پژوهش‌های آبخیزداری

دوره‌ی۳۴، شماره‌ی ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۳۲، پاییز ۱۴۰۰، صفحه‌های ۱۸-۲
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2021.352857.1380

مقاله‌ی پژوهشی

CC BY

ارزیابی کمی تراکم ایستگاه‌های آب‌سنجی استان کرمانشاه با روش آنتروپی و پهنه‌بندی در جی‌آی‌اس

محمد جوهری‌پور
کارشناس‌ارشد مدیریت منابع آب
علی بافکار
(نویسنده‌ی مسئول)* استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی
مریم حافظ‌پرست‌مودت
استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده‌ی علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول : alibafkar@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۲۳ آذر ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۲۵ اسفند ۱۳۹۹

چکیده

ارزیابی کارآیی سامانه‌های پایش منابع آب و تلاش برای بهبود وضعیت مؤلفه‌های مختلف این سامانه‌ها مانند اصلاح فراوانی نمونه‌برداری متغیرهای کمی و مکان‌یابی دوباره‌ی ایستگاه‌ها اهمیت ویژه‌یی دارد. دلیل اصلی اهمیت این موضوع هزینه‌ی زیاد ماهانه‌ی این سامانه‌ها است، به‌طوری که کاهش اطلاعات اضافی در این سامانه‌ها ممکن است بی آن که اندازه و دقت اطلاعات حاصل را کاهش دهد تأثیر زیادی بر کاهش هزینه‌های سامانه داشته‌باشد. از طرف دیگر اگر تعداد ایستگاه‌ها بهینه نباشد ممکن است داده‌های جاهای حساس نیز برداشته نشود. در این پژوهش برای ارزیابی کمی شبکه‌ی ایستگاه‌های آب‌سنجی استان کرمانشاه و بررسی دقت اطلاعات ایستگاه‌ها و تراکم آن‌ها نظریه‌ی آنتروپی گسسته به‌کاربرده شد. چهارده ایستگاه با دوره‌ی آماری مشترک ۳۰ ساله بررسی شد. نتایج این ارزیابی نشان داد که ۳ ایستگاه بحرانی دوآب-مرگ، شاه‌گذر و حیدرآباد در شبکه است که لازم است در آن‌ها بازنگری شود. از سوی دیگر ایستگاه‌های پل‌چهر و پیرسلمان و قورباغستان بیش‌ترین رتبه‌ها را گرفت و سه ایستگاه مهم حوزه شناخته شد که باید در شبکه فعال بماند. ایستگاه دوآب‌مرگ بدترین وضعیت را در شبکه‌ی پایش دارد و ضروری است که وضعیت آن به‌دقت بررسی و بازنگری شود. اندازه‌ی شاخص‌های$S(i)$ و $R(i)$ در بیش‌تر ایستگاه‌ها تقریباً یکسان بود، یعنی هر ایستگاه تقریباً به‌همان اندازه که اطلاعات به ایستگاه‌های دیگر می‌فرستد، سعی در گرفتن اطلاعات از ایستگاه‌های دیگر دارد.

واژگان کلیدی: ارزیابی، شبکه‌ی ایستگاه‌های آب‌سنجی، نظریه‌ی آنتروپی

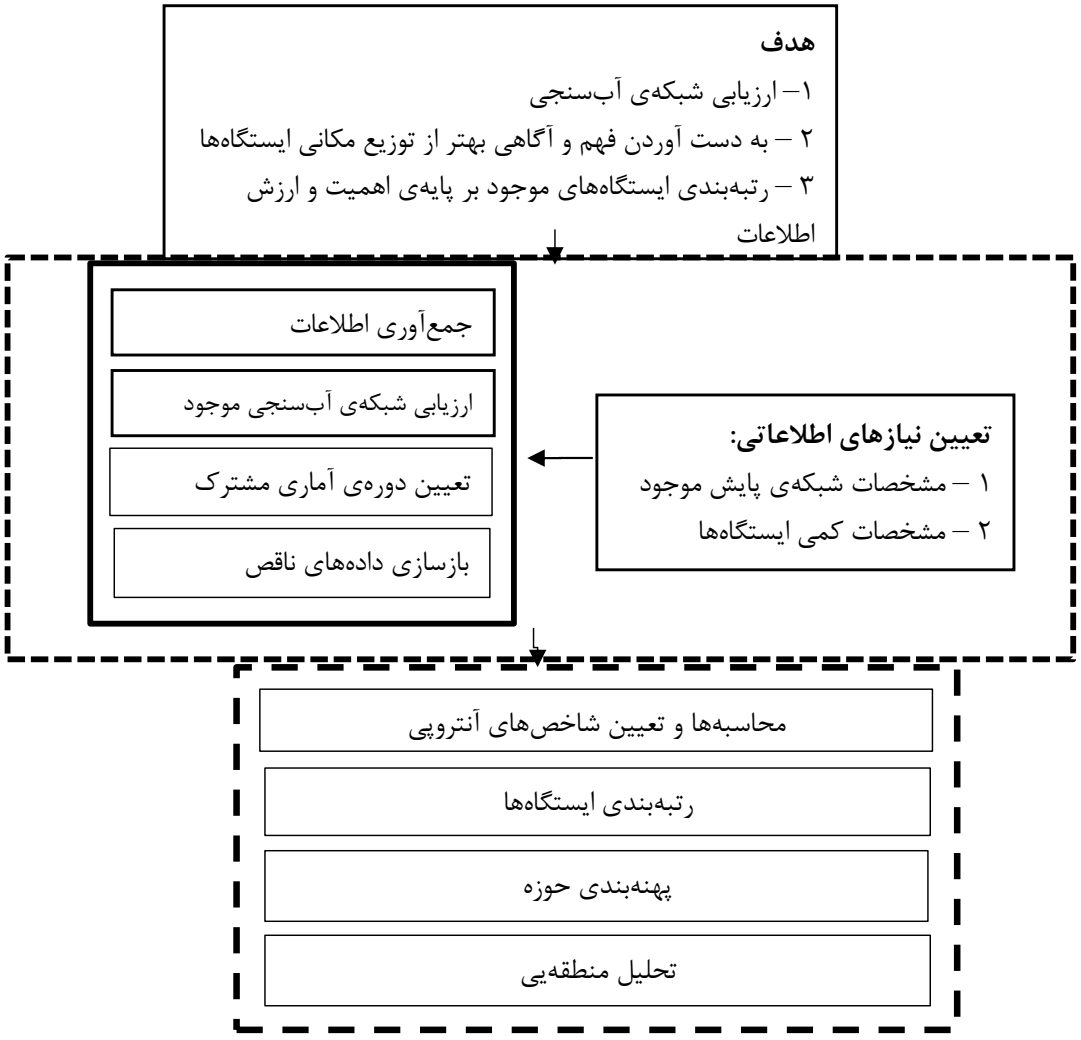
مقدمه

وجود شبکه‌یی بهینه و کارآمد از ایستگاه‌های آب‌سنجی و پایش و ارزیابی آن ضمن آن‌که ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است، راه‌گشای بسیاری از دشواری‌های منطقه‌های زیر پوشش نیز هست (میشرا و کالیبالی ۲۰۱۰). بسیاری از سامانه‌های مهندسی ازجمله سامانه‌های زیست‌محیطی و آبی ذاتاً پیچیده است، و درک جزئیات این سامانه‌ها محدود است. بسیاری از این سامانه‌ها یا کاملاً اتفاقی اند یا قسمتی از آن اتفاقی و قسمتی قطعی است. نظریه‌ی آنتروپی ازجمله روش‌هایی است که توانایی توصیف رفتار ناقطعی سامانه‌های پیچیده را دارد (موغیر و همکاران ۲۰۰۲، ۲۰۰۳، ۲۰۰۴). اهمیت روش آنتروپی در حل این مسئله را شانون و وی‌ور (۱۹۴۸) مطرح کردند، و اخیراً در بسیاری از زمینه‌های علمی مانند مدیریت منابع آب برای اندازه‌گیری اندازه‌ی انتقال اطلاعات بین فرایندهای آب‌شناسی و ارزیابی سامانه‌های جمع‌آوری داده‌ها به کار گرفته شده است.

هرمانجگلو و آل‌پسلن (۱۹۹۲) نظریه‌ی آنتروپی را برای طراحی شبکه‌ی پایش کیفی آب به‌کار بردند. پژوهش‌های ایشان نشان‌دهنده‌ی توانایی‌های فراوان نظریه‌ی آنتروپی در طراحی شبکه‌ی پایش کیفی است. با نظریه‌ی آنتروپی اطلاعات به‌دست‌آمده به‌شکل کمی بازگو شد (آزکول و همکاران ۲۰۰۰). موگیر و سینگ (۲۰۰۳) و موگیر و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که از میان چهار نوع آنتروپی (مرزی، مشترک، شرطی و انتقال اطلاعات)، آنتروپی انتقال اطلاعات بهترین و مناسب‌ترین روش برای بررسی سامانه‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی است. آن‌ها با نقشه‌های خط‌های هم‌مقدار آنتروپی مرزی، روشی برای ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی دادند. کارآموز و همکاران (۲۰۰۵، ۲۰۰۹) اطلاعات انتقالی را برای انتخاب بهترین ایستگاه‌های پایش از مجموعه‌یی از منطقه‌ها با توان پایش در طول رودخانه‌ی کارون به‌کار بردند. برای هر ایستگاه جدید با توان پایش، مجموعه‌ی زمانی داده‌های کیفیت آب با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی کیفی تولید شد، و ضمن به‌کارگیری روش آنتروپی پیوسته در ارزیابی سامانه‌های پایش رودخانه‌ها، با تلفیق روش آنتروپی و یک نرم‌افزار شبیه‌سازی کیفی، موقعیت ایستگاه‌های جدید برای بهبود عمل‌کرد سامانه‌ی پایش پیشنهاد شد. مهم‌تر از سنجه‌ی کیفی، بررسی ایستگاه‌های آب‌سنجی از دید اطلاعات کمی بود. سرلک و همکاران (۲۰۰۶) با نظریه‌ی آنتروپی ایستگاه‌های شبکه‌ی آب‌سنجی را ارزیابی و انتخاب کردند. آن‌ها اثر نوع‌های توزیعهای بهنجار، لوگ بهنجار و گاما را بر نتیجه‌ی رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که نوع توزیع درنظر گرفته‌شده برای داده‌های آب‌دهی در نظریه‌ی پیوسته اهمیت دارد و موجب به‌دست آمدن اندازه‌های متفاوتی در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها می‌شود. میشرا و کولیبالی (۲۰۱۰) با نظریه‌ی آنتروپی گسسته شبکه‌های آب‌سنجی حوزه‌های کانادا را ارزیابی کردند. آن‌ها با اندازه‌های شاخص انتقال اطلاعات، ایستگاه‌های آب‌سنجی را در حوزه‌های کانادا ارزیابی، رتبه‌بندی و پهنه‌بندی، و درجه‌ی اهمیت منطقه‌ها را از این نظر تعیین کردند. نتیجه‌ها کارآیی شبکه‌های پایش سراسر کانادا را بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌است که در بیش‌تر شبکه‌های پایش کانادا کم‌بود تعداد ایستگاه آب‌سنجی هست، و لازم است در آن‌ها بازنگری شود. چائو و ویجی (۲۰۱۲) با نظریه‌ی آنتروپی و با شاخص‌های بیش‌ترین اطلاعات و کم‌ترین تکرار اطلاعات، ایستگاه‌های آب‌سنجی رودخانه‌ی پرازوس را ارزیابی و رتبه‌بندی، و ایستگاه‌های با تکرار اطلاعات و انتقال اطلاعات کم را شناسایی‌کردند. ویویکاناندان (۲۰۱۲) با نظریه‌ی آنتروپی پیوسته و توزیع‌های بهنجار و لوگ بهنجار شبکه‌ی آب‌سنجی رودخانه‌ی کریشنا در عرض‌های جنوبی هند را ارزیابی، و با محاسبه‌ی شاخص‌های آنتروپی مرزی و آنتروپی شرطی، ایستگاه‌های آب‌سنجی این حوزه را رتبه بندی کرد، و ایستگاه‌های با بیش‌ترین انتقال اطلاعات و کم‌ترین تکرار اطلاعات را ایستگاه‌های برتر، و ایستگاه‌های با اطلاعات تکراری را ایستگاه‌های زائد دانست. کریمی گوغری و خلیفه (۲۰۱۱) با شاخص‌های کل اطلاعات فرستاده از ایستگاه، کل اطلاعات دریافته‌ی ایستگاه، و کل اطلاعات خالص ایستگاه شبکه‌ی آب‌سنجی را ارزیابی، و ایستگاه‌های حوزه را بر اساس این شاخص‌ها رتبه‌بندی کردند، و ایستگاه‌هایی را که در وضعیت بحرانی بود و امکان حذف آن‌ها بود مشخص کردند. ویویکاناندان (۲۰۱۴) با روش آنتروپی و توزیع‌های بهنجار و لوگ بهنجار شبکه‌ی ایستگاه‌های آب‌سنجی حوزه‌یی در غرب ماهاراشترا را ارزیابی، و برای امتیازدهی ایستگاه‌ها شاخص‌های آنتروپی مرزی و شرطی را با نرم‌افزار فشرده‌ساز اطلاعات محاسبه کرد، و با درنظر گرفتن توزیع‌های بهنجار و لوگ بهنجار ایستگاه‌هایی را که اطلاعات نالازم می‌داد حذف کرد.

ورستاک و کولیبالی (۲۰۱۷) دریافتند که با تلاش زیادی که برای به‌کاربردن این روش می‌شود، هنوز شبکه‌های بهینه‌ی پایش آب کم‌یاب است. به‌خصوص در این زمینه کانادا بهینه‌سازی چند هدفی آنتروپی دوگانه (DEMO) از نظریه‌ی اطلاعات را برای شناسایی مکان‌هایی که ایستگاه آب‌سنجی در آن هست توسعه داده‌است. این پژوهش به بررسی ابزار تجزیه و تحلیل (IT) که می‌تواند به‌شکل کمی سهم هر ایستگاه را اندازه بگیرد می‌پردازد. اطلاعات منحصربه‌فرد از ایستگاه آب‌سنجی با بهره‌گیری مشترک، اندازه‌گیری عینی از بهره‌وری شبکه ایجاد می کند، و به کاربر اجازه می‌دهد که توصیه‌هایی برای بهبود شبکه‌های آب‌سنجی موجود انجام دهد. این سامانه در حوزه‌ی رودخانه‌ی اتاوا، که منطقه‌یی بزرگ در آبخیز کانادا با تعدادی سد برق‌آبی تنظیم شده‌است به‌کارگرفته‌شد. کیوم و همکاران (۲۰۱۷) دریافتند که به‌طور کلی فرآیندی بمعیار برای طراحی نظارت بر آب شبکه‌ها، به‌استثنای سازمان جهانی هواشناسی، در دست نیست. نظریه‌ی اطلاعات

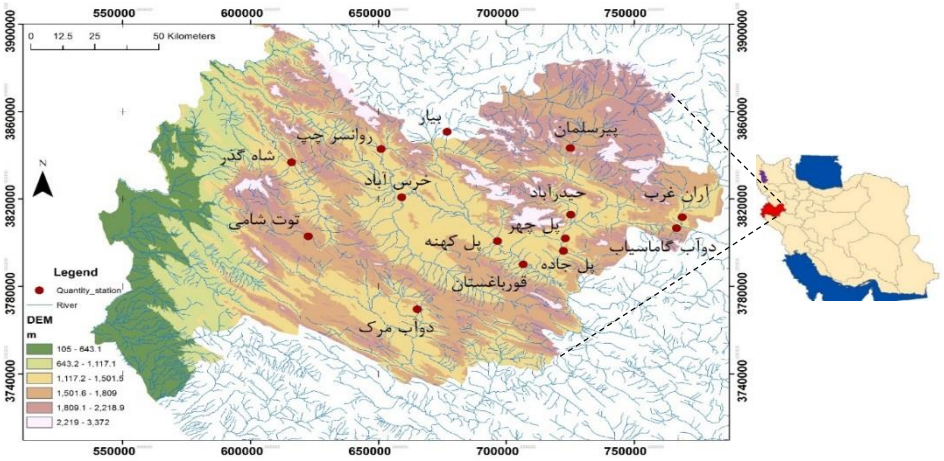
در مورد کم ترین تراکم شبکه از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی شبکه‌های آب‌سنجی بهینه برای ایجاد هدف‌های طراحی است. با دادن معیارهای محتوای اطلاعات، دشواری‌های طراحی شبکه پذیرفته شد. اصطلاح آنتروپی در طراحی شبکه‌ی نظارت بر آب به بارندگی، جریان و سطح آب، کیفیت آب، و خاک شبکه‌های رطوبت و آب‌های زیرزمینی طبقه‌بندی می‌شود. روش طراحی یکپارچه برای نظارت بر شبکه‌های چندمتغیره نیز پوشش داده می‌شود. با وجود چندین مسئله، نظریه‌ی آنتروپی برای نظارت بر طراحی شبکه‌ی آب مناسب است. با این حال، کار بیش‌تری برای تهیه‌ی معیارهای طراحی و دستورکارهای کاربردی لازم است. هونگ جون و همکاران (۲۰۱۹) با نگاه به‌تغییر شکل آنتروپی (تابع هدف ۱) و اهمیت هر ایستگاه سنجش جریان (تابع هدف ۲) یک شبکه‌ی جریان‌سنج ساختند. نتیجه‌ی تجزیه‌وتحلیل روان‌آب بارندگی، نمودار آبی واحد بازتاب اتصال جریان استخراج، و به نظریه‌ی آنتروپی اضافه‌شد. اهمیت هر ایستگاه سنجش جریان بر پایه‌ی هدف‌های آن مانند مهار سیل، به‌کارگیری آب و محیط محاسبه شد. هنگامی که این روش در حوزه‌ی سد نامگانگ اجرا شد، مشخص کرد که به هشت ایستگاه از ۱۲ ایستگاه جریان‌سنج نیاز است. ترکیبی از ایستگاه‌های انتخاب‌شده، بازتاب آنتروپی و اهمیت هر ایستگاه است. بر پایه‌ی محدودیت موجود در پیروی‌نکردن اطلاعات آب‌سنجی از توزیع بهنجار یا لوگ بهنجار، توانایی نظریه‌ی آنتروپی گسسته در تعیین ارزش منطقه‌یی ایستگاه‌های موجود در شبکه‌ی آب‌سنجی استان کرمانشاه ارزیابی شد. ایستگاه‌ها با شاخص‌های آنتروپی رتبه‌بندی، و آب‌خیز با شاخص انتقال اطلاعات پهنه‌بندی کرده‌شد. تراکم ایستگاه‌های آب‌سنجی شبکه‌ی پایش ارزیابی، و ارتباط بین شاخص‌های آنتروپی و ضریب هم‌بستگی اطلاعات بررسی شد. محدودیت توزیع آماری موجود برطرف شد، و شبکه‌ی ایستگاه‌های آب‌سنجی با داده‌های ۳۰ ساله‌ی مشترک در ۱۴ ایستگاه پایش شد.



شکل ۱- ارزیابی شبکه‌ی ایستگاه‌های آب‌سنجی استان کرمانشاه.

مواد و روش‌ها

استان کرمانشاه در غرب ایران در دو آبخیز بزرگ کرخه و سیروان واقع است. آبخیز کرخه‌ی علیا (آبخیز داخلی) از ۱۵ زیرحوزه‌ی اصلی تشکیل می‌شود، که در مرکز و شمال استان گسترده است، و به رودخانه‌ی سیمره می‌ریزد. آبخیز سیروان (آبخیز خارجی) با ۱۹ زیرحوزه‌ی اصلی در شمال و غرب گسترده‌است و آب رودخانه‌های آن به عراق می‌ریزد. شکل ۲ محدوده‌ی ایستگاه‌های اندازه‌گیری کمی آب‌دهی، و شبکه‌ی آب‌راه در حوزه‌های استان کرمانشاه را نشان می‌دهد.



شکل۲- محدوده‌ی بررسی ایستگاه‌های کمی

جدول ۱ مشخصه‌های ایستگاه‌های آب‌سنجی بررسی‌شده، در بخش کمی در سامانه‌ی مختصات UTM را که در این پژوهش به‌کار رفته است نشان می‌دهد. سنجه‌ی آب‌دهی در همه‌ی ایستگاه‌ها برای دوره‌ی مشترک ۳۰ ساله ۱۳۸۹-۱۳۶۰ بررسی شد.

جدول۱- ویژگی‌های کمی ایستگاه‌های بررسی‌شده.

شناسه‌ی ایستگاه	رودخانه	ارتفاع	ایستگاه	y	x
۲۱-۳۹۷	نهرچپ		روانسر چپ	۳۸۴۲۸۶۲	۶۵۱۰۸۹/۸
۲۱-۰۵۳	زمکان	۱۱۰۰	شاه گذر	۳۸۳۶۸۰۸	۶۱۶۰۵۵/۶
۲۱-۱۴۱	قره‌سو	۱۲۶۰	پل‌کهنه	۳۸۰۰۷۲۴	۶۹۶۶۷۱/۲
۲۱-۳۷۹	کمیش	۱۲۷۵	پل‌جاده‌کمیش	۳۷۹۶۲۱۶	۷۲۲۴۵۴/۶
۲۱-۱۳۱	آب‌مرک	۱۳۲۰	خرس‌آباد	۳۸۲۰۸۰۹	۶۵۹۱۰۲/۷
۲۱-۱۳۳	قره‌سو	۱۲۹۰	دوآب‌مرگ	۳۷۶۹۵۴۶	۶۶۵۲۰۸/۸
۲۱-۱۱۳	خرم‌رود	۱۴۴۰	آران‌غرب	۳۸۱۱۶۲۴	۷۶۸۹۵۳/۹
۲۱-۳۸۹	دینه ور	۱۲۹۰	حیدرآباد	۳۸۱۲۸۴۱	۷۲۵۳۵۳/۸
۲۱-۰۵۱	زمکان	۱۵۵۰	توتشامی	۳۸۰۲۹۷۰	۶۲۲۵۶۰/۴
۲۱-۱۳۷	رازآور	۱۵۰۰	بیار	۳۸۵۰۷۱۹	۶۷۶۸۹۵/۴
۲۱-۳۸۳	جامیشان	۱۵۳۰	پیرسلمان	۳۸۴۳۲۶۷	۷۲۵۲۰۰
۲۱-۱۲۷	گاماسیاب	۱۲۸۰	پل‌چهر	۳۸۰۲۰۳۰	۷۲۳۲۱۱/۳
۲۱-۱۱۵	گاماسیاب	۱۴۱۰	دوآب‌گاماسیاب	۳۸۰۶۶۲۴	۷۶۶۶۹۴/۲
۲۱-۱۴۳	قره‌سو	۱۲۳۰	قورباغستان	۳۷۹۰۰۹۱	۷۰۶۷۲۵/۴

اطلاعات وقتی به‌دست می‌آید که در باره‌ی روی‌دادی بی‌قطعیت است (شانون ۱۹۴۸). درنتیجه، هنگام روی‌دادهای با احتمال زیاد، اطلاعات کم‌تری در اختیار می‌گذارند، و بالعکس. کاهش‌دادن بی‌قطعیتی به این معنا است که اطلاعات به‌دست آمده است. ارزش این اطلاعات دقیقاً برابر با مقداری است که از بی‌قطعیتی کاسته شده است؛ بنابراین بی‌قطعیتی و اطلاعات دو سنجه‌ی وابسته به

هم است (آلفانسو و همکاران ۲۰۱۳). نظریه‌ی آنتروپی به دو شکل گسسته و پیوسته تعریف شده است، و به‌کار برده می‌شود. در آنتروپی پیوسته فرض بر این است که توزیع احتمال متغیرها بهنجار یا لوگ بهنجار است، ولی در حالت گسسته باتوجه به بازه‌ی تغییر اندازه‌های متغیرها، اطلاعات موجود گسسته–سازی و جدول توزیع متغیرها تهیه می‌شود. با آن جدول‌ها اندازه‌های احتمال رخداد در هر حالت محاسبه می‌شود. آنتروپی پیوسته و گسسته به چهار آنتروپی مرزی، مشترک، شرطی و انتقال اطلاعات تقسیم می‌شود (موگیر و سینگ ۲۰۰۳).

آنتروپی مرزی:

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

آنتروپی مشترک:

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

آنتروپی شرطی:

$$H(x \mid y))=-\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=i}^{\infty} p(x_{i,y_j}) \ln p(x_{i \mid} y_j) \quad (۳)$$

آنتروپی انتقال اطلاعات:

$$T(X,y)=-\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=i}^{\infty} p(x_{i,y_j}) \ln[\frac{p(x_{i,y_j})}{p(x_i)p(y_j)}] \quad (۴)$$

$P(x)$ احتمال روی دادن x، $P(x,y)$ احتمال روی دادن مشترک x و y، و $P(x) \mid y$ احتمال رخ دادن x به‌شرط y است.

اگرچه $T(x,y)$ شاخصی برای تعیین انتقال اطلاعات دانسته می‌شود، اما موگیر و سینگ (۲۰۰۴) شاخص‌های جدیدی را برای بهنجارکردن آنتروپی انتقال اطلاعات[1] معرفی کردند و آن را شاخص انتقال اطلاعات نامیدند.

در این پژوهش علاوه بر شاخص‌های معرفی‌شده در آنتروپی گسسته، ۳ شاخص دیگر به‌کار برده شد (مارکوز و همکاران ۲۰۰۳). یک تبدیل کسری آنتروپی x با $R(x,y)$ که یک کاهش بی‌قطعیتی از x اگر y معلوم باشد یا اطلاعات دریافته‌ی x از y با رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود.

$$R(x, y)=\frac{T(X,Y)}{H(X)} \quad (۵)$$

اطلاعات فرستاده از x به y نیز با رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود.

$$S(x, y)=\frac{T(x,y)}{H(Y)} \quad (۶)$$

معادله‌های بالا رابطه‌های میان دو متغیر x و y را توصیف می‌کند. با برهان یکسان می‌توان در شبکه‌ی آب‌سنجی و برای بررسی اطلاعات دریافته و فرستاده‌ی ایستگاه i ام آن‌ها را به‌شکل رابطه‌ی ۷ تعریف کرد.

$$R(i)=R(x(i), \hat{x}(i)) \quad (۷)$$

$x(i)$ بیان‌کننده‌ی داده‌های ایستگاه i ام و $x(\hat{i})$ با رابطه‌ی وایازی چندگانه‌ی خطی ۸ به‌دست می‌آید.

$$\hat{x}(i)=a(i) + \sum_{j=1}^{I-1} y_{j(i)\times b_{j(i)}} \quad (۸)$$

$y(i)$ چهارچوب داده‌ها از همه‌ی ایستگاه‌های دیگر، $a(i)$ و $b(i)$ سنجه‌های وایازی بین ایستگاه i ام و همه‌ی ایستگاه‌های دیگر با فرض برقراری رابطه‌ی خطی یا نزدیک به خطی است (رابطه‌ی ۹).

$$S(i)=S(x(i),\hat{x}(i)) \quad (۹)$$

برای تعیین‌کردن ایستگاه‌ها با بیش‌ترین مقدار $R(i)$ و $S(i)$ روش جدید آنتروپی به‌کار برده‌شد. برای نمونه ایستگاه i ام اطلاعات زیادی دریافت می‌کند، اگر $R(i)$ ارتباط بیش‌تری با ایستگاه‌های دیگر داشته باشد. از سوی دیگر اگر ایستگاه‌های دیگر اطلاعات بیش‌تری بفرستند $S(i)$ بیش‌تری به‌دست می‌آید، که با ارزش‌تر بوده است، و فعال می‌مانند.

سنجه‌ی $N(i)$ برای بیان اطلاعات تبادلی خالص با رابطه‌ی ۱۰ تعریف می‌شود.

$$N(i) = S(i) – R(i) \quad (۱۰)$$

بر اساس این شاخص ارزش هر ایستگاه با مقدار $N(i)$ سنجیده می‌شود، به‌گونه‌یی که ارزش ایستگاه‌های دارنده‌ی اندازه‌های مثبت $N(i)$ بیش‌تر است، و با احتمال بیش‌تری در شبکه حفظ خواهند شد. این شاخص‌ها برحسب بیت[2] محاسبه کرده‌می‌شود. به همین دلیل در رابطه‌ها و معادله‌ها به‌جای لگاریتم طبیعی لگاریتم مبنای ۲ به‌کار برده‌شد.

دوره‌ی آماری مشترک، بازسازی داده‌ها، برقراری رابطه‌ی وایازی خطی، تفاضل‌ها و نسبت‌ها و شاخص‌های آنتروپی تعیین شد. برای محاسبه‌ی شاخص‌های آنتروپی، جدول توزیع فراوانی مشاهده‌ی متغیرها تهیه شد. اندازه‌های آب‌دهی ایستگاه i ام $x(i)$ نسبت به اندازه‌های آب‌دهی ایستگاه‌های دیگر $\hat{x}(i)$ طبقه‌بندی، و فراوانی در هر حالت محاسبه شد. اندازه‌های $\hat{x}(i)$ با رابطه‌ی چندگانه‌ی خطی بین اندازه‌های ایستگاه i ام و سایر ایستگاه‌ها با رابطه‌ی ۱۱ محاسبه شد.

$$\hat{x}(i)=a(i)+\sum_{j=1}^{I-1} y_j(i) \times b_j(i) \quad (۱۱)$$

1- Information Transfer Index (ITI)
2- bit

a(i) b(i)، سنجه‌های رابطه میان ایستگاه i ام و سایر ایستگاه‌ها است.

در بسیاری از موارد، تعداد بازه‌ها دلخواه انتخاب می‌شود. در این حالت معمولاً تعداد طبقه‌ها کم‌تر از ۵ و بیش‌تر از ۲۰ نیست. دلیل این انتخاب آن است که اگر تعداد طبقه‌ها کم‌تر از ۵ باشد، داده‌ها اطلاعات خود را از دست خواهند داد. اگر تعداد طبقه‌ها بیش‌تر از ۲۰ باشد نیز محاسبه‌ها طولانی و وقت‌گیر خواهد شد (بازرگان لاری، ۱۳۷۸). در هر حال این روش کاملاً سلیقه‌یی است. به همین دلیل و برای بررسی اثر طبقه‌بندیهای مختلف در اندازه‌های شاخص‌های آنتروپی و پهنه‌بندی این شاخص‌ها در حوزه، بر اساس شاخص انتقال اطلاعات ITI(i)، سه حالت طبقه بندی در نظر گرفته‌شد. برای طبقه‌بندی داده‌های پیوسته، تعداد دسته‌ها از رابطه‌های تجربی یول $K=۲.۵\times n^{(۱/۲)}$ یا از رابطه‌ی استورجس $k=۱+۳.۳\log(n)$ یا از رابطه‌ی تقریبی $n=۲^k$ تعیین می‌شود $k=(\ln(n))/(\ln(۲))$ است. در این رابطه‌ها n تعداد مشاهده‌ها یا داده‌ها، و k تعداد دسته‌ها است. از آن‌جا که دوره‌ی بررسی در این پژوهش ۳۰ سال بود، تعداد طبقه‌ها به‌ترتیب از روش اول ۱۴ طبقه، از روش دوم ۶ طبقه، و از روش سوم ۵ طبقه برآورد کرده‌شد.

پس از طبقه‌بندی داده‌ها برای محاسبه‌ی شاخص‌های آنتروپی مشترک، آنتروپی شرطی و آنتروپی انتقال اطلاعات با رابطه‌های مربوط، ابتدا جدول‌های دوطرفه (توافقی) برای اندازه‌های داده‌های اصلی و تخمینی هر ایستگاه با نرم‌افزار R۳.۳.۱ درست شد. بر اساس اندازه‌های احتمال جدول‌های توزیع احتمال دوطرفه اندازه‌های شاخص‌های آنتروپی محاسبه شد. R زبان برنامه‌نویسی و نرم‌افزاری برای محاسبه‌های آماری و علم داده‌ها است. محدوده‌ی گسترده‌یی از فن‌های آماری ازجمله نرم‌افزارسازی خطی و غیرخطی، آزمون‌های سنتی آماری، تحلیل مجموعه های زمانی، طبقه‌بندی، و خوشه‌بندی در آن است. اگرچه نرم‌افزار R اغلب برای انجام محاسبه‌های آماری به‌کار می‌رود، در محاسبات ماتریسی نیز به‌کارگرفته می‌شود.

اساس پهنه‌بندی در آب‌خیز درون‌یابی است.

درون‌یابی فرآیند به‌دست آوردن نقطه‌های مجهول با نقطه‌های معلوم است. داده‌های ورودی در عملیات درون‌یابی از نوع داده‌های نقطه‌یی است. روش Spline در نرم‌افزار آرک جی‌آی‌اس ۱۰.۳ به‌کار گرفته‌شد. در این روش اندازه‌های مجهول با تابعی ریاضی که منحنی‌یی را از نقطه‌های معلوم می‌گذراند تخمین زده می‌شود. نتیجه‌ی این روش سطح منحنی‌یی هموار با جزئیات کم‌تر است.

نتایج و بحث

دوره‌ی آماری مشترک بین ایستگاه‌های آب‌سنجی با نسبت بازسازی ۲۰٪ برای ایستگاه‌های ۳۰ سال (۱۳۶۰-۱۳۸۹) با ۱۴ ایستگاه برای بررسی و پایش شبکه به‌دست آمد. ضریب تعیین ایستگاه‌های پیرسلمان، بیار، پل جاده کمیش، توتشامی، دو آب گاماسیاب، قورباغستان، پل کهنه در جدول وایازی معنادار و هم‌بستگی در تراز مناسبی بود، بنابراین روش وایازی برای بازسازی در این ایستگاه‌ها مناسب تشخیص داده شد.

ایستگاه‌های روانسرچپ و شاه گذر، نسبت به سایر ایستگاه‌ها در برقراری رابطه‌ی تجربی اندازه‌های ضریب تعیین کمی داشت و بنابراین برای تکمیل نقص‌های آماری در این ایستگاه‌ها روش تفاضل‌ها و نسبت‌ها به‌کار گرفته شد. در ایستگاه‌های پیرسلمان، توتشامی، دوآب-گاماسیاب، شاه‌گذر، قورباغستان، روانسرچپ، بیار، پل‌کهنه و پل جاده‌کمیش در دوره‌ی مشترک داده‌ی گم‌شده بود. از آن‌جاکه داده‌های گم شده‌ی ایستگاه‌های شاه‌گذر، توتشامی و پل‌جاده کمیش در ابتدای دوره‌ی مشترک بود، و داده‌های قبل از دوره نیز نبود، به‌کاربردن پیش‌بینی مجموعه‌ی زمانی ایستگاه‌ها ممکن نبود.

اندازه‌های شاخص‌های آنتروپی گسسته برای ۱۴ ایستگاه شبکه‌ی پایش استان کرمانشاه در ۳ حالت طبقه‌بندی محاسبه و ایستگاه‌های موجود در شبکه رتبه‌بندی شد. هر شاخص جداگانه رتبه‌بندی شد. در این رتبه‌بندی به کم‌ترین مقدار شاخص آنتروپی رتبه‌ی ۱ و به بیش‌ترین مقدار رتبه‌ی ۱۴ داده شد (جدول ۲ تا ۴).

جدول۲- اندازه‌های شاخص‌های آنتروپی ۱۴ ایستگاه شبکه‌ی پایش حوزه (۶ رده‌یی).

ایستگاه	رتبه	N(i)	رتبه	S(i)	رتبه	R(i)	رتبه	ITI(i)	رتبه	H(x(i),$\hat{x}(i)$)	رتبه	H($\hat{x}$(i))	رتبه	H(x(i))
روانسر چپ	۱۰	۰/۰۳	۳	۰/۴۳	۳	۰/۴	۷	۰/۵۵	۶	۱/۸۳	۱۰	۲/۳۷	۱۲	۲/۵۳
شاه گذر	۶	-۰/۰۱	۱	۰/۲۹	۱	۰/۳	۱	۰/۱۹	۱۳	۳/۶	۱۲	۲/۴۴	۹	۲/۳۶
پل کهنه	۹	۰/۰۲	۱۰	۰/۷۶	۱۰	۰/۷۵	۹	۰/۶۱	۸	۲/۹۴	۸	۲/۳۴	۱۰	۲/۴
پلجاده‌کمیش	۱۱	۰/۰۴	۹	۰/۷۵	۸	۰/۷۱	۸	۰/۵۸	۷	۲/۸۵	۵	۲/۱۹	۶	۲/۳۱
خرس آباد	۱	۰/۰۷۴	۱۱	۰/۷۷	۱۲	۰/۸۴	۱۲	۰/۷۷	۳	۲/۶	۷	۲/۲۷	۲	۲/۰۷
دو آب مرگ	۷	-۰/۰۰۵	۲	۰/۳۸	۲	۰/۳۸	۲	۰/۲۳	۱۴	۳/۷۹	۹	۲/۳۵	۸	۲/۳۲
آران غرب	۱۱	۰/۰۴	۸	۰/۷۲	۷	۰/۶۸	۶	۰/۵۴	۴	۲/۷	۱	۲/۰۱	۴	۲/۱۴
حیدرآباد	۴	-۰/۰۳	۴	۰/۵۷	۴	۰/۶	۳	۰/۴۱	۱۱	۳/۰۴	۴	۲/۲۰	۳	۲/۰۹
توتشامی	۸	۰/۰۱	۶	۰/۶۷	۶	۰/۶۶	۵	۰/۵۰	۱۲	۳/۲۶	۱۱	۲/۴۳	۱۱	۲/۴۵
بیار	۲	-۰/۰۶	۵	۰/۶	۵	۰/۶۵	۴	۰/۴۵	۹	۲/۹۵	۶	۲/۲۴	۱	۲/۰۵
پیرسلمان	۹	۰/۰۲	۱۳	۰/۸۹	۱۳	۰/۸۷	۱۱	۰/۷۶	۲	۲/۴۹	۳	۲/۱۳	۵	۲/۱۹
پل چهر	۵	۰/۰۲	۱۲	۰/۸۵	۱۳	۰/۸۷	۱۳	۰/۸۱	۱	۲/۲۲	۲	۲/۱۲	۲	۲/۰۷
دوآب-گاماسیاب	۶	-۰/۰۱	۷	۰/۷۱	۹	۰/۷۲	۷	۰/۵۵	۱۰	۳/۰۱	۹	۲/۳۵	۷	۲/۳۳
قورباغستان	۳	-۰/۰۴	۱۱	۰/۷۷	۱۱	۰/۸۱	۱۰	۰/۶۸	۵	۲/۷۹	۱۳	۲/۴۸	۹	۲/۳۶

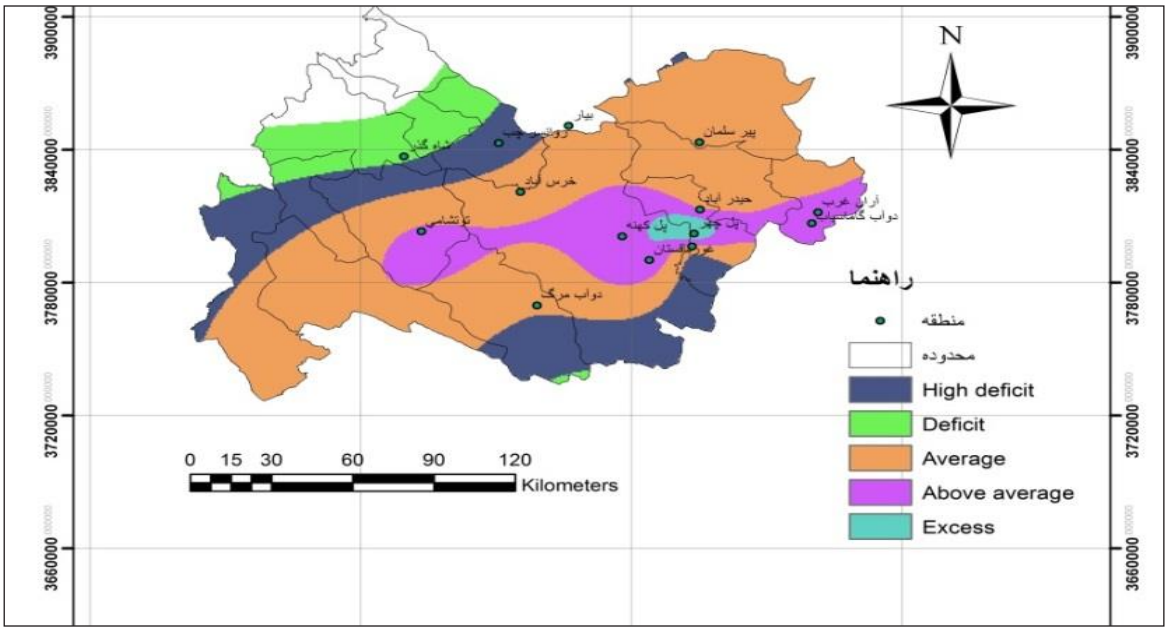
جدول۳- اندازه‌های شاخص‌های آنتروپی ۱۴ ایستگاه شبکه‌ی پایش حوزه (۵ رده‌یی).

ایستگاه	رتبه	N(i)	رتبه	S(i)	رتبه	R(i)	رتبه	ITI(i)	رتبه	H(x(i),$\hat{x}(i)$)	رتبه	H($\hat{x}$(i))	رتبه	H(x(i))
روانسر چپ	۷	۰/۰۲	۲	۰/۴۷	۲	۰/۴۵	۲	۰/۳۰	۱۲	۳/۴۳	۹	۲/۱۷	۱۱	۲/۲۸
شاه گذر	۲	-۰/۰۱	۱	۰/۲۹	۱	۰/۲۹	۱	۰/۱۷	۱۱	۳/۶۷	۹	۲/۱۷	۸	۲/۱۲
پل کهنه	۶	۰/۰۱۶	۱۱	۰/۸۳۲	۱۱	۰/۸۲	۱۱	۰/۷۰	۴	۲/۴۶	۷	۲/۰۸	۸	۲/۱۲
پل‌جاده-کمیش	۵	۰/۰۱	۷	۰/۷	۷	۰/۷	۶	۰/۵۴	۷	۲/۶۵	۵	۲/۰۲	۷	۲/۰۴
خرس آباد	۴	۰/۰۰۴	۶	۰/۶۹	۶	۰/۶۹	۵	۰/۵۳	۵	۲/۵۲	۲	۱/۹۲	۴	۱/۹۳
دو آب مرگ	۸	۰/۰۳	۴	۰/۶۲	۳	۰/۵۹	۳	۰/۴۳	۱۰	۲/۹۶	۶	۲/۰۵	۹	۲/۱۷
آران غرب	۸	۰/۰۳	۱۰	۰/۸	۱۰	۰/۷۸	۹	۰/۶۵	۲	۲/۲۳	۱	۱/۸۲	۲	۱/۸۸
حیدرآباد	۵	۰/۰۱	۸	۰/۷۶	۹	۰/۷۵	۷	۰/۶۱	۳	۲/۴۱	۳	۱/۹۳	۵	۱/۹۵
توتشامی	۹	۰/۰۵	۹	۰/۷۹	۸	۰/۷۴	۸	۰/۶۲	۹	۲/۶۸	۸	۲/۱	۱۰	۲/۲۵
بیار	۱	-۰/۰۵	۳	۰/۵۸	۵	۰/۶۳	۳	۰/۴۳	۷	۲/۶۵	۴	۱/۹۸	۱	۱/۸۲
پیرسلمان	۷	۰/۰۲	۵	۰/۶۴	۴	۰/۶۱	۴	۰/۴۶	۶	۲/۵۵	۱	۱/۸۲	۳	۱/۸۹
پل چهر	۳	۰	۱۴	۱/۰	۱۴	۱/۰	۱۳	۱/۰	۱	۱/۹۸	۴	۱/۹۸	۶	۱/۹۸
دوآب-گاماسیاب	۷	۰/۰۲	۱۳	۰/۹	۱۲	۰/۸۸	۱۰	۰/۶۹	۹	۲/۸۰	۸	۲/۱۳	۹	۲/۱۷
قورباغستان	۱	-۰/۰۵	۱۲	۰/۸۸	۱۳	۰/۹۲	۱۲	۰/۷۴	۸	۲/۶۶	۱۰	۲/۲۳	۸	۲/۱۲

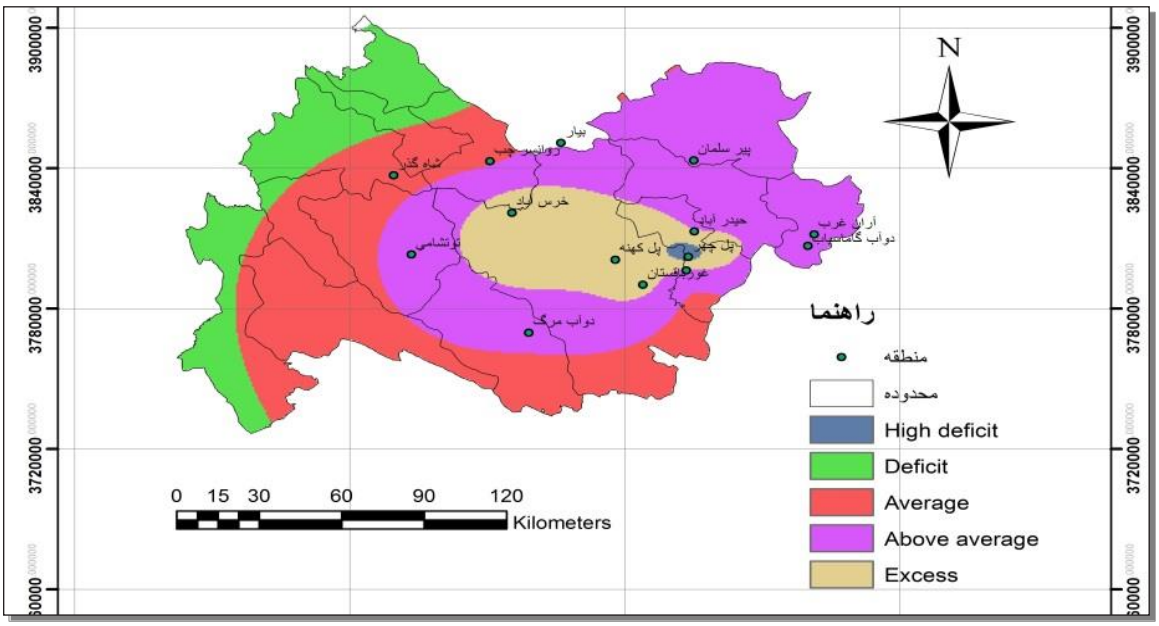
جدول ۴- اندازه‌های شاخص‌های آنتروپی ۱۴ ایستگاه شبکه‌ی پایش حوزه (۱۴ رده‌یی).

ایستگاه	رتبه	N(i)	رتبه	S(i)	رتبه	R(i)	رتبه	ITI(i)	رتبه	H(x(i),$\hat{x}(i)$)	رتبه	H($\hat{x}$(i))	رتبه	H(x(i))
روانسر چپ	۶	-۰/۰۷	۲	۰/۵۱	۲	۰/۵۸	۲	۰/۳۸	۱۳	۴/۶۴	۸	۳/۳۹	۵	۳
شاه گذر	۳	-۰/۱۲	۱	۰/۴۳	۱	۰/۵۵	۱	۰/۳۲	۱۴	۴/۸۴	۱۳	۳/۶۵	۲	۲/۸۷
پل کهنه	۵	-۰/۰۸	۹	۰/۷۲	۹	۰/۸۰	۱۰	۰/۶۴	۴	۳/۹۳	۱۲	۳/۴۸	۶	۳/۱۵
پل جاده کمیش	۱۰	-۰/۰۱	۹	۰/۷۲	۷	۰/۷۳	۸	۰/۵۷	۹	۴/۱۷	۶	۳/۳۱	۹	۳/۲۵
خرس آباد	۱	-۰/۱۵	۱۱	۰/۸۱	۱۰	۰/۹۶	۱۲	۰/۷۱	۲	۳/۶۶	۵	۳/۲۲	۱	۲/۷۱
دوآب‌مرگ	۴	-۰/۰۹	۵	۰/۵۸	۴	۰/۶۷	۴	۰/۴۶	۱۱	۴/۳۲	۷	۳/۳۸	۳	۲/۹۳
آران غرب	۲	-۰/۱۴	۳	۰/۵۶	۶	۰/۷	۷	۰/۵۶	۶	۴	۱	۳/۰۵	۸	۳/۱۹
حیدرآباد	۱۲	۰/۰۴	۱۰	۰/۷۹	۸	۰/۷۴	۹	۰/۶۲	۵	۳/۹۴	۲	۳/۱۱	۱۰	۳/۲۹
توتشامی	۸	-۰/۰۵	۶	۰/۶۱	۴	۰/۶۷	۵	۰/۴۷	۱۲	۴/۴۶	۱۰	۳/۴۲	۶	۳/۱۵
بیار	۸	-۰/۰۵	۴	۰/۵۷	۳	۰/۶۲	۳	۰/۴۳	۱۰	۴/۲۶	۴	۳/۲۱	۴	۲/۹۷
پیرسلمان	۱۱	۰/۰۱	۷	۰/۷	۵	۰/۶۹	۶	۰/۵۳	۸	۴/۱۲	۳	۳/۱۳	۷	۳/۱۸
پل چهر	۷	-۰/۰۶	۱۲	۰/۹	۱۰	۰/۹۶	۱۳	۰/۸۷	۱	۳/۲۴	۳	۳/۱۳	۳	۲/۹۳
دوآب-گاماسیاب	۹	-۰/۰۲	۸	۰/۷۱	۷	۰/۷۳	۷	۰/۵۶	۳	۳/۹۲	۱۱	۳/۴۷	۱۲	۳/۳۸
قورباغستان	۱۰	-۰/۰۱	۱۰	۰/۷۹	۹	۰/۸	۱۱	۰/۶۶	۷	۴/۰۸	۹	۳/۴	۱۱	۳/۳۷

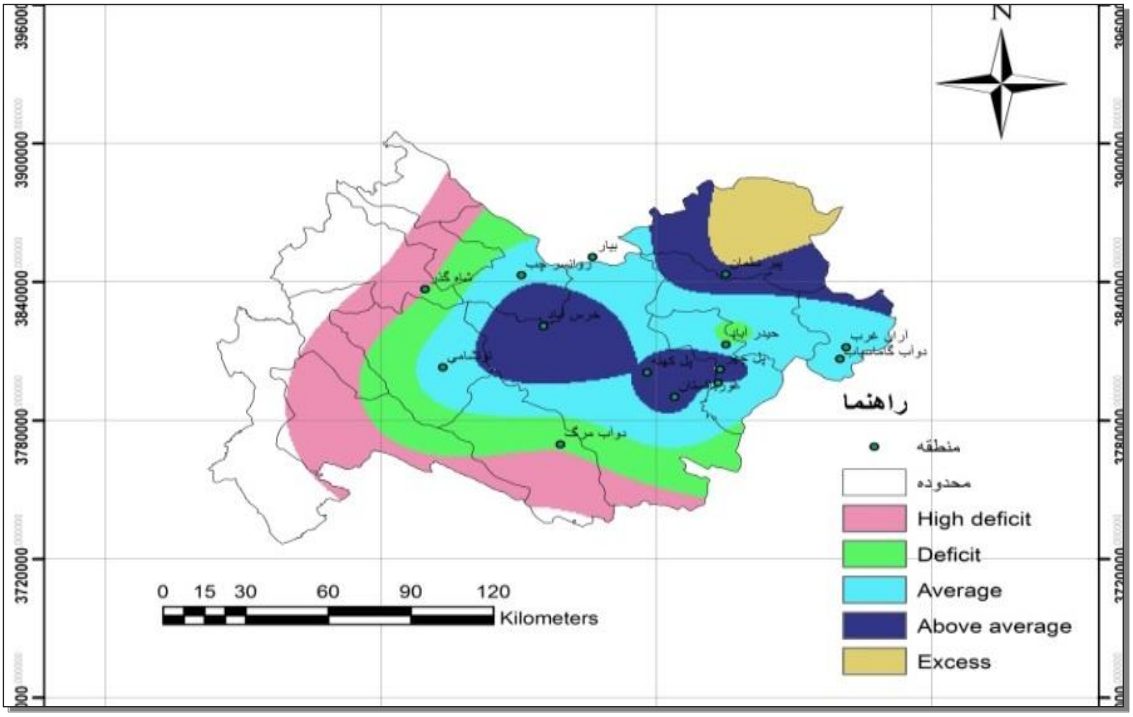
نتیجه‌ی پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات ITI(i) در حوزه‌های بررسی‌شده بر اساس طبقه‌بندی در ۳ حالت مختلف ۵، ۶ و ۱۴ رده‌یی، به‌ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۵ نمایش داده‌شده است.



شکل ۳- پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات در حوزه (۵ رده‌یی).



شکل ۴- پهنه‌بندی انتقال اطلاعات در حوزه (۱۴ رده‌یی).



شکل ۵- پهنه‌بندی انتقال اطلاعات در حوزه (۶ رده‌یی).

از مقایسه‌ی شکل‌های ۳ تا ۵ در تحلیل حساسیت پهنه‌بندی شاخص‌های آنتروپی در حوزه می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر تعداد طبقه‌ها، نتیجه‌ی پهنه‌بندی تغییر کرد، و مساحت هر ناحیه‌ی تقسیم‌بندی در ۳ وضعیت طبقه‌بندی متفاوت بود. حالت ۱۴ طبقه‌یی در مقایسه با حالت های ۵ و ۶ طبقه‌یی رفتار متفاوتی داشت. از آن‌جاکه بین اندازه‌ها و رتبه‌ی شاخص‌های وضعیت ۶ طبقه‌یی ارتباط و هماهنگی معنادارتری از وضعیت‌های ۵ و ۱۴ طبقه‌یی بود، نتیجه‌های پهنه‌بندی حالت ۶ طبقه‌یی برای ارزیابی

شبکه‌ی ایستگاه‌های آب‌سنجی به‌کار گرفته شد.
پس از تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی انتقال اطلاعات در حوزه، در سه‌حالت طبقه‌بندی، مساحت زیر پوشش هر طبقه براساس جدول میشرا و کولیبالی (۲۰۱۰) محاسبه شد (جدول ۵، ۶، و ۷).

جدول ۵- نتیجه‌ی پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات در حوزه (۵ رده‌یی).

مساحت زیر پوشش (٪)	مساحت زیر پوشش (ha)	طبقه‌بندی شاخص
۱۰/۸۲	۱۲۷۱۱۰/۸۷	کم‌بود شدید
۲۸/۵۷	۳۳۵۷۵۰/۶۰۵	کم‌بود
۳۰/۸۱	۳۶۲۰۳۴/۲۳	متوسط
۲۴/۸۷	۲۹۲۲۳۷/۹۵۶	بیش‌تر از متوسط
۴/۹۴	۵۷۹۹۸۱/۳۸۴	بی ایستگاه
۱۰۰	۱۱۷۵۱۳۱/۸	مجموع

جدول ۶- نتیجه‌ی پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات در حوزه (۶ رده‌یی).

مساحت زیر پوشش (٪)	مساحت زیر پوشش (ha)	طبقه‌بندی شاخص
۴/۳۸	۵۱۴۹۹/۸	کم‌بود شدید
۴/۷۳	۵۵۵۹۱/۶۹۳۲	کم‌بود
۲۳/۸۲	۲۷۹۹۳۴/۱۸۶	متوسط
۴۲/۹۳	۵۰۴۴۸۲/۶۷۷	بیش‌تر از متوسط
۲۴/۱۴	۲۸۳۶۲۳/۴۴۴	بی ایستگاه
۱۰۰	۱۱۷۵۱۳۱/۸	مجموع

جدول ۷- نتیجه‌ی پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات در حوزه (۱۴ رده‌یی).

مساحت زیر پوشش (٪)	مساحت زیر پوشش (ha)	طبقه‌بندی شاخص
۱۲/۶۵	۱۴۸۶۴۷/۲	کمبود شدید
۱۹/۱۷	۲۲۵۲۹۷/۶	کمبود
۳۵/۹۰	۴۲۱۸۷۷	متوسط
۲۱/۶۷	۲۵۴۵۹۶/۲۸	بیش‌تر از متوسط
۱۰/۶۱	۱۲۴۷۱۳/۷۹	بی ایستگاه
۱۰۰	۱۱۷۵۱۳۱/۸	مجموع

در طبقه‌بندی‌های متفاوت هر طبقه مساحت متفاوتی را پوشاند، این یافته لزوم و اهمیت طبقه‌بندی در نتیجه‌ی شاخص‌ها را برای صحت کار گوشزد می‌کند. شاخص‌ها بر اساس اطلاعات آماری ۱۴ ایستگاه آب‌دهی‌سنجی پهنه‌بندی شد، بنابراین همه‌ی حوزه‌ی زیر پوشش در طبقه بندی و پهنه‌بندی نبود.
در جدول ۸ رتبه‌های چهار ایستگاه بحرانی ازنظر شاخص‌های مهم نشان داده‌شده است. ایستگاه شاه‌گذر، ازنظر اهمیت و توان گرفتن اطلاعات رتبه‌ی یک را داشت؛ یعنی ضعیف‌ترین ایستگاه ازنظر گرفتن اطلاعات بود. این ایستگاه در سایر شاخص‌ها نیز وضعیت ضعیفی داشت. ضریب هم‌بستگی این ایستگاه با سایر ایستگاه‌ها نیز بسیار کم بود. در پهنه‌بندی نیز در ناحیه‌ی کم‌بود شدید بود. ایستگاه روانسرچپ ازنظر اهمیت و گرفتن اطلاعات رتبه‌ی ۷ را داشت و در میان سایر ایستگاه‌ها وضعیتی متوسط ازنظر گرفتن اطلاعات دارد و در رتبه‌ی ۳ در ناحیه‌ی متوسط بود. ایستگاه دوآب مرگ نیز تقریباً در همه‌یی شاخص‌ها وضعیت ضعیف داشت و در ناحیه‌ی کم‌بود بود. ایستگاه حیدرآباد ازنظر

شاخص آنتروپی مرزی توان انتقال و دریافت اطلاعات رتبه‌ی ۱۰ را داشت که نشان‌دهنده‌ی توان خوب این ایستگاه ازنظر دریافت و دادن اطلاعات است، ولی در شاخص‌های اصلی رتبه‌های ۳ و ۴ داشت که از آن‌جاکه ازنظر هم‌بستگی رتبه‌ی بالایی گرفت، وضعیت آن نیاز به بررسی بیش‌تری دارد. از آن‌جاکه این ایستگاه در مجاورت ایستگاه پل‌چهر است، و ایستگاه پل‌چهر در همه‌یی شاخص‌ها در بهترین وضعیت ثبت اطلاعات است، لازم است علت رفتار متفاوت ایستگاه حیدرآباد بررسی شود، و اگر منبع خطایی مانند ثبت نادرست متصدی ایستگاه، کارکرد نادرست وسایل، یا حتا عارضه‌یی زمین‌شناسی در آن هست اصلاح لازم انجام شود. ایستگاه شاه‌گذر بر اساس همه‌یی شاخص‌ها رتبه‌ی ضعیفی داشت و اولین گزینه‌ی حذف است. ایستگاه دوآب‌مرگ نیز رتبه‌های ضعیفی را در شاخص‌های آنتروپی گرفت و گزینه‌ی دیگرِ حذف یا جابه‌جایی است. البته باید در باره‌ی ۴ ایستگاه تجدیدنظر شود و با بازدید میدانی از محل آن، و در نظر گرفتن عامل‌هایی مانند شرایط جغرافیایی، پستی‌بلندی، آب‌شناسی و اقلیمی، پروژه‌های آبی توسعه‌یابنده در منطقه، امکان احداث، بهره‌برداری و نگه‌داری ایستگاه، و عامل‌های اقتصادی، آن را نصب و یا بازتجهیز کرد.

جدول ۸- رتبه‌بندی شاخص‌های ۴ ایستگاه بحرانی.

ایستگاه	رتبه‌ی شاخص‌ها					
	H(X(i)	ITI(i)	R(i)	S(i)	N(i)	R^2
روانسرچپ	۵	۷	۳	۳	۶	۳
شاه‌گذر	۲	۱	۱	۱	۳	۱
دوآب‌مرگ	۳	۲	۲	۲	۴	۲
حیدرآباد	۱۰	۳	۴	۴	۱۲	۱۱

برای بررسی صحت نتایج به‌دست‌آمده و درستی نتیجه‌ی اضافی‌بودن و حذف‌شدنی بودن ایستگاه شاه‌گذر از شبکه، همه‌ی مرحله‌های محاسبه برای ۱۳ ایستگاه باقی‌مانده‌ی شبکه در وضعیت ۶ طبقه‌یی تکرار شد (جدول ۹ و ۱۰).

جدول ۹- اندازه‌های شاخص‌های آنتروپی گسسته‌ی ۱۳ ایستگاه حوزه (۶ رده‌یی).

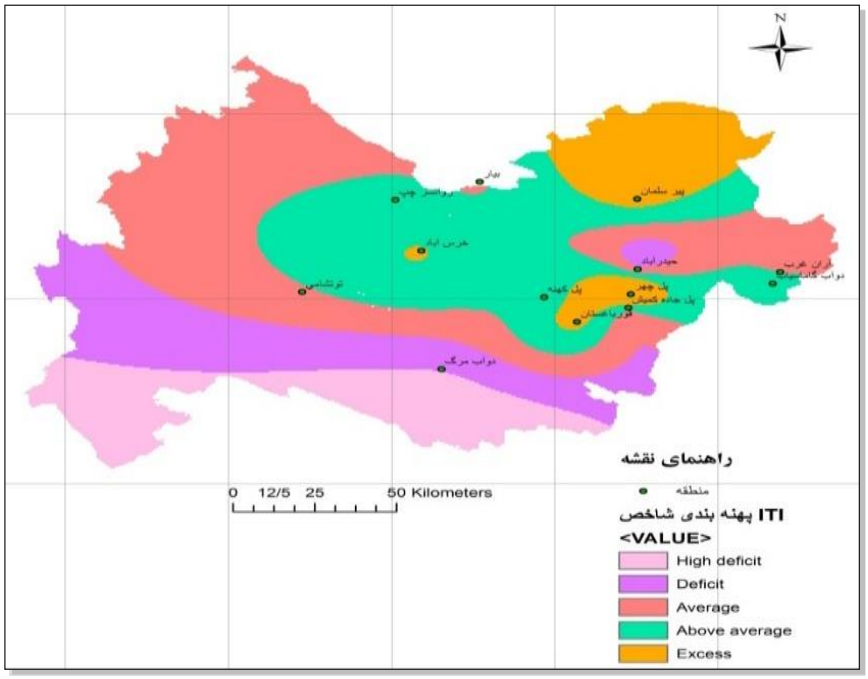
ایستگاه	رتبه	N(i)	رتبه	S(i)	رتبه	R(i)	رتبه	ITI(i)	رتبه	H(x(i),$\hat{x}(i)$)	رتبه	H($\hat{x}$(i))	رتبه	H(x(i))
روانسر	۹	۰/۰۶	۵	۰/۶۷	۳	۰/۶۲	۵	۰/۵۵	۹	۲/۸۸	۹	۲/۳۳	۱۲	۲/۵۵
پل‌کهنه	۷	۰/۰۲	۷	۰/۷۴	۶	۰/۷۱	۶	۰/۵۷	۱۰	۳/۰۳	۱۰	۲/۳۴	۱۰	۲/۴۱
پل کمیش	۸	۰/۰۴	۸	۰/۷۵	۶	۰/۷۱	۷	۰/۵۸	۷	۲/۸۵	۵	۲/۱۹	۶	۲/۳۱
خرس آباد	۱۰	۰/۰۷	۱۱	۰/۸۴	۸	۰/۷۷	۹	۰/۶۷	۲	۲/۶۰	۷	۲/۲۷	۲	۲/۰۷
دو آب	۵	-۰/۰۱	۱	۰/۳۷	۱	۰/۳۸	۱	۰/۲۳	۱۳	۳/۷۹	۱۱	۲/۳۵	۷	۲/۳۲
آران غرب	۸	۰/۰۴	۶	۰/۶۸	۴	۰/۶۵	۴	۰/۵	۴	۲/۷۸	۱	۲/۰۳	۴	۲/۱۴
حیدر آباد	۴	-۰/۰۳	۲	۰/۵۷	۲	۰/۶	۲	۰/۴۱	۱۱	۳/۰۴	۶	۲/۲۰	۳	۲/۰۹
توتشامی	۶	۰/۰۱	۴	۰/۶۶	۴	۰/۶۵	۳	۰/۴۹	۱۲	۳/۲۶	۱۲	۲/۴۰	۱۱	۲/۴۵
بیار	۲	-۰/۰۴	۳	۰/۶۵	۵	۰/۶۸	۴	۰/۵	۵	۲/۸۲	۴	۲/۱۷	۱	۲/۰۵
پیرسلمان	۷	۰/۰۲	۱۳	۰/۹۱	۱۱	۰/۸۸	۱۱	۰/۷۳	۳	۲/۶۳	۲	۲/۱۳	۵	۲/۱۹
پل چهر	۳	-۰/۰۳	۱۲	۰/۸۵	۱۰	۰/۸۸	۱۲	۰/۹۷	۱	۱/۸۷	۳	۲/۱۴	۲	۲/۰۷
دوآب	۶	۰/۰۱	۹	۰/۷۶	۷	۰/۷۵	۸	۰/۶۱	۸	۲/۸۶	۸	۲/۲۹	۸	۲/۳۳
قورباغستان	۱	-۰/۰۴	۱۰	۰/۸۱	۹	۰/۸۵	۱۰	۰/۷۱	۶	۲/۸۳	۱۳	۲/۴۸	۹	۲/۳۶

بر اساس جدول‌های ۹ و ۱۰ صحت‌سنجی، با حذف ایستگاه شاه‌گذر تغییر شاخص‌های آنتروپی کاملاً مشهود است. اندازه‌های شاخص‌ها در ایستگاه‌های پیرامون شاه‌گذر، و ایستگاه‌هایی که ضریب هم‌بستگی آن‌ها بیش‌تر است افزایش یافت، که نشان‌دهنده‌ی آن است که با حذف ایستگاه شاه‌گذر بی‌قطعیتی در ایستگاه‌های مجاور مانند روانسرچپ، خرس‌آباد و دوآب‌مرگ و ایستگاه‌هایی با ضریب هم‌بستگی بیش‌تر مانند پل‌چهر و آران‌غرب و دوآب گاماسیاب به اندازه‌ی بیش‌تری کاهش، و به

جدول ۱۰- اندازه‌های R^2 ,R(i) ,S(i), ITI(i) H(x(i)) (۱۳ ایستگاه حوزه).

ایستگاه	رتبه	R^2	رتبه	N(i)	رتبه	S(i)	رتبه	R(i)	رتبه	ITI(i)	رتبه	H(x(i))
روانسر	۲	۷۴/۶	۹	۰/۰۶	۵	۰/۶۷	۳	۰/۶۲	۵	۰/۵۵	۱۲	۲/۵۵
پل‌کهنه	۱۱	۹۷/۸	۷	۰/۰۲	۷	۰/۷۴	۶	۰/۷۱	۶	۰/۵۷	۱۰	۲/۴۱
پل کمیش	۵	۹۵/۱	۸	۰/۰۴	۸	۰/۷۵	۶	۰/۷۱	۷	۰/۵۸	۶	۲/۳۱
خرس آباد	۸	۹۶/۸	۱۰	۰/۰۷	۱۱	۰/۸۴	۸	۰/۷۷	۹	۰/۶۷	۲	۲/۰۷
دوآب	۱	۷۳/۴	۵	-۰/۰۱	۱	۰/۳۷	۱	۰/۳۸	۱	۰/۲۳	۷	۲/۳۲
آران غرب	۱۰	۹۷/۸	۸	۰/۰۴	۶	۰/۶۸	۴	۰/۶۵	۴	۰/۵	۴	۲/۱۴
حیدر آباد	۱۰	۹۷/۷	۴	-۰/۰۳	۲	۰/۵۷	۲	۰/۶	۲	۰/۴۱	۳	۲/۰۹
توتشامی	۶	۹۵/۲	۶	۰/۰۱	۴	۰/۶۶	۴	۰/۶۵	۳	۰/۴۹	۱۱	۲/۴۵
بیار	۳	۹۲/۶	۲	-۰/۰۴	۳	۰/۶۵	۵	۰/۶۸	۴	۰/۵	۱	۲/۰۵
پیرسلمان	۴	۹۴/۳	۷	۰/۰۲	۱۳	۰/۹۱	۱۱	۰/۸۸	۱۱	۰/۷۳	۵	۲/۱۹
پل‌چهر	۱۲	۹۹/۳	۳	-۰/۰۳	۱۲	۰/۸۵	۱۰	۰/۸۸	۱۲	۰/۹۷	۲	۲/۰۷
دوآب	۷	۹۵/۳	۶	۰/۰۱	۹	۰/۷۶	۷	۰/۷۵	۸	۰/۶۱	۸	۲/۳۳
قورباغستان	۹	۹۷/۶	۱	-۰/۰۴	۱۰	۰/۸۱	۹	۰/۸۵	۱۰	۰/۷۱	۹	۲/۳۶

همان اندازه ارزش اطلاعات نیز در این ایستگاه‌ها افزایش یافت (شکل۶). هم‌آهنگی بهتر در رتبه‌های هر ایستگاه در شاخص‌های مهم نسبت به حالت اولیه (با در نظر گرفتن ۱۴ ایستگاه) مشاهده می‌شود. از بررسی رتبه‌های ۱۳ ایستگاه شبکه‌ی پایش دانسته می‌شود که دو ایستگاه حیدرآباد و دوآب‌مرگ بازهم ایستگاه‌های بحرانی شبکه است. ایستگاه‌های مهم شبکه نیز همان ایستگاه‌های قبلی (پل‌چهر، پیرسلمان و قورباغستان) است.

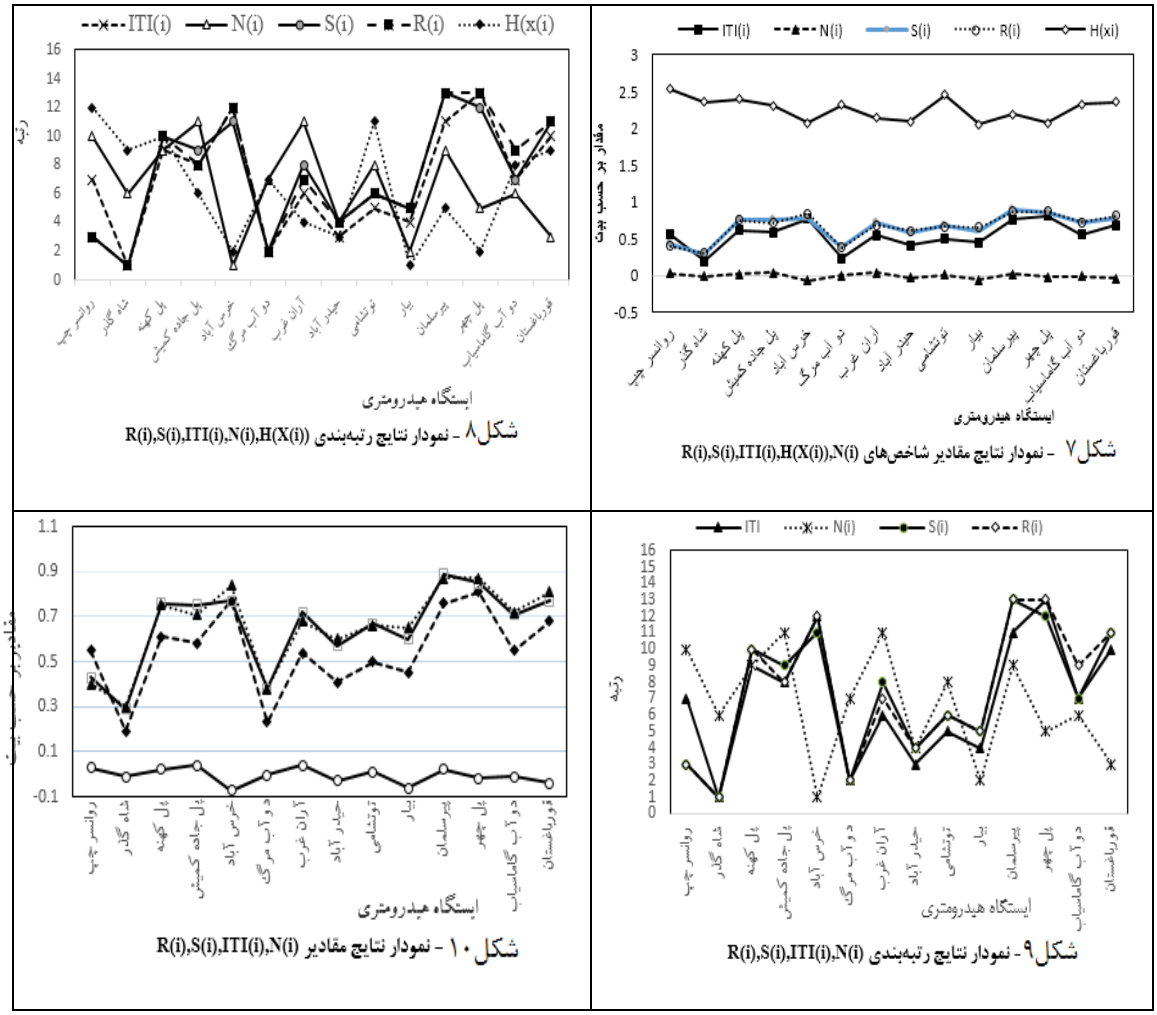


شکل ۶- پهنه‌بندی انتقال اطلاعات بعد از واسنجی (در حوزه‌ی ۶ رده‌یی).

در این پژوهش دو دسته‌ی متفاوت از شاخص‌های اطلاعات آنتروپی، که در پژوهش‌های پیشین معرفی و به‌کاربرده شده‌بود، به‌کار گرفته‌شد. دسته‌ی اول شاخص‌های آنتروپی مرزی، مشترک، شرطی و انتقال اطلاعات است. دسته‌ی دوم نیز بر مبنای دیدگاه مارکوز و همکاران (۲۰۰۳)، که شامل کل اطلاعات فرستاده از ایستگاه$S(i)$، کل اطلاعات دریافته در ایستگاه$R(i)$ و کل اطلاعات

خالص ایستگاه(N(i است. یکی از هدف‌های اصلی دیگر این پژوهش به‌کاربردن شاخص‌های هر دودسته در ارزیابی و بررسی ارتباط بین شاخص‌های آن‌ها است. از بررسی نمودارهای شکل‌های ۷ تا ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که نخست تفاوت چندانی در رتبه‌های هر ایستگاه در شاخص‌های(S(i ،(R(i)، و(ITI(i

دیده نشده است و بیش‌تر ایستگاه‌ها رتبه‌های مشابه دارند، و دوم، روند افزایشی–کاهشی این شاخص‌ها مشابه است.
هر ایستگاه رتبه‌های تقریباً یک‌سانی در شاخص‌های(S(i ،(R(i) گرفت.



شکل۷ - نمودار نتایج مقادیر شاخص‌های R(i),S(i),ITI(i),H(X(i)),N(i)

شکل۸ - نمودار نتایج رتبه‌بندی R(i),S(i),ITI(i),N(i),H(X(i))

شکل۹ - نمودار نتایج رتبه‌بندی R(i),S(i),ITI(i),N(i)

شکل ۱۰ - نمودار نتایج مقادیر R(i),S(i),ITI(i),N(i)

از مقایسه‌ی اندازه‌های شاخص‌های (S(i ،(R(i)، و(ITI(i نتیجه‌گیری شد که ارتباط تقریباً مشخصی بین این شاخص‌ها وجود داشته‌است که می‌توان آن را در قالب معادله‌یی نشان داد. بنابراین با فرض این‌که رابطه‌ی خطی یا نزدیک به خطی بین این اندازه‌ها بود، و برقرار شدن وایازی خطی چندگانه بین اندازه‌های شاخص‌های(S(i ،(R(i)، و(ITI(i رابطه‌ی ۱۲ به دست آمد:

$$ITI(i)=-0.274+1.13R(i)+0.081S(i) \quad (۱۲)$$

جدول ۱۱- ویژگی‌های آماری رابطه‌ی تجربی بین اندازه‌های شاخص‌های S(i) ، R(i)، و ITI(i).

شاخص‌ها	اندازه‌های ضریب‌ها	همبستگی رابطه	اندازه‌های همبستگی
Intercept	-۰/۲۷۴	R- Square	۰/۸۶
R(i)	۱/۱۳	R- Square(adj)	./۸۳
S(i)	۰/۰۸۱	Standard Error	۰/۰۷۳

اندازه‌ی شاخص‌های$(R(i)، S(i)$ در بیش‌تر ایستگاه‌ها تقریباً یکسان بود، یعنی هر ایستگاه تقریباً به همان اندازه که اطلاعات به‌سایر ایستگاه‌ها می‌فرستد سعی در گرفتن اطلاعات از ایستگاه‌های دیگر دارد.

نتیجه‌گیری

نتیجه‌های این ارزیابی نشان‌دهنده‌ی وجود ۳ ایستگاه بحرانی دو آب‌مرگ، شاه‌گذر و حیدرآباد در شبکه است، که ضرورت تجدیدنظر و بازنگری آن‌ها هست. از سوی دیگر رتبه‌ی ایستگاه‌های پل‌چهر و پیرسلمان و قورباغستان بیش‌ترین بود و سه ایستگاه مهم حوزه شناخته شد، که باید در شبکه فعال بمانند. ایستگاه دوآب مرگ بدترین وضعیت را در شبکه‌ی پایش دارد و ضروری است وضعیت آن به‌دقت بررسی شود. ایستگاه شاه‌گذر اولین گزینه‌ی حذف از شبکه است. مقایسه‌ی نتیجه‌های این پژوهش با مارکوس و همکاران (۲۰۰۳) و کریمی گوغری و خلیفه (۲۰۱۱) در تغییر شاخص‌های آنتروپی در طبقه‌بندی‌های مختلف هم‌خوانی دارد، در حالی‌که نتیجه‌های میشرا و کولیبالی (۲۰۱۰) در بی‌اثر بودن تعداد طبقه‌بندی n در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها کاملا تایید نمی‌شود. باید توجه داشت که همه‌ی نتیجه‌ها تنها بر پایه‌ی نظریه‌ی آماری و تنها از دید آماری به‌دست آمده‌است. بنابراین با بازدید میدانی از محل سه ایستگاه یادشده و با درنظر گرفتن شرایط جغرافیایی، پستی–بلندی، آب‌شناسی و اقلیمی، طرح‌های آبی در منطقه، و با بررسی امکان احداث، بهره‌برداری و نگه‌داری ایستگاه، عوامل اقتصادی، و جمعیت منبع خطا و دشواری‌های آن‌ها شناسایی و برطرف شود. اگر لازم باشد نیز محل ایستگاه جابه‌جا یا تغییرهای لازم اندیشیده شود.

هم‌اکنون ۲۸ ایستگاه آب‌سنجی فعال در شبکه هست که در بخش‌های شرقی، شمال، و شمال شرقی به‌علت کم‌بود ایستگاه‌های فعال، اطلاعات آب‌سنجی مناسبی در اختیار نیست. از این نظر ضروری است که ایستگاه‌های تعطیل‌شده در این ناحیه‌ها فعال شود یا ایستگاه‌هایی جدید احداث شود. این کار مهم سبب توزیع متوازن‌تر و دقیق‌تر اطلاعات آب‌سنجی در شبکه خواهد شد، که بی‌گمان بر ارزیابی بهتر شبکه تأثیرگذارتر خواهد بود.

اگرچه برقراری رابطه‌ی تجربی بین ایستگاه‌های شبکه‌ی پایش از ساده‌ترین اقدام‌های آماری است، نتیجه‌های به دست‌آمده از این روش کاملاً اعتناکردنی و معنادار بود. به نظر می‌رسد کاربرد این روش برای ارزیابی شبکه‌ی پایش نکته‌ها و یافته‌های فراوانی خواهد داشت که به ارتقای کیفی نتیجه‌های به‌دست‌آمده از روش آنتروپی کمک خواهد کرد. به‌ویژه در ایستگاه‌های بحرانی برقراری ضریب تعیین نتیجه‌ها و ارزیابی‌های هم ارزی با نتایج آنتروپی داده شده‌است.

فهرست منابع

Alfonso L, He L, Lobbrecht A, Price R. 2013. Information theory applied to evaluate the discharge monitoring network of the Magdalena River. Journal of Hydroinformatics, 15(1): 211–228

Bazargan Lari A. 1999. Applied statistics, Shiraz University Press, 730 p. (In Persian).

Chao L, Vijay. 2012. Entropy based criterion for hydrometric network evaluation and design. Water Resources Research, 48(5): W05521, doi: 10. 1029/2011 WR011251.

Harmancioglu NB, Alpaslan N. 1992. Water quality moniroring network design: A Problem of Multi-objective Decision Making1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 28(1): 179–192.

Harmancioglu N, Yevjevich V. 1987. Transfer of hydrologic information among river points. Journal of Hydrology, 91(1–2): 103–118.

Hongjun J, Kyungtak K, Seungjin H, Jungwook K, Hung Soo K. 2019. Optimal stream gauge network design using entropy theory and importance of stream gauge stations, Entropy.21(10): 2–18;https://doi.org/10.3390/e21100991.

Karamouz M, Hafez B, Kerachian R. 2005. Water quality monitoring network for river systems: Application of Ordinary Kriging. In Proceedings of ASCE-EWRI World Water and Environmental Resources Congress, Alaska. ASCE, Reston VA, USA.

Karamouz M, Nokhandan AK, Kerachian R, Maksimovic Č. 2009. Design of on-line river water quality monitoring systems using the entropy theory: A case study. Environmental monitoring and assessment, 155(1–4): 63–81.

Karimi goghari SH, Khalife S. 2011. Evaluating the efficiency of hydrometric networks using discrete entropy theory (Case study: Bakhtegan-Maharloo basin). Journal of Watershed Management Research 2(3):34–50 .(In Persian).

Keum J, Kornelsen K, Leach J, Coulibaly P. 2017 .Entropy Applications to Water Monitoring Network Design: A Review. Entropy,19(11):613–635. DOI:10.3390/e19110613.

Mahjouri N, Kerachian R. 2011. Revising river water quality monitoring networks using discrete entropy theory: The Jajrood River experience. Environmental Monitoring and Assessment, 175(1–4): 291–302.

Marcus M, Knapp HV, Tasker GD. (2003). Entropy and generalized least square methods in assessment of the regional value of stream gages. Journal of Hydrology, 283(1–4):107–121.

Mishra AK, Coulibaly P. 2009. Developments in hydrometric network design: A review. Reviews of Geophysics, 47(2):1–24.

Mishra AK, Coulibaly P. 2010. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. Journal of Hydrology, 380(3): 420–437.

Mogheir Y, De Lima JLMP, Singh VP. 2004. Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory: I. Synthetic data. Hydrological Processes, 18(11):2165–2179.

Mogheir Y, Singh VP. 2002. Application of information theory to groundwater quality monitoring networks. Water Resources Management, 16(1): 37–49.

Mogheir Y, De Lima JLMP, Singh VP. 2003. Assessment of spatial structure of groundwater quality variables based on the entropy theory. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 7(5): 707–721.

Ozkul S, Harmancioglu NB, Singh VP. 2000. Entropy-based assessment of water quality monitoring networks. Journal of Hydrologic

Engineering, 5(1): 90–100.

Sarlak N, Sorman A. 2006. Evaluation and selection of streamflow network station using entropy method. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 30:91–100.

Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communiation. Bell System Technical Journal, 27(3): 379–423.

Vivekanandan N. 2012. Evaluation of streamflow using Entropy Measures of Normal and Lognormal Distributions. Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, 2(3):33–37.

Vivekanandan N. 2014. Entropy based assessment of hydrometric network using normal and log – normal distribution. Applied Mathematics and Sciences: An International Journal (MathSJ). 1 (1): 33–42.

Werstuck C, Coulibaly P. 2017. Hydrometric network design using dual entropy multi-objective optimization in the Ottawa River Basin, Hydrology Research .48 (6): 1639–1651. https://doi.org/10.2166/nh.2016.344.

Watershed Management Research

VOL. 34, No. 3, Ser. No: 132, Autumn 2021, pp. 2 -18
DOI: 10.22092/wmej.2021.352857.1380

Research Paper

Quantitative Assessment of Hydrometry Station Density in the Province of Kermanshah Using the Entropy and Zoning Method in the GIS

Mohammad Johari Pour
M.Sc. in Water Resources Management
Ali Bafkar
(Corresponding Author)* Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Science and Engineering, Razi University
Maryam Hafezparast Mavadat
Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Science and Engineering, Razi University

Corresponding Author Email: alibafkar@yahoo.com
Received: 13 December 2020 Accepted: 15 March 2021

Abstract

Evaluating the efficiency of water resources monitoring systems and trying to improve the status of various components of these systems, such as modifying the frequency of quantitative variable sampling and relocating stations, is of particular importance. The main reason for the importance of this issue is the significant monthly cost of maintaining these systems; therefore, reducing the redundant and excess information in such systems may have a significant effect on reducing costs without decreasing the value and accuracy of the resulting information. However, if the number of stations is not optimal, the data of sensitive points may be missed. In the discrete entropy theory was used to investigate the accuracy of station information and their density in the region, and to quantitatively evaluate the network of hydrometry stations in the province of Kermanshah. Fourteen stations with a common statistical period of 30 years was evaluated. The results indicate the presence of three critical stations of Doabmarg, Shah Gozar and Hyderabad in the network, which their continued functioning need to be reconsidered. The Pol-e-Chehr, Pirsalman and Ghorbaghistan are the three most important stations in the basin that should remain active in the network, as they have the highest ranking among other stations. Doabmarg Station has the worst condition in the monitoring network and its condition needs to be carefully reviewed and revised. The indexes S (i) R (i) have almost the same values in most stations; each station tries to collect information from other stations as much as it contributes data to other stations.

Keywords: Evaluation, entropy theory, network of hydrometriy station