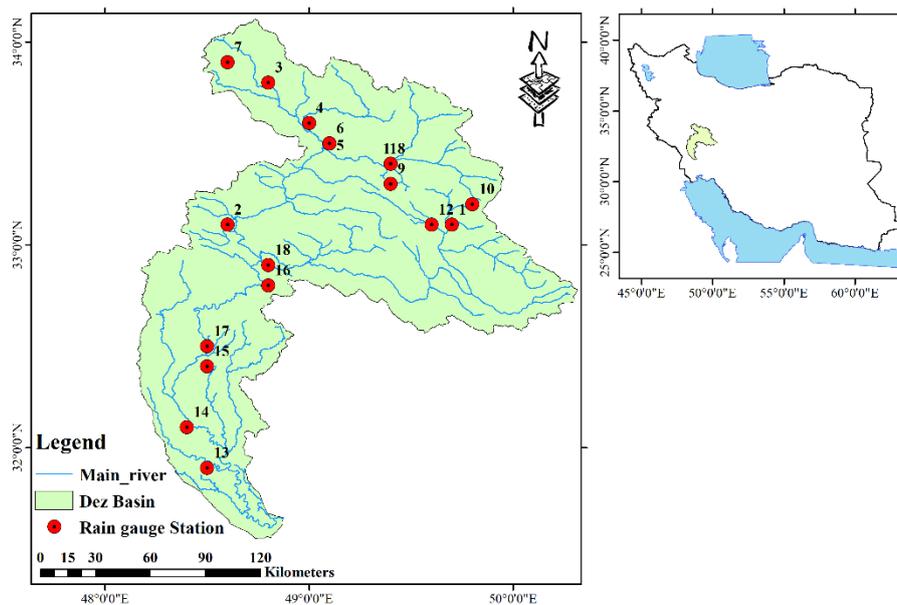


Figure 1. Location map of study area and selected stations

Table 1. Statistical characteristics of studied data

Station	St. No	Max (mm)	Min (mm)	STD	Var	Average (mm)
Takht Dareh	1	732	119.5	132.4121	17532.96	309.164
Kazemabad	2	484	114	102.4635	10498.77	268.848
Keshvar	3	826	162	165.8843	27517.6	470.794
Borujerd	4	370.5	92	75.83773	5751.361	210.51
Cham sabzeh	5	776	154	141.0486	19894.71	359.03
Doroud	6	532	145	107.3664	11527.55	295.28
Marvak	7	298	40	58.82798	3460.732	150.846
Vanaee	8	910	95	152.1327	23144.37	313.37
Kamandan	9	592	73	123.3756	15221.54	281.53
Ab Barik	10	288	44	62.53474	3910.594	148.578
Chamchit	11	441	64.5	86.68708	7514.65	211.02
Sekan	12	734	117	153.6114	23596.46	315.513
Harmale	13	280	34	58.61307	3435.493	121.25
Haft tapeh	14	276.2	4.2	60.97246	3717.64	124.957
Dezful	15	443.5	32	88.59182	7848.511	179.089
Talezang	16	819.5	91.8	169.7145	28803.03	416.039
Dez Dam	17	497.5	44.5	108.9556	11871.33	242.158
Tang Pang Bakhtiari	18	1131	121	234.1209	54812.58	563.346

۲.۲. آزمون روند

روند تغییرات بارش زمستانه در ایستگاه‌های منتخب در حوضه آبریز دز با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال اصلاح شده مورد

بررسی قرار گرفت. آزمون من-کندال و نسخه اصلاح شده آن پایه اصلی مطالعات روند در حوزه هیدرولوژی و منابع آب می‌باشد و در

مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (Mann, 1945; Kendall, 1963; Kumar et al., 2009; Khalili et al., 2016; Ahmadi)

et al., 2018; Nazeri Tahroudi, 2025). در آزمون من-کندال اصلاح شده هر مقدار در سری زمانی به صورت پیوسته و پشت سرهم با

بقیه مقادیر سری، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در این آزمون مراحل زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

در گام اول آماره S برای مقادیر متوالی x_j با طول داده‌های برای n به صورت زیر محاسبه می‌شود که در آن، $\text{sgn}(\theta)$ به

عنوان تابع علامت شناخته می‌شود شرط رابطه ۲ در این تابع برقرار است:

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

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad \text{and } V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

که در آن t_i تعداد داده‌های یکسان در دسته i ام و m برابر با تعداد گروه‌های جفتی می‌باشند. در آماره آزمون اصلاح شده من-کندال، ابتدا خودهمبستگی داخلی داده‌ها با تاخیرهای مختلف برآورد شده و در صورت معنی‌دار بودن، از سری زمانی حذف می‌شوند. این روش بدین صورت است که شیب خط روند از رابطه ۴ محاسبه شده و در گام بعدی از سری داده‌ها حذف می‌شود. با حذف شیب خط روند از سری داده‌ها، خودهمبستگی نیز حذف شده و در نهایت شیب حذف شده به داده‌ها اضافه می‌شود (Theil, 1950; Sen, 1968; Tahroudi et al., 2019).

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad \forall i < j \quad (4)$$

که در آن β برآوردگر شیب خط روند و x_i, x_j به ترتیب مقادیر مشاهداتی i ام و j ام می‌باشند. مقادیر مثبت β نشان دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی آن روند کاهشی را نشان می‌دهند (Kumar et al., 2009).

همچنین در این مطالعه جهت بررسی و شناسایی زمان تغییر روند از آزمون پتیت استفاده شد (Pettit, 1979). آزمون پتیت بر اساس رتبه‌ها عمل می‌کند و به توزیع داده‌ها حساس نیست. این ویژگی آن را برای داده‌های غیرنرمال یا دارای چولگی مناسب می‌سازد. همچنین از آنجا که پتیت از رتبه‌ها استفاده می‌کند، نسبت به داده‌های پرت مقاوم‌تر است.

۲.۳. روش‌های ارزیابی توزیع‌های آماری

در این مطالعه تغییرات بارش زمستانه در دو مرحله یا استفاده از توزیع‌های آماری بررسی شده است. بدین صورت که در ابتدا متناسب با زمان تغییر روند دو زیربازه قبل و بعد از زمان تغییر روند در نظر گرفته شد. در نهایت با استفاده از توزیع‌های آماری مختلف و متناسب با داده‌های دو زیربازه، توزیع متناسب بر اساس آزمون کلموگروف اسمیرنف انتخاب گردید. آماره آزمون کلموگروف-اسمیرنف با توزیع $F(x)$ به صورت زیر می‌باشد:

$$D_n = \sup_x |\hat{F}_n(x) - F(x)| \quad (5)$$

منظور از $D_n = \sup_x |\hat{F}_n(x) - F(x)|$ ، پیدا کردن کوچک‌ترین کرانه بالا برای فاصله بین دو توزیع واقعی روی همه مقادارها است (برگر و ژو، ۲۰۱۴).

۳. نتایج و بحث

در این مطالعه در گام اول به بررسی تغییرات بارش زمستان در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آماری ۱۹۷۵-۲۰۲۴ با استفاده از آزمون من-کندال اصلاح شده پرداخته شد. شیب خط روند نیز مورد بررسی قرار گرفته که نتایج به صورت جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد. در این جدول نتایج حاصل از بررسی زمان تغییر روند نیز ارائه شده است.

Table 2. The results of the trend, slope of trend line, and change point of precipitation at selected stations

Station	St. No	Change Point	MK p_value	Sen Slope
Takht Dareh	1	1988	0.039	-2.350
Kazemabad	2	1980	0.462	-0.842
Keshvar	3	2007	0.026	-3.204
Borujerd	4	2016	0.821	0.203
Cham sabzeh	5	1983	0.913	0.140
Doroud	6	1994	0.036	-2.188
Marvak	7	2016	0.821	-0.130
Vanaee	8	1982	0.558	-0.769
Kamandan	9	1978	0.854	0.207
Ab Barik	10	1993	0.098	-1.095
Chamchit	11	2006	0.002	-2.313
Sekan	12	2006	0.040	-2.845
Harmale	13	2006	0.022	-1.338
Haft tapeh	14	2006	0.020	-1.385
Dezful	15	1999	0.432	-0.766

Talezang	16	2006	0.010	-4.235
Dez Dam	17	2006	0.427	-1.000
Tang Pang Bakhtiari	18	1999	0.019	-5.500

با توجه به جدول ۲ نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات مقادیر بارش زمستان در ایستگاه‌های مختلف نشان داد که از بین ایستگاه‌های مورد بررسی و بر اساس p-value آماره من-کندال، روند تغییرات ریزش‌های زمستانی در ایستگاه‌های تخت دره، کشور، دورود، چم چیت، سکانه، حرمله، هفت تپه، تله زنگ و تنگ پنج بختیاری در سطح ۵ درصد معنی‌دار و کاهش می‌باشد که ۵۰ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه را شامل می‌شود.

نتایج ارائه شده نشان‌دهنده الگوی نگران‌کننده‌ای از تغییرات هیدرولوژیکی در حوضه‌های مورد مطالعه است که نیازمند بررسی عمیق و تحلیل همه‌جانبه می‌باشد. در میان ۱۸ ایستگاه مورد بررسی، ۱۵ ایستگاه کاهش در مقادیر بارش زمستانه را تجربه کرده که ۹ مورد آن معنی‌دار می‌باشد و این امر حاکی از تغییرات اساسی در رژیم هیدرولوژیکی منطقه است. روند تغییرات مقادیر بارش زمستانه نیز مطابق با شیب خط روند در ایستگاه‌های کمندان، بروجرد و چم سبزه افزایش ولی غیرمعنی‌دار (بر اساس p-value) می‌باشند.

بر اساس آماره شیب خط روند (Sen^۲)، کاهش شدید بارش زمستانه (کاهش بیش از ۳ میلی‌متر در سال) به ترتیب در ایستگاه‌های تنگ پنج بختیاری (۵/۵- میلی‌متر در سال)، تله زنگ (۴/۲۴- میلی‌متر در سال) و کشور (۳/۲- میلی‌متر در سال) اتفاق افتاده است که با توجه به دوره آماری مورد مطالعه به بیش از ۱۵۰ میلی‌متر کاهش (به ترتیب ۲۷۵، ۲۱۱ و ۱۶۰ میلی‌متر کاهش) در دوره آماری ۲۰۲۴-۱۹۷۵ میرسد. چنین شیب‌های تندی نشان‌دهنده تغییرات شدید در بارش‌ها و در پی آن منابع آب سطحی است که می‌تواند پیامدهای جدی برای اکوسیستم‌های آبی، کشاورزی و تأمین آب شرب داشته باشد. نتایج ارائه شده نشان‌دهنده الگوی پیچیده و نگران‌کننده‌ای از تغییرات بارش زمستانه در منطقه مورد مطالعه است. بارش زمستانه به‌عنوان حیاتی‌ترین منبع تأمین آب در بسیاری از حوضه‌های ایران محسوب می‌شود، چرا که این بارش‌ها منبع اصلی تغذیه آبخوان‌ها، ذخیره برفی و جریان پایه رودخانه‌ها در فصل خشک هستند. این میزان کاهش برای بارش زمستانه بسیار قابل توجه و هشداردهنده است، چرا که حتی کاهش کوچکی در بارش زمستانه می‌تواند تأثیرات نامتناسبی بر منابع آب منطقه داشته باشد.

ایستگاه‌های دارای کاهش متوسط بارش زمستانه را نیز می‌توان با شیب خط روند بین ۳- تا ۱/۵- نشان داد که ایستگاه‌های چم چیت، دورود، تخت دره و سکانه با مقادیر شیب خط روند به ترتیب ۲/۳-، ۲/۱۸-، ۲/۳۵- و ۲/۸۴- میلی‌متر در سال را شامل می‌شود. بر اساس شیب خط روند، ایستگاه‌های کاظم‌آباد، مروک، ونایی آب باریک، هفت تپه، حرمله، سد تنظیمی دزفول و سد دز با شیب خط روند بین ۱/۵- تا صفر به‌عنوان ایستگاه‌های دارای کاهش ملایم در بارش زمستانه معرفی می‌شوند.

سال تغییر روند در این ایستگاه‌ها عمدتاً در دو مقطع زمانی متمرکز شده است: دوره اول حدود سال ۱۹۹۰ و دوره دوم حدود سال ۲۰۰۶. این تمرکز زمانی نشان‌دهنده آن است که عوامل بزرگ‌مقیاس اقلیمی احتمالاً محرک اصلی این تغییرات بوده‌اند. سال ۲۰۰۶ به عنوان نقطه عطف حائز اهمیت است، چرا که همزمانی تغییر روند در شش ایستگاه مختلف نشان‌دهنده یک تغییر ناگهانی در الگوهای گردش جوی حاکم بر منطقه است. این تغییر بسیار محتمل ناشی از تغییر در رفتار سامانه‌های فشار مانند تغییر در مکان و شدت سامانه پرفشار سیبری، تغییر در مسیر سامانه‌های مدیترانه‌ای و یا تغییر در الگوهای نوسانات اقلیمی مانند نوسان اطلس شمالی (NAO) باشد. ایستگاه‌هایی که کاهش معناداری نشان نمی‌دهند، مانند بروجرد، چم سبزه و کمندان احتمالاً تحت تأثیر عوامل محلی هستند که کمتر تحت تأثیر تغییرات الگوهای بزرگ‌مقیاس قرار گرفته‌اند.

همخوانی این نتایج با مطالعات بین‌المللی قابل توجه است. گزارش‌های IPCC کاملاً کاهش ریزش‌های زمستانی در منطقه مدیترانه و خاورمیانه را پیش‌بینی کرده‌اند (IPCC, 2020). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که تغییرات در الگوهای نوسانات اقلیمی مانند NAO و تغییر در مسیر طوفان‌های مدیترانه‌ای نقش مهمی در کاهش بارش زمستانه منطقه داشته‌اند. همچنین، گرمایش جهانی با تغییر در گرادیان دمایی بین عرض‌های جغرافیایی مختلف، می‌تواند بر الگوهای بارش زمستانه تأثیر گذاشته باشد.

پیامدهای کاهش بارش زمستانه برای منطقه بسیار جدی است. این کاهش می‌تواند منجر به کاهش تغذیه آبخوان‌ها، کاهش ذخیره برفی، کاهش جریان پایه رودخانه‌ها در فصل خشک و در نهایت کاهش دسترسی به آب برای مصارف مختلف شود. همچنین، کاهش بارش زمستانه می‌تواند بر اکوسیستم‌های وابسته به آب، کشاورزی دیم و حتی میکرو اقلیم‌های منطقه تأثیر بگذارد.

این نتایج بر ضرورت اتخاذ راهبردهای سازگاری تأکید می‌کنند. مدیریت یکپارچه منابع آب، توسعه سیستم‌های جمع‌آوری و ذخیره آب باران، بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی و توسعه ارقام مقاوم به خشکی از جمله اقدامات ضروری هستند. همچنین، ادامه پایش و تحقیقات علمی برای درک بهتر مکانیسم‌های تغییر بارش زمستانه و پیش‌بینی روندهای آینده ضروری به نظر می‌رسد.

یافته‌های حاضر که نشان‌دهنده کاهش معنادار بارش زمستانه در بیش از ۵۰٪ ایستگاه‌های مورد مطالعه است، به طور قابل توجهی با مطالعات سایر محققان در منطقه خاورمیانه و ایران همخوانی دارد (Modarres and Sarhadi, 2011; Nazeri Tahroudi *et al.*, 2016; Darand *et al.*, 2017). مطالعه حاضر نشان می‌دهد که کاهش بارش زمستانه در ایران نه تنها یک پدیده محلی، بلکه بخشی از یک الگوی بزرگ‌مقیاس اقلیمی است. یافته‌های Tabari and Talaee (2011) نشان داد که کاهش بارش زمستانه در غرب و شمال غرب ایران از دهه ۱۹۹۰ تشدید شده است که با نتایج حاضر همخوانی کامل دارد. همچنین، مطالعات Raziei *et al.* (2020) بر نقش تغییرات در الگوهایی مانند NAO و NCP^۴ در کاهش بارش زمستانه ایران تأکید کرده‌اند. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که تغییرات مشاهده‌شده در مطالعه حاضر ناشی از تغییر در این الگوهای بزرگ‌مقیاس است. نتایج حاضر از این نظر حائز اهمیت است که نه تنها وجود روند کاهشی را نشان

می‌دهد، بلکه زمان‌بندی و بزرگی تغییرات را نیز ارائه می‌کند. این اطلاعات برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی آینده و تدوین راهبردهای سازگاری بسیار ارزشمند است. در مجموع، یافته‌های حاضر نه تنها تأییدی بر مطالعات پیشین است، بلکه با ارائه جزئیات زمانی و مکانی دقیق‌تر، به درک بهتری از دینامیک تغییرات بارش زمستانه در منطقه کمک می‌کند.

با توجه به پراکندگی ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱، می‌توان تغییرات افزایشی بارش را در ایستگاه‌های شمال غرب منطقه مورد مطالعه مشاهده کرد که البته معنی‌دار نبوده و افزایش کمتر از ۰/۲۱ میلی‌متر در سال را داشته‌اند. روند تغییرات کاهش‌ی معنی‌دار اغلب در نواحی مرکزی و به خصوص نواحی جنوبی منطقه مورد مطالعه تمرکز دارد.

در گام بعدی، با توجه به زمان تغییر روند در داده‌های بارش در ایستگاه‌های مختلف، دوره آماری ۵۰ ساله به دو دوره قبل و بعد از زمان تغییر روند تقسیم شد. با تقسیم دوره آماری به دو زیر بازه مبتنی بر زمان تغییر روند، توزیع آماری داده‌های قبل و بعد از زمان تغییر روند مورد بررسی قرار گرفته و بر اساس آماره کلموگروف-اسمیرنوف، توزیع متناسب انتخاب شد. نتایج بررسی توزیع‌های آماری در زیربازه‌های مورد بررسی به همراه تغییرات پارامترهای میانگین، واریانس، چولگی، چارک‌های ۵ و ۹۵ درصد به صورت جدول ۳ ارائه شد.

Table 3. Changes in the statistical characteristics of the data along with their statistical distribution in two sub-intervals before and after the change point

Station	Mean Change (mm)	Distribution Before change point	Distribution After change point	Variance Percent Change (%)	Skewness Percent Change (%)	Q95 (95th Percentile) Percent Change (%)	Q5 (5th percentile) Percent Change (%)
Takht Dareh	-120.173	log-normal	log-normal	-50.7	-13.26	-25.2	-38.24
Kazemabad	-80.28	gamma	log-normal	-9.95	206.62	-5.93	-39.8
Keshvar	-121.944	weibull	log-normal	28.85	621	-6.9	-42.07
Borujerd	37.86043	log-normal	weibull	-13.14	-109.45	-10.03	42.9
Cham sabzeh	-67.9702	weibull	log-normal	-10.75	-469.25	-2.67	-23.24
Doroud	-77.8591	weibull	log-normal	-27.56	581.3	-16.94	-17.05
Marvak	38.46694	gamma	weibull	-35.77	-161.56	0.33	49.8
Vanaee	-115.35	weibull	log-normal	43.48	-353.61	-1.9	-53.14
Kamandan	-144.826	log-normal	gamma	-42.32	-8.13	-19.94	-59.9
Ab Barik	-50.2601	weibull	log-normal	32.15	-669.06	-2.43	-51.64
Chamchit	-61.3226	log-normal	log-normal	4.23	39.39	-6.39	-43.51
Sekan	-140.789	weibull	log-normal	-78.48	50.23	-44.94	-0.45
Harmale	-40.9805	gamma	gamma	-49.06	-20.05	-34.09	-13.01
Haft tapeh	-39.1412	log-normal	weibull	34.99	31.37	-16.86	-47.25
Dezful	-46.9042	weibull	weibull	-39.4	0.86	-10.2	-8.12
Talezang	-135.296	gamma	gamma	7.92	55.84	-10.16	-48.12
Dez Dam	-49.1937	gamma	weibull	22.45	30.96	-10.86	-32.92

Tang Pang Bakhtiari	-167.548	gamma	gamma	-4.37	29.04	-18.93	-48.12
------------------------	----------	-------	-------	-------	-------	--------	--------

نتایج ارائه شده در جدول ۲، تغییرات قابل توجهی را در الگوهای ریزش‌های زمستانی بین دو زیربازه زمانی نشان می‌دهد که حاکی از تحولات مهم اقلیمی در منطقه است. کاهش میانگین بارش در اکثر ایستگاه‌ها بسیار محسوس است، به طوری که ایستگاه تنگ پنج بختیاری واقع در جنوب منطقه مورد مطالعه با کاهش ۱۶۷/۵ میلی‌متری بیشترین کاهش را در زیربازه بعد از زمان تغییر روند تجربه کرده است. این میزان کاهش برای بارش زمستانه که منبع اصلی تأمین آب در بسیاری از حوضه‌ها محسوب می‌شود، بسیار نگران‌کننده است و می‌تواند پیامدهای جدی برای منابع آب منطقه داشته باشد. ایستگاه‌های تله زنگ، سکانه و کمندان نیز در رتبه دوم از نظر کاهش بارش در زیربازه بعد از زمان تغییر روند نسبت به زیربازه بعد از زمان تغییر روند قرار دارند که کاهش بین ۱۳۵ تا ۱۴۵ میلی‌متر را شامل می‌شوند. تغییرات افزایشی بارش در زیربازه دوم (بعد از زمان تغییر روند) نسبت به زیربازه اول (قبل از زمان تغییر روند) تنها در دو ایستگاه بروجرد و مروک با تغییرات ۳۷/۸ و ۳۸/۴ میلی‌متر مشاهده شد.

با توجه به نتایج ارائه در جدول ۲ مشاهده می‌شود که توزیع آماری ریزش‌های زمستانی در ایستگاه‌های تخت دره، چم چیت، حرمله، سد تنظیمی، تله زنگ و تنگ پنج بختیاری در دو زیربازه قبل و بعد از زمان تغییر روند ثابت بوده و به ترتیب لاگ-نرمال، لاگ-نرمال، گاما، ویبل، گاما و گاما می‌باشد.

تغییر در توزیع آماری داده‌ها از جنبه‌های مهم این مطالعه است. در بسیاری از ایستگاه‌ها، تغییر از توزیع گاما یا ویبل به توزیع لاگ-نرمال مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تغییر در ویژگی‌های آماری بارش است. این تغییر توزیع احتمالاً ناشی از تغییر در الگوهای بارشی و افزایش فراوانی دوره‌های خشک است. به‌عنوان مثال، در ایستگاه کشور تغییر از توزیع ویبل به لاگ-نرمال همراه با افزایش ۶۲۱ درصدی ضریب چولگی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده افزایش شدید عدم تقارن در توزیع داده‌ها و احتمالاً افزایش فراوانی بارش‌های حدی است.

بارش زمستانه در ایستگاه تخت دره (شمال حوضه) با حفظ توزیع لاگ-نرمال در هر دو دوره، کاهش قابل توجهی را در تمامی شاخص‌ها نشان می‌دهد. کاهش واریانس به میزان ۵۰/۷ درصد حاکی از یکنواخت‌تر شدن الگوی بارش است، در حالی که کاهش ضریب چولگی به میزان ۱۳/۲۶ درصد نشان‌دهنده کاهش عدم تقارن در توزیع داده‌ها می‌باشد. کاهش بیشتر در صدک پنجم (۳۸/۲۴-) نسبت به صدک نود و پنجم (۲۵/۲-) حاکی از تأثیرپذیری شدیدتر مقادیر حداقل بارش است که می‌تواند نشان‌دهنده طولانی‌تر شدن دوره‌های خشک باشد.

در ایستگاه کاظم آباد (شرق حوضه) تغییر توزیع از گاما به لاگ-نرمال همراه با افزایش چشمگیر ضریب چولگی به میزان ۲۰۶/۶۲ درصد بوده است که نشان‌دهنده افزایش شدید عدم تقارن در توزیع بارش است. کاهش ملایم واریانس (۹/۹۵-) همراه با کاهش شدید صدک پنجم (۳۹/۸-) در مقابل کاهش کم صدک نود و پنجم (۵/۹۳-) حاکی از آن است که اگرچه بارش‌های حدی کمتر تحت تأثیر قرار گرفته‌اند، اما دوره‌های خشک به طور معناداری شدیدتر شده‌اند.

در ایستگاه کشور (غرب حوضه) تغییر توزیع از ویبل به لاگ-نرمال با افزایش بسیار شدید ضریب چولگی به میزان ۶۲۱ درصد همراه بوده که نشان‌دهنده تغییر در الگوی بارش است. افزایش واریانس (۲۸/۸۵٪) همراه با کاهش بیشتر در صدک پنجم (۴۲/۰۷-) نسبت به صدک نود و پنجم (۶/۹-) حاکی از افزایش تغییرپذیری بارش و تأثیرپذیری شدید مقادیر حداقل است.

تغییر توزیع از لاگ-نرمال به ویبل در ایستگاه بروجرد (شمال غربی حوضه) با کاهش ضریب چولگی به میزان ۱۰۹/۴۵ درصد همراه بوده است. کاهش کم واریانس (۱۳/۱۴-) و کاهش صدک نود و پنجم (۱۰/۰۳-) در مقابل افزایش صدک پنجم (۴۲/۹) نشان‌دهنده بهبود شرایط بارش‌های حداقل و کاهش نسبی بارش‌های حدی است که می‌تواند حاکی از تعدیل الگوی بارش در این ایستگاه باشد. در ایستگاه چم‌سبزه (شمال غربی حوضه) تغییر توزیع از ویبل به لاگ-نرمال با کاهش شدید ضریب چولگی به میزان ۴۶۹/۲۵ درصد همراه بوده است. کاهش نسبی واریانس (۱۰/۷۵-) و کاهش بیشتر در صدک پنجم (۲۳/۲۴-) نسبت به صدک نود و پنجم (۲/۶۷-) نشان‌دهنده تأثیرپذیری مقادیر حداقل بارش و کاهش کلی تغییرپذیری داده‌ها است. تغییر توزیع از ویبل به لاگ-نرمال در ایستگاه دورود (شمال شرق حوضه) با افزایش بسیار شدید ضریب چولگی به میزان ۵۸۱/۳ درصد همراه بوده است. کاهش واریانس همراه با کاهش نسبی در هر دو صدک پنجم و نود و پنجم نشان‌دهنده کاهش کلی بارش اما با افزایش عدم تقارن در توزیع داده‌ها است.

در ایستگاه مروک (شمال شرق حوضه) تغییر توزیع از گاما به ویبل با کاهش شدید ضریب چولگی به میزان ۱۶۱/۵۶ درصد همراه بوده است. کاهش قابل توجه واریانس و افزایش صدک پنجم در مقابل تغییر ناچیز صدک نود و پنجم حاکی از بهبود شرایط بارش‌های حداقل و کاهش کلی تغییرپذیری داده‌ها است. در ایستگاه ونایی (شمال شرق و بالادست حوضه) تغییر توزیع از ویبل به لاگ-نرمال با کاهش شدید ضریب چولگی به میزان ۳۵۳/۶۱ درصد همراه بوده است. افزایش واریانس (۴۳/۴۸٪) و کاهش بسیار شدید صدک پنجم (۵۳/۱۴-) در مقابل کاهش کم صدک نود و پنجم نشان‌دهنده افزایش تغییرپذیری و تأثیرپذیری شدید مقادیر حداقل بارش است. در ایستگاه کمندان (نیمه شمالی حوضه) تغییر توزیع از لاگ-نرمال به گاما با کاهش کم ضریب چولگی همراه بوده است. کاهش قابل توجه واریانس (۴۲/۳۲-) و کاهش بسیار شدید صدک پنجم (۵۹/۹-) در مقابل کاهش کم صدک نود و پنجم (۱۹/۹۴-) حاکی از تأثیرپذیری شدید مقادیر حداقل بارش و کاهش کلی تغییرپذیری داده‌ها است.

تغییر توزیع از ویبل به لاگ-نرمال در ایستگاه آب باریک (شرقی‌ترین ایستگاه) با کاهش بسیار شدید ضریب چولگی به میزان ۶۶۹/۰۶ درصد همراه بوده است. افزایش واریانس و کاهش شدید صدک پنجم در مقابل کاهش کم صدک نود و پنجم نشان‌دهنده افزایش تغییرپذیری و تأثیرپذیری شدید مقادیر حداقل بارش است. در ایستگاه چم‌چیت (شمال حوضه) حفظ توزیع لاگ-نرمال در این ایستگاه با افزایش نسبی ضریب چولگی همراه بوده است. تغییر ناچیز واریانس و کاهش بیشتر در صدک پنجم نسبت به صدک نود و پنجم حاکی از تأثیرپذیری مقادیر حداقل بارش است.

در ایستگاه سکان واقع در شرق حوضه آبریز دز، تغییر توزیع از ویبل به لاگ-نرمال با افزایش ۵۰ درصدی ضریب چولگی همراه بوده است. کاهش بسیار شدید واریانس (۷۸/۴۸-) و کاهش شدید صدک نود و پنجم (۴۴/۹۴-) در مقابل تغییر ناچیز صدک پنجم نشان‌دهنده کاهش چشمگیر بارش‌های حدی و کاهش کلی تغییرپذیری داده‌ها است.

در ایستگاه‌های مرکزی حوضه آبریز دز، ایستگاه‌های تله زنگ و تنگ پنج بختیاری، حفظ توزیع گاما با افزایش ضریب چولگی همراه بوده است. کاهش بیشتر در صدک پنجم نسبت به صدک نود و پنجم حاکی از افزایش تغییرپذیری و تأثیرپذیری شدید مقادیر حداقل بارش است.

در ایستگاه حرمله (جنوبی‌ترین ایستگاه مورد مطالعه) حفظ توزیع گاما در این ایستگاه با کاهش قابل توجه واریانس و کاهش بیشتر در صدک نود و پنجم نسبت به صدک پنجم حاکی از کاهش بارش‌های حدی و کاهش کلی تغییرپذیری داده‌ها است. در ایستگاه‌های جنوبی حوضه آبریز دز، ایستگاه هفت تپه و سد دز دچار تغییر در توزیع آماری داده‌های بارش زمستانه به ترتیب از لاگ-نرمال به ویبل و از گاما به ویبل با افزایش ضریب چولگی همراه بوده است. در ایستگاه سد تنظیمی دزفول واقع در مناطق جنوب حوضه آبریز مورد مطالعه حفظ توزیع ویبل با تغییر ناچیز ضریب چولگی همراه بوده است. کاهش واریانس و کاهش کم در هر دو صدک پنجم و نود و پنجم نشان‌دهنده کاهش کلی بارش با حفظ الگوی توزیع قبلی است.

تحلیل منطقه‌ای تغییرات بارش زمستانه در حوضه آبریز مورد مطالعه نشان می‌دهد که کاهش بارش به طور ناهمگون در زیرحوضه‌ها توزیع شده است، به طوری که مناطق شمالی و شرقی (مانند تخت دره، کاظم آباد و کشور) با کاهش شدید بارش‌های حداقلی و افزایش نوسانات مواجه شده‌اند که منجر به طولانی‌تر شدن دوره‌های خشک شده است. در مقابل، مناطق شمال غربی (بروجرد و چم‌سبزه) وضعیت نسبتاً بهتری داشته و حتی بهبود جزئی در بارش‌های حداقلی مشاهده شده است. مناطق مرکزی و جنوبی حوضه (کمندان، آب باریک و حرمله) کاهش قابل توجهی در بارش‌های حدی و تغییرپذیری کلی نشان می‌دهند که احتمالاً ناشی از ترکیب اثرات تغییر اقلیم و عوامل محلی است. این الگوی ناهمگون کاهش بارش می‌تواند مدیریت یکپارچه منابع آب را با چالش‌های جدی مواجه کند.

تغییرات در واریانس داده‌ها نیز الگوی جالبی را نشان می‌دهد. در برخی ایستگاه‌ها مانند سکانه کاهش $78/48$ درصدی واریانس مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده یکنواخت‌تر شدن الگوی بارش و کاهش تغییرپذیری بین سالی است. این پدیده می‌تواند ناشی از تغییر در الگوهای گردش جوی و تضعیف سامانه‌های بارشی منطقه باشد. از سوی دیگر، در ایستگاه‌هایی مانند ونایی افزایش $43/48$ درصدی واریانس دیده می‌شود که حاکی از افزایش تغییرپذیری و عدم قطعیت در الگوی بارش است. تغییرات در صدک‌های مختلف نیز اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهد. کاهش بیشتر در صدک پنجم نسبت به صدک نود و پنجم در بسیاری از ایستگاه‌ها (مانند ایستگاه کمندان با کاهش $59/9$ درصدی در Q5 در مقابل کاهش $19/94$ درصدی در Q95) نشان‌دهنده این است که خشکسالی‌ها شدیدتر از ترسالی‌ها تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. این الگو حاکی از آن است که دوره‌های خشک طولانی‌تر و شدیدتر شده‌اند در حالی که بارش‌های حدی کمتر کاهش یافته‌اند.

از دیدگاه اقلیمی، این تغییرات ناشی از ترکیبی از عوامل مختلف است. تغییر در الگوهای پیوند از دور مانند نوسان اطلس شمالی (NAO) و نوسان مدیترانه‌ای (MO) می‌تواند بر مسیر سامانه‌های بارشی تأثیر گذاشته باشد. همچنین، گرمایش جهانی ممکن است با تغییر در گرادیان دمایی و الگوهای باد، بر توزیع مکانی و زمانی بارش تأثیر گذاشته باشد. تغییر در پوشش برف و یخ در مناطق بالادست نیز می‌تواند بر خرد اقلیم‌های منطقه تأثیر گذاشته و الگوی بارش را تغییر دهد (ناظری تهرودی، ۲۰۲۵). پیامدهای این تغییرات برای منطقه بسیار جدی است. کاهش بارش زمستانه به معنای کاهش تغذیه آبخوان‌ها، کاهش ذخیره برفی و کاهش جریان پایه رودخانه‌ها در فصل بهار و تابستان است. این موضوع می‌تواند بر امنیت آبی منطقه، کشاورزی، تولید برق آبی و اکوسیستم‌های آبی تأثیر منفی بگذارد. همچنین، افزایش تغییرپذیری بارش می‌تواند مدیریت منابع آب را با چالش‌های جدی مواجه کند. نمودار تغییرات توزیع‌های آماری بارش زمستانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز به صورت پیوست الف قابل مشاهده می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

این تحقیق به صورت جامع و چندبعدی به تحلیل روند تغییرات بارش زمستانه در حوضه‌های آبریز مهم ایران پرداخته و یافته‌های آن حاکی از یک دگرگونی نگران‌کننده و عمیق در رژیم هیدرولوژیکی منطقه است. در بعد اول، تحلیل روند با آزمون من-کندال کاهش آماری معنادار بارش را در ۵۰ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه (۹ ایستگاه از ۱۸ ایستگاه) تأیید می‌کند. این کاهش تنها یک تغییر آماری محض نیست، بلکه از نظر مقدار فیزیکی نیز بسیار قابل توجه است. محاسبه شیب سن نشان می‌دهد که ایستگاه‌هایی مانند تنگ پنج بختیاری (با کاهش ۵.۵ میلی‌متر در سال)، تله‌زنگ ($4/24$ میلی‌متر در سال) و کشور ($3/2$ میلی‌متر در سال) با کاهشی انباشتی بیش از ۱۵۰ میلی‌متر در طول دوره ۵۰ ساله مواجه شده‌اند. این حجم از کاهش برای بارش زمستانه که اصلی‌ترین منبع تغذیه آبخوان‌ها، ذخایر

برفی و جریان پایه رودخانه‌هاست، به طور مستقیم امنیت آبی منطقه را به مخاطره می‌اندازد. کاهش بارش زمستانه به‌طور مستقیم بر حجم آب ورودی به مخازن سدها تاثیر می‌گذارد. این امر نه تنها تولید برق آبی را کاهش می‌دهد، بلکه تأمین آب شرب و صنعت را برای کلان‌شهرهای پایین‌دست با چالش مواجه می‌سازد. همچنین، کاهش جریان پایه رودخانه‌ها، کشاورزی آبی در دشت‌های وسیع پایین دست را با بحران مواجه خواهد کرد.

در بعد دوم، این مطالعه با نگاهی نوآورانه به تحلیل تغییرات در توزیع‌های آماری و پارامترهای مربوطه پرداخته است. این تحلیل نشان می‌دهد که تغییرات فراتر از کاهش میانگین بوده و به «ویژگی‌های آماری» بارش نیز رسوخ کرده است. تغییر نوع توزیع در بسیاری از ایستگاه‌ها (مانند تغییر از توزیع ویبل به لاگ-نرمال در ایستگاه کشور) همراه با تغییرات چشمگیر در شاخص‌هایی مانند واریانس و به‌ویژه ضریب چولگی (افزایشی تا ۶۲۱ درصد)، گویای یک تحول کیفی است. این تغییرات نشان می‌دهد که نه تنها مقدار بارش کاهش یافته، بلکه «الگوی وقوع» آن نیز دگرگون شده است. کاهش بیشتر در صدک پنجم (Q5) نسبت به صدک نود و پنجم (Q95) در اکثر ایستگاه‌ها (مانند ایستگاه کمندان با کاهش ۵۹/۹ درصدی در Q5 در مقابل کاهش ۱۹/۹۴ درصدی در Q95) به وضوح ثابت می‌کند که دوره‌های خشک و کم‌بارش، بسیار شدیدتر و طولانی‌تر از گذشته شده‌اند. به عبارت دیگر، خشکسالی‌ها نسبت به ترسالی‌ها با شدت بسیار بیشتری تحت تأثیر قرار گرفته‌اند.

در بعد سوم، تمرکز زمانی تغییر روند در دو مقطع حدود سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۶، به‌ویژه همزمانی تغییر در شش ایستگاه در سال ۲۰۰۶، به وضوح تأثیر قوی و تعیین‌کننده «عوامل بزرگ‌مقیاس اقلیمی» دارد. این نتایج، تغییرات مشاهده‌شده در مقیاس محلی را به تحولات جهانی پیوند می‌زند و همخوانی کاملی با پیش‌بینی‌های گزارش‌های IPCC درباره کاهش بارش در خاورمیانه و نیز یافته‌های مطالعاتی که بر نقش نوساناتی مانند NAO و تغییر مسیر سامانه‌های مدیترانه‌ای تأکید دارند، نشان می‌دهد. در بعد چهارم، تحلیل مکانی، الگویی ناهمگون و پیچیده را آشکار می‌سازد. به طور کلی، مناطق مرکزی و جنوبی حوضه‌ها (مانند تله‌زنگ و تنگ پنج) با شدیدترین کاهش‌ها مواجه شده‌اند، در حالی که مناطق شمال غربی (بروجرد و چم‌سبزه) حتی بهبود جزئی در بارش‌های حداقلی را نشان داده‌اند. این ناهمگونی، مدیریت یکپارچه منابع آب را با چالش‌های مضاعفی روبرو می‌کند.

در مجموع، این مطالعه تنها به ثبت یک روند کاهشی بسنده نکرده، بلکه با ارائه تحلیل‌های عمیق آماری، ابعاد کیفی، زمانی، مکانی و علی این تغییرات را روشن ساخته است. پیامدهای این یافته‌ها برای امنیت آبی، کشاورزی (به‌ویژه کشاورزی دیم)، اکوسیستم‌های آبی و ثبات اجتماعی-اقتصادی منطقه بسیار جدی است. بنابراین، نتایج این تحقیق بر ضرورت فوری گذار از «مدیریت بحران» به «مدیریت ریسک و سازگاری فعال» تأکید می‌کند. اجرای راهبردهایی مانند مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM)^۵، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های

جمع‌آوری و بازیابی آب (مانند آبخوان‌داری و سامانه‌های ذخیره‌سازی آب باران)، اصلاح الگوی کشت و توسعه ارقام مقاوم به خشکی، و تقویت سیستم‌های پایش و پیش‌آگاهی برای مواجهه با این چالش اجتناب‌ناپذیر است.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. Sen's slope
3. North Atlantic Oscillation
4. North Sea Caspian Pattern
5. Integrated Water Resources Management

۶. تعارض منافع

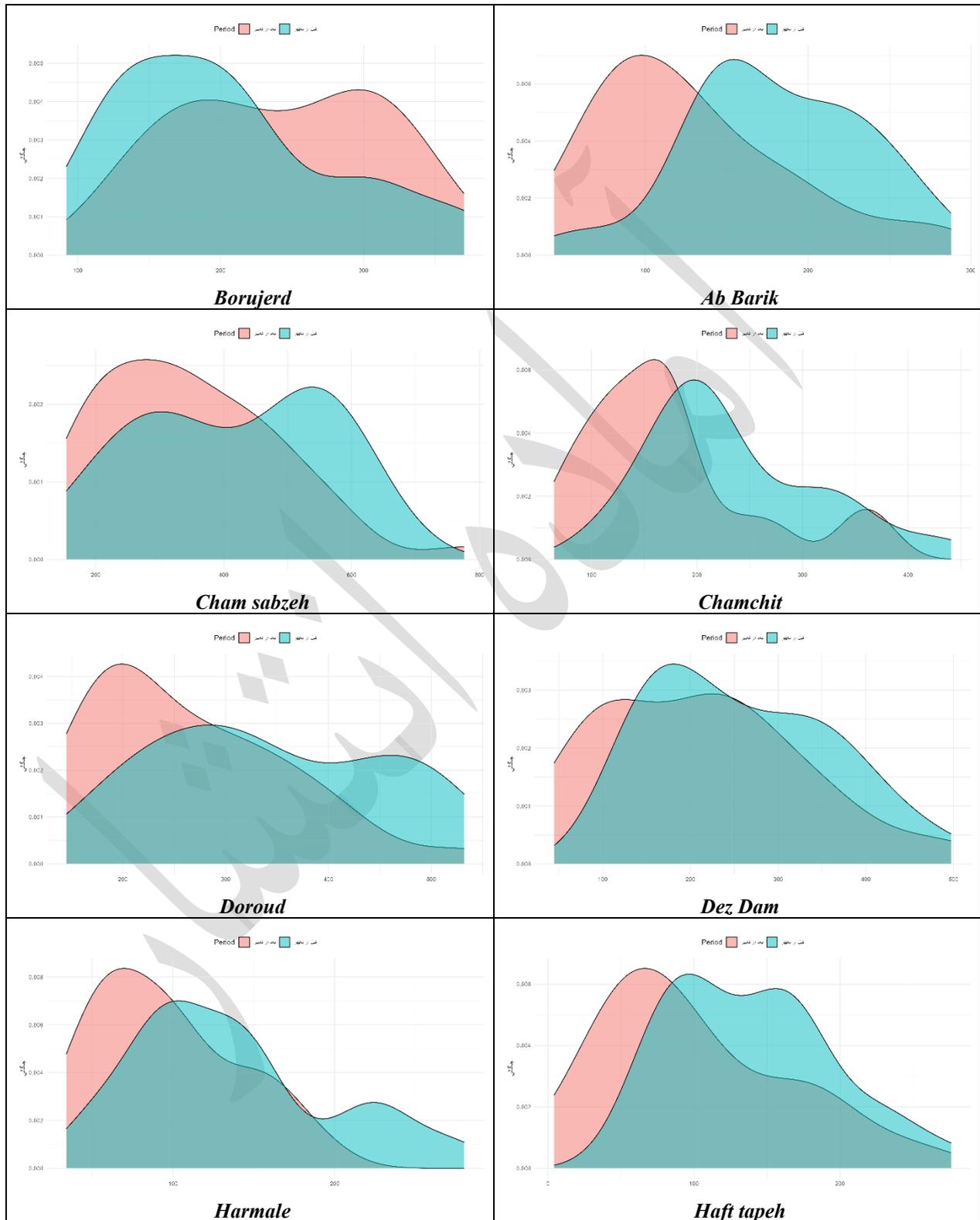
هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

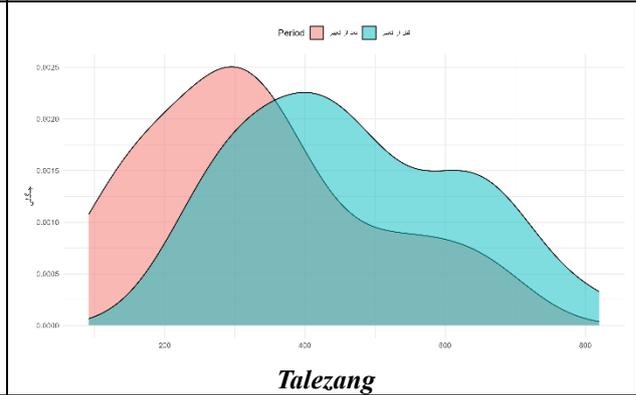
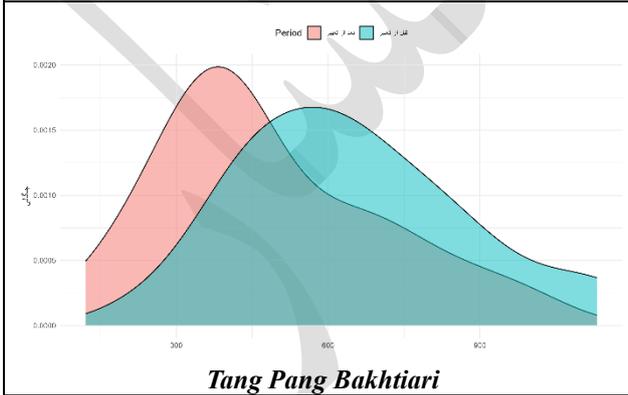
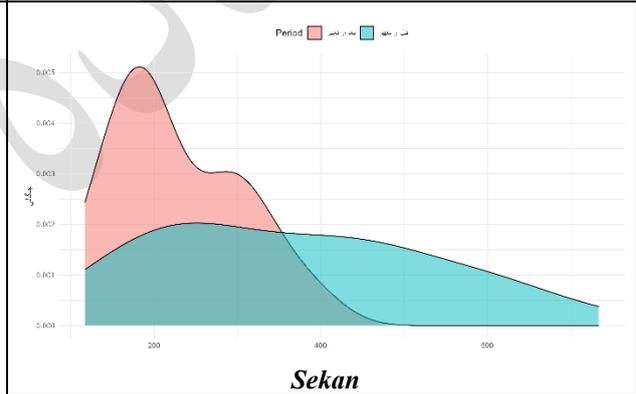
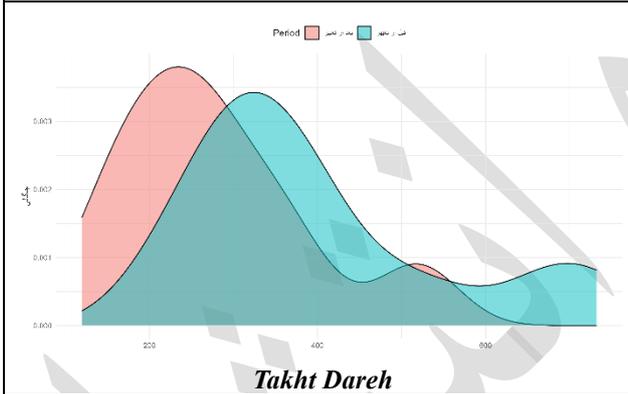
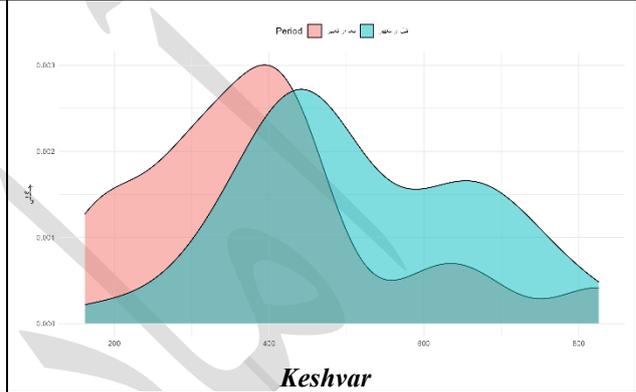
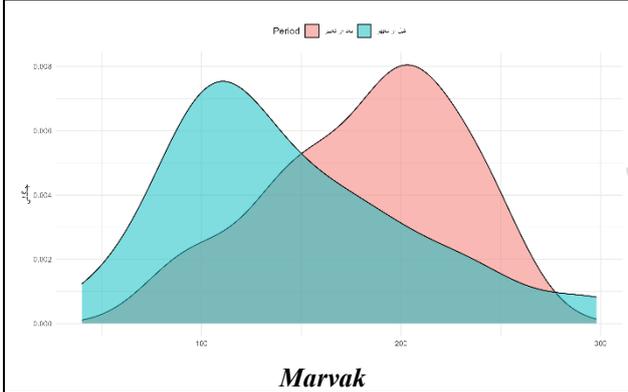
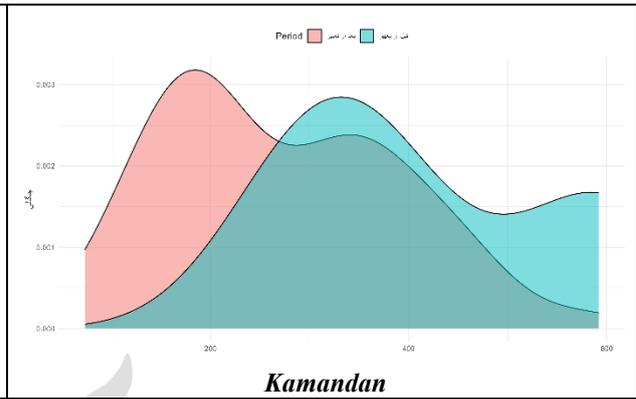
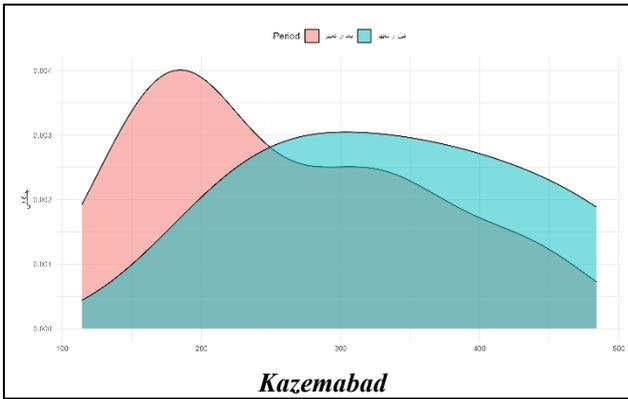
۷. منابع مورد استفاده

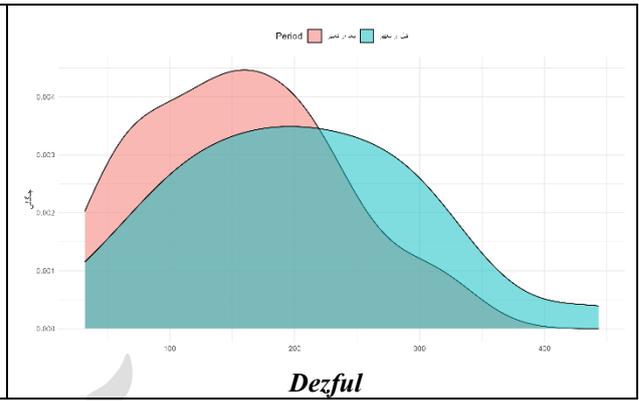
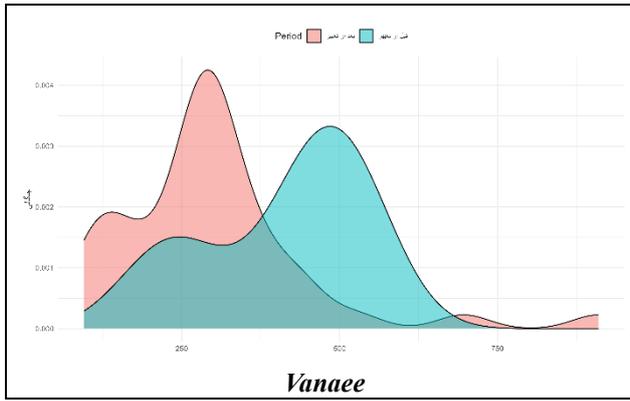
- Ahmadi, F., Nazeri Tahroudi, M., Mirabbasi, R., Khalili, K., & Jhajharia, D. (2018). Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran. *Meteorological Applications*, 25(2), 314-321. <https://doi.org/10.1002/met.1694>
- Ashouri, H., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., ... & Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(1), 69-83. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00068.1>
- Berger, V. W., & Zhou, Y. (2014). Kolmogorov-smirnov test: Overview. *Wiley statsref: Statistics reference online*. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat06558>
- Darand, M., Amanollahi, J., & Zandkarimi, S. (2017). Evaluation of the performance of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) estimation over Iran. *Atmospheric Research*, 190, 121-127. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.011>
- Fischer, G., Shah, M., N. Tubiello, F., & Van Velhuizen, H. (2005). Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2067-2083. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1744>
- Giorgi, Filippo, and Piero Lionello. "Climate change projections for the Mediterranean region." *Global and planetary change* 63, no. 2-3 (2008): 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Hawkins, E., & Sutton, R. (2011). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate dynamics*, 37(1), 407-418. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0810-6>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Kendall, M. G., & Stuart, A. (1963). *The advanced theory of statistics: in 3 volumes*. C. Griffin.
- Khalili, K., Tahoudi, M. N., Mirabbasi, R., & Ahmadi, F. (2016). Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 30(4), 1205-1221. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1095-4>
- Kumar, S., Merwade, V., Kam, J., & Thurner, K. (2009). Streamflow trends in Indiana: effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. *Journal of Hydrology*, 374(1-2), 171-183. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.012>

- Kundzewicz, Z. W., Kanai, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., ... & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Milly, P. C., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347-350. <https://doi.org/10.1038/nature04312>
- Modarres, R., & Sarhadi, A. (2011). Statistically-based regionalization of rainfall climates of Iran. *Global and Planetary Change*, 75(1-2), 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.10.009>
- Nazeri Tahroudi, M. (2025). Comprehensive global assessment of precipitation trend and pattern variability considering their distribution dynamics. *Scientific Reports*, 15(1), 22458. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06050-5>
- Nazeri Tahroudi, M., Khalili, K., & Ahmadi, F. (2016). Spatial and regional analysis of precipitation trend over Iran in the last half of century. *Water and Soil*, 30(2), 643-654. <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.39130>. In Persian
- Nicholson, S. E. (2013). The West African Sahel: A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability. *International Scholarly Research Notices*, 2013(1), 453521. <https://doi.org/10.1155/2013/453521>
- Papalexiou, S. M., & Montanari, A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resources Research*, 55(6), 4901-4914. <https://doi.org/10.1029/2018WR024067>
- Pettit, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied statistics*, 28(2), 126-135.
- Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., ... & Fang, J. (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311), 43-51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature communications*, 6(1), 5989. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>
- Raziei, T., Arasteh, P. D., & Saghafian, B. (2005, May). Annual rainfall trend in arid and semi-arid regions of Iran. In *ICID 21st European regional conference* (pp. 15-19).
- Salameh, A. A. (2024). Using the precipitation concentration index for characterizing the rainfall distribution in the Levant. *Journal of Water and Climate Change*, 15(4), 1945-1960. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.037>
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., & Ziese, M. (2016). GPCC full data reanalysis version 7.0: monthly land-surface precipitation from rain gauges built on GTS based and historic data.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.
- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific reports*, 10(1), 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- Tahroudi, MN., Khashei Siuki, A., & Ramezani, Y. (2019). Redesigning and monitoring groundwater quality and quantity networks by using the entropy theory. *Environmental monitoring and assessment*, 191(4), 250.-261.
- Thiel, H. (1950, February). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, Part 3. In *Proceedings of koninlijke nederlandse akademie van weinenschatpen a* (Vol. 53, pp. 1397-1412).
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., ... & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389-395. <https://doi.org/10.1038/416389a>
- Westra, S., Alexander, L. V., & Zwiers, F. W. (2013). Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of climate*, 26(11), 3904-3918. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- Yatagai, A., Kamiguchi, K., Arakawa, O., Hamada, A., Yasutomi, N., & Kitoh, A. (2012). APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(9), 1401-1415. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00122.1>

Changes in the fitted statistical distributions to winter precipitation values at the rain gauge stations within the Dez River Basin, before and after the change point.







آماده انتشار

Statistical Analysis of Winter Precipitation Values in the Dez River Basin

Mohammad Nazeri Tahroudi^{1*}

1. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: nazeri.mh@lu.ac.ir

ABSTRACT

This research investigates the variations in the distribution and quantity of winter precipitation at 18 stations located in the Dez River Basin, western Iran, during the period 1975-2024. The results from the modified Mann-Kendall test indicate that 50% of the stations (9 stations, including Takht Dareh, Keshvar, and Tang Pang Bakhtiari) have experienced a significant decreasing trend at the 5% level. According to the Sen's slope estimator, the most severe decreases (more than 3 mm per year) occurred at the Tang Pang Bakhtiari, Telezang, and Keshvar stations, which collectively led to a reduction of more than 150 mm over the study period. Temporal changes were primarily concentrated around two points: 1990 and 2006, indicating the influence of large-scale climatic factors. Furthermore, the analysis of the statistical distribution of data before and after the change points revealed a change in the distribution type (Changing from Weibull to Log-Normal based on Kolmogorov-Smirnov statistics) and significant changes in statistical indices such as variance and skewness at many stations. These findings are consistent with the predictions of IPCC reports and other regional studies and demonstrate that the decrease in winter precipitation is a large-scale challenge with serious implications for the region's water resources. The results also indicate changes in the form of the distribution function and severe changes in skewness in the sub-interval after the change point.

Keywords: Climate Development, Extreme Values, Precipitation Pattern, Variability.

* - Email: nazeri.mh@lu.ac.ir