



کاربرد تئوری آنتروپی در ارزیابی کارایی شبکه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی سفیددشت

کوثر سیفی پور^۱، رسول میرعباسی نجفآبادی^{۲*}، مهدی میرزایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

۲- دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

* نویسنده مسئول: mirabbasi_r@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۲۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵

چکیده

ارزیابی کارایی شبکه‌های پایش کیفی منابع آب و بهبود مؤلفه‌های مختلف این سیستم‌ها، مانند مکان‌یابی بهینه ایستگاه‌های پایش از اهمیت ویژه‌ای در مدیریت منابع آب برخوردار است. دلیل اصلی اهمیت این موضوع، هزینه‌های قابل توجه ایجاد، نگهداری و بهره‌برداری از این شبکه‌های پایش می‌باشد. به طوری که کاهش اطلاعات مازاد می‌تواند در کاهش هزینه‌های سیستم، بدون کاهش ارزش و دقت اطلاعات حاصل، تأثیر قابل توجهی داشته باشد. در این پژوهش با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته، کارایی شبکه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی سفیددشت در استان چهارمحال و بختیاری مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، مقادیر شاخص‌های آنتروپی $R(i)$ ، $IT(i)$ ، $S(i)$ و $N(i)$ در ۹ ایستگاه سفیددشت در سه کلاس مختلف ۶، ۹ و ۱۲ محاسبه شد. نتایج نشان داد که چاه اسکندر صفرپور بهینه‌ترین ایستگاه پایش دشت و چاه علی مدد طهما سبی و قنات شادبخوار ضمن کسب رتبه‌های پایین در شبکه، وضعیت بحرانی داشته و ادامه فعالیت آن‌ها مستلزم تجدیدنظر کلی است. واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، تئوری آنتروپی، فاصله کلاس‌بندی، شبکه پایش کیفی، شاخص انتقال اطلاعات.

مقدمه

تئوری یکی از روش‌های مؤثر در حل مسائل عدم قطعیت در سامانه‌های منابع آب به حساب می‌آید (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷). به‌طورکلی تا حدود نیمه اول قرن بیستم، به دلیل پیچیدگی مفهومی و محاسباتی، محققان علاقه چندانی به استفاده از آن به‌عنوان یک روش آماری پیدا نکردند. سینگ (۱۹۹۷) گزارشی جامع از تاریخچه کاربرد تئوری آنتروپی در علوم مهندسی آب ارائه داد. چاپمن (۱۹۸۶) آنتروپی را یک کمیت اندازه‌گیری عدم قطعیت داده‌های هیدرولوژیکی معرفی کرد. او با بررسی اثر کلاس‌بندی‌های مختلف بر شاخص‌های آنتروپی به این نتیجه رسید که تغییر تعداد کلاس‌ها بر مقادیر

واژه آنتروپی به عنوان یک مفهوم علمی اولین بار در سال ۱۸۵۰ توسط کلاسیوس در ترمودینامیک مطرح شد. در سال ۱۸۷۷، بولتزمن آنتروپی را به عنوان معیاری از بی‌نظمی در یک سامانه و میزان عدم قطعیت مربوط به یک حالت میکروسکوپی خاص تعریف کرد. تعریف بولتزمن آنتروپی را به شکل احتمالی و به عنوان مفهوم اساسی ترمودینامیک غیرقطعی نشان داد. از این نظر پیشینه استفاده از تئوری آنتروپی به بحث‌های ترمودینامیک مربوط می‌شود. اما علیرغم کم بودن پیشینه استفاده از تئوری آنتروپی در علوم هیدرولوژی و منابع آب این

کریمی گوگری و خلیفه (۱۳۹۲) ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های آب‌سنجی حوزه بختگان- مهارلو را بر پایه تئوری آنتروپی، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن گروهی از شاخص‌های آنتروپی همانند آنتروپی مرزی، آنتروپی مشترک، شاخص‌های اطلاعات ارسال شده و دریافت شده توسط هر ایستگاه و شاخص انتقال اطلاعات بین ایستگاه‌ها به تعیین ایستگاه‌های شاخص و مناطق ضعیف از نظر تبادل اطلاعات پرداختند. محمدرضاپور طبری و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی در دشت شهرکرد با استفاده از تئوری آنتروپی پرداختند. نتایج این مطالعه حاکی از کارایی مناسب این روش در ارزیابی کیفی منابع آب زیرزمینی بود. لندی و میرعباسی نجف‌آبادی (۱۳۹۵) ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی دشت خانمیرزا را با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته مورد بررسی قرار دادند. آنالیز حساسیت نحوه کلاس‌بندی اطلاعات نشان داد هرچند مقادیر شاخص‌های آنتروپی به تغییر فاصله کلاس‌بندی اطلاعات حساس هستند، اما رتبه‌بندی ایستگاه‌ها حساسیت بسیار کمی را از خود نشان دادند. جوهری‌پور (۱۳۹۵) به ارزیابی شبکه ایستگاه‌های هیدرومتری با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته و پهنه‌بندی آن در محیط GIS پرداخت. نتایج نشان داد که از میان ۱۴ ایستگاه انتخابی شبکه، ۴ ایستگاه وضعیت بسیار ضعیف و بحرانی داشته و قابل حذف می‌باشند. پورشهایی و همکاران (۲۰۱۸) شیوه‌ای جدید مبتنی بر روش فازی به منظور بهینه‌سازی چندهدفه ایستگاه‌های پایش کیفی آب مخزن را براساس شاخص انتقال اطلاعات توسعه دادند. نتایج ارزیابی ایستگاه‌های پایش کیفی سد کرخه با روش پیشنهادی نشان داد که برای پایش بهینه، ایستگاه‌های بیشتری مورد نیاز است.

با توجه به محدودیت‌های روش آنتروپی پیوسته، هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی سفیددشت با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته می‌باشد.

آنتروپی اثر خواهند گذاشت. حسین (۱۹۸۹) بر اساس تئوری آنتروپی به ارائه روشی ساده به منظور تخمین عدم قطعیت‌های هیدروژئولوژیکی منطقه‌ای در یک حوزه آبخیز رودخانه‌ای و همچنین طراحی روشی برای پایش شبکه بر اساس آنتروپی پرداخت. کاوچی (۲۰۰۱) ضمن به کارگیری روش تئوری آنتروپی برای کمی کردن عدم قطعیت شبکه پایش بارندگی سراسر ژاپن، نقشه هم‌آنتروپی آن کشور را تهیه و ارائه نمود و نشان داد که مقایسه این نقشه‌ها با نقشه‌های هم‌باران منطقه، آن‌ها را قادر به ارزیابی نسبی و دسته‌بندی پتانسیل منابع آب موجود ژاپن می‌کند. مغیر و سینگ (۲۰۰۲) موفق شدند با استفاده از تئوری آنتروپی انتقالی، روشی را برای طراحی شبکه پایش کیفی آب‌های زیرزمینی ارائه دهند. اغلب تحقیقات قبلی با استفاده از تئوری آنتروپی پیوسته انجام پذیرفته‌اند، این در حالی است که در آنتروپی پیوسته، فرض بر این است که توزیع احتمالاتی متغیرها از توزیع نرمال یا لوگ نرمال پیروی می‌کنند که این فرض در بسیاری از متغیرهای هیدروژئولوژیکی معتبر نیست. مغیر و سینگ (۲۰۰۳) به ارائه روشی برای ارزیابی کیفی سامانه‌های آب‌های زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته پرداختند. مارکوس و همکاران (۲۰۰۳) ضمن به کارگیری از تئوری آنتروپی و GIS به ارزیابی ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های پایش رودخانه‌ای در ایالت ایلینویز آمریکا و مقایسه نتایج حاصل از هر دو روش پرداختند و در نهایت یک مدل ترکیبی ارائه نمودند. کارآموز و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از تئوری آنتروپی به ارزیابی سامانه‌های پایش رودخانه‌ها پرداختند، همچنین به منظور افزایش عملکرد سامانه، موقعیت ایستگاه‌های جدیدی را ارائه دادند. میرعباسی و معیری (۱۳۸۹) شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی دشت اهر را با دو مدل آنتروپی گسسته و مدل همبستگی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل‌شده از این مطالعه نشان داد که مدل انتقال اطلاعات در ارائه تغییرات مکانی نسبت به مدل رگرسیون از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد.

مواد و روش‌ها

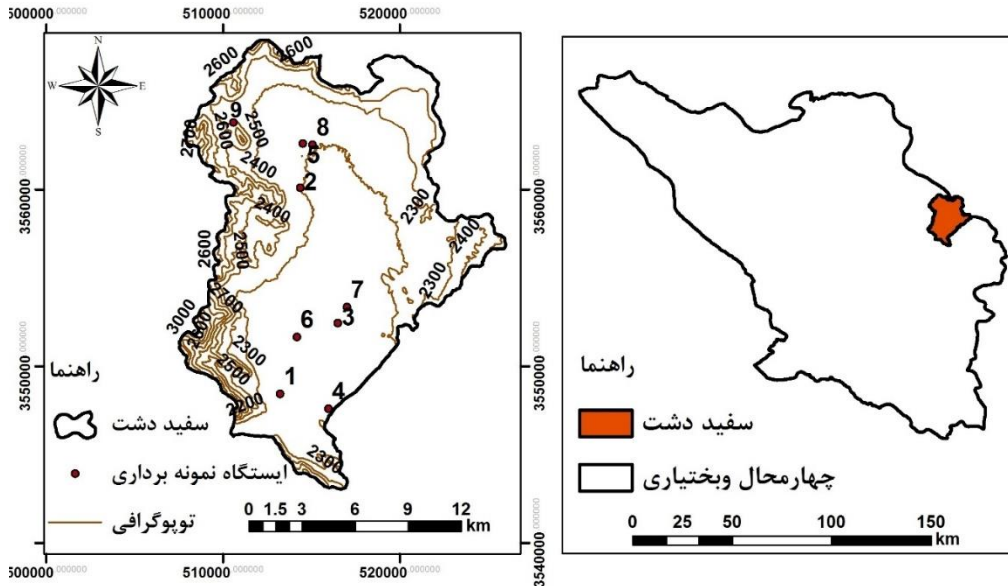
منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

آبخوان سفیددشت با وسعت ۲۰۱ کیلومترمربع در استان چهارمحال و بختیاری و ۳۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرکرد در عرض ۳۲ درجه و ۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی، در جلگه‌ای سبز و کوهستانی در ارتفاع ۲۱۵۰ متر از سطح دریا با میانگین بارندگی سالانه ۲۳۰ میلی‌متر واقع شده است (شکل ۱). حداقل دمای این دشت ۱/۷ درجه زیر صفر و حداکثر دمای آن ۲۴/۵ درجه بالای صفر می‌باشد. از این رو دارای آب و هوای معتدل کوهستانی می‌باشد. سفیددشت که از بزرگ‌ترین پهنه‌های وسیع و مسطح استان چهارمحال و بختیاری است، در سال‌های اخیر با تغییرات بسیار گسترده‌ای در کاربری اراضی، کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی مواجه بوده است. از آنجائی که آب زیرزمینی یکی از منابع اصلی تأمین آب کشاورزی و شرب در این منطقه می‌باشد، پایش کیفیت آب زیرزمینی از اهمیت بسزایی برخوردار است. با توجه به هزینه‌های سنگین نمونه‌برداری و آنالیز شیمیائی نمونه‌های کیفیت آب، تعیین نقاط پهنه نمونه‌برداری می‌تواند تا حد زیادی موجب کاهش تعداد نمونه‌های مورد نیاز و بالطبع کاهش هزینه‌ها گردد. همچنین با اصلاح شبکه پایش کیفی ممکن است بتوان با تعداد نقاط نمونه‌برداری کمتر، اطلاعات مورد نیاز را به دست آورد. بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه‌ای در مورد ارزیابی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی سفیددشت انجام نشده است. در این مطالعه، از داده‌های کیفی آب زیرزمینی سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۳ مربوط به ۶ حلقه چاه عمیق و ۲ قنات و یک

چشمه واقع در آبخوان سفیددشت استفاده شده است. داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز از شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری اخذ گردید. موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در سطح دشت در شکل ۱ نشان داده شده است.

تئوری آنتروپی

آنتروپی در اصل به معنای بی‌نظمی است؛ یعنی هرچقدر میزان بی‌نظمی یک سیستم بیشتر باشد گفته می‌شود آنتروپی سیستم بیشتر است. شانون (۱۹۴۸) نشان داد که وقایع با احتمال وقوع زیاد اطلاعات کمتری در اختیار می‌گذارند و برعکس هرچه قدر احتمال وقوع یک رخداد کمتر باشد، اطلاعات حاصل از آن بیشتر است. در یک تقسیم‌بندی می‌توان آنتروپی را به دو دسته آنتروپی گسسته و پیوسته تقسیم‌بندی نمود. در زیر به تعریف مختصر هرکدام از شاخص‌های آنتروپی در دو حالت پیوسته و گسسته پرداخته شده است (هارمانجی‌اغلو و آلپسلان، ۱۹۹۲). در آنتروپی پیوسته، فرض بر این است که توزیع احتمالاتی متغیرها، از توزیع نرمال یا لوگ‌نرمال پیروی می‌کند (سینگ، ۱۹۹۷). ولی در حالت گسسته با توجه به بازه تغییرات مقادیر متغیرها، اطلاعات موجود گسسته سازی شده و جداول توزیع متغیرها تهیه می‌شوند. سپس بر مبنای این جداول، مقادیر احتمال رخداد در هر حالت محاسبه می‌شود؛ اما تحقیقات اخیر همچون مغیر و سینگ (۲۰۰۳) نشان داد که تابع توزیع احتمال بسیاری از متغیرهای کمی و کیفی در سامانه‌های منابع آب از توزیع‌های نرمال یا لوگ‌نرمال تبعیت نمی‌کنند. آنتروپی گسسته راهی برای اصلاح این نقیصه مهم در کاربرد تئوری آنتروپی در مسائل مربوط به آب است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سفیددشت در استان چهارمحال و بختیاری و موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی.

$$H(x|y) = -\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln p(x_i|y_j) \quad [3]$$

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 (لوبه، ۱۹۹۶).

$$T(x, y) = -\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln \left[\frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)p(y_j)} \right] \quad [4]$$

انتقال اطلاعات همچنین می‌تواند با استفاده از یک شاخص انتقال اطلاعات نرمال که با ITI نشان داده می‌شود، بیان گردد که میزان اطلاعات استاندارد را که از یک مکان به مکان دیگری منتقل می‌شود را نشان می‌دهد.

$$ITI = \frac{T(x, y)}{H(x, y)} \quad [5]$$

در جدول ۱ طبقه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات ارائه شده است. می‌توان سه شاخص $R(i)$ ، $S(i)$ و $N(i)$ را به شرح زیر و به‌صورت یک تبدیل کسری آنتروپی x با نماد $R(x, y)$ که یک کاهش عدم قطعیت از x اگر y معلوم باشد و در واقع اطلاعات دریافتی توسط x از y نیز است، در آنتروپی گسسته تعریف نمود (مارکوس و همکاران، ۲۰۰۳):

طبق تعریف ارائه‌شده از آنتروپی توسط شانون (۱۹۴۸)، 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، هرکدام دارای یک احتمال گسسته وقوع $p(x_i)$ ، $p(x_i, y_j)$ 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 به‌صورت زیر می‌باشند:

آنتروپی مرزی

برای یک متغیر تصادفی x ، آنتروپی حاشیه‌ای، $H(x)$ ، به‌عنوان اطلاعات بالقوه متغیر به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

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

آنتروپی توأم

آنتروپی توأم نشان‌دهنده داده‌هایی است که هم در x و هم در y وجود دارند.

$$H(x, y) = -\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln p(x_i, y_j) \quad [2]$$

آنتروپی شرطی

برای دو متغیر تصادفی x و y ، آنتروپی شرطی نشان‌دهنده‌ی داده‌هایی از x است که در y موجود نیست (مغیر، ۲۰۰۳):

در تئوری آنتروپی در حالت گسسته، فواصل بازه‌ها با توجه به تغییرات مقادیر متغیرها تعیین می‌شوند (جدول ۲). سپس با استفاده از این جداول، مقادیر احتمال رخداد در هر حالت محاسبه می‌شود (جدول ۳). اعداد داخل جدول، تعداد تکرار مقادیر یک متغیر مثل x را در یک بازه مشخص، زمانی که متغیر y در یک بازه دیگر قرار دارد، نشان می‌دهد. البته این دو بازه یکسان در نظر گرفته شده‌اند. یکی از عوامل مؤثر در تعیین ارزش آنتروپی حاشیه‌ای، فاصله طبقاتی (اندازه و تعداد) مشخص شده، می‌باشد. در انجام تحلیل فراوانی، هرچه اندازه فاصله طبقاتی (SCI) کوچک‌تر باشد، تعداد کلاس‌ها (NCI) بیش‌تر می‌شود (ژو، ۱۹۹۶). برای انتخاب NCI هیچ قانون کلی وجود ندارد. ژو (۱۹۹۶) پیشنهاد کرد برای جلوگیری از چنین مشکلاتی برای محاسبه تعداد کلاس‌ها از رابطه زیر استفاده شود که به دستور استورجس^۱ معروف است:

$$NCI = 1 + 1.33Ln(n) \quad [12]$$

در رابطه بالا، n تعداد مشاهدات و NCI تعداد بازه‌ها (کلاس بندی) در سری زمانی متغیر موردنظر است. با توجه به مطالب مطرح شده در بالا و برای بررسی اثر کلاس‌بندی‌های مختلف بر مقادیر شاخص‌های آنتروپی و رتبه‌بندی ایستگاه‌ها در دشت موردنظر سه حالت کلاس‌بندی ۶، ۹ و ۱۲ در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

رتبه‌بندی ایستگاه‌های پایش کیفی آبخوان سفیددشت

با توجه به مطالب مطرح شده داده‌های جدید برای هر ایستگاه بر اساس رگرسیون چندگانه تولید و مقدار شاخص‌های آنتروپی در سه کلاس ۶، ۹، ۱۲ محاسبه شد. نتایج محاسبات مقادیر شاخص‌های آنتروپی در کلیه ایستگاه‌ها برای مقادیر مختلف n ، در جدول ۴ آمده است. در این جدول مقادیر شاخص‌های آنتروپی $JTI(i)$ ، $R(i)$ ، $S(i)$ و $N(i)$ در ۹ ایستگاه سفیددشت در سه کلاس مختلف ۶، ۹ و ۱۲ آورده شده است.

$$R(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(x)} \quad [6]$$

$$S(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(y)} \quad [7]$$

اطلاعات دریافتی و ارسال ایستگاه نام نیز این‌گونه

تعریف می‌شود:

$$R(i) = R(x(i), \hat{x}(i)) \quad [8]$$

که در آن، $x(i)$ بیان‌کننده داده‌های ایستگاه نام و $\hat{x}(i)$ از رابطه خطی زیر به دست می‌آید:

$$\hat{x}(i) = a(i) + \sum_{j=1}^{I-1} y_j(i) \times b_j(i) \quad [9]$$

که در آن، $y(i)$ ماتریس داده‌ها از تمام ایستگاه‌های دیگر و $a(i)$ و $b(i)$ پارامترهای رگرسیون بین ایستگاه نام و تمام ایستگاه‌های دیگر است که به صورت خطی برازش داده شده است. به‌گونه‌ای مشابه:

$$S(i) = S(x(i), \hat{x}(i)) \quad [10]$$

روابط فوق به‌ویژه (۸) و (۱۰) بیانگر آن است که مقادیر بزرگ‌تر $R(i)$ و $S(i)$ به ترتیب به معنای دریافت و ارسال بیشتر اطلاعات بین ایستگاه نام و سایر ایستگاه‌های شبکه و یا برقراری بهتر ارتباط بین این ایستگاه و سایر ایستگاه‌ها است. بدین ترتیب، مقادیر بزرگ‌تر $R(i)$ و $S(i)$ برای یک ایستگاه به معنای ارزش بیشتر ایستگاه یادشده است و حفظ ایستگاه مزبور در شبکه پایش توصیه می‌شود. اما شاخص $N(i)$ با نام اطلاعات خالص تبدالی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$N(i) = S(i) - R(i) \quad [11]$$

شاخص $N(i)$ از این نظر حائز اهمیت است که ارزش هر ایستگاه با این شاخص سنجیده می‌شود. شاخص $N(i)$ 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.

آنالیز حساسیت

در جدول ۵ به رتبه‌بندی شاخص‌های آنروپی بر اساس مقادیر شده است. پس از رتبه‌بندی صورت گرفته در بخش قبل به موجود در جدول ۴ پرداخته شده است. تعیین بحرانی‌ترین (ایستگاه‌های با اهمیت کم در پایش کیفی) و بهترین‌ترین (ایستگاه‌های با اهمیت زیاد در پایش کیفی) رتبه‌بندی صورت گرفته به طوری است که کمترین مقدار به کمترین رتبه و بیشترین مقادیر به بالاترین رتبه اختصاص داده شده است. همه ایستگاه‌ها پرداخته شد.

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات ITI (سینگ، ۱۹۹۷).

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

جدول ۲- جدول فراوانی مطلق ۶ کلاسه چاه‌های شماره ۱ و ۲.

| مجموع مشاهدات | چاه شماره ۱ | | | | | | چاه شماره ۲ |
|---------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| | ۹۹۲-۱۱۱۱ | ۸۷۳-۹۹۲ | ۷۵۴-۸۷۳ | ۶۳۵-۷۵۴ | ۵۱۶-۶۳۵ | ۳۹۷-۵۱۶ | |
| ۵ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۴ | ۱ | ۳۰۲-۳۶۹ |
| ۳ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۳۶۹-۴۳۵ |
| ۱۰ | ۰ | ۰ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | ۴۳۵-۵۰۱ |
| ۵ | ۱ | ۱ | ۲ | ۰ | ۱ | ۰ | ۵۰۱-۵۶۷ |
| ۳ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۵۶۷-۶۳۳ |
| ۲ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۶۳۳-۷۰۰ |
| ۲۸ | ۲ | ۳ | ۶ | ۶ | ۸ | ۳ | مجموع مشاهدات |

جدول ۳- جدول احتمال توأم ۶ کلاسه چاه‌های شماره ۱ و ۲.

| مجموع احتمالات | چاه شماره ۱ | | | | | | چاه شماره ۲ |
|----------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| | ۹۹۲-۱۱۱۱ | ۸۷۳-۹۹۲ | ۷۵۴-۸۷۳ | ۶۳۵-۷۵۴ | ۵۱۶-۶۳۵ | ۳۹۷-۵۱۶ | |
| ۰/۱۷۹ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۱۴۳ | ۰/۰۳۶ | ۳۰۲-۳۶۹ |
| ۰/۱۰۷ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۳۶ | ۳۶۹-۴۳۵ |
| ۰/۳۵۷ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۰/۱۴۳ | ۰/۱۰۷ | ۰/۰۷۱ | ۰/۰۳۶ | ۴۳۵-۵۰۱ |
| ۰/۱۷۹ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۷۱ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۰۰ | ۵۰۱-۵۶۷ |
| ۰/۱۰۷ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۵۶۷-۶۳۳ |
| ۰/۰۷۱ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۰۰ | ۰/۰۰۰ | ۶۳۳-۷۰۰ |
| ۱/۰۰۰ | ۰/۰۷۱ | ۰/۱۰۷ | ۰/۲۱۴ | ۰/۲۱۴ | ۰/۲۸۶ | ۰/۱۰۷ | مجموع احتمالات |

ضعیف‌ترین ایستگاه، ایستگاهی است که در مجموع شاخص‌های ذکر شده رتبه‌بندی شاخص‌های شاخص انتقال اطلاعات، شاخص اطلاعات ارسال شده، شاخص اطلاعات دریافت شده و شاخص اطلاعات خالص تبادلی کمترین رتبه‌ها را داشته باشد و بهترین ایستگاه، ایستگاهی است که در مجموع شاخص‌های ذکر شده بیشترین رتبه و اهمیت را داشته باشد. در حالتی که $n=6$ است چاه خیبر صادقی (ایستگاه شماره ۲) در رتبه‌بندی انجام شده از نظر اطلاعات ارسالی و دریافتی از سایر ایستگاه‌ها و همچنین

مقادیر شاخص‌های آنتروپی نسبت به تعداد کلاس‌ها است. این در حالی است که این حساسیت در مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های محاسبه شده بسیار کمتر است و حداقل می‌توان گفت که آهنگ این تغییرات در هر سه کلاس مورد بررسی بسیار نزدیک به هم و دارای شباهت‌های زیادی است.

لذا با در نظر گرفتن حداقل محاسبات، حالت ۶ کلاسه ($n=6$) برای دشت قابل توصیه است که این مقدار با رابطه استورجس نیز مطابقت دارد. همچنین با بررسی تغییرات رتبه‌بندی ایستگاه‌ها $N(i)$ ، تغییرات زیادی را با چهار شاخص $(S(i), R(i), ITI(i))$ و $H(X(i))$ داراست. لذا می‌توان نتیجه گرفت این چهار شاخص نسبت به تغییرات فاصله دسته‌بندی اطلاعات از حساسیت کمتری برخوردار می‌باشند. نتایج در دشت مورد مطالعه با نتایج مارکوس و همکاران (مارکوس و همکاران، ۲۰۰۳) در مورد تغییر میزان شاخص‌های آنتروپی همخوانی دارد، در حالی که نتایج میشرای و کولیبالی (میشرای و کولیبالی، ۲۰۱۰) در مورد بی‌اثر بودن تعداد کلاس‌بندی‌ها، n در رتبه‌بندی ایستگاه‌ها کاملاً تأیید نمی‌شود.

تراکم ایستگاه‌های دشت

به‌منظور مشاهده تغییرات مکانی شاخص آنتروپی انتقال اطلاعات در دشت مورد مطالعه از درون‌یابی در سطح دشت استفاده شده است (شکل ۳). با توجه به نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف درون‌یابی و توپوگرافی منطقه، از روش Spline به منظور مکان‌یابی استفاده شده است. این روش با استفاده از تعداد خاصی از نقاط دارای مقادیر اندازه‌گیری شده همسایه، مقادیر را برای نقاط فاقد اندازه‌گیری به دست می‌آورد. بر اساس پهنه‌بندی انجام شده امکان تشخیص احداث و یا تعطیلی ایستگاه‌ها با توجه به درجه اهمیتی که بر اساس مقدار $ITI(i)$ دارند، رسیدن به بهینه‌ترین شبکه پایش و مطلوب‌ترین نتیجه امکان‌پذیر است. پهنه‌بندی صورت گرفته بر اساس جدول ۱ طبقه‌بندی انتقال اطلاعات در پنج سطح اهمیتی صورت گرفته است (میشرای و کولیبالی، ۲۰۱۰).

انتقال اطلاعات ضعیف‌ترین عملکرد را دارد که سبب شده این چاه بحرانی‌ترین ایستگاه در محدوده مطالعاتی باشد و چاه اسکندر صفرپور (ایستگاه شماره ۱) از لحاظ شاخص‌های آنتروپی اطلاعات ارسالی، اطلاعات دریافتی و انتقال اطلاعات بهترین عملکرد را در بین ۹ ایستگاه مورد بررسی دارد. لذا می‌توان با قاطعیت این چاه را به‌عنوان قوی‌ترین ایستگاه از لحاظ شاخص‌های آنتروپی نامید. در صورتی که تعداد کلاس‌ها را ۹ در نظر بگیریم ضعیف‌ترین و بحرانی‌ترین ایستگاه در این حالت، چاه علی مدد طهماسبی (ایستگاه شماره ۵) است. چاه سلطانعلی شیرانی (ایستگاه شماره ۴) نیز که در حالت ۶ کلاسه در رتبه‌بندی صورت گرفته جز ایستگاه‌های بهینه محسوب می‌شد، در حالت ۹ کلاسه نیز بهینه‌ترین ایستگاه است. پس از تحلیل رتبه‌بندی چاه‌ها در حالت ۱۲ کلاسه، چاه سید حسن حسینی (ایستگاه شماره ۶) و قنات شادیکوار (ایستگاه شماره ۸) که جز ضعیف‌ترین ایستگاه‌ها می‌باشند؛ مانند دو حالت قبل در حالت ۱۲ کلاسه نیز چاه اسکندر صفرپور جز بهینه‌ترین ایستگاه در دشت می‌باشد.

آنالیز حساسیت دسته‌بندی اطلاعات

طبق پژوهش‌های مارکوس و همکاران (۲۰۰۳) تغییر تعداد کلاس‌ها بر میزان شاخص‌های آنتروپی تأثیر می‌گذارد. در حالی که تحقیقات میشرای و کولیبالی (۲۰۱۰) در کانادا تغییر در تعداد کلاس‌ها را روی رتبه‌بندی ایستگاه‌ها بی‌تأثیر می‌داند. در این پژوهش نیز حساسیت فاصله دسته‌بندی‌ها بر مقادیر شاخص‌های آنتروپی $(S(i), R(i), ITI(i))$ و $N(i)$ در ۹ ایستگاه سفیددشت در سه کلاس مختلف ۶، ۹ و ۱۲ مورد بررسی قرار گرفت به منظور درک بهتر اثر کلاس‌بندی بر روی محاسبات شاخص‌های آنتروپی در آبخوان سفیددشت نمودار تغییرات رتبه شاخص‌های در نظر گرفته شده در شکل ۲ آورده شده است. لذا با توجه به مطالب ذکر شده در بالا و نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت شاخص‌های آنتروپی در کلیه ایستگاه‌های سفیددشت برای مقادیر مختلف n ، نتایج حاکی از حساسیت رتبه‌بندی

جدول ۴- نتایج تأثیر تعداد کلاس بندی بر روی مقادیر شاخص های آنتروپی آبخوان سفیددشت.

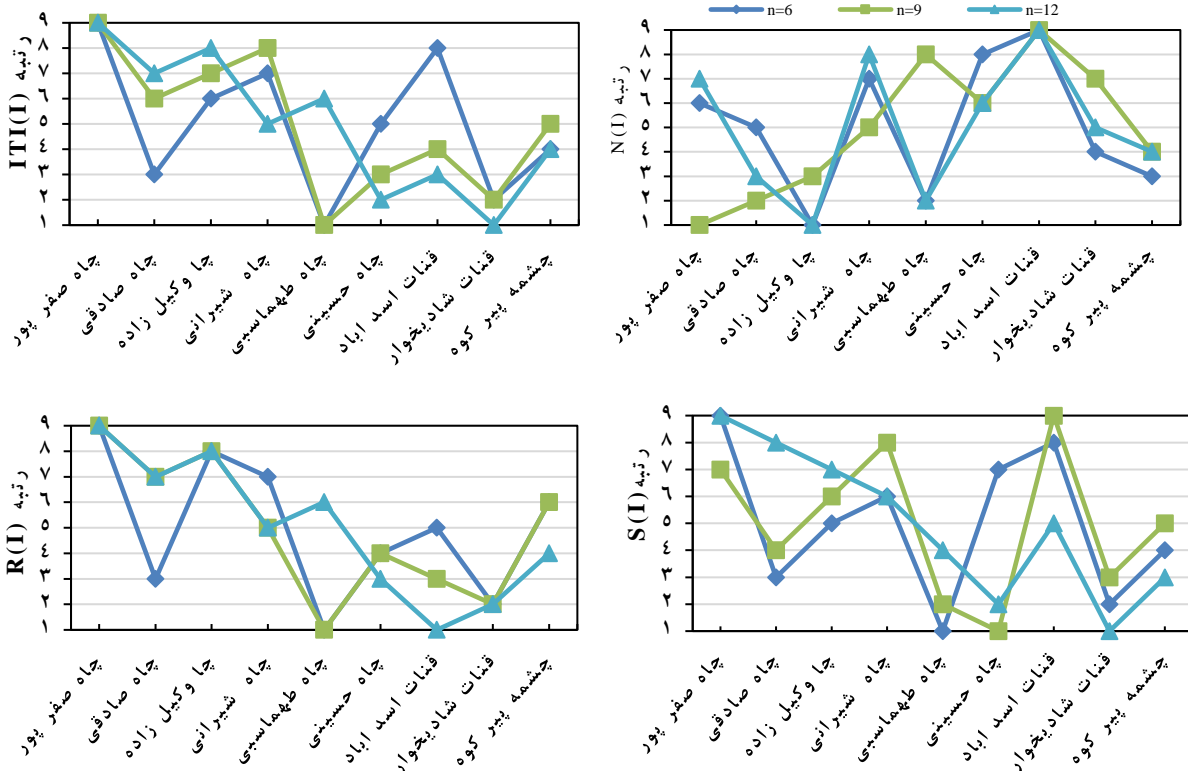
| n=۱۲ | | | | n=۹ | | | | n=۶ | | | | نام ایستگاه | شماره ایستگاه |
|-----------------------|-----------------|-----------|----------|-----------------------|-----------------|-----------|----------|-----------------------|-----------------|-----------|----------|-------------|---------------|
| $H(x(i), \bar{x}(i))$ | $H(\bar{x}(i))$ | $H(x(i))$ | $ITI(i)$ | $H(x(i), \bar{x}(i))$ | $H(\bar{x}(i))$ | $H(x(i))$ | $ITI(i)$ | $H(x(i), \bar{x}(i))$ | $H(\bar{x}(i))$ | $H(x(i))$ | $ITI(i)$ | | |
| ۲/۹۱۷ | ۲/۱۴۵ | ۲/۱۹۹ | ۰/۴۸۹ | ۳/۰۱۶ | ۲/۰۶۷ | ۱/۹۸۶ | ۰/۳۴۴ | ۲/۴۷۲ | ۱/۶۵۰ | ۱/۶۷۹ | ۰/۳۴۷ | صفرپور | ۱ |
| ۳/۲۸۳ | ۲/۳۳۳ | ۲/۳۲۳ | ۰/۴۱۸ | ۳/۰۸۵ | ۲/۰۳۲ | ۱/۹۹۷ | ۰/۳۰۶ | ۲/۹۳۶ | ۱/۶۸۵ | ۱/۷۰۱ | ۰/۱۵۳ | صادقی | ۲ |
| ۲/۸۹۶ | ۲/۱۴۵ | ۱/۹۷۹ | ۰/۴۲۴ | ۲/۸۴۹ | ۱/۹۸۵ | ۱/۷۳۸ | ۰/۳۰۶ | ۲/۶۰۲ | ۱/۶۲۵ | ۱/۴۴۰ | ۰/۱۷۸ | وکیل زاده | ۳ |
| ۳/۱۳۴ | ۲/۱۴۵ | ۲/۲۰۹ | ۰/۳۸۹ | ۲/۹۸۶ | ۱/۹۰۶ | ۲/۰۳۸ | ۰/۳۲۱ | ۲/۷۳۲ | ۱/۵۵۱ | ۱/۶۶۷ | ۰/۱۷۸ | شیرانی | ۴ |
| ۲/۸۸۷ | ۲/۰۸۹ | ۱/۹۳۶ | ۰/۳۹۴ | ۲/۸۸۷ | ۱/۷۲۱ | ۱/۷۸۲ | ۰/۲۱۳ | ۲/۵۶۲ | ۱/۵۰۵ | ۱/۳۷۲ | ۰/۱۲۳ | طهماسبی | ۵ |
| ۳/۱۳۴ | ۱/۹۸۶ | ۲/۰۶۰ | ۰/۲۹۱ | ۳/۰۳۵ | ۱/۸۵۶ | ۱/۸۴۸ | ۰/۲۲۰ | ۲/۴۸۴ | ۱/۳۵۷ | ۱/۵۶۵ | ۰/۱۷۶ | حسینی | ۶ |
| ۳/۰۱۶ | ۱/۶۲۳ | ۲/۲۸۳ | ۰/۲۹۵ | ۲/۸۴۹ | ۱/۴۸۸ | ۲/۱۱۶ | ۰/۲۶۵ | ۲/۵۵۲ | ۱/۳۲۰ | ۱/۷۱۳ | ۰/۱۸۸ | اسدآباد | ۷ |
| ۳/۱۱۵ | ۱/۹۳۹ | ۲/۰۰۷ | ۰/۲۶۷ | ۲/۸۴۹ | ۱/۷۲۹ | ۱/۷۳۴ | ۰/۲۱۶ | ۲/۴۶۵ | ۱/۳۹۸ | ۱/۳۹۴ | ۰/۱۳۳ | شادبخوار | ۸ |
| ۳/۱۶۵ | ۲/۰۷۶ | ۲/۰۹۵ | ۰/۳۱۸ | ۳/۰۳۵ | ۲/۰۰۴ | ۱/۹۵۶ | ۰/۳۰۵ | ۲/۷۲۹ | ۱/۶۱۹ | ۱/۵۶۵ | ۰/۱۶۷ | پیرکوه | ۹ |

جدول ۵- نتایج تأثیر تعداد کلاس بندی بر روی رتبه شاخص های آنتروپی آبخوان سفیددشت.

| n=۱۲ | | | | n=۹ | | | | n=۶ | | | | نام ایستگاه | شماره ایستگاه |
|-----------------------|-----------------|-----------|----------|-----------------------|-----------------|-----------|----------|-----------------------|-----------------|-----------|----------|-------------|---------------|
| $H(x(i), \bar{x}(i))$ | $H(\bar{x}(i))$ | $H(x(i))$ | $ITI(i)$ | $H(x(i), \bar{x}(i))$ | $H(\bar{x}(i))$ | $H(x(i))$ | $ITI(i)$ | $H(x(i), \bar{x}(i))$ | $H(\bar{x}(i))$ | $H(x(i))$ | $ITI(i)$ | | |
| ۳ | ۸ | ۶ | ۹ | ۱ | ۹ | ۶ | ۹ | ۸ | ۷ | ۷ | ۹ | صفرپور | ۱ |
| ۹ | ۹ | ۹ | ۷ | ۲ | ۸ | ۷ | ۶ | ۱ | ۸ | ۸ | ۳ | صادقی | ۲ |
| ۲ | ۷ | ۲ | ۸ | ۳ | ۶ | ۲ | ۷ | ۴ | ۶ | ۳ | ۶ | وکیل زاده | ۳ |
| ۶ | ۶ | ۷ | ۵ | ۴ | ۵ | ۸ | ۸ | ۲ | ۵ | ۶ | ۷ | شیرانی | ۴ |
| ۱ | ۵ | ۱ | ۶ | ۵ | ۲ | ۳ | ۱ | ۵ | ۴ | ۱ | ۱ | طهماسبی | ۵ |
| ۷ | ۳ | ۴ | ۲ | ۶ | ۴ | ۴ | ۳ | ۷ | ۲ | ۴ | ۵ | حسینی | ۶ |
| ۴ | ۱ | ۸ | ۳ | ۷ | ۱ | ۹ | ۴ | ۶ | ۱ | ۹ | ۸ | اسدآباد | ۷ |
| ۵ | ۲ | ۳ | ۱ | ۸ | ۳ | ۱ | ۲ | ۹ | ۳ | ۲ | ۲ | شادبخوار | ۸ |
| ۸ | ۴ | ۵ | ۴ | ۹ | ۷ | ۵ | ۵ | ۳ | ۹ | ۵ | ۴ | پیرکوه | ۹ |

۳/۵ درصد) از مساحت دشت از نظر تعداد ایستگاه وضعیت مطلوبی برخوردار می‌باشد. طبق نتایج حاصل شده از پهنه‌بندی در حالت ۱۲ کلاسه، مساحتی برابر با ۱۶۸/۷ کیلومتر مربع از سطح دشت که ۷۶/۳ درصد از سطح کل دشت را تشکیل می‌دهد، دارای ایستگاه‌های پایش کیفی کمتر از تعداد مورد نیاز دشت است. حدود ۲۳ درصد از سطح دشت نیز از درجه اهمیت متوسط و یا بالای متوسط برخوردار است. به‌طور کلی از نتایج به‌دست‌آمده از هر سه حالت کلاس‌بندی چنین می‌توان استنباط کرد که بیش‌تر از ۹۰ درصد از سطح دشت دارای تبادل اطلاعات کم و ضعیف است که باید برای این بخش از شبکه پایش دشت تجدید نظر کرد.

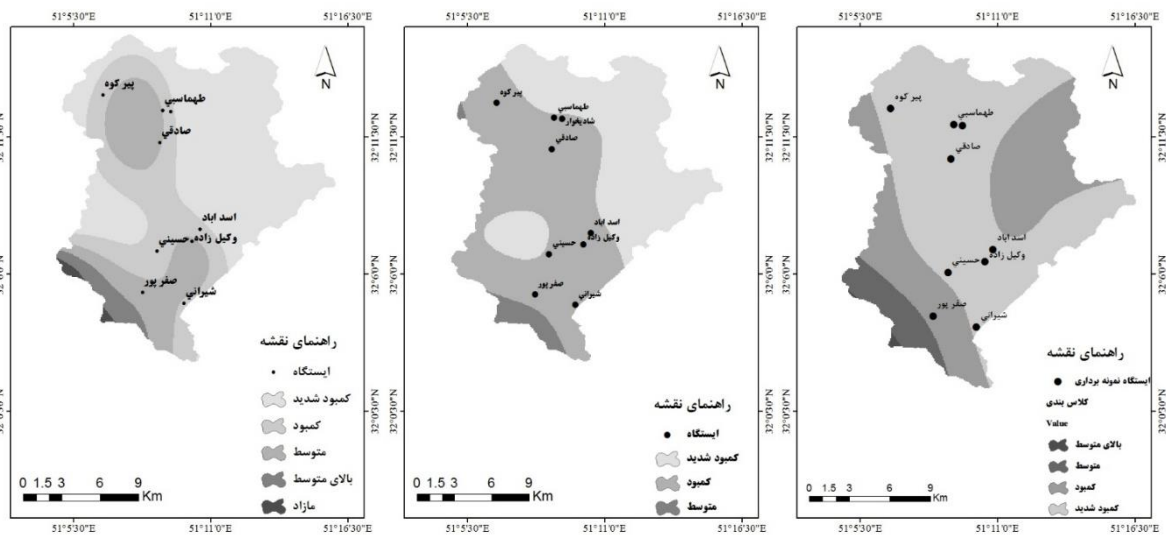
نقشه پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات در هر سه حالت مطرح شده در شکل ۳ آمده است. همچنین نتایج به دست آمده از پهنه‌بندی‌های صورت گرفته شده برای شاخص انتقال اطلاعات در هر سه کلاس در جدول ۶ ارائه شده‌اند. در حالت ۶ کلاسه، حدود ۹۴ درصد از سطح دشت نیاز به تأسیس ایستگاه‌های پایش دارد و تنها حدود ۶ درصد از وسعت دشت از نظر تعداد ایستگاه‌های پایش در وضعیت مطلوب می‌باشد. در حالت $n=9$ همانند حالت قبل بخش اعظم مساحت دشت نیازمند احداث ایستگاه‌های بیشتر پایش کیفی هست. طبق این نتایج ۹۶/۵ درصد از سطح دشت دارای کمبود و یا کمبود شدید ایستگاه پایش است و مابقی سطح دشت که درصد کمی (حدود



شکل ۲- نتایج آنالیز حساسیت مقدار شاخص‌های آنتروپی آبخوان سفید دشت

جدول ۶- نتایج پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات ITI(i) در سفیددشت

| n=۱۲ | | n=۹ | | n=۶ | | درجه اهمیت منطقه |
|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------|----------|------------------|
| مساحت (KM ²) | درصد (%) | مساحت (KM ²) | درصد (%) | مساحت (KM ²) | درصد (%) | |
| ۱۳۱/۳۰ | ۵۰/۶۵ | ۱۱۲/۹۲ | ۴۳/۵۴ | ۱۵۴/۹۰ | ۵۹/۷۱ | کمبود شدید |
| ۶۶/۳۸ | ۲۵/۶۱ | ۱۳۷/۶۰ | ۵۳/۰۵ | ۸۷/۶۵ | ۳۳/۷۹ | کمبود |
| ۵۰/۸۳ | ۱۹/۶۱ | ۸/۸۷ | ۳/۴۱ | ۱۶/۳۱ | ۶/۲۸۷ | متوسط |
| ۹/۱۰ | ۳/۵۰ | - | - | ۰/۵۴ | ۰/۲۱۰ | بالای متوسط |
| ۰/۶۲ | ۱/۶۲ | - | - | - | - | مازاد |



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۳- پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات ITI(i) در سفیددشت (الف) ۶ کلاسه، (ب) ۹ کلاسه، (ج) ۱۲ کلاسه)

نتیجه‌گیری

سفیددشت برای مقادیر مختلف n، حاکی از حساسیت رتبه‌بندی مقادیر شاخص‌های آنتروپی نسبت به تعداد کلاس‌ها بود. این در حالی است که این حساسیت در مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های محاسبه شده بسیار کمتر است. پهنه‌بندی‌ها شاخص انتقال اطلاعات در سه کلاس مختلف ۶، ۹ و ۱۲ نشان داد که در حالت ۶ کلاسه، حدود ۹۴ درصد از سطح دشت نیاز به تأسیس ایستگاه‌های پایش دارد و تنها حدود ۶ درصد از وسعت دشت از نظر تعداد ایستگاه‌های پایش در وضعیت مطلوب می‌باشد. در حالت ۹ کلاسه ۹۶/۵ درصد از سطح دشت دارای کمبود و یا کمبود شدید ایستگاه پایش است. در حالت ۱۲ کلاسه، ۷۶/۳ درصد از سطح کل دشت دارای ایستگاه‌های پایش

در این مطالعه، کارایی شبکه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی سفیددشت در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، مقادیر شاخص‌های آنتروپی $ITI(i)$ ، $R(i)$ ، $S(i)$ و $N(i)$ در ۹ ایستگاه سفیددشت در سه کلاس مختلف ۶، ۹ و ۱۲ محاسبه شد. نتایج نشان داد که چاه اسکندر صفرپور بهینه‌ترین ایستگاه پایش دشت و چاه علی مدد طهماسبی و قنات شادبخوار ضمن کسب رتبه‌های پایین در شبکه، وضعیت بحرانی داشته و ادامه فعالیت آن‌ها مستلزم تجدیدنظر کلی است. همچنین نتایج آنالیز حساسیت شاخص‌های آنتروپی در کلیه ایستگاه‌های

مدیریت منابع آب اراضی ساحلی، ساری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

- Chapman, T.G., 1986. Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance. *Journal of Hydrology*. 85: 111-126.
- Harmancioglu, N.B., Alpaslan, N., 1992. Water quality monitoring network design: A problem of multiobjective decision making. *Water Resources Bulletin*. 28: 179- 192.
- Husain, T., 1989. Hydrologic uncertainty measure and network design. *Water Resources Bulletin*. 25: 527-534.
- Karamouz, M., Khajehzadeh Nokhandan, A., Kerachian, R., 2006. Design of river water quality monitoring networks using an entropy based approach: a case study. *World Water and Environmental Resources Congress, Nebraska, USA*.
- Kawachi, T., 2001. Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan. *Journal of Hydrology*. 246: 36-44.
- Markus, M., Vernon, K.H., Tasker, G.D., 2003. Entropy and generalized least square methods in assessment of the regional value of stream gages. *Journal of Hydrology*. 283: 107-121.
- Mishra, A.K., Coulibaly, P., 2010. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*. 380: 420-437.
- Mogheir, Y., Singh, V.P., 2002. Application of information theory to groundwater quality monitoring system. *Water Resources Management*. 16(1): 37-49.
- Mogheir, Y. and Singh, V.P., 2003. Specification of information needs for groundwater management planning in developing country. *Groundwater Hydrology*. 2: 3-20.
- Lubbe, C., 1996. *Information Theory*, Cambridge: Cambridge University Press. 364 p.
- Pourshahabi, S., Nikoo, M.R., Raei, E., Adamowski, J.F., 2018. An entropy-based approach to fuzzy multi-objective optimization of reservoir water quality monitoring networks considering uncertainties. *Water Resources Management*. 32(13): 4425-4443.
- Shannon, C.E., 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*. 27: 379-423
- Singh, V.P., 1997. The use of entropy in hydrology and water resources. *Hydrological Process*. 11: 587-626.
- Zhu, Q., Shen, L., Liu, P., Zhao, Y., Yang, Y., Huang, D., 2015. Evolution of the water resources system based on synergetic and Entropy Theory. *Polish Journal of Environmental Studies*. 24(6): 2727- 2738.
- Obifuna, G., and Shariff, A., 2010. Assessment of Shallow Ground water Quality of Pindiga Gombe Area, Yola Area, NE, Nigeria for Irrigation and Domestic Purposes. *Research Journal of Environmental and Earth*. 24(6): 2727- 2738.
- Schmidt, S.G., 2013. Quantification of long - term Wastewater impacts on karst groundwater.

کیفی کمتر از تعداد موردنیاز دشت است. حدود ۲۳ درصد از سطح دشت نیز از درجه اهمیت متوسط و یا بالای متوسط برخوردار است. به طور کلی از نتایج به دست آمده از هر سه حالت کلاس بندی چنین می توان استنباط کرد که بیش تر از ۹۰ درصد از سطح دشت دارای تبادل اطلاعات کم و ضعیف است. لذا به نظر می رسد که شبکه پایش این دشت نیاز به بازنگری اساسی دارد.

منابع

- جوهری پور، م.، ۱۳۹۵. ارزیابی شبکه ایستگاه های هیدرومتری با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته و پهنه بندی آن در محیط GIS. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- حسینی، ز.، میرعباسی نجف آبادی، ر. قاسمی، ا.ر.، ۱۳۹۷. پایش بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت خانمیرزا با استفاده از روش تصمیم گیری درختی. هیدروژئولوژی. دوره ۳، شماره ۱، ۹۹-۱۱۰.
- کریمی گوغری، ش.، خلیفه، س.، ۱۳۹۲. ارزیابی کارایی شبکه های آب سنجی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته (مطالعه موردی: حوزه بختگان - مهارلو). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، جلد ۳، ۳۴-۵۰.
- لندی، ک.، میرعباسی نجف آبادی، ر.، ۱۳۹۵. ارزیابی کارایی شبکه پایش کیفی دشت خانمیرزا با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته. هیدروژئولوژی، دوره ۱، شماره ۲، ۳۸-۴۷.
- محمدرضای پور طبری، م.، ۱۳۹۶. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش های مقدار آنتروپی وزنی مشترک (EWOV) و تحلیل مجموعه های جفت شده (SPA) مطالعه موردی، دشت سرایان. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، جلد ۴، شماره ۳، ۱۸-۲۹.
- میرعباسی، ر.، معیری، م.، ۱۳۸۹. ارزیابی شبکه پایش کیفیت آب زیرزمینی دشت اهر بر اساس تئوری آنتروپی. اولین همایش ملی