



شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۴۸۰
شاپا الکترونیکی: ۲۲۵۰-۷۴۰۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir

iauwsrcj@gmail.com

سال یازدهم

شماره دو

زمستان ۱۴۰۰

تاریخ دریافت:

۱۴۰۰/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۰/۰۹/۲۷

صفحات: ۱۱۳-۱۳۱



کاربرد شاخص هرست در تعیین حافظه طولانی مدت سری‌های زمانی بارش و دبی ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل

رئوف مصطفی‌زاده^۱، وحیده مرادزاده^۲، نازیلا علایی^۳ و زینب حزبوی^{۴*}

(۱) دانشیار، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
(۳) دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
(۴) استادیار، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
*نویسنده مسئول مکاتبات: z.hazbavi@uma.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: آشفتگی‌های اکوسیستم ناشی از عوامل اجتماعی بر تغییرات محیط‌زیست، دما، تبخیر و تعرق، تولید رواناب و دبی جریان تأثیر می‌گذارد. در همین راستا، شاخص هرست برای تحلیل تغییرات فرآیندهای هیدرولوژی ناشی از عوامل مختلف به کار برده شده است. شاخص هرست به عنوان یک ویژگی مهم برای تحلیل اثرات هیدرولوژی شناخته شده است. یکی از مناسب‌ترین آزمون‌ها برای تشخیص حافظه بلندمدت، آزمون دامنه مقیاس بندی شده (R/S) است. آزمون دامنه مقیاس بندی شده (R/S) امکان محاسبه پارامتر خود همانندی H (هرست) را ایجاد می‌کند که شدت وابستگی بلندمدت در یک سری زمانی را می‌سنجد. بنابراین پژوهش حاضر با هدف تعیین حافظه طولانی مدت سری‌های زمانی بارش و دبی ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل واقع در شمال غرب ایران با استفاده از شاخص هرست انجام شد.

روش پژوهش: در پژوهش حاضر، به بررسی کاربرد شاخص هرست در تعیین حافظه طولانی مدت سری‌های زمانی بارش و دبی ایستگاه‌های منتخب استان اردبیل حافظه بلندمدت در داده‌های بارش و دبی سالانه (۹۲-۱۳۷۰) در ۱۷ ایستگاه باران‌سنجی و ۲۸ ایستگاه آب‌سنجی استان اردبیل پرداخته شد. مقادیر محاسباتی شاخص هرست از لحاظ میزان وابستگی و مقیاس ناپایداری در سری زمانی به پنج طبقه خیلی ضعیف تا خیلی قوی طبقه بندی شدند. تجزیه و تحلیل همبستگی مکانی شاخص هرست با استفاده از شاخص موران انجام شد. در ادامه مقادیر شاخص هرست به روش وزنی معکوس فاصله (IDW) در محیط ArcMap 10.8 درون‌یابی شد.

یافته‌ها: در حالت کلی از ۱۷ ایستگاه مورد بررسی به ترتیب ۲۳/۵۳، ۲۹/۴۱، ۱۷/۶۵ و ۲۳/۵۳ درصد در مقیاس پایداری خیلی ضعیف (۰/۵ < H < ۰/۶۵)، نسبتاً ضعیف (۰/۶۵ < H < ۰/۵۵)، نسبتاً قوی (۰/۶۵ < H < ۰/۷۵) و قوی (۰/۷۵ < H < ۰/۸۰) قرار گرفتند. در این میان، تنها ۵/۸۸ درصد مربوط به ایستگاه شمس‌آباد در مقیاس ناپایداری خیلی ضعیف (۰/۴۵ < H < ۰/۵۵) دسته‌بندی شد. طبق تجزیه و تحلیل ۲۸ ایستگاه آب‌سنجی مورد بررسی به ترتیب ۲۵، ۵۰ و ۲۱/۴۲ درصد در مقیاس پایداری نسبتاً ضعیف، نسبتاً قوی، قوی و ۳/۵۸ درصد در مقیاس ناپایداری خیلی ضعیف قرار گرفتند. در این بین، تنها ایستگاه عموقین در مقیاس ناپایداری خیلی ضعیف دسته‌بندی شد. بر اساس نتایج ایستگاه‌های باران‌سنجی هیر، کوزه‌تپراقی و شمس‌آباد و احمدکندی دارای مقادیر مثبت شاخص موران هستند، به عبارتی دارای مقادیر مشابه از نظر مکانی هستند. در بقیه ایستگاه‌ها مقدار شاخص موران منفی هستند که به معنی عدم مشابهت مقادیر متغیرهای مورد بررسی بود و در حقیقت تشکیل خوشه نداده‌اند. نتایج خوشه‌بندی در ایستگاه‌های آب‌سنجی نشان داد که اپریل در طبقه خوشه‌بندی زیاد-زیاد قرار گرفت و آتسگاه در خوشه‌های کم-کم و مقادیر مثبت شاخص موران طبقه‌بندی شد. بقیه ایستگاه‌های مورد مطالعه، خوشه‌های مشخصی تشکیل ندادند.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که شاخص هرست برای ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد بررسی با میانگین ۰/۶۴ و انحراف معیار ۰/۱۱ به دست آمد. همچنین شاخص هرست در ایستگاه‌های آب‌سنجی با میانگین ۰/۷۴ و انحراف معیار ۰/۱۲ به دست آمد. در مجموع، دامنه مقادیر شاخص هرست و تغییرات مکانی آن در مورد داده‌های بارش سالانه نشان داد که مقادیر بارش در دوره مورد مطالعه دارای پایداری مناسبی نیست. تغییرات مکانی شاخص‌های مذکور نشان داد که تفاوت مشخصی بین مناطق مختلف استان از نظر پایداری مقادیر بارش و دبی وجود دارد. این در حالی است که بر اساس نمودار جعبه‌ای، دامنه تغییرات و نیز پراکنش مکانی ایستگاه‌هایی با پایداری قوی و نسبتاً قوی، بیش‌تر ایستگاه‌های واقع در محدوده مرکزی استان دارای پایداری در مقادیر دبی هستند که می‌تواند بیان‌گر تداوم جریان‌های پربابی و هم وقوع دبی‌های حداکثر باشد.

کلید واژه‌ها: تجزیه و تحلیل پراکندگی، تحلیل سری زمانی، دامنه مقیاس بندی شده (R/S)، نمایه تغییر اقلیم

مقدمه

یک سری زمانی را می‌سنجد. امروزه، شاخص هرست برای اندازه‌گیری حافظه بلندمدت سری‌های زمانی در پژوهش‌های متعددی استفاده شده است که مربوط به همبستگی‌های خودکار سری زمانی است و با افزایش تأخیر بین جفت مقادیر، مقادیر آن کاهش می‌یابد (Koutsoyiannis, 2003). تصور بر این است که شاخص هرست در همه جنبه‌های هیدرولوژی شامل بارندگی، رواناب و دبی جریان رودخانه قابلیت استفاده دارد. از این شاخص به‌عنوان «شاخص وابستگی^۴» یا «شاخص وابستگی در دامنه‌های بلندمدت^۵» نیز در مطالعات علمی یاد شده است. یک مقدار H در محدوده ۰/۵-۱ نشان‌گر یک سری زمانی با همبستگی بلندمدت مثبت است (Koutsoyiannis, 2003).

تجزیه و تحلیل آماری و ارزیابی شاخص هرست برای سری زمانی بارش سالانه و ماهانه Dobrudja در جنوب شرقی رومانی انجام شده است. هم‌چنین، تحلیل آماری و نتایج تحلیل LRD^۶ برای برخی از سری‌های زمانی بارش در دوره زمانی ۴۱ ساله (۲۰۰۳-۱۹۶۵) با روش‌های واریانس تجمعی^۷، گشتاورهای مطلق^۸، تحلیل نوسان با حذف روند^۹ (DFA)، دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S)، نسبت واریانس باقیمانده^{۱۰} و نمودار تناوب‌نگار^{۱۱} مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که LRD بستگی به روش مورد استفاده دارد و همیشه با نتایج آزمون‌های آماری مطابقت ندارند. بنابراین، استفاده از روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل LRD با احتیاط توصیه می‌شود، زیرا گاهی اوقات آمارهای منتج از آن‌ها دارای ویژگی‌هایی هستند که فقط برای برخی از سری‌های زمانی به‌خوبی اثبات شده یا ویژگی‌های آن‌ها مشخص نیست (Barbulescu et al., 2010). علاوه بر این، در پژوهشی

شناخت نسبی از اثرات پیچیده تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر مدیریت منابع آب و توسعه پایدار جامعه اهمیت زیادی دارد (Liu et al., 2019). طی ۵ تا ۱۰ دهه گذشته، چرخه هیدرولوژیکی که جریان رودخانه‌ها یکی از متغیرهای مهم آن به‌شمار می‌رود (Farzin et al., 2020)، به‌شدت تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است (Tian et al., 2019). در حال حاضر، عوامل اجتماعی نقش اصلی را در تغییر رژیم جریان رودخانه و خدمات تنظیمی هیدرولوژیک ایفا می‌کنند و ممکن است به‌طور غیرمستقیم بر تغییرات اقلیمی ناشی از انسان تأثیر بگذارند. حتی در اکوسیستم‌های آب شیرین نیز عوامل اجتماعی از جمله پویایی جمعیت، توسعه اقتصادی، درگیری‌های سیاسی و سیاست‌های استفاده از منابع باعث ایجاد اختلال در اکوسیستم از جمله تخریب جنگل، چرای مفرط، توسعه بی‌رویه کشاورزی، معدنکاری و آتش‌سوزی می‌شوند. این‌گونه اختلالات به‌نوبه خود بر تغییرات محیط‌زیست، دما، تبخیر و تعرق، تولید رواناب و دبی جریان تأثیر می‌گذارند (Jones et al., 2012). از این‌رو بررسی تغییرات دبی رودخانه در طول زمان از طریق شاخص‌های مختلف می‌تواند آثار تغییر یا عدم تغییر در شرایط اقلیمی یک منطقه را مشخص کند (Garberchet et al., 2004). در همین راستا، شاخص هرست^۱ برای تحلیل تغییرات فرآیندهای هیدرولوژی ناشی از عوامل مختلف به‌کار برده شده است (Hurst, 1951; Koutsoyiannis, 2003; Munshi, 2017; Millán et al., 2021).

شاخص هرست به‌عنوان یک ویژگی مهم برای تحلیل اثرات هیدرولوژی شناخته شده است. یکی از مناسب‌ترین آزمون‌ها برای تشخیص حافظه بلندمدت، آزمون دامنه مقیاس‌بندی شده^۲ (R/S) است. آزمون دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S) امکان محاسبه پارامتر خود همانندی^۳ H (هرست) را ایجاد می‌کند که شدت وابستگی بلندمدت در

⁴ Index of dependence

⁵ Index of long-range dependence

⁶ Long range dependence

⁷ Aggregated variance

⁸ Absolute moments

⁹ Detrended fluctuation analysis

¹⁰ Ratio of variance of residuals

¹¹ Periodogram

¹ Hurst index

² Rescaling range

³ Self-similarity

آماري مورد تجزيه و تحليل قرار گرفت. نتايج نشان داد كه تجزيه و تحليل شاخص هرست براي مقياس‌هاي زماني مختلف، در مقياس زماني كوچك، تمايل به افزايش دارد. بنابراين، اين مجموعه رفتار پايدار قوي‌تري را ارائه مي‌دهد (López-Lambrano et al., 2018). در منطقه آمزون نيز به تجزيه و تحليل شاخص بارش-تبخير و تعرق استاندارد شده³ (SPEI) و هرست با استفاده از مجموعه داده‌هاي ۱۵ ايستگاه هواشناسي پرداخته شده است. به همين منظور، روش‌هاي هيدرولوژيكي در منطقه جنگل‌هاي باراني برزيل از طريق SPEI در مقياس نه ماهه و جستجوي همبستگي بلندمدت يا کوتاه‌مدت متوسط بارش ماهانه بررسي شد. مقادير SPEI با سري‌هاي زماني بارش و دماي ماهانه محاسبه شد و شاخص هرست از طريق سري زماني کاهش يافته با تجزيه و تحليل دامنه مقياس‌بندي شده (R/S) تعيين شد. درصد مقادير SPEI تقريباً نرمال و از ۵۹/۸ درصد تا ۶۹/۷ درصد متغير بوده است و شاخص هرست نيز بين ۰/۳۸ تا ۰/۶۳ به دست آمد. نتايج نشان‌دهنده روند مداوم الگوهاي مرطوب در آينده در برخي مناطق است. تجزيه و تحليل شاخص هرست براي روزهاي با بارندگي ماهانه مي‌تواند به عنوان ابزاري مفيد براي تفسير تغييرات اقليمي معرفي شد (Vega et al., 2019).

در شمال غرب چين روند تغييرات بارش، رواناب و تبخير در دوره زماني ۴۰ ساله (۱۹۷۹-۲۰۰۴) مطالعه شده است. از آزمون من-كندال⁴ براي تشخيص معني‌داري روند استفاده شد و روند آينده با استفاده از روش دامنه مقياس‌بندي شده (R/S) محاسبه شد. نتايج نشان داد كه در سال ۲۰۰۴ تغيير قابل توجهي در بارش، تبخير و رواناب رخ داده است، به طوري كه پس از سال ۲۰۰۴ در مقايسه با نتايج به دست آمده بين سال‌هاي ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۴ روند افزايشي داشته است. شاخص هرست در اين مطالعه برابر با ۰/۹۲ به دست آمد. بنابراين مي‌توان بيان كرد كه بارش،

ديگر فرايند دو بعدي هرست-كلموگروف¹ (HK) و کاربرد آن در ارزيابي بارندگي مورد تجزيه و تحليل قرار گرفته است. هم‌چنين، در اين مطالعه به وجود رفتار HK در زمينه‌هاي هيدرولوژيكي از جمله توپوگرافي، بارش و دما پرداخته شد. ضمن ارائه روابط دقيقی از ويژگي‌هاي آماری، فرآيند HK تک‌بعدي به دو بعدي بسط داده شد و در خصوص مسئله برآورد پارامترها با تأكيد بر عدم قطعيت‌ها و سوگيري‌ها بحث شد. در نهايت، يك طرح توليد تصادفي دو بعدي پيشنهاده شد كه قابليت نمايش رفتار HK را داشت. اين طرح براي توليد ميدان‌هاي بارشي، مطابق با موارد مشاهده شده، به كار گرفته شد (Koutsoyiannis et al., 2011).

خوشه‌بندي ايستگاه‌هاي بارندگي در منطقه RH-24 مكزيك با استفاده از هرست انجام شده و رفتار تغييرات بارندگي در دوره‌هاي مختلف با استفاده از تجزيه و تحليل همبستگي مورد بررسي قرار گرفت. در مطالعه آمار ايستگاه‌هاي بارندگي با تجزيه و تحليل نيم‌تغيير نماها² و R/S امكان ارزيابي همبستگي‌ها و خوشه‌بندي‌هاي بلندمدت در سري‌هاي زماني هيدرولوژيكي فراهم شد (Benavides-Bravo et al., 2015). هم‌چنين، تجزيه و تحليل ماهانه بارش در انگلستان و ولز (۱۷۶۶-۲۰۱۶) در مقياس زماني سالانه و براي ۱۲ ماه انجام شده است. نتايج نشان داد كه هيچ شواهدی مبنی بر وابستگي، حافظه بلندمدت يا تداوم يافت نمی‌شود. مقادير محاسباتي شاخص هرست بارش ماهانه $H \approx 0.5$ نشان‌دهنده تصادفي بودن گوسي بود. بنابراين خوشه‌هاي غير دوره‌اي سال‌هاي سيلابي مشاهده شده در اين منطقه بيش‌تر از اثرات پديده هرست پديده‌هاي چرخه‌اي نامنظم طبيعت هستند (Munshi, 2017). در پژوهشي ديگر، رفتار فراكتال رخدادهاي بارشي در يك منطقه نيمه‌خشك واقع در شمال غربي مكزيك با استفاده از مفاهيم هرست و بر اساس داده‌هاي ۹۲ ايستگاه هواشناسي با حداقل ۳۰ سال دوره

³ Standardized precipitation evapotranspiration index

⁴ Man-Kendall

¹ Hurst-Kolmogorov

² Semivariograms

یک رابطه خطی متفاوت بین هرست و پارامترهای اختلاف کسری وجود دارد (Ding et al., 2021). در ایران نیز فتحیان و مرید به ارزیابی و مقایسه روش‌های تخمین شاخص هرست در بررسی روند و فصلی بودن متغیرهای اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. در پژوهش ایشان با استفاده از شاخص کندال فصلی، روند تغییرات در سری‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفت، هم‌چنین مقدار شاخص هرست، به‌عنوان یک عامل تأثیرگذار بر روند و فصلی بودن سری‌های زمانی با استفاده از روش‌های واریانس، R/S و تحلیل نوسان با حذف روند (DFA) ارزیابی شد. نتایج تحلیل روش‌های تخمین شاخص هرست نشان دادند که سری‌های زمانی بارش و دبی دارای حافظه بلندمدت نسبتاً متوسطی (۰/۶۵) هستند (Fathian and Morid, 2012). روند جریان در یک منطقه نیمه‌خشک ایران (کرخه) طی ۳۸ سال گذشته (۲۰۱۱-۱۹۷۴) با در نظر گرفتن ساختار همبستگی خود، ماندگاری بلندمدت و هرست تجزیه و تحلیل شد. در این پژوهش برای شناسایی روند جریان در ۲۰ ایستگاه هیدرومتری و ۱۱ ایستگاه اندازه‌گیری بارندگی واقع در حوضه رودخانه کرخه در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه انجام شد که با استفاده از دو نسخه از آزمون‌های من-کندال از جمله (۱) آزمون من-کندال با در نظر گرفتن تمام ساختار خودهمبستگی قابل توجه (MK3) و (۲) آزمون من-کندال با در نظر گرفتن تداوم طولانی مدت^۸ (LTP) و شاخص هرست (MK4) انجام شده است. نتایج نشان داد که روند جریان KRB (با استفاده از هر دو نسخه آزمایشی) در هر سه مقیاس زمانی کاهش یافته است. روند کاهش قابل توجهی در ۷۸ و ۷۳ درصد موارد ماهانه به ترتیب با استفاده از آزمون‌های MK3 و MK4 وجود دارد، در حالی که این درصدها در مقیاس‌های زمانی فصلی و سالانه به ترتیب به ۸۰ و ۷۰ درصد تغییر کرده است (Zamani et al., 2017).

تبخیر و رواناب در شمال غرب چین احتمالاً گرایش مثبت را در آینده حفظ خواهد کرد، زیرا شاخص‌های هرست این متغیرها بزرگ‌تر از ۰/۵ هستند (Tian et al., 2019). علاوه بر این، شاخص هرست برای مقادیر خشکسالی در بلم و مانائوس، برزیل در بازه زمانی ۵۹ ساله (۱۹۶۱-۲۰۱۹) محاسبه شده است. قبل از تجزیه و تحلیل دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S)، ویژگی‌های غیرخطی هر سری زمانی خام و باقیمانده از طریق خطی و غیرخطی بررسی شد. نتایج حاکی از این بود که مقادیر مثبت SPEI می‌تواند در بلم در آینده باقی بماند، در حالی که اثر حافظه مقادیر منفی SPEI در مانائوس نشان‌دهنده تقویت روند خشکسالی‌های مختلف است (Millán et al., 2021). در پژوهشی دیگر، نه روش برآورد نمایی شاخص هرست مقایسه شده است. اکثر روش‌های مذکور از شیب انحراف برای برآورد پارامتر هرست مانند محدوده مقیاس‌بندی شده (R/S)، واریانس تجمعی^۱ (AV) و گشتاور مطلق^۲ (AM) استفاده می‌کنند و برخی به روش فیلتراسیون مانند تغییرات گسسته^۳ (DV) متکی هستند، واریانس در مقابل سطح با استفاده از موجک^۴ (VVL) و مشتق گسسته مرتبه دوم با استفاده از موجک^۵ (SODDW) مقایسه‌ای بود که در یک شبیه‌سازی برای یافتن کارآمدترین روش از طریق میانگین خطای مطلق مقیاس‌بندی شده (MASE)^۶ انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که عملکرد روش‌ها نسبتاً نزدیک به هم است، به‌جز روش SODDW در MASE کارآمدترین بود (Hamza and Hmood, 2021). اخیراً نیز کارایی روش‌های برآورد فرآیند حافظه بلندمدت بر اساس رابطه خطی بین هرست (H) و پارامتر اختلاف کسری (d)^۷ که دو رویکرد مورد استفاده برای شناسایی فرآیند حافظه بلندمدت هستند، بررسی شده است. نتایج نشان داد که

¹ Aggregate variance

² Absolute moments

³ Discrete variations

⁴ Variance versus level

⁵ Second-order discrete derivative using wavelets

⁶ Mean absolute scaled error

⁷ Fractional differencing

⁸ Long-term persistence

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

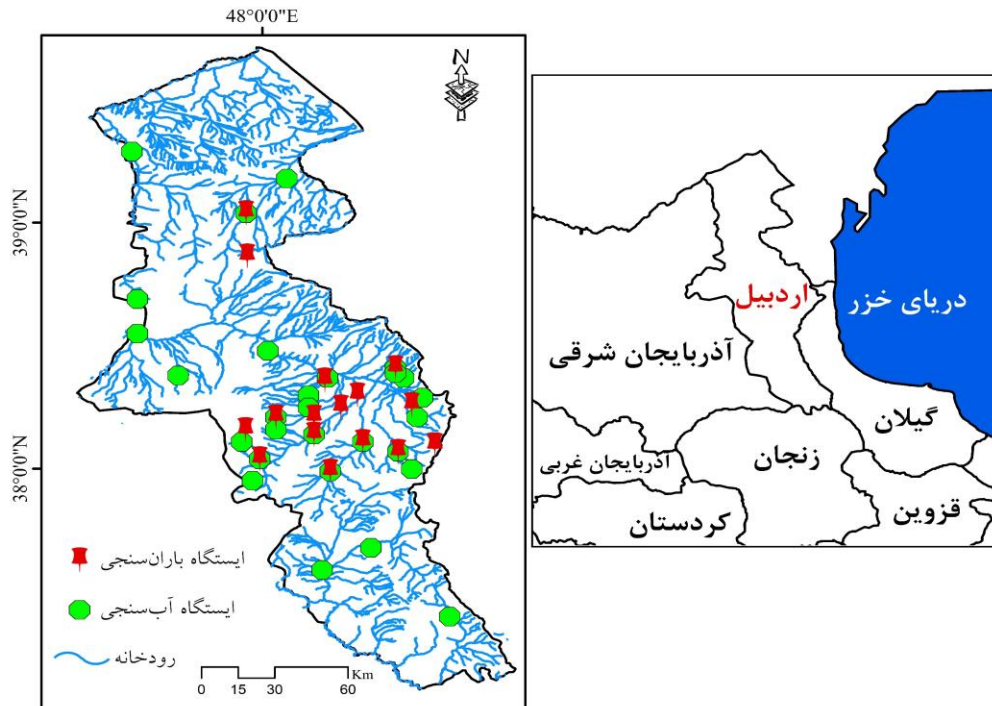
منطقه مورد مطالعه در این پژوهش استان اردبیل با مساحت ۱۷۹۵۳ کیلومتر مربع است که در شمال غربی فلات ایران به مختصات جغرافیایی $26^{\circ} 46' 47''$ تا $34^{\circ} 05' 48''$ طول شرقی و $53^{\circ} 01' 37''$ تا $33^{\circ} 14' 38''$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). تغییرات ارتفاعی آن از ۴۰ تا ۴۸۱۱ متر متغیر است. ارتفاع حداکثر در قله سبلان، ارتفاع حداقل در شهرستان پارس‌آباد و ارتفاع متوسط در دشت اردبیل به ترتیب ۴۸۱۱، ۴۰ و ۱۸۵۰ متر بالاتر از سطح دریا است (مهری و همکاران، ۱۳۹۶). موقعیت خاص جغرافیایی اردبیل سبب شده است که این استان در فصل‌های سرد سال تحت تأثیر توده‌های هوای مهاجر از شمال، شمال غرب و غرب قرار گیرد. غرب استان اردبیل دارای بیش‌ترین مجموع بارش سالانه است. در این مناطق میانگین بارش سالانه بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر برآورد می‌شود. مناطق جنوبی استان اردبیل (شهرستان خلخال) دارای بارش سالیانه در حدود ۳۵۰ میلی‌متر است (Mostafazadeh and Mehri, 2018).

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های سالانه بارش و دبی ایستگاه‌های آب‌سنجی و باران‌سنجی استان اردبیل استفاده شد. از بین ۴۱ ایستگاه آب‌سنجی و ۷۰ ایستگاه باران‌سنجی موجود در استان، آمار ۲۸ ایستگاه آب‌سنجی و ۱۷ ایستگاه باران‌سنجی به دلیل دارا بودن طول دوره آماری بلندمدت استفاده شد (شکل ۱). بر همین اساس، به دلیل انتخاب آماری مشترک و اینکه ایستگاه‌ها در بازه مذکور دارای داده کامل هستند، دوره آماری ۲۳ سال در ایستگاه‌های مورد مطالعه از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۳ در نظر گرفته شد.

در پژوهشی، حافظه بلندمدت و رفتار دینامیکی سیگنال سری زمانی جریان روزانه رودخانه خرم‌آباد با استفاده از شاخص هرست بررسی شده است. نتایج شاخص هرست برابر ۰/۸ به دست آمد که این مقدار نشان از وجود حافظه بلندمدت و رفتار دینامیکی و غیرخطی دارد (Farzin et al., 2020). در ادامه، ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی شاخص‌های فصلی منحنی تداوم جریان (FDCSI) طی چهار دهه در حوزه آبخیز دریاچه نمک صورت گرفت. برای این منظور، ۱۸ ایستگاه با حداکثر آمار بلندمدت (۴۳ سال) انتخاب و مقادیر FDCSI بر اساس دو فصل تابستان (خرداد تا آبان) و زمستان (آذر تا اردیبهشت) استخراج شد. از آزمون‌های ناپارامتری من-کندال، من-کندال اصلاح شده و برآوردگر شیب سن جهت شناسایی روند زمانی و توان هرست جهت بررسی حافظه بلندمدت استفاده شد. بر پایه نتایج هرست، اغلب سری‌های زمانی دارای حافظه بوده ولی الگوهای یکپارچه‌ای تبیین نشد (Sheikh et al., 2019).

محدودیت منابع آب و افزایش نیاز به آب ناشی از افزایش جمعیت، توسعه شهرها و سیاست‌های جدید مدیریت جوامع در ایران منجر به استفاده بی‌رویه و نیز غیراصولی از این منابع شده و مناطق مختلفی را با چالش روبه‌رو کرده است. با توجه به این‌که دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S) هرست یکی از ابزارهای پایش این نوع از مشکلات در بلندمدت توسط تعداد زیادی از مطالعات تجربی پیشنهاد شده است (Feng et al., 2008; Peng et al., 2012; Tian et al., 2019)، بنابراین در پژوهش حاضر، وجود حافظه طولانی‌مدت در سری‌های زمانی بارندگی و دبی سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی و آب‌سنجی منتخب در استان اردبیل ارزیابی شد. در ادامه، وابستگی و پایداری در رفتار رژیم بارش و دبی جریان با استفاده از شاخص هرست تعیین و ضمن ارزیابی تغییرات مکانی، همبستگی مکانی آن با استفاده از شاخص موران مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی و باران‌سنجی مورد استفاده در استان اردبیل

به کار گرفته شده است (Hurst, 1951). هرست با مطالعه تراز آبی رودخانه نیل، آزمونی برای بررسی حافظه بلندمدت ارائه داد که به‌عنوان شاخص هرست نامیده می‌شود (Hurst, 1951). این آزمون در مطالعه حاضر به‌عنوان ابزاری جهت بررسی حافظه بلندمدت سری زمانی داده بارش و دبی در ایستگاه‌های دارای آمار استان اردبیل مورد استفاده قرار گرفته است. نگرش دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S) قدیمی‌ترین نگرش به شاخص هرست است. به کمک این شاخص، تغییرات در تغییرپذیری ظاهری سری زمانی در طول دوره زمانی ارزیابی می‌شود. دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S) توسط تقسیم دامنه مقادیر در بخشی از سری زمانی بر انحراف معیار مقادیر در همان بخش از سری زمانی محاسبه می‌شود (Ghahraman, 2013). با اتخاذ یک سری زمانی رواناب $(x=x_1.x_2....x_n)$ ، ابتدا مقیاس داده‌ها با استفاده از رابطه (۱) نرمال شده که در آن، x_k مقدار سالانه، x_m میانگین سری زمانی و Z_k مقدار رواناب نرمال شده است (Hurst, 1951).

$$Z_k = (x_k - x_m) \quad (1)$$

محاسبه شاخص هرست

شاخص هرست در هیدرولوژی برای اندازه‌گیری میزان سیلاب رود نیل و شرایط خشکسالی که در یک دوره طولانی مشاهده شد، ارائه شده است (Hmood and Hamza, 2021). نام «هرست» از هارولد ادوین هرست^۱ (۱۹۷۸-۱۸۸۰) اقتباس شده است (Hurst, 1951). در سال ۱۹۰۶، هارولد ادوین، مفهوم هرست را برای پیش‌بینی سطح طغیان سالانه رود نیل ارائه داد. ایشان همبستگی‌های درازمدت قابل توجهی بین نوسانات خروجی رود نیل یافت و این همبستگی‌ها را از نظر قانون توانی^۲ توصیف کرد. پس از آن، مطالعات مربوط به شاخص هرست در هیدرولوژی برای تعیین اندازه بهینه سد برای شرایط ناپایدار باران و خشکسالی رودخانه نیل برای مدت زمان طولانی انجام شد (Barbulescu et al., 2010; López-). کاربرد (Lambrano et al., 2010; Millán et al., 2021). شاخص هرست در هیدرولوژی کاملاً اثبات شده و به‌عنوان یک ویژگی مهم برای تحلیل اثرات هیدرولوژی

¹ Harold Edwin Hurst

² Laws of power

تجزیه و تحلیل پراکندگی

تجزیه و تحلیل پراکندگی را می‌توان یک روش مناسب برای توصیف سری‌های زمانی طبیعی دانست که عموماً همبستگی مثبت بلندمدت را نشان می‌دهند (Bassingthwaighte and Raymond, 1995). تجزیه و تحلیل پراکندگی شامل اندازه‌گیری واریانس یا انحراف استاندارد

است. رابطه (۵) نحوه محاسبه تجزیه و تحلیل پراکندگی (D) را نشان می‌دهد.

$$\frac{SD(m)}{SD(m_0)} = \left(\frac{m}{m_0}\right)^{1-D} \quad (5)$$

$$D = 1 - \frac{\log[SD(m)/SD(m_0)]}{\log\left(\frac{m}{m_0}\right)}$$

که در آن، m اندازه عنصر مورد استفاده برای محاسبه انحراف معیار (SD) است و m₀ اندازه طول دوره مبنای انتخابی که شامل تعداد تجمعی سال‌های مورد مطالعه است و بر اساس طول دوره آماری هر ایستگاه انتخاب شده (مبنای محاسبه میانگین) بوده است.

تجزیه و تحلیل همبستگی مکانی شاخص هرست

شاخص موران، مدل متفاوتی برای اندازه‌گیری آماره خودهمبستگی فضایی به‌شمار می‌رود (Fu et al, 2014). دو نوع شاخص موران جهانی و موران محلی برای مشخص نمودن همبستگی فضایی بین متغیرها وجود دارد که کارایی آن‌ها از یکدیگر متفاوت است. شاخص موران (Legros and Dube, 2014). یکی از اساسی‌ترین شاخص‌های جهانی همبستگی، شاخص موران است که طبق رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

در مرحله بعد سری زمانی تجمعی محاسبه می‌شود (رابطه ۲). از آن‌جایی که میانگین Z صفر است، آخرین مقدار Y_n یعنی Y_n صفر خواهد بود. بنابراین دامنه تعدیل شده برابر رابطه‌های (۲) و (۳) خواهد بود.

$$Y_i = \sum_{k=1}^i Z_k \quad (2)$$

$$R_n = \max_{j=1,m} Y_{jn} - \min_{j=1,m} Y_{jn} \quad (3)$$

با توجه به این‌که میانگین Y صفر است، حداکثر مقدار آن همواره بزرگ‌تر یا مساوی صفر و حداقل آن کوچک‌تر یا مساوی صفر خواهد بود. بنابراین، دامنه تعدیل شده همیشه غیر منفی است. در رابطه (۴) R دامنه تغییرات، S انحراف معیار سری زمانی، α عدد ثابت، m تعداد مشاهده‌ها و H مقدار توان هرست است. با رسم آماره (R/S) m در برابر تعداد نقاط سری تجمع یافته بر روی یک نمودار لگاریتمی دوگانه log(m)، یک خط مستقیم حاصل می‌شود که شیب خط یک تخمینی از شاخص هرست می‌باشد (Hurst, 1951).

$$\log\left(\frac{R}{S}\right)_m = \log a + H \log(m) \quad (4)$$

دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S) می‌تواند یک دنباله تصادفی را از یک دنباله غیرتصادفی تشخیص دهد و می‌تواند فرآیند حافظه بلندمدت سیستم‌های غیرخطی را بیان کند (Tian, 2019). جدول (۱) طبقه‌بندی شاخص هرست را نشان می‌دهد. تداوم و پایداری به پنج سطح، از خیلی ضعیف به خیلی قوی تقسیم می‌شود که در آن درجه پایداری به ترتیب از +۱ تا +۵ و درجه ناپایداری به ترتیب از -۱ تا -۵ بیان می‌شود (Tian, 2019).

جدول ۱. طبقات عددی شاخص هرست بر اساس مقیاس‌های پایداری و ناپایداری

درجه	مقیاس پایداری	شاخص هرست	درجه	مقیاس ناپایداری	شاخص هرست
۱	خیلی ضعیف	۰/۵ < H < ۰/۵۵	-۱	خیلی ضعیف	۰/۴۵ < H < ۰/۵۵
۲	نسبتاً ضعیف	۰/۵۵ < H < ۰/۶۵	-۲	نسبتاً ضعیف	۰/۳۵ < H < ۰/۴۵
۳	نسبتاً قوی	۰/۶۵ < H < ۰/۷۵	-۳	نسبتاً قوی	۰/۲۵ < H < ۰/۳۵
۴	قوی	۰/۷۵ < H < ۰/۸۰	-۴	قوی	۰/۲۰ < H < ۰/۲۵
۵	خیلی قوی	۰/۸۰ < H < ۱/۰۰	-۵	خیلی قوی	۰/۱۰ < H < ۰/۲۰

(Tian, 2019)

نتایج و بحث

• بارش

(شکل ۲) تغییرات دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S) مقادیر مجموع بارش سالانه را در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. شکل ۲ از قرارگیری مقادیر لگاریتم گام زمانی در برابر لگاریتم انحراف معیار سری‌های زمانی به دست آمده است. شیب خط برازش برابر با توان یا شاخص هرست بوده و خطی بودن مقادیر لگاریتم این دو متغیر نشان‌دهنده سری تصادفی با حافظه بلندمدت است (Sheikh et al., 2019). ضریب تبیین در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی بالای ۹۰ درصد است. حداکثر ضریب تبیین به ترتیب در ایستگاه‌های آتشگاه و سیاه‌پوش با مقدار عددی ۹۹ درصد و حداقل مقدار آن در ایستگاه گیلانده با مقدار عددی ۹۲ درصد برآورد شده است. (شکل ۳)، تغییرات شاخص هرست را در ایستگاه‌های باران‌سنجی نشان می‌دهد.

با توجه به (شکل ۳)، شاخص هرست برای ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد بررسی با میانگین ۰/۶۴ به دست آمد. حداکثر این مقدار برای ایستگاه کوزه‌تپراقی برابر ۰/۸۹ بوده است که نشان می‌دهد مقادیر بارش سالانه در حوزه کوزه‌تپراقی دارای پویایی غیرخطی بوده و از حافظه بلندمدت برخوردار است. حداقل شاخص هرست برای شمس‌آباد با مقدار عددی ۰/۴۸ به دست آمد که نشان از عدم تداوم سری زمانی دارد. ایستگاه‌های پل‌الماس، گیلانده، سیاهپوس و لای در مقیاس پایداری خیلی ضعیف، نمین، آبی‌بیگلو، آتشگاه، سرعین و نئور در مقیاس پایداری ضعیف، سامیان، اردبیل، ملا احمد و نیر در مقیاس پایداری نسبتاً قوی و کوزه‌تپراقی، هیر و آلاذیزگه در مقیاس پایداری قوی قرار گرفتند. بر اساس، مقادیر شاخص هرست می‌توان گفت که در استان اردبیل پایداری بارش در ایستگاه‌های مختلف از دارای مشابهت نیست که به تغییرپذیری رژیم بارندگی ایستگاه‌ها مرتبط است. تغییرات مکانی شاخص هرست نشان می‌دهد که مقادیر

$$I(d) = \frac{\frac{1}{W} \sum_{h=1}^n \sum_{i=1}^n w_{hi} (z_h - \bar{z})(z_i - \bar{z})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (6)$$

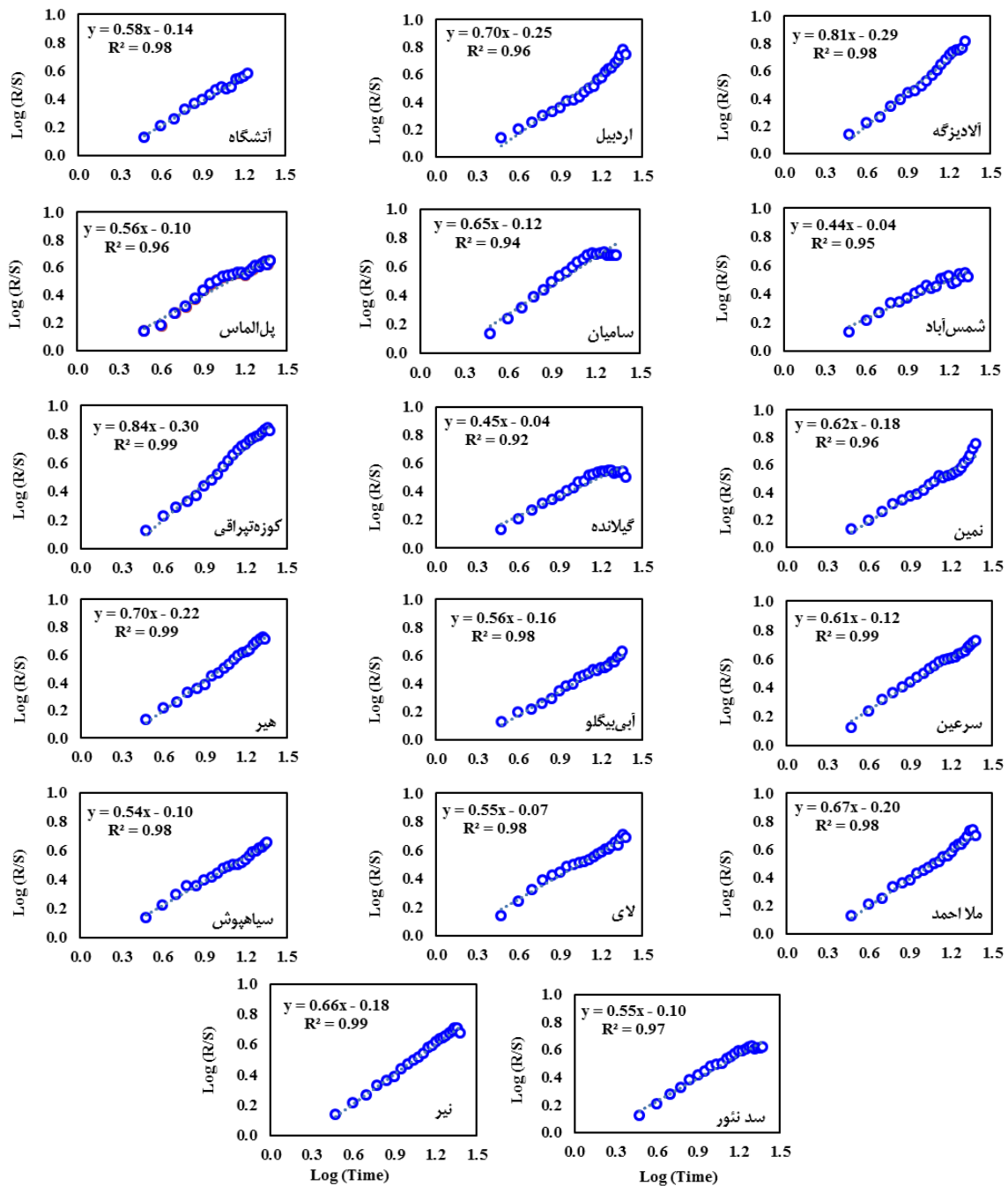
در این رابطه، X_i ضریب متغیر فاصله‌ای یا نسبی در واحدهای ناحیه‌ای i و n تعداد واحدهای ناحیه‌ای است. ضریب موران بین -1 تا 1 متغیر است. ضریب -1 به معنای تعامل فضایی منفی و ضریب 1 معادل تعامل فضایی مثبت است و در صورت فقدان تعامل فضایی، ضرایب مورد انتظار موران برابر صفر است (Fu et al., 2014). شاخص موران بین مقادیر -1 تا $+1$ محاسبه می‌شود. مقدار $+1$ بیان‌گر الگوی کاملاً تک‌قطبی (خوشه‌ای)، مقدار صفر بیان‌گر الگوی تجمع تصادفی یا چندقطبی و مقدار -1 بیان‌گر الگوی پراکنده است. هرچه این ضریب مقدار بالاتری داشته باشد، بیان‌گر تجمع زیاد و هر چه مقدار پایین‌تری داشته باشد، بیان‌گر پراکندگی است (Fu et al, 2014). در تحلیل خوشه و ناخوشه بودن که به شاخص انسلین موران^۱ نیز شناخته می‌شود از ابزارهای مفید برای نمایش توزیع آماری پدیده‌ها در فضا می‌باشد. هم‌چنین محل مقادیر زیاد و کم خوشه‌ها و ناخوشه‌ها را در فضای مورد مطالعه نشان می‌دهد (Bahri and Khosravi, 2018).

تغییرات مکانی شاخص هرست

پس از محاسبه مقادیر شاخص هرست برای بارش و دبی در ۱۷ ایستگاه باران‌سنجی و ۲۸ ایستگاه آب‌سنجی در منطقه مورد مطالعه، مقادیر مذکور به روش وزنی معکوس فاصله (IDW) در نرم‌افزار Arc Map 10.8 درون‌یابی شدند. در درون‌یابی به روش وزن‌دهی عکس فاصله یا IDW فرض بر این است که هر نقطه اندازه‌گیری شده یک تأثیر محلی دارد که با افزایش فاصله از آن این تأثیر کاهش می‌یابد. بنابراین نقاط نزدیک‌تر در پیش‌بینی وزن بیش‌تری نسبت به نقاط دورتر خواهند داشت و تأثیر پدیده مورد نظر با افزایش مسافت کاهش می‌یابد (Siabi and Sanaeinejad, 2013).

¹ Anselin Local Moran I

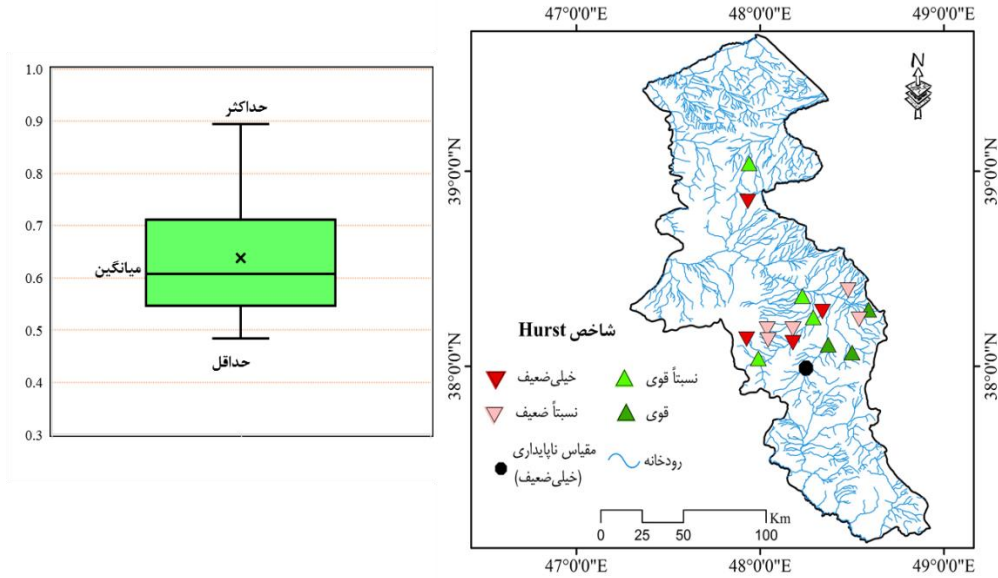
بارش در دوره مورد مطالعه در بخش‌های مرکزی استان دارای پایداری نیست. اما باید اشاره شود که در



شکل ۲. دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S) حداکثر بارش سالانه در ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب استان اردبیل

گرایش مثبت را در آینده حفظ خواهد کرد، زیرا مقدار شاخص هرست برای همه این متغیرها بیش‌تر از ۰/۵ به‌دست آمد (Tian, Et al., 2019). شکل ۴، تغییرات مکانی شاخص هرست در ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب استان اردبیل را نشان می‌دهد.

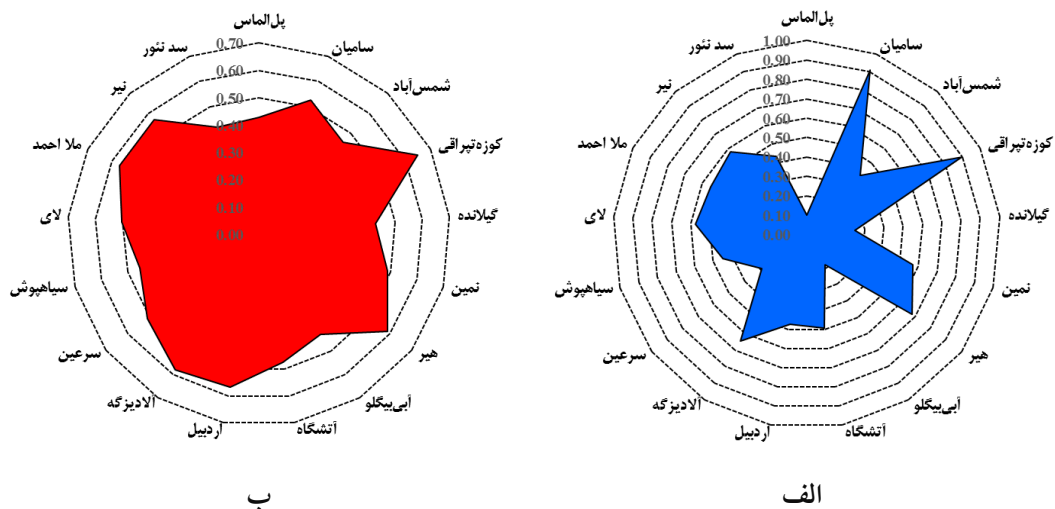
ایستگاه‌های سامیان، اردبیل، ملااحمد، نیر، کوزه‌تپراقی، هیر و آلودیزگه دارای پایداری بالا هستند که نشان از تداوم بارش و وجود حافظه بلندمدت در ایستگاه‌های مذکور است. در همین راستا، تغییرات شاخص هرست برای شمال غرب چین به‌دست آمد. آن‌ها بیان کردند که بارش، تبخیر و رواناب در شمال غرب چین احتمالاً



شکل ۳. تغییرات شاخص هرست در ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب استان اردبیل

پراکندگی و ریسک EDEC در ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب استان اردبیل ارائه شده است. با توجه به (شکل ۵)، میانگین تجزیه و تحلیل پراکندگی برای ایستگاه‌های باران‌سنجی برابر با ۰/۵۰ محاسبه شد. حداقل و حداکثر این مقدار به ترتیب برای ایستگاه پل‌الماس برابر ۰/۱۰ و سامیان با مقدار عددی ۰/۹۱ به دست آمد.

با توجه به شکل ۴، نتایج حاکی از این است که تغییرات شاخص هرست در اکثر مناطق در مقیاس پایداری ضعیف و بخش‌هایی از شمال شرقی و مرکزی در مقیاس پایداری نسبتاً قوی قرار گرفته‌اند. در همین راستا، تغییرات شاخص هرست ۰/۶۵ برای حوضه دریاچه ارومیه به دست آمده است و مشخص شد که سری‌های زمانی بارش و دبی دارای تداوم بلندمدت نسبتاً متوسطی هستند (Fathian and Morid, 2012). در شکل ۵ تغییرات مقادیر تجزیه و تحلیل



شکل ۵: تغییرات مقادیر تجزیه و تحلیل پراکندگی (الف) و ریسک EDEC (ب) در ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب استان اردبیل

موران هستند، به عبارتی دارای مقادیر مشابه از نظر مکانی هستند. در بقیه ایستگاه‌ها مقدار شاخص موران منفی هستند که به معنی عدم مشابهت مقادیر متغیرهای مورد بررسی بود و در حقیقت تشکیل خوشه نداده‌اند.

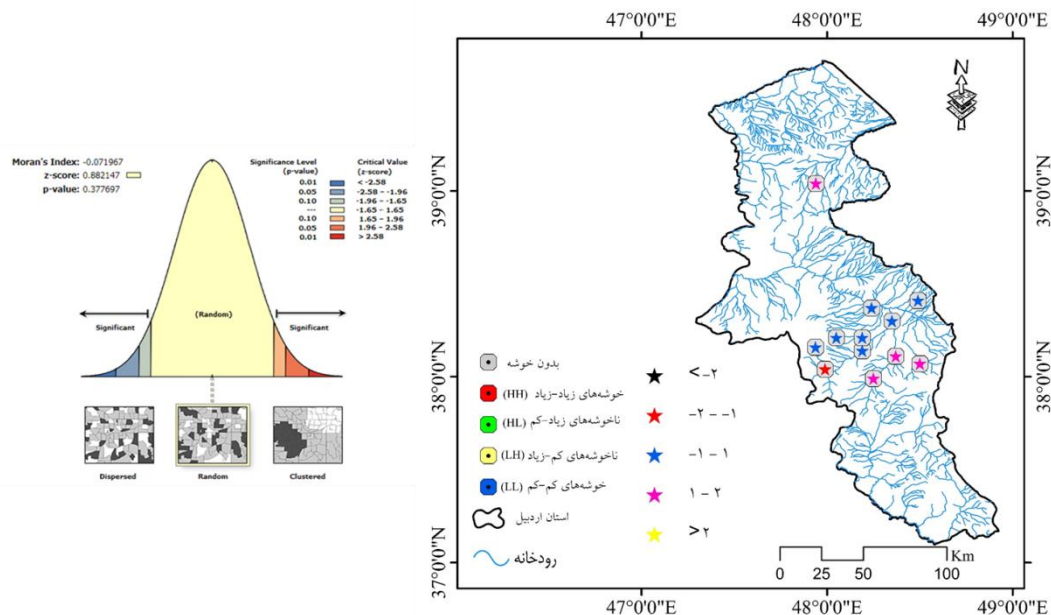
• دبی جریان آب

شکل ۷، تغییرات دامنه مقیاس‌بندی شده (R/S) حداکثر دبی سالانه را در ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب استان اردبیل نشان می‌دهد.

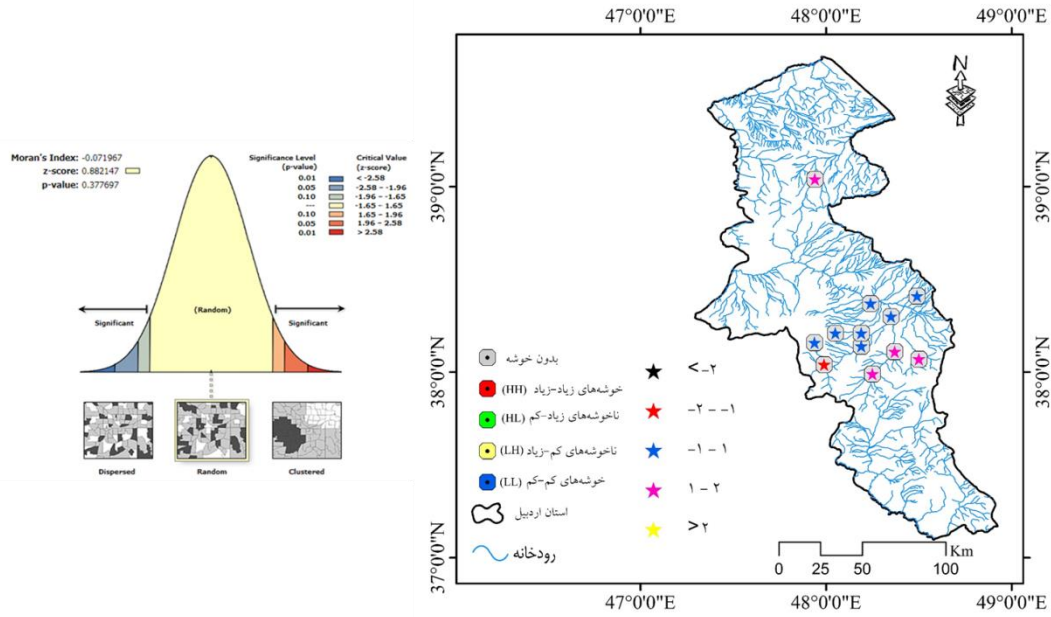
با توجه به شکل ۷، ضریب تبیین در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی بالای ۹۰ درصد است، به‌نحوی که حداکثر ضریب تبیین در ایستگاه‌های آبگرم، دوست‌بیگلو و احمدکندی با مقدار عددی ۹۹ درصد و حداقل آن در ایستگاه آتشگاه با مقدار عددی ۹۳ درصد به‌دست آمد. شکل ۸، تغییرات مقادیر شاخص هرست را در ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب استان اردبیل نشان می‌دهد.

مقادیر بالای شاخص مذکور بیان‌گر تغییرپذیری بیش‌تر مقادیر بارش سالانه در دوره آماری است که حاکی از عدم قطعیت در مقادیر آب در دسترس خواهد بود و نیز احتمال وقوع دوره‌های خشکسالی بسیار بالاتر خواهد بود. هم‌چنین طبق نتایج میانگین ریسک EDEC برای ایستگاه‌های باران‌سنجی برابر با ۰/۵۱ محاسبه شد. حداقل و حداکثر این مقدار به‌ترتیب برای ایستگاه سد نور برابر با ۰/۴۲ و کوزه‌تپراقی با مقدار عددی ۰/۶۵ به‌دست آمد. در شکل ۶، نمودار گرافیکی شاخص همبستگی موران ارائه شده است.

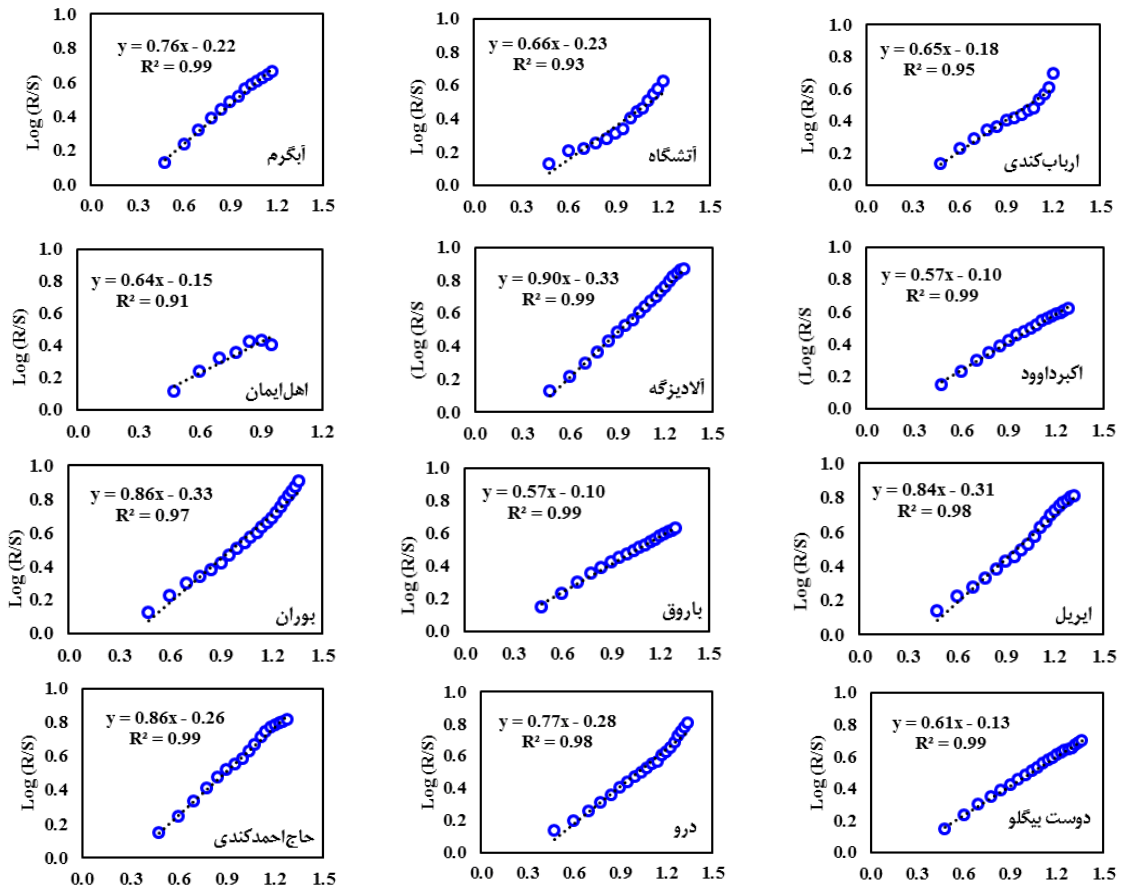
بر اساس نتایج شکل ۶، نتایج حاصل از امتیاز استاندارد Z و مقادیر P-Value خوشه‌ای بودن توزیع فضایی هرست را در ایستگاه‌های باران‌سنجی را اثبات نمود. به عبارتی می‌توان گفت که مقادیر داده‌های شاخص هرست در ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد مطالعه با همدیگر همبستگی مکانی دارند. تمامی ایستگاه‌ها بدون الگوی مشخص خوشه‌بندی هستند. بر اساس نتایج هیر، کوزه‌تپراقی و شمس‌آباد و احمدکندی دارای مقادیر مثبت شاخص



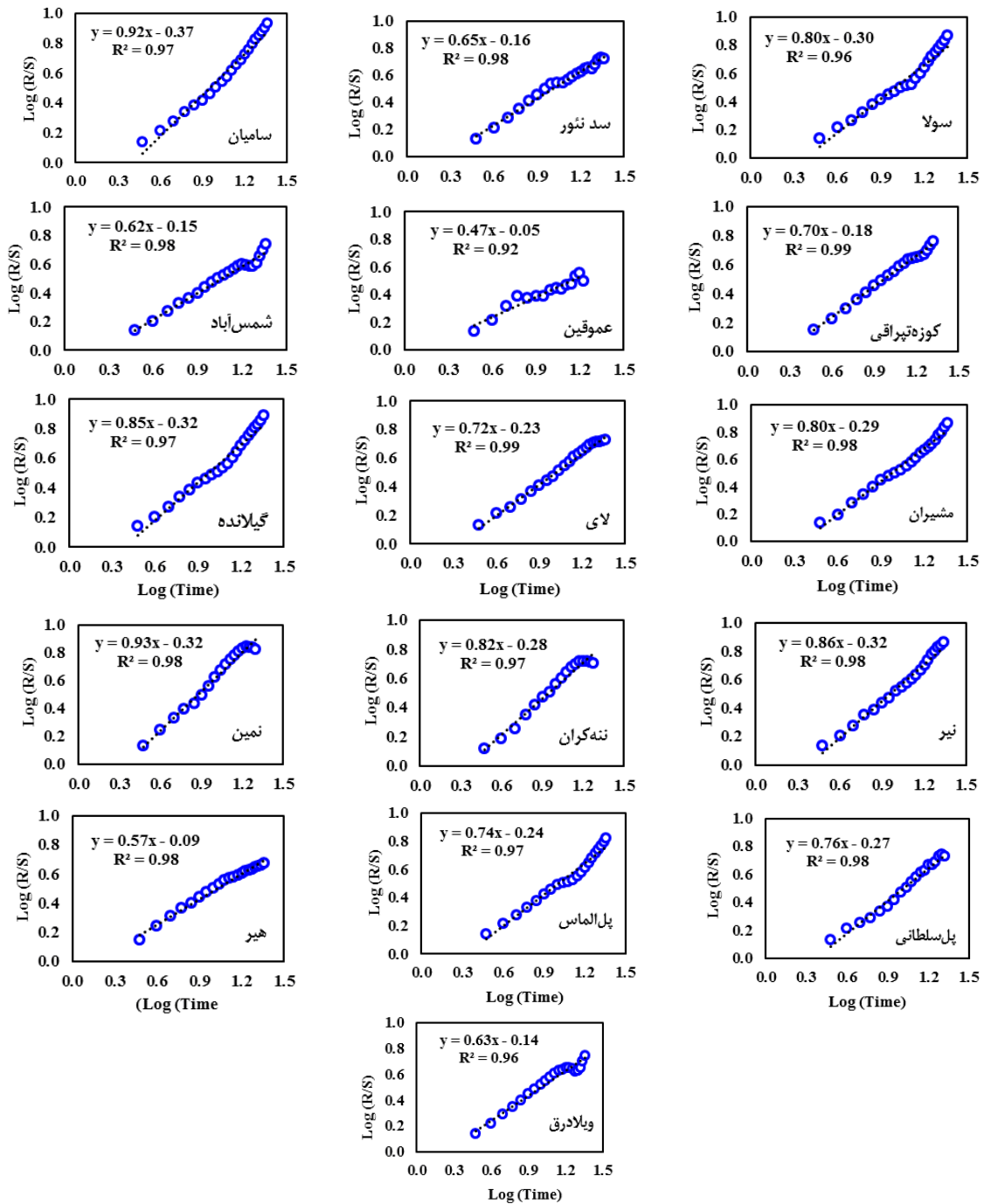
شکل ۶. نمودار گرافیکی شاخص همبستگی موران



شکل ۶. نمودار گرافیکی شاخص همبستگی موران



شکل ۷. تغییرات دامنه مقیاس بندی شده (R/S) حداکثر دبی سالانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب استان اردبیل



ادامه شکل ۷. تغییرات دامنه مقیاس بندی شده (R/S) حداکثر دبی سالانه در ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب استان اردبیل

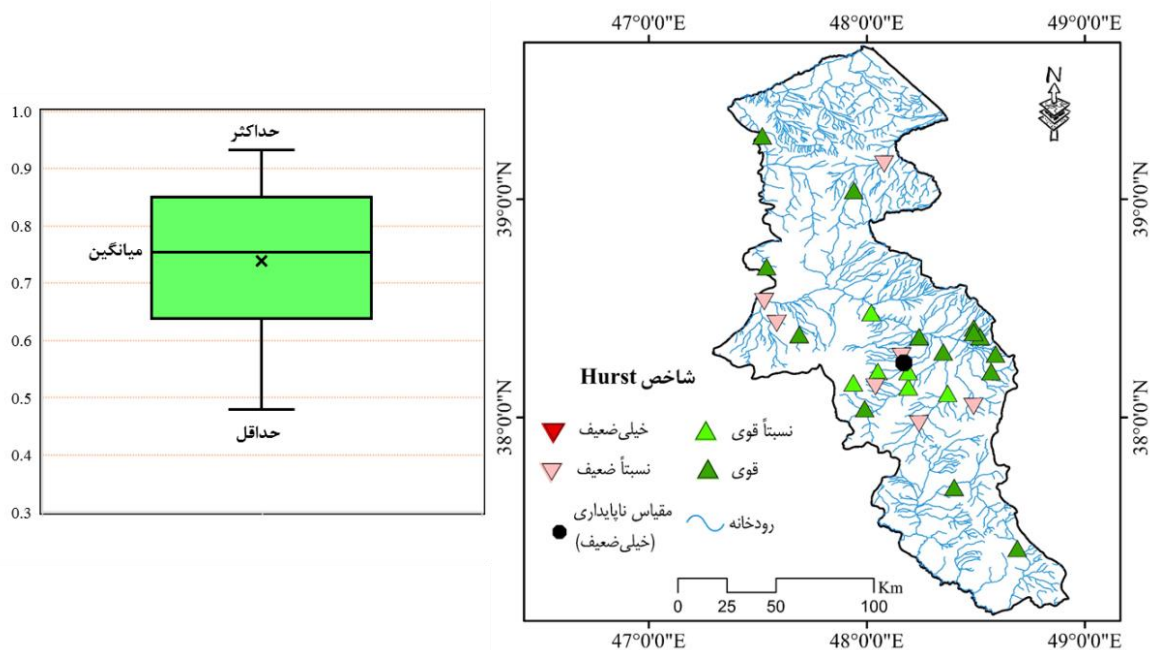
در آینده در منطقه است (Vega et al., 2019). ایستگاه‌های اکبرداوود، اهل ایمان، باروق، دوست‌بیگلو، شمس‌آباد، ویلادرق و هیر نسبتاً ضعیف، آتشگاه، ارباب‌کندی، پل‌الماس، سد نئور، کوزه‌تپراقی و لای در مقیاس پایداری نسبتاً قوی و آبگرم، آلاذیزگه، ایریل، بوران، پل‌سلطانی، احمدکندی، درو، سامیان، سولا، گیلانده، مشیران، نمین، ننه‌کران و نیر در مقیاس پایداری قوی قرار گرفتند.

با توجه به شکل ۸، شاخص هرست در ایستگاه‌های آب‌سنجی با میانگین 0.74 به‌دست آمد. حداکثر و حداقل این مقدار به‌ترتیب برای ایستگاه نمین برابر 0.93 و با مقدار عددی 0.48 به‌دست آمد. در همین راستا، وگا و همکاران بازه تغییرات شاخص هرست را بین 0.38 تا 0.73 برای جنگل‌های بارانی برزیل به‌دست آوردند. آن‌ها اذعان کردند این مقادیر نشان‌دهنده روند مداوم الگوهای مرطوب

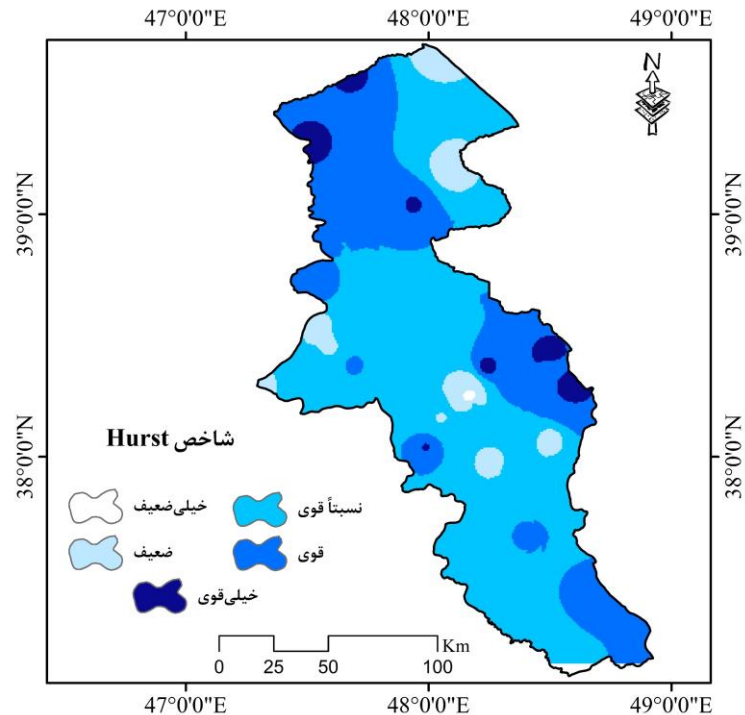
رفتار دینامیکی و غیرخطی بیان نموده‌اند، هم‌خوانی دارد. (Ansari ghoghhar et al., 2021) مقدار شاخص هرست ۰/۵ را برای مناطق غرب و جنوب غرب کشور به دست آوردند. آن‌ها اذعان کردند این مقادیر در واقع از واریانس کافی جهت تحلیل روند سری‌های زمانی برخوردار هستند. (شکل ۹)، تغییرات مکانی شاخص هرست در ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب استان اردبیل را نشان می‌دهد.

با توجه به (شکل ۹)، نتایج حاکی از این است که تغییرات شاخص هرست در بخش‌های شمالی و قسمت‌هایی از شرق و جنوب شرقی استان در مقیاس پایداری قوی و در بخش‌های غربی و قسمت‌هایی از شمال شرقی و مرکزی در مقیاس پایداری نسبتاً قوی قرار دارد. در (شکل ۱۰) تغییرات مقادیر تجزیه و تحلیل پراکندگی و ریسک EDEC در ایستگاه‌های آب‌سنجی ارائه شده است.

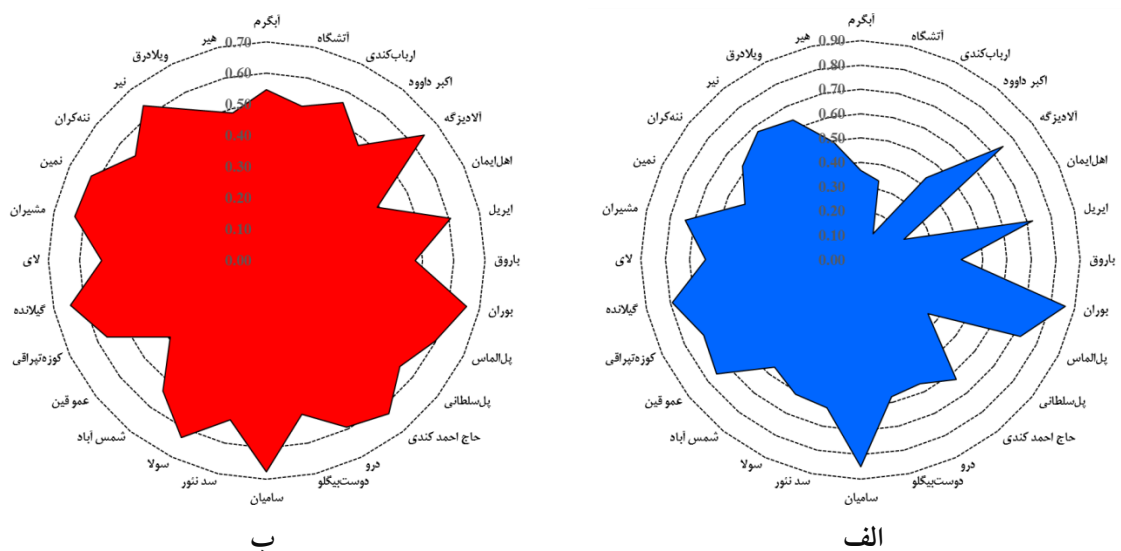
در مجموع بر اساس نمودار جعبه‌ای، دامنه تغییرات و نیز پراکنش مکانی ایستگاه‌هایی با پایداری قوی و نسبتاً قوی، می‌توان گفت که بیش‌تر ایستگاه‌های واقع در محدوده مرکزی استان دارای پایداری در مقادیر دبی هستند که می‌تواند بیان‌گر تداوم جریان‌های پربابی و هم وقوع دبی‌های حداکثر باشد. این در حالی است که پیش‌بینی روند تغییرات در آینده نیازمند تحلیل‌های بیش‌تر در خصوص روند با استفاده از پیش‌بینی‌های اقلیمی است. باید اشاره شود که اثر تنظیمی احداث سد و یا برداشت‌های انسانی می‌تواند تغییرپذیری داده‌های دبی جریان را از حالت طبیعی خارج نماید که می‌تواند بر روی مقادیر محاسباتی و در نتیجه پایداری جریان تأثیر داشته باشد؛ اما تحلیل‌ها با لحاظ این پیش‌فرض و وجود اثرات اثرات مذکور انجام شده است. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج (Farzin et al., 2020) که مقادیر بالای شاخص هرست برابر ۰/۸ را نشان از وجود حافظه بلندمدت و



شکل ۸. تغییرات مقادیر شاخص هرست در ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب استان اردبیل



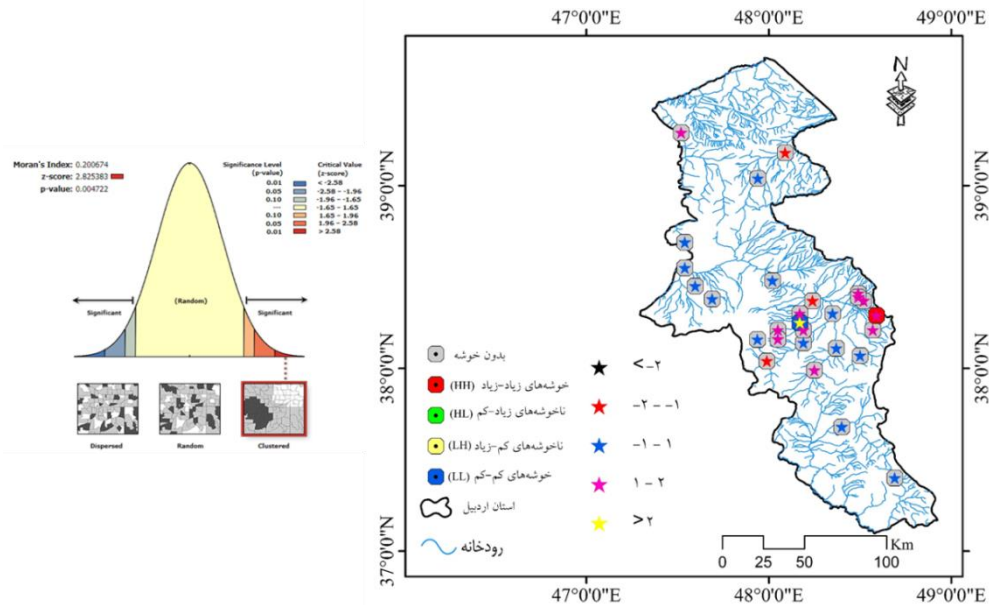
شکل ۹. تغییرات مکانی شاخص هرست در ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب استان اردبیل



شکل ۱۰. تغییرات مقادیر تجزیه و تحلیل پراکندگی (الف) و ریسک EDEC (ب) در ایستگاه‌های آب‌سنجی منتخب استان اردبیل

با ۰/۵۶ محاسبه شد. حداقل و حداکثر این مقدار به ترتیب برای ایستگاه اهل‌ایمان برابر با ۰/۳۹ و سامیان با مقدار عددی ۰/۶۸ به دست آمد. در شکل ۱۱، نمودار گرافیکی شاخص همبستگی موران در ایستگاه‌های آب‌سنجی ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۰، بر همین اساس، تجزیه و تحلیل پراکندگی برای ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد بررسی با میانگین ۰/۵۰ به دست آمد. حداقل و حداکثر این مقدار به ترتیب برای ایستگاه‌های پل‌الماس برابر ۰/۱۰ و سامیان با مقدار عددی ۰/۹۱ بوده است. همچنین طبق نتایج میانگین ریسک EDEC برای ایستگاه‌های باران‌سنجی برابر



شکل ۱۱. نمودار گرافیکی شاخص همبستگی موران

بر اساس نتایج شکل ۱۱، شاخص موران مشخص شد که مقادیر مثبت شاخص Z بیانگر همبستگی مکانی میان مقادیر شاخص هرست در ایستگاه‌های مورد مطالعه است که معنی‌داری آن‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر p-value کم‌تر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده این است که داده‌ها دارای ساختار و همبستگی مکانی هستند. نتایج خوشه‌بندی نشان داد که ایریل در طبقه خوشه‌بندی زیاد-زیاد قرار گرفت و آتشگاه در خوشه‌های کم-کم و مقادیر مثبت شاخص موران طبقه‌بندی شد. بقیه ایستگاه‌های مورد مطالعه، خوشه‌های مشخصی تشکیل ندادند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی شاخص هرست و مقایسه میزان تغییرات آن از داده‌های آماری ۲۸ ایستگاه آب‌سنجی و ۱۷ ایستگاه باران‌سنجی بر اساس دوره آماری مشترک ۲۲ ساله (۱۳۷۰ تا ۱۳۹۲) استفاده شد. پس از محاسبه شاخص هرست، مقادیر آن به روش وزنی معکوس فاصله (IDW) پهنه‌بندی شد. نتایج نشان داد که شاخص هرست برای ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد بررسی با میانگین ۰/۶۴ و انحراف معیار ۰/۱۱ به دست آمد. در حالت کلی از ۱۷ ایستگاه مورد بررسی به ترتیب

۲۳/۵۳، ۲۹/۴۱، ۱۷/۶۵، ۲۳/۵۳ درصد در مقیاس پایداری خیلی ضعیف ($0/05 < H < 0/5$)، نسبتاً ضعیف ($0/65 < H < 0/55$)، نسبتاً قوی ($0/75 < H < 0/65$) و قوی ($0/80 < H < 0/75$) قرار گرفتند. در این میان، تنها ۵/۸۸ درصد مربوط به ایستگاه شمس‌آباد در مقیاس ناپایداری خیلی ضعیف ($0/45 < H < 0/55$) دسته‌بندی شد. همچنین شاخص هرست در ایستگاه‌های آب‌سنجی با میانگین ۰/۷۴ و انحراف معیار ۰/۱۲ به دست آمد. طبق تجزیه و تحلیل ۲۸ ایستگاه آب‌سنجی مورد بررسی به ترتیب ۲۵، ۵۰ و ۲۱/۴۲ درصد در مقیاس پایداری نسبتاً ضعیف، قوی و ۳/۵۸ درصد در مقیاس ناپایداری خیلی ضعیف قرار گرفتند. در این بین، تنها ایستگاه عموقین در مقیاس ناپایداری خیلی ضعیف دسته‌بندی شد. در مجموع، دامنه مقادیر شاخص هرست و تغییرات مکانی آن در مورد داده‌های بارش سالانه نشان داد که مقادیر بارش در دوره مورد مطالعه دارای پایداری مناسبی نیست. تغییرات مکانی شاخص‌های مذکور نشان داد که تفاوت مشخصی بین مناطق مختلف استان از نظر پایداری مقادیر بارش و دبی وجود دارد. این در حالی است که بر اساس نمودار جعبه‌ای، دامنه تغییرات و نیز پراکنش مکانی ایستگاه‌هایی با پایداری قوی و نسبتاً قوی، بیش‌تر ایستگاه‌های واقع در

محدوده مرکزی استان دارای پایداری در مقادیر دبی هستند که می تواند بیانگر تداوم جریان های پرآبی و هم وقوع دبی های حداکثر باشد. قابل ذکر است که ارزیابی تغییرات پایداری مقادیر بارش و دبی در آینده، نیازمند پیش بینی مقادیر بارش و دبی حداکثر و تحلیل های بیش تر از طریق آزمون روند است. در مجموع، مطالعه تغییرات مکانی شاخص هرست در خصوص داده های بارش و دبی از نقاط قوت تحقیق حاضر است. از طرفی ارزیابی همبستگی مکانی مقادیر شاخص هرست از طریق محاسبه شاخص موران از مواردی است که تحقیق حاضر را از

تحقیق های قبلی متمایز می نماید. در حالت کلی تداوم بلندمدت در سری زمانی دبی قوی تر از سری زمانی بارش است و نیاز به مطالعه یک دوره بلندمدت تری از دوره در نظر گرفته شده در این تحقیق، به منظور دلالت بهتر بر وجود روند را ایجاب می کند. همچنین از آنجایی که ارزیابی فصلی شاخص ها، می تواند انعکاس بهتری از رژیم جریان رودخانه ها طی دوره های متفاوت ارائه کند. از این رو پیشنهاد می شود که شاخص هرست در دوره زمانی ماهانه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

Reference:

- Ansari ghoghghar, M., Pourgholam-Amiji, M. and Araghinejad, Sh. 2021. Investigating the relationship between drought and trend of the frequency of dust storms in the west and southwest of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(11): 2839-2852. [in Persian]
- Bahri, A., and Khosravi, Y. 2018. Application of ArcGIS spatial statistical tools in environmental sciences. *Geospatial Engineering Journal*, 9 (3): 39-50. [in Persian]
- Barbulescu, A., Serban, C., Maftai, C. 2010. Statistical analysis and evaluation of Hurst coefficient for annual and monthly precipitation time series. *Wseas Transactions on Mathematics*, 10(9): 791-800.
- Bassingthwaight, J.B., and Raymond, G.M. 1995. Evaluation of the dispersion analysis method for fractal time series. *Annals of Biomedical Engineering*, 23(4):491-505.
- Benavides-Bravo, F.G., Almaguer, F. Soto-Villalobos, R. Tercero-Gómez, V. and Morales-Castillo, J. 2015. Clustering of rainfall stations in RH-24 Mexico region using the Hurst exponent in semivariograms. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 629254, 7 pages.
- Ding, L., Luo, Y. Lin, Y. and Huang, Y. 2021. Revisiting the relations between Hurst exponent and fractional differencing parameter for long memory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 566(1):125603.
- Dube, J., and Legros, D. 2014. Spatial autocorrelation. *Spatial Econometrics using Microdata*. 51-91.
- Farzin, S. Mirhashemi, H. Abbasi, H. Maryanaji, Z. and Khosravinia, P. 2020. Assessing memory signal of time-series and simulation of rainfall-runoff process, using neural networks and wavelet-neural hybrid models. *Watershed Engineering and Management*, 11(4): 1059-1074. [in Persian]
- Fathian, F., and Morid, S. 2012. Trend Analysis of Meteorological and Hydrological Variables in Urmia Lake Basin by use of Non-parametric Methods. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 43(3): 259-269. [in Persian]
- Feng X. L., Luo, L.C. Qiu, L.L. Liu, P. and Feng, Z.L. 2008. Fractal analysis of climate change and Hurst index experiment in Tibetan plateau in future. *Arid Land Geography*, 31(2), 175-181.
- Fu, W.J., Jiang, P.K. Zhou, G.M. and Zhao, K.L. 2014. Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China. *Biogeosciences*. 11, 2401–2409.
- Garberchet, J., Van, M. and Brown, G.O. 2004. Trends in precipitation, streamflow, and evapotranspiration in the great plains of the United States. *Hydrologic Engineering*, 9(5): 360-367.
- Ghahraman, B. 2013. Performance of some different methods of computing Hurst exponent for climatological time series. *Journal of Water and Soil*, 27(4): 850-859. [in Persian]
- Hamza, A.H., and Hmood, M.Y. 2021. Comparison of Hurst exponent estimation methods. *Journal of Economics and Administrative Sciences*, 27(128): 167-183.
- Hurst, H.E. 1951. Long-term storage capacity of reservoirs (with discussion). *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116: 770–808.
- Jones, J., Creed, I.F. Hatcher, K. Warren, R. Adams, M. Benson, M. Boose, M. Brown, M. and campbe, J. 2012. Williams. Ecosystem Processes and human influences regulate streamflow response to climate change at long-term ecological research sites. *Biological Sciences*, 62(4): 390-404.
- Koutsoyiannis, D. 2003. Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics. *Hydrological Sciences Journal*, 48(1): 3-24.

- Koutsoyiannis, D., Paschalis, A. and Theodoratos, N. 2011. Two-dimensional Hurst-Kolmogorov process and its application to rainfall fields. *Journal of Hydrology*, 398(1):91-100.
- Liu, J. Chen, J. Xu, J. Lin, Y. Yuan, Z. and Zhou, M. 2019. Attribution of runoff variation in the headwaters of the Yangtze River based on the Budyko hypothesis. *International journal of environmental research and public health*, 16(14): 2506.
- López-Lambraño, A.A. Fuentes, C. López-Ramos, A.A. Mata-Ramírez, J. and López-Lambraño, M. 2018. Spatial and temporal Hurst exponent variability of rainfall series based on the climatological distribution in a semiarid region in Mexico. *Atmósfera*, 31(3): 199-219.
- Mehri, S. Mostafazadeh, R. Esmaliouri, A. and Ghorbani, A. 2017. Spatial and temporal variations of Base Flow Index (BFI) for the Ardabil Province Rivers, Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(3): 623-634. [in Persian]
- Millán, G. Macías, I. and Rabelo-Lima, J. 2021. Hurst scaling with crossover of a drought indicator: a case study in Belem and Manaus, Brazil. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04937-w>.
- Mostafazadeh, R. and Mehri, S. 2018. Determination of the precipitation regime and the seasonality index variations in the central part of the Ardabil Province. *Watershed Management Research*, 31(3): 28-39. [in Persian]
- Munshi, J. 2017. The Hurst exponent of precipitation: England and Wales 1766-2016. Available at SSRN 2931893.
- Peng, J. Liu, Z. Liu, Y. Wu, J. and Han, Y. 2012. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent. *Ecological Indicators*, 14(1): 28-39.
- Sheikh, Z. Yazdani, M.R. and Moghaddam nia, A. 2019. Evaluation of spatio-temporal changes of flow duration curve seasonal indexes (FDCSI) in four decades in Namak Lake Basin. *Iran-Water Resources Research*, 15(2): 39 -56. [in Persian]
- Siabi, N., and Sanaeinejad, H. 2013. An investigation into using of combined geostatistical methods to increase precision in climatological classification and climatic parameters zoning in great Khorasan. *Journal of Climate Research* 15(4): 81-32. [in Persian]
- Tian, Y. Zhong, D. Wei, Y. Morovati, K. Meng, Ch. and Zhang, M. 2019. Precipitation, runoff, and evaporation trends in Northwest China over the Past 40 Years. E-proceedings of the 38th IAHR World Congress. September 1-6, 2019, Panama City, Panama.
- Vega, H. M. Lima, J.R. and Cerniak, S.N. 2019. SPEI and Hurst analysis of precipitation in the Amazonian Area of Brazil. *Revisal Brasília de Meteorology*: 34: 325-334.
- Zamani, R., Mirabbasi, R., Abdollahi, S. and Jhahharia, D. 2017. Streamflow trend analysis by considering autocorrelation structure, long-term persistence, and Hurst coefficient in a semi-arid region of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(1), 33-45.



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation**
(WSRCJ)

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 11
No. 2
Winter 2022**

**Received:
2021-09-09**

**Accepted:
2021-12-18**

Pages: 113-131



Determining Long-term Memory using Hurst Index for Precipitation and Discharge Time Series of Selected Stations in Ardabil Province

Raof Mostafazadeh¹, Vahideh Moradzadeh², Nazila Alaei³ and Zeinab Hazbavi^{4*}

- 1) Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
 - 2) M.Sc. Student, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
 - 3) Ph.D. Student Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.
 - 4) Assistant Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
- *Corresponding author email: z.hazbavi@uma.ac.ir

Abstract

Background and Aim: Ecosystems disturbances induced from social factors affect the environmental changes, temperature, evapotranspiration, runoff production and flow rate. In this regard, Hurst index has been used to analyze changes in hydrological processes due to various factors. The Hurst index is known as an important feature for analyzing hydrological effects. One of the most appropriate tests for long-term memory detection is the rescaling range (R/S) test. The R/S test makes it possible to calculate the self-similarity parameter H (Hurst), which measures the severity of long-term dependence over a time series. Towards this, the present study was conducted to determine the long-term memory using Hurst index for precipitation and discharge time series throughout some selected stations in Ardabil Province, NW Iran.

Method: In the present study, long-term memory for annual precipitation and discharge time series (1991-2013) in 17 rain gauges stations and 28 river gauge stations in Ardabil Province was assessed. The Hurst index computational values were classified into five categories from very weak to very strong in terms of dependency and scale of instability in the time series. Spatial correlation analysis of Hurst index was performed using Moran index. The Hurst index values were then interpolated by the inverse weighted distance (IDW) method in Arc Map 10.8.

Results: The results showed that the among 17 study stations, 23.53, 29.41, 17.65, and 23.53% respectively were classified in the stability scale of very weak ($0.50 < H < 0.55$), relatively weak ($0.55 < H < 0.65$), relatively strong ($0.65 < H < 0.75$), and strong ($0.75 < H < 0.80$). Meanwhile, only 5.88% including Shamsabad station were classified as very weak ($0.45 < H < 0.55$) in terms of instability scale. According to the analysis of 28 hydrometric stations, 25, 50, and 21.42% were respectively relatively weak, relatively strong, and strong, and 3.58% were very weak on the instability scale, respectively. In the meantime, only the Amuqin Station was categorized with very poorly scale. According to the results of Hir, Koozeh Tapraghi, Shamsabad and Ahmadkandi rain gauge stations, a positive value of Moran index was found indicating similar values in terms of location. In the other stations, the Moran index values are negative, indicating non-similar values and no clusters were formed. The results of clustering in hydrometric stations showed that Iril Station was in the high-high clusters and the Atashgah Station was classified in the low-low clusters and positive values of Moran index. The rest of the study stations did not form specific clusters.

Conclusion: The results showed that the Hurst index was obtained for the rainfall stations with an average of 0.64 and a standard deviation of 0.11. The Hurst index was also obtained in hydrometric stations with an average of 0.74 and a standard deviation of 0.12. In general, the range of Hurst index values and its spatial variations on annual precipitation data showed that precipitation values in the study period are not stable. Spatial changes of the mentioned indicators showed that there is a clear difference between different regions of the province in terms of stability of precipitation and discharge. However, according to the box diagram, amplitude of changes and spatial distribution of stations with strong and relatively strong stability, most stations located in the central part of the province have stability in discharge values, which can indicate the continuation of water currents and the occurrence of maximum discharges.

Keywords: Climate change, Dispersion analysis, Rescaling range (R/S), Time series analysis