

تأثیر تغییر اقلیم بر روند وقایع فرین بارشی ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی

(مطالعه موردی: ۲۰۱۳-۱۹۷۵)

جمیله قلی پور - دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
سید محمد موسوی بایگی^۱ - استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
مهدی جباری نوقابی - استادیار گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۱۴ تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۳/۱۹

چکیده

در دهه‌های اخیر وقایع حدی و یا اصطلاحاً فرین بارش و دما تغییرات چشمگیری از لحاظ مکان، زمان و شدت شاهد بوده‌اند که تعیین چگونگی و مقدار آن به دلیل تأثیری که بر جان و مال بشر و نیز اکوسیستم‌های طبیعی دارد، به یکی از دغدغه‌ها و مشکلات بشر در سراسر جهان تبدیل شده است. افزایش آشکار دمای کره زمین علاوه بر اثر مستقیمی که بر دماهای حدی دارد، باعث تغییراتی در فرکانس و شدت وقوع رخداد‌های حدی بارشی می‌شود. در این مطالعه داده‌های روزانه بارش ۹ ایستگاه سینوپتیک و تبخیرسنجی فعال که دارای دوره زمانی بلندمدت بودند برای سال‌های ۱۹۷۵-۲۰۱۳ مورد استفاده قرار گرفت. بررسی همگنی، یافتن نقاط شکست و نیز اصلاح سری‌های زمانی داده‌ها به کمک بسته نرم‌افزاری RHtests-dlyPrecp صورت گرفت. تعیین روندهای مشاهده شده در شاخص‌های بارشی با استفاده از بسته RClimDex1 و تعیین معناداری روند در شاخص‌ها نیز به کمک آزمون آماری ناپارامتری من-کنندال و توسط بسته trend صورت گرفت. در این مطالعه تعداد روزهایی از سال که بارش‌های بیشتر از ۱ میلی‌متر R1mm و ۱۰ میلی‌متر R10mm را شاهد خواهند بود، و نیز بیشترین مقدار ۵ روز RX5day و ۱ روز RX1day متوالی بارشی؛ شاخص‌هایی هستند که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه شاهد روندی معنادار هستند (اکثراً افزایشی و برخی کاهش‌ی). شاخص‌های مجموع بارش سالانه PRCPTOT، شدت بارش SDII، تعداد روزهای با بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر R20mm، روز خیلی مرطوب R95p، در نیمی از ایستگاه‌ها شاهد روندی معنادار هستند که در اکثر این ایستگاه‌ها روند از نوع افزایشی معنادار مشاهده شد (غیر از SDII که غیر از زشک برای تمام ایستگاه‌ها روندی کاهش‌ی دارد). شاخص‌های بیشترین تعداد

روزهای تر و خشک متوالی CWD و CDD؛ در تعداد اندکی از ایستگاه‌ها روند معنادار دارد. ایستگاه سبزوار در هیچ‌کدام از شاخص‌های حدی روند معناداری را مشاهده نمی‌کند؛ درحالی‌که ایستگاه‌های زشک، پنگجه آبشار و فرهادگرد در اکثر شاخص‌ها روند معنادار و از نوع افزایشی دارد. رفتار روند رخدادهای حدی در ایستگاه‌های منتخب بسیار نامنظم است؛ مثلاً در دو ایستگاه پنگجه آبشار و باراریه چهارباغ که فاصله مکانی کمی با یکدیگر دارند، رفتار آن‌ها کاملاً ناهمسو است. نتایج این مطالعه تغییرات چشمگیر و ناهمسانی در اندازه و نوع روند در شاخص حدی بارشی، با تغییر مکان ایستگاه نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: آزمون آماری ناپارامتری من-کندال، بارش‌های حدی، تغییر اقلیم، معناداری روند، وقایع حدی بارشی.

۱- مقدمه

در حال حاضر حدود ۵ دهه از حاکمیت صنعت بر جوامع بشری می‌گذرد و این حاکمیت باعث تغییرات عمده‌ای در اقلیم و گرمایش جهانی زمین و به تبع آن چالش‌های جهانی و تهدیدهای جدی برای محیط‌زیست کره زمین شده است که عمده‌ترین دلیل آن شدت یافتن فعالیت‌های صنعتی انسان است. افزایش جهانی دمای کره زمین باعث ذوب شدن یخ‌های قطبی، بالا آمدن سطح آب‌های آزاد اقیانوسی و بی‌نظمی در پدیده‌های آب و هوایی شده است. در مطالعاتی که معطوف به موضوع تغییر اقلیم هستند، یکی از عوامل کلیدی، بررسی چگونگی روند تغییرات وقایع حدی است (Zwiers et al, 2013). یک واقعه حدی، یعنی رخ دادن پدیده‌ای که از دیدگاه آماری احتمال وقوع آن خیلی کم بوده و دوره بازگشتی طولانی دارد؛ به عبارت دیگر وقایع حدی از نظر فراوانی، تعداد وقوع کمی دارند اما شدت رخداد آن زیاد است و معمولاً هنگام وقوع اکوسیستم‌ها و زندگی انسان‌ها را با تغییرات و مشکلات جدی روبه‌رو می‌کند (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۳). به‌طور متوسط احتمال وقوع این رخدادهای کمتر از ۵٪ است (Zhu & Toth, 2001). سیل و باران‌های شدید رگباری، خشکسالی، یخبندان، موج گرما، توفان و ... از جمله وقایع حدی است. وقایع حدی آب و هوایی به دلیل تأثیراتی که بر زندگی و اقتصاد بشر و نیز اکوسیستم‌های طبیعی برجای می‌گذارد، در دهه‌های اخیر به یک مسئله اساسی در سراسر جهان تبدیل شده است (Rosenzweig et al., 2001; Aguilar et al., 2009; Zwiers et al, 2013). چهارمین گزارش ارزیابی IPCC^۱ بیان می‌دارد که تعداد روزهای خیلی گرم و شب‌های گرم با احتمال زیادی در بیش از ۷۰٪ خشکی‌های کره زمین افزایش و روز و شب‌های سرد نیز با احتمال زیادی کاهش می‌یابد. بارش‌های حدی در اکثر مناطق عرض‌های میانه افزایش و نیز کل مناطقی که تحت تأثیر خشکسالی قرار می‌گیرند روندی افزایشی را از سال ۱۹۷۰ شاهد خواهند بود (Alexander IPCC., 2014 & 2007; et al., 2006)؛ بنابراین امروزه بررسی هر چه دقیق‌تر تغییر رفتار رخدادهای حدی به یکی از مهم‌ترین موضوعات

1 IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

مطالعاتی محققین این حوزه تبدیل شده است، مثلاً کیگنهاف و همکاران روند ۱۱ شاخص حدی بارشی و ۱۴ شاخص دمایی را - از مجموع شاخص‌های توصیه شده توسط سازمان جهانی هواشناسی^۱ - در گرجستان مورد مطالعه قرار دادند. مطالعات این محققین نشان داد اکثر شاخص‌های حدی دما روند افزایشی معنادار و شاخص‌های بارش روند افزایشی یا کاهش‌ی دارند (Keggenhoff et al., 2014). جیانگ و همکاران شاخص‌های حدی دمایی را در شمال و جنوب منطقه کوهستانی کیونلینگ^۲ کشور چین با استفاده از روند خطی و آنالیز همبستگی محاسبه و تحلیل کردند. نتایج آنها نشان داد که شاخص‌های دمایی سرد مثل TX10، TN10، JD، FD و CSDI روند کاهش‌ی و شاخص‌های دمایی گرم مثل TR، SU، TX90، TN90 و WSDI روند افزایشی و شاخص‌های حدی دمایی مثل TXn، TXx، TXn، TNn روند کاهش‌ی مشاهده کرده‌اند (Jiang et al., 2015).

در سال ۲۰۱۶ سان و همکاران مطالعه جامعی برای تغییرات وقایع حدی بارش و دما در لوئس پلاتیو^۳ کشور چین (۱۹۶۰ تا ۲۰۱۳) انجام دادند و تأثیر تغییر اقلیم بر روند و معناداری روند برای ۱۲ شاخص دمایی و ۱۰ شاخص بارشی مورد مطالعه قرار دادند (Sun et al., 2016). امروزه کاملاً ثابت شده است که تغییر در شدت و فراوانی وقایع حدی به‌مراتب اثر مخرب‌تری نسبت به تغییر در حالت متوسط اقلیمی دارد (Katz & Mearns et al., 2001). Brown., 2004). همین نگرانی‌ها موجب شده که چگونگی تغییر شاخص‌های اقلیمی حدی مثل دما و بارش مورد توجه و مطالعه قرار گیرد. در کشور ایران در این زمینه مطالعات اندکی صورت گرفته است. مطالعه شاخص‌های حدی دما و بارش در ایستگاه تهران، که نتایج آن حکایت از افزایش روند دمای حداکثر، حداقل و متوسط روزانه و نیز کاهش روند شاخص‌های حدی بارش با شیب بسیار کم دارد (محمدی و تقوی، ۱۳۸۴). تغییر رفتار شاخص‌های حدی دما و بارش استان خراسان رضوی با استفاده از داده‌های روزانه دما و بارش برای مشهد، تربت‌حیدریه و سبزوار (۱۹۶۱-۲۰۱۰) و تعیین معناداری روند شاخص‌ها با استفاده از آزمون من-کندال، که نتایج آن برای شاخص‌های بارشی نشان‌دهنده نوسانات زیاد و عمدتاً شیب کاهش‌ی اندک بوده است (عرفانیان و همکاران، ۱۳۹۳).

در مطالعه دیگری توسط ورشایویان و همکاران (۱۳۸۸)، روند تغییر مقادیر حدی دما و بارش در چند نمونه اقلیمی شامل شهرهای بوشهر، تبریز، تهران، مهرآباد، زاهدان، شیراز، کرمان، کرمانشاه و مشهد؛ برای ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۴ مورد مطالعه قرار گرفت. این ایستگاه‌ها بر اساس طبقه‌بندی کوپن معرف مناطق اقلیمی بیابانی، استپی و معتدل مرطوب هستند. بررسی نرمال بودن داده‌ها به کمک آزمون کولموگروف-اسمیرنوف اصلاح شده (لی لی فورس) و تحلیل روند داده‌ها به کمک آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری رگرسیون خطی - کمترین توان‌های دوم، ضریب همبستگی خطی پیرسون، و اسپیرمن و من-کندال صورت گرفت. آنچه از بررسی منابع انجام شده در سراسر دنیا و

1 WHO: World Meteorological Organization

2 Qinling Mountains (in china)

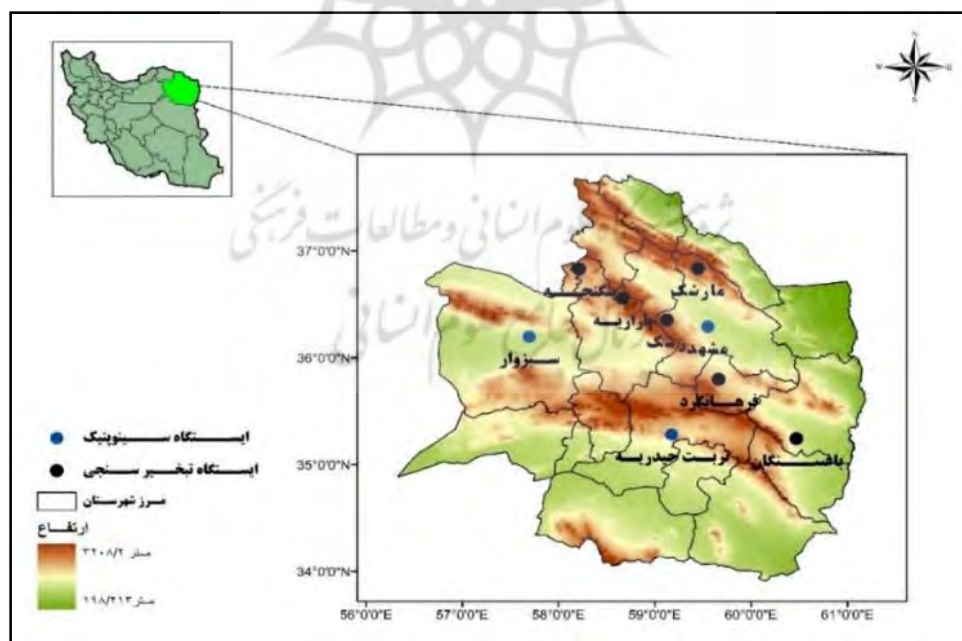
3 Loess Plateau (in China)

کشور ایران برمی آید، اهمیت زیاد مطالعه روند شاخص‌های حدی به صورت دقیق و جامع برای تمام مناطق دنیا است که با توجه به گرم شدن کره زمین و تأثیرات اقلیمی که برجای می‌گذارد می‌توان بیش‌ازپیش به اهمیت این گونه مطالعات پی برد. هدف اصلی مطالعه حال حاضر بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر روند وقایع فرین بارشی استان خراسان رضوی و نیز تعیین همگنی داده‌های بارش برای محاسبه هر چه دقیق‌تر تغییرات وقایع حدی بارشی و همچنین تعیین روند و معناداری آماری روند در هر یک از این شاخص‌ها است. نتیجه این مطالعه در بخش‌های مختلف مرتبط با تغییرات اقلیمی خصوصاً منابع آب و کشاورزی که مستقیماً متأثر از این پدیده‌ها و تغییرات آن هستند بسیار لازم و ضروری می‌نماید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌ها و محدوده مطالعه

برای انجام این مطالعه داده‌های روزانه بارش ۳ ایستگاه سینوپتیک مشهد، تربت‌حیدریه و سبزوار و ۶ ایستگاه تبخیرسنجی مارشک، زشک خراسان، باراریه چهارباغ، پنگجه آبشار، باغسنگان تربت‌جام و فرهادگرد فریمان که دارای دوره زمانی بلندمدت بودند برای سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۷۵ استفاده شد. شکل شماره ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه و جدول شماره ۱ مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و تبخیرسنجی منتخب مستقر در استان خراسان رضوی.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک و تبخیر سنجی منتخب مطالعه حال حاضر.

نام ایستگاه	ارتفاع (m)	طول جغرافیایی (°E)	عرض جغرافیایی (°N)
مشهد	۹۹۹/۲	۵۹/۳۸	۳۶/۱۶
تربت حیدریه	۱۴۵۰/۸	۵۹/۱۳	۳۵/۱۶
سبزوار	۹۷۲	۵۷/۳۹	۳۶/۱۲
مارشک	۱۸۳۰	۵۲/۵۴	۳۶/۸
زشک خراسان	۱۸۳۲	۵۹/۱۹	۳۶/۳۳
پنجه آبشار	۱۷۰۳	۵۸/۲۶	۳۶/۸۲
بار اریه-چهار باغ	۱۵۹۹	۵۸/۷	۳۶/۴۵
فرهادگرد فریمان	۱۵۰۳	۵۹/۷۳	۳۵/۷۶
باغسنگان تربت جام	۹۳۷	۶۰/۶	۳۵/۲۲

۲-۲- بررسی همگنی داده‌های ایستگاه‌ها

قبل از تحلیل در مورد روند و نیز معناداری روند در شاخص‌ها، باید همگنی و یکنواختی سری‌های زمانی بلندمدت داده‌های بارش مورد بررسی قرار گیرند. بررسی همگنی و همگن‌سازی سری‌های زمانی ناهمگن، توسط بسته نرم‌افزاری RHtests-dlyPrpcp صورت گرفت. این بسته که به‌طور خاص برای همگن کردن سری‌های زمانی بارشی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در ۱۴ آگوست ۲۰۱۳ به‌صورت آنلاین در اختیار عموم قرار گرفت^۱ و به کمک الگوریتمی موسوم به trans-^۲PMFred و با استفاده از داده‌های حاصل از تبدیل باکس-کاکس^۳، به‌طور ویژه برای داده‌های بدون سری مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجاکه داده‌های بارش دارای توزیع نرمال نیستند، استفاده از تبدیل باکس-کاکس ضروری است (Wang & Feng, 2013).

بارش روزانه هم از لحاظ زمان و هم مکان بسیار متغیر است به‌طوری‌که مثلاً در یک طرف خیابان می‌تواند بارش وجود داشته باشد و در طرف دیگر نباشد؛ بنابراین سری مرجع مناسبی برای داده‌های بارش روزانه در اکثر نقاط دنیا و خصوصاً منطقه مورد مطالعه این تحقیق وجود ندارد، زیرا اندازه‌گیری‌های موازی^۴ و به فواصل برابر انجام نمی‌شود. پس بارش روزانه فرایندی پیوسته نیست و از دیدگاه آماری یک سری زمانی در حوزه زمان است یعنی اینکه اگر گام‌های زمانی اندازه‌گیری کوچک شود، مقادیر آن می‌تواند قابل توجه نباشد و یا کلاً صفر بوده و تغییرات چشمگیری نداشته باشد؛ بنابراین اصطلاحاً گفته می‌شود بارش پیوسته نیست. در این گونه موارد در اولین برخورد با یک سری زمانی بارش روزانه، باید نقاط شکست^۵ از بین برود و بررسی شود که آیا سری‌های زمانی همگن هستند و نقطه

1 <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>2 PMFred algorithm: penalized maximal F (PMF) test

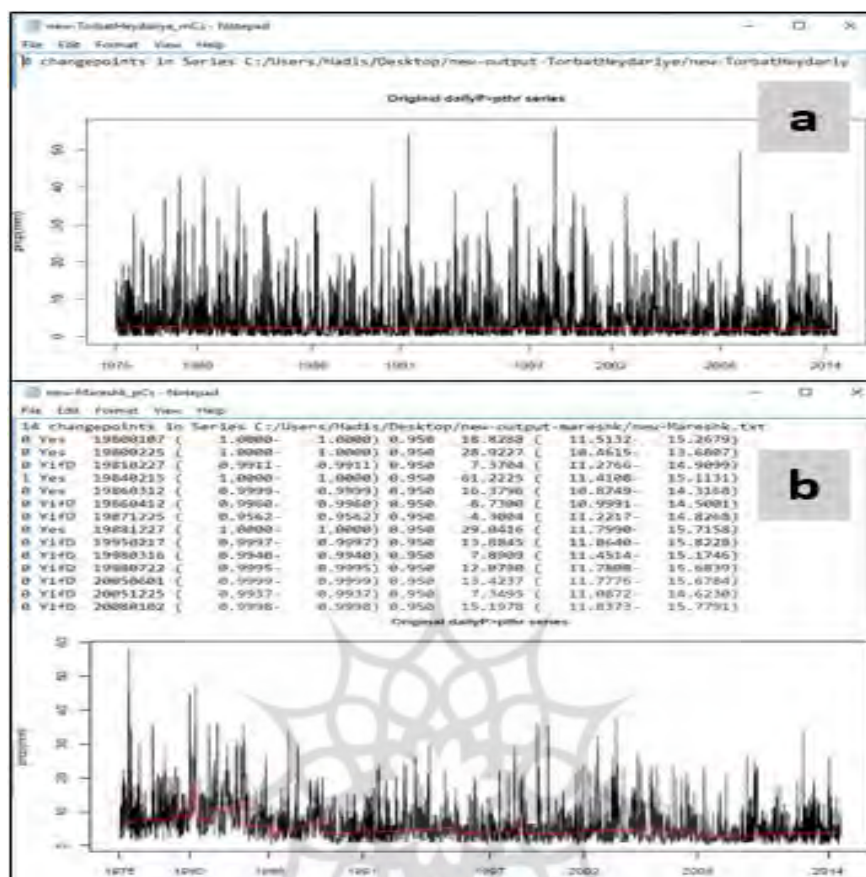
3 Box-Cox transformation

4 Parallel measurements

5 Change point

شکستی دارند یا خیر. در میان داده‌های مورد مطالعه، سه ایستگاه مشهد، تربت‌حیدریه و بار اریه چهارباغ از ابتدا همگن بودند و مابقی ۶ ایستگاه ناهمگن بودند. حال نیاز است نقاط شکست این ۶ ایستگاه ناهمگن شناسایی شده و داده‌های آنها اصلاح شوند تا سری زمانی همگن شود. روش همگن‌سازی سری‌های زمانی با متادیتا و بدون متادیتا، تفاوت‌هایی با یکدیگر دارد (در بین داده‌های ۹ ایستگاه مورد مطالعه، ایستگاه‌های سینوپتیک بدون متادیتا و ایستگاه‌های تبخیر سنجی با متادیتا بودند). ابتدا باید داده‌ها به فرمت دلخواه بسته نرم‌افزاری تبدیل شود. این فرمت یک فایل نوشتاری^۱ متشکل از چهار ستون است. ستون اول سال، ستون دوم ماه، ستون سوم روز و ستون آخر مقدار بارش دیده بانی شده برای آن روز است (حتماً تاریخ‌ها باید از شمسی به میلادی تبدیل شوند). هر جا داده ندارد باید کد داده گم شده برای آن وارد شود (در این مطالعه کد ۹۹۹/۹ بجای داده‌های گم شده وارد شد). بسته نرم‌افزاری RHtests-dlyPrpc سه تابع را برای تشخیص و رفع نقاط شکست غیر طبیعی موجود در سری‌های بارش روزانه استفاده می‌کند، بدون اینکه از سری مرجعی استفاده کند (Wang & Feng., 2013).

در مرحله اول داده‌های هر کدام از ایستگاه‌ها توسط تابع FindU بررسی می‌شوند. پس از اعمال این تابع در همان مسیر دایرکتوری که داده وجود دارد، ۵ فایل ایجاد می‌شود. با باز کردن فایل نوشتاری *.mcs لیستی از نقاط شکست موجود در سری، به همراه تاریخ آن نشان داده می‌شود. اگر در این لیست پیغام "0 changepoints in Series" مشاهده شد، یعنی سری همگن بوده و نقطه شکستی ندارد؛ اما اگر لیستی از نقاط شکست وجود داشت یعنی سری ناهمگن است و نقطه شکست‌های موجود در لیست -که تاریخ وقوعشان قید شده- باید اصلاح شوند. در این مرحله بین سری‌های با متادیتا و بدون متادیتا تفاوت‌هایی وجود دارد. اگر سری بدون متادیتا و ناهمگن بود باید به سراغ گام بعد رفت ولی اگر متادیتای قابل اعتمادی از ایستگاه وجود داشت که در آن تاریخ، هرگونه تغییر در موقعیت ایستگاه، ساعات دیده بانی، تغییر ابزارهای دیده بانی و دقت اندازه‌گیری‌ها و ... ثبت شده بود، باید پس از اعمال تابع FindU؛ تابع FindUD را هم اعمال کرد. سپس نقاط شکستی را که از اعمال تابع به دست آمد، با متادیتای ایستگاه مقایسه کرده و اگر هرگونه تغییری در موقعیت ایستگاه، ابزار و یا ساعات دیده بانی در متادیتا وجود نداشت، این نقطه شکست از لیست حذف می‌شود. پس از اعمال هر دو تابع FindU برای داده‌های با متادیتا/ بدون متادیتا و نیز تابع FindUD برای داده‌های با متادیتا، اعمال تابع StepSize انجام می‌شود تا هرگونه نقطه شکست شناسایی شده و حذف نشده از لیست را مجدداً در سری پیدا کرده و تأیید کند که نقطه شکستی واقعی بوده یا خیر (پیغام و نمودار حاصل از تابع FindU برای یک سری زمانی همگن بدون متادیتا در قسمت a (ایستگاه تربت‌حیدریه) و نیز پیغام و نمودار حاصل از اعمال تابع FindU و FindUD برای یک سری زمانی ناهمگن با متادیتا (ایستگاه مارشک) در قسمت b شکل ۲ نشان داده شده است).



شکل ۲- الف: پیغام و نمودار حاصل از اعمال تابع FindU برای سری زمانی همگن تربت حیدریه، بدون متادیتا. ب: پیغام و نمودار حاصل از اعمال تابع FindU و FindUD برای سری زمانی ناهمگن مارشک، با متادیتا.

۲-۳- محاسبه شاخص‌های حدی بارش روزانه

محاسبه شاخص‌های حدی بارش توسط بسته نرم‌افزاری RClimDex 1.0 صورت گرفت. در این بسته لیستی از شاخص‌های حدی بارشی و دمایی وجود دارد که محقق بسته به هدف خود می‌تواند هر کدام از آنها را انتخاب کند. به‌طور کل شاخص‌های بارشی در دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند. یک عده از شاخص‌ها مبتنی بر شدت بارش بر حسب واحد mm یا mm/days هستند و عده دیگر مبتنی بر مدت بارش یا تعداد روز بارشی و بر حسب واحد days هستند. در این مطالعه تعداد ۱۱ شاخص بارشی مورد تأیید سازمان جهانی هواشناسی، برای ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی مورد محاسبه و مطالعه قرار گرفت (جدول شماره ۲).

جدول ۲- شاخص‌های بارشی مورد محاسبه در این مطالعه و مشخصات آنها.

نام شاخص	نوع شاخص	تعریف شاخص	تشریح شاخص
PRCPTOT	شدت بارش (mm)	مجموع بارش سالانه	مجموع بارش‌های روزانه کل سال (بیشتر از ۱ میلی‌متر)
SDII	شدت بارش (mm/days)	شدت ساده بارش روزانه	بارش سالانه تقسیم بر تعداد روزهای مرطوب
R99 R95	شدت بارش (mm)	روز فوق العاده مرطوب روز خیلی مرطوب	مجموع بارش روزهایی با میزان بارش بیشتر از صدک ۹۹ ام (۱۹۵م)
RX5day RX1day	شدت بارش (mm)	بیشترین مقدار بارش ۵ روزه بیشترین مقدار بارش ۱ روزه	ماکسیمم مقدار سالانه بارش ۵ روزه (۱ روزه)
CWD	تعداد روز بارش (days)	روزهای تر متوالی	بیشترین تعداد روزهای تر متوالی
CDD	تعداد روز بارش (days)	روزهای خشک متوالی	بیشترین تعداد روزهای خشک متوالی
R1mm R10mm R20mm	تعداد روز بارش (days)	تعداد روزهایی در سال با بارش بیشتر از ۱، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر	تعداد روزهایی در سال با بارش بیشتر از ۱ میلی‌متر (۱۰ میلی‌متر / ۲۰ میلی‌متر)

۲-۴- معناداری روند در شاخص‌های حدی بارشی

پس از محاسبه شاخص‌ها و روند در آنها و نیز نمودارهای هر شاخص، نیاز به استفاده از آزمون‌های آماری جهت تعیین معناداری روند در شاخص مورد نظر است. در این مطالعه آزمون آماری ناپارامتری من-کندال استفاده شد. روش من-کندال ابتدا توسط من (Mann., 1945) ارائه و سپس توسط کندال (Kendall., 1970) 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) دلالت 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:

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

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

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

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

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

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

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:

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

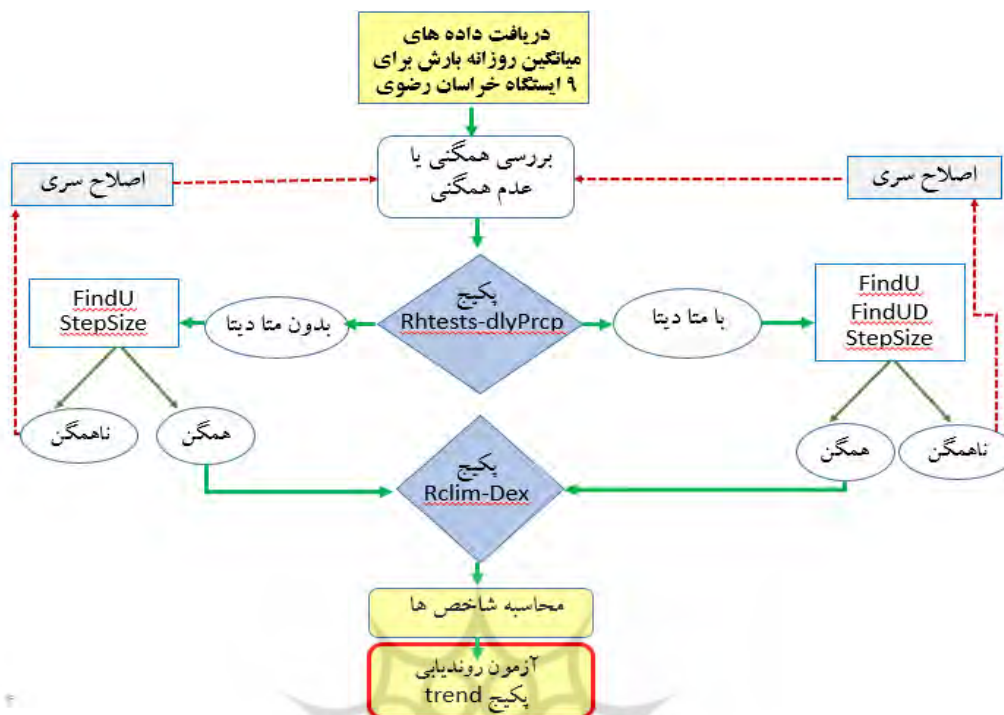
$$z = 0 \quad \text{for } S = 0$$

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

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

$$|Z| < Z_{\alpha/2}$$

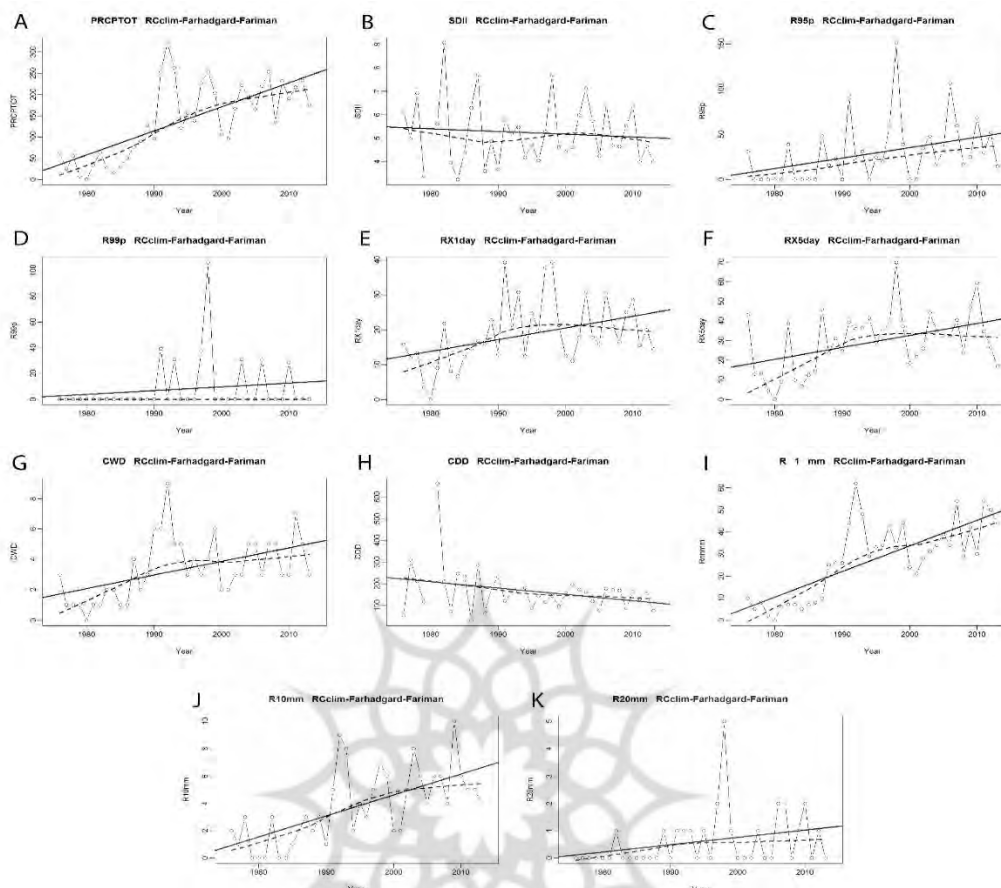
α سطح معنی‌داری برای آزمون و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح α می‌باشد. در بررسی حاضر این آزمون برای سطح اعتماد ۹۵٪ به کار گرفته شد. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی می‌باشد. برای محاسبه معناداری روند به روش من-کندال، در این مطالعه از بسته نرم‌افزاری trend استفاده شد. با توجه به سطح اطمینان - که برای این مطالعه ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است - فرض صفر آزمون قبول و یا رد می‌شود. در صورت رد نشدن فرض صفر، یعنی آماره آزمون بین $+1/96$ و $-1/96$ قرار داشته و روند موجود در شاخص معنادار نیست و وقوع آن در اثر عوامل تصادفی است؛ اما اگر فرض صفر رد شود (فرض یک قبول شود) بدان معناست که آماره آزمون از $+1/96$ بیشتر و یا از $-1/96$ کمتر است، پس در فاصله اطمینان قرار نگرفته و در بازه خطا قرار دارد. در این حالت روند موجود در شاخص که می‌تواند مثبت یا منفی باشد، معنادار و در اثر عوامل غیرتصادفی اجباری و در این مطالعه عوامل ناشی از تغییر اقلیم و مؤثر بر رونددار کردن شاخص‌های حدی؛ می‌باشد. شکل شماره ۳، روش‌شناسی کلی مورد استفاده برای انجام این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- روش شناسی مورد استفاده در مطالعه حال حاضر.

۳- نتایج و بحث

در این مطالعه همگنی و یکنواختی ۹ ایستگاه مستقر در استان خراسان رضوی توسط بسته نرم افزاری Rhtests-dlyPrpc مورد بررسی قرار گرفته و سری های دارای نقطه شکست اصلاح و همگن شدند. سپس ۱۱ شاخص حدی بارشی شامل ۶ شاخص شدتی و ۵ شاخص مدتی برای هر یک از این ایستگاه ها در سال های ۱۹۷۵-۲۰۱۳ محاسبه و نمودارهایی که روند در هر شاخص را نشان دهد ترسیم شد. شکل ۴ و جدول ۳ نمودارهای و آماره های مربوط به ۱۱ شاخص بارشی ایستگاه فرهادگرد فریمان به عنوان یکی از ایستگاهی که در اکثر شاخص ها شاهد روند معنادار (همگی افزایشی بودند) و شکل ۵ و جدول ۴ نمودارهای و آماره های مربوط به ایستگاه سبزوار را به عنوان ایستگاهی که در هیچ یک از شاخص ها روند افزایشی یا کاهشی معنادار در سطح اطمینان ۹۵ درصد ندارد، نشان می دهد.

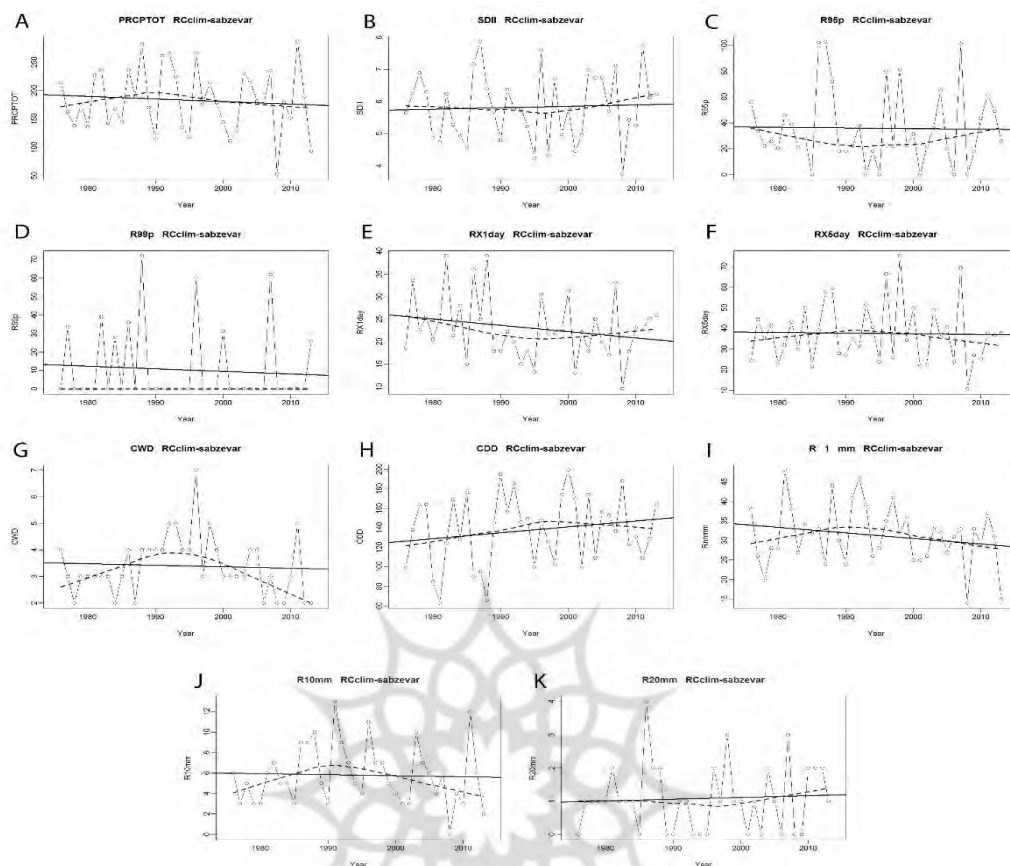


شکل ۴- روند در شاخص‌های شدتی و مدتی محاسبه شده برای ایستگاه فرهادگرد فریمان.

A: مجموع سالانه، **B**: شدت ساده بارش روزانه، **C**: روز خیلی مرطوب، **D**: روز فوق‌العاده مرطوب، **E**: بیشترین مقدار بارش ۱ روزه، **F**: بیشترین مقدار بارش ۵ روزه، **G**: روزهای تر متوالی، **H**: روزهای خشک متوالی، **I**: تعداد روزهایی در سال با بارش بیشتر از ۱ میلی‌متر، **J**: تعداد روزهایی در سال با بارش بیشتر از ۱۰ میلی‌متر و **K**: تعداد روزهایی در سال با بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر.

جدول ۳- آماره‌های آزمون من-کندال برای شاخص‌های حدی بارشی ایستگاه فرهادگرد فریمان.

فرهادگرد فریمان	S	VarS	Z	tau	Pvalue
PRCPTOT	349	5845	4.6	0.524	0.0000053
SDII	0	5374	0	0	1
R95p	237	5576.333	3.2	0.356	0.0015757
R99p	54	2703.333	1	0.081	0.30803
RX1day	200	5846	2.6	0.3	0.0092494
RX5day	223	5845	2.9	0.335	0.0036871
CWD	262	5641.333	3.5	0.393	0.00051093
CDD	-51	5843	-0.7	-0.077	0.51304
R1mm	383	5829	5	0.575	0.00000056
R10mm	310	5749.333	4.1	0.465	0.0000459
R20mm	138	4454.667	2.1	0.207	0.040107



شکل ۵- روند در شاخص‌های شدتی و مدتی محاسبه شده برای ایستگاه سبزوار.

A: مجموع سالانه، B: شدت ساده بارش روزانه، C: روز خیلی مرطوب، D: روز فوق‌العاده مرطوب، E: بیشترین مقدار بارش ۱ روزه، F: بیشترین مقدار بارش ۵ روزه، G: روزهای تو متوالی، H: روزهای خشک متوالی، I: تعداد روزهایی در سال با بارش بیشتر از ۱ میلی‌متر، J: تعداد روزهایی در سال با بارش بیشتر از ۱۰ میلی‌متر و K: تعداد روزهایی در سال با بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر.

جدول ۴- آماره‌های آزمون من-کندال برای شاخص‌های حدی بارشی ایستگاه سبزوار.

سبزوار	S	VarS	Z	tau	Pvalue
PRCPTOT	-4	5846	0	-0.006	0.9687
SDII	17	5831.667	0.2	0.026	0.83404
R95p	-12	5814	-0.1	-0.018	0.88529
R99p	-44	3284	-0.8	-0.066	0.45304
RX1day	-82	5830.667	-1.1	-0.123	0.28879
RX5day	-44	5844	-0.6	-0.066	0.57378
CWD	-18	5313.333	-0.2	-0.027	0.81559
CDD	58	5842	0.7	0.087	0.45582
R1mm	-36	5821.333	-0.5	-0.054	0.64643
R10mm	-25	5713.667	-0.3	-0.038	0.75086
R20mm	-1	5206.333	0	-0.002	1

همانند نمودارها و آماره‌های نمایش داده شده در جدول بالا، نمودارها و اشکال دیگری برای سایر ایستگاه‌ها نیز محاسبه شده است. با توجه به شکل‌ها (شکل شماره ۴ و ۵)، روند در نمودارها قابل ملاحظه است اما با انجام آزمون آماری من-کندال مشخص می‌شود که می‌توان این روند را به‌عنوان روندی معنادار پذیرفت یا خیر. جدول شماره ۵ معناداری در روندهای صعودی یا نزولی برای کل ایستگاه‌های مورد مطالعه این تحقیق به همراه آماره عددی من-کندال نشان می‌دهد.

جدول ۵- آماره آزمون من-کندال شاخص‌های حدی بارشی ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی

(خانه‌های زردرنگ نشان‌دهنده معناداری در سطح خطای ۵ درصد است).

	mm or mm/days						days				
	PRCPTOT	SDII	R95p	R99p	RX1day	RX5day	CWD	CDD	R1mm	R10mm	R20mm
مشهد	-1.7	-0.1	-1.8	-1.6	-2	-2	-1.3	-1.3	-2.4	-2	-1.6
ترت حیدریه	-1.7	-1.3	-1.8	-1	-2	-1.2	-0.7	-0.5	-0.7	-1.6	-2.5
سبزوار	0	0.2	-0.1	-0.8	-1.1	-0.6	-0.2	0.7	-0.5	-0.3	0
مارشک	-1.1	-3.7	-0.7	-0.5	-0.9	-2	0	-1.3	2.2	-1.2	-0.3
زشک خراسان	3.9	6.4	5.6	4.1	5.3	4.9	0.5	0.1	-0.2	5.7	4.1
پنجه آبشار	5.1	-0.6	2	1.5	2.7	2.7	4.8	-1.6	6	5	3
بار اریه-چهارباغ	-2.5	-4.7	-0.1	-1.7	-0.8	-1.4	0.6	-0.7	0.4	-2.1	-1.4
فرهادگرد فریمان	4.6	0	3.2	1	2.6	2.9	3.5	-0.7	5	4.1	2.1
باغسنگان ترت جلم	1	-4.1	-1.8	-1.3	-1.7	-0.5	1.7	-2.1	3.1	0.1	-1.5

با مشاهده جدول ۵ مشخص می‌شود شاخص تعداد روزهایی از سال با بارش بیشتر از ۱ میلی‌متر R1mm و ۱۰ میلی‌متر R10mm، و نیز بیشترین مقدار ۵ روز RX5day و ۱ روز RX1day متوالی بارشی؛ شاخص‌هایی هستند که در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، شاهد روند معنادار هستند (اکثراً افزایشی و برخی کاهش). شاخص‌های مجموع بارش سالانه PRCPTOT، شدت بارش SDII، تعداد روزهای با بارش بیشتر از ۲۰ میلی‌متر R20mm، روز خیلی مرطوب R95p، در نیمی از ایستگاه‌ها شاهد روندی معنادار هستند که در اکثر این ایستگاه‌ها روند از نوع افزایشی و معنادار مشاهده شد (غیر از SDII). شاخص‌های CWD، R99p و CDD؛ تنها در تعداد اندکی از ایستگاه‌ها روند معناداری را شاهد است که این روند برای CDD از نوع کاهش معنادار و برای CWD از نوع افزایشی معنادار است. اکثر شاخص‌های غیرمعنادار روندی کاهش و به مقدار کم نشان داده‌اند و چون از ۱/۹۶- کوچک‌تر نبوده، در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار نیستند. ایستگاه سبزوار در هیچ‌کدام از شاخص‌ها روند معنادار ندارد. ایستگاه‌های زشک، پنجه آبشار و فرهادگرد؛ در اکثر شاخص‌ها روند معنادار و از نوع افزایشی و البته با شدت بالا دارند. به‌طور کل شاخص‌های حدی بارشی در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان رضوی نشان دهنده نوسانات زیاد و در برخی از شاخص‌ها شیب کاهش و در برخی دیگر شیب افزایشی است. اگر ایستگاه‌های باغسنگان و ترت حیدریه به‌عنوان

مرکز استان در نظر گرفته شود، تقریباً اکثر شاخص‌های حدی آنها روندی کاهشی تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان می‌دهد اما در سایر ۷ ایستگاه که معرف شمال استان هستند، رفتار روند شاخص‌ها بسیار نامنظم و ناهمسو است؛ بنابراین تغییر اقلیم و تفاوت و تمایز مکان و زمان بارندگی‌ها، تأثیرات ناهمسو و ناهمسانی بر روند شاخص‌های هر منطقه اعمال می‌کند.

۴- جمع‌بندی

در این مطالعه داده‌های روزانه بارش ۹ ایستگاه سینوپتیک و تبخیر سنجی فعال در استان خراسان رضوی برای سال‌های ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۳ از لحاظ همگنی و یکنواختی، تعیین نقاط شکست و نیز رفع آن‌ها بررسی شد. سپس ۱۱ شاخص حدی بارشی مورد توصیه WMO برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه و روندهای موجود در هر شاخص تعیین شد و در پایان نیز با اعمال آزمون آماری من-کندال، معناداری روند موجود در هر یک از شاخص‌ها، مورد آزمون قرار گرفت. شاخص‌های حدی بارشی ایستگاه‌های خراسان رضوی رفتار متفاوت و ناهمسویی را نشان می‌دهد که متأثر از روند افزایشی گرمایش جهانی و تغییر اقلیم و به تبع آن ناهماهنگی در توزیع زمانی و مکانی بارندگی‌هاست.

معناداری روند در شاخص PRCPTOT فقط در ایستگاه باراریه چهارباغ از نوع کاهشی است و در بین ایستگاه‌هایی که روند PRCPTOT آن‌ها معنادار شده است، تأثیر عوامل غیر تصادفی یا همان تغییر اقلیم منجر به افزایش مجموع بارش سالانه آنها شده است. در شاخص SDII نیز فقط در ایستگاه زشک روندی افزایشی نشان داده شده است و بنابراین تغییر اقلیم در اکثر ایستگاه‌هایی که روند آن‌ها معنادار است موجب کاهش شاخص شدت ساده بارش (مجموع بارش سالانه تقسیم بر تعداد روزهای مرطوب) شده است. روندهای معنادار R95p و R99p همگی از نوع افزایشی هستند اما در تعداد اندکی از ایستگاه‌ها روند افزایشی معنادار در این دو شاخص نشان داده شده است. روندهای معنادار در شاخص‌های RX1day و RX5day همگی افزایشی هستند غیر از مشهد و تربت‌حیدریه و سبزوار. تعداد روزهای خشک متوالی در سال، در ۸ ایستگاه، روند کاهشی نشان می‌دهد ولی این روند کاهشی فقط در باغسنگان تربت‌جام معنادار است که می‌توان آن را به عامل غیر تصادفی تغییر اقلیم مرتبط دانست. عمده روندهای معنادار در شاخص‌های تعداد روزهای با بارش بیشتر از ۱، ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر نیز از نوع افزایشی بوده‌اند (به جز در مشهد، تربت‌حیدریه و باراریه چهارباغ). در مجموع، تغییر رفتار رخداد‌های حدی بارشی در اثر تغییر اقلیم بسیار نامنظم است مثلاً در دو ایستگاه پنگجه آبشار و باراریه چهارباغ که فاصله مکانی کمی با یکدیگر دارند، رفتار آن‌ها کاملاً ناهمسو است. نتایج این مطالعه تغییرات چشمگیر و ناهمسانی در اندازه و نوع روند در شاخص حدی بارشی، با تغییر مکان ایستگاه و نهایتاً نتایجی مشابه با مطالعاتی از این قبیل در اقصی نقاط دنیا نشان می‌دهد.

منابع

- شیرمحمدی، زهرا؛ خانی، علی‌اکبر؛ انصاری، حسین؛ علیزاده، امین؛ محمدیان، آزاده؛ ۱۳۹۰. بررسی ارتباط پدیده انسو (ENSO) با مقادیر حدی بارش‌های فصلی در استان‌های خراسان. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. شماره ۱۹، صص ۶۱-۷۹.
- عرفانیان ارغوانیان سرشوری، مریم؛ انصاری، حسین؛ علیزاده، امین؛ بنایان اول، محمد؛ ۱۳۹۳. بررسی تغییرات شاخص‌های حدی هواشناسی در استان خراسان رضوی. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. شماره ۴. صص ۸۱۷-۸۲۵.
- محمدی، حسین؛ تقوی، فرحناز؛ ۱۳۸۴. روند شاخص‌های حدی دما و بارش در تهران. *نشریه پژوهش‌های جغرافیایی*. شماره ۵۳. صص ۱۵۱-۱۷۲.
- ورشوایان، وحید؛ خلیلی، علی؛ قهرمان، نوذر؛ حجام، سهراب؛ ۱۳۸۸. بررسی روند تغییرات مقادیر حدی دمای حداقل، حداکثر و میانگین روزانه در چند نمونه اقلیمی ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*. شماره ۳۷. صص ۱۶۹-۱۷۹.
- Aguilar, E., Aziz Barry, A., Brunet, M., Ekan, L., Fernandes, A., Massoukina, M., Mbah, J., Mhanda, A., Do Nascimento, D., Peterson, T., 2009. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, *Res. Atmos.* 114.
- Alexander, L., Zhang, X., Peterson, T., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res. Atmos.* 111.
- IPCC (2014a). "Summary for Policymakers." In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by Stocker, T.F., et al., Cambridge: Cambridge University Press (online at <http://climatechange2013.org/>).
- IPCC (2014b). *Climate Change., 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press (online at <http://climatechange2013.org/>).
- IPCC., 2007. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fourth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/ New York, USA. 996.
- Jiang, Ch. Mu, X. Wang, F. Zhao, G., 2015. Analysis of extreme temperature events in the Qinling Mountains and surrounding area during 1960-2012. *Quaternary International* xxx. 1-13.
- Katz, R.W., Brown, B.G., 2004. Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. *Journal of Climatic change*. 21: 289-302.
- Kegenhoff, I. Elizbarashvili, M. Amiri-Farahani, A. King, L., 2014. Trends in daily temperature and precipitation extreme over Georgia., 1971-2010. *Weather and Climate Extremes*. 4:75-85.
- Kendall, M.G., 1970, *Rank Correlation Methods*, 2nd Ed., New York: Hafner.
- Mann, H.B., 1945, Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13: 245-259
- Mearns, L.O., Hulme, M., Carter, T.R., Leemans, R., Lal, M., Whetton, P., 2001. Climate scenario development. In: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (editors) *Climate change., 2001: The Scientific Basis*,

- Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge. 583-638.
- Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X., Epstein, P.R., Chivian, E., 2001. Climate change and extreme weather events; implications for food production, plant diseases, and pests. *Glob. Chang. Hum. Health*. 2: 90–104.
- Sun, W. Mu, X. Song, X. Wu, D. Cheng, F. Qiue, B., 2016. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960–2013 under global warming. *Atmospheric Research* 168: 33–48.
- Wang, X. L. and Y. Feng., 2013. RHtests_dlyPrp User Manual. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada. 17 pp.
- Zhu, Y and Toth, Z., 2001. Extreme Weather Events and their Probabilistic Prediction by the NCEP Ensemble Forecast System, Proceedings of the symposium on Precipitation Extremes: Prediction, Impact, and Responses, Albuquerque, USA, 1-38.
- Zwiers, F.W., Alexander, L.V., Hegerl, G.C., Knutson, T.R., Kossin, J.P., Naveau, P., Nicholls, N., Schär, C., Seneviratne, S.I., Zhang, X., 2013. Climate extremes: challenges in estimating and understanding recent changes in the frequency and intensity of extreme climate and weather events. *Climate Science for Serving Society*. Springer, 339–389.

