دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی با استفاده از آنتروپی اطلاعات و الگوریتم کرم شب‌تاب (مطالعه موردی: حوضه شرق دریاچه ارومیه)

المیرا ولی‌پور[۱]، محمدعلی قربانی[۲] و اسماعیل اسدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز، (نویسنده مسوول: elmira.valipoor@yahoo.com)
۲ و ۳- دانشیار و استادیار، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۹ تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۲۵
صفحه: ۱۱ تا ۲۳

چکیده

اولین اقدام در اجرای پروژه‌های آبی، شناخت ویژگی‌های بارندگی و آگاهی از آب و هوا و اقلیم منطقه است. بارندگی به‌دلیل تغییرات مکانی و زمانی زیاد، در مقایسه با سایر عوامل هواشناسی، به شبکه متراکم‌تری برای دیده‌بانی نیاز دارد. از این‌رو مکان‌یابی بهینه احداث ایستگاه‌ها امری بسیار ضروری است. بنابراین ابتدا داده‌های بارش ماهانه ایستگاه‌های باران‌سنجی در سطح حوضه و مناطق مجاور آن‌ها جمع‌آوری گردید. سپس تمامی داده‌های سری زمانی مورد تحلیل‌های آماری ازجمله آزمون نرمال و همگنی قرارگرفتند و ایستگاه‌های دارای آمار خطا و غیرهمگن از مجموع ایستگاه‌ها حذف و یا اصلاح شدند. با توجه به نتایج آزمون‌های نرمال، بارندگی سالانه در ۵ ایستگاه به‌دلیل کوچک بودن مقادیر آزمون‌ها از مقدار بحرانی آن‌ها، از توزیع نرمال پیروی نمی‌نمایند. همچنین نتایج آزمون‌های همگنی حاکی از آن بود که ۹۱/۷ درصد از ایستگاه‌های منتخب حوضه از لحاظ صحت و درستی داده‌های بارندگی ثبت‌شده مورد تأیید بوده و در ادامه، قابل استفاده در تحلیل‌های هیدرولوژیک و یا منابع آبی خواهند بود. با تحلیل مکانی آنتروپی بارش، مقدارآنتروپی انتقال اطلاعات در سطح حوضه محاسبه و معیاری در تعیین نقاط با پتانسیل تأسیس ایستگاه جدید در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از این است که شش ایستگاه شبستر، شرفخانه، زرنق هریس، هرزندات، کلیبر و قوشچی سراب ضمن کسب رتبه‌های پایین در شبکه، وضعیتی بحرانی داشته و ضعیف‌ترین ایستگاه‌های حوضه می‌باشند. از سوی دیگر ایستگاه‌های سعیدآباد، باشسیزاوجان، مراغه، خرمازرد و شیرین‌کندی بالاترین رتبه‌ها را در میان سایر ایستگاه‌ها به خود اختصاص داده‌اند و پنج ایستگاه مهم حوزه آبخیز مورد مطالعه می‌باشند که مفیدترین اطلاعات در شبکه را تولید می‌نمایند. به‌منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی تابع هدفی برای کل حوضه تعیین و سپس از الگوریتم کرم شب‌تاب بهره‌گیری شد تا بهترین جانمایی برای ایستگاه‌های باران‌سنجی به‌دست آید. پس از بررسی نتایج مشخص گردید، بهترین جانمایی با اضافه کردن تعداد ۹ ایستگاه به‌دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی انتقال اطلاعات، الگوریتم کرم شب‌تاب، بهینه‌سازی، باران‌سنج، مکان‌یابی

مقدمه

تولید اطلاعات صحیح و کارآمد همواره از مسائل و چالش‌های مهم زیر مجموعه منابع آب کشور بوده است. از این نظر چیدمان ایستگاه‌های باران‌سنجی مناسب در شبکه باران‌سنجی یک حوضه حائز اهمیت فراوان بوده و در درک صحیح ویژگی‌های هیدرولوژیک حوضه تأثیر بسزایی 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 مجدد و صحیح شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه می‌باشد (۴). تئوری آنتروپی با نگرشی آماری- احتمالاتی به وضعیت ایستگاه‌های موجود در شبکه پایش و آمار و اطلاعات ثبت شده در آن‌ها به‌همراه ارتباط ایستگاه‌های موجود با یکدیگر، ضمن بررسی اطلاعات مجموعه ایستگاه‌های موجود، امکان حذف ایستگاه‌های مازاد و اضافه نمودن ایستگاه‌های جدید در مناطق مورد نیاز را فراهم می‌کند (۱۲). در سال‌های اخیر اغلب کشورهای توسعه یافته شروع به طراحی مجدد شبکه‌های موجود، به‌منظور اصلاح و تکمیل آن‌ها نموده‌اند. اخیراً نیز روش آنتروپی مورد توجه قرار گرفته است که می‌توان به‌عنوان روشی نوین در جهت سنجش عملکرد شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی از آن بهره جست. تا نیمه اول قرن بیستم، به‌دلیل پیچیدگی مفهومی و محاسباتی این تئوری، محققان علاقه چندانی به کاربرد آن به‌عنوان یک روش آماری پیدا نکردند تا این که شانون (۲۲) پژوهش‌های گسترده‌ای را در زمینه استفاده از این تئوری در علوم مختلف مانند ارزیابی سری 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. موغیر و سینگ (۱۹) آنتروپی انتقال اطلاعات را از میان چهار نوع آنتروپی (مرزی، مشترک، شرطی و انتقال اطلاعات) بهترین و در عین حال مناسب‌ترین روش را برای بررسی سیستم‌های پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی تشخیص دادند. سرلک و سرمان (۲۱) به ارزیابی و انتخاب ایستگاه‌های شبکه باران‌سنجی با استفاده از تئوری آنتروپی پرداختند. آن‌ها به بررسی اثر انواع توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال و گاما بر نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها، به این نتیجه رسیدند که نوع توزیع در نظر گرفته شده برای داده‌های بارندگی در تئوری آنتروپی پیوسته مهم می‌باشد و موجب مقادیر متفاوتی در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها می‌شود. مارکوس و همکاران (۱۴)، از دو روش تئوری آنتروپی و حداقل مربعات تعمیم یافته به‌منظور ارزیابی ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های پایش رودخانه‌ای در ایالت ایلی‌نویز امریکا استفاده نموده و نتایج هر دو روش را با هم مقایسه و مدل ترکیبی از دو روش

1- Shannon

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

پیشنهاد کردند. چن و همکاران (۲) روشی مرکب از زمین آمار و آنتروپی برای تعیین تعداد و توزیع مکانی بهینه ایستگاه‌های باران‌سنجی در شمال تایوان ارائه دادند. در این مطالعه از روش کریجینگ برای درون‌یابی مقادیر مشاهده شده بارندگی در موقعیت‌های جدید باران‌سنج‌ها و از روش آنتروپی، برای یافتن تعداد کافی باران‌سنج‌ها به‌طوری که معرف پدیده بارندگی ماهانه باشند استفاده شد. همچنین با محاسبه آنتروپی انتقال اطلاعات و آنتروپی مشترک، درجه اهمیت ایستگاه‌ها تعیین گردید. اوداله (۱) با استفاده از روش‌های کریجینگ و آنتروپی وضعیت شبکه باران‌سنجی حوزه آبخیز شهر مکه را بررسی و در نهایت با تعیین موقعیت بهینه ایستگاه‌ها در منطقه، جانمایی نهایی شبکه باران‌سنجی را ارائه کرد. چیانگ و همکاران (۳) تئوری آنتروپی انتقال اطلاعات در طراحی شبکه باران‌سنجی را مورد استفاده قرار دادند. آنها در این پژوهش اثر تغییرات مکانی و زمانی بارش با محاسبه حداکثر آنتروپی مشترک را بررسی کردند. نتایج بیانگر آن است که اثر تغییرات مکانی و مقایسه با مقیاس‌های زمانی ناچیز است. وی و همکاران (۲۳) با محاسبه‌ی تئوری آنتروپی انتقال اطلاعات شبکه باران‌سنجی تایوان را در دوره‌ی آماری (۲۰۱۲-۱۹۹۲) و برای بارش‌های ساعتی، ماهانه و شش ماه خشک و تر ارزیابی کردند. در نهایت برای پایش دقیق شبکه باران‌سنجی، نقاط پتانسیلی را برای تأسیس ایستگاه پیشنهاد کردند. معصومی و کراچیان (۱۷) به ارزیابی کارایی سیستم پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از نظریه آنتروپی گسسته پرداختند و از روی منحنی آنتروپی انتقال اطلاعات بر حسب فاصله‌ی بین ایستگاه‌ها، یک منحنی نمایی به مجموعه نقاط برازش دادند و کمترین فاصله‌ای را که تغییرات مقدار انتقال اطلاعات بر حسب فاصله بسیار کم و ناچیز می‌گردد، بهینه‌ترین فاصله ایستگاه‌های پایش در نظر گرفتند. مهجوری مجد و کراچیان (۱۵)، از آنتروپی گسسته به‌منظور ارزیابی و مکان‌یابی مجدد ایستگاه‌های پایش کیفیت آب موجود و تعیین فواصل زمانی بهینه‌ی نمونه‌برداری متغیرهای کیفی شاخص در طول رودخانه جاجرود استفاده کردند. کریمی‌حسینی (۱۰) با استفاده از مفهوم تئوری آنتروپی و دو روش الگوریتم ترتیبی و الگوریتم ژنتیک، با بررسی آنتروپی انتقال اطلاعات یک سری نقاط پتانسیل، محل‌های نیازمند احداث ایستگاه باران‌سنجی جدید درحوضه باتلاق گاوخونی را تعیین کردند. بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب در خروجی از یک تابع یا فرآیند است. کریمی حسینی و همکاران (۱۱) در حوضه آبریز زاینده‌رود، پس از محاسبه‌ی آنتروپی انتقال اطلاعات زوج ایستگاه‌ها، رابطه آنتروپی انتقال اطلاعات- فاصله برای منطقه را تعیین و سپس به کمک الگوریتم‌های ژنتیک و ترتیبی با دو هدف بیشینه کردن حداقل آنتروپی و متوسط آنتروپی، مناطق نیازمند ایستگاه‌های جدید را معرفی نمودند. در واقع مفهوم بهینه‌سازی به این صورت است که در بین پارامترهای یک تابع به دنبال مقادیری باشیم که تابع را کمینه یا بیشینه نماید. کلیه مقادیر مناسب جهت این امر را، راه‌حل‌های ممکن و بهترین مقدار از این مقادیر را، راه حل بهینه می‌نامند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی هر دو نوع مسائل بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی را پوشش می‌دهند. الگوریتم کرم شب‌تاب یک مدل تکاملی است که مبتنی بر الگوریتم‌های هوش جمعی و برگرفته شده از طبیعت می‌باشد (۶). این الگوریتم با ایجاد یک جمعیت اولیه از راه‌حل‌های کاربردی آغاز می‌گردد و به صورت مکرر از نسلی به نسل دیگر در جهت بهترین راه‌حل حرکت می‌کند. در تکرارهای موفق الگوریتم، انتخاب در مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها انجام می‌گیرد. در زمینه بهینه‌سازی با الگوریتم کرم شب‌تاب مطالعاتی انجام گرفته است. حسینی موغاری و بنی حبیب (۷) در پژوهشی الگوریتم کرم شب تاب را به‌عنوان روشی نوین برای تعیین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن، به‌کار گرفتند. عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب با الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی مجموعه ذرات که روش‌های بهینه‌سازی متداول و شاخصی می‌باشند، مقایسه و ارزیابی شد. نتایج حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم کرم شب‌تاب نسبت به دو روش دیگر بود. یانگ و هه[۶] با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری کرم‌شب تاب نتیجه گرفتند این الگوریتم بهتر از راهبرد بهینه جستجو متناوب است. همچنین این الگوریتم را برای پیامدهای مسایل بهینه‌سازی تحلیل کردند. الگوریتم کرم شب‌تاب دارای دو مزیت عمده نسبت به الگوریتم‌های دیگر است: اول اینکه، الگوریتم کرم شب‌تاب بر اساس جاذبه بین عوامل عمل می‌کند و جذابیت را با فاصله کاهش می‌دهد، این امر منجر به این می‌شود که کل جمعیت به‌طور خودکار بتواند به زیر گروه تقسیم شده و هر گروه بتواند در اطراف هر یک از حالت‌های بهینه موجود ازدحام کند. در میان تمام این حالات، بهترین راه‌حل را می‌توان یافت. دوم اینکه، این زیر بخش‌ها اجازه می‌دهند تا الگوریتم کرم شب‌تاب قادر به پیدا کردن همه حالت‌های بهینه به‌طور هم‌زمان شود (۲۵). کاظم زاده و همکاران (۹) مطالعه بررسی آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی محصور نشده بر اساس المان محدود و الگوریتم کرم شب‌تاب اصلاح شده را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه حاضر بهبود کاربرد و کارایی الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب فوق ابتکاری و جایگزینی الگوریتم بهنیه‌سازی کرم شب‌تاب اصلاح شده به‌جای روش‌های بهینه‌سازی متعارف (به‌عنوان مثال، الگوریتم ژنتیک) صورت گرفت. مدل شبیه‌سازی بهینه شده در این مطالعه، به‌منزله یک راه موثر برای تعیین طراحی مجدد مطلوب برای یک آبخوان آلوده است. نتایج حاصل از این پژوهش کمک به بهبود مدیریت آب‌های زیرزمینی در سفره آلوده را در برداشته است. کیسی و همکاران (۱۳) برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب در دریاچه ارومیه از ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم کرم شب‌تاب استفاده کردند. نتایج نشان داد که بهبود در دقت پیش‌بینی و قابلیت تعمیم می‌تواند توسط روش ماشین بردار پشتیبان همراه با الگوریتم کرم شب‌تاب توسعه داده شده در مقایسه با برنامه‌ریزی ژنتیک و الگوریتم شبکه عصبی به‌دست آید. علاوه بر این، یافته‌ها نشان داد که مدل ماشین بردار پشتیبان همراه با الگوریتم کرم شب‌تاب را می‌توان در یک مدل جدیدی از استراتژی‌های پیش‌بینی، برای پیش‌بینی سطح دریاچه به‌کار برد. جباری و همکاران (۸) در مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی در

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

شهرستان مشکین شهر از الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) استفاده کردند. نتایج بیان‌کننده عملکرد مناسب این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم PSO می‌باشد.

مسأله طراحی شبکه پایش را می‌توان به‌صورت انتخاب یک سری ایستگاه‌های جدید تعریف نمود، که انتقال اطلاعات در شبکه را بهبود بخشیده و به سطح مطلوب می‌رساند. در این مورد، آنتروپی انتقال اطلاعات که معیاری از انتقال اطلاعات در شبکه است، می‌تواند به عنوان معیار طراحی شبکه مورد استفاده قرار گیرد. در مطالعه حاضر نیز، هدف تعیین موقعیت ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی در سطح حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، با استفاده از آنتروپی انتقال اطلاعات می‌باشد به طوری که با افزودن ایستگاه‌های پیشنهادی به شبکه باران‌سنجی موجود، بیشترین انتقال اطلاعات ممکن باران‌سنجی صورت گیرد.

مواد و روش‌ها

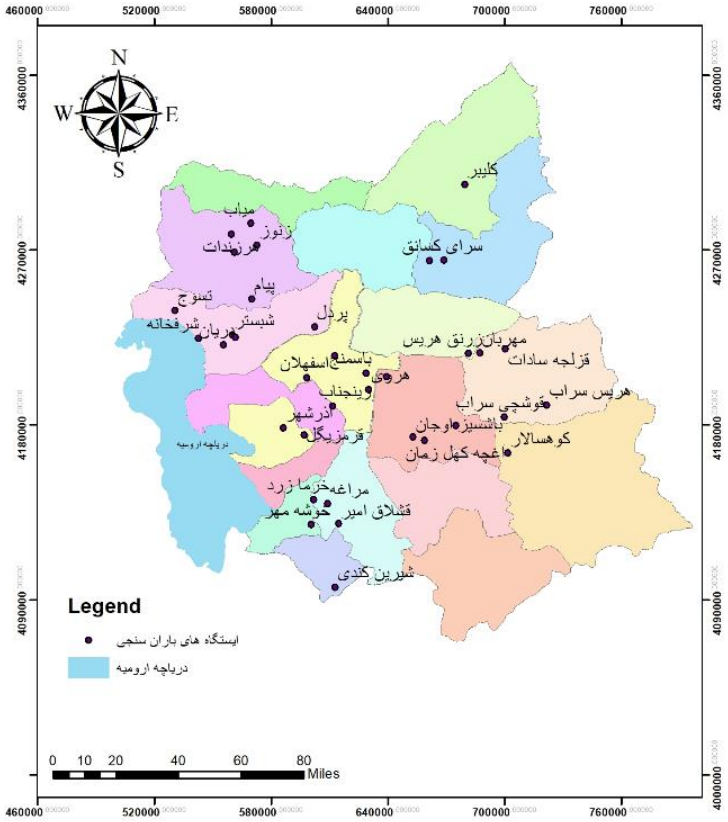
منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در شمال‌غرب کشور قرار گرفته است. این حوضه به وسیله بخش شمالی کوه‌های زاگروس و دامنه‌های جنوبی کوه سبلان و نیز دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند احاطه شده است. این حوضه از سمت شمال به حوزه آبخیز رودخانه ارس، از سمت مشرق و جنوب به حوزه آبخیز رودخانه قزل اوزن و از سمت غرب به مرز کشور ترکیه و عراق محدود می‌شود. حوضه دریاچه ارومیه بین مرزهای جغرافیایی ´۱۲ °۴۴ تا ´۵۵ °۴۷ طول شرقی و ´۴۰ °۳۵ تا ´۵ °۳۸ عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع متوسط آن از سطح آزاد دریا ۱۲۷۵ متر می‌باشد. مساحت حوزه آبخیز دریاچه ارومیه ۵۲۳۵۵ کیلومتر مربع است. تلخه رود، سیمینه رود، زرینه رود و نازلو از مهم‌ترین رودخانه‌های حوزه آبخیز دریاچه ارومیه می‌باشد (شکل ۱).

آمار و اطلاعات

در این پژوهش داده‌های بارش با دوره آماری ۴۲ ساله از سال ۱۳۵۰تا ۱۳۹۲ شامل ۳۶ ایستگاه برای حوزه آبخیز شرق دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گرفتند. بدیهی است که در تشکیل دوره آماری یاد شده بازسازی آماری نیز صورت گرفته است. البته میزان بازسازی آماری در همه ایستگاه‌ها کمتر از ۲۰ درصد طول دوره آماری بوده است. دو آزمون کلموگراف – اسمیرنوف و اندرسون دارلینگ روی داده‌ها انجام گرفت و با توجه به نتایج این دو آزمون، بارندگی سالانه در ۵ ایستگاه کسانق، هریس‌سراب، پردل، مهربان و قوشچی‌سراب به دلیل کوچک بودن مقادیر آزمون‌ها از مقدار بحرانی آن‌ها، از توزیع نرمال پیروی نمی‌نمایند. سپس با استفاده از آزمون گروبز– بک داده‌های پرت در همه ایستگاه‌ها تعیین شدند. با توجه به این آزمون ۶۱ داده به عنوان داده پرت تشخیص داده شدند که پس از بررسی مجدد و مقایسه با ایستگاه‌های مجاور، تعداد ۹ داده پرت و نامتحمل مشخص و حذف شدند. همگنی داده‌ها در تمام ایستگاه‌های باران‌سنجی با روش آزمون نرمال استاندارد (SNHT)، آزمون همگنی دامنه بیشند، آزمون همگنی پتیت و آزمون همگنی نسبت فون نیومن (VNR) بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از این آزمون‌ها ۹۱/۷ درصد از ایستگاه‌های منتخب حوضه از لحاظ صحت و درستی داده‌های بارندگی ثبت شده مورد تأیید بوده و در ادامه، قابل استفاده در تحلیل‌های هیدرولوژیک خواهند بود.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]



شکل ۱- نقشه حوضه شرق دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 1. Map of East Basin of Urmia Lake and the studied stations

تئوری آنتروپی

به‌طور کلی تئوری آنتروپی به دو صورت گسسته و پیوسته تعریف شده و مورد استفاده قرارمی‌گیرد. در آنتروپی پیوسته، فرض بر آن است که توزیع احتمالاتی متغیرها، ازتوزیع نرمال یا لوگ‌نرمال پیروی می‌کنند ولی در حالت گسسته با توجه به بازه تغییرات مقادیر متغیرها، اطلاعات موجود گسسته‌سازی شده و جدول‌های توزیع فراوانی مشاهداتی متغیرها تهیه می‌شوند. سپس با استفاده ازجدول‌ها، مقادیر احتمال رخداد در هر حالت محاسبه می‌شود. بنابراین نوع تابع توزیع چگالی احتمال اهمیتی ندارد. مطالعات اخیر همچون موغیر و سینگ (۱۹) نشان دادند که تابع توزیع احتمال بسیاری از متغیرهای کمی و کیفی در سامانه‌های منابع آب، از توزیع‌های نرمال یا لوگ‌نرمال تبعیت نمی‌کنند. بنابراین استفاده از آنتروپی گسسته روشی برای اصلاح این ضعف مهم درکاربرد آنتروپی است. تعریف گروهی از شاخص‌های آنتروپی گسسته به‌صورت زیر می‌باشند (۱۷):

آنتروپی مرزی:

$$H(x) = -\sum_{i=1}^{\infty} P(x_i) \ln P(x_i) \quad (۱)$$

آنتروپی مشترک:

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

آنتروپی شرطی:

$$H(x|y) = -\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} P(x_i|y_j) \ln P(x_i|y_j) \quad (۳)$$

آنتروپی انتقال اطلاعات:

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

که در روابط بالا $P(x)$ احتمال رویداد x، $P(x,y)$ احتمال رویداد مشترک x و y و $P((X|Y))$ احتمال رخداد x به شرط y می‌باشد. موغیر و سینگ (۲۰) شاخص زیر را به منظور نرمال نمودن شاخص آنتروپی انتقال اطلاعات معرفی و آن را شاخص انتقال اطلاعات نامیدند:

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

اساس پهنه‌بندی بر درون‌یابی استوار است. درون‌یابی فرآیند به‌دست آوردن نقاط مجهول توسط نقاط معلوم است. در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی حوزه آبخیز مطالعاتی بر اساس شاخص $ITI\ (i)$، از روش میان‌یابی IDW با استفاده از جدول (۱) برای شاخص $ITI\ (i)$ استفاده شد.

دسته‌بندی داده‌ها

در تئوری آنتروپی در حالت گسسته، با توجه به بازه تغییرات مقادیر متغیرها، اطلاعات موجود گسسته‌سازی شده و جداول توزیع فراوانی مشاهدات متغیرها تهیه شده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات $ITI\ (i)$ (۱۸)

Table 1. Classification of Information transmission indexes ITI (i) (18)

درجه اهمیت منطقه	شاخص $ITI\ (i)$
کمبود شدید	۰/۰ – ۰/۲
کمبود	۰/۲ – ۰/۴
متوسط	۰/۴ – ۰/۶
بالای متوسط	۰/۶ – ۰/۸
مازاد	۰/۸ و بالاتر

سپس با استفاده از این جداول، مقادیر احتمال رخداد در هر حالت محاسبه شده است. اعداد داخل جدول، تعداد تکرار مقادیر یک متغیر مثل x را در یک بازه مشخص نشان می‌دهد. از رابطه زیر که به دستور استورجس[1] مشهور است استعداد کلاس‌های (بازه‌های) مناسب محاسبه شده است:

$$NCI = 1 + 3.322\ Log(n)P\big((X|Y)\big) \qquad (۶)$$

در رابطه بالا، n تعداد مشاهدات و NCI تعداد بازه‌ها (کلاس‌بندی) در سری زمانی متغیر مورد نظر است. البته در بسیاری از موارد، تعداد کلاس‌ها به‌طور دلخواه انتخاب می‌شود. در این حالت معمولاً تعداد کلاس‌ها کمتر از ۵ کلاس و بیشتر از ۲۰ کلاس نیست. اگر تعداد کلاس‌ها از ۵ کمتر انتخاب شود، داده‌ها اطلاعات خود را از دست خواهند داد. افزایش تعداد کلاس‌ها به بیش از ۲۰ کلاس نیز سبب طولانی و وقت‌گیر شدن محاسبات خواهد شد. اما در هر حال این روش، یک روش کاملا سلیقه‌ای و عملی است (۴). با توجه به مطالب مطرح شده در بالا و بررسی کارایی تئوری آنتروپی در رتبه‌بندی و تحلیل منطقه‌ای ایستگاه‌های آب‌سنجی در حوضه‌های مختلف و نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس مقادیر شاخص‌های متفاوت آنتروپی برای $n = ۶$ ارائه شده است.

الگوریتم کرم شب‌تاب[2]

الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) توسط یانگ (۲۴) بر مبنای رفتار و الگوهای چشمک‌زن کرم‌های شب‌تاب ارائه گردید. این الگوریتم یک روش جدید مبتنی بر رفتارهای جمعی است که از رفتارهای اجتماعی کرم شب‌تاب در طبیعت الهام گرفته است و به‌عنوان یکی از روش‌های قدرتمند در حل مسائل بهینه‌سازی شناخته شده است. کرم‌های شب‌تاب نورهای موزون و کوتاه تولید می‌کنند. الگوی نوری هر کدام از کرم‌های شب‌تاب با یکدیگر متفاوت می‌باشند. کرم‌های شب‌تاب از این نورها به دو منظور استفاده می‌کنند: یکی فرآیند جذب جفت و دیگری برای جذب شکار. همچنین این نورها می‌توانند به‌عنوان یک مکانیزم محافظتی برای کرم‌های شب‌تاب باشند. نورهای موزون، نرخ تابیدن نور و میزان فاصله زمانی که بین سیگنال‌های نور وجود دارند باعث می‌شوند که کرم‌های شب‌تاب به یکدیگر جذب شوند. دو موضوع مهم در این الگوریتم، تغییرات شدت نور و فرموله کردن جذابیت حشرات می‌باشد. به‌منظور سادگی فرض می‌شود که جذابیت حشرات با شدت روشنایی آن‌ها بیان می‌شود. در حالت کلی جذابیت پارامتری نسبی بوده و از دید حشرات دیگر سنجیده می‌شود. همچنین به فاصله حشرات از یکدیگر نیز بستگی دارد. رابطه جذابیت با تغییرات فاصله حشرات به‌صورت زیر می‌باشد (۲۴):

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r} \qquad (۷)$$

که در آن β_0 بیانگر بیشینه جذابیت بوده و مقدار آن در بازه $[۰,۱]$ تغییر می‌کند. γ نیز بیانگر ضریب جذب می‌باشد و مقدار آن در بازه $[۰,\infty]$ قابل تغییر است. r بیانگر فاصله حشرات بوده و به‌عنوان مثال در مقیاس دو بعدی فاصله حشرات iام از حشره j ام به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \qquad (۸)$$

حرکت حشره iام به سمت حشره jام نیز با رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r}(x_j - x_i) + \alpha(\text{rand} - 0.5) \qquad (۹)$$

به‌طور کلی سه قانون ایده‌آل برای توسعه الگوریتم‌های الهام گرفته شده ازکرم شب‌تاب به‌کار برده شده است که عبارتند از:

۱- همه کرم‌های شب‌تاب از یک جنس در نظرگرفته می‌شوند، به‌گونه‌ای که یک کرم شب‌تاب به کرم شب‌تاب دیگر صرف‌نظر از جنسیت‌شان جذب خواهد شد.

۲- جذابیت با روشنایی یک کرم شب‌تاب متناسب است. بنابراین برای هرکرم شب‌تاب چشمک‌زن، یکی با روشنایی کمتر به سوی دیگری با درخشندگی بیشتر حرکت خواهدکرد. جذابیت با روشنایی متناسب است و هر دوی آن‌ها هرچه که فاصله افزایش می‌یابد، کاهش می‌یابند. اگر هیچ یک از کرم‌های شب‌تاب روشن‌تر از دیگری نباشد، کرم شب‌تاب به‌طور تصادفی حرکت خواهدکرد.

۳- روشنایی یک کرم شب‌تاب به‌وسیله چشم‌انداز تابع هدف تعیین می‌شود یا تحت تاثیر آن قرار می‌گیرد (۸). بر اساس این سه اصل، در شکل ۳ مراحل الگوریتم کرم شب‌تاب به‌صورت شبه کد نشان داده شده است.

الگوریتم پیشنهادی

به‌طور خلاصه، نحوه عملکرد الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) بدین صورت است که ابتدا تعدادی کرم شب‌تاب مصنوعی به‌طور تصادفی در دامنهٔ مساله توزیع می‌شوند و سپس هر کرم شب‌تاب از خود نوری ساطع می‌کند که شدت آن متناسب با میزان بهینگی نقطه‌ای است که آن کرم شب‌تاب در آن واقع شده است. سپس شدت نور هر کرم شب‌تاب مرتباً با شدت نور سایر کرم شب‌تاب‌ها مقایسه شده و کرم شب‌تاب کم نورتر به سوی کرم‌های شب‌تاب پر نورتر جذب می‌شود. این عمل باعث می‌شود که ذرات به اطراف ذره‌ای که نور بیشتری دارد متمرکز شوند و اگر در تکرار بعدی الگوریتم، ذره‌ای با نور بهتر وجود داشته باشد ذرات دوباره به سمت ذره با نور بیشتر حرکت می‌کند. در بحث حرکت کرم‌های شب‌تاب دو برداشت متفاوت وجود دارد.

1- Storeajs

2- Fire Fly Algorithm

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]

[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

برداشت اول به این صورت است که هر حرکت کرم شب‌تاب مورد نظر به‌سمت کرم شب‌تاب پر نورتر به‌عنوان موقعیت جدید در نظر گرفته می‌شود. در برداشت دوم حرکت کرم شب‌تاب مورد نظر بر اساس برآمد نهایی حرکت به سمت تمام کرم شب‌تاب‌های پر نور است. اگر در حرکت کرم‌های شب‌تاب فقط برداشت اول در نظر گرفته شود، اشکال روش این است که حرکت ذرات فقط با توجه به مقدار یک کرم شب‌تاب انجام می‌گیرد که در واقع همان بهینه محلی می‌باشد و بهینه سراسری تأثیری در روال جستجوی الگوریتم ندارد به‌همین دلیل فضای مسئله به‌صورت بهینه مورد جستجو قرار نمی‌گیرد و به تعداد تکرار بیشتری برای رسیدن به نقطه بهینه نیاز است. برای رفع این مشکل و سهیم شدن ذرات دیگر در حرکت ذرات و بهینه عمل جستجوی الگوریتم روش جدیدی پیشنهاد شده است و نتایج به‌دست آمده اثبات می‌کند که در نظر گرفتن هر دو برداشت در حرکت کرم‌های شب‌تاب با دقت بهتری می‌تواند نقطه بهینه را درفضای جست و جو بیابد (۶).

نتایج و بحث

ارزیابی ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌ها

کارایی تئوری آنتروپی در رتبه‌بندی و تحلیل منطقه‌ای ایستگاه‌های باران‌سنجی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه مورد ارزیابی قرا گرفت و نتایج رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بر اساس مقادیر شاخص‌های متفاوت آنتروپی برای $n = ۶$ ارائه شده است. چنانچه در جدول ۲ مشاهده می‌شود شش ایستگاه شبستر، شرفخانه، زرنق هریس، هرزندات، کلیبر و قوشچی سراب ضمن کسب رتبه‌های پایین در شبکه، وضعیتی بحرانی داشته و ادامه فعالیت آنها مستلزم تجدید نظر جدی است. از سوی دیگر ایستگاه‌های سعیدآباد، باشسیزاوجان، مراغه، خرمازرد و شیرین‌کندی بالاترین رتبه‌ها را در میان سایر ایستگاه‌ها به خود اختصاص داده‌اند و پنج ایستگاه مهم حوزه آبخیز مورد مطالعه می‌باشند که مفیدترین اطلاعات در شبکه را تولید می‌نمایند. نمودار آنتروپی انتقال اطلاعات ۳۶ ایستگاه بر حسب فاصله بین ایستگاه‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌شود. در این روش مقدار آنتروپی انتقال اطلاعات گسسته محاسبه می‌گردد. این کار برای هر جفت از ایستگاه‌های موجود تکرار شده و سپس نمودار کل آنتروپی‌های محاسبه شده بین ایستگاه‌ها بر حسب فاصله بین ایستگاه‌ها رسم می‌گردد. سپس بهترین منحنی به نقاط نمودار برازش داده می‌شود. جایی که منحنی برازش داده شده تقریبا به حالت ثابت می‌رسد، انتخاب می‌گردد. نقطه انتخابی نقطه‌ای است که منحنی برازش داده شده به حدود ۹۵٪ مقدار مجانب خود رسیده است. فاصله مربوطه به نقطه انتخابی ازمحور yها در واقع همان فاصله‌ای است که انتقال اطلاعات بیش از آن صورت نمی‌گیرد و در فواصل بیشتر از آن کمبودهای اطلاعاتی وجود خواهد داشت. بنابراین این مقدار بهینه‌ترین فاصله بین دو ایستگاه پایش در آن منطقه می‌باشد. نتایج پهنه‌بندی حوضه مورد مطالعه بر اساس شاخص $ITI(i)$ (شکل ۳) نشان داد نزدیک ۵ درصد حوزه آبخیز فاقد ایستگاه و یا دارای کمبود شدید تبادل اطلاعات می‌باشد و به تبعیت از آن اطلاعات آب‌سنجی مناسبی نیز در این مناطق در اختیار نیست. ضروری است ایستگاه‌های تعطیل شده در این نواحی فعال شده و یا ایستگاه‌های جدید احداث گردد. همچنین ۹۳ درصد حوزه آبخیز دارای تبادل اطلاعات متوسط و یا بیشتر می‌باشد.

نتایج الگوریتم کرم شب‌تاب

در این بخش، در ابتدا پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب مورد بررسی قرار گرفته و سعی شده است با تنظیم صحیح پارامترها، نتایج حاصل از الگوریتم بهبود داده شود. از مهم‌ترین پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب پارامتر آلفا و گاما می‌باشند. که در این پژوهش پارامتر آلفا مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار پیشنهاد شده برای این پارامتر ۰/۲ می‌باشد (۲۵). اما با توجه به اینکه ماهیتاً الگوریتم کرم شب‌تاب استخراج‌گر[1] می‌باشد برای بهبود حرکات تصادفی ذرات و ایجاد تعادل بین خصوصیات الگوریتم می‌توان مقدار این پارامتر را با سعی و خطا به‌دست آورد. بدین منظور مقادیر مختلف این پارامتر برای یافتن نقطه بهینه توابع مختلف در ابعاد مختلف مورد بررسی قرارگرفت و بهترین مقدار برای این پارامتر ۰/۱ تعیین شد.

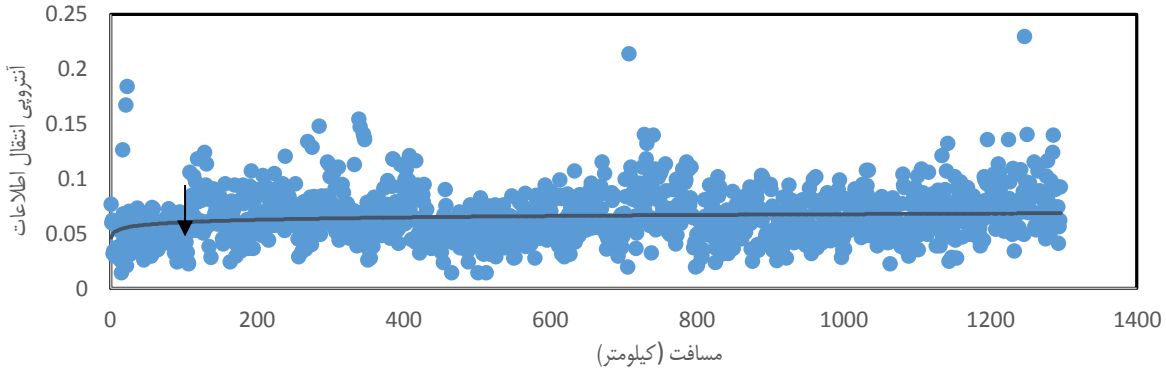
1- Exploitive

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

جدول ۲- رتبه‌بندی ایستگاه‌های حوزه آبخیز شرق دریاچه ارومیه بر اساس مقادیر شاخص‌های آنتروپی

Table 2. Ranking the stations of East Basin of Urmia Lake based on Entropy Indexes

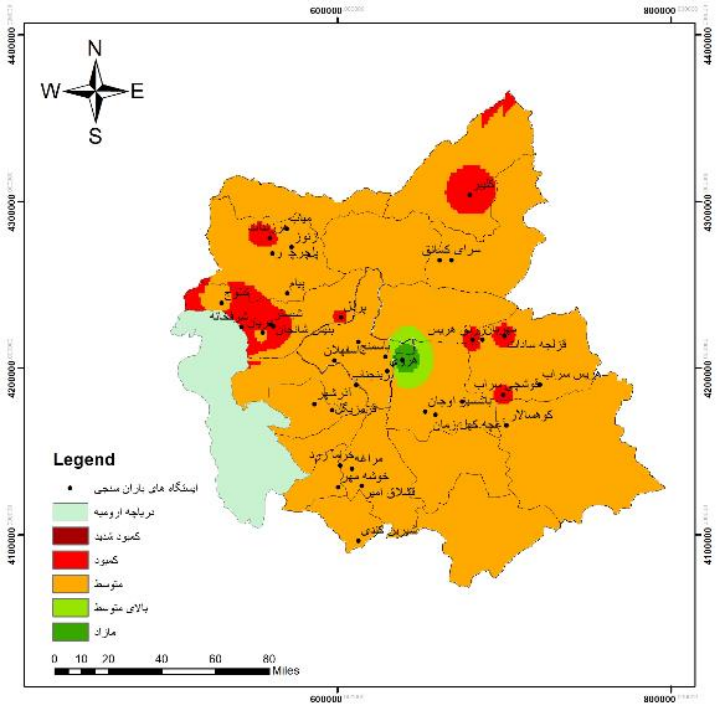
نام ایستگاه	رتبه	$ITI(i)$	رتبه	$T(X(i),Y(i))$	رتبه	$H(X(i),Y(i))$	رتبه	$H(X(i))$
آذرشهر	۱۷	۰/۴۲۳۵	۱۷	۱/۹۵۱۷	۱۶	۴/۶۰۸۱	۲	۳/۷۴۰۲
اسفهلان	۲۰	۰/۴۳۰۹	۲۰	۲/۰۰۷۷	۲۱	۴/۶۵۹۰	۱۵	۳/۷۵۳۱
آغچه کهل زمان	۳۱	۰/۴۸۸۱	۳۲	۲/۳۵۴۴	۳۳	۴/۸۲۳۱	۶	۳/۷۵۰۴
باسمنج	۱۴	۰/۴۱۳۷	۱۳	۱/۸۹۶۵	۱۲	۴/۵۸۴۰	۳۱	۳/۷۵۶۷
باشسیزاوجان	۳۵	۰/۵۲۳۷	۳۵	۲/۵۸۸۷	۳۶	۴/۹۴۳۴	۳۰	۳/۷۵۶۶
بنیس شانجان	۱۲	۰/۴۱۲۱	۱۲	۱/۸۹۴۰	۱۳	۴/۵۹۶۳	۱۳	۳/۷۵۲۶
پردل	۸	۰/۳۸۷۱	۸	۱/۷۶۰۰	۷	۴/۵۴۶۵	۲۳	۳/۷۵۴۴
پل چرچر	۱۹	۰/۴۲۸۷	۱۹	۲/۰۰۳۳	۲۳	۴/۶۷۲۹	۲۴	۳/۷۵۴۷
پیام	۲۳	۰/۴۳۷۱	۲۳	۰/۰۳۹۳	۲۲	۴/۶۶۵۱	۳۲	۳/۷۵۶۹
تبریز	۱۳	۰/۴۱۳۱	۱۴	۱/۹۱۰۰	۱۹	۴/۶۲۵۳	۳۶	۳/۷۵۸۳
تسوج	۱۰	۰/۴۰۶۵	۱۰	۱/۸۶۰۴	۱۱	۴/۵۷۵۷	۳۳	۳/۷۵۶۹
چرم خوران علیا	۲۹	۰/۴۷۳۵	۲۹	۲/۲۴۳۱	۲۹	۴/۷۳۶۸	۱۰	۳/۷۵۲۰
خرمازرد	۳۳	۰/۴۸۹۴	۳۳	۲/۳۶۷۵	۳۵	۴/۸۳۶۵	۲۲	۳/۷۵۴۳
خوشه مهر	۲۸	۰/۴۵۸۱	۲۷	۲/۱۶۱۶	۲۷	۴/۷۱۹۸	۱۴	۳/۷۵۳۱
دریان	۱۵	۰/۴۱۶۸	۱۵	۱/۹۲۵۳	۱۸	۴/۶۱۹۲	۱۸	۳/۷۵۳۹
زرنق هریس	۳	۰/۳۶۶۶	۳	۱/۶۳۶۷	۳	۴/۴۶۳۴	۱	۳/۷۳۱۳
زنوز	۱۱	۰/۴۰۷۴	۱۱	۱/۸۷۶۶	۱۵	۴/۶۰۶۱	۹	۳/۷۵۱۶
زینجناب	۲۶	۰/۴۴۹۲	۲۶	۲/۱۱۶۱	۲۶	۴/۷۱۱۱	۲۵	۳/۷۵۴۹
سرای	۲۲	۰/۴۳۴۷	۲۲	۲/۰۳۷۲	۲۵	۴/۶۸۷۰	۱۷	۳/۷۵۳۸
سعیدآباد	۳۶	۱/۴۲۸۲	۳۶	۶/۴۱۱۷	۵	۴۴/۸۹۳	۵	۳/۷۴۸۰
شبستر	۱	۰/۳۰۱۵	۱	۱/۳۰۰۶	۱	۴/۳۱۴۱	۲۰	۳/۷۵۳۹
شرفخانه	۲	۰/۳۵۵۶	۲	۱/۵۹۰۴	۴	۴/۴۷۲۴	۲۹	۳/۷۵۶۴
شیرین کندی	۳۲	۰/۴۸۸۹	۳۱	۲/۳۳۹۲	۳۱	۴/۷۸۴۲	۷	۳/۷۵۰۷
قرمزی گل	۳۰	۰/۴۸۰۰	۳۰	۲/۳۰۶۰	۳۲	۴/۸۰۳۹	۲۶	۳/۷۵۵۱
قزلچه سادات	۷	۰/۳۸۴۴	۷	۱/۷۴۸۱	۹	۴/۵۴۶۷	۱۳	۳/۷۵۲۴
قشلاق امیر	۲۴	۰/۴۴۱۵	۲۴	۲/۰۴۹۹	۲۰	۴/۶۴۳۳	۳	۳/۷۴۴۷
قوشچی سراب	۶	۰/۳۷۳۹	۴	۱/۶۶۲۶	۲	۴/۴۴۷۱	۲۸	۳/۷۵۶۳
کسانق	۲۱	۰/۴۳۴۰۰	۲۱	۲/۰۲۸۵	۲۴	۴/۶۷۳۸۸	۱۶	۳/۷۵۳۷
کلیبر	۵	۰/۳۷۲۳	۶	۱/۶۹۲۶	۸	۴/۵۴۶۶	۳۵	۳/۷۵۸۲
کوهسالار	۲۷	۰/۴۵۷۹	۲۸	۲/۱۶۹۳	۳۰	۴/۷۳۷۸	۱۱	۳/۷۵۲۰
مراغه	۳۴	۰/۴۹۳۲	۳۴	۲/۳۷۹۵	۳۳	۴/۸۲۴۳	۸	۳/۷۵۱۷
مهربان	۹	۰/۴۰۴۰	۹	۱/۸۳۸۸	۱۰	۴/۵۵۱۵	۱۹	۳/۷۵۳۹
میاب	۲۵	۰/۴۴۴۸	۲۵	۲/۱۰۰۶	۲۸	۴/۷۲۲۲	۳۴	۳/۷۵۸۰
هرزندات	۴	۰/۳۷۲۲	۵	۱/۶۷۸۵	۶	۴/۵۰۸۹	۲۱	۳/۷۵۴۰
هروی	۱۸	۰/۴۲۵۲	۱۸	۱/۹۶۰۴	۱۷	۴/۶۱۰۸	۴	۳/۷۴۷۸
هریس سراب	۱۶	۰/۴۲۲۱	۱۶	۱/۹۴۳۷	۱۴	۴/۶۰۴۲	۲۷	۳/۷۵۵۱



شکل ۲- نمودار پراکندگی آنتروپی انتقال اطلاعات متغیر بارش بر حسب فاصله

Figure 2. The Scatter diagram of variable Information transmission entropy of precipitation to distance

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]



شکل ۳- پهنه‌بندی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه بر اساس شاخص انتقال اطلاعات $ITI(i)$
Figure 3. Basin of Urmia Lake zoning based on Information Transmission Index ITI (i)

۲) مکان‌یابی صحیح ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی در بهبود تخمین بارش منطقه‌ای با حداقل هزینه اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه مدلی برای تعیین نقاط مناسب برای تأسیس ایستگاه‌های جدید در سطح حوضه‌ی آبخیز توسعه داده شده است. اهداف اصلی مدل توسعه داده شده عبارت‌اند از:

۱) بیشینه کردن حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات

$$a_{ij} = b_{ij} \times c_{ij} \quad (۱۰)$$

$$b_{ij} > \frac{r_1 - Ent_{ij}}{r_1} \quad (۱۱)$$

$$b_{ij} < \frac{r_1}{Ent_{ij}} \quad (۱۲)$$

$$c_{ij} > \frac{Errs_{ij} - r_2}{r_2} \quad (۱۳)$$

$$c_{ij} < \frac{Errs_{ij}}{r_2} \quad (۱۴)$$

$$\sum_{i=1}^{2} \alpha_i = 1 \quad (۱۵)$$

$$a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} \in [0,1] \quad (۱۶)$$

از آنجا که دامنه تغییرات آنتروپی انتقال اطلاعات و واریانس خطا متفاوت است، برای مقایسه این دو معیار از اعداد استاندارد شده استفاده می‌شود تا داده‌های واریانس خطا بین صفر و ۱ تأثیر یکسانی در ارزیابی نهایی تابع هدف داشته باشد. برای استانداردسازی این معیار از رابطه زیر استفاده می‌شود (۵):

کمینه کردن مقدار واریانس خطا

بنابراین تابع هدف پیشنهادی به‌صورت زیرتعریف شده است:

$$MinZ = a_{ij}\left\{\alpha_1 (Errs_{ij} - Errs_{max})^2 + \alpha_2 (Ent_{ij} - Ent_{max})^2\right\} \quad (۹)$$

$$Errs_{ij} = \frac{Err_{ij} - Err_{min}}{Err_{max} - Err_{min}} \quad (۱۷)$$

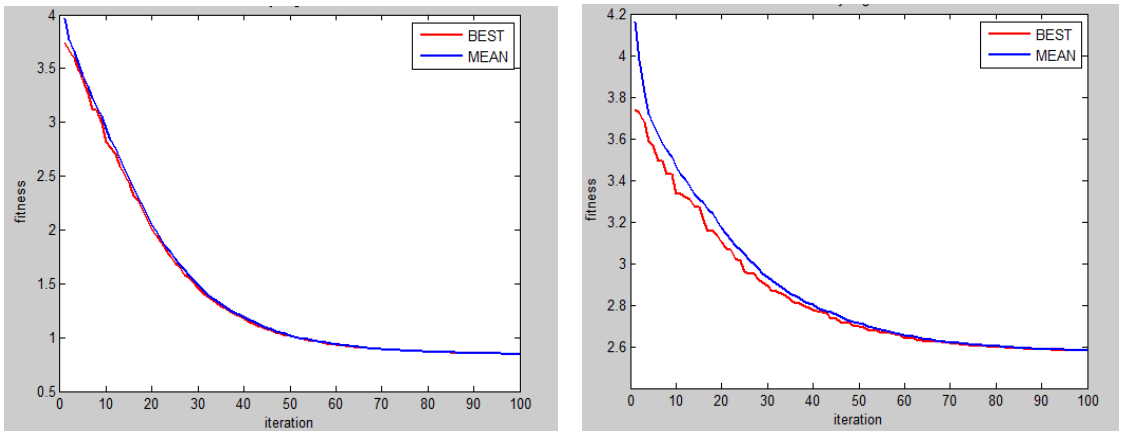
که Ent_{ij} و Err_{ij} به ترتیب مقدار واقعی آنتروپی و خطای واریانس است. $Ent_{min} = \min(Ent_{ij})$ و $Err_{max} = \max(Err_{ij})$ به ترتیب مقدار کمینه‌ی آنتروپی و بیشینه خطای واریانس است.

همچنین در تابع هدف بالا $Errs_{max} = \max(Errs_{ij})$ مقدار بیشینه‌ی استاندارد خطای واریانس برابر ۱ است. همچنین، $Ent_{min} = \min(Ent_{ij})$ مقدار کمینه‌ی آنتروپی انتقال اطلاعات برابر صفر است. r_1 مقدار آستانه برای انتخاب نقاط در محدوده آنتروپی انتقال اطلاعات و r_2 مقدار آستانه برای انتخاب نقاط در محدوده‌ی خطای واریانس است. چون برای مکان‌یابی ایستگاه‌های جدید از نقاط پتانسیل با کمینه آنتروپی انتقال اطلاعات استفاده می‌شود، بنابراین متغیر b_{ij} تعریف می‌شود که در صورت برقرار بودن شرط $Ent_{ij} < r_1$ (یعنی، نقاط پتانسیلی که مقدار آن‌ها از یک مقدار خاص آنتروپی انتقال اطلاعات کمتر است)، مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار صفر می‌گیرد. مقدار ۱ به معنی این است که شرط مسئله برقرار است و الگوریتم برای مراحل بعد بررسی

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به مقدار واریانس تخمین، نقاطی برای مکان‌یابی ایستگاه مناسب‌اند که دارای بیشینه واریانس تخمین باشند. بنابراین، متغیر c_{ij} تعریف می‌شود که در صورت برقراری شرط $Ess_{ij} > r_2$، (یعنی نقاط پتانسیلی که مقدار آنها از یک مقدار خاص واریانس خطا بالاتر باشد) مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد. متغیر a_{ij} تصمیم است که در صورت برقراری هر دو شرط $Ent_{ij} < r_1$ و $Ess_{ij} > r_2$، مقدار ۱ و در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد. a_{ij} وقتی مقدار ۱ می‌گیرد که هر کدام از متغیرهای a_{ij} و b_{ij} مقدار ۱ بگیرند، در این صورت الگوریتم اجرا می‌شود و به دنبال نقطه بهینه می‌گردد، در غیر این‌صورت مقدار صفر و الگوریتم متوقف می‌شود. α_1 و α_2 ضرایبی بین صفر و ۱ هستند که مقدار آن‌ها با توجه به اهمیت هر کدام از معیارهای تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. ضریب هر معیاری که بیشتر باشد، تأثیر آن معیار در یافتن نقطه بهینه بیشتر است. با اجرای تابع هدف بالا (رابطه ۹) نقاط با عدم قطعیت بیشتر (حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات)، همچنین با واریانس خطای بالا، نقاط پیشنهادی برای تأسیس ایستگاه‌های جدید مشخص می‌شوند. برای اجرای ساختار بهینه، ابتدا باید مقادیر r_1 و r_2 مشخص شود. در واقع این مقادیر برای مشخص کردن محدوده با آنتروپی انتقال پایین و واریانس خطای بالاست، بنابراین با توجه به خصوصیات شبکه باران‌سنجی منطقه و آزمون و خطا با مقادیر مختلف، در نهایت ۳۰ درصدکمینه‌ی آنتروپی انتقال اطلاعات، $r_1 =$ ۰/۳ و ۶۰ درصد بیشینه‌ی خطای واریانس، یعنی $r_2 =$ ۰/۶، در انتخاب موقعیت بهینه‌ی تأسیس ایستگاه جدید مدنظر قرار گرفتند. همچنین، به‌دلیل اهمیت یکسان هر دو معیار، مقادیر α_1 و α_2 برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. بر طبق نتایج به‌دست آمده مشاهده می‌شود که الگوریتم کرم شب‌تاب پیشنهادی با در نظر گرفتن هر دو برداشت حرکت، توانسته با دقت بهتری نقطه بهینه را بیابد. نتایج بدست آمده فاصله زیادی با نتایج حاصل از الگوریتم حاصل از یک نوع حرکت دارد. در این ارزیابی الگوریتم (FA) ۱۰۰ بار اجرا شده و بهترین جواب حاصل از این اجرا در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن هر دو نوع حرکت بسیار بهتر از الگوریتم کرم شب‌تاب حاصل از یک برداشت حرکت می‌باشد و خطا کاهش یافته است.

برای اجرای ساختار بهینه با توجه به خصوصیات شبکه‌ی باران‌سنجی منطقه، محدودیت‌هایی با مقادیر واریانس خطای بالا، برای انتخاب موقعیت بهینه تأسیس ایستگاه جدید مد نظر قرار گرفتند. همچنین طبق استاندارد سازمان جهانی هواشناسی، (WMO)[1] در مناطق مسطح با آب و هوای معتدل، یک ایستگاه در هر ۶۰۰ تا ۹۰۰ کیلومتر مربع لازم است. بر این مبنا و با توجه به وجود اقلیم‌های نسبتاً متفاوت در محدوده مطالعاتی، در اطراف هر یک از نقاط منتخب تأسیس ایستگاه جدید، محدوده‌ای به شعاع ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شد که در آن محدوده امکان تأسیس ایستگاه دیگری وجود نداشته است. همچنین با در نظر گرفتن فاصله بهینه بدست آمده از تئوری آنتروپی، مدل بهینه‌سازی در محیط متلب و با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب توسعه داده شد و در هر بار اجرا، یک نقطه جدید برای تأسیس ایستگاه تعیین شد. پس ازاجرای ساختار بهینه، تعداد ۹ نقطه برای تأسیس ایستگاه‌های جدید تعیین شد که درجدول (۳) مختصات آن‌ها نمایش داده شده است.



شکل ۴- نمودار نتایج حاصل از بهترین مقادیر بدست آمده از الگوریتم *FA* استاندارد (راست) و الگوریتم *FA* پیشنهادی به همراه تمام حرکت‌ها (چپ)

Figure 4. Diagram of the results obtained from the best values of standard FA algorithm (right), and the proposed FA algorithm with all the movements (left)

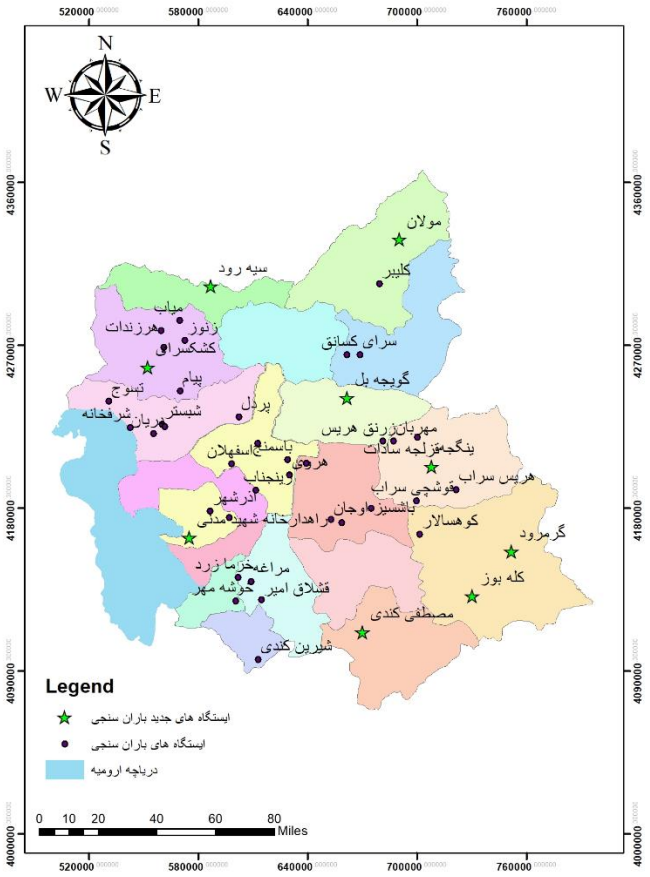
1- World Meteorological Organization

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

جدول ۳- مشخصات ایستگاه‌های جدید باران‌سنجی بدست آمده از ساختار پیشنهادی بهینه‌سازی شبکه

Table 3. Specifications of the new rain gauge stations obtained from the proposed structure of the network optimization

نام ایستگاه	مشخصات جغرافیایی			نوع ایستگاه
	طول	عرض	ارتفاع (m)	
ینگجه	۴۷°۲۲	۳۷°۵۷	۱۶۹۰	کلیماتولوژی
گویجه‌یل	۴۶°۵۱	۳۸°۱۸	۱۷۳۰	کلیماتولوژی
مولان	۴۷°۱۲	۳۹°۰۵	۹۳۵	کلیماتولوژی
سیه‌رود	۴۶°۰۰	۳۸°۵۲	۶۶۰	کلیماتولوژی
کشکسرای	۴۵°۳۶	۲۸۳۸	۱۲۴۴	کلیماتولوژی
راهدارخانه شهید مدنی	۴۵°۵۱	۳۷°۳۷	۱۳۷۰	کلیماتولوژی
مصطفی‌کندی	۴۶°۵۵	۳۷°۰۸	۱۹۹۰	کلیماتولوژی
کله‌بوز	۴۷°۳۶	۳۷°۱۸	۱۳۱۰	کلیماتولوژی
گرمرود	۴۷°۵۱	۳۷°۳۱	۱۰۹۲	کلیماتولوژی



شکل ۵- نقشه حوضه شرق دریاچه ارومیه به‌همراه ایستگاه‌های مورد مطالعه و ایستگاه‌های نیازسنجی شده

Figure 5. Map of East Basin of Urmia Lake with the studied stations and required stations

در این پژوهش از تئوری آنتروپی گسسته به‌منظور ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوزه آبخیز شرق دریاچه ارومیه استفاده شده است. نتایج ارزیابی نشان داد شش ایستگاه شبستر، شرفخانه، زرنق هریس، هرزندات، کلیبر و قوشچی‌سراب ضمن کسب رتبه‌های پایین درشبکه، وضعیتی بحرانی داشته و ادامه فعالیت آنها مستلزم تجدید نظر جدی است. از سوی دیگر ایستگاه‌های سعیدآباد، باشسیزاوجان، مراغه، خرمازرد و شیرین‌کندی بالاترین رتبه‌ها را در میان سایر ایستگاه‌ها به‌خود اختصاص داده‌اند و پنج ایستگاه مهم حوزه آبخیز مورد مطالعه می‌باشند که مفیدترین اطلاعات در شبکه را تولید می‌نمایند. این نتایج با پژوهش‌های فانی و همکاران (۴) در رابطه با ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از آنتروپی گسسته و کریمی حسینی و همکاران (۱۱) در رابطه با مکان‌یابی ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از آنتروپی مطابقت داشته است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از پهنه‌بندی مقدار شاخص آنتروپی انتقال اطلاعات $ITI(i)$ نشان داد نزدیک به ۵ درصد مساحت حوزه آبخیز فاقد ایستگاه و یا دارای کمبود شدید تبادل اطلاعات می‌باشد و به تبعیت از آن اطلاعات آب‌سنجی مناسبی نیز در این مناطق در اختیار نیست. ضروری است ایستگاه‌های تعطیل شده در این نواحی فعال شده و یا ایستگاه‌های جدید احداث گردد. همچنین ۹۳ درصد حوضه

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

دارای تبادل اطلاعات متوسط و یا بیشتر می‌باشد که با نتایج پژوهش‌های فانی و همکاران (۴) در رابطه با ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از آنتروپی گسسته، کریمی حسینی و همکاران (۱۱) در رابطه با مکان‌یابی ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از آنتروپی و فرجی سبکبار و همکاران (۵) در رابطه با توسعه بهینه شبکه باران‌سنجی با استفاده از روش کریجینگ و آنتروپی در محیط GIS در حوضه آبریز کرخه هم‌خوانی دارد.

در بخش بهینه‌سازی نیز، در ابتدا پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب مورد بررسی قرار گرفته و سعی شده با تنظیم صحیح پارامترها، نتایج حاصل از الگوریتم بهبود داده شود. از مهم‌ترین پارامترهای الگوریتم کرم شب‌تاب پارامتر آلفا و گاما می‌باشند. که در این پژوهش پارامتر آلفا مورد بررسی قرار گرفته شده است و مقدار آن با توجه به مقدار بهینه تابع اسفیر، ۰/۱ پیشنهاد شده است. به‌منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی مدلی برای تعیین نقاط مناسب برای تأسیس ایستگاه‌های جدید در سطح حوزه آبخیز توسعه داده شده است. اهداف اصلی مدل عبارتند از: بیشینه کردن حداقل آنتروپی انتقال اطلاعات و کمینه کردن مقدار واریانس خطا، در نهایت با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب مجموعه نقاط پتانسیل برای تأسیس ایستگاه جدید تعیین می‌گردد. بر طبق نتایج، الگوریتم کرم شب‌تاب پیشنهادی با در نظر گرفتن هر دو برداشت حرکت، توانسته با دقت بهتری نقطه بهینه را بیابد. با اجرای مدل پیشنهادی در حوزه آبخیز دریاچه‌ی ارومیه، تعداد ۹ ایستگاه باران‌سنجی جدید برای اضافه شدن به شبکه موقعیت‌یابی شد که مختصات ایستگاه‌های جدید در جدول ۳ قابل مشاهده است. ایستگاه‌های پیشنهادی بیشتر در مناطق مرزی و کوهستانی که تغییرات بارش زیاد است و همچنین در نقاطی که تراکم ایستگاه‌ها کم است مکان‌یابی شد.

نتایج حاصل ازاین پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از اطلاعات گسترده‌تر با دوره‌ی زمانی طولاتی‌تر در مطالعات آتی دقت مطالعات مشابه در سایر حوضه‌ها را افزایش می‌دهد. نتایج این پژوهش به نحو مؤثری در برنامه‌ریزی برای توسعه شبکه‌ی سنجش بارش و تخصیص بودجه موجود استفاده می‌شود. در نهایت پیشنهاد می‌شود با انجام پژوهش‌های همراه با بازدیدهای میدانی، نتایج به‌دست آمده از روش آنتروپی و مقدار شاخص‌های آن با واقعیت‌های فیزیکی و شرایط نصب و عملکرد ایستگاه مقایسه شود. بدین ترتیب ممکن است از برخی نتایج این روش بدون انجام بازدیدهای میدانی یا صرف هزینه‌های بیشتر به‌علت تغییرات نحوه کارکرد ایستگاه مورد نظر پی برد. بدیهی است نتایج به‌دست آمده از هر روش علمی که مبتنی بر آمار و اطلاعات ثبت شده در ایستگاه‌های پایش است همواره متأثر از کیفیت، صحت و کمیت آمار و اطلاعات یاد شده خواهد بود. از این نظر توسعه شبکه‌های پایش، ضمن ارتقای کیفیت ثبت آمار و اطلاعات آن‌ها، پیشنهاد بدیهی خواهد بود.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

منابع

1. Awadallah, A.G. 2012. Selecting optinum locations of rainfall stations using kriging and entropy. International Journal of Civil & Environmental Engineering, IJCEE-IJENS, 12(1): 7575-126301.
2. Chen, Y.C., C. Weiand and H.C. Yeh. 2008. Rainfall network design using kriging and entropy. Hydrological Processes, 22: 340-346.
3. Chiang, W., Y. Hui-Chung and C. Yen-Chang. 2014. Spatiotemporal scaling effect on rainfall network design using entropy. Entropy, 16(8): 4626-4647.
4. Fanny, M., S. Khalifeh, A. Khalifeh and M. Aflatouni. 2013. Raingauge network evaluation using the discrete entropy (case study: great karoun basin). Journal of Science and Irrigation Engineering, 38(4): 1-13 (In Persian).
5. Faraji sabokbar, H., H. Mahmoudi, S. Nazif and R. Abbaspour. 2014. Development rain gauge network optimization using kriging method and entropy in GIS, (case study: karkhe River Basin). Natural Geographical Research, 46(4): 462-445 (In Persian).
6. Hassanzadeh, T., M. Meybodi and M. Mahmoudi. 2011. An improved firefly algorithm for optimization in static environment. The Fifth Iran Data Mining Conference. Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (In Persian).
7. Hosseini Moghari, M. and A. Bani Habib. 2014. Optimize the operation of the reservoir for agricultural water supply using firefly algorithm. Journal of Soil and Water Conservation, 4: 29-17 (In Persian).
8. Jabari, A., H. Shayeghi, B. Esmaylnzhad, A. Zava and D. Najafi. 2012. Optimal location and size of wind turbines in the meshkinshahr with technical and economic factors and the feasibility of installing a discrete algorithm firefly, Iran Wind Energy Conference. 647. Tehran, Iran (In Persian).
9. Kazemzadeh, M., J. Daneshmand and M.A. Ahmadfard. 2015. Optimal remediation design of unconfined contaminated aquifers based on the finite element method and a modified firefly algorithm. Water Resources Management, 29(8): 2895-2912.
10. Karimi Hosseini, A. 2009. Evaluation and comparison of rain gauge stations in GIS. Msc thesis. Tehran University, Iran, 105 pp (In Persian).
11. Karimi-Hosseini, A., O. Bozorg Haddad and M.A. Mariño. 2011. Site selection of raingauges using entropy methodologies. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 164(7): 321-333.
12. Karimi-Googhari, Sh. and S. Khalifeh. 2013. Hydrometric network evaluation for bakhtegan-maharlu watershed using the discrete entropy. Journal of Watershed Management Research. 2(3): 34-50 (In Persian).
13. Kisi, O., J. Shiri, S. Karimi, S.H. Shamshirband, S.H. Motamedi, D. Petkovic and R. Hashim. 2015. A survey of water level fluctuation predicting in Urmia Lake using support vector machine with firefly algorithm. Applied Mathematics and Computation, 270: 731-743 (In Persian).
14. Markkus, M., H.V. Knapp and G.D. Tasker. 2003. Entropy and generalized least square methods in assessment of the regional value of stream gages. Hydrology, 283: 107-121.
15. Moshtaghi-Yazdani, N. and D. Shariatpanahi. 2012. Firefly improve the performance of algorithms using automata receiver, The Ninth International Conference on Industrial Engineering, Tehran, Iran (In Persian).
16. Mahjouri-majd, N. and R. Kerachian. 2009. Performance assessment of river quality monitoring systems using discrete entropy theory (River Jajrud), Environmental Engineering Conference, Iran, Tehran (In Persian).
17. Masoumi, F. and R. Kerachian. 2007. Optimal groundwater monitoring network design using the entropy theory, National Conference of Water Resources, Esfehan, Iran (In Persian).
18. Mishra, A.K. and P. Coulibaly. 2010. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. Hydrology, 380: 420-437.
19. Mogeir, Y. and V.P. Singh. 2002. Application of information theory to groundwater quality monitoring networks. Water Resources Management, 16: 37-79.
20. Mogheir, Y., J.L. Lima and V.P. Singh. 2004. Characterizing the special variability of groundwater quality using the entropy theory. Hydrological Process, 18: 2165-2179.
21. Sarlak, N. and A. Sorman. 2006. Evaluation and selection of streamflow network stations using entropy methods. Turkish Journal of Engineering Environment, 30: 91-100.
22. Shannon, C.E. 1948. A Mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 27: 379-423.
23. Wei, C., H.C. Yeh and Y.C. Chen. 2014. Spatiotemporal scaling effect on rainfall network design using entropy. Entropy, 16: 4626-4647.
24. Yang. X.S. 2008. Firefly Algorithm for Multimodel Optimization, In: Stochastic Algorithms: Foundations and Applications, SAGA, Lecture notes in Computer Science.
25. Yang, X.S. and X. He. 2013. Firefly algorithm: recent advances and applications. International Journal of Swarm Intelligence, 1(1): 36-50.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]

[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]

Rainfall Network Optimization using Information Entropy and Fire Fly Algorithm Case Study: East Basin of Urmia Lake

Elmira Valipoor[1], Mohammad Ali Ghorbani[2] and Esmail Asadi[3]

1- M.Sc. Student Tabriz University, (Coressponding Author: elmira.valipoor@yahoo.com)
2 and 3- Associate Professore and Assistant Professor, Tabriz University
Received: November 23, 2017 Accepted: May 15, 2018

Abstract

The first step of the implementation of water projects is recognizing the characteristics of rainfall and awareness of the weather and climate of the region. Because of the spatial and time variations of rainfall, it requires much denser network to supervise compared to the other meteorological factors. Therefore, optimal localization of the stations is very necessary. Accordingly, monthly rainfall data of rain gauge stations were collected at the basin and adjacent areas first. The primary rain gauge network was created by considering the period with the largest number of the stations, the most statistical years, and the lowest rebuilding ratio. Then all of time series data were analyzed by statistical analysis including normal and homogeneous tests and stations with errors and non-homogeneous statistics were removed or modified from the total stations. According to the results of normal tests, annual rainfall in 5 stations, due to their smaller amount of tests' values toward their critical value, does not follow normal distribution. Also, the results of homogeneous tests indicated that 91.7% of selected stations in the basin were confirmed in term of the accuracy of the recorded rainfall data and could be used in hydrological analysis or water resources after this. With the spatial analysis of the precipitation entropy, the amount of information transmission entropy was calculated in the basin area and was considered as a criterion in determining the points with the potential of establishing a new station. The results indicate that the six stations of Shabestar, Sharafkhaneh, Zarnagh-Heris, Harzandat, Kalibar and Ghoshchi-sarab, while having low ranks in the network, are in critical condition and are the weakest stations in the basin. On the other hand, the stations of Saeedabad, Bashsizovjan, Maragheh, Khormazard and Shirin Kandy have the highest rank among other stations, and are five important studied stations in the basin that produce the most useful information in the network. In order to perform the optimization process, an objective function for the whole basin was determined and then the Firefly algorithm was used to obtain the best localization for rain gauge stations. The best localization is obtained by adding 9 stations after checking the results.

Keywords: Firefly Algorithm, Information Transmission Entropy, Optimization, Rain Gauge, Location

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.21.4.8]
[DOI: 10.52547/jwmr.11.21.11]