

## طراحی شبکه پایش ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از تئوری بی‌نظمی (مطالعه موردی): حوضه دریاچه ارومیه

علی شهیدی<sup>۱\*</sup>، عباس خاشعی سیوکی<sup>۲</sup>، یوسف رضانی<sup>۳</sup>، محمد ناظری تهرودی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۵

### چکیده

طراحی سامانه‌های پایش کیفی و کمی منابع آب همواره به عنوان یکی از موضوعات پیچیده در زمینه منابع آب و محیط زیست مطرح بوده است. طراحی این سامانه‌ها برای دستیابی به اطلاعات پایه کمی و کیفی صورت می‌گیرد، در حالی که فرآیند طراحی خود نیازمند این اطلاعات پایه است. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب کشور می‌باشد. آنتروپی در لغت به معنای بی‌نظمی است. در این تحقیق از تئوری آنتروپی جهت پایش شبکه باران‌سنجی در دوره آماری ۲۰۱۱-۱۹۸۴ استفاده شده است. همچنین جهت بررسی روند تغییرات پارامترهای مورد بررسی از آزمون من - کندال اصلاح شده استفاده گردید. نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات مقادیر بارش سالانه حوضه دریاچه ارومیه نشان داد که تغییرات مقادیر بارش در این حوضه در طی دوره آماری مورد بررسی در مقیاس سالانه کاهش یافته است. جهت بررسی و پایش شبکه باران‌سنجی با استفاده از تئوری بی‌نظمی از روش رگرسیون بردار پشتیبان جهت تخمین مقادیر بارش استفاده شد. نتایج بررسی مقادیر شاخص آنتروپی در سطح آبخوان نشان داد که تنها ۱/۴ درصد سطح حوضه مورد بررسی دچار کمبود شدید اطلاعات می‌باشد که احداث ایستگاه جدید در این منطقه را طلب می‌کند. اما از آنجایی که بیش از ۹۰ درصد سطح حوضه از نظر انتقال اطلاعات در شرایط مازاد و نسبتاً مازاد قرار دارد، لذا منطقه مورد مطالعه از پایش نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشد. به طور کلی نتایج بیانگر بالا بودن دقت روش بهینه شده رگرسیون بردار پشتیبان در برآورد مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در حوضه دریاچه ارومیه بود. نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داد که ایستگاه‌های زارآباد، باداملو و اوربان رتبه‌های ۱ تا ۳ را دریافت کردند که نشان دهنده انتقال و دریافت اطلاعات بیشتر نسبت به سایر ایستگاه‌ها است.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی شانون، انتقال اطلاعات، بی‌نظمی، دریاچه ارومیه

### مقدمه

اهمیت فراوان بوده و در درک صحیح ویژگی‌های هیدرولوژیک حوضه تأثیری عمیق و مستقیم دارد.

اما هزینه‌های نصب، تجهیز و نگهداری ایستگاه‌های باران‌سنجی را نیز نمی‌توان از نظر دور داشت. بنابراین تولید حداکثر آمار و اطلاعات مورد نیاز با استفاده از حداقل تعداد ایستگاه‌ها، اصلی اساسی در طراحی صحیح شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی یک حوضه می‌باشد. بر این اساس بررسی امکان حذف یا اضافه نمودن ایستگاه‌های شبکه پایش باران‌سنجی بحثی مهم در مدیریت منابع آب می‌باشد. 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. تا

کیفیت مناسب اطلاعات بارندگی ثبت شده در شبکه‌های باران‌سنجی در طراحی پایدار پروژه‌های آبی نقش مهمی ایفا می‌کند. از این نظر جهت ایجاد شبکه‌ای بهینه و کارآمد، شبکه‌های باران‌سنجی بایستی به صورت دوره‌ای با توجه به نیاز و طرح‌های توسعه منابع آب پیش روی، مورد ارزیابی قرار گیرند. تولید اطلاعات صحیح و کارآمد همواره از مسائل و چالش‌های مهم زیر مجموعه منابع آب کشور بوده است. از این نظر چیدمان ایستگاه‌های باران‌سنجی بجا و مناسب در شبکه باران‌سنجی یک حوضه حائز

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بیرجند

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بیرجند

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بیرجند

۴- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشگاه بیرجند

(Email: ashahidi@birjand.ac.ir

\*) نویسنده مسئول:

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 شانون (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. طراحی برنامه‌های پایش و فعالیت‌ها باید بر اساس اهداف مشخص و از پیش معین باشند. به‌طور معمول این برنامه‌ها با تهیه یک طرح مطالعاتی همراه هستند که در آن اهداف برنامه پایش، محدوده مطالعاتی و مدل درک مفهومی ارائه می‌شود. یک برنامه پایش ممکن است یک یا چند هدف داشته باشد. مهم‌ترین اهداف پایش کمی ایستگاه‌های باران‌سنجی عبارت‌اند از: بررسی وضعیت بارش، بررسی کمیت مقادیر آب حاصل از بارش برای کاربردهای مختلف، به دست آوردن اطلاعاتی در خصوص تراکم ایستگاه‌های منطقه، بررسی روندهای کوتاه‌مدت یا بلندمدت کیفیت آب زیرزمینی و جلوگیری از احداث ایستگاه‌های باران‌سنجی در مناطق غیر ضروری

با توجه به اهمیت اطلاعات و اطلاع‌رسانی، ارزیابی شبکه‌های پایش طراحی شبکه بهینه همواره در کانون توجهات بوده است. ارزیابی شبکه موجود به‌منظور طراحی شبکه بهینه ضروری به نظر می‌رسد و باید ابتدا شرایط اولیه بررسی شود؛ یعنی ابتدا لزوم شبکه بهینه بررسی شده و سپس شبکه بهینه ارائه گردد. تحقیقات جینز<sup>۱</sup> (۱۹۵۷) و شانون<sup>۲</sup> (۱۹۴۸) فضای تازه‌ای برای تحقیقات در زمینه استفاده از تئوری آنتروپی در حوزه وسیعی از علوم و فناوری ایجاد کرد. این حوزه شامل علوم ارتباطات، اقتصاد، ترمودینامیک، روانشناسی، هیدرولوژی، مهندسی عمران و مکانیک، آمار، تئوری تصمیم‌گیری و علوم اجتماعی هست.

اوزکل<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۰) با استفاده از تئوری آنتروپی پیوسته روشی برای ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی رودخانه ارائه دادند. در واقع آن‌ها کار هارمانچی اغلو و الپاسالن (۱۹۹۲) را برای بهتر تعریف کردن مناطقی با عدم قطعیت‌های اطلاعاتی زیاد در طول رودخانه توسعه دادند. این مدل تنها برای کاهش چاه‌های اضافی یا کاهش تواتر نمونه‌برداری در یک سامانه پایش موجود یا اولیه مناسب است. کاواچی<sup>۴</sup> (۲۰۰۱) از تئوری آنتروپی برای کمی کردن عدم قطعیت شبکه پایش بارندگی سراسر ژاپن استفاده کرده و نقشه‌های هم‌آنتروپی ژاپن را تهیه و آن را با نقشه هم باران مقایسه کردند که آن‌ها را قادر به ارزیابی نسبی و دسته‌بندی پتانسیل موجودی منابع آب ژاپن کرد. تمامی مطالعاتی که به آن‌ها اشاره شد با استفاده از تئوری

آنتروپی انجام شده است و همان‌طور که در ادامه تشریح می‌گردد در آنتروپی پیوسته فرض بر این است که توزیع اطلاعات از توزیع احتمالاتی نرمال پیروی نمی‌کند که این فرض همیشه قابل کاربرد نیست. این به آن معنا است که برای داده‌های کیفی در یک بازه زمانی کوتاه ۱۰ ساله نمی‌توان از این روش استفاده نمود. موغیر و سینگ<sup>۵</sup> (۲۰۰۲) روشی را برای طراحی شبکه پایش کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی انتقالی توسعه دادند. آن‌ها همچنین با استفاده از نقشه‌های خطوط همسان آنتروپی مرزی روشی برای ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی ارائه کردند. مارکوس<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۳) از روش تئوری آنتروپی و GLS<sup>۷</sup> به‌منظور ارزیابی ارزش منطقه‌ای چاه‌های پایش رودخانه‌ای در ایالت ایلی نویز آمریکا استفاده نمودند و نتایج هر دو روش را باهم مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که در هر دو روش، رتبه‌های متفاوتی برای هر چاه تولید می‌شود و ضریب همبستگی میان رتبه‌های دو روش نشان داد که رتبه‌های روش GLS، نسبت برعکس با رتبه‌های شاخص‌های آنتروپی دارد. در نهایت مدل هیبریدی ترکیبی از هر دو روش را به‌عنوان تلاشی برای غلبه بر تفاوت‌های میان دو روش پیشنهاد کردند. نونس<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۴) با کاهش افزونگی اطلاعاتی در برخی از چاه‌ها به این نتیجه رسیدند که می‌توان چاه‌هایی که دارای افزونگی اطلاعاتی زیادی نسبت به چاه‌های مجاور می‌باشند را به‌عنوان نماینده در شبکه نگاه داشت و تعداد چاه‌ها را تا رسیدن به یک شبکه بهینه کاهش داد. موغیر و همکاران (۲۰۰۶) چرخه پایش را در نوار غزه با استفاده از تئوری آنتروپی نشان دادند. آن‌ها فلوجارتی را برای ارزیابی رابطه بین اهداف، عملکردها، داده‌ها و فعالیت‌های پایشی با استفاده از تئوری پیشنهاد دادند. سرلک<sup>۹</sup> (۲۰۰۵) از اطلاعات انتقالی برای انتخاب بهترین چاه پایش از یک سری مناطق با پتانسیل در طول یک رودخانه استفاده کردند. برای هر چاه جدید با پتانسیل پایش، سری زمانی داده‌های کیفیت آب با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی تولید شد. به این ترتیب ضمن به‌کارگیری آنتروپی پیوسته در ارزیابی سامانه‌های پایش رودخانه‌ها، با تلفیق روش آنتروپی و یک مدل شبیه‌سازی کیفی، موقعیت چاه‌های جدیدی نیز برای بهبود عملکرد سامانه‌های پایش پیشنهاد گردید. سرلک و همکاران (۲۰۰۶) به ارزیابی و انتخاب چاه‌های شبکه هیدرومتری با استفاده از تئوری آنتروپی پرداختند. ایشان اثر انواع توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال و گاما بر نتایج رتبه‌بندی چاه‌ها را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که نوع توزیع در نظر گرفته شده برای داده‌های آبدی

5 - Mogheir &amp; Singh

6 - Markus

7 - Generalized Least Square

8 - Nunes

9 - ŞARLAK

1 - Jaynes

2 - Shannon

3 - Ozkul

4 - Kawachi

تئوری آنتروپی پیوسته و حاشیه‌ای می‌تواند تا حدودی این امکان را ایجاد کند که در مطالعات صورت گرفته این موضوع مدنظر قرار نگرفته است. در واقع رتبه‌بندی ایستگاه‌ها از نظر انتقال اطلاعات می‌تواند در تصمیم‌گیری بهینه‌سازی پایش منابع آب باران از طریق کاهش و یا افزایش ایستگاه‌ها چاره‌ساز باشد. بر این اساس اهداف تحقیق حاضر به صورت الف) پایش شبکه باران‌سنجی جهت بررسی تعداد ایستگاه‌های مازاد و مورد نیاز در حوضه دریاچه ارومیه و رتبه‌بندی ایستگاه‌های موجود و ب) بررسی دقت مدل رگرسیون بردار پشتیبان جهت تخمین مقادیر بارش سالانه مورد نیاز در روش آنتروپی می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه که کانون تجمع جریان‌های سطحی مازاد بر مصرف کلیه رودخانه‌های حوضه بسته ارومیه می‌باشد، با وسعت تقریبی ۵۱۸۰۰ کیلومتر مربع در میانه ناحیه شمالی حوضه قرار دارد. در اطراف دریاچه ارومیه تعداد ۱۶ تالاب با وسعت‌های ۵ تا ۱۲۰ هکتار (که بعضی خشک شده‌اند) وجود دارد که اکثراً دارای آب شیرین و یا شور و شیرین بوده و از ارزش اکوسیستمی بالایی برخوردار هستند. حوضه آبریز دریاچه ارومیه بین مختصات  $30^{\circ} 35'$  تا  $30^{\circ} 44'$  شرقی و  $38^{\circ} 30'$  تا  $38^{\circ} 30'$  عرض شمالی واقع شده است. تغییرات بارندگی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه ۲۲۰ تا ۹۰۰ میلی‌متر و متوسط بارش ۲۶۳ میلی‌متر می‌باشد. موقعیت دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد مطالعه در حوضه دریاچه ارومیه به شرح شکل ۱ و مشخصات آماری ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده به شرح جدول ۱ ارائه شده است.

### بررسی روند

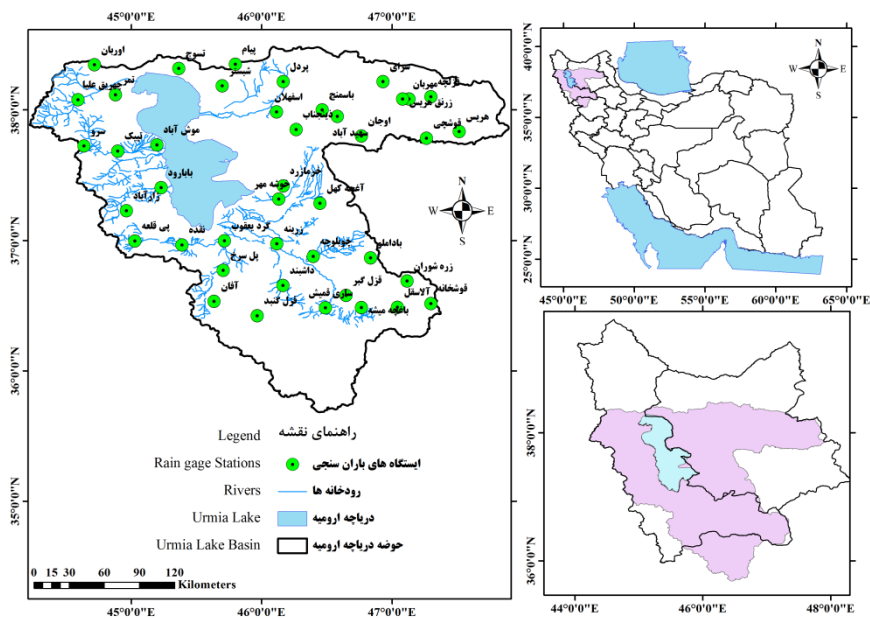
در این مطالعه روند تغییرات سری‌های زمانی مجموع بارش سالانه ایستگاه‌های موجود در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون به طور وسیعی در مطالعات هیدرولوژی، کلیماتولوژی و متئورولوژی مورد استفاده قرار گرفته است. شرط لازم برای استفاده از این آزمون عدم وجود خودهمبستگی در سری زمانی داده‌ها می‌باشد، با این حال ممکن است داده‌ها دارای خودهمبستگی معنی‌دار باشند. بنابراین باید ابتدا اثر خودهمبستگی داده‌ها حذف گردد تا بتوان از آزمون من-کندال استفاده نمود (خلیلی و همکاران، ۲۰۱۶). به این منظور در مطالعه حاضر به جای آزمون من-کندال مرسوم (MK1) از ویرایش دیگر آن شامل آزمون من-کندال با حذف کامل ساختار خودهمبستگی (MK3) استفاده شد

در تئوری آنتروپی پیوسته اهمیت داشته و موجب مقادیر متفاوتی در رتبه‌بندی چاه می‌شود. چن<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸) روش کریجینگ را برای درون‌یابی داده‌های بارش ماهیانه سیزده ایستگاه باران‌سنجی ثبت‌کننده ۸۷ ماه بارش منطقه شیمان تایوان را در شبکه‌ای به ابعاد  $7/5 \times 7/5$  کیلومتر استفاده کردند. تعداد شبکه‌های حاصل در منطقه هفده مورد بود که در مرکز هر شبکه یک چاه قرار داده شد که مبنای بررسی‌های بعدی قرار گرفت. با توجه به آمار بارش آن‌ها از آنتروپی انتقال اطلاعات بین چاه‌ها برای اولویت‌بندی چاه‌های بارش جدید استفاده کردند. درنهایت، با توجه به ۹۵ درصد آنتروپی انتقال اطلاعات بین چاه‌ها، تعداد شش چاه برای منطقه مکان‌یابی شد. چاداولادا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰) نیز با استفاده از عدم حتمیت (آنتروپی) و با استفاده از روش‌های ذکرشده، شبکه مورد مطالعه را بهینه نمود. ژو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی در چین پرداختند. در ایران نیز مطالعاتی در این زمینه انجام شده است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

معصومی و کراچیان (۱۳۸۵) با استفاده از تئوری آنتروپی به بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که کارایی الگوریتم پیشنهادی در ارزیابی و بهنگام‌سازی سامانه‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی بسیار مناسب می‌باشد. میرعباسی و همکاران (۱۳۸۹)، شبکه کیفی آب زیرزمینی دشت اهر را از نظر میزان پارامتر EC با استفاده از تئوری آنتروپی مورد ارزیابی قرار دادند. به این منظور ساختار زمانی متغیر هدایت الکتریکی توسط شاخص انتقال اطلاعات به صورت تابعی از فاصله بین چاه‌ها توصیف گردید. فانی و همکاران (۱۳۹۲) ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز کارون بزرگ واقع در استان خوزستان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تئوری آنتروپی قابلیت خوبی برای کمی کردن ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های باران‌سنجی یک شبکه باران‌سنجی دارد.

انتخاب محل مناسب جهت احداث ایستگاه باران‌سنجی و ارزیابی آن یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در زمینه اندازه‌گیری بارش‌ها در هر حوضه‌ای می‌باشد. کمبود آن مشکل‌ساز بوده و تعدد بیش از حد آن نیز در حوضه مشکلات اقتصادی زیادی را در بر خواهد داشت. هزینه‌های تعمیر و نگهداری ادوات ثبت باران چه ثابت و چه غیر ثابت زیاد می‌باشد. از این رو تعداد بهینه این ایستگاه‌ها با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. برنامه‌های پایش منابع آب می‌توانند کمیت مناسب منابع آب برای کاربری‌های مختلف را تضمین کنند. امکان تعیین محل دقیق ایستگاه‌های مازاد و یا ایستگاه‌های کمبود توسط تئوری آنتروپی وجود ندارد ولی تلفیق

- 1 - Chen
- 2 - Chadalavada
- 3 - Zhu



شکل ۱- ارتفاعات حوضه دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده در دوره آماری ۲۰۱۳-۱۹۸۴

جدول ۱- مشخصات آماری ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده واقع در حوضه دریاچه ارومیه در دوره آماری ۲۰۱۳-۱۹۸۴

ارتفاع (m)	عرض جغرافیایی (m)	طول جغرافیایی (m)	بارش سالانه (mm/y)	ایستگاه	ارتفاع (m)	عرض جغرافیایی (m)	طول جغرافیایی (m)	بارش سالانه (mm/y)	ایستگاه
۱۷۱۰	۴۱۲۷۲۹۰	۶۲۸۵۲۹	۴۲۴/۰	آغچه کهل	۲۱۱۹	۴۰۸۱۲۶۵	۶۶۳۸۲۰	۶۲۸/۴	باداملو
۱۸۵۰	۴۱۸۵۰۹۵	۶۵۵۵۳۵	۳۵۲/۶	باشسيزاوجان	۱۸۹۸	۴۰۳۹۰۱۸	۶۵۸۲۵۴	۳۴۸/۳	باغچه میشه
۱۷۰۰	۴۲۰۶۸۳۰	۶۲۸۷۷۳	۱۷۲/۰	باسمنج	۱۶۱۱	۴۲۱۴۵۴۹	۴۶۴۳۶۳	۳۶۶/۳	چهریق
۱۸۴۴	۴۲۱۹۴۰۹	۷۰۱۶۷۲	۳۳۹/۵	قزلچه سادات	۱۲۶۱	۴۰۸۲۰۹۵	۶۲۴۵۴۹	۳۰۶/۳	چولپوچه
۱۹۸۰	۴۱۸۴۱۹۶	۶۹۹۶۰۴	۷۶۸/۳	قوشچی سراب	۱۳۱۸	۴۰۵۶۹۸۶	۶۰۴۲۲۹	۳۹۷/۳	داهشند
۱۶۹۰	۴۱۹۰۳۰۸	۷۲۱۴۷۴	۴۶۳/۷	هریس سراب	۱۲۸۰	۴۰۹۴۵۹۷	۵۶۳۷۸۸	۲۶۸/۷	گردیعقوب
۱۳۲۰	۴۱۳۰۶۰۴	۶۰۰۴۲۲	۳۰۹/۰	خوشه مهر	۱۳۷۴	۴۰۳۱۱۰۶	۵۸۷۷۵۵	۴۰۲/۵	قزل
۱۵۵۶	۴۱۴۱۷۳۵	۶۰۳۲۳۸	۳۹۸/۳	خرمازرد	۱۶۵۷	۴۰۴۹۳۵۱	۶۴۷۵۸۰	۳۲۲/۶	قزل گبر
۱۶۰۸	۵۲۱۷۲۱۰	۶۸۷۰۹۹	۳۲۷/۲	مهربان	۲۲۶۰	۴۰۴۳۵۰۱	۷۰۵۹۶۰	۳۷۹/۸	قوشخانه
۱۴۱۵	۴۲۳۰۴۹۸	۶۰۲۱۳۰	۲۳۸/۱	پردل	۱۲۸۱	۴۱۷۵۹۹۲	۵۱۷۴۳۶	۲۴۸/۴	موش آباد
۱۷۹۰	۴۲۴۴۹۵۲	۵۶۹۹۰۳	۴۵۷/۷	پیام	۱۳۰۶	۴۰۹۰۹۹۵	۵۳۴۷۹۵	۳۲۳/۲	نقده
۱۹۵۰	۴۲۰۱۴۵۰	۶۳۹۱۱۱	۳۸۱/۳	سعیدآباد	۱۳۰۶	۴۰۹۴۲۸۷	۵۰۲۶۶۳	۴۸۶/۱	پی قلعه
۱۵۴۵	۴۲۳۱۶۲۲	۶۶۹۲۴۸	۲۸۷/۶	سرای	۱۳۵۰	۴۰۶۹۴۸۰	۵۶۳۱۲۶	۲۵/۰	پل سرخ
۱۴۰۰	۴۲۰۴۵۵۴	۵۹۸۰۶۴	۲۷۲/۶	اسفهلان	۱۳۹۱	۴۰۳۸۴۳۵	۶۳۳۵۱۸	۳۲۲/۵	ساری قمیش
۱۴۰۰	۴۲۲۶۳۸۸	۵۶۱۳۰۵	۲۹۷/۴	شبیستر	۱۶۲۸	۴۱۷۵۱۷۱	۴۶۸۲۳۱	۳۶۰/۸	سرو
۱۳۹۰	۴۲۱۷۱۱۱	۶۸۲۷۱۴	۳۷۲/۵	زررق هریس	۱۳۸۷	۴۲۱۸۵۶۳	۴۸۹۶۱۳	۲۱۲/۶	تمر
۱۶۰۰	۴۲۴۱۰۱۴	۵۳۲۰۵۳	۲۹۷/۷	تسوج	۱۳۹۸	۴۱۷۰۷۱۷	۴۹۰۹۸۸	۳۶۸/۶	تپیک
۲۱۱۰	۴۱۸۹۹۲۸	۶۱۱۴۲۸	۳۳۲/۹	زینجناب	۱۸۴۰	۴۲۴۴۱۷۲	۴۷۵۴۴۵	۳۱۰/۰	اوریان
۱۶۲۰	۴۰۴۳۱۴۸	۵۵۷۰۵۲	۵۷۸/۸	آفان	۱۳۹۰	۴۰۹۲۴۱۳	۵۹۹۵۹۲	۴۲۲/۵	زرینه
۱۷۰۰	۴۰۳۹۸۷۷	۶۸۳۰۴۱	۳۹۲/۷	آلاسقل	۲۱۰۰	۴۰۶۲۳۳۴	۶۸۹۱۱۲	۴۲۷/۶	زره شوران
۱۲۸۲	۴۱۳۹۵۸۱	۵۲۰۴۹۰	۳۴۲/۸	بابارود	۱۵۶۹	۴۱۱۹۹۰۴	۴۹۶۷۶۸	۵۴۲/۳	ژار آباد

(y) بیان می‌شود و صورت پیوسته آن اگر x و y غیر وابسته باشند برابر است:

$$H(x, y) = H(x) + H(y) \quad (3)$$

که H(x) و H(y) آنتروپی مرزی x و y می‌باشند و اگر وابسته باشند:

$$H(x, y) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \ln f(x, y) dx dy \quad (4)$$

که تابع f(x, y) چگالی احتمال مشترک x و y هست. آنتروپی شرطی: آنتروپی شرطی x به شرط y بیان کننده عدم قطعیت باقیمانده در x به شرط معلوم بودن y است:

$$H(x|y) = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x|y) \ln f(x|y) dx dy \quad (5)$$

که در آن f(x|y) تابع توزیع چگالی احتمالی x به شرط y هست. آنتروپی انتقال اطلاعات: نوعی دیگر از آنتروپی است که برابر با تفاضل مجموع آنتروپی‌های حاشیه‌ای و آنتروپی مشترک است. آنتروپی انتقال اطلاعات بین دو متغیر x و y به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y) \quad (6)$$

$$T(x, y) = T(y, x) = \quad (7)$$

$$- \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \ln \left( \frac{f(x, y)}{f(x)f(y)} \right) dx dy$$

T(x, y) را همچنین می‌توان به صورت محتوای اطلاعات مشترک x و y تعریف نمود (موغیر و سینگ، ۲۰۰۲). با توجه به رابطه نزدیک بین توزیع نرمال و لوگ نرمال، ضرایب آنتروپی را می‌توان با یک تغییر و تحول به دست آورد (حسین، ۱۹۸۷).

### آنتروپی گسسته

طبق تعریف ارائه شده شانون از آنتروپی، 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 دارای یک احتمال گسسته وقوع  $p(x_i)$  و  $p(y_j)$  احتمال وقوع مشترک  $x_i, y_j$  و  $p(x_i | y_j)$  احتمال رخ دادن  $x_i$  به شرط  $y_j$  می‌باشند. تعریف شاخص‌های آنتروپی گسسته مشابه آنتروپی پیوسته است. تنها تفاوت در شکل معادلات است که در حالت گسسته به صورت رابطه ۸ می‌باشند.

$$E(I(x)) = H(x) = - \sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) \ln p(x_i) \quad (8)$$

که در آن E(I(x)) نشانگر امید ریاضی داده‌هاست. در واقع، طبق تعریف، از متوسط داده‌ها (میانگین I(x)) به عنوان یک اندازه‌گیری از

در ادامه روش‌های آزمون من-کندال شرح داده می‌شود (من<sup>۱</sup>، ۱۹۴۵، تیل<sup>۲</sup>، ۱۹۵۰، سن<sup>۳</sup>، ۱۹۶۸، کندال<sup>۴</sup>، ۱۹۷۵، حامد و رائو<sup>۵</sup>، ۱۹۹۸ و کومار<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

### تئوری آنتروپی

از آنتروپی به عنوان یک مفهوم علمی در ابتدا در سال ۱۸۵۰ میلادی توسط کلاسیوس در ترمودینامیک استفاده شد. بعد از آن در سال ۱۹۸۸، بولتزمن یک تفسیر احتمالی در چارچوب مکانیک آماری ارائه داد. رابطه آشکار میان آنتروپی و احتمال در اوایل سال ۱۹۰۰ میلادی توسط پلانک توسعه داده شد (هارمانچی اغلو و همکاران، ۱۹۹۹). آنتروپی در اصل به معنای بی‌نظمی است. شاخص‌های آنتروپی در دو حالت پیوسته و گسسته بررسی می‌شود.

### آنتروپی پیوسته

فرض کنید یک متغیر تصادفی پیوسته با تابع توزیع چگالی احتمال f(x) موجود باشد، در این صورت احتمال اینکه x در i امین زیر بخش (بازه) قرار داشته باشد، عبارت است از:

$$P(x_i) = P\left(x_i - \frac{\Delta x}{2} \leq x_i \leq x_i + \frac{\Delta x}{2}\right) \quad (1)$$

$$= \int_{x_i - \frac{\Delta x}{2}}^{x_i + \frac{\Delta x}{2}} f(x) dx$$

اگر p(x) در معادله  $H(x) = -k \sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) \ln p(x_i)$  که

توسط شانون در سال ۱۹۴۸ به عنوان تعریف آنتروپی مرزی ارائه شد، قرار گیرد:

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \ln f(x) dx \quad (2)$$

بنابراین H بیان کننده مقدار عدم قطعیتی است که در نتیجه عدم آگاهی کامل از یک سیستم به وجود می‌آید. این عدم قطعیت بیان کننده میزان هرج و مرج یا کمبود اطلاعات در خصوص یک سیستم است.

آنتروپی مشترک: آنتروپی مشترک دو متغیر x و y به صورت H(x, y)

- 1 - Mann
- 2 - Theil
- 3 - Sen
- 4 - Kendall
- 5 - Hamed & Rao
- 6 - Kumar

$N(i)$  بیان‌کننده اطلاعات کل خالص هر ایستگاه بوده و هر ایستگاهی که کمترین میزان  $N(i)$  را داراست کمترین رتبه و اهمیت را در شبکه پایش به خود اختصاص می‌دهد (مارکوس<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۳). درنهایت بر اساس حدود ذکرشده در جدول ۲ برای شاخص  $ITI(i)$  در دشت نقده پهنه‌بندی انجام‌شده است.

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات  $ITI(i)$  (میشرا و

کولیبالی، (۲۰۱۰)	
شاخص $ITI(i)$	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

در این مطالعه جهت برآورد مقادیر تخمینی مورد بررسی از روش رگرسیون بردار پشتیبان استفاده شد. هم‌چنین جهت بهینه کردن پارامترهای مدل رگرسیون بردار پشتیبان از روش بهینه‌سازی الگوریتم مورچگان استفاده شده است که جهت اطلاعات بیشتر به دوریگو<sup>۵</sup>، ۱۹۹۲، واپنیک، ۱۹۹۸، استاتزل و هووس<sup>۶</sup>، ۲۰۰۰ و سوشا<sup>۷</sup> و دوریگو، ۲۰۰۸ مراجعه کرد. هم‌چنین جهت بررسی میزان خطا و کارایی مدل رگرسیون بردار پشتیبان به ترتیب از دو آماره جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و نش - ساتکلیف (Nash) استفاده شد (نش و ساتکلیف<sup>۸</sup>، ۱۹۷۰).

## نتایج و بحث

همان‌طور که ذکر شد، در این مطالعه جهت پایش کمی آب بارش حوضه دریاچه ارومیه از داده‌های سالانه مقادیر بارش اندازه‌گیری شده از ۴۲ ایستگاه باران‌سنجی موجود در محدوده حوضه دریاچه ارومیه در دوره آماری ۲۰۱۱-۱۹۸۴ استفاده شد. در این مطالعه روند تغییرات داده‌های بارش سالانه ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از آزمون من-کندال اصلاح شده محاسبه شد. مقادیر آماره  $Z$  بارش-های حوضه دریاچه ارومیه در مقیاس زمانی سالانه محاسبه و نتایج به شرح شکل ۲ ارائه گردید. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که روند غالب در سری‌های ماهانه و سالانه این حوضه کاهش است. آماره  $Z$  آزمون من - کندال بیانگر افزایش یا کاهش معنی‌دار و

عدم قطعیت استفاده‌شده است. علاوه بر این در برخی کتاب‌ها از  $H(x)$  به‌عنوان معیاری برای سنجش عدم قطعیت داده‌ها نام‌برده‌اند. البته از آنجایی که عدم قطعیت بیانگر اطلاعات بالقوه است می‌تواند درست باشد؛ بنابراین، برای یک متغیر تصادفی  $x$ ، آنتروپی حاشیه‌ای،  $H(x)$  می‌تواند به‌عنوان اطلاعاتی بالقوه متغیر تعریف شود. آنتروپی مشترک: نشان‌دهنده‌ی داده‌هایی است که هم در  $x$  هم و در  $y$  وجود دارند.

$$H(x, y) = - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln p(x_i, y_j) \quad (9)$$

آنتروپی شرطی: برای دو متغیر تصادفی  $x$  و  $y$  که دو متغیر تصادفی باشند، آنتروپی شرطی نشان‌دهنده‌ی داده‌هایی از  $x$  است که در  $y$  موجود نیست (موغیر و سینگ، ۲۰۰۳).

$$H(x|y) = - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i|y_j) \ln p(x_i|y_j) \quad (10)$$

آنتروپی انتقال اطلاعات: به‌عنوان کاهش در عدم قطعیت در  $x$  با توجه به آگاهی از متغیر تصادفی  $y$  تفسیر شده است. هم‌چنین می‌توان به‌عنوان اطلاعاتی از  $x$  تعریف شود که در  $y$  موجود هستند (لوبی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۶).

$$T(x, y) = - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln \left( \frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)p(y_j)} \right) \quad (11)$$

که 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  $y$  می‌باشند. توجه داشته باشید که  $T(x, y) = T(y, x)$  (ژوزف<sup>۲</sup>، ۱۹۹۵) و می‌توان به روش‌های زیر نیز محاسبه شود:

$$T(x, y) = H(x) - H(x|y) \quad (12)$$

$$T(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y) \quad (13)$$

$$T(y, x) = H(y) - H(y|x) \quad (14)$$

$$T(y, x) = H(y) + H(x) - H(y, x) \quad (15)$$

انتقال اطلاعات هم‌چنین می‌تواند با استفاده از یک شاخص انتقال اطلاعات نرمال که با  $ITI^3$  نشان داده می‌شود، بیان گردد؛ که میزان اطلاعات استاندارد که از یک مکان به مکان دیگری منتقل می‌شود را نشان می‌دهد. در نهایت شاخص  $N(i)$  با نام اطلاعات خالص تبدیلی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N(i) = S(i) - R(i) \quad (16)$$

که در آن  $S(i)$  اطلاعات ارسالی از هر ایستگاه و  $R(i)$  اطلاعات دریافتی از هر ایستگاه می‌باشد. شاخص  $N(i)$  از این نظر حائز اهمیت است که ارزش هر ایستگاه با این شاخص سنجیده می‌شود. شاخص

4 - Markus

5 - Dorigo

6 - Stützel and Hoos

7 - Socha

8 - Nash and Sutcliffe

1 - Lubbe

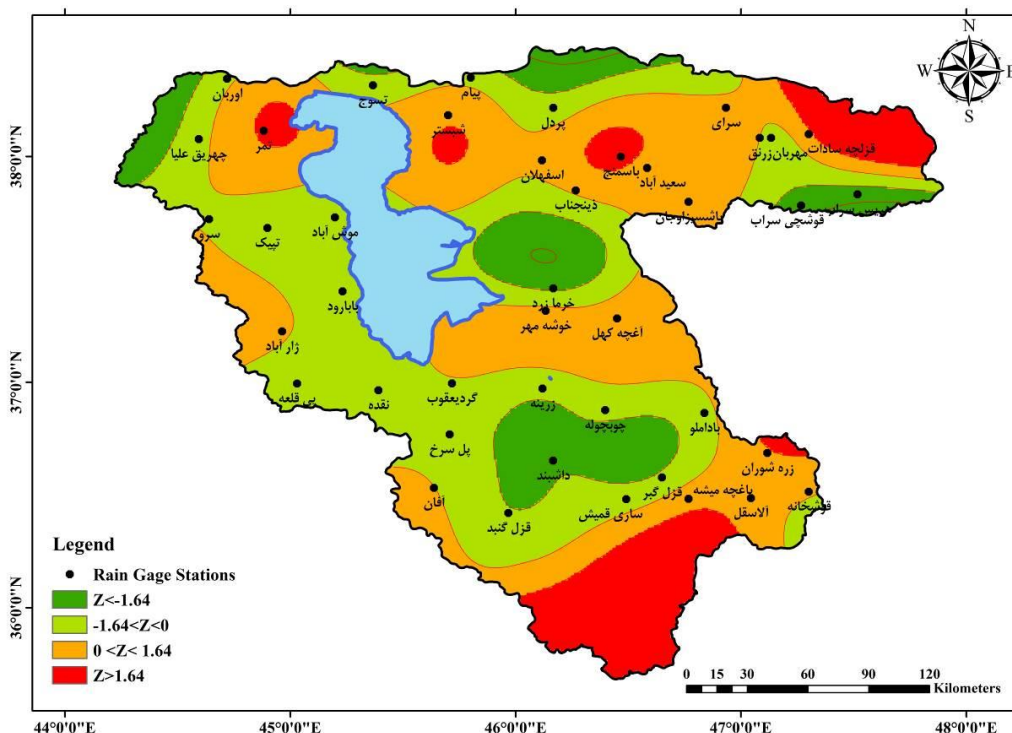
2 - Jessop

3 - Information Transfer Index

حوضه دریاچه ارومیه نیز با روندی افزایشی و شدید در بارش‌های سالانه مواجه هستند. سایر ایستگاه‌های موجود در حوضه دریاچه ارومیه نیز با روندی افزایشی روبرو هستند. بطور کلی نتایج نشان داد که ایستگاه‌های غربی حوضه دریاچه با روندی کاهشی و ایستگاه‌های شرقی حوضه با روندی افزایشی روبرو هستند.

غیرمعنی‌دار پارامتر مورد بررسی می‌باشد که در سطح اعتماد نود درصد، دامنه تغییرات آن بین  $+1/64$  تا  $-1/64$  می‌باشد. اعداد منفی نشان دهنده روند کاهشی و اعداد مثبت نشان دهنده روند افزایشی می‌باشد.

نتایج نشان داد که ایستگاه‌های غربی و شرقی دریاچه ارومیه روندی کاهشی را شامل می‌شود. ایستگاه‌های شمال شرق و جنوبی



شکل ۲- نتایج آزمون من - کندال اصلاح شده در بررسی روند سالانه بارش

### نتایج تخمین مقادیر اولیه با استفاده از مدل SVR

بعد از آماده‌سازی داده‌های مورد بررسی، مقادیر بارش سالانه هر ایستگاه با استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان مقادیر ایستگاه-های دیگر تخمین زده شد. در این مرحله اقدام به تولید داده‌های جدید برای هر ایستگاه با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های مجاور پرداخته شد. به عبارت دیگر بجای استفاده مستقیم از داده‌های یک ایستگاه، پیش‌بینی داده‌های ایستگاه مورد نظر انجام شد. مدل‌سازی مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های مورد بررسی در این تحقیق با استفاده از مقادیر بارش سالانه دیگر ایستگاه‌ها و روش رگرسیون بردار پشتیبان مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در به کار گیری روش رگرسیون بردار پشتیبان، از الگوریتم جامع مورچگان جهت بهینه‌سازی پارامترهای مدل استفاده شد. در اجرای روش الگوریتم جامع مورچگان از ۱۰۰ تکرار در هر دوره استفاده شده و در نهایت مقادیر  $c$ ،  $\epsilon$  و  $\delta$  مربوط به روش رگرسیون بردار پشتیبان به

نتایج نشان داد که ایستگاه‌های غربی و شرقی دریاچه ارومیه روندی کاهشی را شامل می‌شود. ایستگاه‌های شمال شرق و جنوبی حوضه دریاچه ارومیه نیز با روندی افزایشی و شدید در بارش‌های سالانه مواجه هستند. سایر ایستگاه‌های موجود در حوضه دریاچه ارومیه نیز با روندی افزایشی روبرو هستند. به‌طور کلی نتایج نشان داد که ایستگاه‌های غربی حوضه دریاچه با روندی کاهشی و ایستگاه‌های شرقی حوضه با روندی افزایشی روبرو هستند که برخی معنی‌دار و برخی غیرمعنی‌دار می‌باشد. در این بین روند تغییرات مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های باسمنج، شبستر، تمر و مناطق جنوبی حوضه دریاچه ارومیه در طی دوره آماری مورد بررسی روندی کاهشی و معنی‌دار را تجربه کرده‌اند (مناطق قرمز رنگ). ایستگاه‌هایی همچون هریس سراب، قوشچی سراب و مناطقی در قسمت شرق دریاچه ارومیه با روندی افزایشی و معنی‌دار در مقادیر بارش سالانه مواجه بوده‌اند.

بردار پشتیبان و مقادیر بارش سایر ایستگاه‌های مورد بررسی، مدل‌سازی مقادیر بارش سالانه صورت پذیرفت. دقت مدل‌سازی و تخمین داده‌ها نیز با استفاده از آماره جذر میانگین مربعات خطا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی میزان دقت روش رگرسیون بردار پشتیبان نشان داد که بر اساس آماره خطا، کارایی مدل در تخمین مقادیر بارش سالانه مربوط به هر ایستگاه قابل قبول می‌باشد. نتایج بررسی دقت و میزان خطای تخمین مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه با ورودی‌های ذکر شده به صورت جدول ۴ ارائه گردید.

نحو مناسبی بهینه شدند. مقادیر بهینه پارامترهای مدل رگرسیون بردار پشتیبان در مدل‌سازی مقادیر بارش سالانه حوضه دریاچه ارومیه در یک ایستگاه به عنوان نمونه (آفان) به شرح جدول ۳ ارائه شد.

جدول ۳- مقادیر بهینه مدل رگرسیون بردار پشتیبان در مدل‌سازی

مقادیر بارش سالانه ایستگاه آفان			
ایستگاه	مقادیر c	مقادیر e	مقادیر سیگما
آفان	۶۰۳/۸۲	۱/۰۰	۲۰/۹۳

با استفاده از مقادیر بهینه پارامترهای مدل رگرسیون چند متغیره

جدول ۴- نتایج بررسی میزان دقت و خطای روش رگرسیون بردار پشتیبان در تخمین داده‌های مجموع بارش سالانه ایستگاه‌های موجود در حوضه

دریاچه ارومیه							
ایستگاه	r	RMSE	Nash	ایستگاه	r	RMSE	Nash
S1	۰/۹۹۹	۷/۵۸۴	-۰/۹۹۷	S22	۱/۰۰۰	۲/۶۳۰	-۰/۹۹۹
S2	۰/۹۹۸	۶/۸۱۱	-۰/۹۹۷	S23	-۰/۹۹۹	۳/۶۲۷	-۰/۹۹۹
S3	۰/۹۹۵	۸/۱۰۸	-۰/۹۹۱	S24	۱/۰۰۰	۴/۰۰۹	۱/۰۰۰
S4	۰/۹۹۹	۵/۷۲۸	-۰/۹۹۸	S25	-۰/۹۹۸	۳/۶۰۲	-۰/۹۹۷
S5	۰/۹۹۸	۶/۰۹۶	-۰/۹۹۶	S26	-۰/۹۹۹	۳/۶۱۴	-۰/۹۹۹
S6	۰/۹۹۸	۶/۰۲۶	-۰/۹۹۹	S27	-۰/۹۹۹	۳/۵۳۰	-۰/۹۹۹
S7	۰/۹۹۸	۷/۵۲۹	-۰/۹۹۵	S28	۱/۰۰۰	۰/۶۶۱	۱/۰۰۰
S8	۰/۹۹۹	۵/۴۰۷	-۰/۹۹۹	S29	۱/۰۰۰	۷/۹۶۴	-۰/۹۹۹
S9	۰/۹۹۹	۳/۹۷۳	-۰/۹۹۹	S30	۱/۰۰۰	۶/۱۰۰	-۰/۹۹۹
S10	۰/۹۹۹	۵/۳۰۹	-۰/۹۹۸	S31	-۰/۹۹۷	۷/۹۱۰	-۰/۹۹۵
S11	۰/۹۹۸	۵/۰۷۰	-۰/۹۹۷	S32	-۰/۹۹۷	۶/۹۶۷	-۰/۹۹۳
S12	۰/۹۹۹	۵/۸۶۶	-۰/۹۹۷	S33	-۰/۹۹۶	۷/۸۵۵	-۰/۹۹۲
S13	۰/۹۹۹	۵/۱۷۱	-۰/۹۹۸	S34	-۰/۹۹۷	۷/۶۴۷	-۰/۹۹۵
S14	۰/۹۹۸	۴/۶۵۸	-۰/۹۹۶	S35	-۰/۹۹۹	۶/۹۸۲	-۰/۹۹۸
S15	۱/۰۰۰	۴/۲۶۰	-۰/۹۹۹	S36	-۰/۹۹۷	۶/۹۹۹	-۰/۹۹۳
S16	۰/۹۹۹	۴/۰۲۳	-۰/۹۹۸	S37	-۰/۹۹۸	۶/۷۱۳	-۰/۹۹۶
S17	۰/۹۹۸	۷/۱۴۰	-۰/۹۹۷	S38	۱/۰۰۰	۰/۶۴۹	۱/۰۰۰
S18	۰/۹۹۸	۵/۲۸۳	-۰/۹۹۶	S39	۱/۰۰۰	۰/۷۲۰	۱/۰۰۰
S19	۱/۰۰۰	۰/۷۵۲	۱/۰۰۰	S40	۱/۰۰۰	۰/۷۹۴	۱/۰۰۰
S20	۱/۰۰۰	۳/۵۶۷	-۰/۹۹۹	S41	۱/۰۰۰	۰/۶۳۰	۱/۰۰۰
S21	۰/۹۹۹	۳/۳۵۴	-۰/۹۹۹	S42	۱/۰۰۰	۰/۵۳۰	۱/۰۰۰

شبیه‌سازی مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های مورد بررسی می‌باشد. ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی نیز نشان داد که همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی بین ۱/۰۰ تا ۰/۹۸ می‌باشد. با توجه به آماره جذر میانگین خطا نیز مشخص گردید که بیشترین خطا مربوط به ایستگاه شماره ۱۰ با ۱۳/۲۳ میلی‌متر می‌باشد که با توجه مجموع مقادیر بارش سالانه در این ایستگاه حدود سه درصد خطا در تخمین داده‌ها وجود دارد. با توجه به شاخص نش - ساتکلیف نیز مشاهده می‌شود که مقادیر این شاخص همگی نزدیک به یک

با توجه به جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که دقت محاسبات روش رگرسیون چند متغیره در برآورد مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های مورد بررسی قابل قبول بوده و این روش به خوبی توانسته است که این مقادیر را شبیه‌سازی کند. در ای جدول نتایج حاصل از تخمین مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه در مقیاس سالانه با استفاده از سه معیار ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و نش - ساتکلیف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج بررسی هر سه معیار حاکی از دقت قابل قبول مدل SVR در



مطالعه نشان داد که در قسمت‌هایی از شرق حوضه و در نزدیکی ایستگاه‌های قزلچه سادات و هریس شرایط متوسط بوده و حتی کمبود ایستگاه نیز احساس می‌شود. این موضوع بیانگر انتقال اطلاعات ضعیف یا فقدان ایستگاه بوده و نشان می‌دهد که ارتباط ایستگاه‌ها در این نواحی ضعیف می‌باشد اما کمبود ایستگاه در این منطقه شدید نبوده و نیاز شدیدی به احداث ایستگاه جدید احساس نمی‌شود. در بیشتر نواحی منطقه مورد مطالعه ایستگاه‌های مازاد دیده می‌شود. به عبارتی با پراکندگی موجود در بین ایستگاه‌های مورد بررسی به خوبی می‌توان اطلاعات کافی در مورد بارش در این حوضه کسب کرد. مساحت تحت پوشش هر یک از تقسیمات شاخص ITI به شرح جدول ۶ ارائه گردید. با توجه به شکل ۳ و جدول ۶ می‌توان مشاهده کرد که بیش از ۸۰ درصد منطقه مورد مطالعه پایش خوبی بر منابع آب باران از نظر پراکندگی ایستگاه‌ها دارد. در کمتر از ۱/۵ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه کمبود تعداد ایستگاه احساس می‌شود که بخش عمده آن در قسمت شمال شرقی حوضه قرار دارد.

جدول ۶- مناطق تحت پوشش تقسیمات شاخص ITI در سطح

حوضه	درجه اهمیت منطقه	مساحت (Km <sup>2</sup> )	درصد (%)
کمبود شدید	۰/۶	۳۰۹	
کمبود	۰/۸	۴۱۷	
متوسط	۱/۷۴	۹۰۴	
نسبتاً مازاد	۱۴	۷۲۷۱	
مازاد	۸۲/۸۶	۴۲۸۹۹	
مجموع	۱۰۰	۵۱۸۰۰	

همان‌طور که از جدول ۶ قابل مشاهده می‌باشد، بیشتر نواحی منطقه مورد مطالعه (۹۶ درصد) را مناطق با ایستگاه‌های نسبتاً مازاد و مازاد فرا گرفته است. ۰/۸ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه را نواحی با کمبود ایستگاه و ۰/۶ درصد مساحت منطقه را کمبود شدید ایستگاه نشان می‌دهد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که حدود ۱/۵ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه با کمبود ایستگاه مواجه بوده و سایر مناطق از نظر پایش شبکه آب باران مشکلی ندارند. با استفاده از تقسیم‌بندی ۱۲ کلاسه تعداد ایستگاه‌های مازاد در سطح منطقه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که با توجه به فاصله موجود بین ایستگاه‌ها، تعداد ایستگاه مازاد در حوضه ابریز دریاچه ارومیه حدود ۱۷ ایستگاه می‌باشد. به دلیل پراکندگی نامنظم ایستگاه‌ها در سطح حوضه و همچنین به دلیل یافتن محل‌هایی با کاهش یا افزایش اطلاعات از شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه کمک گرفته شد. در صورتی که هدف از پایش بهینه کردن و بهبود شبکه باران‌سنجی باشد، می‌توان بر اساس نتایج موجود گمانه‌های جدید ایجاد کرد و یا گمانه‌هایی که

می‌باشد که بیانگر کارایی بسیار خوب مدل SVR در شبیه‌سازی مقادیر بارش می‌باشد. در بیشتر ایستگاه‌های موجود کارایی صد درصد مدل SVR (Nash=1) مشاهده می‌شود.

### نتایج بررسی و پایش شبکه باران‌سنجی

در نهایت داده‌های مورد بررسی در کلاس‌های مختلف تقسیم شد. جهت تقسیم‌بندی داده‌های موجود تقسیمات سه کلاسه، پنج کلاسه، نه کلاسه و دوازده کلاسه مورد بررسی قرار گرفت. دلیل انتخاب کلاس‌بندی‌های مختلف در واقع بررسی دقت پایش شبکه می‌باشد. با مشخص شدن تعداد کلاس‌های مورد بررسی ماتریس‌های مشاهداتی و ماتریس‌های احتمالات به‌دست آمد. با محاسبه ماتریس‌های فراوانی و احتمالاتی، مقادیر آنتروپی انتقال (T) برای تمامی کلاس‌های مورد بررسی، آماره T مدل با استفاده از روابط ارائه شده نیز برای تمامی کلاس‌ها محاسبه گردید. نتایج بررسی T مدل نشان داد که تقسیم‌بندی ۱۲ کلاسه از بین سایر کلاس‌ها دقت بیشتری در تخمین داده‌ها دارد. در این روش ابتدا آماره T برای داده‌های مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های موجود محاسبه و با استفاده از آن مقادیر انتقال اطلاعات هر ایستگاه (T) بر اساس فاصله بین آن‌ها تخمین زده شد. نتایج بررسی میزان خطای ناشی از کلاس‌های مورد بررسی به شرح جدول ۵ ارائه گردید.

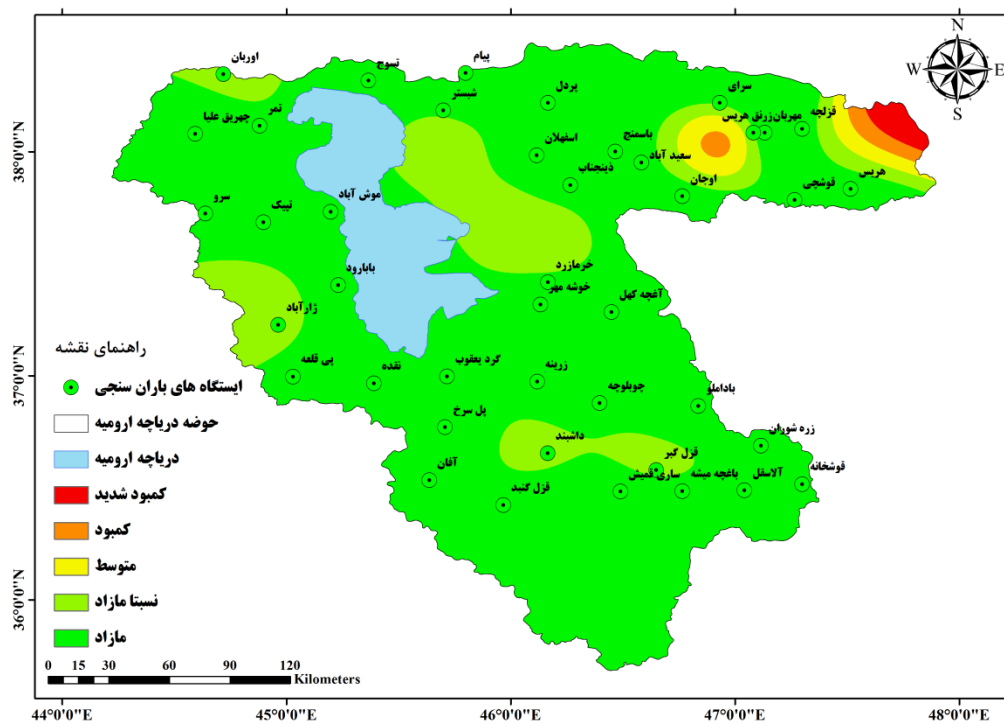
جدول ۵- نتایج بررسی مقادیر انتقال اطلاعات کلاس‌بندی‌های

مختلف	RMSE	R <sup>2</sup>
کلاس‌بندی سه کلاسه	۳/۰۹	۰/۳۲
پنج کلاسه	۳/۰۲	۰/۴۸
نه کلاسه	۵/۴۱	۰/۳۹
دوازده کلاسه	۲/۹۸	۰/۵۸

نتایج بررسی دقت کلاس‌بندی‌های مختلف در محاسبه مقادیر انتقال اطلاعات نشان داد که تقسیمات ۱۲ کلاسه کمترین میزان خطا و بیشترین همبستگی را در بین سایر کلاس‌ها دارد (جدول ۵). همچنین نتایج تغییر کلاس‌بندی‌ها نشان داد که حساسیت مدل آنتروپی به تغییر کلاس‌ها زیاد می‌باشد که این موضوع با تحقیقات فانی و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد. با انتخاب تعداد تقسیمات ۱۲ کلاسه و مقادیر تخمین زده شده توسط روش رگرسیون بردار پشتیبان، مقادیر شاخص آنتروپی تعیین و نتایج مربوط به پایش کمی شبکه باران‌سنجی منطقه مورد مطالعه برآورد گردید. نتایج بررسی وضعیت شبکه پایش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه دریاچه ارومیه به شرح شکل ۳ ارائه گردید. همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، نتایج پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات (ITI) در سطح منطقه مورد

تئوری آنتروپی قابلیت خوبی برای کمی کردن ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های باران‌سنجی در یک شبکه باران‌سنجی دارد.

انتقال اطلاعات کمتری دارند را از سیستم حذف کرد. همچنین نتایج این تحقیق همانند تحقیق فانی و همکاران (۱۳۹۲) نشان داد که



شکل ۳- نتایج پهنه‌بندی مقادیر شاخص آنتروپی در کلاس ۱۲ طبقه‌ای جهت پایش شبکه کیفی آب زیرزمینی

### نتیجه‌گیری

داده‌ها از معیارهای بررسی خطا و همبستگی استفاده شد. در این روش ابتدا مقادیر و ضرایب آنتروپی در کلاس‌های مختلف طبقه محاسبه و در نهایت دقت محاسبات در تخمین مقادیر انتقال اطلاعات مورد ارزیابی واقع شد. در نهایت نتایج نشان داد که طبقه‌بندی ۱۲ کلاسه با توجه به معیار خطا و معیار کارایی به‌عنوان بهترین طبقه‌بندی انتخاب گردید. نتایج بررسی تئوری آنتروپی در پایش شبکه باران‌سنجی نشان داد که بیشتر نواحی منطقه مورد مطالعه را نواحی مازاد از نظر تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی در بر گرفته است. هدف از مطالعات پایش شبکه آب زیرزمینی یا باران‌سنجی، بهبود تراکم شبکه می‌باشد که این موضوع با افزایش یا کاهش تعداد ایستگاه همراه باشد لذا توصیه می‌شود جهت کاهش یا افزایش تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی در منطقه مورد مطالعه از آماره رتبه‌بندی ایستگاه‌ها استفاده شده و رتبه ایستگاه‌ها از نظر انتقال اطلاعات در نظر گرفته شود. نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داد که ایستگاه‌های شماره ۲۴، ۸ و ۱۹ رتبه‌های ۱ تا ۳ را دریافت کردند که نشان دهنده انتقال و دریافت اطلاعات بیشتر نسبت به سایر ایستگاه‌ها است. به عبارت دیگر این ایستگاه‌ها ارزش حفظ بیشتری نسبت به ایستگاه‌های دیگر دارند و داده‌های این ایستگاه‌ها را می‌توان با اطمینان کامل استفاده کرد. این ایستگاه‌ها در نقاط مختلف حوضه

در این مطالعه کارایی تئوری آنتروپی در رتبه‌بندی و تحلیل منطقه‌ای شبکه باران‌سنجی حوضه دریاچه ارومیه مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس مقادیر شاخص‌های متفاوت آنتروپی برای تقسیمات ۱۲ کلاسه ارائه شد. در تئوری آنتروپی گسسته جهت تأثیر غیرمستقیم داده‌های سایر ایستگاه‌ها بر یکدیگر از روش‌هایی برای تخمین چندمتغیره استفاده می‌شود که در این مطالعه از رگرسیون بردار پشتیبان استفاده شد. در ابتدا دقت مدل یاد شده (رگرسیون بردار پشتیبان) در تخمین مقادیر بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از اطلاعات سایر ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا جهت بهینه‌یابی پارامترهای مدل رگرسیون بردار پشتیبان از الگوریتم مورچگان استفاده شد. بعد از بهینه‌یابی پارامترهای مدل رگرسیون بردار پشتیبان، مقادیر بارش سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مقادیر بارش تمامی ایستگاه‌ها تخمین زده شد. نتایج همبستگی و میزان خطای بین داده‌های مشاهداتی و تخمینی نشان داد که روش رگرسیون بردار پشتیبان بهینه شده به‌خوبی رابطه بین ایستگاه‌ها را برقرار نموده است. جهت انتخاب کلاس‌های تقسیم‌بندی

Chadalavada,S., Datta,B., Naidu, R. 2011. Uncertainty based optimal monitoring network design for a chlorinated hydrocarbon contaminated site. *Environmental monitoring and assessment*. 173.1-4: 929-940.

Chen,Y.C., Wei,C., Yeh,H.C. 2008. Rainfall network design using kriging and entropy. *Hydrological Processes*. 22. 3: 340.

Dorigo,M., Maniezzo,V., Colorni,A. 1991. The ant system: An autocatalytic optimizing process.

Hamed,K.H., Rao,A.R. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*. 204.1-4: 182-196.

Harmancioglu,N.B., Alpaslan,N. 1992. Water quality monitoring network design: A problem of multiobjective decision making. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 28.1: 179-192.

Jaynes,E.T. 1957. Information theory and statistical mechanics. *Physical review*. 106.4: 620-630.

Kawachi,T., Maruyama,T., Singh,V.P. 2001. Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan. *Journal of Hydrology*. 246.1: 36-44.

Kendall,M.G. 1975. Rank Correlation Measures. Charles Griffin. London.

Khalili,K., Tahoudi,M.N., Mirabbasi,R., Ahmadi, F. 2016. Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 30.4: 1205-1221.

Kumar,S., Merwade,V., Kam,J., Thurner,K. 2009. Streamflow trends in Indiana: effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. *Journal of Hydrology*. 374.1: 171-183.

Lubbe,C. 1996. Information Theory, Cambridge: Cambridge University Press.

Mann,H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*. 245-259.

Markus,M., Knapp,H.V., Tasker,G.D. 2003. Entropy and generalized least square methods in assessment of the regional value of streamgages. *Journal of hydrology*. 283.1: 107-121.

قرار دارند. از طرف دیگر ایستگاه‌های شماره ۱۵، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱ و ۳۳ در بین سایر ایستگاه‌ها کمترین ارزش و اعتبار را کسب کرده‌اند. این ایستگاه‌ها دورترین فاصله را نسبت حوضه داشته و در منطقه بحرانی از نظر ITI قرار دارد.

## تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره ابلاغ ۱۳۹۷/د/۸۷۴ مورخ ۱۳۹۷/۰۱/۲۶ با استفاده از اعتبارات دانشگاه بیرجند انجام شده لذا نویسندگان مقاله از دانشگاه بیرجند به دلیل حمایت از این مقاله کمال تشکر را دارند.

## منابع

ابکرزاده، م.، قهرمان، ب. ۱۳۹۲. استفاده هم‌زمان از آنتروپی و کریجینگ فضایی - زمانی برای تعیین شبکه بهینه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی دشت مشهد، نشریه آب و خاک. جلد ۲۷. شماره ۳. صفحات ۶۲۹-۶۱۳.

فانی، مرتضی،، خلیفه، س.، خلیفه، ا.، افلاطونی، م. ۱۳۹۴. ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته (مطالعه موردی: حوضه آبریز کارون بزرگ. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸(۴): ۱-۱۳.

فرجی، ح.، محمودی میمند، ه.، نظیف، س.، عباسپور، ر. ۱۳۹۳. توسعه بهینه شبکه باران‌سنجی با استفاده از کریجینگ و آنتروپی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز کرخه). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۴۶(۴): ۴۴۲-۴۴۵.

قهرمانی، ع.، شقاقیان، م. ۱۳۹۴. طراحی شبکه باران با استفاده از مفهوم آنتروپی (مطالعه موردی: حوضه آبریز کرخه). دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه تبریز.

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

مهجوری‌مجد، ن.، کراچیان، ر. ۱۳۸۷. ارزیابی کارایی سیستم‌های پایش کیفی رودخانه با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته (رودخانه جاجرود). دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران.

میرعباسی، ر.، دین‌پژوه، ی. ۱۳۸۷. ارزیابی شبکه پایش کیفیت دشت اهر براساس تئوری آنتروپی، اولین همایش ملی مدیریت منابع آب اراضی ساحلی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری.

- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 63.324: 1379-1389.
- Shannon, C.E. 1948. A mathematical theory of communication, *bell System technical Journal* 27: 379-423 and 623-656. *Mathematical Reviews (MathSciNet)*: MR10, 133e.
- Socha, K., Dorigo, M. 2008. Ant colony optimization for continuous domains. *European journal of operational research*. 185.3: 1155-1173.
- Stützle, T., Hoos, H.H. 2000. MAX-MIN ant system. *Future generation computer systems*. 16.8: 889-914.
- Theil, H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, 3; confidence regions for the parameters of polynomial regression equations. *Stichting Mathematisch Centrum. Statistische Afdeling, (SP 5a/50/R)*. 1-16.
- Vapnik, V. 1998. *Statistical learning theory*. 1998. Wiley, New York.
- Zhu, Q., Shen, L., Liu, P., Zhao, Y., Yang, Y., Huang, D. Yang, J. 2015. Evolution of the Water Resources System Based on Synergetic and Entropy Theory. *Polish Journal of Environmental Studies*. 24.6: 2727-2738.
- Mishra, A.K., Coulibaly, P. 2010. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*. 380.3: 420-437.
- Mogheir, Y., Singh, V.P. 2002. Application of information theory to groundwater quality monitoring networks. *Water Resources Management*. 16.1: 37-49.
- Mogheir, Y., Singh, V.P. 2003. Specification of information needs for groundwater management planning in developing country. *Groundwater Hydrology*. *Balema Publisher, Tokyo*. 2: 3-20.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3): 282-290.
- Nunes, L.M., Cunha, M.C., Ribeiro, L. 2004. Groundwater monitoring network optimization with redundancy reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 130.1: 33-43.
- Ozkul, S., Harmancioglu, N.B., Singh, V.P. 2000. Entropy-based assessment of water quality monitoring networks. *Journal of hydrologic engineering*. 5.1: 90-100.
- ŞARLAK, N. 2005. Evaluation and modeling of streamflow data: Entropy method, Autoregressive models with asymmetric innovation and artificial neural networks (Doctoral dissertation, Middle East Technical University).

## Designing Monitoring Network for Rain Gauge Stations Using Irregularity Theory (Case Study: Urmia Lake Basin)

A. Shahidi<sup>1\*</sup>, A. KhasheiSiuki<sup>2</sup>, Y. Ramazani<sup>3</sup>, M. Nazeri-Tahrudi<sup>4</sup>

Recived: Augu.20, 2018

Accepted: Nov.06, 2018

### Abstract

Designing of water quantity and quality monitoring system has been raised as one of the most complex issues in the field of water resources and the environment. Designing of these systems used to achieve qualitative and quantitative information, while their design process requires basic information. The study area in this research is Urmia Lake basin that located in the North West of Iran. Entropy literally means disorder. In this study used entropy theory to rain gaging monitoring in period of 1984-2011. Also The modified Mann - Kendal test was used to study the trend of the studied parameters The results of the study of the trend of precipitation values of Urmia Lake basin at annual scale showed that rainfall changes in this basin have been decreasing in the annual scale. In order to study and monitoring the rain gauge network using Entropy theory, two methods of support vector regression and kriging were used to estimate precipitation values. Results indicated that the accuracy of the regression model was higher than the Kriging model. The results of the evaluation of the entropy index at the aquifer showed that only 1.4% of the studied basin had a severe shortage of information that required the construction of a new station in the area. However, since more than 90 percent of the basin area is in terms of data transmission in excess and relatively excessive condition, the study area is relatively good at its monitoring. In general, the results indicated that the accuracy of the optimized method of support vector regression was used to estimate the annual rainfall in the Urmia Lake basin. The results of the stations' ranking in the study area showed that the stations of Jharabad, Badamlou and Orban received ratings ranging from 1 to 3, which indicates the transfer and reception of more information than other stations.

**Keywords:** Irregularities, Shannon Entropy, Transfoinformation, Urmia Lake

---

1- Associate Professor, Sciences and Water Engineering Department, Faculty of Agricultural, Birjand University. Iran  
2- Associate Professor, Sciences and Water Engineering Department, Faculty of Agricultural, Birjand University. Iran  
3 - Assistant Professor, Sciences and Water Engineering Department, Faculty of Agricultural, Birjand University. Iran  
4- Ph.D. Student of water Resources Management, Sciences and Water Engineering Department, Birjand University  
(\*- Corresponding Author Email: ashahidi@birjand.ac.ir)