

Evaluation of Groundwater Quality Monitoring Network in Khanmirza Plain Using the Discrete Entropy Theory

Kobra Landi¹, Rasoul Mirabbasi Najafabadi^{*2}

Abstract

Quality of recorded information in a monitoring network plays an important role in sustainable design and operation of water resources systems. For an optimal monitoring network design, they should be evaluated periodically based on the information needs and future water resources development plans. In this study, regional values of groundwater quality monitoring network stations in Khanmirza plain were investigated using the discrete entropy theory. Discrete entropy can overcome the limitations regarding data normality assumption in past research. Several entropy parameters such as marginal entropy, joint entropy, indices of sent and received information by each station and transinformation index between stations, were calculated to identify essential stations and poor regions based on the amount of information exchanges. Sensitivity analysis of discrete intervals shows that the entropy indices are sensitive to change of interval length, but the ranks of stations appear to be less sensitive. Validation result confirms that the entropy has a good performance in quantifying the regional values of sampling wells in a monitoring network and comparison with the correlation coefficient of information between stations shows that this coefficient can be used for determining the essential and unnecessary stations in the region.

Keywords: Correlation coefficient, Discrete intervals, Entropy theory, Monitoring networks, Transinformation index.

Received: 2016/06/27
Accepted: 2017/01/04

ارزیابی کارایی شبکه پایش کیفی آب- زیرزمینی دشت خانمیرزا با استفاده از فرضیه آنتروپی گسسته

کبری لندی^۱، رسول میرعباسی نجف آبادی^{*۲}

چکیده

کیفیت مناسب اطلاعات ثبت شده در شبکه‌های پایش در طراحی و بهره برداری پایدار از پروژه‌های آبی نقش مهمی ایفا می‌کند. از این نظر جهت ایجاد شبکه‌ای بهینه و کارآمد، شبکه‌های پایش بایستی به صورت دورم‌ای با توجه به نیاز و طرح‌های توسعه منابع آب پیش روی، مورد ارزیابی قرار گیرند. در این پژوهش، ارزش منطقه‌ای ایستگاه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی دشت خانمیرزا با استفاده از تئوری آنتروپی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از تئوری آنتروپی گسسته، محدودیت نرمال بودن داده‌ها در تحقیقات قبلی را مرتفع می‌نماید. 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 ایستگاه به تعیین ایستگاه‌های شاخص و مناطق ضعیف از نظر تبادل اطلاعات در شبکه پایش دشت پرداخته شد. آنالیز حساسیت نحوه کلاس‌بندی اطلاعات نشان می‌دهد که مقادیر شاخص‌های آنتروپی به تغییر فاصله کلاس‌بندی اطلاعات حساس، اما رتبه‌بندی ایستگاه‌ها حساسیت بسیار کمی را از خود نشان می‌دهد. نتایج صحت سنجی حاکی از این است که تئوری آنتروپی قابلیت خوبی جهت کمی کردن ارزش منطقه‌ای چاه‌های نمونه برداری در یک شبکه پایش دارد و مقایسه آن با ضریب همبستگی اطلاعات بین ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که جهت تعیین مؤثرترین و ضعیف‌ترین ایستگاه‌ها می‌توان از روش ساده ضریب همبستگی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: تئوری آنتروپی، شاخص انتقال اطلاعات، شبکه پایش، ضریب همبستگی، فاصله کلاس‌بندی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۵

1- MSc student of Water Resources Engineering, Shahrekord University.

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University E-mail: mirabbasi_r@yahoo.com

*- Corresponding Author

۱- کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه شهرکرد.

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول

مقدمه

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 هم-آنتروپی ژاپن را تهیه و ارائه نمود و نشان داد با مقایسه این نقشه‌ها با نقشه‌های هم-باران 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. تمامی تحقیقات ارائه شده 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 هیدرولوژیکی نادرست است. 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 سیستم‌های پایش رودخانه‌ها پرداختند، همچنین به منظور افزایش عملکرد سامانه، موقعیت ایستگاه‌های جدیدی را ارائه دادند. سرلک و همکاران (۲۰۰۶) از تئوری آنتروپی برای ارزیابی و انتخاب ایستگاه‌های شبکه آب‌سنجی استفاده کردند. همچنین با بررسی توزیع‌های نرمال، لوگ نرمال و گاما به رتبه‌بندی بهینه‌ترین ایستگاه‌ها پرداختند. چن و همکاران (۲۰۰۸) موفق شدند با به کارگیری دو روش تئوری آنتروپی و زمین‌آمار به تعیین تعداد و توزیع مکانی بهینه ایستگاه‌های باران‌سنجی در شمال تایوان بپردازند. آنها به منظور درون‌یابی مقادیر مشاهده شده ماهانه بارندگی از روش زمین‌آمار استفاده نمودند تا با استفاده از مقادیر به دست آمده به بررسی تغییرات مکانی بارندگی و تعیین مقدار بارندگی در مکان‌های جدید باران‌سنج‌ها بپردازند و آنها با استفاده از آنتروپی، تعداد کافی باران‌سنج‌ها را مشخص نمودند و همچنین با محاسبه آنتروپی انتقال اطلاعات و آنتروپی مشترک درجه اهمیت ایستگاه‌ها را تعیین کردند. معصومی و

پایش کیفی منابع آب یک فرآیند سیستماتیک شامل جمع‌آوری، نگهداری و آنالیز نمونه‌های آب هست که به منظور شناسایی خصوصیات کمی و کیفی منابع آب صورت می‌گیرد. منظور از طراحی شبکه، بهینه‌سازی فنون نمونه‌برداری، فواصل زمانی نمونه‌برداری، نقاط نمونه‌برداری و بالاخره تعداد و نوع متغیرهای کیفی است که باید بر اساس اهداف برنامه پایش، مورد پایش قرار گیرند.

با توجه به پیچیدگی سامانه‌های منابع آب، در بسیاری از موارد تصمیم‌ها بدون اطلاعات کافی گرفته می‌شوند. معمولاً در تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر عدم قطعیت، تمایل به تصمیم‌گیری محافظه‌کارانه وجود دارد. تقریباً در تمامی موارد، اطاعات کافی برای توصیف رفتار اتفاقی چنین سامانه‌هایی در دسترس نیست. نمونه‌گیری‌های با مقیاس کوچک و اطلاعات کم، تخمین توابع توزیع چگالی احتمالی متغیرهای سامانه به وسیله روش‌های احتمالاتی را دشوار می‌کند. با توجه به نگرش آماری-احتمالاتی، از تئوری آنتروپی می‌توان در بررسی وضعیت ایستگاه‌ها، ارتباط ایستگاه‌ها باهم، حذف ایستگاه‌های مازاد یا اضافه نمودن ایستگاه جدید و همچنین فاصله بهینه بین ایستگاه‌ها استفاده کرد. همچنین آنتروپی یکی از روش‌های کارآمد در تحلیل عدم قطعیت در سامانه‌های منابع آب محسوب می‌شود. استفاده از تئوری آنتروپی به عنوان یک روش آماری به قبل از قرن بیستم برمی‌گردد. اما به دلیل پیچیدگی-های مفهومی و مشکلات محاسباتی این روش، محققان در نیمه اول قرن بیستم رغبت چندانی به استفاده از آن نداشتند. شانون (۱۹۴۸) تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه استفاده از تئوری آنتروپی در زمینه‌های مختلف مثل ارزیابی سری‌های زمانی اقتصادی و مباحث اکولوژیکی انجام داد. 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 آنتروپی اثر خواهند گذاشت. حسین (۱۹۸۹) بر اساس تئوری آنتروپی به ارائه روشی ساده به منظور تخمین عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی منطقه‌ای در یک حوزه آبخیز رودخانه‌ای و

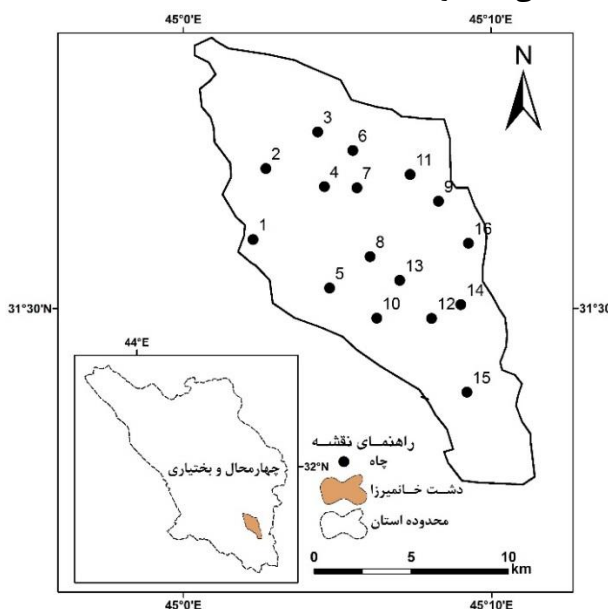
کیلومترمربع در جنوب شرق استان چهارمحال و بختیاری قرار دارد. به لحاظ تقسیمات سیاسی در محدوده شهرستان لردگان و به طور دقیق تر در بخش خانمیرزا قرار گرفته است. این شهرستان با وسعت ۳۴۲۳ کیلومترمربع حدود ۲۰/۷ درصد از کل مساحت استان را تشکیل می دهد. شهرستان مذکور بین طول های شرقی ۴۹ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه و عرض های شمالی ۳۰ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۶ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). متوسط بارش سالانه منطقه مورد بررسی ۴۶۷/۷ میلی متر و میانگین دمای سالانه ۱۷/۵ درجه سانتی گراد است. در این تحقیق، از داده های هدایت الکتریکی ۱۶ ایستگاه اندازه گیری کیفیت آب زیرزمینی در دشت خانمیرزا در یک دوره آماری ۲۳ ساله (۱۳۶۸ تا ۱۳۹۰) استفاده شد. داده های مورد نیاز از شرکت اب منطقه ای چهارمحال و بختیاری اخذ گردید.

کراچیان (۱۳۸۷) با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته، سامانه پایش کیفی قسمتی از دشت تهران را ارزیابی و ساختار جدیدی برای بهنگام سازی موقعیت ایستگاه های پایش ارائه دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از تئوری آنتروپی راهکار خوبی برای نمایش و ارزیابی انتقال اطلاعات بین ایستگاه های مختلف در یک شبکه پایش است. 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 حاصل شده از این مطالعه نشان داد که مدل انتقال اطلاعات در ارائه تغییرات مکانی نسبت به مدل رگرسیونی از دقت بالاتری برخوردار می باشد.

با توجه به محدودیت های روش آنتروپی پیوسته، هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی دشت خانمیرزا با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته می باشد.

مواد و روش ها

دشت خانمیرزا با مساحتی حدود ۱۲۹/۳



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت خانمیرزا و چاه های مورد بررسی در استان چهارمحال و بختیاری.

با توجه به بازه تغییرات مقادیر متغیرها، اطلاعات موجود گسسته سازی شده و جداول توزیع متغیرها تهیه می شوند. سپس بر مبنای این جداول، مقادیر احتمال رخداد در هر حالت محاسبه می شود. اما تحقیقات اخیر همچون مغیر و سینگ (۲۰۰۳) نشان داده است که تابع توزیع احتمال بسیاری از

تئوری آنتروپی

به طور کلی تئوری آنتروپی به دو صورت گسسته و پیوسته تعریف شده و مورد استفاده قرار می گیرد. در آنتروپی پیوسته، فرض بر این است که توزیع احتمالاتی متغیرها، از توزیع نرمال یا لوگ نرمال پیروی می کند. ولی در حالت گسسته

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

اطلاعات دریافتی و ارسالی ایستگاه نام نیز این گونه تعریف می‌شود:

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

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

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

$y(i)$ 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.

به گونه‌ای مشابه:

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

روابط فوق به ویژه (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 و نگهداری ایستگاه مزبور توصیه می‌شود. اما شاخص $N(i)$ با نام اطلاعات خالص تبادلی 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 تئوری آنتروپی در حالت گسسته، فواصل بازه‌ها با توجه به تغییرات مقادیر متغیرها تهیه می‌شوند (جدول ۱). سپس با استفاده از این جداول، مقادیر احتمال رخداد در هر حالت محاسبه می‌شود (جدول ۲). اعداد داخل جدول، تعداد تکرار مقادیر یک متغیر مثل x را در یک بازه مشخص، زمانی

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. در این راستا مقادیر هدایت الکتریکی ۱۶ ایستگاه توسط نرم‌افزار MATLAB و روش آزمون Anderson-Darling مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که از تابع توزیع احتمال نرمال و لوگ‌نرمال پیروی نمی‌نمایند. لذا در این تحقیق آنتروپی گسسته مورد استفاده قرار گرفته است. تعریف گروهی از شاخص‌های آنتروپی گسسته به صورت زیر می‌باشند.

آنتروپی مرزی

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

آنتروپی توام

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

آنتروپی شرطی

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

آنتروپی انتقال اطلاعات

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

در روابط بالا، $p(x)$ احتمال روی دادن x ، $p(x, y)$ احتمال روی دادن توام x و y و $p(x|y)$ احتمال رخ دادن x به شرط y هست. اگرچه $T(x, y)$ به عنوان شاخصی برای تعیین انتقال اطلاعات مطرح است، اما مغیر و سینگ (۲۰۰۳) شاخص زیر را برای نرمال کردن شاخص آنتروپی انتقال اطلاعات معرفی و آن را شاخص انتقال اطلاعات نامیدند.

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

مارکوس و همکاران (۲۰۰۳) سه شاخص $R(i)$ ، $S(i)$ و $N(i)$ را به شرح زیر و به صورت 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 هست، در آنتروپی گسسته تعریف نمودند:

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

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 حال این روش، یک روش کاملاً سلیقه‌ای و عملی است.

نتایج و بحث

در این مطالعه برای بررسی اثر کلاس‌بندی‌های مختلف بر مقادیر شاخص‌های آنتروپی و رتبه‌بندی ایستگاه‌ها در دشت، چهار حالت کلاس‌بندی ۳، ۶، ۱۲ و ۱۸ در نظر گرفته شده است.

که متغیر γ در یک بازه دیگر قرار دارد، نشان می‌دهد. البته این دو بازه یکسان در نظر گرفته شده‌اند. از رابطه زیر که به نام دستور استورجس مشهور است تعداد کلاس‌های (بازه‌های) مناسب محاسبه شده است:

$$[12] \quad NCI = 1 + 3.322 \log(n)$$

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،

جدول ۱- جدول فراوانی مطلق ۶ کلاس‌های سیمی و دومکان.

سیمی							
مجموع مشاهدات	۴۴۶-۵۰۰	۳۹۲-۴۴۶	۳۹-۳۹۲	۲۸۵-۳۳۹	۲۳۲-۲۸۵	۱۷۸-۲۳۲	
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۳۹۵-۴۴۵
۵	۰	۰	۰	۰	۳	۲	۴۴۵-۴۹۵
۹	۰	۶	۰	۰	۲	۱	۴۹۵-۵۴۵
۷	۱	۱	۳	۲	۰	۰	۵۴۵-۵۹۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۹۵-۶۴۵
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۶۴۵-۶۹۵
۲۳	۱	۸	۳	۲	۵	۴	مجموع
							مشاهدات

دومکان:

خانمیرزا می‌باشد (حسینی، ۱۳۹۴). به همین دلیل در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی دشت مطالعاتی بر اساس شاخص $ITI(i)$ ، از روش میان‌یابی Spline با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.2 استفاده شد. در نهایت بر اساس حدود ذکر شده در جدول (۳) برای شاخص $ITI(i)$ در دشت خانمیرزا پهنه‌بندی انجام شده است.

پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات $ITI(i)$ در دشت

اساس پهنه‌بندی بر درون‌یابی استوار است. درون‌یابی فرایند به دست آوردن نقاط مجهول توسط نقاط معلوم است. داده‌هایی که به‌عنوان ورودی در عملیات درون‌یابی مورد استفاده قرار می‌گیرند، از نوع داده‌های نقطه‌ای می‌باشند. با توجه به تحقیقات صورت گرفته روش میان‌یابی Spline مناسب‌ترین روش برای پهنه‌بندی داده‌های کیفی دشت

جدول ۲- جدول احتمال توام ۶ کلاس‌های سیمی و دومکان.

سیمی							
مجموع احتمالات	۴۴۶-۵۰۰	۳۹۲-۴۴۶	۳۹-۳۹۲	۲۸۵-۳۳۹	۲۳۲-۲۸۵	۱۷۸-۲۳۲	
۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۴	۳۹۵-۴۴۵
۰/۲۲	۰	۰	۰	۰	۰/۱۳	۰/۰۹	۴۴۵-۴۹۵
۰/۳۹	۰	۰/۲۶	۰	۰	۰/۰۹	۰/۰۴	۴۹۵-۵۴۵
۰/۳۰	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۰۹	۰	۰	۵۴۵-۵۹۵
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۹۵-۶۴۵
۰/۰۴	۰	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۶۴۵-۶۹۵
۱/۰۰	۰/۰۴	۰/۳۵	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۱۷	مجموع احتمالات

دومکان:

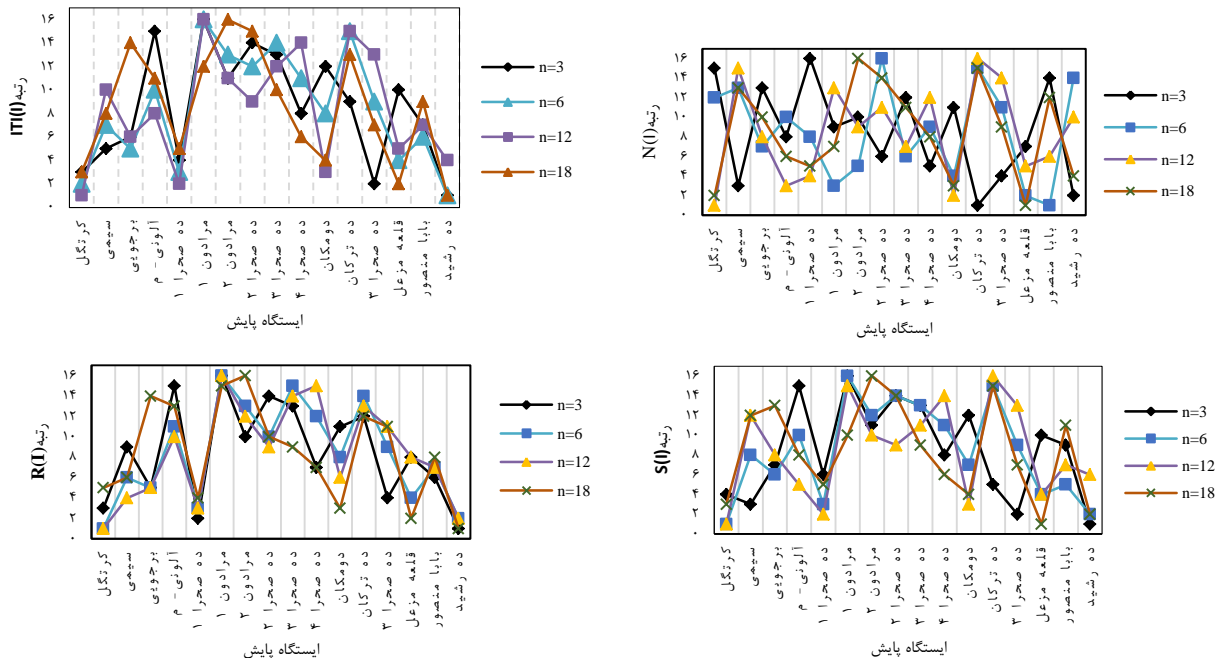
جدول ۳- طبقه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات ITI.

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

آنالیز حساسیت دسته‌بندی اطلاعات

ضرایب انتقال اطلاعات مانند $ITI(i)$ ، ارسال اطلاعات $S(i)$ و یا دریافت اطلاعات $R(i)$ و حتی مقادیر آنتروپی‌های مرزی و توام به تغییر فاصله دسته‌بندی اطلاعات و متعاقب آن تعداد دسته‌بندی‌ها حساس هستند. چاپمن و همکاران (۱۹۸۶) در تحقیقات خود بیان داشتند که انتخاب تعداد دسته‌بندی‌ها یک مسئله عملی و انتخابی است. مارکوس و همکاران (۲۰۰۳) گزارش دادند که تغییر تعداد کلاس‌ها بر میزان شاخص‌های آنتروپی تأثیر می‌گذارد. درحالی‌که تحقیقات میشرا و کولیبالی (۲۰۱۰) در کانادا تغییر کلاس‌بندی‌ها، n را در رتبه‌بندی

چاه‌ها بی‌تأثیر می‌داند. همچنین در پژوهش انجام‌شده توسط کریمی گوغری و همکاران (۱۳۹۰) بر روی حوزه بختگان-مهارلو به این نتیجه رسیدند که سه شاخص $ITI(i)$ ، $R(i)$ و $S(i)$ نسبت به تغییرات فاصله‌بندی اطلاعات از حساسیت کمتری نسبت به $N(i)$ برخوردار می‌باشند. در این تحقیق، تحلیل حساسیت فاصله‌بندی‌ها بر مقادیر شاخص‌های آنتروپی $ITI(i)$ ، $R(i)$ ، $S(i)$ و $N(i)$ در ۱۶ چاه منتخب دشت خانمیرزا در چهار حالت مختلف ۳، ۶، ۱۲ و ۱۸ کلاسه انجام‌شده و نتایج رتبه‌بندی چاه در شکل ۲ ارائه گردیده است.



شکل ۲- نتایج آنالیز حساسیت مقدار $S(i)$.

رتبه‌بندی چاه‌ها دارد، اگرچه مقادیر چاه‌ها به تغییرات n حساسیت کمتری نشان داده است. با توجه به رتبه‌بندی چاه‌ها برای مقادیر مختلف n می‌توان نتیجه گرفت که مقدار $n=3$

نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز حساسیت شاخص‌های آنتروپی در کلیه چاه‌های دشت خانمیرزا برای مقادیر مختلف n حکایت از تغییر مقادیر شاخص‌های آنتروپی و تأثیر در

مورد بی‌اثر بودن تعداد کلاس‌بندی‌ها، n ، در رتبه‌بندی چاه‌ها کاملاً تأیید نمی‌شود.

ارزیابی شبکه پایش

کارایی تئوری آنتروپی در رتبه‌بندی و تحلیل منطقه‌ای کیفیت آب چاه‌های منتخب در دشت خانمیرزا مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج رتبه‌بندی چاه‌ها بر اساس مقادیر شاخص‌های متفاوت آنتروپی برای $n=6$ ارائه شده است. چنان‌که در جدول ۴ مشاهده می‌شود چاه‌های کرتگل، ده صحرا ۱ و برجویی ضمن کسب رتبه‌های پایین در شبکه، وضعیت بحرانی داشته و ادامه فعالیت آن‌ها مستلزم تجدیدنظر جدی است. از سوی دیگر، چاه‌های مرادون و سیمی بالاترین رتبه‌ها را در میان سایر چاه‌ها به خود اختصاص داده‌اند و چاه‌های مهم دشت مورد مطالعه می‌باشند که مفیدترین اطلاعات در شبکه را تولید می‌نمایند. به‌منظور صحت سنجی کارکرد تئوری آنتروپی در رتبه‌بندی چاه‌ها، ضعیف‌ترین چاه دشت خانمیرزا (کرتگل) در شبکه پایش حذف و رتبه‌بندی چاه‌ها مجدداً با $n=6$ برای پانزده چاه باقی‌مانده تکرار شد. مقادیر و رتبه‌بندی‌های جدید شاخص‌های آنتروپی (۱۵ چاه باقیمانده) در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

بیشترین تغییرات مقادیر شاخص‌ها و رتبه‌بندی را در مقایسه با سایر مقادیر n ایجاد نموده است و حالت‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ کلاسه رفتاری نزدیک به هم دارند. 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 چاه‌ها $N(i)$ ، تغییرات بیش‌تری نسبت به شاخص‌های $ITI(i)$ ، $R(i)$ و $S(i)$ داراست.

طبق شکل ۲ این عدم تطابق در حالت سه کلاسه بیش‌تر از سایر حالت‌ها می‌باشد که می‌توان علت آن را کمتر بودن دقت محاسبات در این حالت دانست. ضمناً همانطور که در همین شکل مشاهده می‌شود با بیش‌تر شدن تعداد کلاس‌ها تطابق بیش‌تری در کلاس بندی وجود می‌آید. بطوریکه کلاس‌بندی در حالت ۱۲ و ۱۸ کلاسه بسیار نزدیک به هم بوده‌اند.

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 (۲۰۰۳) و همچنین کریمی گوگری و همکاران (۱۳۹۰) در مورد تغییر میزان شاخص‌های آنتروپی همخوانی دارد. درحالی‌که نتایج می‌شرا و کولیبالی (۲۰۱۰) در

جدول ۴- رتبه‌بندی شاخص‌های آنتروپی ۱۶ چاه شبکه پایش دشت

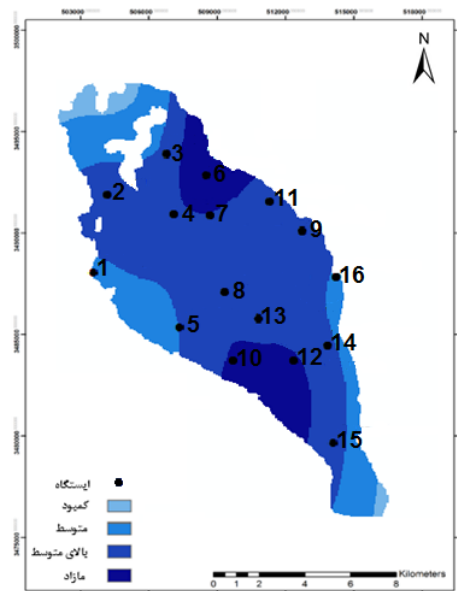
ایستگاه	رتبه	$S(i)$	رتبه	$R(i)$	رتبه	$ITI(i)$	رتبه	$H(x(i), \hat{x}(i))$	رتبه	$H(\hat{x}(i))$	رتبه	$H(x(i))$
کرتگل	۱	۰/۷۳	۱	۰/۷۰	۱	۰/۵۶	۱۵	۱۳/۰	۱	۹/۹۳	۳	۱۰/۳
سیمی	۸	۰/۸۴	۶	۰/۸۱	۷	۰/۷۰	۱۴	۱۳/۰	۱۶	۱۰/۹	۱۵	۱۱/۲
برجویی	۶	۰/۸۰	۵	۰/۸۰	۵	۰/۶۶	۱۰	۱۲/۵	۷	۱۰/۳	۸	۱۰/۴
آلونی-م	۱۰	۰/۸۷	۱۱	۰/۸۶	۱۰	۰/۷۶	۵	۱۱/۷	۴	۱۰/۲	۴	۱۰/۳
ده صحرا ۱	۳	۰/۷۶	۳	۰/۷۵	۳	۰/۶۱	۱۳	۱۲/۸	۵	۱۰/۳	۶	۱۰/۳
مرادون ۱	۱۶	۰/۹۷	۱۶	۰/۹۸	۱۶	۰/۹۵	۱	۱۰/۹	۱۴	۱۰/۷	۱۲	۱۰/۶
مرادون ۲	۱۲	۰/۸۸	۱۳	۰/۸۸	۱۳	۰/۷۹	۲	۱۱/۳	۲	۱۰/۱	۱	۱۰/۱
ده صحرا ۲	۱۳	۰/۹۰	۱۰	۰/۸۶	۱۲	۰/۷۸	۸	۱۲/۱	۱۱	۱۰/۵	۱۴	۱۱/۰
ده صحرا ۳	۱۴	۰/۹۰	۱۵	۰/۹۰	۱۴	۰/۸۱	۴	۱۱/۴	۸	۱۰/۴	۷	۱۰/۴
ده صحرا ۴	۱۱	۰/۸۷	۱۲	۰/۸۶	۱۱	۰/۷۶	۶	۱۱/۸	۶	۱۰/۳	۹	۱۰/۴
دومکان	۷	۰/۸۳	۸	۰/۸۳	۸	۰/۷۱	۹	۱۲/۱	۱۰	۱۰/۴	۵	۱۰/۳
ده ترکان	۱۵	۰/۹۲	۱۴	۰/۸۸	۱۵	۰/۸۲	۳	۱۱/۴	۳	۱۰/۲	۱۱	۱۰/۵
ده صحرا ۵	۹	۰/۸۶	۹	۰/۸۴	۹	۰/۷۴	۷	۱۲/۱	۹	۱۰/۴	۱۳	۱۰/۷
قلعه مزعل	۴	۰/۷۸	۴	۰/۷۹	۴	۰/۶۵	۱۲	۱۲/۷	۱۳	۱۰/۶	۱۰	۱۰/۴
بابا منصور	۵	۰/۷۹	۷	۰/۸۱	۶	۰/۶۷	۱۱	۱۲/۵	۱۲	10/7	۲	۱۰/۲
دهرشید	۲	۰/۷۴	۲	۰/۷۱	۲	۰/۷۵	۱۶	14/1	۱۵	10/8	۱۶	۱۱/۳

جدول ۵- رتبه‌بندی شاخص‌های آنتروپی ۱۵ چاه شبکه پایش دشت

ایستگاه	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))	رتبه
سیمی	۲	۰/۷۵	۵	۰/۷۷	۱۲	۰/۷۲	۴	۱۲/۰	۱۰	۱۰/۴	۲	۱۰/۲	۲
برجویی	۱	۰/۶۷	۱	۰/۶۹	۱۵	۰/۷۷	۱	۱۱/۸	۶	۱۰/۳	۱۱	۱۰/۶	۱۱
آلونی-م	۱۱	۰/۸۳	۱۳	۰/۸۴	۶	۰/۶۵	۱۲	۱۳/۱	۱۴	۱۰/۶	۱۳	۱۱/۰	۱۳
ده صحرا ۱	۷	۰/۸۲	۱۰	۰/۸۲	۱۳	۰/۷۳	۲	۱۱/۹	۴	۱۰/۲	۳	۱۰/۳	۳
مرادون ۱	۱۰	۰/۸۳	۱۱	۰/۸۳	۷	۰/۶۸	۶	۱۲/۲	۳	۱۰/۲	۸	۱۰/۴	۸
مرادون ۲	۸	۰/۸۲	۹	۰/۸۱	۸	۰/۶۹	۹	۱۲/۳	۹	۱۰/۳	۹	۱۰/۴	۹
ده صحرا ۲	۱۴	۰/۸۵	۱۴	۰/۸۵	۱۱	۰/۷۱	۵	۱۲/۱	۵	۱۰/۳	۴	۱۰/۳	۴
ده صحرا ۳	۱۲	۰/۸۵	۱۲	۰/۸۴	۹	۰/۶۹	۸	۱۲/۳	۸	۱۰/۴	۶	۱۰/۳	۶
ده صحرا ۴	۹	۰/۸۲	۷	۰/۸۰	۱۰	۰/۷۰	۷	۱۲/۱	۷	۱۰/۱	۱۲	۱۰/۷	۱۲
دومکان	۱۵	۰/۸۸	۱۵	۰/۸۶	۱۴	۰/۷۴	۳	۱۱/۹	۳	۱۰/۳	۷	۱۰/۴	۷
ده ترکان	۴	۰/۷۷	۴	۰/۷۴	۱	۰/۶۱	۱۱	۱۳/۰	۱۱	۱۰/۶	۵	۱۰/۳	۵
ده صحرا ۵	۶	۰/۸۰	۶	۰/۷۷	۲	۰/۵۲	۱۴	۱۳/۴	۱۴	۱۰/۳	۱	۱۰/۱	۱
قلعه مزعل	۳	۰/۷۷	۲	۰/۷۴	۵	۰/۶۱	۵	۱۳/۷	۱۵	۱۰/۸	۱۵	۱۱/۳	۱۵
بابا منصور	۱۳	۰/۸۵	۸	۰/۸۰	۴	۰/۶۲	۴	۱۳/۴	۱۳	۱۰/۵	۱۴	۱۱/۲	۱۴
دهرشید	۵	۰/۷۹	۳	۰/۷۴	۲	۰/۶۱	۲	۱۲/۸	۱۰	۱۰/۱	۱۰	۱۰/۴	۱۰

نمونه‌برداری با درجه اهمیت بالای متوسط دیده می‌شود، می‌توان گفت چاه‌های نمونه‌برداری مازاد در تمام دشت دیده می‌شود. در مجموع نتایج نشان می‌دهد که تراکم شبکه پایش دشت مورد مطالعه، نیاز به تجدیدنظر کلی دارد.

در شکل ۳ پهنه بندی دشت خانمیرزا بر اساس شاخص انتقال اطلاعات نشان داده شده است. نتایج حاصل از پهنه‌بندی دشت در حالت شش کلاسه نشان می‌دهد مساحتی از دشت که در آن کمبود شدید چاه نمونه‌برداری نیاز باشد، تقریباً برابر با صفر است. در بیش‌تر سطح دشت چاه‌های



شکل ۳- پهنه‌بندی دشت خانمیرزا بر اساس شاخص انتقال اطلاعات.

تعیین فاصله بهینه

بر نقاط نمودار برازش داده شد (منحنی T- D) که رابطه آن به صورت زیر می باشد:

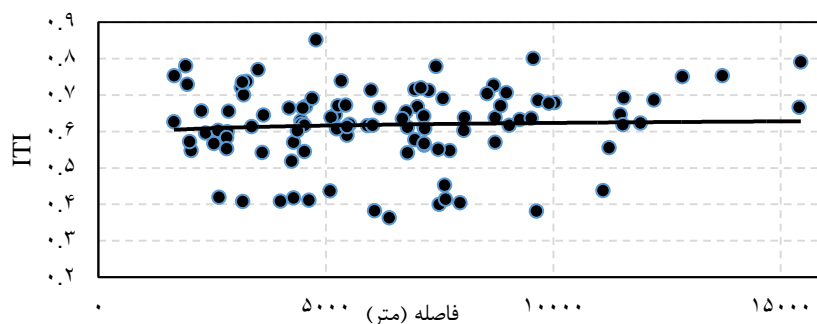
$$y = 0.0105 \ln(x) + 0.5269 \quad [13]$$

$$(NCI = 6, R^2 = 0.0027)$$

بر روی شکل ۴ جایی که منحنی برازش داده شده تقریباً به حالت ثابت می رسد ($x=11000$) انتخاب می گردد. فاصله مربوط به نقطه انتخابی از محور y ها در واقع همان فاصله ای است که انتقال اطلاعات بیش از آن صورت نمی گیرد و در فواصل بیشتر از آن کمبودهای اطلاعاتی وجود خواهد داشت؛ بنابراین، این مقدار بهینه ترین فاصله بین دو چاه پایش در آن منطقه است.

در این مطالعه، بدین منظور ساختار مکانی متغیر هدایت الکتریکی (EC) توسط شاخص انتقال اطلاعات به صورت تابعی از فاصله بین چاهها (مدل انتقال اطلاعات) و همچنین همبستگی به صورت تابعی از فاصله (مدل همبستگی) توصیف گردید. بر هر دو مدل مورد بررسی رگرسیون خطی برازش داده شد.

در شکل ۴ نمودار مدل انتقال اطلاعات در برابر فاصله برای حالت شش کلاسه ارائه شده است. سپس بهترین منحنی



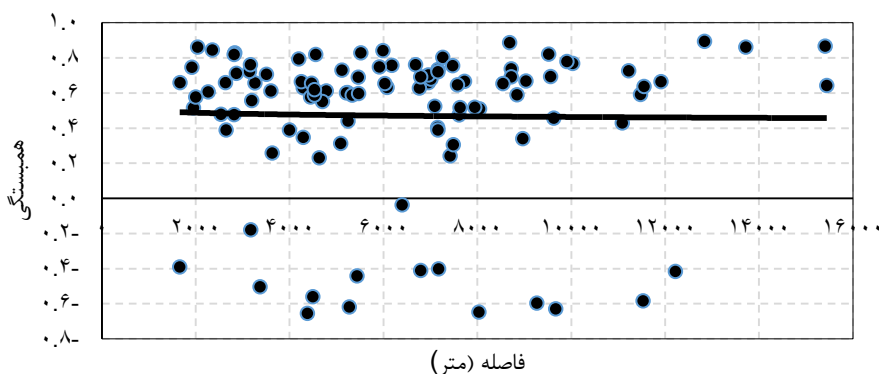
شکل ۴- نمودار مدل انتقال اطلاعات.

از بررسی این شکل مشخص می شود که بعد از فاصله حدود ۱۴۰۰۰ متر هم به حالت ثابت نرسیده است. مقایسه ضریب تبیین دو مدل آنتروپی و همبستگی مشخص می شود که منحنی لگاریتمی برازش بهتری بر مدل آنتروپی نسبت به مدل همبستگی دارد. این نتایج با نتایج به دست آمده توسط میر عباسی و همکاران (۱۳۸۹) مطابقت دارد.

در مرحله بعد مقادیر ضریب همبستگی بین داده های EC مشاهداتی هر جفت از چاهها نسبت به فاصله بین دو چاه در شکل ۵ رسم شد. سپس بهترین منحنی به نقاط رسم شده برازش داده شد که رابطه آن به صورت زیر می باشد:

$$y = -0.0151 \ln(x) + 0.6025 \quad [14]$$

$$(NCI = 6, R^2 = 0.0004)$$



شکل ۵- نمودار مدل همبستگی.

اولین همایش ملی مدیریت مابعد 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.
- Chen, Y.C. C. Weiland and H.C. Yeh. 2008. Rainfall network design using kriging and entropy. *Hydrological Processes*. 22: 340-346.
- Husain, T. 1989. Hydrologic uncertainty measure and network design. *Water Resources Bulletin*. 25: 527-534.
- Karamouz, M. Khajehzadeh Nokhandan, A. and 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. H.V. Knapp and G.D. Tasker. 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. and Coulibaly, P. 2010. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*, 380: 420-437.
- Mogheir, Y. and 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*, Balema Publisher, Tokyo, 2: 3-20.
- Mogheir, Y. and Lima, J.L.M.P. and Singh, V.P. 2004. Characterizing the special variability of groundwater quality using the entropy theory, *hydrological process*, 18: 2165-2179
- Sarlak, N. and A. Sorman. 2006. Evaluation and selection of streamflow network stations using entropy methods. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*. 30: 91-100.
- Shannon C.E. 1948. A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal*, 27:379-423
- Singh VP. 1997. The use of entropy in hydrology and water resources. *Hydrological Process*, 11:587-626.

نتیجه گیری

در این پژوهش بر پایه تئوری آنتروپی، ارزش منطقه‌ای چاه‌های نمونه‌برداری دشت خانمیرزا مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز حساسیت نحوه کلاس‌بندی اطلاعات نشان داد که مقادیر شاخص‌های آنتروپی به تغییر کلاس‌بندی اطلاعات حساس، اما رتبه‌بندی ایستگاه‌ها حساسیت بسیار کمی را از خود نشان می‌دهد. نتایج صحت سنجی حاکی از این بود که تئوری آنتروپی قابلیت خوبی جهت کمی کردن ارزش منطقه‌ای چاه‌های نمونه‌برداری در یک شبکه پایش دارد. از طرفی دیگر، نتایج نشان داد که مدل انتقال اطلاعات در ارائه تغییرات مکانی نسبت به مدل رگرسیونی از دقت بالاتری برخوردار است. همچنین نتایج حاصل از مدل انتقال اطلاعات نشان داد که شبکه پایش کیفیت منابع آب دشت خانمیرزا از پراکنش خوبی برخوردار نبوده و می‌توان به‌منظور بهینه‌سازی شبکه پایش نمونه‌برداری در تعدادی از چاه‌ها متوقف گردد.

منابع و مراجع

- کریمی‌گوغری ش. خلیفه س. ۱۳۹۰. ارزیابی کارایی شبکه‌های آب‌سنجی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته (مطالعه موردی: حوزه بختگان- مهاباد)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۳: ۳۴-۵۰.
- معصومی، ف. و کراچیان، ر. ۱۳۸۵. ارزیابی سیستم‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با کاربرد تئوری آنتروپی گسسته -مطالعه موردی: آبخوان تهران. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. اصفهان (دانشگاه صنعتی اصفهان)، ۲ و ۹ بهمن ۱۳۸۵.
- معصومی، ف. و کراچیان، ر. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی مکانیابی ایستگاه‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی. مجله آب و فاضلاب. ۵: ۶۵-۱۲-۲.
- میرعباسی، ر. و معیری، م. ۱۳۸۹. ارزیابی شبکه پایش کیفیت آب زیرزمینی دشت اهر بر اساس تئوری آنتروپی،