

مقاله پژوهشی

ارزیابی مقایسه‌ای شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از کریجینگ و آنتروپی

سمیرا بیاتی^۱ - خدایار عبدالمهی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶

چکیده

یک شبکه باران‌سنجی بهینه برآورد واقع‌گرایانه‌ای از میانگین یا پراکنش بارش نقطه‌ای حوزه آبخیز دارد. گرچه افزایش تراکم شبکه باران‌سنجی موجب کاهش خطای برآورد می‌گردد اما تعداد ایستگاه‌های بیشتر به معنای هزینه نصب و نظارت بیشتر است. هدف از مطالعه حاضر ارزیابی وضعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و تئوری آنتروپی است. بدین منظور وضعیت آماری ایستگاه‌های این استان مطالعه و دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ به عنوان پایه زمانی مشترک انتخاب و همگنی، وجود روند در سری زمانی داده‌ها و کفایت تعداد باران‌سنج‌ها در شبکه باران‌سنجی بررسی شد. سپس با استفاده از روش کریجینگ، نقشه‌های درون‌یابی بارش سالانه و خطای استاندارد آن‌ها در دوره مورد مطالعه تهیه و سهم هر ایستگاه در کاهش یا افزایش خطا در شبکه باران‌سنجی با حذف هر ایستگاه بررسی شد. با استفاده از مفهوم آنتروپی، کارایی شبکه باران‌سنجی منطقه مورد مطالعه ارزیابی و مقادیر شاخص‌های آنتروپی محاسبه گردید. در نهایت ارزش و اهمیت ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از شاخص اطلاعات خالص تبادل سنجیده شد. نتایج این مطالعه، همگنی داده‌ها و عدم وجود روند معنی‌دار در سری داده‌ها را نشان داد. نتایج محاسبه خطای کریجینگ نشان داد که با حذف ایستگاه آب ترکی مقدار خطا ۰/۰۳٪ و با حذف هریک از ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن و بارز مقدار خطا ۰/۰۱٪ افزایش می‌یابد، لذا از اهمیت بالاتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها برخوردارند. طبق نتایج شاخص اطلاعات خالص تبادل ایستگاه‌های بارده، بره مرده و ذک‌آباد به ترتیب با رتبه‌های ۱ تا ۳ دارای انتقال و دریافت اطلاعات و ارزش حفظ بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها بودند.

واژه‌های کلیدی: انتقال اطلاعات، بارش سالانه، درون‌یابی، زمین‌آمار، شبکه باران‌سنجی

مقدمه

است (۱). تراکم و توزیع بهینه باران‌سنج‌ها در شبکه باران‌سنجی نقش به‌سزایی در موفقیت بیشتر طرح‌های آبی و استفاده مؤثر از اطلاعات ایفا می‌کند (۱۲). یک شبکه باران‌سنجی قابل اطمینان، داده‌های بارندگی سریع و دقیق را ارائه می‌دهد که برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی قابل اجرا و اقتصادی در کنترل سیل بسیار مهم است (۱). بنابراین شبکه باران‌سنجی با طراحی خوب باید شامل تعداد کافی باران‌سنج باشد که نشان‌دهنده تنوع مکانی و زمانی بارندگی (۳۶) و قادر به تخمین بهتر بارش با تعداد مناسب ایستگاه‌ها در حوضه آبریز باشد (۲۱). این درحالی است که استفاده از داده‌های نادرست بارش ممکن است منجر به خطاهای قابل توجهی در طراحی پروژه‌های منابع آب و در نهایت منجر به خسارات جانی و مالی قابل توجهی شود. بنابراین، شناسایی و انتخاب بهترین پیکربندی شبکه با داشتن تعداد و مکان‌های مطلوب ایستگاه‌های باران‌سنجی، تنها هدف طراحی شبکه است (۱). می‌توان با حذف ایستگاه‌های اضافی برای به

داده‌های بارندگی، کاربردهای مختلفی در مدیریت منابع آب از جمله تجزیه و تحلیل و ارزیابی بودجه آب، تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی فرکانس سیل، تخمین جریان رودخانه و طراحی سازه‌های هیدرولیکی دارند. هیدرولوژیست‌ها معمولاً ملزم به تخمین میزان متوسط بارش در گستره حوضه آبریز و/یا بارندگی نقطه‌ای در مکان‌های نمونه‌برداری نشده، از اندازه‌گیری‌های نمونه مشاهده شده در مکان‌های همسایه هستند. این کار با یک شبکه باران‌سنجی طراحی شده امکان‌پذیر

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

(*- نویسنده مسئول: Email: kabdolla@sku.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2021.72310.1086

حداقل رساندن هزینه یا با گسترش شبکه با نصب ایستگاه‌های اضافی برای کاهش عدم قطعیت برآورد، مشکلات را برطرف نمود (۲۱).

به‌طور کلی برای ارزیابی و طراحی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی از روش‌های آماری، درون‌یابی مکانی، تئوری مبتنی بر اطلاعات و ترکیبی استفاده می‌گردد (۲۴). کاربرد روش‌های درون‌یابی زمین‌آمار در سه دهه گذشته با استفاده از مقادیر نقطه‌ای یا مقادیر منطقه‌ای، با در نظر گرفتن کوواریانس بوده است. تکنیک درون‌یابی مکانی، امکان تخمین داده‌ها را در هر مکان در حوزه آبخیز فراهم می‌کند (۵، ۱۷ و ۱۸). روش کریجینگ^۱ به دلیل کاربردی بودن و فراهم نمودن واریانس تخمین بیشتر مورد توجه بوده است (۱) و با توجه به مختصات مکانی می‌تواند به صورت غیرخطی استفاده گردد (۶). این روش در طراحی شبکه باران‌سنجی کاربردهای گسترده‌ای دارد. از ویژگی‌های مهم این روش ارائه خطای کریجینگ است که مبنای طراحی شبکه باران‌سنجی تشکیل می‌دهد. بیکربندی بهینه شبکه را می‌توان با به حداقل رساندن خطای کریجینگ که شامل یک فرآیند جستجوی علمی برای یافتن ترکیبی بهینه از تعداد و مکان مناسب ایستگاه‌های تولیدکننده حداقل خطای کریجینگ است، به دست آورد (۱). چهار هدف مختلف در طراحی و ارزیابی مطلوب شبکه باران‌سنجی با استفاده از روش زمین‌آمار مبتنی بر کریجینگ شامل گسترش شبکه باران‌سنجی موجود با ایستگاه‌های اضافی برای دستیابی به تراکم شبکه مناسب برای کاهش عدم قطعیت برآورد (۴، ۸، ۲۶ و ۳۳)، شناسایی و استقرار مکان بهینه ایستگاه‌های باران‌سنجی اضافی در شبکه برای بهبود دقت تخمین (۹ و ۲۷)، اولویت‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی با توجه به سهم آن‌ها در کاهش خطا در شبکه (۱۰، ۱۴ و ۳۶) و انتخاب زیرمجموعه‌ای از ایستگاه‌های بهینه از شبکه باران‌سنجی متراکم موجود برای دستیابی به اطلاعات مطلوب بارندگی (۲۹) می‌باشند. روش پرکاربرد دیگر، تئوری آنتروپی^۲ است که به‌طور خاص از دهه ۱۹۷۰ به‌طور گسترده‌ای برای طراحی شبکه جمع‌آوری داده‌های هیدرولوژیکی و ارزیابی عدم قطعیت پذیرفته شده است (۱۵). در بسیاری از مطالعات، روش کریجینگ به تنهایی برای طراحی شبکه باران‌سنجی استفاده شده است (۱۰، ۱۴، ۲۶ و ۳۳). برخی مطالعات نیز از روش کریجینگ در ترکیب با روش‌های دیگر مانند آنتروپی (۹ و ۳۶) و تحلیل عاملی چند متغیره (۲۹) برای طراحی شبکه استفاده کردند. کسایی رودسری و همکاران (۱۳) تراکم شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی را در دو حالت مجزا و پیوسته با استفاده از

روش زمین‌آمار بررسی نمودند. زندکریمی و همکاران (۳۸) به‌منظور تحلیل مکانی و بهینه‌سازی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان از روش‌های زمین‌آمار بر مبنای واریانس خطای کریجینگ استفاده نمودند. شهیدی و همکاران (۳۰) در طراحی شبکه پایش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، روش آنتروپی را به کار بردند و با رتبه‌بندی ایستگاه‌های شبکه، انتقال و دریافت اطلاعات ایستگاه‌ها را بررسی نمودند. در مطالعه ولی‌پور و همکاران (۳۴) به‌منظور بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی حوضه آبریز شرق دریاچه ارومیه از آنتروپی اطلاعات استفاده و ایستگاه‌های مهم حوزه‌آبخیز را تعیین نمودند. میسرا و کولیالی (۲۲) با استفاده از سه اصطلاح آنتروپی (حاشیه‌ای، مشترک و انتقال اطلاعات) طراحی شبکه ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان رودخانه را در حوزه‌های آبخیز مختلف کانادا بررسی کردند. یه^۳ و همکاران (۳۶) به‌منظور اصلاح شبکه باران‌سنجی در تایوان از دو روش آنتروپی و کریجینگ استفاده نمودند. شقاقیان و عابدینی (۲۹) برای اولویت‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی از نظر محتوای اطلاعات در منطقه دشتی واقع در استان‌های کهگیلویه-بویراحمد و خوزستان، ترکیبی از ابزارهای زمین‌آمار و تجزیه به عامل را همراه با یک روش خوشه‌بندی به کار بردند. آدهیکاری و همکاران (۱) با استفاده از روش کریجینگ یک شبکه باران‌سنجی مطلوب در حوضه آبریز رودخانه یارا میانه در ویکتوریا، استرالیا طراحی نمودند که کاهش خطای کریجینگ به‌عنوان شاخصی برای موقعیت مکانی بهینه ایستگاه‌ها در نظر گرفته شد. خو و همکاران (۳۵) رویکردی را براساس کریجینگ و آنتروپی برای تعیین یک طراحی مطلوب شبکه در شهر شانگهای، چین پیشنهاد کردند. این رویکرد نه تنها از روش کریجینگ به‌عنوان یک روش درون‌یابی برای تعیین داده‌های بارندگی در مکان‌های فاقد آمار استفاده می‌کند بلکه دارای حداقل خطای استاندارد کریجینگ و حداکثر محتوای اطلاعات خالص (NI)^۴ است.

کاربردهای متعددی در تئوری آنتروپی در علوم زمین موجود است اما در این مطالعه به حالت مقایسه‌ای این تئوری در کنار زمین‌آمار برای شناخت طرح شبکه‌های باران‌سنجی استفاده شده است. در استان چهارمحال و بختیاری به‌عنوان سرمنشاء دو رود بزرگ کارون و زاینده‌رود بارش عنصر علمی مهمی است و به لحاظ کاربرد نیز در بخش‌هایی از استان تراکم ایستگاهی نامطلوب و در برخی مناطق ایستگاه‌های مازاد وجود دارد که من حیث هزینه ساخت و نگهداری قابل توجه است. لذا هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و تئوری آنتروپی در

3- Yeh

4- Net Exchange Information

1- Kriging

2- Entropy

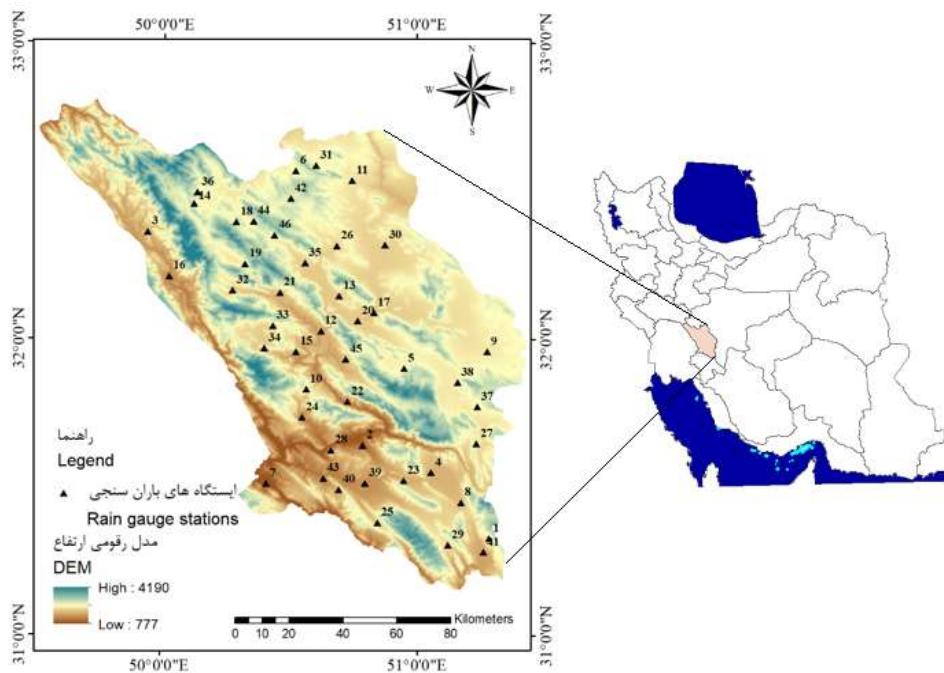
متر می‌باشد. براساس تقسیم‌بندی کوپن، اقلیم این استان در نواحی شرقی معتدل و سرد با تابستان‌های گرم و خشک، در ارتفاعات ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متری معتدل سرد و تابستان‌های خشک، در نواحی غربی نیمه گرمسیری با تابستان‌های گرم و خشک و در ارتفاعات بیش از ۳۰۰۰ متری اقلیم ارتفاعات می‌باشد که پوشیده از برف‌های دائمی است. در مرکز استان (شهرکرد) ۱۷ روز از سال همراه با برف یا مخلوط برف و باران و بیشترین فراوانی این پدیده در کوه‌رنگ با ۵۳ روز از سال می‌باشد. تعداد روزهای یخبندان در سال در نواحی مختلف استان متفاوت است، کمترین آن به مدت ۸۳ روز به‌طور متوسط سالیانه در لردگان و بیشترین آن در دزک با ۱۴۰ روز می‌باشد (۷). همچنین میانگین بارندگی سالانه ۵۶۰ میلی‌متر است که می‌تواند بین ۲۵۰ میلی‌متر در شرق و جنوب شرقی و ۱۴۰۰ میلی‌متر در شمال غربی استان متغیر باشد. میانگین دمای سالانه نیز بین ۹ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، حداکثر دمای مطلق ۴۶ درجه سانتی‌گراد (در لردگان) و حداقل دمای مطلق ۳۳- درجه سانتی‌گراد (در چلگرد) می‌باشد (۳۹).

استان چهارمحال و بختیاری می‌باشد. با حذف هر ایستگاه و تهیه نقشه‌های خطای درون‌یابی کریجینگ، سهم هر ایستگاه در کاهش یا افزایش خطا در شبکه باران‌سنجی بررسی و در مناطق با خطای زیاد نصب ایستگاه جدید پیشنهاد می‌گردد. همچنین با محاسبه مقادیر شاخص‌های آنتروپی و شاخص اطلاعات خالص تبدیلی ایستگاه‌های دارای انتقال و دریافت اطلاعات و ارزش حفظ بیشتر مشخص می‌شوند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان چهارمحال و بختیاری با مساحت ۱۶۳۲۸ کیلومتر مربع در جنوب غربی ایران و بین ۴۹°۲۸' تا ۵۱°۲۵' طول شرقی و ۳۱°۰۹' تا ۳۲°۴۸' عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این منطقه از سمت شمال و شرق به استان اصفهان، از غرب به استان خوزستان، از جنوب به استان کهگیلویه و بویراحمد و از شمال غرب به استان لرستان محدود شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع در این منطقه ۷۷۷ و ۴۱۹۰



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های باران‌سنجی
Figure 1- The location map of rain gauge stations in the study area

۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ به‌عنوان پایه زمانی مشترک و ۴۶ ایستگاه باران‌سنجی دارای آمار کامل‌تر برای انجام پژوهش انتخاب شدند. همگنی داده‌ها با استفاده از روش‌های آزمون جرم مضاعف و رسم هیستوگرام در نرم‌افزارهای اکسل و SPSS بررسی شد. در هیستوگرام داده‌ها، اگر

به‌منظور انجام این مطالعه داده‌های بارش در مقیاس روزانه از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری واقع در شهرکرد جمع‌آوری و بعد از آزمون‌های آماری، سری زمانی سالانه داده‌ها تهیه شد. با بررسی وضعیت آماری ایستگاه‌ها، دوره آماری

که در آن، N تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی لازم، C_v ضریب تغییرات بارندگی منطقه بر اساس تعداد ایستگاه‌های موجود و داده‌های آماری آن‌ها، E درصد اشتباه مجاز در تخمین میانگین بارندگی منطقه، S انحراف از معیار و \bar{P} متوسط بارندگی سالانه، n تعداد ایستگاه‌های موجود، $\overline{P^2}$ متوسط مجذورات بارندگی سالانه، P مقدار بارندگی سالانه در هر ایستگاه و $\sum P$ مجموع بارندگی سالانه در ایستگاه‌های موجود می‌باشند (۲).

روش زمین‌آمار

داده‌های باران‌سنجی، مربوط به اندازه‌گیری باران در یک نقطه بوده (بارش نقطه‌ای) که این داده‌ها باید به کل محدوده پوشش‌دهنده تعمیم داده شوند. از خطاهایی که بر روی داده‌های نقطه‌ای بار می‌شود، خطای نحوه درون‌یابی آن‌ها برای تهیه نقشه‌های رستری و بیش‌تر به دلیل انتخاب روش نامناسب درون‌یابی است. از جمله روش‌های درون‌یابی شامل درون‌یابی خطی^۱، وزن‌دهی معکوس فاصله^۲، کریجینگ و کوکریجینگ^۳ می‌باشد. این روش‌ها توسط محققان بسیاری بررسی شده است که غالب آن‌ها روش کریجینگ را مناسب‌ترین روش معرفی کرده‌اند (۳). ویژگی منحصر به فرد این روش برآورد خطا علاوه بر تخمین متغیر است. با مشخص شدن قسمت‌های دارای خطای بیش‌تر، برای کاهش خطا می‌توان در این قسمت‌ها از داده‌های بیش‌تری استفاده کرد (۲۰). کریجینگ یک برآوردگر خطی است که رابطه آن به صورت زیر است:

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i z(x_i) \quad (9)$$

که در آن، Z مقدار متغیر مکانی برآوردشده، $z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه و w_i وزن آماری اختصاص داده شده به نمونه x_i و n تعداد نمونه‌های قرار گرفته در همسایگی نقطه مورد نظر می‌باشند. به منظور درون‌یابی داده‌های بارش از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جامع آب و زمین ILWIS^۴ و روش کریجینگ ساده و از بین مدل‌های مختلف دایره‌ای، نمایی، گاوسی، توانی، درجه دوم گویا، کروی و موجی از مدل کروی استفاده شد. مزیت استفاده از این روش و نرم‌افزار ILWIS ایجاد نقشه‌های رستری خطای درون‌یابی است. در مجموع ۷۵۶ نقشه به همراه نقشه‌های خطای آن‌ها برای ۱۷ سال تهیه و برای بررسی سهم هر ایستگاه در مقدار خطا، در هر گام یکی از ایستگاه‌ها حذف و نقشه‌ها تهیه شدند. سپس میانگین نقشه‌های

تعداد داده‌هایی که در یک بازه مشخص قرار می‌گیرند از بقیه بازه‌ها بیشتر باشد، هیستوگرام تک نمایی می‌باشد که نشان می‌دهد داده‌ها همگن و مربوط به یک جامعه آماری هستند. نما، بازه‌ای است که بیشترین تعداد داده‌ها را در خود جای می‌دهد (۲). سپس وجود یا عدم وجود روند در سری زمانی داده‌ها بررسی شد. در اغلب مطالعات هیدرولوژیکی روش‌های ناپارامتری به دلیل مناسب بودن برای سری داده‌های با توزیع غیرنرمال و یا دارای داده‌های گمشده استفاده شده‌اند. این روش‌ها بر خلاف روش‌های پارامتری حساسیت زیادی به داده‌های پرت ندارند که این یکی دیگر از مزایای این روش‌ها می‌باشد (۲۵). یکی از آزمون‌های ناپارامتری، آزمون اسپیرمن است که در اوایل دهه ۱۹۰۰ میلادی توسط چارلز اسپیرمن توسعه داده شد. در این آزمون، بعد از مرتب‌سازی داده‌ها به صورت صعودی، برای هر کدام رتبه از ۱ تا n در نظر گرفته می‌شود. سپس داده‌ها به صورت تاریخی مرتب و رتبه‌های هر کدام $(R(X_i))$ مقابل آن‌ها درج می‌شود. مقدار آماره D برای مجموعه داده‌ها و آماره اسپیرمن (Z_{SR}) با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود که در آن D دارای توزیع نرمال است (۳۷):

$$D = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n [R(X_i) - i]^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

$$V(D) = \frac{1}{n-1} \quad (2)$$

$$Z_{SR} = \frac{D}{\sqrt{V(D)}} \quad (3)$$

فرض صفر یکنواختی توزیع و مستقل بودن داده‌ها و فرض مقابل آن روند افزایشی یا کاهش داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. بعد از مقایسه مقدار آماره t با مقدار بحرانی حاصله از جدول (با توجه به درجه آزادی $n-2$ و سطح معنی‌داری) چنانچه مقدار قدرمطلق آماره اسپیرمن از مقدار t جدول بزرگتر بوده فرض صفر رد شده و داده‌ها دارای روند خواهد بود، در غیراینصورت داده‌ها فاقد روند معنی‌دار هستند. در مرحله بعد، کفایت تعداد باران‌سنج‌ها در شبکه باران‌سنجی بررسی می‌گردد. تعداد کم باران‌سنج‌ها در یک منطقه، تخمین غیردقیق بارندگی و تعداد بیش از حد، مخارج اضافی را در بر دارد خواهند داشت. بسته به درجه دقت تخمین بارندگی، رابطه (۴) برای تعیین تعداد مطلوب ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده می‌شود (۲):

$$N = \left(\frac{C_v}{E}\right)^2 \quad (4)$$

$$C_v = \frac{100 S}{\bar{P}} \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{n}{n-1} [P^2 - (\bar{P})^2]} = \sqrt{\frac{\sum (P - \bar{P})^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$\overline{P^2} = \frac{\sum P^2}{n} \quad (7)$$

$$\bar{P} = \frac{\sum P}{n} \quad (8)$$

1- Linear Interpolation

2- Inverse Distance Weighted

3- Co- Kriging

4- Integrated Land and Water Information System

$$T(x, y) = H(x) - H(x|y) \quad (۱۴)$$

$$T(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y) \quad (۱۵)$$

$$T(y, x) = H(y) - H(y|x) \quad (۱۶)$$

$$T(y, x) = H(y) + H(x) - H(y, x) \quad (۱۷)$$

انتقال اطلاعات با استفاده از شاخص انتقال اطلاعات نرمال (ITI) نیز بیان می‌شود که نشان‌دهنده میزان اطلاعات استاندارد منتقل شده از یک مکان به مکان دیگر است. طبقه‌بندی میزان انتقال اطلاعات در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

$$ITI = \frac{T(x, y)}{H(x, y)} \quad (۱۸)$$

اطلاعات دریافتی x از y به صورت $R(x, y)$ و اطلاعات ارسالی از x به صورت $S(x, y)$ و اطلاعات دریافتی و ارسالی ایستگاه i ام $R(i)$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(x)} \quad (۱۹)$$

$$S(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(y)} \quad (۲۰)$$

$$R(i) = R(x(i), \hat{x}(i)) \quad (۲۱)$$

$$x(i) = a(i) + \sum_{j=1}^{I-1} y_j(i) \times b_j(i) \quad (۲۲)$$

که $y(i)$ ماتریس داده‌ها از تمام ایستگاه‌های دیگر و $a(i)$ و $b(i)$ پارامترهای رگرسیون بین ایستگاه i ام و تمام ایستگاه‌های دیگر می‌باشد که به صورت خطی برازش داده شده است. مقادیر بزرگ‌تر $R(i)$ و $S(i)$ به ترتیب نشان‌دهنده دریافت و ارسال بیشتر اطلاعات بین ایستگاه i ام و سایر ایستگاه‌های شبکه و ارزش بیشتر ایستگاه یاد شده هستند که حفظ و نگهداری ایستگاه مزبور توصیه می‌گردد (۲۸). در نهایت شاخص اطلاعات خالص تبدالی $N(i)$ است که ارزش هر ایستگاه را می‌سنجد. کمترین میزان $N(i)$ ، کمترین رتبه و اهمیت را در شبکه پایش به خود اختصاص خواهد داد (۱۹).

$$N(i) = S(i) - R(i) \quad (۲۳)$$

در این پژوهش با استفاده از تئوری آنتروپی، ارزش و اهمیت ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری مورد ارزیابی قرار گرفت.

خطا با استفاده از ابزار Mean Calc در نرم‌افزار بیلان آب WetSpas-M محاسبه شد.

روش تئوری آنتروپی

مفهوم آنتروپی برای اولین بار توسط شانون در سال ۱۹۴۸ معرفی شد که طبق تعریف برای دو متغیر گسسته x و y که $x_i, i=1,2,3, \dots, n$ و $y_j, j=1,2,3, \dots, m$ در همان فضای احتمال باشند، هر کدام یک احتمال گسسته وقوع $p(x_i)$ ، احتمال وقوع مشترک x_i, y_j و احتمال رخ دادن x_i به شرط y_j دارند (۳۱).

$$E(I(x)) = H(x) = - \sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) \ln p(x_i) \quad (۱۰)$$

$E(I(x))$ امید ریاضی داده‌ها و $H(x)$ معیاری برای سنجش عدم قطعیت داده‌ها است. اگر X یک متغیر قطعی باشد، احتمال اینکه مقدار خاصی را به خود اختصاص دهد یک و احتمال سایر مقادیر جایگزین دیگر صفر است. لذا $H(x)=0$ می‌تواند به عنوان حد پایین مقادیر توابع آنتروپی فرض شود، یعنی عدم قطعیت وجود ندارد و سیستم کاملاً نظم‌یافته است (۳۲). آنتروپی مشترک بیانگر اطلاعاتی است که در x و در y وجود دارند و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H(x, y) = - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln p(x_i, y_j) \quad (۱۱)$$

آنتروپی شرطی برای دو متغیر تصادفی x و y بیانگر اطلاعاتی از متغیر x است که در متغیر y موجود نمی‌باشد (۲۳).

$$H(x|y) = - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i|y_j) \ln p(x_i|y_j) \quad (۱۲)$$

آنتروپی انتقال اطلاعات، کاهش در عدم قطعیت در x با توجه به آگاهی از متغیر تصادفی y است و می‌تواند به عنوان اطلاعاتی از x تعریف شود که در y موجود هستند (۲۳).

$$T(x, y) = - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln \left(\frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)p(y_j)} \right) \quad (۱۳)$$

$p(x)$ احتمال وقوع x و $p(x, y)$ احتمال وقوع مشترک x و y هستند. لازم به ذکر است که $T(x, y) = T(y, x)$ (۱۱) که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۱- طبقه‌بندی مقادیر شاخص انتقال اطلاعات

Table 1- Classification of information transfer index values

مقادیر شاخص	درجه اهمیت منطقه
Index values	The degree of importance for the region
0-0.2	کمبود شدید Severe deficit
0.2-0.4	کمبود Deficit
0.4-0.6	متوسط Medium
0.6-0.8	بالای متوسط Above average
>0.8	مازاد Surpluse

بروجن) نشان داد که با وصل کردن نقاط حاصله، خطی مستقیم حاصل می‌شود که نشان‌دهنده همگنی داده‌های بارندگی ایستگاه گندمان، نسبت به ایستگاه مجاور خود بود. طبق نتایج آزمون اسپیرمن، داده‌های همه ایستگاه‌ها در دوره آماری مورد بررسی، در سطح اطمینان ۹۹ درصد فاقد روند معنی‌دار بودند. از آنجا که داده‌های بارش بازسازی نشدند و در برخی سال‌ها به دلیل سال تأسیس متفاوت آن‌ها فاقد آمار بودند، با توجه به تعداد داده‌های هر ایستگاه و متفاوت بودن درجه آزادی آن‌ها، مقادیر t متفاوتی داشتند. برای درجه آزادی‌های ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب t برابر ۳/۱۷، ۳/۱۱، ۳/۰۱، ۲/۹۸ و ۲/۵۰ بود. به‌طور کلی محدوده مقادیر D بین -۰/۶۱ تا ۰/۲۳ و Z_{SR} بین -۲/۸۷ تا ۰/۷۵ بود که از t جدول کوچکتر و نشان‌دهنده یکنواختی توزیع و مستقل بودن داده‌های این ایستگاه‌ها بود. نتایج بررسی تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی لازم نیز با مقادیر متوسط بارندگی سالانه ۶۳۳/۲ و ضریب تغییرات ۳۹/۱۴ نشان داد که اگر درصد اشتباه مجاز را ۵ درصد در نظر بگیریم، تعداد ۶۱ ایستگاه باران‌سنجی لازم است. با توجه به اینکه ۴۶ ایستگاه برای این پژوهش موجود بوده، ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی دیگر مورد نیاز است.

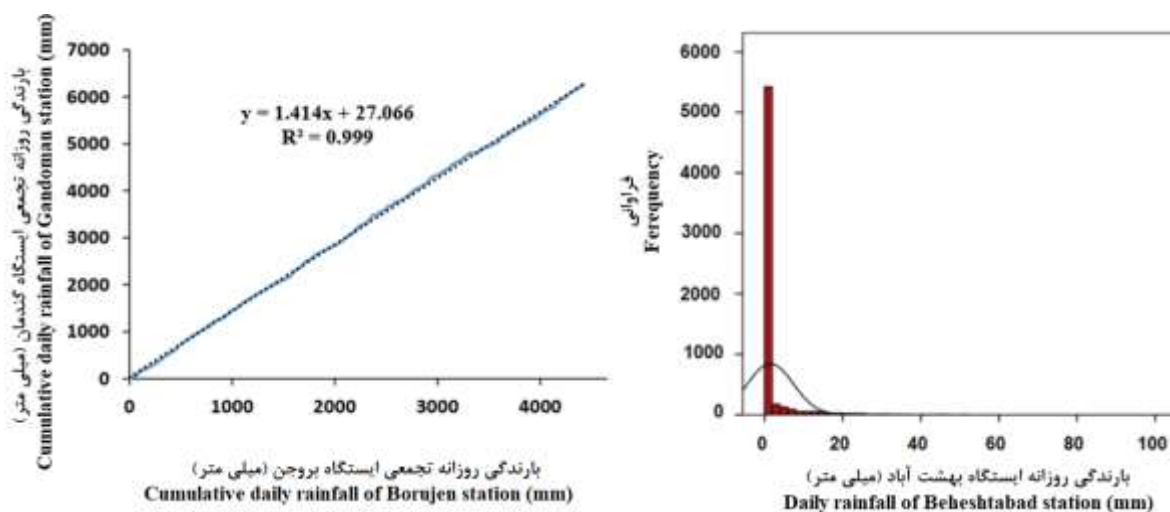
ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی با روش آنتروپی

جدول ۲ مقادیر محاسباتی شاخص‌های آنتروپی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار $H(x)$ در داده‌های ایستگاه ارمند (۳/۲۶) و کمترین مقدار آن در ایستگاه عباس‌آباد (۲/۲۸) مشاهده شد.

بدین ترتیب تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی بهینه در منطقه مورد مطالعه جهت سنجش تغییرات بارندگی در منطقه مشخص می‌گردد. اولین گام صورت گرفته در این قسمت، تعیین رابطه خطی بین هر ایستگاه با سایر ایستگاه‌ها بود که با استفاده از روش حداقل کردن مربعات خطا با روش برنامه‌ریزی خطی در نرم‌افزار اکسل صورت گرفت. بنابراین برای هر ایستگاه باران‌سنجی یک رابطه خطی به صورت $y = B + C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_n X_n$ به دست آمده که در آن y مقدار تخمینی بارش در ایستگاه موردنظر برحسب میلی‌متر، X_1, X_2, \dots, X_n مقادیر بارش در سایر ایستگاه‌ها برحسب میلی‌متر، B و C_1, C_2, \dots, C_n نیز ضرایب ثابت هر معادله می‌باشند. سپس مقادیر شبیه‌سازی شده بارندگی سالانه هر ایستگاه با استفاده از رابطه مربوط به همان ایستگاه محاسبه شد. در مرحله بعد، کد محاسبات روش آنتروپی در نرم‌افزار برنامه‌ریزی Matlab اجرا و با استفاده از خروجی‌های این برنامه، شاخص‌های آنتروپی در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد.

نتایج و بحث

نتایج بررسی همگنی داده‌ها با دو روش هیستوگرام و جرم مضاعف همگنی داده‌های بارندگی همه ایستگاه‌ها را نشان داد. به دلیل زیاد بودن تعداد ایستگاه‌ها از هر روش یک نمودار در شکل ۲ ارائه شده است. طبق شکل هیستوگرام ایستگاه بهشت‌آباد تک‌نمایی و نشان‌دهنده همگنی داده‌ها می‌باشد. در بررسی همگنی داده‌ها با استفاده از روش جرم مضاعف فرض شده است که داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک همگن هستند. نمودار بارندگی تجمعی ایستگاه‌های گندمان و ایستگاه سینوپتیک مجاور خود (ایستگاه



شکل ۲- نمودارهای هیستوگرام بارندگی ایستگاه‌های بهشت‌آباد و گندمان
Figure 2- Rainfall histogram charts for the Beheshtabad and Gandoman stations

مورد انتقال اطلاعات بارندگی دریافت کردند که نشان‌دهنده انتقال و دریافت اطلاعات بیشتر یا ارزش حفظ بیشتر نسبت به ایستگاه‌های دیگر است. از طرفی ایستگاه‌های دورک اناری، آب ترکی و چلو کمترین ارزش و اعتبار را از نظر تبادل اطلاعات بارندگی کسب کردند.

از آنجا که $H(x)$ معیاری برای سنجش عدم قطعیت داده‌هاست، لذا عدم قطعیت در داده‌های ایستگاه ارمند بیشتر و در ایستگاه عباس‌آباد کمتر است. کمترین مقدار شاخص N_i ، کمترین رتبه و اهمیت را در شبکه باران‌سنجی دارد. لذا مقادیر این شاخص به ترتیب نزولی مرتب و به هر ایستگاه یک رتبه اختصاص داده شد. ایستگاه‌های بارده، بره مرده و دزک‌آباد به ترتیب رتبه‌های ۱ تا ۳ را در

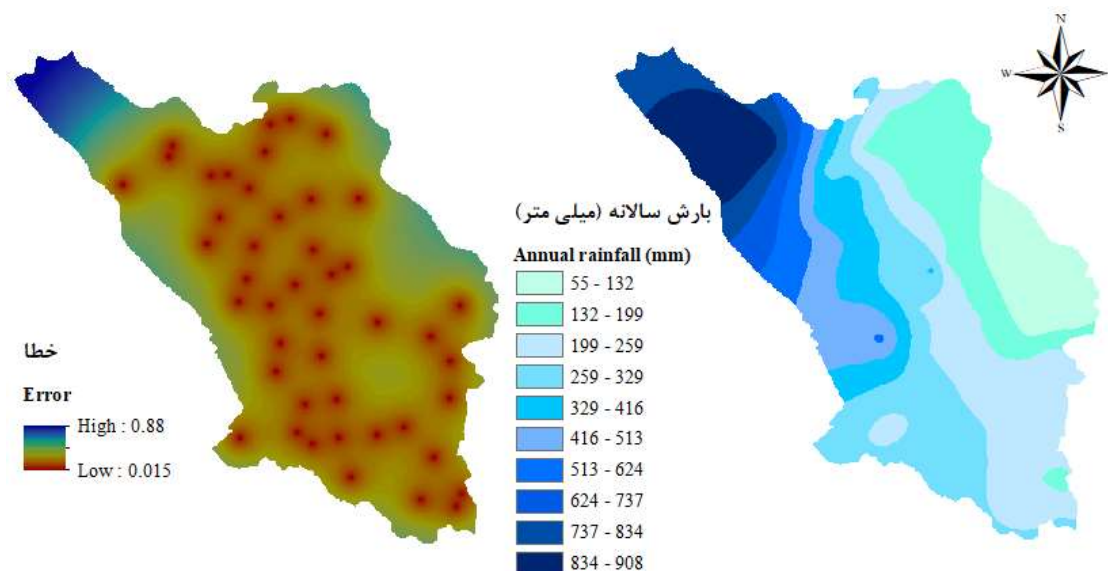
جدول ۲- مقادیر برخی شاخص‌های آنتروپی و رتبه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی متعلق به سازمان هواشناسی در منطقه بر اساس شاخص N_i
 Table 2- Values of some entropy indices along with ranking of rain gauge stations related to the Meteorological Organization in the area based on the N_i index

شماره ایستگاه Station number	نام ایستگاه Station name	H(x)	T(x,y)	ITI	Ni	رتبه Rank	
1	ابواسحاق	Abooeshagh	2.63	2.32	0.76	-0.037	38
2	ارمند	Armand	3.26	3.01	0.87	0.01	13
3	آب ترکی	Abtorki	2.71	2.56	0.84	-0.055	42
4	آلونی	Aloni	3.13	2.70	0.76	-0.004	27
5	آورگان	Avargan	3.12	3.12	1.00	0	19
6	بارده	Bardeh	3.23	2.33	0.62	0.093	1
7	بارز	Barez	3.00	2.55	0.73	-0.016	33
9	بروجن	Borujen	3.13	2.51	0.67	0.001	17
10	بره مرده	Bare mordeh	2.93	2.14	0.63	0.084	2
11	بن	Ben	3.13	2.39	0.63	0.014	11
12	بهشت‌آباد	Beheshtabad	3.06	2.72	0.80	-0.005	30
13	جونقان	Joneghan	2.80	2.56	0.86	0.014	10
14	چلگرد	Chelgerd	3.14	2.87	0.86	0.021	8
15	چلو	Chelo	2.59	2.05	0.62	-0.048	41
17	خراچی	Kharaji	2.75	2.32	0.73	-0.001	23
18	دره زری	DareZari	2.67	2.16	0.66	-0.025	35
19	دزک‌آباد	Dezakabad	3.09	2.32	0.63	0.038	3
20	دستنا	Dastena	2.89	2.67	0.85	-0.008	31
21	دشتک	Dashtak	2.76	2.28	0.71	0	20
22	دورک اناری	Dorak anari	2.54	2.05	0.63	-0.064	43
23	زرین درخت	Zarin derakht	3.08	2.82	0.85	0	21
24	سرخون	Sarkhoon	3.09	2.55	0.71	0.006	14
25	سردشت	Sardasht	2.75	2.19	0.68	0.024	6
26	سورشجان	Soresgjan	2.44	1.99	0.72	0.035	4
27	سولگان	Solegan	3.13	2.19	0.55	0.016	9
28	سید محمد	seyed mohammad	2.78	2.50	0.83	0.023	7
29	شاه نجف	Shah najaf	2.75	2.46	0.81	0.001	18
30	شهرکرد	Shahrekord	3.12	2.65	0.74	0	22
31	شیخ شبان	Sheikh shaban	2.72	2.68	0.92	-0.047	40
32	صمصامی	Samsami	3	2.71	0.79	-0.036	37
33	عباس‌آباد	Abasabad	2.28	1.59	0.55	0.024	5
34	عزیز‌آباد	Azizabad	2.74	2.64	0.93	-0.001	24
35	فارسان	Farsan	3.13	2.40	0.62	0.001	16
36	قلعه تک	Ghaletak	3.05	2.82	0.86	-0.005	29
37	کردشامی	Kordshami	3.14	2.74	0.77	-0.002	25

ادامه جدول ۲- مقادیر برخی شاخص‌های آنتروپی و رتبه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی متعلق به سازمان هواشناسی در منطقه بر اساس شاخص Ni

Continuation of Table 2- Values of some entropy indices and ranking of rain gauge stations related to the Meteorological Organization in the area based on the Ni index

شماره ایستگاه Station number	نام ایستگاه Station name	H(x)	T(x,y)	ITI	Ni	رتبه Rank	
38	گندمان	Gandoman	2.98	2.57	0.73	-0.038	39
39	لردگان	Lordegan	3.08	2.66	0.76	-0.002	26
40	لیرابی	Lirabi	3.04	2.38	0.64	0.005	15
41	مالخلیفه	Malkhalifeh	3.09	2.29	0.60	0.014	12
42	مرغملک	Marghmalek	2.90	2.39	0.68	-0.027	26
43	منج	monj	3.06	2.60	0.73	-0.019	34
44	میبهه	Miheh	2.92	2.11	0.56	-0.016	32
46	هیرگان	Hirgan	3.11	2.57	0.70	-0.004	28



شکل ۳- نقشه درون‌یابی بارش و خطای آن مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری در سال ۱۳۸۶
Figure 3- Rainfall interpolation map and its error related to rain gauge stations in Chaharmahal and Bakhtiari province in 2007

مقادیر خطای نقشه‌های درون‌یابی بارندگی سالانه در حالت بدون حذف هیچ ایستگاه و حذف تک ایستگاه در جدول ۳ ارائه شده است. یک بار بدون حذف هیچ ایستگاهی خطای درون‌یابی کریجینگ برای داده‌های بارش در هر سال محاسبه شده، سپس در هر مرحله فقط یک ایستگاه حذف شده و با محاسبه خطا، سهم هر ایستگاه در افزایش یا کاهش خطا نسبت به حالت بدون حذف ایستگاه تعیین می‌شود. به‌عنوان مثال در مورد ردیف دوم جدول ایستگاه‌های ۱ و ۲۰ باهم حذف نمی‌شوند بلکه یک بار ایستگاه ۱ حذف و مقادیر خطا در نقشه‌های سالانه محاسبه می‌گردد و بار دیگر ایستگاه ۲۰ و به‌دلیل یکسان بودن نتایج برخی از ایستگاه‌ها با هم در یک ردیف مشخص شده‌اند.

تحلیل نتایج روش زمین‌آمار

به‌دلیل زیاد بودن تعداد نقشه‌های تولید شده در این پژوهش، به‌عنوان نمونه، نقشه‌های درون‌یابی بارش سال ۱۳۸۶ و خطای آن در شکل (۳) ارائه شده است. از منظر پراکنش مکانی بیشترین مقدار بارش در سال ۱۳۸۶ در بخش شمال غربی استان (بخش‌های کوهستانی) با مقدار ۹۰۸/۳۳ میلی‌متر و کمترین مقدار در بخش شرقی استان (نواحی مسطح و دشتی) با مقدار ۵۵/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین کمترین مقدار خطا در محل باران‌سنج‌ها و نواحی نزدیک به آن‌هاست و بیشترین مقدار خطا در قسمت‌هایی است که هیچ ایستگاه باران‌سنجی وجود ندارد (شمال غربی استان چهارمحال و بختیاری).

جدول ۳- مقادیر خطای نقشه‌های درون‌یابی بارش سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی

Table 3- Error values after interpolating the spatial distribution of annual rainfall data

حذف ایستگاه Remove station	2000-2001	2002	2003-2004	2005-2006	2007	2008	2009	2010-2014	2015-2016
1, 20	-	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.64
2	0.63	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.59	0.61	0.64
3	0.67	0.64	0.64	0.64	0.65	0.65	0.64	0.64	-
4, 5, 6, 12, 19, 23, 24, 27, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 42, 45, 46	0.63	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.64
7	0.63	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.64
8, 10, 13, 15, 17, 18, 21, 22, 25, 28, 29, 34	-	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.61
9, 30	0.64	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.64
11	0.63	0.62	0.62	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.64
41	0.64	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.64
16	-	0.62	0.61	0.61	-	-	0.61	0.61	0.65
26	-	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	-
33	-	-	-	0.61	0.61	0.62	0.61	0.61	0.64
14, 39, 40, 43, 44	0.63	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.64
بدون حذف No removal	0.63	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.64

آماري ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ تهیه شدند. مزیت نقشه خطا، شناسایی مناطق با خطای زیاد است که بعد از بازدیدهای صحرائی و بررسی منطقه از نظر شیب، کاربری و توپوگرافی اقدامات لازم جهت نصب باران‌سنج جدید صورت گیرد. همان‌طور که نتایج نشان داد با توجه به وسعت منطقه و در نظر گرفتن درصد اشتباه مجاز ۵ درصد ایستگاه‌های این منطقه کافی نیستند لذا حذف هیچ ایستگاهی توصیه نمی‌شود، هرچند برخی ایستگاه‌ها در فرآیند حذف و محاسبه خطای کریجینگ نشان دادند که سهم قابل توجهی در افزایش خطا ندارند. در مورد اضافه نمودن ایستگاه‌های اضافی با توجه به اینکه ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی دیگر موردنیاز است، توصیه می‌شود با توجه به نقشه‌های خطا و پس از بازدید صحرائی برای بررسی شرایط منطقه از نظر توپوگرافی و استانداردهای فنی این امر صورت گیرد. بهتر است در درجه اول ایستگاه‌هایی در قسمت شمال غربی (مناطق دارای بیشترین خطای درون‌یابی) در اولویت قرار داده شود. در درجه بعد در بخش‌هایی از شمال شرقی، شرق، جنوب شرقی، غرب و جنوب غربی که فاقد ایستگاه‌های باران‌سنجی هستند، اقدام به احداث ایستگاه‌های باران‌سنجی اضافی گردد. در مناطق با تراکم کم ایستگاه‌ها اهمیت قابل توجهی دارند مانند ایستگاه آب ترکی (واقع در شمال غرب استان چهارمحال و بختیاری)، لذا در درجه اول این ایستگاه و پس از آن ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن و بارز در شبکه باران‌سنجی اهمیت بالایی دارند. ایستگاه‌های چمن‌گلی و بن را نیز با توجه به تراکم ایستگاه‌ها در منطقه و نقشه‌های خطا می‌توان جزو ایستگاه‌های مؤثر در خطا در نظر گرفت. به‌طور مشابه نتایج روش تئوری آنتروپی نیز در

البته برخی ایستگاه‌ها در برخی سال‌ها داده ندارند که با خط تیره مشخص شده‌اند و ایستگاه‌های فاقد داده در این سال‌ها در مقدار خطا اثر می‌گذارند، زیرا نداشتن داده به منزله نبود ایستگاه است. به‌منظور نمایش ساده‌تر نتایج، بیشترین افزایش خطا با رنگ سبز، افزایش خطا با رنگ آبی و کاهش خطا با رنگ قرمز مشخص شده است. در سال ۱۳۸۸ با حذف ایستگاه ارمند مقدار خطا ۰/۰۲ کاهش یافته است. در حالت کلی با حذف ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن و بارز میانگین خطای نقشه‌های درون‌یابی بارندگی نسبت به حالتی که هیچ ایستگاهی حذف نشده، به میزان ۰/۰۱ و با حذف ایستگاه آب ترکی به مقدار ۰/۰۳ و در سال‌هایی که بعضی ایستگاه‌ها فاقد داده هستند به مقدار ۰/۰۴ افزایش یافته است. بنابراین، در درجه اول ایستگاه آب ترکی و سپس ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن و بارز از اهمیت بالاتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها برخوردارند. طبق شکل ۱ ایستگاه آب ترکی در شمال غرب منطقه مورد مطالعه که کمبود ایستگاه وجود دارد، واقع شده است لذا این ایستگاه در شبکه باران‌سنجی باید حفظ گردد.

نتیجه‌گیری

استان چهارمحال و بختیاری منطقه‌ای کوهستانی است که در این مناطق تراکم شبکه باران‌سنجی بیشتری مورد انتظار است. در این مطالعه، به روش مقایسه‌ای شبکه باران‌سنجی ایستگاه‌های وزارت نیرو در این استان با استفاده از روش‌های زمین‌آمار مبتنی بر کریجینگ و تئوری آنتروپی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور نقشه‌های بارش سالانه و خطای کریجینگ در این استان طی دوره

شهیدی و همکاران (۳۰) نیز جهت بررسی و پایش شبکه باران‌سنجی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص اطلاعات خالص تبدیلی، ایستگاه‌های با ارزش و انتقال و دریافت اطلاعات بیشتر مشخص شدند. کاربرد نتایج مطالعه حاضر به‌منظور برنامه‌ریزی صحیح و مدیریت منابع آب توسط سازمان‌های ذی‌ربط مانند وزارت نیرو، سازمان هواشناسی و ... می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود، در مطالعات آبی از سایر روش‌های زمین آمار در ترکیب با روش‌های دیگر به‌منظور افزایش دقت و ترکیب ایستگاه‌های باران‌سنجی متعلق به سازمان هواشناسی و وزرات نیرو استفاده گردد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از شرکت سهامی آب منطقه‌ای، اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات، هماهنگی پروژه سرکار خانم زهرا اسلامی تشکر می‌گردد.

ارزیابی شبکه باران‌سنجی مؤثر بود. به‌طوری که با محاسبه شاخص رتبه‌بندی، مشخص شد که ایستگاه‌های بارده، بره مرده و دزک‌آباد بیشترین انتقال اطلاعات بارندگی را داشتند، لذا ارزش حفظ بیشتری نسبت به ایستگاه‌های دیگر داشتند. نتایج این مطالعه در گزارش توانایی روش‌های زمین‌آمار و آنتروپی به‌منظور ارزیابی وضعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و بررسی ارزش و اهمیت هر یک از ایستگاه‌ها با نتایج برخی مطالعات همخوانی دارد. از جمله مطالعه چن و همکاران (۹) که با ترکیب روش کریجینگ و آنتروپی، تعداد و توزیع مکانی بهینه ایستگاه‌های باران‌سنجی در شمال تایوان را تعیین و با محاسبه آنتروپی انتقال اطلاعات و آنتروپی مشترک درجه اهمیت ایستگاه‌ها را مشخص نمودند. همچنین مطالعه خلیفه (۱۶) در ارزیابی شبکه باران‌سنجی حوزه آبخیز زهره فارس که با در نظر گرفتن شاخص‌های آنتروپی مرزی، مشترک، اطلاعات ارسال شده و دریافت شده توسط هر ایستگاه و شاخص انتقال اطلاعات و در نهایت با رتبه‌بندی، ایستگاه‌های دارای اهمیت بیشتر تعیین شدند. در مطالعه

منابع

- 1- Adhikary S.K., Yilmaz A.G., and Muttil N. 2015. Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia. *Hydrological Processes* 29(11): 2582-2599.
- 2- Alizadeh A. 2015. *Applied Hydrology*. Astan Quds Razavi Publication, Mashhad. (In Persian)
- 3- Asadi A., and Jalali M. 2016. Review and Evaluation of Geostatistical Method of Kriging in the spatial distribution precipitation (Case Study: North West of Iran). *Geographic Space* 15(52): 187-204. (In Persian)
- 4- Barca E., Passarella G., and Uricchio V. 2008. Optimal extension of the raingauge monitoring network of the Apulian regional consortium for cropprotection. *Environmental Monitoring and Assessment* 145: 375-386.
- 5- Bechler A., Vrac M., and Bel L. 2015. A spatial hybrid approach for downscaling of extreme precipitation fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120(10): 4534-4550.
- 6- Biau G., Zorita E., Von Storch H., and Wackernagel H. 2010. Estimation of precipitation bykriging in the EOF space of the Sea level pressure field. *Journal of Climate* 12(12): 1070-1085.
- 7- Chaharmahal-Bakhtiari Meteorological Administration. Available at <http://www.chbmet.ir> (visited 27 September 2021).
- 8- Chebbi A., Bargaoui Z.K., and Cunha M.D.C. 2011. Optimal extension of raingauge monitoring network for rainfall intensity and erosivity indexinterpolation. *Journal of Hydrologic Engineering* 16: 665-676.
- 9- Chen Y.C., Wei C., and Yeh H.C. 2008. Rainfall network design using kriging andentropy. *Hydrological Processes* 22: 340-346.
- 10- Cheng K.S., Lin Y.C., and Liou J.J. 2008. Rain-gauge network evaluation andaugmentation using geostatistics. *Hydrological Processes* 22: 2554-2564.
- 11- Jessop A. 1995. *Informed Assessments, an Introduction to Information, Entropy and Statistics*. Ellis Horwoo, New York.
- 12- Karimi Hosseini A., Bozorg Haddad O., Hoorfar A.H., and Ebrahimi K. 2010. Rainfall Network Design Using Entropy Approach. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 4(11): 1-12. (In Persian with English abstract)
- 13- Kasae Roodsari B., Ghahreman B., and Sharifi M.B. 2010. Study of rain-gauge network density using geostatistical methods (Case study: Northern, Eastern and Razavi Khorasan Provinces). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 4(10): 35-44. (In Persian with English abstract)
- 14- Kassim A.H.M., and Kottegoda N.T. 1991. Rainfall network design throughcomparative kriging methods. *Hydrological Sciences Journal* 36: 223-240.
- 15- Kawachi T., Maruyama T., and Singh V.P. 2001. Rainfall entropy fordelineation of water resources zones in Japan. *Journal of Hydrology* 246: 36-44.
- 16- Khalifeh S. 2014. Evaluation of monitoring network density using discrete entropy theory. *Journal of Water Science Engineering* 4(10): 19-36. (In Persian)
- 17- Kilibarda M., Hengl T., Heuvelink G.B.M., Graler B., Pebesma E., Percec Tadic M., and Bajat B. 2014. Spatio-

- temporal interpolation of daily temperatures for global landareas at 1 km resolution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119(5): 2294-2313.
- 18- Manz B., Buytaert W., Zulkafli Z., Lavado W., Willems B., Robles L.A., and Rodriguez-Sanchez J.P. 2016. High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the Tropical Andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121(3): 1190-1207.
 - 19- Markus M., Knapp H.V., and Tasker G.D. 2003. Entropy and generalized least square methods in assessment of the regional value of stream gages. *Journal of Hydrology* 283: 107-121.
 - 20- Marofi S., Golmohammadi G., Mohammadi K., and Zare Abyaneh H. 2010. Evaluation of Geostatistical Methods for Estimating Spatial Distribution of Annual Rainfall Using GIS. *Water and Soil Science* 19.1(2): 147-164. (In Persian)
 - 21- Mishra A.K., and Coulibaly P. 2009. Developments in hydrometric network design: a review. *Reviews of Geophysics* 47(2): 2415-2440.
 - 22- Mishra A.K., and Coulibaly P. 2010. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology* 380: 420-437.
 - 23- Mogheir Y., and Singh V.P. 2003. Specification of information needs for groundwater management planning in developing country. *Groundwater Hydrology*. Balema Publisher, Tokyo.
 - 24- Moss M.E. and Tasker G.D. 1991. An intercomparison of hydrological network-design technologies. *Hydrological Sciences Journal* 36(3): 209-221.
 - 25- Nazeri Tehrani M., and Ramazani Y. 2018. River drought analysis using time series. Birjand University Press, Birjand. (In Persian)
 - 26- Papamichail D.M., and Metaxa I.G. 1996. Geostatistical analysis of spatial variability of rainfall and optimal design of rain gauge network. *Water Resources Management* 10: 107-127.
 - 27- Pardo-Iguzquiza E. 1998. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. *Journal of Hydrology* 210: 206-220.
 - 28- Ramazani Y., Pourreza-Bilondi M., Yaghoobzadeh M., and Nazeri Tahrudi M. 2018. Qualitative Monitoring of Drinking Water Using Entropy Indices (Case Study: Central Aquifer of Birjand Plain). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 12(3): 556-568. (In Persian with English abstract)
 - 29- Shaghaghian M.R., and Abedini M.J. 2013. Rain gauge network design using coupled geostatistical and multivariate techniques. *Scientia Iranica* 20(2): 259-269.
 - 30- Shahidi A., Khashei Siuki A., Ramazani Y., and Nazeri-Tahrudi M. 2019. Designing Monitoring Network for Rain Gauge Stations Using Irregularity Theory (Case Study: Urmia Lake Basin). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 2(13): 296-308. (In Persian with English abstract)
 - 31- Shannon C.E. 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27: 379-423.
 - 32- Singh V.P. 2013. Entropy theory and its application in environmental and water engineering. John Wiley and Sons, Hoboken. New Jersey.
 - 33- Tsintikidis D., Georgakakos K.P., Sperflage J.A., Smith D.E., and Carpenter T.M. 2002. Precipitation uncertainty and rain gauge network design within Folsom Lakewatershed. *Journal of Hydrologic Engineering* 7: 175-184.
 - 34- Valipour E., Ghorbani M.A., and Asadi E. 2020. Rainfall Network Optimization using Information Entropy and Fire Fly Algorithm Case Study: East Basin of Urmia Lake. *Journal of Watershed Management Research* 11(21): 11-23. (In Persian with English abstract)
 - 35- Xu P., Wang D., Singh V.P., Wang Y., Wu J., Wang L., Zou X., Liu J., Zou Y., and He R. 2018. A kriging and entropy-based approach to rain gauge network design. *Environmental Research* 161: 61-75.
 - 36- Yeh H.C., Chen Y.C., Wei C., and Chen R.H. 2011. Entropy and kriging approach to rainfall network design. *Paddy and Water Environment* 9(3): 343-355.
 - 37- Yue S., Pilon P., and Cavadas G. 2002. Power of the Mann-Kendall and Spearman's tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology* 259: 254-271.
 - 38- Zandkarimi A., Mokhtari D., and Zandkarimi S. 2018. The spatial analysis and optimization of rain gauging station network in Kurdistan Province using the Kriging Error Variance. *Geographical Data* 27(105): 115-126. (In Persian)
 - 39- Zarei A., Asadi E., Ebrahimi A., Jafari M., Malekian A., Mohammadi Nasrabad H., Chemura A., Maskell G. 2020. Prediction of future grassland vegetation cover fluctuation under climate change scenarios. *Ecol. Indicat.* 119, 106858.

Evaluation of Chaharmahal va Bakhtiari Rain Gauge Stations Network Using Kriging and Entropy

S. Bayati¹- K. Abdollahi^{2*}

Received: 08-09-2021

Accepted: 08-10-2021

Introduction: Rainfall data are required for planning, designing, developing and managing water resources projects as well as hydrological studies. Some previous studies have suggested increasing the density of the rain gauge network to reduce the estimation error. However, more operational stations require more installation costs and monitoring. Some common techniques including statistical methods, spatial interpolation, information-based theory and combination are used to evaluate and design the network. Chaharmahal va Bakhtiari province is a mountainous region; hence, a denser rainfall network is expected in this mountainous environment. The aim of this study was to evaluate the condition of rain gauge stations in Chaharmahal va Bakhtiari province using two approaches, i.e. geostatistical methods and entropy theory.

Materials and Methods: The main required data set for this study is a time series of rainfall data. These data were collected on a daily scale from the Regional Water Company of Chaharmahal va Bakhtiari. After performing statistical tests, the annual data series was prepared for 46 rain gauge stations. A statistical period of 2000 to 2016 was used. The homogeneity of data was investigated by double mass test and histogram drawing methods using Excel and SPSS software, and the existence of trend in the time series of data was investigated by applying a Spearman test. Then, the adequacy of rain gauges in the gauging network was investigated. Annual rainfall interpolation maps and their standard error maps were prepared using the kriging method. Contribution of each station in reducing or increasing the error in the rain gauge network was investigated by removing each station in a cross validation procedure. The efficiency of the rain gauge network was evaluated using the concept of discrete entropy and the values of entropy indices. The value of keeping the rain gauge stations was determined using the net exchange information index.

Results and Discussion: There was no homogeneity problem and significant trend in the data series. Considering the permissible error percentage of 5%, there is a need to add 15 new rain gauge stations to the network. To apply the geostatistical method, we applied it once without deleting any station; then, the kriging interpolation error was calculated for the precipitation data. Then, only one station was removed at each stage, and both the error and the contribution of each station in increasing or decreasing the error compared to the case without Station deletion were obtained. The results indicated that Ab-Turki, Shahrekord, Borujen and Barez stations were more important than other stations. Two stations namely Chaman-Goli and Ben stations can also be considered as the influential stations in error due to the density of stations in the region and error maps. Similarly, the results of the entropy theory method were found effective in evaluating the design of the rain gauge network. The highest value of $H(x)$ was observed in the data of Armand station (3.26) and the lowest value was observed in Abbasabad station (2.28). Since $H(x)$ shows the uncertainty of measuring data, the maximum and minimum uncertainty were found for Armand and Abbasabad sites, respectively. Based on the Net Exchange Information Index, Bardeh, Bareh Mardeh and Dezkabad stations were ranked 1 to 3, respectively, indicating that they transmit and receive more information than other stations. On the other hand, a number of stations including Dorak anari, Abtorki and Chelo stations had the lowest values.

Conclusion: Due to the vast extent of the area and also considering the permissible error percentage of 5%, the number of the stations in this area was found to be insufficient. Thus, although calculating the kriging error maps showed that some stations do not have a significant share in increasing the error, removing the stations is not recommendable. Regarding the new stations, new 15 rain gauge stations are needed to check out the error maps. According to the field observations, the higher priority should be given to the northwestern area (which

1 and 2- Ph.D. Student and Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Shahrekord, respectively.

(*- Coressponding Author Email: kabdolla@sku.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2021.72310.1086

had the largest interpolation error) in the first place. For the regions with lower error, such as northeast, east, southeast, west and southwest that do not have rain gauge stations, additional rain gauge stations should be constructed.

Keywords: Annual rainfall, Geostatistical, Information transfer, Interpolation, Rain gauge network