نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۲، مرداد - شهریور ۱۳۹۷، ص. ۵۶۸-۵۵۶

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 12, Agu.-Sep. 2018, p. 556-568

پایش کیفی آب شرب با استفاده از شاخص‌های آنتروپی (مطالعه موردی: آبخوان مرکزی دشت بیرجند)

یوسف رمضانی*[۱]، محسن پوررضا بیلندی[۲]، مصطفی یعقوب‌زاده[۳]، محمد ناظری تهرودی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۸/۳۰

چکیده

در این پژوهش با نگرشی نو بر پایه تئوری آنتروپی، ارزش منطقه‌ای چاه‌های نمونه‌برداری آبخوان مرکزی دشت بیرجند و کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب مورد بررسی قرارگرفت. با توجه به سازندهای دشت و هم‌چنین مشکل کروم و نیترات آب زیرزمینی منطقه، پایش کیفی مقادیر نیترات و کروم با استفاده از تئوری آنتروپی بررسی شد تا تعداد چاه‌های بهینه در آبخوان جهت پایش دقیق این دو پارامتر مشخص گردد. نتایج بررسی روند تغییرات پارامترهای کروم و نیترات در سطح منطقه نشان دهنده روند افزایشی مقادیر نیترات و کروم در دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۸۴ در بیش‌تر چاه‌های مورد بررسی بود. بیش‌ترین نرخ افزایشی در مقادیر نیترات مربوط به چاه شماره ۱۱ رکات و در مورد مقادیر کروم مربوط به چاه‌های شماره ۴ رکات و مدرس بود. نتایج به‌دست آمده از پایش کیفی این دو پارامتر نشان داد که از ۱۹ چاه نمونه‌برداری مورد بررسی در دشت، چاه شماره ۳ رکات و شماره ۴ مدرس از نظر انتقال اطلاعات کروم و چاه‌های شماره ۵ رکات و ۱۳ علی‌آباد از نظر انتقال اطلاعات نیترات در وضعیت بحرانی (کم‌ترین رتبه‌ها و ضعیف‌ترین وضعیت) قرار داشت و استفاده از داده‌های برداشتی آن‌ها اطلاعات آبخوان را به درستی بیان نمی‌کند. از دیگر نتایج مهم به دست آمده در این پژوهش قرار گرفتن تمامی چاه‌های مورد بررسی در وضعیت نامطلوب کیفی و متوسط در مصارف شرب از دیدگاه آنتروپی وزن‌دار است. بر اساس آنتروپی شاخص کیفیت آب، ۶۳ درصد از کل نمونه‌های آب زیرزمینی مورد بررسی دارای رتبه سه و ۳۷ درصد دارای رتبه چهار از نظر کیفیت آب برای مصرف شرب است.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، تئوری آنتروپی، پایش، مدل انتقال اطلاعات

مقدمه

آب از اجزای حیاتی زندگی است که برای بسیاری از فعالیت‌های اقتصادی ضروری است. بر اساس داده‌های منتشره حدود سه درصد از آب موجود در کره زمین آب شیرین است و فقط ۰/۳۶ درصد آن قابل‌استفاده است. آب زیرزمینی درواقع فراوان‌ترین منبع قابل دسترس آب شیرین در دنیا است که ۹۷ درصد منابع آب شیرین دنیا را (به‌جز یخ‌های قطبی و یخچال‌ها) تشکیل می‌دهد و گاهی ثروت پنهان نامیده می‌شود که وجود و اهمیت آن به‌خوبی شناخته نشده است.

معمولاً اقدامات لازم برای حفاظت و مدیریت آب‌های شیرین اغلب به هنگام وقوع خشک‌سالی در برخی مناطق، اهمیت پیدا می‌کند. در گذشته تصور می‌شد خاک‌ها و سنگ‌های روی پهنه‌های آب زیرزمینی حفاظت کافی برای کیفیت آب زیرزمینی را فراهم می‌کنند. ولی پژوهش‌های علمی و بررسی‌ها نشان داده است که آلاینده‌ها می‌توانند از درون خاک و ناحیه غیراشباع نفوذ کرده و وارد آب زیرزمینی شوند. هنگامی‌که آب زیرزمینی آلوده می‌شود، در بسیاری از مواقع ده‌ها سال یا بیش‌تر طول می‌کشد تا آلودگی رفع شده و آب کیفیت مطلوب خود را بازیابد. دلیل این موضوع زمان‌ماند بسیار طولانی آب به دلیل حرکت آهسته آن از میان زمین و نرخ پایین فرایندهای زوال آلاینده‌ها است. با توجه به اهمیت اطلاعات و اطلاع‌رسانی، ارزیابی شبکه‌های پایش و طراحی شبکه بهینه همواره در کانون توجهات بوده است. ارزیابی شبکه موجود به‌منظور طراحی شبکه بهینه ضروری به نظر می‌رسد و باید ابتدا شرایط اولیه بررسی شود؛ یعنی ابتدا لزوم شبکه بهینه بررسی‌شده و سپس شبکه بهینه ارایه گردد. سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی در کشورهای توسعه یافته با توجه به اهمیت حفظ آب‌های زیرزمینی از خطر آلودگی به‌طور کامل شکل‌گرفته و در کشورهای در حال توسعه در حال شکل گرفتن است. طراحی سامانه‌های پایش کیفی منابع آب همواره

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند
۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند
۴- دانشجوی دکتری منابع آب دانشگاه بیرجند
(*- ایمیل نویسنده مسئول: y.ramezani@birjand.ac.ir)

به‌عنوان یکی از موضوعات پیچیده در زمینه‌ی منابع آب و محیط زیست مطرح بوده است؛ زیرا باید مسایل مختلفی هم‌چون تعیین توالی زمانی نمونه‌برداری‌ها، انتخاب تعداد و موقعیت مکانی، انتخاب متغیرهای کیفی شاخص، مدت زمان مورد نیاز برای پایش و نیز هزینه‌های پایش در طراحی‌ها موردتوجه قرار گیرند (معصومی و کراچیان، ۱۳۸۷). پایش کیفی منابع آب زیرزمینی می‌تواند به‌صورت بررسی تغییرات زمانی آلاینده‌ها و یا به‌صورت بررسی منطقه مورد نظر از لحاظ انتقال اطلاعات بین منابع آب زیرزمینی باشد.

پایش، بر اساس تعریف ارایه شده توسط سازمان بین‌المللی استاندارد،[1] ISO، عبارت است از فرایند برنامه‌ریزی شده‌ای از نمونه-برداری، اندازه‌گیری، ثبت و انعکاس نتایج در برگیرنده ویژگی‌های آب که اغلب متناسب با هدف یا اهداف کاربری تعریف شده برای آب می‌باشد. تحقیقات جینز و شانون فضای تازه‌ای برای تحقیقات در زمینه‌ی استفاده از تئوری آنتروپی در حوزه وسیعی از علوم و فناوری ایجاد کرد (Jaynes., 1975; Shannon., 1948). شانون (۱۹۴۸) تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه‌ی استفاده از این تئوری در زمینه‌های مختلف مهندسی مانند ارزیابی سری‌های زمانی اقتصادی و مباحث اکولوژیکی انجام داد و بسیاری از مفاهیم ناشناخته این تئوری را توسعه داد (Shannon., 1948).

چاپمن آنتروپی را به‌عنوان یک کمیت اندازه‌گیری عدم قطعیت داده‌های هیدرولوژیکی و کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی بیان کرد. او همچنین به بررسی اثر کلاس‌بندی‌های متفاوت بر شاخص‌های آنتروپی پرداخت و به این نتیجه رسید که آنتروپی با تغییر تعداد کلاس‌ها مقادیر متفاوتی از خود نشان می‌دهد (Chapman., 1986). هارمانچی اغلو و الپاسالن از تئوری آنتروپی جهت طراحی شبکه پایش کیفی آب استفاده کردند (Harmancioglu and Alpaslan., 1992). موغیر و سینگ و موغیر و همکاران نشان دادند از میان چهار نوع آنتروپی (مرزی، مشترک، شرطی و انتقال اطلاعات)، آنتروپی انتقال اطلاعات بهترین و مناسب‌ترین روش برای ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی است. آن‌ها همچنین با نقشه‌های خطوط هم‌مقدار آنتروپی مرزی، روشی برای ارزیابی سامانه‌های پایش کیفی آب‌های زیرزمینی ارایه کردند (Mogheir and Singh., 2003; Mogheir et al., 2004). سرلک و سورمن به ارزیابی و انتخاب چاه‌های شبکه هیدرومتری با استفاده از تئوری آنتروپی پرداختند (Sarlak and Sorman., 2006).

چاداوالادا و همکاران نیز با استفاده از عدم حتمیت (آنتروپی) و با استفاده از روش‌های ذکر شده، شبکه مورد مطالعه را بهینه نمود (Chadalavada et al., 2010). در تحقیق دیگری به بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی در چین پرداخته شد (Zhu et al., 2015). در ایران نیز مطالعاتی در مورد تئوری آنتروپی صورت گرفته است که در ادامه بدان اشاره می‌شود. معصومی و کراچیان (۱۳۸۵) به ارزیابی کارایی سیستم پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته پرداختند و از روی منحنی آنتروپی انتقال اطلاعات برحسب فاصله‌ی بین چاه‌ها یک منحنی نمایی به مجموعه نقاط برازش دادند و کم‌ترین فاصله‌ای را که تغییرات مقدار انتقال اطلاعات برحسب فاصله بسیار کم و ناچیز می‌گردد را به‌عنوان بهینه‌ترین فاصله بین چاه‌های پایش در نظر گرفتند.

میرعباسی و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از تئوری آنتروپی گسسته کارایی شبکه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی دشت اهر را مورد ارزیابی قراردادند. بدین منظور ساختار مکانی متغیر هدایت الکتریکی (EC) توسط شاخص انتقال اطلاعات به‌صورت تابعی از فاصله بین چاه‌ها (مدل انتقال اطلاعات آنتروپی) و هم‌چنین همبستگی به‌صورت تابعی از فاصله بین چاه‌ها (مدل همبستگی) توصیف کردند. در نهایت به این نتیجه رسیدند مدل انتقال اطلاعات در ارایه تغییرات مکانی نسبت به مدل رگرسیونی از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد.

اکبر زاده و قهرمانی (۱۳۹۲) با استفاده هم‌زمان از آنتروپی و کریجینگ فضایی – زمانی به تعیین شبکه بهینه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی دشت مشهد پرداختند. با بکارگیری آنتروپی، شبکه بهینه پایش کیفی منابع آب زیرزمینی را ارایه کردند. در این پژوهش ابتدا چاه‌ها بر اساس معیارهای آنتروپی و اطلاع متقابل، رتبه‌بندی شد. سانچز و همکاران شاخص WQI و کمبود اکسیژن محلول را در طول رودخانه گواداراما و منزانارس مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه مذکور نشان داد که شاخص WQI در ابتدای رودخانه گوواداراما دارای مقدار عددی ۷۰ (کیفیت خوب) و در انتهای آن در حدود ۶۴ (کیفیت متوسط) می‌باشد. همچنین شاخص WQI برای رودخانه منزانارس در حدود ۶۵ گزارش گردید (Sanchez et al., 2007). در مطالعه‌ای که پی یو و همکاران در منطقه پنگیانگ[2] در شمال‌غربی چین انجام دادند، ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از آنتروپی وزن‌دار شاخص کیفیت آب (EWQI) نتایجی قابل اعتماد و مناسبی در اختیار قرار داد (Pei-Yue et al., 2010). جیان هوا و همکاران با استفاده از EWQI به تحلیل وضعیت کیفیت آب زیرزمینی منطقه جینگ‌یان در شمال‌غربی چین پرداختند و نشان دادند که نمونه‌های مورد بررسی دارای کیفیت مناسبی برای شرب می‌باشند (Jian-Hua et al., 2011). فاگبت و همکاران به کمک آنتروپی وزن‌دار به بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی بیتومن پرداختند (Fagbote et al., 2014). علاوه بر بررسی کیفیت پارامترهای کیفی

1- International standard organization

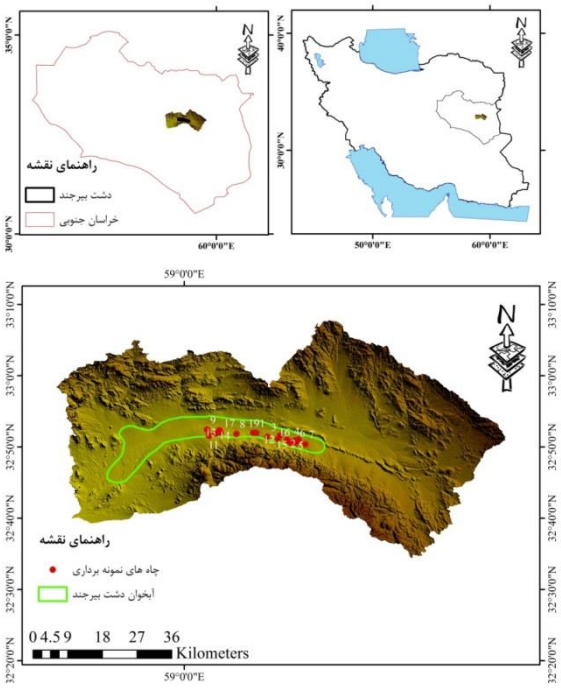
2- Pengyang

آب زیرزمینی، بررسی روند تغییرات این پارامترها در طی زمان نیز جهت رسیدن به پایش دقیق مقادیر کیفی یک دشت از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بررسی روند تغییرات پارامترهای کیفی می‌تواند اثرات زیست محیطی متاثر از فعالیت‌های انسانی را نشان دهد. محققین مختلفی در مناطق مختلف جهان از آزمون آماری ناپارامتری رتبه‌ای من – کندال به طور وسیع برای ارزیابی معنی‌دار بودن وجود روند در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و متئورولوژیکی از قبیل کیفیت آب، استفاده کرده‌اند. احمد و همکاران کیفیت آب زیرزمینی دو دشت را با استاندارد سازمان بهداشت جهانی طبقه‌بندی و مقایسه کردند (Ahmed et al., 2002). آنباژاگان و نیر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی تغییرات مکانی عناصر شیمیایی آب زیرزمینی را در دشت پانول بررسی کردند (Anbazhagan and Nair., 2007). مطالعات صورت گرفته در مورد پایش شبکه آب زیرزمینی، صرفا رتبه‌بندی چاه‌ها در منطقه بوده و تعداد چاه‌های مازاد و یا کمبود در هر منطقه مشخص نشده است. هم‌چنین استفاده از تئوری‌های آنتروپی انتقال اطلاعات و آنتروپی گسسته به‌طور هم‌زمان جهت یافتن مکان‌های دارای کمبود یا افزونگی اطلاعات در مطالعات یاد شده صورت نگرفته است. با توجه به اینکه دشت بیرجند از نظر کروم و نیترات دچار مشکل می‌باشد، بنابراین یکی از اهداف این تحقیق، بررسی تعداد چاه‌های مازاد و مورد نیاز در شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی آبخوان مرکزی دشت بیرجند جهت پایش کروم و نیترات در سطح دشت می‌باشد. هدف دیگری که این تحقیق دنبال می‌کند، استفاده از روش آنتروپی وزن‌دار جهت بررسی کیفیت آب شرب آبخوان مرکزی دشت بیرجند در دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۸۴ می‌باشد که در این روش بر خلاف روش‌های دیگر، وزن اختصاص یافته برای هر پارامتر بهینه می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق چاه‌های شرب موجود در آبخوان دشت بیرجند واقع در استان خراسان‌جنوبی می‌باشد. استان خراسان‌جنوبی در شرق کشور با مساحت ۹۵۳۸۵ کیلومترمربع بین طول‌های جغرافیایی ´۳۲ °۵۷ تا ´۵۰ °۶۱ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ´۳۱ °۳۰ تا ´۱۵ °۳۴ شمالی قرارگرفته است. منشا عناصر سنگین در دشت و شهر بیرجند متعلق به کرتاسه است که شامل افیولیت‌ها و آمیزه‌های رنگین می‌باشد. در دشت بیرجند این مجموعه در بخش جنوبی دشت گسترش فراوان دارد. محدوده مطالعاتی شهر بیرجند از نظر چینه‌شناسی از رسوبات کرتاسه تا عهد حاضر تشکیل شده است. رسوبات آبرفتی که سراسر دشت را می‌پوشانند، محل ذخیره آب‌های زیرزمینی می‌باشند. اندازه رسوبات در نقاط مختلف دشت متفاوت است که این امر بر کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی تاثیر گذار است و احتمالا دلیل بالا بودن بعضی عناصر سنگین از جمله کروم در منابع آب شهرستان بیرجند همین سازندهای زمین-شناسی می‌باشد (طاهری و همکاران، ۱۳۸۹).



شکل ۱- موقعیت چاه‌های شرب مورد بررسی واقع در آبخوان دشت بیرجند

تئوری آنتروپی

آنتروپی در لغت به معنای بی‌نظمی است. یعنی هرچقدر میزان بی‌نظمی یک سیستم بیش‌تر باشد بدین معنی است که آنتروپی سیستم بیش‌تر می‌باشد. طبق تعریف ارایه شده توسط شانون، برای دو متغیر گسسته x و y که x_i, i=1,2,3, …, n و y_i, j=1,2,3, …, 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 $p(x_i \mid y_j)$ احتمال رخ دادن x_i به‌شرط y_j می‌باشند (Shannon., 1948).

آنتروپی حاشیه‌ای

$$E(I(x)) = H(x) = -\sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) \ln p(x_i) \qquad (۱)$$

که در آن E(I(x)) نشانگر امید ریاضی داده‌هاست. در واقع، طبق تعریف، از متوسط داده‌ها (میانگین I(x)) به‌عنوان یک اندازه‌گیری از عدم قطعیت استفاده شده است. علاوه بر این در برخی کتاب‌ها از H(x) به‌عنوان معیاری برای سنجش عدم قطعیت داده‌ها نام برده‌اند.

البته از آن‌جایی‌که عدم قطعیت بیانگر اطلاعات بالقوه است می‌تواند درست باشد. بنابراین، برای یک متغیر تصادفی x، آنتروپی حاشیه‌ای H(x)، می‌تواند به‌عنوان اطلاعاتی بالقوه متغیر تعریف شود. آنتروپی مشترک نشان‌دهنده‌ی داده‌هایی است که در x و در y وجود دارند.

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

آنتروپی شرطی

برای دو متغیر تصادفی x و y، آنتروپی شرطی نشان دهنده‌ی داده‌هایی از x است که در y موجود نیست (Mogheir and Singh., 2003).

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

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 (Mogheir and Singh., 2003).

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

که در روابط بالا p(x) احتمال روی دادن x، p(x, y) احتمال روی دادن مشترک x و y و p(x | y) احتمال رخ دادن x به‌شرط y می‌باشند. توجه داشته باشید که T(x,y)=T(y,x) (Jessop., 1995). می‌توان به روش‌های زیر نیز محاسبه شود (رابطه ۵ تا ۸):

$$T(x,y) = H(x) - H(x|y) \qquad (۵)$$

$$T(x,y) = H(x) + H(y) - H(x,y) \qquad (۶)$$

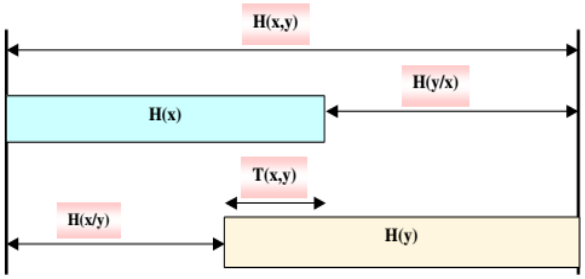
$$T(y,x) = H(y) - H(y|x) \qquad (۷)$$

$$T(y,x) = H(y) + H(x) - H(y,x) \qquad (۸)$$

برای درک بهتر روابط بین انتقال اطلاعات و ضرایب آنتروپی می‌توان به شکل ۲ مراجعه کرد. که در آن $H(y,x)$ آنتروپی مشترک x و y، $H(x)$ برابر با آنتروپی حاشیه‌ای، $H(x|y)$ برابر با آنتروپی شرطی x و y و $T(x,y)$ برابر با آنتروپی انتقال اطلاعات می‌باشد.

انتقال اطلاعات هم‌چنین می‌تواند با استفاده از یک شاخص انتقال اطلاعات نرمال که با **ITI** نشان داده می‌شود، بیان گردد؛ که میزان اطلاعات استانداردی که از یک مکان به مکان دیگری منتقل می‌شود را نشان می‌دهد. طبقه‌بندی میزان انتقال اطلاعات نیز به شرح جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

$$ITI = \frac{T(x,y)}{H(x,y)} \qquad (۹)$$



شکل ۲- طرح شماتیک ضرایب تئوری آنتروپی (**Jessop, 1995**)

جدول ۱- طبقه‌بندی مقادیر شاخص انتقال اطلاعات

درجه اهمیت منطقه	مقادیر شاخص
کمبود شدید	۰ – ۰/۲
کمبود	۰/۲ – ۰/۴
متوسط	۰/۴ – ۰/۶
بالای متوسط	۰/۶ – ۰/۸
مازاد	> ۰/۸

اطلاعات دریافتی توسط **x** از **y** نیز در آنتروپی گسسته به شرح رابطه ۱۰ تعریف می‌شود.

$$R(x,y) = \frac{T(x,y)}{H(x)} \qquad (۱۰)$$

که می‌تواند به‌عنوان کاهش عدم اطمینان از **x** در صورت معلوم بودن **y** تعریف شود و یا به بیان دیگر میزان اطلاعات دریافتی چاه **x** از چاه **y** را نشان می‌دهد. همانند اطلاعاتی که از **x** به **y** فرستاده شده است به‌صورت رابطه ۱۱تعریف می‌شود:

$$S(x,y) = \frac{T(x,y)}{H(y)} \qquad (۱۱)$$

معادلات بالا روابط بین دو متغیر **x** و **y** را بیان می‌کند. همین استدلال را می‌توان برای هر یک از چاه‌ها با استفاده روابط ۱۰ و ۱۱ بکار برد، اطلاعات دریافتی و ارسالی ایستگاه **i**ام نیز این‌گونه تعریف می‌شود (رابطه ۱۲).

$$R(i) = R(x(i), \hat{x}(i)) \qquad (۱۲)$$

x(i) بیان‌کننده داده‌های چاه i ام و $\hat{x}(i)$ از رابطه خطی ۱۳ به دست می‌آید.

$$\hat{x}(i) = a(i) + \sum_{j=1}^{I-1} y_j(i) \times b_j(i) \qquad (۱۳)$$

y(i) ماتریس داده‌ها از تمام ایستگاه‌های دیگر و a(i) و b(i) پارامترهای رگرسیون بین ایستگاه i ام و تمام ایستگاه‌های دیگر است

که به‌صورت خطی برازش داده شده است. مقادیر بزرگ‌تر R(i) و S(i)به ترتیب به معنای دریافت و ارسال بیش‌تر اطلاعات بین ایستگاه i ام و سایر ایستگاه‌های شبکه و یا برقراری بهتر ارتباط بین این ایستگاه و سایر ایستگاه‌ها است. بدین ترتیب مقادیر بیش‌تر R(i) و S(i) برای یک ایستگاه به معنای ارزش بیش‌تر ایستگاه یاد شده است و حفظ و نگهداری ایستگاه مزبور توصیه می‌شود؛ اما شاخص N(i) با نام اطلاعات خالص تبادلی به‌صورت رابطه ۱۴ تعریف می‌شود.

$$N(i) = S(i) - R(i) \qquad (۱۴)$$

شاخص N(i) از این نظر حایز اهمیت است که ارزش هر ایستگاه با این شاخص سنجیده می‌شود. شاخص N(i) بیان‌کننده اطلاعات کل خالص هر چاه بوده و هر ایستگاهی که کم‌ترین میزان N(i) را داراست کم‌ترین رتبه و اهمیت را در شبکه پایش به خود اختصاص می‌دهد (Markus et al., 2003). جهت بررسی انتقال اطلاعات در فواصل مختلف از T مدل به شرح زیر استفاده می‌شود (Mogheir et al., 2006):

$$T(d) = (T_0 - T_{Min})e^{(-Kd)} + T_{Min} \qquad (۱۵)$$

که در آن T_0 مقدار اولیه انتقال اطلاعات است. K نرخ واپاشی انتقال اطلاعات است. T_{min} حداقل مقدار انتقال اطلاعات است و d فاصله بین چاه است. درصد چاه‌های مازاد نیز از رابطه ۱۶ قابل محاسبه می‌باشد.

$$\%NRI = \frac{T(d)^{NET}}{T_0 - T_{Min}} \times 100 \qquad (۱۶)$$

که در آن $T(d)^{NET}$ برابر با انتقال اطلاعات شبکه می‌باشد که به شرح رابطه ۱۷ می‌باشد ((Mogheir et al. (2006):

$$T(d)^{NET} = T(d) - T_{Min} \qquad (۱۷)$$

شاخص کیفی آنتروپی وزن‌دار (EWQI[1])

علی‌رغم استفاده گسترده از شاخص کیفیت آب، در طی محاسبات شاخص کیفی آب وزن هر پارامتر معمولاً به‌صورت تجربی و توسط کارشناس تعیین می‌شود و به این طریق بسیاری از اطلاعات ارزشمند کیفیت آب زیرزمینی بدون استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه از رابطه بهینه‌شده شاخص کیفی آب که در آن آنتروپی تعیین کننده وزن هر پارامتر می‌باشد، بهره گرفته‌شده است. در این مطالعه جهت برآورد شاخص کیفی آب از ۱۱ پارامتر کیفی جهت ارزیابی وضعیت کیفیت آب زیرزمینی برای مصرف شرب استفاده شد که شامل کلسیم (Ca)، سدیم (Na)، پتاسیم (K)، منیزیم (Mg)، کلر (Cl)، هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد محلول (TDS)، اسیدیته (PH)، سختی (TH)، بی‌کربنات (Hco_3) و سولفات (So_4) می‌باشد. پس از بررسی‌های مقدماتی، با بهره‌گیری از روش بهبود یافته شاخص کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از آنتروپی وزن‌دار (EWQI) به تحلیل کیفیت آب شرب آبخوان مرکزی دشت بیرجند پرداخته شده است. بر اساس داده‌های کیفیت آب زیرزمینی برای m نمونه و n پارامتر ماتریس مقادیر ویژه X به‌صورت رابطه ۱۸ خواهد بود:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & . & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & . & x_{2n} \\ . & . & . & . \\ x_{m1} & x_{m2} & . & x_{mn} \end{bmatrix} \qquad (۱۸)$$

با توجه به اینکه پارامترهای کیفی آب زیرزمینی واحدهای مختلفی دارند و همچنین اختلاف کیفیت نمونه‌ها، با استفاده از تابع نرمال‌سازی، داده‌ها آماده‌سازی می‌شوند. چهار نوع و حالت را بر اساس خصوصیات هر شاخص می‌توان از هم تفکیک کرد که شامل نوع کارایی، نوع هزینه‌ای، نوع ثابت شده و نوع بازه‌ای است. برای نوع کارایی، تابع نرمال‌سازی به‌صورت رابطه ۱۹ خواهد بود:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \qquad (۱۹)$$

و این در حالی است که برای نوع هزینه‌ای، تابع نرمال‌سازی داده‌ها به‌صورت رابطه ۲۰ است:

$$y_{ij} = \frac{(x_{ij})_{\max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \qquad (۲۰)$$

ماتریس استاندارد داده‌های خام پس از نرمال‌سازی به صورت رابطه ۲۱ خواهد شد:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & . & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & . & y_{2n} \\ . & . & . & . \\ y_{m1} & y_{m2} & . & y_{mn} \end{bmatrix} \qquad (۲۱)$$

نسبت مقدار شاخص پارامتر j در نمونه i بر اساس معادله ۲۲ محاسبه‌شده است:

$$P_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^{m} y_{ij} \qquad (۲۲)$$

آنتروپی اطلاعات نیز به‌صورت رابطه ۲۳ بیان می‌شود:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^{m} P_{ij} \ln P_{ij} \qquad (۲۳)$$

هرچقدر مقدار آنتروپی کم‌تر باشد؛ تاثیر پارامتر j بیش‌تر خواهد بود. وزن آنتروپی (ωj) هر پارامتر (j) با استفاده از معادله ۲۴محاسبه شده است:

1 - Enteropy Water Quality Water

$$\omega_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-e_j)} \quad (۲۴)$$

مرحله دوم محاسبه میزان EWQI، تعیین معیار رتبه‌بندی (Rating scale) کیفی (q_j) برای هر پارامتر است. معیار رتبه‌بندی کیفی نیز با استفاده از رابطه ۲۵ محاسبه می‌شود:

$$q_j = \frac{C_j}{S_j} \times 100 \quad (۲۵)$$

که در این رابطه، Cj غلظت هر پارامتر شیمیایی در هر نمونه به mg/l و S_j غلظت همان پارامتر بر اساس استاندارد مشخص (در این مطالعه، سازمان بهداشت جهانی (WHO)) برای مصارف شرب به mg/l هست. در این رابطه اگر پارامتر j در آب موجود نباشد، q_j برابر صفر خواهد بود. هم‌چنین، اگر مقدار این پارامتر مقدار مجاز باشد، q_j برابر ۱۰۰ خواهد بود. باید توجه کرد که میزان تغییرات pH کوچک بوده و همین نیز موجب می‌شود مقدار معیار رتبه‌بندی کیفی برای این پارامتر بسیار کوچک باشد. طبق استاندارد WHO میزان تغییرات مجاز pH بین ۶/۵ تا ۹/۲ است بنابراین برای محاسبه معیار رتبه‌بندی کیفی pH از رابطه ۲۶ استفاده می‌شود.

$$q_{pH} = \frac{C_{pH} - S_I}{S_{pH} - S_I} \quad (۲۶)$$

که در این رابطه، q_{pH} معیار رتبه‌بندی کیفی pH، C_{pH} مقدار pH مشاهداتی، S_{pH} بیش‌ترین مقدار pH مجاز (بر اساس WHO برابر ۹/۲) و S_I نیز مقدار ایده‌آل pH می‌باشد. در نهایت، EWQI با ضرب مقدار وزن آنتروپی و معیار رتبه‌بندی کیفی هر پارامتر و جمع تمامی این مقادیر باهم محاسبه می‌شود (رابطه ۲۷):

$$EWQI = \sum_{j=1}^{n} \omega_j q_j \quad (۲۷)$$

کیفیت آب زیرزمینی بر اساس EWQI برای مصارف شرب در ۵ رده بسیارخوب، خوب، متوسط، بد و بسیاربد قرار می‌گیرد (Jian-Hua et al., 2011). این رتبه‌بندی در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲- رتبه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی بر اساس EWQI برای مصارف شرب

مقدار شاخص	رتبه	کیفیت آب
کم‌تر از ۲۵	۱	بسیارخوب
۲۵ تا ۵۰	۲	خوب
۵۰ تا ۱۰۰	۳	متوسط
۱۰۰ تا ۱۵۰	۴	بد
بیش‌تر از ۱۵۰	۵	بسیاربد

نتایج و بحث

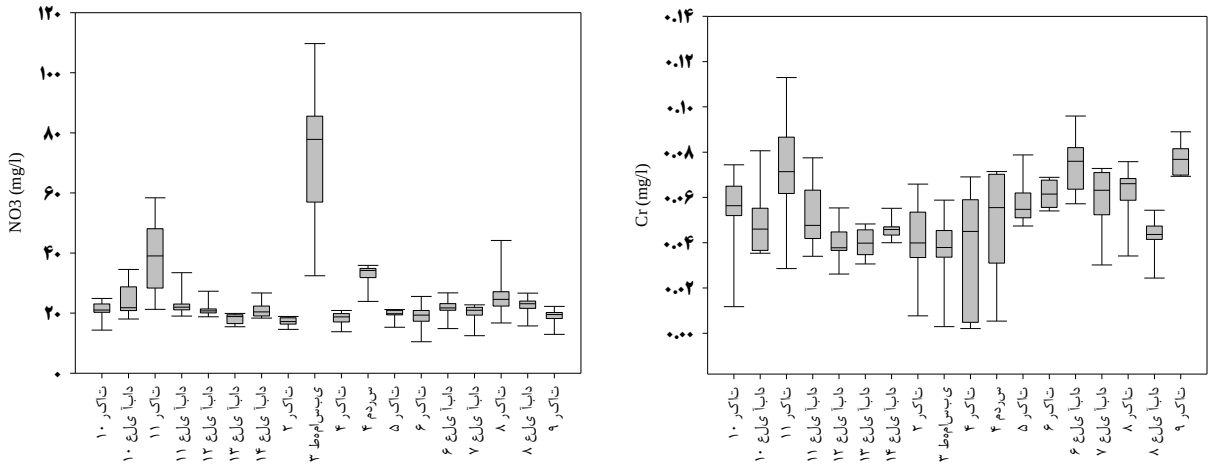
نتایج بررسی پایش کیفی آبخوان از نظر کروم و نیترات

در این مطالعه جهت پایش کیفی آب شرب آبخوان مرکزی دشت بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی از داده‌های کیفی نیترات و کروم اندازه‌گیری شده در دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۸۳ مربوط به ۱۹ حلقه چاه شرب استفاده شده است. دلیل استفاده از این دو پارامتر، مشکل‌ساز بودن مقادیر نیترات و کروم در این شهرستان می‌باشد. جهت بررسی روند تغییرات مقادیر مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه از آزمون من – کندال اصلاح شده با حذف اثر خودهمبستگی داخلی استفاده شده است که جهت اطلاع بیش‌تر در مورد این روش به خلیلی و همکاران (۲۰۱۶) مراجعه شود (Khalili et al., 2016). نتایج بررسی روند تغییرات پارامترهای کیفی مورد بررسی (کروم و نیترات) در دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۸۳ به شرح جدول ۳ و نمودار تغییرات مقادیر کیفی نیترات و کروم موجود در دوره آماری ذکر شده به شرح شکل ۲ می‌باشد.

جهت بررسی اولیه داده‌های موجود از آزمون من – کندال اصلاح شده در خصوص بررسی روند تغییرات داده‌ها استفاده گردید و نتایج بیانگر وجود روند معنی‌دار افزایشی در مقادیر کروم سالانه چاه‌های ۱۳ علی‌آباد و ۴ رکات بود که با استفاده از روش تفاضل‌گیری، روند موجود از داده‌ها حذف گردید. چاه شماره ۴ رکات در غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارد و میزان کروم این چاه در هر سال حدود ۰/۰۰۶ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافته است که با توجه به طول دوره آماری مورد بررسی، از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۳ حدود ۰/۰۵۴ میلی‌گرم بر لیتر افزایش داشته است. یون‌های کرومات می‌توانند توسط اکسیدهای آهن، آلومینیوم، منگنز، مواد معدنی رسی، خاک‌های طبیعی و کلوییدها جذب شوند. جذب کروم شش ظرفیتی یک واکنش ترکیبی سطحی است که بین یون‌های کرومات آبی از یک طرف و مکان‌های ویژه سطحی هیدروکسیل از طرف دیگر انجام می‌پذیرد. هر واحد ترکیب سطحی کروم شش ظرفیتی می‌تواند ۳ الی۴ مکان سطح هیدروکسیل را پوشش دهد. این واکنش ترکیبی وابسته به pH است و در غلظت‌های کم کروم شش ظرفیتی، جذب کروم با کاهش pH افزایش پیدا می‌کند (Davis et al., 1980). در این بین روند تغییرات مقادیر کروم در چاه‌های ۱۰ علی‌آباد، ۱۱ علی‌آباد، ۶ علی‌آباد، ۶ رکات، ۸ رکات و ۸ علی‌آباد کاهشی و غیرمعنی‌دار می‌باشد. روند تغییرات مقادیر نیترات در سطح منطقه نشان داد که تغییرات مقادیر سالانه نیترات در چاه‌های ۱۰ علی‌آباد، ۱۱ رکات، ۸ رکات، ۸ علی‌آباد و ۹ رکات افزایشی و معنی‌دار می‌باشد که بر اساس شیب خط روند، تغییرات مقادیر سالانه نیترات در چاه شماره ۱۱ رکات بیش‌ترین میزان افزایش در بین سایر چاه‌ها را داشته و یا افزایشی در حدود ۳/۵۰ میلی‌گرم در سال در طی دوره آماری مورد بررسی افزایشی در حدود ۳۱/۵۰ میلی‌گرم در سال داشته است.

جدول ۳- نتایج بررسی روند تغییرات مقادیر نیترات و کروم در چاه‌های نمونه‌برداری

چاه	شماره چاه	شیب روند مقادیر نیترات	شیب روند مقادیر کروم	روند تغییرات مقادیر نیترات	روند تغییرات مقادیر کروم
۱۰ رکات	۱	۰/۲۹۸	۰/۰۰۰	۰/۷۱۶	۰/۰۰۰
۱۰ علی‌آباد	۲	۱/۳۰۸	-۰/۰۰۲	۱/۹۶۸	-۰/۵۳۷
۱۱ رکات	۳	۳/۵۰۰	-۰/۰۰۱	۱/۸۹۹	۰/۱۷۹
۱۱ علی‌آباد	۴	-۰/۰۵۶	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	-۰/۳۵۸
۱۲ علی‌آباد	۵	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۷۹
۱۳ علی‌آباد	۶	۰/۰۷۷	۰/۰۰۲	۰/۵۳۷	۰۱/۷۸۹
۱۴ علی‌آباد	۷	۰/۵۰۹	۰/۰۰۰	۱/۶۱۰	۰/۰۹۰
۲ رکات	۸	-۰/۱۷۳	۰/۰۰۲	-۱/۰۷۳	۰/۸۹۴
۳ رکات	۹	۰/۸۵۴	۰/۰۰۰	۰/۵۳۷	۰/۱۷۹
۳ طهماسبی	۱۰	-۰/۵۴۰	۰/۰۰۱	-۰/۱۷۹	۰/۱۷۹
۴ رکات	۱۱	۰/۳۶۷	۰/۰۰۶	۰/۸۹۴	۲/۵۰۴
۴ مدرس	۱۲	۰/۰۸۰	۰/۰۰۴	۰/۱۷۹	۱/۰۷۳
۵ رکات	۱۳	۰/۱۳۸	۰/۰۰۱	۰/۸۹۴	۱/۰۸۲
۶ رکات	۱۴	-۰/۱۷۲	-۰/۰۰۱	-۰/۳۵۸	-۱/۶۱۰
۶ علی‌آباد	۱۵	۰/۱۲۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	-۰/۳۵۸
۷ علی‌آباد	۱۶	۰/۰۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰	۱/۰۷۳
۸ رکات	۱۷	۱/۰۱۲	-۰/۰۰۱	۲/۳۲۶	-۱/۴۳۱
۸ علی‌آباد	۱۸	۰/۲۵۸	۰/۰۰۰	۱/۶۱۰	-۰/۳۵۸
۹ رکات	۱۹	۰/۲۴۲	۰/۰۰۱	۱/۹۶۸	۰/۱۷۹

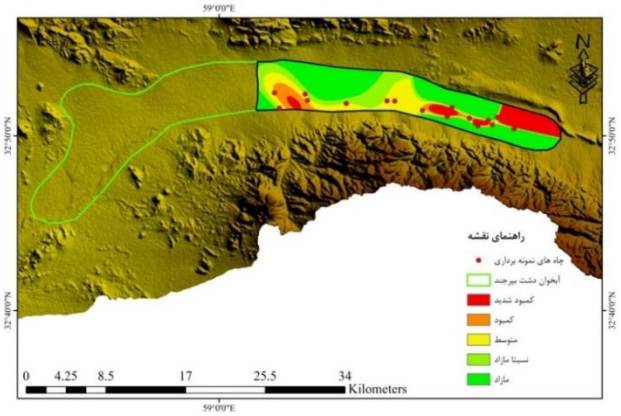


شکل ۲- مقادیر مشاهداتی پارامترهای کروم و نیترات در دوره آماری مورد بررسی در سطح منطقه مورد مطالعه

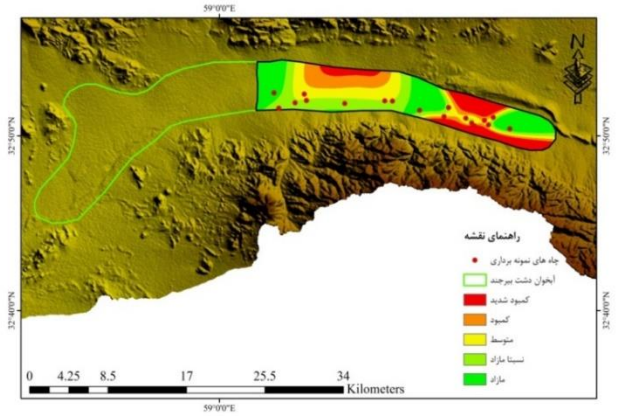
نیترات بدون رنگ، بو و طعم بوده و در آب‌های آشامیدنی بدون آزمایش قابل تشخیص نیست. نیترات به‌طور طبیعی در حد غلظت کم‌تر از حد مجاز، در آب‌های آشامیدنی و آب‌های زیرزمینی وجود دارد. هر نوع فعالیتی در نزدیک چاه‌های آب می‌تواند سبب آلودگی شود. در صورت وجود منابع نقطه‌ای آلوده کننده مانند محل زندگی دام‌ها، محل دفع فاضلاب در مجاورت چاه‌های خانگی، لازم است حداقل سالی یک‌بار آزمایش نیترات انجام و با پایش کیفی آن تغییرات غلظت نیترات بررسی گردد و در صورتی‌که چاه در معرض منابع غیرنقطه‌ای مانند کاربرد کودهای کشاورزی قرار گرفته باشد، پایش کیفی برای بررسی تغییرات غلظت نیترات کم‌تر مورد نیاز می‌باشد. در بین چاه‌های مورد بررسی چاه شماره ۶ رکات و چاه شماره ۳ طهماسبی روندی کاهشی و غیرمعنی‌دار در مقادیر نیترات سالانه در

طی دوره آماری ۱۳۹۳-۱۳۸۴ تجربه کرده‌اند. بعد از آماده‌سازی داده-های مورد بررسی مقادیر کروم و نیترات هر چاه با استفاده از رگرسیون چند متغیره و مقادیر چاه‌های دیگر تخمین زده شد. در نهایت داده‌های مورد بررسی در کلاس‌های مختلف تقسیم شد. جهت تقسیم‌بندی داده‌های موجود تقسیمات ۶ کلاسه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پایش کیفی آب شرب منطقه مورد مطالعه از نظر کروم و نیترات به شرح شکل‌های ۳ و ۴ ارایه گردید. نتایج بررسی شاخص Ni (رتبه‌بندی چاه‌ها) نیز به شرح جدول ۴ ارایه گردید.

همان‌طور که از شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد نتایج پهنه‌بندی شاخص انتقال اطلاعات (ITI) در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داد که در قسمت‌های مرکزی شرایط متوسط بوده و حتی کمبود چاهی از نظر پایش بهینه پارامتر کروم احساس نمی‌شود. این موضوع بیانگر انتقال اطلاعات مناسب در چاه‌های این منطقه از نظر پایش پارامتر کروم می‌باشد. اما کمبود چاه در منطقه شمال‌شرقی منطقه زیاد بوده و نیاز شدید به احداث چاه احساس می‌شود. کمبود شدید چاه در این مناطق شرقی بیانگر ناکافی بودن تعداد چاه‌ها در این منطقه جهت پایش کیفی از نظر پارامتر کروم می‌باشد. یا به عبارتی با پراکندگی موجود در بین چاه‌های مورد بررسی نمی‌توان اطلاعات کافی در مورد میزان کروم آبخوان در این مناطق (نواحی شرقی آبخوان) کسب کرد. با پراکندگی چاه‌ها به شکل فعلی، نمی‌توان پایش نسبتا خوبی بر کیفیت آبخوان از نظر میزان کروم داشت. در قسمت‌های جنوب‌غربی آبخوان نیز تعداد چاه‌های موجود جهت پایش میزان کروم در شرایط متوسط و کمبود قرار دارد. بر اساس جدول ۴، نتایج رتبه‌بندی چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داد که چاه‌های شماره ۱۴، ۲ و ۱۶ رتبه‌های ۱ تا ۳ را در مورد انتقال اطلاعات مقادیر کروم دریافت کردند که نشان دهنده انتقال و دریافت اطلاعات بیش‌تر نسبت به سایر چاه‌ها است. به عبارت دیگر این چاه‌ها ارزش حفظ بیش‌تری نسبت به چاه‌های دیگر دارند و داده‌های این چاه‌ها را می‌توان با اطمینان کامل برداشت و استفاده کرد. این چاه‌ها در نقاط غربی آبخوان قرار دارند. از طرف دیگر چاه‌های شماره ۳، ۹ و ۱۲ در بین سایر چاه‌ها کم‌ترین ارزش و اعتبار را از نظر تبادل اطلاعات کروم کسب کرده‌اند. استفاده از داده‌های این چاه‌ها باید با احتیاط صورت گیرد.



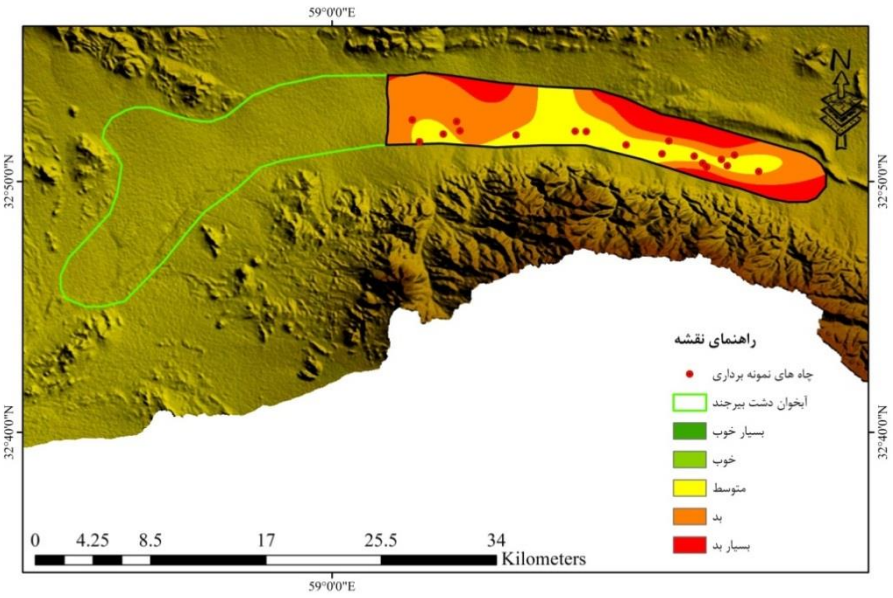
شکل ۳- نتایج پهنه‌بندی مقادیر شاخص آنتروپی جهت پایش کیفی آب زیرزمینی از نظر پارامتر کروم



شکل ٤- نتایج پهنه‌بندی مقادیر شاخص آنتروپی جهت پایش کیفی آب زیرزمینی از نظر پارامتر نیترات

جدول ٤- رتبه‌بندی چاه‌های موجود در منطقه بر اساس شاخص N(i) بر اساس مقادیر کروم و نیترات

شماره چاه	نام چاه	رتبه از نظر مقادیر نیترات	رتبه از نظر مقادیر کروم
۱	چاه شماره ۱۰ رکات	۱۲	۱۲
۲	چاه شماره ۱۰ علی‌آباد	۲	۲
۳	چاه شماره ۱۱ رکات	۶	۱۷
۴	چاه شماره ۱۱ علی‌آباد	۱۰	۵
۵	چاه شماره ۱۲ علی‌آباد	۸	۴
۶	چاه شماره ۱۳ علی‌آباد	۱۸	۶
۷	چاه شماره ۱۴ علی‌آباد	۱۷	۹
۸	چاه شماره ۲ رکات	۱۳	۱۶
۹	چاه شماره ۳ رکات	۴	۱۸
۱۰	چاه شماره ۳ طهماسبی	۳	۸
۱۱	چاه شماره ۴ رکات	۷	۱۳
۱۲	چاه شماره ۴ مدرس	۹	۱۹
۱۳	چاه شماره ۵ رکات	۱۹	۱۵
۱۴	چاه شماره ۶ رکات	۱۱	۱
۱۵	چاه شماره ۶ علی‌آباد	۱	۷
۱۶	چاه شماره ۷ علی‌آباد	۱۶	۳
۱۷	چاه شماره ۸ رکات	۱۵	۱۱
۱۸	چاه شماره ۸ علی‌آباد	۵	۱۴
۱۹	چاه شماره ۹ رکات	۱۴	۱۰



شکل ۵- نتایج بررسی شاخص آنتروپی وزن‌دار در بررسی کیفیت آب شرب آبخوان مرکزی دشت بیرجند

در مورد پهنه‌بندی نتایج حاصل از مقادیر انتقال اطلاعات شاخص آنتروپی در پایش نیترات منطقه مورد مطالعه نتایج نشان دهنده انتقال اطلاعات ضعیف در نواحی شمال‌شرقی و نواحی جنوب‌شرقی منطقه می‌باشد و احداث چاه جدید جهت پایش دقیق منطقه از نظر نیترات در این نواحی ضروری به نظر می‌رسد. با وجود این تعداد چاه در منطقه مورد مطالعه نمی‌توان پایش دقیقی از مقادیر نیترات و کروم در سطح منطقه داشت. هم‌چنین نتایج رتبه‌بندی چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داد که چاه‌های شماره ۱۵، ۲ و ۱۰ رتبه‌های ۱ تا ۳ را در مورد انتقال اطلاعات مقادیر نیترات دریافت کردند که نشان دهنده انتقال و دریافت اطلاعات بیش‌تر نسبت به سایر چاه‌ها است. به عبارت دیگر این چاه‌ها ارزش حفظ بیش‌تری نسبت به چاه‌های دیگر دارند و داده‌های این چاه‌ها را می‌توان با اطمینان کامل برداشت

و استفاده کرد. این چاه‌ها نیز در نقـاط غربـی آبخـوان قـرار دارنـد. از طرف دیگر چاه‌های شماره ۷، ۶ و ۱۳ در بین سایر چـاه‌هـا کـم‌تـرین ارزش و اعتبار را از نظر تبادل اطلاعات نیترات کسب کرده‌اند. استفاده از داده‌های این چاه‌ها نیز باید با احتیاط صورت گیرد (جدول ۴).

نتایج بررسی کیفیت آب شرب آبخوان مرکزی دشت بیرجند

کیفیت آب منطقه مورد مطالعـه بـا اسـتفاده از شـاخص آنتروپـی وزن‌دار مورد بررسی قرار گرفتـه و نتـایج بررسـی کیفیـت آب شـرب منطقه به شرح شکل ۵ ارائه گردید. در این مطالعه از ۱۱ پارامتر کیفی جهت ارزیابی وضـعیت کیفیـت آب زیرزمینـی بـرای مصـرف شـرب استفاده شد که شامل کلسیم (Ca)، سدیم (Na)، پتاسیم (K)، منیزیم (Mg)، کلر (Cl)، هدایت الکتریکی (EC)، کـل مـواد جامـد محلـول (TDS)، اسـیدیته (pH)، سـختی (TH)، بـی‌کربنـات (Hco3) و سولفات (So4) می‌باشد. با بررسی و اعمال تئوری آنتروپی وزن‌دار بر داده‌های کیفی، وزن مورد بررسی در هر پارامتر به دست آمد.

نتایج بررسی کیفیت آب شرب منطقه مورد مطالعه بـا اسـتفاده از شاخص کیفیت آب و آنتروپی وزن‌دار نشـان داد کـه مقـادیر شـاخص مورد نظر بین ۷۱ تا ۱۲۳ متغیر می‌باشد که از نظر طبقه‌بنـدی کیفـی در دسته متوسط و بد قرار دارند. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شـود که تنها بخش‌های مرکزی آبخوان شـرایط متوسـطی داشـته و سـایر نقاط شرایط بد و بسیار بدی از نظر کیفیـت آب دارنـد. لازم بـه ذکـر است که جهت برآورد مقادیر شاخص آنتروپی وزن‌دار تعداد ۱۱ پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است. بدترین کیفیت مربوط به چاه شـماره ۶ علی‌آباد می‌باشد. چاه شماره ۴ مدرس نیز کمترین مقدار شاخص را به دست آورده که این مقدار نیز کیفیتی متوسط را نشان می‌دهد. در بین چاه‌های مورد بررسی، کیفیت چاه‌های شماره ۳ طهماسبی، ۵ رکات، ۶ علی‌آباد، ۷ علی‌آباد، ۸ رکات و ۸ علی‌آباد بدتر از سایر چاه‌ها بود.

کیفیت آب هیچ یک از چاه‌های مورد بررسـی بسـیار خـوب و یـا خوب گزارش نشد. در بین رتبه‌های یـک تـا پـنج، تمـامی چـاه‌هـای منطقه در رتبه‌های ۳ و ۴ قرار گرفتند. به‌طـور کلـی نتـایج بررسـی و پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی آبخوان مورد بررسی نشـان داد کـه کیفیت آب منطقه در شرایط خوبی قرار ندارد و میزان کروم در بیش‌تر چاه‌های مورد بررسی بیش از حد مجاز می‌باشد کـه ایـن موضـوع در تحقیقات طاهری و همکاران (۱۳۸۹) نیز اشاره شده است. با افـزایش شهرنشینی و توسعه صنعت در طی سال‌های مورد بررسی بـه میـزان کروم و نیترات موجود افزوده شده و رونـد افزایشـی میـزان کـروم در منطقه به‌وضوح مشـاهده مـی‌شـود. شـالونگ و همکـاران (۲۰۱۰) در تحقیقات خود عامل افزایش میزان فلزات سنگین در آب زیرزمینـی را توسعه صنعت اعلام کردند (Xiaolong et al., 2010).

جدول ۵- نتایج بررسی وزن پارامترهای کیفی مورد بررسی در شاخص کیفی آب شرب (چاه شماره ۹ رکات)

پارامتر	۹ رکات	۳ رکات	۱۰ رکات	۱۰ علی‌آباد	۱۱ رکات	۱۱ علی‌آباد	۱۲ علی‌آباد	۱۳ علی‌آباد	۱۴ علی‌آباد	۲ رکات	۳ طهماسب	مدرس	٤ رکات	٥ رکات	٦ رکات	۸ رکات	۸ علی‌آباد	۷ علی‌آباد	٦ علی‌آباد
NO3	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۸۶	۰/۰۸۰	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۷	۰/۰۷۴	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۸۲
CO3	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۹	۰/۰۷۵	۰/۰۷۴	۰/۰۷۹	۰/۰۸۲	۰/۰۷۷	۰/۰۷۳	۰/۰۷۳	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۴
K	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۳	۰/۰۷۶	۰/۰۸۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۹	۰/۰۷۶	۰/۰۷۳	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۴
Na	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۹	۰/۰۷۵	۰/۰۸۰	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۲	۰/۰۷۴	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۸۳	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷
Mg	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۳	۰/۰۸۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۸۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵
Cr	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۰/۰۷۶	۰/۰۷۹	۰/۰۷۸	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۷	۰/۰۷۳	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷
Ca	۰/۰۷۹	۰/۰۷۹	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶	۰/۰۸۰	۰/۰۷۳	۰/۰۸۳	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۹	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵
th	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۳	۰/۰۸۰	۰/۰۸۳	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۹	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵
pH	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۵	۰/۰۷۴	۰/۰۷۷	۰/۰۷۵	۰/۰۷۶	۰/۰۷۴	۰/۰۸۲	۰/۰۷۸	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶
SO4	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۹	۰/۰۷۸	۰/۰۸۱	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۴	۰/۰۸۳	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۹	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۸
TDS	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۴	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۳	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷
Cl	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۵	۰/۰۷۹	۰/۰۷۳	۰/۰۷۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۸	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۴	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۷۵	۰/۰۷۵	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸
EC	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۸	۰/۰۸۰	۰/۰۷۸	۰/۰۷۷	۰/۰۷۵	۰/۰۷۳	۰/۰۷۴	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۸	۰/۰۷۶	۰/۰۷۶	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج بررسی پایش آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه نشان داد تغییرات زمانی پارامترهای کروم و نیترات آب شرب منطقه به ترتیب در ۷۴ و ۸۴ درصد چاه‌های مورد بررسی افزایشی می‌باشد که این موضوع بیانگر افزایش مقادیر مذکور در دوره آماری مورد بررسی می‌باشد. با توجه به روند افزایشی مقادیر کروم و نیترات موجود در آب شرب منطقه پیش‌بینی می‌شود در آینده این روند مشکل‌ساز شده و پیامدهای جبران‌ناپذیری را به وجود آورد. چرا که مقادیر مشاهداتی داده‌های کروم و نیترات موجود بیانگر غیرمجاز بودن مقادیر کروم در چاه‌های شماره ۱۰، ۱۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۹ رکات و چاه‌های شماره ۱۰، ۱۱، ۶، ۷ و ۹ علی‌آباد می‌باشد. در بین چاه‌های مورد بررسی تنها چاه‌های شماره ۱۲، ۱۴ و ۸ علی‌آباد و چاه شماره ۳ طهماسبی شرایط بهتری نسبت به سایر چاه‌ها داشته‌اند که در این بین چاه شماره ۱۴ علی‌آباد در هیچ یک از نمونه‌های برداشت شده مقدار کروم بیش‌تر از ۰/۰۵ نداشته و شرایط نرمالی دارد. در مورد مقادیر نیترات نیز مقادیر چاه شماره ۱۱ رکات در سال‌های اخیر، چاه شماره ۶ علی‌آباد در سال ۱۳۸۴ و چاه شماره ۳ طهماسبی در تمامی سال‌های مورد بررسی میزان نیتراتی بیش از حد مجاز داشته است.

نتایج بررسی بهینه بودن تعداد چاه‌های مورد بررسی از نظر پایش بهینه مقادیر کروم و نیترات در منطقه مورد مطالعه نشان داد که با تعداد چاه‌های موجود در منطقه نمی‌توان پایش مناسبی از مقادیر کروم و نیترات در منطقه داشت و پراکندگی این چاه‌ها به‌صورت یکنواخت نیست. به همین دلیل توصیه می‌شود در مطالعات کمی و کیفی آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند از مقادیر داده‌های چاه‌های کشاورزی و یا چاه‌های پیزومتر نیز استفاده شود. هم‌چنین با توجه به اطلاعات ضعیف برخی از چاه‌ها پیشنهاد می‌شود چاه جدید برای جایگزین کردن حفر گردد. بعد از بررسی مقادیر شاخص آنتروپی در بررسی و پایش کیفی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، وزن پارامترهای کیفی جهت برآورد شاخص آنتروپی وزن‌دار محاسبه گردید. نتایج بررسی کیفیت آب آشامیدنی منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های مشاهداتی و شاخص کیفیت آب نشان داد که کیفیت آب شرب منطقه مورد مطالعه در هیچ یک از چاه‌های موجود مناسب نیست. کیفیت آب شرب منطقه مورد مطالعه در بین ۵ دسته طبقه‌بندی، رتبه ۳ و ۴ را دریافت کردند که به ترتیب به معنی کیفیت متوسط و بد می‌باشد. بدترین کیفیت آب نیز مربوط به چاه شماره ۶ علی‌آباد می‌باشد. متوسط مقدار شاخص آنتروپی وزن‌دار در کل منطقه نیز حدود ۹۷/۵۷ محاسبه گردید که بیانگر کیفیت بد آب شرب در کل منطقه می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی به شماره ابلاغیه ۶۵۳۲/د/۱۳۹۶ مورخ ۱۳۹۶/۰۴/۰۳ و با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بیرجند انجام شد که بدین‌وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

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

طاهری،ش.، معاشری،ب.ن.، شریف‌زاده،.غ. ۱۳۸۹. غلظت کروم و مس در آب‌های زیرزمینی و شبکه توزیع آب آشامیدنی شهر بیرجند در سال ۱۳۸۹-۱۳۸۸. مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی بیرجند. ۱۸. ۱: ۶۷-۶۲.

معصومی،ف.، کراچیان،ر. ۱۳۸۵. ارزیابی کارآیی سیستم‌های پایش کیفی منابع آب زیرزمینی با تئوری آنتروپی گسسته، مطالعه موردی: آبخوان تهران. دومین کنفرانس ملی منابع ایران، ۳ و ۴ بهمن، اصفهان.

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

Ahmed,S.S., Mazumder,Q.H., Jahan,C.S., Ahmed,M., Islam,S. 2002. Hydrochemistry and classification of groundwater, Rajshahi City Corporation Area, Bangladesh. Journal of the Geological Society India. 60:411-418

Anbazhagan,S., Nair,A.M. 2007. Geographic information system and groundwater quality mapping in Panvel Basin, Maharashtra, India. Environmental Geology. 45.6: 753-761.

Chadalavada,S., Datta,B., Naidu,R. 2010. Uncertainty based optimal monitoring network design for a chlorinated hydrocarbon contaminated site, Environmental Monitoring and Assessment. 173:929-940.

Chapman,T.G. 1986. Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance. Journal of Hydrology. 85: 111-126.

Davis,M.H., Scroggie,J.G. 1980. Theory and practice of direct chrome liquor recycling, Learning Disabilities Mortality Review (LeDeR). 31: 1-8

Fagbote,E.O., Olanipekun,E.O. Uyi,H.S. 2014.Water Quality index of the ground water of bitumen deposit impacted farm settlements using entropy

planning in developing country, Groundwater Hydrology, Balema Publisher. Tokyo. 2: 3-20.

Pei-Yue,L., Hui,Q. Jian-Hua,W. 2010. Groundwater Quality Assessment Based on Improved Water Quality Index in Pengyang County, Ningxia, North west China. E-Journal of Chemistry. 7(S1): S209-S216.

Sanchez,E., Colmenarejo,M., Vicente,J., Rubio,A., Garca,M., Travieso,L., Borja,R. 2007. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution, Journal of Ecological Indicators.7.2:315-28.

Sarlak,N., Sorman,A. 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.

WHO. 2008. Guidelines for drinking water quality recommendation, Vol. I ،World Health Organization، Geneva.

Xiaolong,W., Jingyi,H., Ligang,X., Qi,Z. 2010. Spatial and seasonal variations of the contamination within water body of the Grand Canal, China. Environmental Pollution. 158.5: 1513-1520.

Zhu,Q., Shen,L., Liu,P., Zhao,Y., Yang,Y., Huang,D. 2015.Evolution of the Water Polish JResources and Entropy Theory, Polish Journal of Environmetal Studies. 24.6: 2727- 2738.

weighted,International Journal of Enviromental Science and Technology. 11.1: 127- 138.

Harmancioglu,N.B., Alpaslan,N. 1992. Water quality monitoring network design: A problem of multiobjective decision making, Water resources bulletin. 28.1: 179-192.

Jaynes,E.T. 1957. Information theory and statistical mechanics, Physical review. 106: 620– 630.

Jessop,A. 1995. Informed Assessments, An Introduction to Information, Entropy and Statistics, New York: Ellis Horwoo.

Jian-Hua,W., Pei-Yue,L., Hui,Q. 2011. Groundwater Quality in Jingyuan County, a Semi-Humid Area in Northwest China, E-Journal of Chemistry. 8.2:787-793.

Khalili,K., Tahoudi,M.N., Mirabbasi,R., Ahmadi,F. 2016. Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century, Stochastic environmental research and risk assessment. 30.4: 1205-1221.

Markus,M., Knapp,H.V., 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.

Mogheir,Y., Lima,J.L.M.P., Singh,V.P. 2004. Characterizing the special variability of groundwater quality using the entropy theory, hydrological process, .18: 2165-2179.

Mogheir,Y., Singh,V.P. 2003. Specification of information needs for groundwater management

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 12, Agu.-Sep. 2018, p. 556-568

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۲، مرداد - شهریور ۱۳۹۷، ص. ۵۶۸-۵۵۶

Qualitative Monitoring of Drinking Water Using Entropy Indices (Case Study: Central Aquifer of Birjand Plain)

Y. Ramezani[1*], M. Pourreza-Bilondi [2], M. Yaghoobzadeh[3], M. Nazeri Tahrudi[4]
Recived: Nov.04, 2017 Accepted: Nov.21, 2017

Abstract

In this research, with a new approach based on entropy theory, the regional value of sampling wells in central aquifer of Birjand Plain and the groundwater quality in terms of drinking is studied. Regarding the formation of the plain, as well as the chromium and nitrate problems of groundwater in the region, the qualitative monitoring of nitrate and chromium amounts using entropy theory has been investigated to determine the number of wells in the aquifer to accurately monitor these two parameters. The results of the trend of chromium and nitrate in the region showed an increase in the amount of nitrate and chromium in the statistical period of 2005-2014 in most of the wells studied. The highest rate of nitrate was related to well No. Rakat 11, and on the chromium values related to the wells Nos. 4 Rakat Modares. The results of the qualitative monitoring of these two parameters showed that of 19 wells in the plain, well Nos. 3 of Rakat and 4 of Modares regarding the transmission of chromium data and wells Nos. 5 Rakat and 13 of Ali Abad in terms of transfer of nitrate information in The critical situation (the lowest rank and the weakest position) and the use of their data are not accurately describing the aquifer information. Other important results obtained in this study are the location of all wells in poor and qualitative conditions in drinking water based on weighted entropy. Based on entropy of the water quality index, 63% of the total groundwater samples were rated three and 37% ranked four in terms of water quality for drinking.

Keywords: Entropy theory, Groundwater, Information transfer model, Monitoring

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran
2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran
3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran
4- Ph.D. Student of Water Resources, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran
(*- Corresponding Author Email: y.ramezani@birjand.ac.ir)