

ارزیابی تراکم شبکه پایش با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته (مطالعه موردی: شبکه

باران سنجی حوزه آبخیز زهره فارس)

سمیه خلیفه*^۱

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

* نویسنده مسئول: s.kh.arshad@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۸/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۵/۰۶

چکیده

ارزیابی منطقه‌ای ایستگاه‌های پایش منابع آب به دلیل اهمیت آن در مکان‌یابی مناسب ایستگاه‌ها، جمع‌آوری حداکثر اطلاعات مفید و جلوگیری از انباشت غیر ضروری اطلاعات و نهایتاً کاهش هزینه‌های جمع‌آوری اطلاعات حائز اهمیت فراوان است. در این پژوهش بر پایه تئوری آنتروپی گسسته، تراکم ایستگاه‌های باران سنجی حوزه آبخیز زهره فارس مورد بررسی قرار گرفته است. با در نظر گرفتن شاخص‌های آنتروپی مرزی ($H(x)$)، آنتروپی مشترک ($H(x,y)$)، شاخص‌های اطلاعات ارسال شده ($S(i)$) و دریافت شده ($R(i)$) توسط هر ایستگاه و شاخص انتقال اطلاعات بین ایستگاه‌ها (ITI) به تعیین ایستگاه‌های مهم و مناطق ضعیف از نظر تبادل اطلاعات در شبکه پایش حوزه آبخیز پرداخته و پهنه بندی انجام شد. نتایج پهنه بندی با استفاده از نرم افزار ArcGIS 9.3 نشان داد نشان داد که تراکم ایستگاه‌های شبکه باران سنجی قابل قبول می‌باشد. مقادیر محاسبه شده برای شاخص‌های $S(i)$ و $R(i)$ کاملاً هم‌ارز بوده و هر ایستگاه تقریباً به همان میزان که اطلاعات به سایر ایستگاه‌ها ارسال می‌کند، اطلاعات دریافت می‌نماید. دو شاخص جدید $NH(x)$ و $NH(\hat{x}(i))$ نتایج هم‌ارزی با شاخص‌های $S(i)$ و $R(i)$ تولید و ارائه می‌نمایند. در نهایت نتایج بدست آمده از ارزشیابی منطقه‌ای ایستگاه‌ها نشان از آن دارد سه ایستگاه نورآباد، برغان و گشنگان ضمن کسب رتبه‌های پایین در شبکه، وضعیتی بحرانی داشته و ادامه فعالیت آنها مستلزم تجدید نظر جدی است. البته با توجه به ماهیت آماری روش گفته شده، حذف یا جابجایی ایستگاه‌های یاد شده بدون بررسی شرایط هیدرولوژیکی و چگونگی تلفیق هیدروگراف‌ها در شبکه آبراه‌ای پیشنهاد نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی، آنتروپی گسسته، تراکم و شبکه باران سنجی.

مقدمه

طراحی و بهره‌برداری مناسب از سامانه‌های پایش منابع آب یکی از مهم‌ترین مباحث مدیریت کمی و کیفی منابع آب بوده و صحت و کفایت آمار و اطلاعات هر سامانه و ارزیابی صحیح این آمار و اطلاعات، نقش تعیین‌کننده‌ای در تصمیم‌گیری‌های صحیح و پایدار در منطقه زیر پوشش سامانه دارد. لزوم دقت در صحت و کفایت آمار از یک طرف و البته زیادبودن هزینه‌های پایش از طرف دیگر، لزوم ارائه روش‌های نوینی برای طراحی بهینه سامانه‌های پایش منابع آب با توجه به هزینه‌های تولید آمار را بیش از پیش آشکار می‌سازد. از این نظر تعیین تعداد و پراکنش مناسب ایستگاه‌های شبکه پایش و همچنین ارزیابی کفایت ایستگاه‌های شبکه‌های موجود به منظور حذف ایستگاه‌های غیرضروری و مازاد و در نتیجه آن کاهش هزینه‌های تولید آمار و اطلاعات از چالش‌های مهم پایش روی هستند (مهجوری مجد و کراچیان، ۱۳۸۷). تئوری آنتروپی با نگرشی آماری-احتمالاتی به وضعیت ایستگاه‌های موجود در شبکه پایش و آمار و اطلاعات ثبت شده در آنها به همراه ارتباط ایستگاه‌های موجود با یکدیگر، ضمن بررسی اطلاعات مجموعه ایستگاه‌های موجود، امکان حذف ایستگاه‌های مازاد یا اضافه نمودن ایستگاه‌های جدید در مناطق دارای کمبود را فراهم می‌کند. بنابراین می‌توان از این تئوری در مدیریت بهتر شبکه‌های باران‌سنجی و چیدمان مناسب ایستگاه‌ها استفاده نمود. همچنین آنتروپی یکی از روش‌های کارآمد در تحلیل عدم قطعیت در سامانه‌های منابع آب محسوب می‌شود. تا نیمه اول قرن بیستم، به دلیل پیچیدگی مفهومی و محاسباتی این تئوری، محققان علاقه چندانی به کاربرد آن به‌عنوان یک روش آماری پیدا نکردند تا اینکه Shannon (۱۹۴۸) تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه استفاده از این تئوری در علوم مختلف مانند ارزیابی سری‌های زمانی اقتصادی و مباحث اکولوژیکی انجام داد و بسیاری از مفاهیم ناشناخته این تئوری را توسعه داد. در زمینه ارزیابی و طراحی سامانه‌های پایش منابع آب با تئوری آنتروپی نیز مطالعاتی انجام شده است. Yang و Burn (۱۹۹۴) از تئوری آنتروپی برای طراحی شبکه پایش آبراه‌های استفاده کردند. آن‌ها تجزیه و تحلیلی بین مقادیر آنتروپی مشترک و ضریب همبستگی بین ایستگاه‌های پایش را نیز شرح دادند. همچنین کارایی روش کریجینگ آماری و شاخص آنتروپی مشترک در زمینه ارزیابی ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش را مقایسه کردند. همچنین در این پژوهش توزیع بارندگی روزانه در منطقه مورد مطالعه گاما تشخیص داده شد. Singh و Krstanovic (۱۹۸۸) تئوری آنتروپی را برای ارزیابی زمانی و مکانی شبکه باران‌سنجی در ایالت لویزیانا در آمریکا به کار بردند. در این پژوهش وابستگی‌های زمانی و مکانی در اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی به وسیله ماتریس‌های خود همبستگی و کوواریانس متقاطع تشریح شدند. در ادامه، با استفاده از تئوری^۱ MEP، توزیع‌های

¹ Maximum Entropy Principle

نرمال چند متغیره است نتاج وسپس آنتروپی های مشترک و شرطی و اطلاعات انتقالی محاسبه و نهایتاً، منحنی های مکان هندسی نقاط با محتوای اطلاعاتی برابر ترسیم شدند. این منحنی ها را می توان برای مکان یابی ایستگاه ها مورد استفاده قرار داد. Husain (۱۹۸۹) یک روش ساده را بر اساس تئوری آنتروپی به منظور تخمین عدم قطعیت های هیدرولوژیکی منطقه ای در یک حوزه آبخیز رودخانه ای ارائه و همچنین یک روش طراحی شبکه پایش بر اساس آنتروپی پیشنهاد کرد. Kawachi و همکاران (۲۰۰۱) از تئوری آنتروپی برای کمی کردن عدم قطعیت شبکه پایش بارندگی سراسر ژاپن استفاده کرده و نقشه هم آنتروپی ژاپن را تهیه و آنرا با نقشه هم باران منطقه مقایسه نمودند. این مقایسه آن ها را قادر به ارزیابی نسبی و دسته بندی پتانسیل منابع آب موجود ژاپن کرد. Singh و Mogheir (۲۰۰۳) روشی را برای طراحی شبکه پایش کیفی آب های زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی انتقالی توسعه دادند. آنها همچنین، با استفاده از نقشه های خطوط هم سان آنتروپی مرزی روشی برای ارزیابی سامانه های پایش کیفی آب های زیرزمینی ارائه کردند. تمامی مطالعاتی که در بالا بیان شد با استفاده از تئوری آنتروپی پیوسته انجام شده اند و در آنتروپی پیوسته فرض بر توزیع احتمالاتی نرمال یا لوگ نرمال اطلاعات است که این فرض در بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی صدق نمی کند. Singh و Mogheir (۲۰۰۲) و Mogheir و همکاران (۲۰۰۴) روشی برای ارزیابی کیفی سامانه آب های زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته پیشنهاد دادند. Markus و همکاران (۲۰۰۳) از دو روش تئوری آنتروپی و GLS به منظور ارزیابی ارزش منطقه ای ایستگاه های پایش رودخانه ای در ایالت ایلینویز آمریکا استفاده نمود و نتایج هر دو روش را با هم مقایسه و مدل ترکیبی از دو روش را پیشنهاد کردند. Sarlak و همکاران (۲۰۰۶) به ارزیابی و انتخاب ایستگاه های شبکه آب سنجی با استفاده از تئوری آنتروپی پرداختند. آنها به بررسی اثر انواع توزیع های نرمال، لوگ نرمال و گاما بر نتایج رتبه بندی ایستگاه ها پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نوع توزیع در نظر گرفته برای داده های آبدی در تئوری آنتروپی پیوسته مهم می باشد و موجب مقادیر متفاوتی در رتبه بندی ایستگاه ها می شود. Chen و همکاران (۲۰۰۸) روشی مرکب از زمین آمار (کریجینگ) و آنتروپی برای تعیین تعداد و توزیع مکانی بهینه ایستگاه های باران سنجی در شمال تایوان ارائه دادند. در این روش از کریجینگ برای درون یابی مقادیر مشاهده شده ماهانه بارندگی به منظور بررسی تغییرات مکانی بارندگی و تعیین مقدار بارندگی در موقعیت های جدید باران سنجی ها (گره های یک شبکه) و از آنتروپی، برای یافتن تعداد کافی باران سنجی ها به طوری که معرف پدیده بارندگی ماهانه باشند استفاده و با محاسبه آنتروپی انتقال اطلاعات و آنتروپی مشترک درجه اهمیت ایستگاه ها تعیین گردید. معصومی و کراچیان (۱۳۸۷) با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته، کارایی سامانه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی دشت تهران را از نظر پایش مکانی و توالی زمانی نمونه برداری ها مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل، نشان دهنده کارایی مناسب الگوریتم پیشنهادی در ارزیابی و بهنگام سازی سامانه های پایش کیفی منابع آب

زیرزمینی بود. کریمی حسینی و بزرگ حداد (۱۳۸۸) با استفاده از تئوری آنتروپی و الگوریتم ژنتیک به ارزیابی و طراحی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه باتلاق گاوخونی پرداختند. بدین منظور با استفاده از مفهوم تئوری آنتروپی و به دو روش الگوریتم ترتیبی و الگوریتم ژنتیک و با بررسی آنتروپی انتقال اطلاعات یک سری نقاط پتانسیل، مکان‌های مناسب نصب ایستگاه باران‌سنجی جدید تعیین گردید. در نهایت با مقایسه نتایج این دو روش، مشخص شد که الگوریتم ژنتیک با یک تعداد معین ایستگاه به جواب بهتری نسبت به الگوریتم ترتیبی می‌رسد. Mishra و Coulibaly (۲۰۱۰) با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته شبکه‌های هیدرومتری حوزه‌های کانادا را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها ابتدا با استفاده از مقادیر شاخص انتقال اطلاعات به ارزیابی و رتبه‌بندی ایستگاه‌های هیدرومتری و سپس پهنه‌بندی آن در حوزه‌های کانادا پرداختند و درجه اهمیت مناطق را از این نظر تعیین نمودند. سپس با استفاده از نتایج به‌دست آمده کارایی شبکه‌های پایش سراسر کانادا را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که اکثر شبکه‌های پایش کانادا با کمبود تعداد ایستگاه هیدرومتری مواجه هستند و نیاز به بازنگری مجدد دارند. Mondal و Singh (۲۰۱۲) با استفاده از نظریه آنتروپی گسسته ایستگاه‌های شبکه پایش آب زیرزمینی حوضه آبریز رودخانه کوداگانار در جنوب هند را ارزیابی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که تعداد ایستگاه‌های شبکه پایش کافی بوده ولی جانمایی و چیدمان آن‌ها مناسب نیست. بدین ترتیب از تعداد ۲۸ ایستگاه موجود، ۱۵ ایستگاه برای سنجش تراز آب زیرزمینی ضروری و حیاتی می‌باشد. فانی و همکاران (۱۳۹۱) به ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه آبخیز کارون بزرگ با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته پرداختند. آن‌ها با استفاده از مقادیر شاخص انتقال اطلاعات به پهنه بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوزه آبخیز کارون بزرگ با استفاده از نرم افزار ArcGIS پرداختند. نتایج ایشان نشان داد تراکم ۳۱ ایستگاه شبکه باران‌سنجی حوزه بهینه می‌باشد و می‌توان سایر ایستگاه‌های باران‌سنجی را از شبکه پایش حوزه حذف نمود. خلیفه و خلیفه (۱۳۹۳) از تئوری آنتروپی در ارزیابی منطقه‌ای ایستگاه‌های پایش هیدرومتری حوزه بختگان- مهارلو استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که از ۱۴ ایستگاه شبکه پایش چهار ایستگاه در وضعیت بحرانی قرار داشته و امکان حذف آن‌ها وجود دارد. در این تحقیق سعی شده است با توجه به محدودیت ذکر شده در مورد عدم پیروی اطلاعات باران‌سنجی از توزیع نرمال یا لوگ‌نرمال، توانایی تئوری آنتروپی گسسته در تعیین ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های موجود در شبکه باران‌سنجی حوزه آبخیز زهره فارس مورد ارزیابی قرار گیرد. ابتدا با استفاده از شاخص‌های آنتروپی به رتبه‌بندی ایستگاه‌ها و پهنه‌بندی حوزه آبخیز با استفاده از شاخص انتقال اطلاعات پرداخته شد. نهایتاً ارزیابی تراکم ایستگاه‌های باران‌سنجی شبکه پایش و بررسی ارتباط بین شاخص‌های آنتروپی و ضریب همبستگی اطلاعات انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و اطلاعات

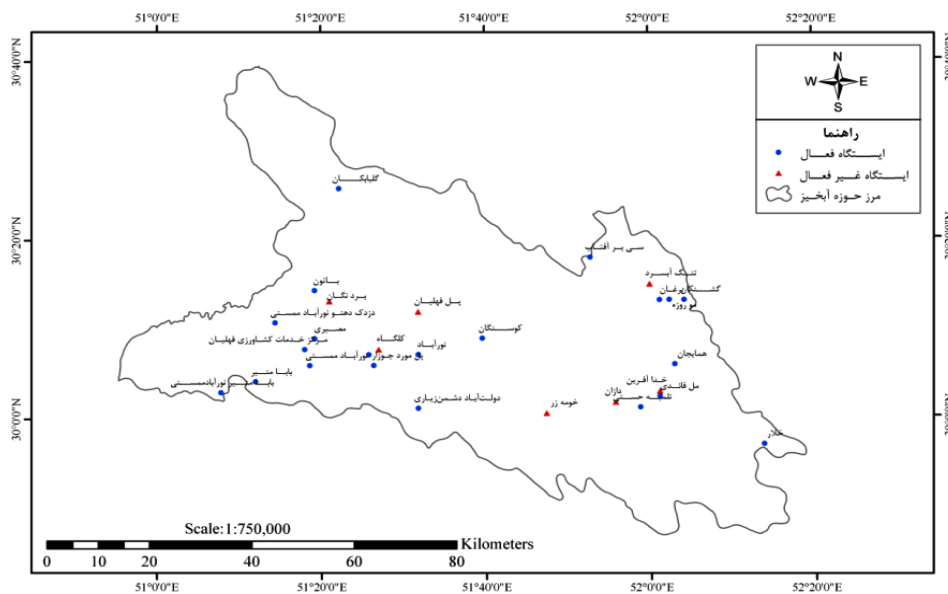
حوزه آبخیز زهره فارس واقع در استان فارس و بخشی از حوزه آبریز اصلی مرکزی ایران می‌باشد که در محدوده جغرافیایی $50^{\circ}55'12''$ تا $52^{\circ}18'36''$ طول شرقی و $29^{\circ}46'48''$ تا $30^{\circ}39'36''$ عرض شمالی گسترش یافته است. مساحت این حوزه آبخیز برابر با $5409/45$ کیلومتر مربع است که تقریباً $4/5$ درصد از استان فارس را تشکیل می‌دهد (شکل ۱). محیط حوزه آبخیز برابر $509/1$ کیلومتر است. در حوزه آبخیز زهره فارس ۳۱ ایستگاه باران‌سنجی موجود می‌باشد که مجموعاً ۱۰ ایستگاه توسط سازمان هواشناسی و ۲۱ ایستگاه توسط سازمان تحقیقات منابع آب ایران نصب گردیده که ۲۱ ایستگاه آن کماکان فعال می‌باشد (شکل ۲). در این پژوهش مجموع بارش سالیانه ایستگاه‌های یاد شده بر حسب میلی‌متر به عنوان آمار و اطلاعات ثبت شده در هر ایستگاه مد نظر قرار گرفته است. اولین گام در بررسی آمار و اطلاعات شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی یک حوزه آبخیز تشکیل دوره آماری مشترک است. در تشکیل دوره آماری به دست آوردن دوره‌ای با بیشترین تعداد ایستگاه، بیشترین سال‌های آماری و کمترین نسبت بازسازی حائز اهمیت فراوان است. در این ارتباط و بر اساس آمار و اطلاعات موجود، دوره آماری ۳۱ ساله از سال ۱۳۵۷ تا ۱۳۸۸ شامل ۱۱۲ ایستگاه برای حوزه آبخیز تشکیل گردید. بدیهی است در تشکیل دوره آماری یاد شده بازسازی آمار نیز صورت گرفته است. بدین منظور ابتدا رابطه رگرسیون خطی بین ایستگاه فاقد آمار و سایر ایستگاه‌ها برقرار گردید. سپس رابطه دارای بهترین ضریب تعیین (R^2) انتخاب و با استفاده از آن آمار ایستگاه فاقد آمار بازسازی شد. البته میزان بازسازی آمار در همه ایستگاه‌ها کمتر از ۲۰ درصد طول دوره آماری بوده است.



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز زهره فارس

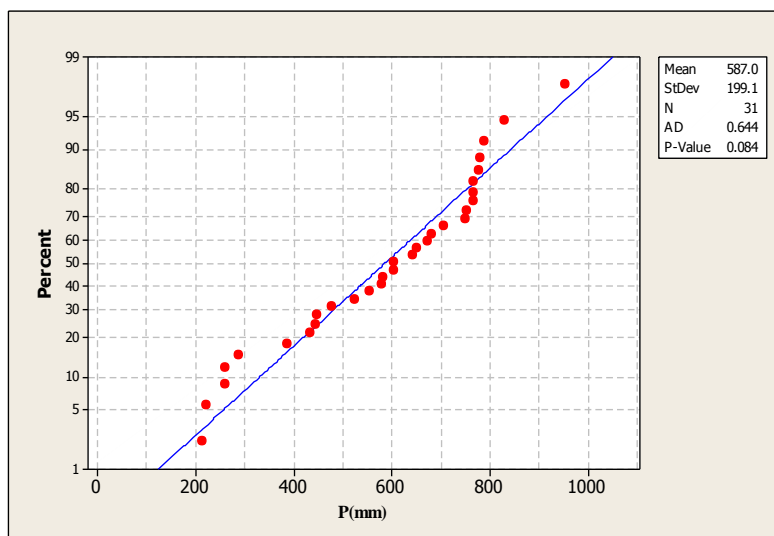
تئوری آنتروپی

به طور کلی تئوری آنتروپی به دو صورت گسسته و پیوسته تعریف شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آنتروپی پیوسته، فرض بر این است که توزیع احتمالاتی متغیرها، از توزیع نرمال یا لوگ‌نرمال پیروی می‌کند. ولی در حالت گسسته با توجه به بازه تغییرات مقادیر متغیرها، اطلاعات موجود گسسته سازی شده و جداول توزیع متغیرها تهیه می‌شوند.

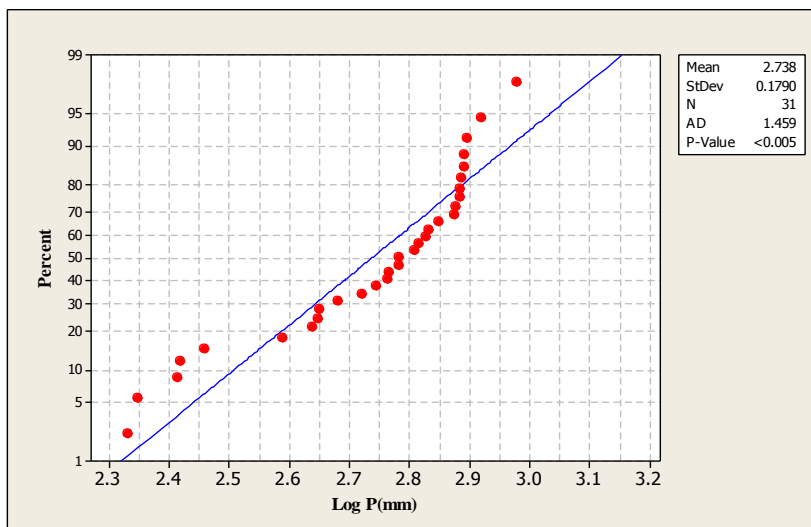


شکل ۲: پراکنش و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه آبخیز زهره فارس

سپس بر مبنای این جداول، مقادیر احتمال رخداد در هر حالت محاسبه می‌شود. اما تحقیقات اخیر همچون Mogheir و Singh (۲۰۰۲) نشان داده است که تابع توزیع احتمال بسیاری از متغیرهای کمی و کیفی در سامانه‌های منابع آب از توزیع‌های نرمال یا لوگ نرمال تبعیت نمی‌کنند. آنتروپی گسسته راهی برای اصلاح این نقیصه مهم در کاربرد آنتروپی در مسائل مربوط به آب است. در این راستا مقادیر آبدهی ۱۲ ایستگاه منتخب توسط نرم‌افزار MINITAB و روش آزمون Anderson-Darling مورد ارزیابی قرار گرفته و مشاهده شد که از تابع توزیع احتمال نرمال و لوگ‌نرمال پیروی نمی‌نمایند شکل‌های ۳ و ۴ لذا در این تحقیق آنتروپی گسسته مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۳: برازش توزیع احتمال نرمال به روش آزمون Anderson-Darling برای ایستگاه نورآباد



شکل ۴: برازش توزیع احتمال لوگ نرمال به روش آزمون Anderson-Darling برای ایستگاه نورآباد

تعریف گروهی از شاخص‌های آنترویی گسسته به صورت زیر می‌باشند.

آنترویی مرزی

$$H(x) = -\sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) \ln p(x_i) \quad \text{رابطه ۱:}$$

آنترویی مشترک

$$H(x, y) = -\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln p(x_i, y_j) \quad \text{رابطه ۲:}$$

آنترویی شرطی

$$H(x|y) = -\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln p(x_i|y_j) \quad \text{رابطه ۳:}$$

آنترویی انتقال اطلاعات

$$T(x, y) = -\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln \left[\frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)p(y_j)} \right] \quad \text{رابطه ۴:}$$

در روابط بالا $p(x)$ احتمال روی دادن x ، $p(x, y)$ احتمال روی دادن مشترک x و y و $p(x|y)$ احتمال رخ دادن x

به شرط y می‌باشد. اگر چه $T(x, y)$ به عنوان شاخصی برای تعیین انتقال اطلاعات مطرح است اما Mogheir و Singh

(۲۰۰۴) شاخص زیر را برای نرمال کردن شاخص آنترویی انتقال اطلاعات معرفی و آنرا شاخص انتقال اطلاعات نامیدند.

$$ITI = \frac{T(x, y)}{H(x, y)} \quad \text{رابطه ۵:}$$

Markus و همکاران (۲۰۰۳) سه شاخص $R(i)$ ، $S(i)$ و $N(i)$ را به شرح زیر و به صورت یک تبدیل کسری آنترویی x

با نماد $R(x,y)$ که یک کاهش عدم قطعیت از x اگر y معلوم باشد و در واقع اطلاعات دریافتی توسط x از y نیز می‌باشد، در آنتروپی گسسته تعریف نمودند:

$$R(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(x)} \quad \text{رابطه ۶:}$$

$$S(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(y)} \quad \text{رابطه ۷:}$$

اطلاعات دریافتی و ارسالی ایستگاه \hat{x} نیز این گونه تعریف می‌شود:

$$R(i) = R(x(i), \hat{x}(i)) \quad \text{رابطه ۸:}$$

$x(i)$ بیان کننده داده‌های ایستگاه $\hat{x}(i)$ از رابطه خطی زیر به دست می‌آید:

$$\hat{x}(i) = a(i) + \sum_{j=1}^{l-1} y_j(i) \times b_j(i) \quad \text{رابطه ۹:}$$

y ماتریس داده‌ها از تمام ایستگاه‌های دیگر و $a(i)$ و $b(i)$ پارامترهای رگرسیون بین ایستگاه \hat{x} و تمام ایستگاه‌های

دیگر است که به صورت خطی برازش داده شده است.

به گونه‌ای مشابه:

$$S(i) = S(x(i), \hat{x}(i)) \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

روابط فوق بیانگر آن است که مقادیر بزرگ‌تر $R(i)$ و $S(i)$ به ترتیب به معنای دریافت و ارسال بیشتر اطلاعات بین ایستگاه \hat{x} و سایر ایستگاه‌های شبکه و یا برقراری بهتر ارتباط بین این ایستگاه و سایر ایستگاه‌ها است. بدین ترتیب مقادیر بیشتر $R(i)$ و $S(i)$ برای یک ایستگاه به معنای ارزش بیشتر ایستگاه یاد شده است و حفظ و نگهداری ایستگاه مزبور توصیه می‌شود. اما شاخص $N(i)$ با نام اطلاعات خالص تبدالی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N(i) = S(i) - R(i) \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

شاخص $N(i)$ از این نظر حائز اهمیت است که ارزش هر ایستگاه با این شاخص سنجیده می‌شود. شاخص $N(i)$ بیان کننده اطلاعات کل خالص هرایستگاه بوده و هر ایستگاهی که کمترین میزان $N(i)$ را داراست کمترین رتبه و اهمیت را در شبکه پایش به خود اختصاص می‌دهد.

کلاس‌بندی اطلاعات

در تئوری آنتروپی در حالت گسسته، با توجه به بازه تغییرات مقادیر متغیرها، اطلاعات موجود گسسته‌سازی شده و جداول توزیع فراوانی مشاهدات متغیرها تهیه می‌شوند (جدول ۱). سپس با استفاده از این جداول، مقادیر احتمال رخداد در

هر حالت محاسبه می‌شود (جدول ۲). اعداد داخل جدول، تعداد تکرار مقادیر یک متغیر مثل x را در یک بازه مشخص، زمانی که متغیر y در یک بازه دیگر قرار دارد، نشان می‌دهد. البته این دو بازه یکسان در نظر گرفته شده‌اند. از رابطه زیر که به نام دستور استورجس مشهور است تعداد کلاس‌های (بازه‌های) مناسب محاسبه شده است:

$$NCI = 1 + 3.322 \log(n) \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

در رابطه بالا، n تعداد مشاهدات و NCI تعداد بازه‌ها (کلاس‌بندی) در سری زمانی متغیر مورد نظر است.

پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات (ITI(i)) در حوزه آبخیز

اساس پهنه‌بندی بر درون‌یابی استوار است. درون‌یابی فرآیند به‌دست آوردن نقاط مجهول توسط نقاط معلوم است. داده‌هایی که به عنوان ورودی در عملیات درون‌یابی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از نوع داده‌های نقطه‌ای می‌باشند.

جدول ۱: توزیع فراوانی مشاهدات متغیرها (Singh and Mogheir, 2003)

		Y					
		۱	۲	۳	.....	u	Total
x	۱	f_{11}	f_{12}	f_{13}	.....	f_{1u}	$f_{1.}$
	۲	f_{21}	f_{22}	.....	.....	f_{2u}	$f_{2.}$
	۳	f_{31}	.....	.....	.....	f_{3u}	$f_{3.}$

	v	f_{v1}	f_{v2}	f_{v2}$	.....	.....	f_{v.}$
	Total	$f_{.1}$	$f_{.2}$	$f_{.3}$	.....	$f_{.u}$	

جدول ۲: توزیع احتمالاتی متغیرها (Singh and Mogheir, 2003)

		Y					
		۱	۲	۳	.....	u	Total
x	۱	P_{11}	P_{12}	P_{13}	.....	P_{1u}	$P_{1.}$
	۲	P_{21}	P_{22}	.....	.....	P_{2u}	$P_{2.}$
	۳	P_{31}	.....	.....	.....	P_{3u}	$P_{3.}$

	v	P_{v1}	P_{v2}	P_{v2}$	.....	.....	P_{v.}$
	Total	$P_{.1}$	$P_{.2}$	$P_{.3}$	.....	$P_{.u}$	

در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی حوزه آبخیز مطالعاتی بر اساس شاخص ITI(i)، از روش میان‌یابی Spline با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 9.3 انجام شد. در نهایت بر اساس حدود ذکر شده در (جدول ۳) برای شاخص ITI(i) در حوزه آبخیز پهنه‌بندی انجام شده است.

جدول ۳: طبقه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات ITI(i)

شاخص ITI	درجه اهمیت منطقه
۰/۰-۰/۲	کمبود شدید
۰/۲-۰/۴	کمبود
۰/۴-۰/۶	متوسط
۰/۶-۰/۸	بالای متوسط
۰/۸ و بالاتر	مازاد

نتایج و بحث

ارزشیابی منطقه‌ای ایستگاه‌ها

کارایی تئوری آنتروپی در رتبه‌بندی و تحلیل منطقه‌ای ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوزه آبخیز زهره فارس مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس مقادیر شاخص‌های متفاوت آنتروپی برای $n=6$ ارائه شده است. چنان که در جدول ۴ دیده می‌شود سه ایستگاه نورآباد، برغان و گشنگان ضمن کسب رتبه‌های پایین در شبکه، وضعیتی بحرانی داشته و ادامه فعالیت آنها مستلزم تجدید نظر جدی است. از سوی دیگر ایستگاه‌های باتون، نورآباد ممسنی و دزدک دهنو بالاترین رتبه‌ها را در میان سایر ایستگاه‌ها به خود اختصاص داده‌اند و سه ایستگاه مهم حوزه آبخیز مورد مطالعه می‌باشند که مفیدترین اطلاعات در شبکه پایش را تولید می‌نمایند.

تراکم سنجی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه آبخیز

بررسی تراکم ایستگاه‌های شبکه حوزه توسط آنالیز کردن مقادیر شاخص انتقال اطلاعات ITI(i) توسط درونیابی مکانی و کلاس بندی مقادیر آن طبق جدول ۳ صورت می‌پذیرد. بر پایه این آنالیز، تراکم ایستگاه‌های یک شبکه هنگامی که درصد زیادی از مساحت حوزه در دسته متوسط (۰/۴-۰/۶) باشد قابل قبول و چنانچه درصد زیادی از مساحت حوزه در دسته بالای متوسط (۰/۶-۰/۸) باشد بهینه می‌باشد (Coulibaly and Mishra, 2010).

جدول ۴: رتبه‌بندی ایستگاه‌های حوزه آبخیز زهره فارس بر اساس مقادیر شاخص‌های آنتروپی

نام ایستگاه	رتبه	N(i)	رتبه	S(i)	رتبه	R(i)	رتبه	ITI(i)
برغان	۱۰	۰/۰۲۰	۲	۰/۵۴۱	۲	۰/۵۲۱	۲	۰/۳۶۱
موروزه	۶	۰/۰۰۲	۸	۰/۷۳۹	۸	۰/۷۳۷	۸	۰/۵۸۵
مل قاندی	۳	-۰/۰۳۶	۴	۰/۶۳۱	۴	۰/۶۶۷	۴	۰/۴۷۹
کوسنگان	۹	۰/۰۱۹	۱۰	۰/۷۸۷	۹	۰/۷۶۸	۹	۰/۶۳۶
نورآباد	۴	-۰/۰۰۶	۱	۰/۴۹۱	۱	۰/۴۹۷	۱	۰/۳۲۸
گشتگان	۸	۰/۰۱۶	۳	۰/۵۹۰	۳	۰/۵۷۴	۳	۰/۴۱۰
دزدک دهنو	۵	۰/۰۰۰	۱۱	۰/۸۰۵	۱۰	۰/۸۰۵	۱۰	۰/۶۷۳
نورآباد ممسنی	۱	-۰/۰۵۴	۹	۰/۷۶۰	۱۲	۰/۸۱۴	۱۰	۰/۶۴۸
گلبابکان	۲	-۰/۰۴۵	۵	۰/۶۳۳	۶	۰/۶۷۸	۵	۰/۴۸۷
خلار	۱۱	۰/۰۲۹	۶	۰/۶۹۸	۵	۰/۶۶۸	۶	۰/۵۱۸
باتون	۷	۰/۰۱۵	۱۲	۰/۸۲۶	۱۱	۰/۸۱۱	۱۲	۰/۶۹۲
بابا منیر	۱۲	۰/۰۴۰	۷	۰/۷۲۵	۷	۰/۶۸۵	۷	۰/۵۴۴

نام ایستگاه	رتبه	$H(x(i), \hat{x}(i))$	رتبه	$H(\hat{x}(i))$	رتبه	$H(x(i))$
برغان	۱۱	۳/۵۲۶	۵	۲/۳۵۴	۱۰	۲/۴۴۵
موروزه	۵	۳/۰۳۱	۹	۲/۳۹۸	۸	۲/۴۰۶
مل قاندی	۱۰	۳/۲۳۶	۱۱	۲/۴۶۰	۵	۲/۳۲۸
کوسنگان	۳	۲/۹۱۸	۶	۲/۳۵۸	۹	۲/۴۱۶
نورآباد	۱۲	۳/۶۲۸	۱۰	۲/۴۲۴	۷	۲/۳۹۳
گشتگان	۷	۳/۰۹۱	۱	۲/۱۴۹	۲	۲/۲۱۰
دزدک دهنو	۲	۳/۷۷۳	۳	۲/۳۲۰	۴	۲/۳۲۰
نورآباد ممسنی	۴	۲/۹۵۰	۱۲	۲/۵۱۳	۶	۲/۳۴۷
گلبابکان	۶	۳/۰۵۳	۴	۲/۳۴۷	۱	۲/۱۹۲
خلار	۹	۳/۲۰۱	۸	۲/۳۷۸	۱۱	۲/۴۸۲
باتون	۱	۲/۶۱۶	۲	۲/۱۹۴	۳	۲/۲۳۴
بابا منیر	۸	۳/۱۴۹	۷	۲/۳۶۱	۱۲	۲/۴۹۹

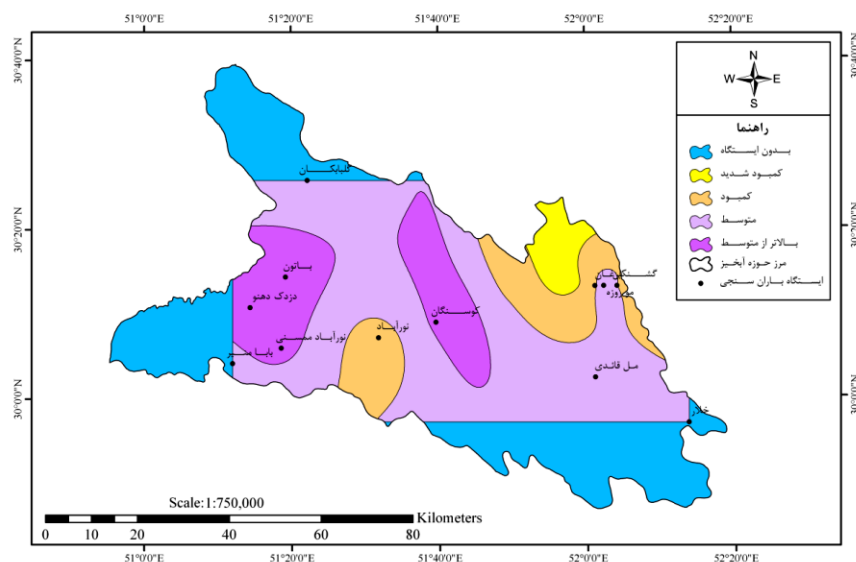
بر اساس نتایج شکل ۵ و جدول ۵ تقریباً ۵۸ درصد مساحت حوزه آبخیز را دسته متوسط و بالای متوسط تشکیل داده است بنابراین تراکم ایستگاه‌های شبکه باران‌سنجی حوزه زهره فارس قابل قبول می‌باشد.

جدول ۵: نتایج پهنه بندی حوزه آبخیز زهره فارس بر اساس شاخص انتقال اطلاعات (ITI)

درجه اهمیت منطقه	درصد مساحت
کمبود شدید	۳/۲۸
کمبود	۱۱/۰۷
متوسط	۴۱/۷۸
بالتر از متوسط	۱۵/۸۷
بدون ایستگاه	۲۸/۰۰
مجموع	۱۰۰/۰۰

بررسی ارتباط بین شاخص‌های آنتروپی و ضریب همبستگی اطلاعات ایستگاه‌ها

نتایج به دست آمده برای ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه آبخیز بر اساس پنج شاخص $N(i)$ ، $S(i)$ ، $R(i)$ ، $ITI(i)$ و ضریب همبستگی اطلاعات هر ایستگاه با سایر ایستگاه‌ها (r) قابل توجه است. چنان‌که در جدول ۶ دیده می‌شود نتیجه رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس r در ایستگاه‌های حوزه آبخیز با روش آنتروپی مشابه است.



شکل ۵: پهنه‌بندی حوزه آبخیز زهره فارس بر اساس شاخص انتقال اطلاعات $ITI(i)$

فانی و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقات خود بیان داشتند که تفاوت چندانی در رتبه‌های یک ایستگاه در رابطه با شاخص‌های $S(i)$ ، $R(i)$ و $ITI(i)$ دیده نشده و بیشتر ایستگاه‌ها دارای رتبه‌های مشابه هستند. Markus و همکاران (۲۰۰۳) و خلیفه و خلیفه (۱۳۹۳) گزارش دادند که رتبه شاخص‌های $R(i)$ و $S(i)$ تقریباً یکسان اما نسبت به شاخص

$N(i)$ متفاوت می‌باشند. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با نتایج تحقیقات ذکر شده همخوانی دارد. همچنین رابطه تجربی بین ضریب همبستگی اطلاعات هر ایستگاه با سایر ایستگاه‌ها (r) و شاخص‌های $R(i)$ ، $N(i)$ ، $S(i)$ و $ITI(i)$ در حوزه آبخیز مورد مطالعه به صورت رابطه ۱۳ تا رابطه ۱۴ می‌باشد.

$$ITI(i) = 1.13R(i) - 0.54N(i) + 0.01r - 0.26 \quad \text{رابطه ۱۳:}$$

$$n = 12, R^2 = 0.84, F = 396.5, \text{Sig} = 0.0\dots$$

$$ITI(i) = 0.54S(i) + 0.58R(i) + 0.01r - 0.26 \quad \text{رابطه ۱۴:}$$

$$n = 12, R^2 = 0.99, F = 396.5, \text{Sig} = 0.0\dots$$

Markus و همکاران (۲۰۰۳) در تحقیقات خود بیان داشتند مقادیر شاخص‌های $R(i)$ و $S(i)$ از همبستگی بالاتری نسبت به شاخص $N(i)$ برخوردارند. فانی و همکاران (۱۳۹۱) و خلیفه و خلیفه (۱۳۹۳) به این نتیجه رسیدند که مقادیر محاسبه شده برای شاخص‌های $R(i)$ و $S(i)$ کاملاً هم‌ارز می‌باشند. نتایج (جدول ۷) هم‌ارزی شاخص‌های $R(i)$ و $S(i)$ را نشان می‌دهند که مطابق با تحقیقات مذکور می‌باشد. $R(i)$ شاخصی برای مقدار اطلاعات دریافت شده از سایر ایستگاه‌ها و $S(i)$ شاخصی برای ارسال اطلاعات به سایر ایستگاه‌ها است. در حقیقت هر دو این شاخص‌ها بیانگر ارتباط یک ایستگاه با سایر ایستگاه‌ها می‌باشند. به عبارتی دیگر هر ایستگاه تقریباً به همان میزان که اطلاعات به سایر ایستگاه‌ها ارسال می‌کند سعی در گرفتن اطلاعات از ایستگاه‌ها دارد. از این نظر رتبه‌های یکسان به دست آمده توسط این شاخص‌ها قابل توجیه و انتظار است.

$$R(i) = 0.97S(i) + 0.01 \quad \text{رابطه ۱۵:}$$

$$n = 12, R^2 = 0.93, \text{Sig} = 0.0\dots$$

فانی و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقات خود بیان داشتند که شاخص‌های $S(i)$ ، $R(i)$ و $ITI(i)$ دارای روند نزولی- صعودی مشابه می‌باشند که می‌توان این ارتباط را در قالب یک رابطه نشان داد. مقایسه مقادیر شاخص‌های $S(i)$ ، $R(i)$ و $ITI(i)$ نشان می‌دهد که ارتباط تقریباً مشخصی بین این شاخص‌ها وجود داشته که می‌توان ارتباط فوق را در قالب یک رابطه خطی نشان داد که با نتایج فانی و همکاران (۱۳۹۱) مطابقت دارد. (رابطه ۱۶) بیانگر این ارتباط در تعیین شاخص تبادل اطلاعات بر اساس سایر شاخص‌های آنتروپی می‌باشد.

$$ITI(i) = 0.56S(i) - 0.57R(i) - 0.25 \quad \text{رابطه ۱۶:}$$

$$n = 12, R^2 = 0.99, \text{Sig} = 0.00$$

اگر شاخص جدید $NH(x)$ را برای نرمال کردن شاخص آنتروپی مرزی معرفی و به صورت (رابطه ۱۷) تعریف کرد:

$$NH(x) = \frac{H(x)}{H(x, \hat{x}(i))} \quad \text{رابطه ۱۷:}$$

به گونه‌ای مشابه:

$$NH(\hat{x}(i)) = \frac{H(\hat{x}(i))}{H(x, \hat{x}(i))} \quad \text{رابطه ۱۸:}$$

این مسأله در واقع بیانی دیگر از مفهوم ارسال و دریافت اطلاعات است و بیانگر این مطلب است که ارتباط تقریباً یکسانی میان $S(i)$ و $NH(x)$ و همچنین میان $R(i)$ و $NH(\hat{x}(i))$ وجود دارد (جدول ۸). بنابراین انتظار می‌رود شاخص‌های $R(i)$ ، $S(i)$ ، $NH(x)$ و $NH(\hat{x}(i))$ یا ترکیب آن‌ها با یکدیگر هم‌ارز بوده و نتایج مشابهی را ارائه نمایند که می‌توان این روابط فوق را در قالب معادلات خطی زیر نشان داد.

$$R(i) = 0.58NH(\hat{x}(i)) - 0.37 \quad \text{رابطه ۱۹:}$$

$$(n=12, R^2=0.98, \text{Sig}=0.000\dots)$$

$$S(i) = 0.57NH(x) - 0.38 \quad \text{رابطه ۲۰:}$$

$$(\dots n=12, R^2=0.98, \text{Sig}=0.000)$$

به طور مشابه ارتباط تقریباً یکسان میان $N(i)$ و اختلاف میان $NH(x)$ و $NH(\hat{x}(i))$ قابل توجیه و انتظار است.

$$N(i) = 0.90(NH(x) - NH(\hat{x}(i))) \quad \text{رابطه ۲۱:}$$

$$(\dots n=12, R^2=0.99, \text{Sig}=0.000)$$

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از تئوری آنتروپی در ارزیابی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه زهره فارس استفاده شد و نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس مقادیر شاخص‌های آنتروپی در حالت ۶ کلاس ارائه شده است. سه ایستگاه نورآباد، برغان و گشنگان ضمن کسب رتبه‌های پایین در شبکه، وضعیتی بحرانی داشته و ادامه فعالیت آن‌ها مستلزم تجدید نظر جدی است. همچنین بر اساس نتایج پهنه بندی تراکم ایستگاه‌های شبکه باران‌سنجی حوزه زهره فارس قابل قبول می‌باشد. بررسی ارتباط بین شاخص‌های آنتروپی نشان داد که مقادیر محاسبه شده برای شاخص‌های $R(i)$ و $S(i)$ کاملاً هم‌ارز می‌باشند و مقایسه مقادیر شاخص‌های $S(i)$ ، $R(i)$ و $ITI(i)$ نشان می‌دهد که ارتباط تقریباً مشخصی بین این شاخص‌ها وجود داشته که می‌توان ارتباط فوق را در قالب یک رابطه خطی نشان داد. همچنین ارتباط تقریباً یکسانی میان $S(i)$ و $NH(x)$ و همچنین میان $R(i)$ و $NH(\hat{x}(i))$ وجود دارد. در نهایت، پیشنهاد می‌شود تمامی بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش

برای شبکه‌های پایش سایر حوزه‌ها انجام و نتایج با نتایج حاصل از این پژوهش مقایسه گردد. حصول نتایج مشابه می‌تواند نشان‌دهنده صحت مباحث طرح شده در این پژوهش باشد.

جدول ۶: رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس ضریب همبستگی (r) و شاخص‌های R(i)، S(i) و ITI(i)

رتبه	N(i)	رتبه	r	رتبه	نام ایستگاه
۲	۰/۰۲۰	۱۰	۰/۹۷۵	۸	برغان
۸	۰/۰۰۲	۶	۰/۹۸۴	۱۲	مو روزه
۴	-۰/۰۳۶	۳	۰/۹۶۰	۶	مل قاندی
۱۰	۰/۰۱۹	۹	۰/۹۸۱	۱۰	کوسنگان
۱	-۰/۰۰۶	۴	۰/۹۱۲	۲	نورآباد
۳	۰/۰۱۶	۸	۰/۷۸۸	۱	گشنکان
۱۱	۰/۰۰۰	۵	۰/۹۷۹	۹	دزدک دهنو
۹	-۰/۰۵۴	۱	۰/۹۸۲	۱۱	نورآباد ممسنی
۵	-۰/۰۴۵	۲	۰/۹۵۳	۵	گلبایکان
۶	۰/۰۲۹	۱۱	۰/۹۲۱	۳	خلار
۱۲	۰/۰۱۵	۷	۰/۹۷۳	۷	باتون
۷	۰/۰۴۰	۱۲	۰/۹۳۸	۴	بابا منیر

ITI(i)	رتبه	R(i)	رتبه	S(i)	نام ایستگاه
۰/۳۶۱	۲	-۰/۵۲۱	۲	-۰/۵۴۱	برغان
۰/۵۸۵	۸	-۰/۷۳۷	۸	-۰/۷۳۹	مو روزه
۰/۴۷۹	۴	۰/۶۶۷	۴	۰/۶۳۱	مل قاندی
۰/۶۳۶	۹	-۰/۷۶۸	۹	-۰/۷۸۷	کوسنگان
۰/۳۲۸	۱	۰/۰۴۹۷	۱	۰/۴۹۱	نورآباد
۰/۴۱۰	۳	-۰/۵۷۴	۳	-۰/۵۹۰	گشنکان
۰/۶۷۳	۱۱	۰/۸۰۵	۱۰	۰/۸۰۵	دزدک دهنو
۰/۶۴۸	۱۰	-۰/۸۱۴	۱۲	-۰/۷۶۰	نورآباد ممسنی
۰/۴۸۷	۵	۰/۶۷۸	۶	۰/۶۳۳	گلبایکان
۰/۵۱۸	۶	۰/۶۶۸	۵	۰/۶۹۸	خلار
۰/۶۹۲	۱۲	-۰/۸۱۱	۱۱	-۰/۸۲۶	باتون
۰/۵۴۴	۷	-۰/۶۸۵	۷	-۰/۷۲۵	بابا منیر

جدول ۷: مقادیر ضریب همبستگی شاخص‌های $(N(i), r, S(i), R(i), ITI(i))$

	r	S(i)	R(i)	ITI(i)	N(i)
r	۱	۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۰۶
S(i)	۰/۲۳	۱	۰/۹۳	۰/۹۸	۰/۰۰۷
R(i)	۰/۲۹	۰/۹۳	۱	۰/۹۷	۰/۰۳
ITI(i)	۰/۲۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۱	۰/۰۰۲
N(i)	۰/۰۶	۰/۰۰۷	۰/۰۳	۰/۰۰۲	۱

جدول ۸: مقادیر و رتبه‌بندی شاخص‌های $(N(i), R(i), S(i), NH(x(i)), NH(\hat{x}(i)))$

R(i)	رتبه	N(i)	رتبه	$NH(x(i)) - NH(\hat{x}(i))$	رتبه	نام ایستگاه
۰/۵۲۱	۲	-۰/۰۲۰	۱۰	۰/۰۲۶	۱۰	برغان
۰/۷۳۷	۸	۰/۰۰۲	۶	۰/۰۰۳	۶	موروزه
۰/۶۶۷	۴	-۰/۰۳۶	۳	-۰/۰۴۱	۳	مل قانندی
۰/۷۶۸	۹	۰/۰۱۹	۹	۰/۰۲۰	۹	کوسنگان
۰/۴۹۷	۱	-۰/۰۰۶	۴	-۰/۰۰۸	۴	نورآباد
۰/۵۷۴	۳	۰/۰۱۶	۸	۰/۰۲۰	۸	گشنگان
۰/۸۰۵	۱۰	۰/۰۰۰	۵	۰/۰۰	۵	دزدک دهنو
۰/۸۱۴	۱۲	-۰/۰۵۴	۱	-۰/۰۵۶	۱	نورآباد ممسنی
۰/۶۷۸	۶	-۰/۰۴۵	۲	-۰/۰۵۱	۲	گلبابکان
۰/۶۶۸	۵	۰/۰۲۹	۱۱	۰/۰۳۲	۱۱	خلار
۰/۸۱۱	۱۱	۰/۰۱۵	۷	۰/۰۱۵	۷	باتون
۰/۶۸۵	۷	۰/۰۴۰	۱۲	۰/۰۴۴	۱۲	بابا منیر

$NH(x(i))$	رتبه	S(i)	رتبه	$NH(\hat{x}(i))$	رتبه	نام ایستگاه
۰/۶۹۳	۲	۰/۵۴۱	۲	۰/۶۶۸	۱	برغان
۰/۷۹۴	۸	۰/۷۳۹	۸	۰/۷۹۱	۸	موروزه
۰/۷۱۹	۵	۰/۶۳۱	۴	۰/۷۶۰	۶	مل قانندی
۰/۸۲۸	۱۰	۰/۷۸۷	۱۰	۰/۸۰۸	۹	کوسنگان
۰/۶۶۰	۱	۰/۴۹۱	۱	۰/۶۶۸	۲	نورآباد
۰/۷۱۵	۳	۰/۵۹۰	۳	۰/۶۹۵	۳	گشنگان
۰/۸۳۷	۱۱	۰/۸۰۵	۱۱	۰/۸۳۷	۱۰	دزدک دهنو
۰/۷۹۶	۹	۰/۷۶۰	۹	۰/۸۵۲	۱۲	نورآباد ممسنی
۰/۷۱۸	۴	۰/۶۳۳	۵	۰/۷۶۹	۷	گلبابکان
۰/۷۷۵	۶	۰/۶۹۸	۶	۰/۷۴۳	۴	خلار
۰/۸۵۴	۱۲	۰/۸۲۶	۱۲	۰/۸۳۹	۱۱	باتون
۰/۷۹۴	۷	۰/۷۲۵	۷	۰/۷۵۰	۵	بابا منیر

منابع

خلیفه، س. و خلیفه، ا. (۱۳۹۳). ارزیابی منطقه‌ای ایستگاه‌های پایش هیدرومتری حوزه بختگان - مهارلو با استفاده از

تئوری آنتروپی. فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب، شماره ۶، ص: ۲۹-۴۶.

فانی، م. و افلاطونی، م. و جاهدی، غ. (۱۳۹۱). ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه آبخیز کارون بزرگ با

استفاده از تئوری آنتروپی گسسته، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز.

کریمی حسینی، آ. و بزرگ حداد، ا. (۱۳۸۸). ارزیابی و طراحی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه باتلاق گاوخونی با استفاده از تئوری آنتروپی و الگوریتم ژنتیک. دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۶۲.

معصومی، ف. و کراچیان، ر. (۱۳۸۷). بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی. مجله آب و فاضلاب، شماره ۶۵، ص ۱۲-۲.

Chen, Y. C., Weiland, C. and Yeh, H. C. (2008). Rainfall network design using kriging and entropy. *Hydrological Processes*, 22, pp. 340-346.

Husain, T. (1989). Hydrologic uncertainty measure and network design. *Water Resources Bulletin*, 25, pp: 527-534.

Krstanovic, P. F. and Singh, V. P. (1988). Application of Entropy theory to multivariate hydrologic analysis. Vol. 1. Technical Report WRR9, Water Resources Program, Dept. of Civil Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, 271 p.

Krstanovic, P. F., and Singh, V.P. (1988). Application of Entropy theory to multivariate hydrologic analysis. Vol. 2. Technical Report WRR9, Water Resources Program, Dept. of Civil Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, pp: 271-557.

Kawachi, T. (2001). Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan. *Journal of Hydrology*, 246, pp: 36-44.

Mishra, A. K. and Coulibaly, P. (2010). Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*, 380, pp: 420-437.

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, pp: 107-121.

Mogheir, Y., Lima, J. L. and Singh, V. P. (2004). Characterizing the special variability of groundwater quality using the entropy theory. *Hydrological Process*, 18, pp: 2165-2179.

Mogheir, Y. and Singh, V. P. (2002). Application of information theory to groundwater quality monitoring system. *Water Resources Management*, 16(1), pp: 37- 49.

Mogheir, Y. and Singh, V. P. 2003. Specification of information needs for groundwater management planning in developing country. *Groundwater Hydrology*. Balema Publisher, Tokyo, 2, pp: 3-20

Mondal, N. and Singh, V.(2012). Evaluation of groundwater monitoring network of Kodaganar River basin from Southern India using entropy. *Environmental Earth Sciences*, 66 (4), p. 1183-1193.

-
- Shannon, C. E. (1948).** A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, pp. 379-423.
- Sarlak, N. and Sorman, A. (2006).** Evaluation and selection of streamflow network stations using entropy methods. *Turkish J. Eng. Env. Sci*, 30, pp. 91-100.
- Yang, Y. and Burn, D. (1994).** An entropy approach to data collection network design. *Journal of Hydrology*, 157, pp.: 307–324.