

ارزیابی زمین آماری با شاخص کیفیت آب زیرزمینی به منظور آشامیدن (DGWQI) در آبخوان دشت
بیرجند

مبین افتخاری، سیداحمد اسلامی نژاد، علی حاجی الیاسی و محمد اکبری

دوره ۷، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صفحات ۲۶۷-۲۷۸

Vol. 7(2), Summer 2021, 267-278

DOI: 10.22034/JEWE.2021.256731.1464

Geostatistical Evaluation with Drinking
Groundwater Quality Index (DGWQI) in Birjand
Plain Aquifer

Eftekhari, M., Eslaminejad, S.A., Haji Elyasi, A. and
Akbari, M.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

افتخاری، م.، اسلامی نژاد، ا.، حاجی الیاسی، ع. و اکبری، م. (۱۴۰۰). ارزیابی زمین آماری با شاخص کیفیت آب زیرزمینی به منظور آشامیدن (DGWQI) در آبخوان دشت بیرجند. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۲، صفحات: ۲۶۷-۲۷۸.

Citing this paper: Eftekhari, M., Eslaminejad, S. A., Haji Elyasi, A. and Akbari, M. (2021) Geostatistical evaluation with drinking groundwater quality index (DGWQI) in Birjand Plain aquifer. Environ. Water Eng., 7(2), 267-278. DOI: 10.22034/JEWE.2021.256731.1464

مقاله پژوهشی

ارزیابی زمین آماری با شاخص کیفیت آب زیرزمینی به منظور آشامیدن (DGWQI) در آبخوان دشت بیرجند

مبین افتخاری^۱، سیداحمد اسلامی نژاد^۲، علی حاجی الیاسی^۳ و محمد اکبری^{۴*}

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

^۲کارشناس ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۴استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

*نویسنده مسئول: moakbari@birjand.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۱/۲۱]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۱/۰۵]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۸/۲۰]

چکیده

آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شرب در مناطق نیمه خشک ایران است؛ بنابراین، نظارت بر کیفیت این منبع ارزشمند، حیاتی است. از این رو، هدف از این مطالعه بررسی و تهیه نقشه کیفیت آب زیرزمینی بیرجند واقع در منطقه نیمه خشک شرق ایران با استفاده از تحلیل زمین آماری مبتنی بر GIS و با شاخص کیفیت آب زیرزمینی به منظور آشامیدن (DGWQI) بود. برای این منظور از داده های جمع آوری شده کیفیت آب زیرزمینی ۲۷ حلقه چاه کشاورزی در طی سال های ۱۳۹۸ - ۱۳۹۳ استفاده شد. نتایج تحلیل های مکانی بیانگر این بود که ۶۳٪ مساحت آبخوان در رده کیفی مناسب، ۱۸٪ مساحت در رده ضعیف، ۱۰٪ مساحت در رده خیلی ضعیف و ۹٪ مساحت آبخوان نیز در رده غیرآشامیدنی قرار داشت. تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای EC ، Mg^{2+} و TDS با بالاترین میانگین شاخص تغییر ۱۸/۹۸، ۲۰/۶۸ و ۱۹/۰۴ به ترتیب حساس ترین پارامترها در محاسبه DGWQI بودند. ارزیابی خطا به روش R^2 و $RMSE$ ، روی مدل های کریجینگ معمولی و تغییرنگار کروی عملکرد خوبی برای تحلیل فضایی تمام پارامترها از جمله DGWQI، EC ، Mg^{2+} و TDS را نشان داد. نقشه DGWQI نشان می دهد که بخش غربی و جنوب غربی آبخوان از شرایط کیفی مناسبی جهت استحصال آب شرب مناسب برخوردار نمی باشد.

واژه های کلیدی: پهنه بندی؛ تحلیل حساسیت؛ تغییرنگار؛ کریجینگ.

۱- مقدمه

آب زیرزمینی یک منبع طبیعی بسیار مهم در مناطق خشک و نیمه خشک می باشد که دارای اهمیت اقتصادی و اجتماعی بسزایی می باشد (Khodapanah et al. 2009; Sandara- Kumar et al. 2010). به دلیل رشد سریع جمعیت، نیاز به آب شیرین در سراسر جهان در حال افزایش است. از طرفی منابع آب شیرین در دنیا محدود هستند و توزیع آن ها نامتوازن می باشد. در ایران، کمبود منابع آب شیرین یکی از موانع توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی می باشد. (Heshmati 2011) آب های زیرزمینی مهم ترین منابع جهت شرب، کشاورزی و صنعت در ایران هستند. ارزیابی کیفیت آب های زیرزمینی، در ایران با توجه به محدودیت منابع موجود بسیار قابل توجه می باشند. یکی از روش های شناخته شده برای ارزیابی کیفیت آب های زیرزمینی برای آشامیدن، استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی^۱ (DGWQI) است (Kumar et al. 2020). یکی از مشکلات اصلی در ارزیابی کیفیت آب های زیرزمینی، عدم امکان نمونه برداری از تمامی مناطق می باشد. یکی از راه حل های مناسب در تجزیه و تحلیل مکانی داده ها، استفاده از روش های درون یابی یا به اصطلاح زمین آمار در محیط GIS می باشد که یک محیط کارآمد برای سازمان دهی سریع و تفسیر حجم زیادی از داده های مکانی فراهم می کند (Khaledi et al. 2020). تاکنون مطالعات زیادی در مورد استفاده از شاخص DGWQI در سراسر جهان انجام شده است. با این حال، مطالعات بسیار کمی در ارزیابی تحلیل زمین آماری این شاخص به ویژه در ایران انجام شده است. Sandara-Kumar et al. (2010) کیفیت آب زیرزمینی را در منطقه جم در هند را با استفاده از شاخص GWQI ارزیابی کردند. پارامترهای pH، EC^۲، کدورت، کلر و سختی کل برای محاسبه شاخص GWQI در نظر گرفتند که نتایج نشان داد بر اساس شاخص DGWQI، آب زیرزمینی منطقه برای آشامیدن از کیفیت پایینی برخوردار بود. Mohebbi et al. (2013) کیفیت آب زیرزمینی مناطق شهری ایران را برای آشامیدن با استفاده از شاخص کیفیت آب آشامیدنی (DGWQI) بررسی کردند. آنها ۲۳ پارامتر کیفیت آب را به عنوان پارامترهای ورودی انتخاب نمودند. براساس شاخص

DGWQI، حدود ۹۵٪ از آب های زیرزمینی برای آشامیدن در کیفیت خوبی قرار داشتند. (Soleimani et al. 2018) کیفیت آب آشامیدنی شهرستان های قروه و دهگلان در استان کردستان را براساس شاخص GWQI مورد ارزیابی قرار دادند. نمونه های آب زیرزمینی از ۵۰ حلقه چاه گرفته شد و ۹ پارامتر فیزیکی و شیمیایی برای محاسبه شاخص GWQI اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که ۳۶٪ از نمونه ها به عنوان کیفیت عالی آب در نظر گرفته شدند و ۶۴٪ از نمونه ها به عنوان کیفیت خوب برای مصارف آشامیدنی طبقه بندی شدند. (Bidhuri and Khan 2020) از مدل درون یابی شاخص کیفیت آب GWQI در نواحی جنوب شرقی دهلی استفاده کردند. نتایج آن ها نشان داد که آب زیرزمینی منطقه از نظر شرب و سایر مصارف خانگی فاقد کیفیت مناسب بود.

بررسی پژوهش های پیشین نشان دهنده این موضوع است که اولاً استفاده از شاخص کیفیت DGWQI، در طیف وسیعی از پژوهش های مورد استفاده قرار گرفته و ثانیاً این شاخص به خوبی می تواند ارزیابی مناسبی از وضعیت کیفی آب های زیرزمینی در خصوص شرب را ارائه دهد. هدف از پژوهش حاضر ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان بیرجند و تحلیل زمین آماری آن و تعیین وضعیت آبخوان از منظر کیفیت برای آشامیدن بود. در این راستا، اهداف جزئی این پژوهش ارزیابی آب زیرزمینی منطقه بیرجند برای مصرف شرب با استفاده از شاخص کیفی DGWQI، شناسایی پارامترهای حساس برای محاسبه شاخص DGWQI، انجام تجزیه و تحلیل زمین آماری DGWQI، و پارامترهای مهم آن، تولید نقشه DGWQI پارامترهای مهم آن در منطقه مورد مطالعه بود.

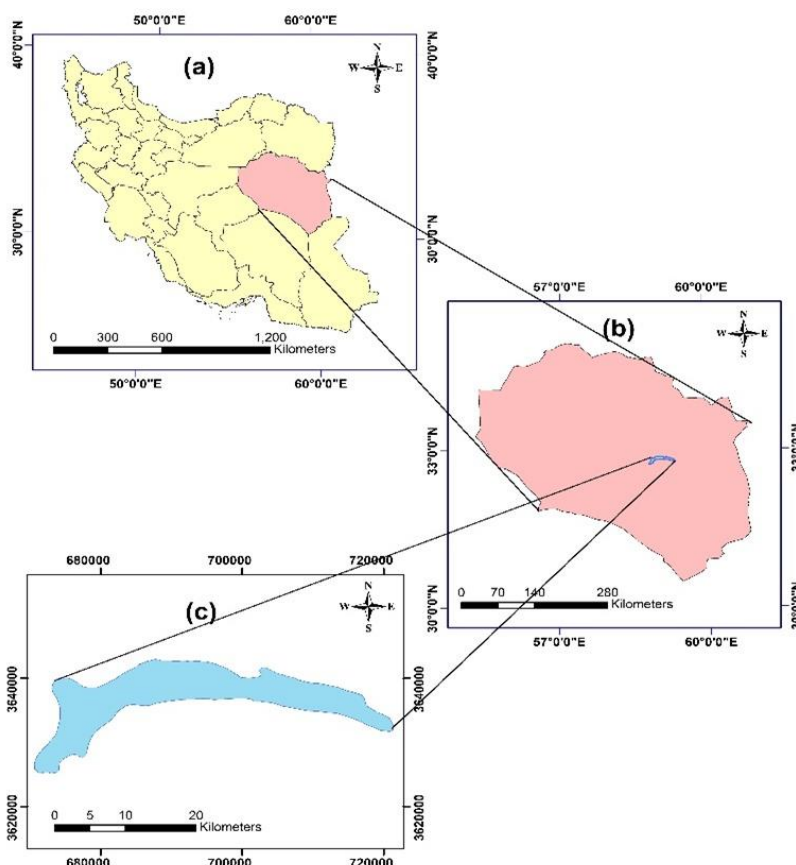
۲- مواد و روش کار

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت بیرجند، یکی از محدوده های مطالعاتی حوزه آبخیز کویر لوت می باشد که مختصات جغرافیایی آن بین طول های ۵۸° و ۴۱' تا ۵۹° و ۴۶' شرقی و عرض های ۳۲° و ۳۵' تا ۳۳° و ۸' شمالی قرار گرفته است. مساحت کلی محدوده مطالعاتی بیرجند ۳۴۰۶/۷۲ km² است که از این مقدار سهم دشت و ارتفاعات به ترتیب ۹۰۰/۶۳ و ۲۵۰۶/۰۹ km² می باشد. آبخوان دشت بیرجند بزرگ ترین حوضه آبریز استان بوده که متوسط بارندگی در این محدوده ۱۷۰ mm در سال می باشد (Eftekhari et al. 2019). آبخوان بیرجند در

^۱Drinking Groundwater Quality index^۲Electrical conductivity

استان خراسان جنوبی با توجه به اینکه در منطقه گرم و نیمه خشک واقع گردیده است به عنوان اصلی ترین منبع آب شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت کلی دشت بیرجند

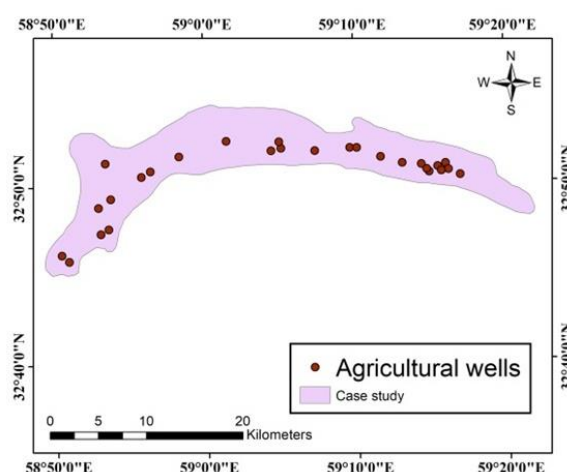
Fig. 1 General location of Birjand plain

منطقه مورد مطالعه در سال های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۸ از طریق آزمایشگاه کیفی شرکت آب و فاضلاب استان خراسان جنوبی جمع آوری شدند که موقعیت چاه های کشاورزی مورد نظر در شکل (۲) نشان داده شده است.

قبل از تجزیه و تحلیل آماری داده ها و تفسیر کیفیت آب های زیرزمینی، دقت نتایج آزمایشگاهی با استفاده از رابطه (۱) خطای توازن یونی به دست آمد (Baudron et al. 2013).

$$IBE(\%) = \frac{\sum(cations - anions)}{\sum(cations + anions)} \times 100 \quad (1)$$

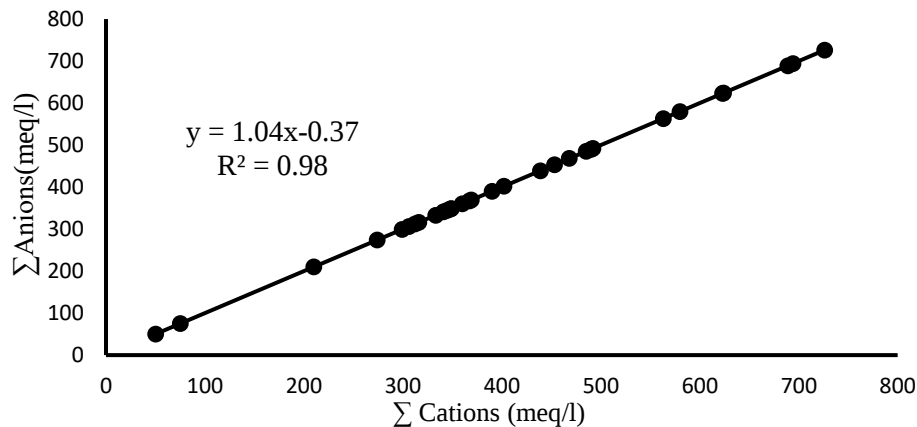
که، IBE خطای توازن یونی می باشد. در رابطه (۱) اگر $IBE > 5\%$ باشد، در رده کیفیت قابل قبول می باشد. همچنین در شکل (۳) با نشان دادن یک رابطه مناسب بین مجموع کل کاتیون ها و آنیون ها تقریباً از تمام ۲۷ نمونه آب زیرزمینی پیروی می کند. همچنین تحلیل هیدروشیمیایی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در نرم افزار Aqua انجام شد.



شکل ۲- موقعیت چاه های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه

Fig. 2 Location of agricultural wells in the study area

به منظور نمونه برداری و تحلیل و بررسی کیفیت آب های زیرزمینی، نمونه های آب از ۲۷ حلقه چاه کشاورزی در



شکل ۳- ارتباط بین مجموع آنیون ها و کاتیون ها

Fig. 3 Correlation between the sum of anions and cation

et al. 2017) برای بررسی تأثیر حذف هر یک از ۱۱ پارامتر بود که برای محاسبه DGWQI مورد استفاده واقع شد. حساسیت حذفی به بررسی حساسیت شاخص DGWQI به حذف یک یا چند پارامتر از تحلیل ها می پردازد و برحسب شاخص تغییر به صورت رابطه (۵) بیان می شود (Machiwal et al. 2011).

$$V_{wi} = \left[\frac{DGWQI - DGWQI_{wi}}{DGWQI} \right] \times 100 \quad (5)$$

که، V_{wi} معادل شاخص تغییر برحسب % بدون پارامتر i ، DGWQI معادل شاخص کیفیت آب زیرزمینی با تمام ۱۱ پارامتر و $DGWQI_{wi}$ معادل شاخص کیفیت آب زیرزمینی بدون پارامتر i می باشد.

۲-۴- تحلیل مکانی

نقشه های این شاخص و پارامترهای حساس آن با استفاده از روش درون یابی کریجینگ معمولی در محیط نرم افزار ArcGIS 10.5 تولید شده اند؛ زیرا بر اساس پژوهش های پیشین، این روش حداقل خطا را در نتایج دارد (Eftekhari et al. 2019). تغییرنگار^۲ توسط رابطه (۶) محاسبه شد (Pirzadeh and Asvar 2020).

$$\gamma(h) = \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (6)$$

تغییرنگار یک ابزار زمین آماری برای مدل سازی و تفسیر وابستگی فضایی در یک متغیر منطقه ای می باشد؛ که در آن $\gamma(h)$ ، $Z(x_i)$ و $N(h)$ پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی در محل x_i ، تغییرنگار برای فاصله تأخیر h بین $Z(x_i)$ و $Z(x_i+h)$ و تعداد جفت داده اندازه گیری شده اند. روش

۲-۲- شاخص شرب کیفیت آب زیرزمینی (DGWQI) جهت تحلیل شاخص کیفی آب زیرزمینی مشخص کردن وزن هر پارامتر کیفیت آب زیرزمینی (Gw_i) به صورتی می باشد که وزن پارامترهای کیفی بین ۱ و ۵ متغیر است. وزن ۱ و ۵ به ترتیب به کم ترین و بیش ترین پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی تعلق دارند (Ramakrishnaiah et al. 2009). وزن نسبی GWR^1 با استفاده از رابطه (۲) به دست می آید.

$$GWR = \frac{Gw_i}{\sum_{i=1}^n Gw_i} \quad (2)$$

که، Gw_i وزن نسبی هر پارامتر کیفیت آب زیرزمینی و در مخرج کسر نیز مجموع این وزن قرار می گیرد. همچنین تعیین نسبت کیفیت (qi) برای هر پارامتر با استفاده از رابطه (۳) به دست می آید.

$$qi = \left(\frac{C_i}{DS_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

که، qi نسبت کیفیت، C_i غلظت هر پارامتر کیفی (mg/l) و DS_i استاندارد WHO برای هر پارامتر کیفی می باشد. در نهایت محاسبه شاخص کیفیت آب های زیرزمینی با استفاده از رابطه (۴) می باشد (Seifi et al. 2020).

$$DGWQI = \sum GWR \times qi \quad (4)$$

که، GWR وزن نسبی و qi نسبت کیفیت می باشد.

۲-۳- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت، به بیان تعیین پارامترهایی می باشد که بیش ترین و یا کم ترین تأثیر را بر کیفیت آب های زیرزمینی یک آبخوان دارند. در مطالعه حاضر، حساسیت حذفی (Hu)

²variogram¹Groundwater Weight Relative

از ۵۲ تا ۸۳۸/۶ mg/l با میانگین ۲۱۷/۱ mg/l متغیر است. تنها ۶۵٪ نمونه‌ها در محدوده مجاز Mg^{2+} (کم‌تر از mg/l ۳۵) بودند. غلظت Na^+ از ۶ تا ۲۲۰۰/۴ mg/l متغیر بود. حداقل، حداکثر و میانگین غلظت بی‌کربنات به ترتیب ۱۰۰، ۵۵۲/۱ و ۳۰۹/۱ mg/l بود. میانگین غلظت سولفات در آب‌های زیرزمینی دشت ۳۰۱/۵ mg/l بود. میزان کلر بین ۱۳/۵ تا ۵۱۱۷ mg/l با میانگین مقدار ۹۴۱/۶ mg/l متغیر بود (جدول ۱). براساس گزارش WHO در سال ۲۰۱۱، ۱۸/۵٪ از نمونه‌های آب زیرزمینی از حداکثر حد مجاز Cl^- (۶۰۰ mg/l) تجاوز نمود.

۳-۲- ارزیابی هیدروژئوشیمیایی

نمودارهای پایپر و استیف برای تعیین کاتیون‌های اصلی، آنیون‌ها و پارامترهای ترکیبی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به نمودار استیف، Cl^- آنیون غالب، با ترتیب فراوانی $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ بود. Na^+ هم کاتیون غالب با ترتیب فراوانی، $K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$ است. Ca^{2+} ، Mg^{2+} و N^+ به علاوه K^+ که به عنوان کاتیون‌های اصلی هستند، به ترتیب در حدود ۳۳، ۲۵، ۴۳٪ از نمونه‌ها را شامل می‌شوند. آنیون اصلی در ۲۵٪ از نمونه‌ها Cl^- ، در ۲۲٪ نمونه‌ها SO_4^{2-} است؛ و در ۴۲٪ نمونه‌ها HCO_3^- است. با توجه به نمودار پایپر، تمام نمونه‌ها به سه نوع آب اصلی طبقه‌بندی می‌شوند؛ آب غالب از نوع Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، SO_4^{2-} و Cl^- بوده که ۳۴٪ نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد. این امر می‌تواند به دلیل تجزیه ناهمگون و هوازگی مواد کربناته از سازندهای کربناته مانند آسماری، توسط کربن دی‌اکسید حل‌شده در محل مطالعه باشد. نوع آب عمده بعدی Ca^{2+} ، Mg^{2+} و HCO_3^- که شامل ۴۸٪ نمونه‌ها بود و سپس نوع آب Na^+ ، Cl^- و SO_4^{2-} که شامل ۱۸٪ نمونه‌ها بود.

۳-۳- شاخص DGWQI

جدول (۲) مقادیر وزنی توصیه‌شده هر پارامتر کیفیت آب زیرزمینی و مراحل محاسبه DGWQI را نشان می‌دهد. وزن هر پارامتر کیفی براساس اهمیت آن در کیفیت آب آشامیدنی تعیین می‌شود. بالاترین وزن ۵ مربوط به TDS بود و به دلیل اهمیت عمده آن در ارزیابی کیفیت آب است پس از آن کلراید با وزن ۴ است. با توجه به میانگین DGWQI که معادل ۲۹۳ است، آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه به عنوان آب‌های غیرقابل شرب طبقه‌بندی می‌شوند. در ۵۹٪ نمونه‌ها مقادیر DGWQI بین صفر تا

کریجینگ معمولی نیز توسط رابطه (۷) محاسبه می‌شود (Pirzadeh and Asvar 2020).

$$\hat{Z}(x_i) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (7)$$

که، λ_i و $Z(x_i)$ به ترتیب، وزن یک نقطه خاص و پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی پیش‌بینی‌شده در نقاط انتخابی هستند.

۵-۲- ارزیابی عملکرد

با استفاده از روش‌های آماری برای نشان دادن عملکرد مدل‌های تغییرنگار نیمه مورد استفاده قرار گرفته شد. ضریب تعیین (R^2) درواقع نشان‌دهنده سنجش مناسبت برازش مدل یا سازگاری روش با داده‌ها می‌باشد (رابطه ۸) و میانگین خطا^۱ (ME) (رابطه ۹) و ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) (رابطه ۱۰) نیز نشان‌دهنده دقت مدل (توزیع باقی‌مانده مدل) می‌باشد (Chandra and Sahoo 2020).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i^2) - \frac{(\sum_{i=1}^N Y_i)^2}{N}} \quad (8)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i) \quad (9)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N} \right]^{0.5} \quad (10)$$

که، N تعداد داده، Y_i مشاهده اندازه‌گیری‌شده و $\hat{Y}_i$ مقدار تخمین زده مشاهدات می‌شود.

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- توصیف پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی

پارامترهای کیفی آبخوان دشت بیرجند در جدول (۱) بیانگر این می‌باشد که حداکثر محدوده مجاز پارامترهای مختلف را مطابق با WHO در سال ۲۰۱۱ نشان می‌دهد. مقادیر pH از ۷/۳۰ تا ۸/۲۵ با مقدار متوسط ۷/۷۰ متغیر می‌باشد (جدول ۱). میانگین TDS در آب زیرزمینی دشت ۳۶۶ mg/l بود و براساس این مقدار، آب زیرزمینی برای آشامیدن مناسب نیست (WHO 2011). نتایج نشان می‌دهد که تنها ۷۵٪ از نمونه‌ها کمتر از ۶۰۰ mg/l TDS دارند که برای آب آشامیدنی بدون خطر محسوب می‌شود (WHO 2011). همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، غلظت Ca^{2+}

¹Mean Error

²Root Mean Square Error

۱۰۰ (رده کیفی مناسب)، در ۲۱٪ نمونه‌ها مقادیر DGWQI بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ (رده ضعیف)، در ۱۲٪ نمونه‌ها مقادیر DGWQI بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ (رده خیلی ضعیف) و در ۸٪ نمونه‌ها مقادیر DGWQI بیش از ۳۰۰ (رده غیرآشامیدنی) بود. طبق جدول (۲)، EC با $QW=۶۲$ ، TDS با $QW=۵۸$ و Mg^{2+} با $QW=۵۸$ بیش‌ترین تأثیر را در محاسبه DGWQI داشتند، درحالی‌که pH با $QW=۶/۲$ ، سولفات با $QW=۱۰$ و TA با $QW=۱۱$ کم‌ترین تأثیر را در محاسبه DGWQI داشتند.

جدول ۱- حداکثر محدوده مجاز پارامترهای فیزیکوشیمیایی آبخوان دشت بیرجند

Table 1 Maximum allowable range of physicochemical parameters of Birjand plain aquifer

Parameter	Unit	Mean	Min	Max	SD	CV	WHO (2017)
pH	----	7.53	6.9	8	0.2	2.8	7.5-8.5
EC	uS/cm	7.33	7.32	7.36	2635.1	127.1	7.34
TDS	mg/L	2400.7	347.2	8000	2823	117.1	1000
TH	mg/L	1123.2	199.6	5470.4	1364.5	121.1	500
HCO ₃ ⁻	mg/L	309.1	100	552.1	89.6	29.4	300
SO ₄ ²⁻	mg/L	301.5	13.2	1501.6	377.3	125.2	200
Cl ⁻	mg/L	941.6	13.5	5117.7	1418.1	150.5	200
Ca ²⁺	mg/L	217.1	52	838.6	235.1	108.2	75
Mg ²⁺	mg/L	164.1	12.2	840.5	187.4	128.2	30
K ⁺	mg/L	7.4	0.5	32	0.8	51	12
Na ⁺	mg/L	398.6	6	2200.4	548.8	137.7	200

جدول ۲- مقادیر وزنی توصیه‌شده پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی بر اساس سازمان بهداشت جهانی و وزن‌های اختصاص‌یافته به هر پارامتر

Table 2 Recommended weight values of groundwater quality parameters based on World Health Organization and weights assigned to each parameter

Parameter	unit	WHO (2017)	Weight of parameters	Relative weight (GWi)	Quality ratio (qi)	QW
pH	----	6.5-8.5	2	0.060	103	6.2
EC	uS/cm	7.34	3	0.090	686	62
TDS	mg/L	600	5	0.121	480	58
TH	mg/L	500	4	0.121	130	15
HCO ₃ ⁻	mg/L	500	3	0.090	123	11
SO ₄ ²⁻	mg/L	250	3	0.090	119	10
Cl ⁻	mg/L	250	4	0.0121	376	49
Ca ²⁺	mg/L	200	3	0.090	200	18
Mg ²⁺	mg/L	12	2	0.060	61	3.71
K ⁺	mg/L	100	2	0.060	217	19
Na ⁺	mg/L	150	2	0.060	97	58
sum	-	-	-	1.000	-	-

است. تمامی پارامترهای آب زیرزمینی، همبستگی معنی‌داری با شاخص ارزیابی کیفیت آب دارند (جدول ۳، $p > 0.05$). همبستگی نسبتاً قوی و قابل‌توجهی بین Mg^{2+} با Cl^- و Ca^{2+} ($p > 0.05$) وجود دارد. این همبستگی می‌تواند به دلیل حضور سازندهای کربناته در منطقه مورد مطالعه باشد. pH نیز همبستگی منفی با تمام پارامترها و DGWQI دارد.

مقادیر ضریب همبستگی بین شاخص کیفیت آب زیرزمینی و پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی بر اساس همبستگی پیرسون (رابطه ۱۱) در جدول (۳) ارائه شده است (Aad et al. 2015):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{n\sigma_x\sigma_y} \quad (11)$$

که؛ $\bar{X}$ و $\bar{Y}$ میانگین دو مجموعه داده، n تعداد داده‌های هر مجموعه و r ضریب همبستگی بین دو مجموعه داده با انحراف معیارهای σ_x و σ_y

جدول ۳ - مقادیر ضریب همبستگی بین شاخص و پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند

Table 3 Correlation coefficient values between index and groundwater quality parameters of Birjand plain aquifer

Parameter	pH	EC	TDS	TH	TA	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
EC	-0.67										
TDS	0.68	0.99									
TH	0.68	0.96	0.97								
TA	-0.24	-0.14	-0.21	-0.25							
SO ₄ ²⁻	-0.53	0.86	0.87	0.90	-0.21						
Cl ⁻	-0.70	0.98	0.99	0.96	-0.23	0.81					
Ca ²⁺	-0.96	0.94	0.96	0.97	-0.34	0.87	0.94				
Mg ²⁺	-0.65	0.94	0.96	0.98	-0.16	0.88	0.94	0.93			
K ⁺	-0.67	0.98	0.99	0.96	-0.20	0.85	0.99	0.95	0.93		
Na ⁺	-0.66	0.96	0.97	0.89	-0.16	0.79	0.97	0.93	0.87	0.97	
DGWQI	-0.68	0.99	0.99	0.98	-0.19	0.87	0.99	0.95	0.97	0.99	0.96

۳-۵- تحلیل مکانی شاخص DGWQI

شکل (۴) بهترین تغییرنگار منطبق بر شاخص DGWQI و پارامترهای EC، TDS و Mg^{2+} را نشان می‌دهد که این پارامترها بیشترین تأثیر را بر شاخص DGWQI دارند. برای DGWQI، پارامترهای EC، TDS و Mg^{2+} مدل کروی تغییرنگار بهترین عملکرد را داشت که می‌تواند به دلیل همبستگی بالای بین DGWQI، EC، TDS و Mg^{2+} باشد. جدول (۵) ویژگی‌های تغییرنگار نیمه را برای شاخص DGWQI و پارامترهای EC، TDS و Mg^{2+} ارائه می‌دهد. در این مطالعه، وابستگی مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی و شاخص DGWQI از طریق نسبت آستانه مشخص شد. با توجه به نسبت آستانه، وابستگی مکانی نسبتاً قوی (به عنوان مثال ۰/۲۷ - ۰/۴۴) برای پارامترهای EC، TDS و Mg^{2+} مشاهده می‌شود (جدول ۵). این بدان معنی است که برآوردها نسبتاً قوی و قابل اعتماد هستند.

مقادیر دامنه برای EC و Mg^{2+} تقریباً برابر هستند که می‌تواند به دلیل حضور سازندهای کربناته دولومیت با مقادیر بالای Mg^{2+} باشد. نتایج روش برای پهنه‌بندی شاخص DGWQI و پارامترهای EC، TDS و Mg^{2+} در جدول (۶) ارائه شده است. مقادیر به دست آمده R^2 ، RMSE و ME حاصل از روش برای TDS و EC تقارب خوبی نسبت به هم دیگر دارند که می‌تواند به دلیل همبستگی بسیار بالا بین EC و TDS باشد (جدول ۳).

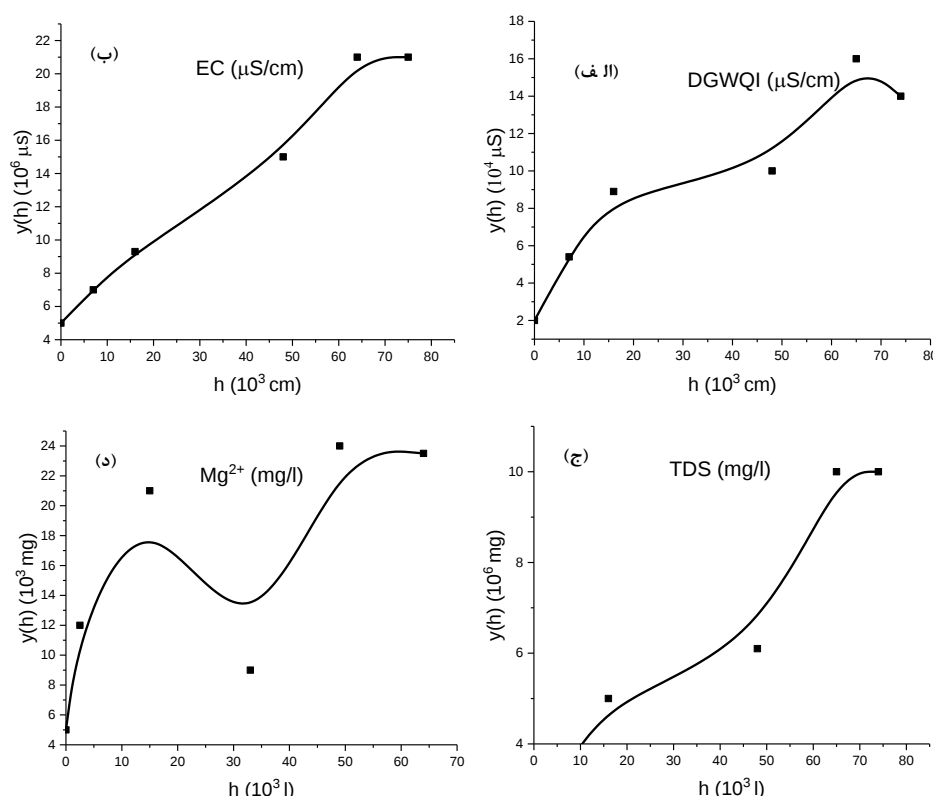
۳-۴- حساسیت پارامترهای کیفیت آب‌های زیرزمینی

جدول (۴) نیز نتایج تحلیل حساسیت حذف پارامتر را نشان می‌دهد. پارامترهای EC، Mg^{2+} و TDS با بالاترین مقدار میانگین شاخص ۱۸/۹۸، ۲۰/۶۸ و ۱۹/۰۴ حساس‌ترین پارامترها در محاسبه DGWQI بودند. پارامترهای Na^+ ($VI = 4/5$) و K^+ ($VI = 14/1$) کمترین تأثیر را بر محاسبه DGWQI داشتند. این بدان معنی است که حذف این پارامترها (Na^+ و K^+) تأثیر قابل توجهی بر DGWQI ندارد.

جدول ۴- نتایج تحلیل حساسیت حذف پارامتر

Table 4 Results of parameter deletion sensitivity analysis

Removed Parameter	Mean	Min	Max	CV
EC	20.68	0.3	28.88	3.33
TDS	19.04	14.35	28.41	2.05
TH	8.5	5.6	14.5	3.5
TA	9.65	7.5	21.02	6.51
SO ₄ ²⁻	3.28	1.11	8.42	1.35
Cl ⁻	9.54	1.26	21.98	6.55
Ca ²⁺	7.79	3.84	15.8	2.9
Mg ²⁺	18.98	9.33	28.16	4.27
K ⁺	1.14	0.38	2.92	0.47
Na ⁺	4.5	0.56	9.93	2.39



شکل ۴- بهترین تغییرنگار منطبق بر DGWQI و پارامترهای EC، TDS و Mg^{2+}

Fig. 4 The best variogram complies with DGWQI and EC, TDS and Mg^{2+} parameters

جدول ۵- تغییرنگار منطبق بر DGWQI و پارامترهای EC، TDS و Mg^{2+}

Table 5. Variogram complies with DGWQI and EC, TDS and Mg^{2+} parameters

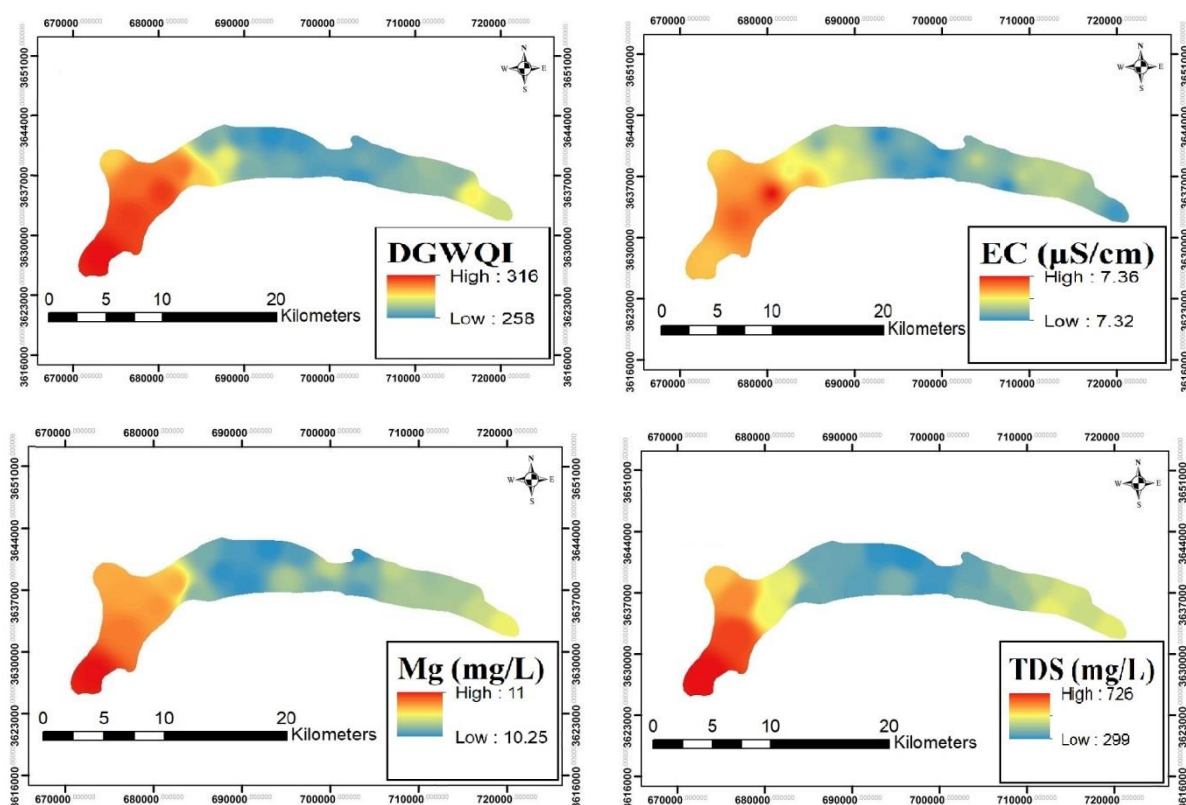
Parameter	Model	Range(km)	Sill (C_0+C) (mg/L) ²	Nugget (C_0) (mg/L) ²	$\frac{C_0}{C_0 + C}$	Spatial Dependency
TDS	Spherical	55347	7900000	2140000	0.27	Relatively strong
EC	Spherical	69520	170000000	5100000	0.3	Relatively strong
Mg^{2+}	Spherical	21356	20206	4550	0.44	Relatively strong
DGWQI	Spherical	19200	130000	50560	0.39	Relatively strong

برای نوشیدن نامناسب می‌شود. مقدار EC از ۷/۳۲ در بخش‌های شمالی تا ۷/۳۶ $\mu S/cm$ در بخش‌های جنوبی آبخوان متغیر بود؛ بنابراین، کیفیت آب زیرزمینی در بخش‌های شمالی مناسب و برای نوشیدن در بخش‌های غربی و جنوب غربی از شرایط مساعدی برخوردار نیست.

بنابراین، EC، TDS، Mg^{2+} و سپس DGWQI در بخش جنوب شرقی بیرجند، در بخش‌های وسیعی از سفره آب زیرزمینی این منطقه، در سطح بالایی قرار دارند. از نظر مکانی نیز شرایط کیفی از نظر آب شرب نیز بیانگر این می‌باشد که ۶۳٪ مساحت آبخوان شاخص DGWQI بین صفر تا ۱۰۰ (رده کیفی مناسب)، در ۱۸٪ مساحت شاخص DGWQI بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ (رده ضعیف)، در ۱۰٪ مساحت شاخص DGWQI بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ (رده خیلی ضعیف) و

مطالعات متعددی گزارش داده‌اند که روش پهنه‌بندی انتخاب‌شده بهترین روش برای تحلیل پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی می‌باشد. نقشه‌های تخمین زده‌شده برای تمام پارامترهای EC، DGWQI، TDS و Mg^{2+} با استفاده از روش کریجینگ معمولی در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. تغییرات مکانی تمامی پارامترها EC، DGWQI، TDS و Mg^{2+} روندی مشابه دارند و از شمال شرق به جنوب غرب آبخوان در حال افزایش هستند. مقادیر TDS از ۲۹۹ در بخش‌های شمالی تا ۷۲۶ mg/l در بخش‌های جنوبی آبخوان متغیر بود. در بخش‌های شمال غربی، مقدار EC و TDS کمتر از استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای نوشیدن است، اما با حرکت به سمت جنوب آبخوان، کیفیت آب زیرزمینی از نظر TDS و EC کاهش یافته و آب زیرزمینی

در ۹٪ مساحت آبخوان نیز مقادیر DGWQI بیش از ۳۰۰ (رده غیرآشامیدنی) می باشد.



شکل ۵- پهنه بندی شاخص میانگین پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی آبخوان بیرجند

Fig. 5 Zoning of the average index of groundwater quality parameters of Birjand aquifer

رویکرد بهبود کیفیت آبخوان دشت بیرجند نشان داد که مناطقی که از نظر اولویت ضعیف تلقی می شوند مشابه نتایج پژوهش حاضر می باشد. در پژوهش دیگری با عنوان مکان یابی مناسب استحصال آب شرب با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی در آبخوان دشت بیرجند، نقشه طبقه بندی استعداد استحصال آب شرب در سطح آبخوان بیرجند با استفاده از ۵ کلاس از ضعیف تا بسیار خوب را تهیه شد (Keshavarz et al. 2014). براساس نتایج به دست آمده مناطق غربی و جنوب غربی آبخوان دارای کلاس ضعیف و مناطق شرقی آبخوان دارای کلاس بسیار خوب می باشد که در مقایسه با پهنه بندی با استفاده از شاخص DGWQI نتایج بیانگر این بوده که مناطق ضعیف در زمینه استحصال آب شرب شرایط کیفی مناسبی ندارند. (Eftekhari and Akbari (2020) استفاده از شاخص آسیب پذیری DRASTIC-LU به ارزیابی آسیب پذیری کیفی آبخوان دشت بیرجند پرداخت که نتایج آن نیز در مقایسه با پژوهش حاضر به این گونه می باشد که با افزایش

جدول ۶- نتایج حاصل از روش کریجینگ در پهنه بندی پارامترهای

DGWQI, EC, TDS و Mg^{2+}

Table 6. Results of kriging method in zoning DGWQI, EC, TDS and Mg^{2+} parameters

Parameter	Interpolation method	R ²	RMSE	ME	CV
TDS	Ordinary Kriging	0.76	132.2	12.1	22.3
EC	Ordinary Kriging	0.74	152.8	15.2	15.12
Mg^{2+}	Ordinary Kriging	0.65	23.3	11.2	32.63
DGWQI	Ordinary Kriging	0.58	32.3	13.5	25.87

بررسی کارهای مشابه در زمینه تحلیل کیفی آبخوان نیز تأیید کننده این نتایج می باشد. (Hassanpour and Khozaymehnezhad در پژوهشی با عنوان مکان یابی چاه های تغذیه جهت تغذیه مصنوعی و بهبود کیفیت آبخوان دشت بیرجند با استفاده از پساب تصفیه شده فاضلاب، وزندهی پارامترهای مورد بررسی از طریق روش ANP را انجام دادند که پهنه بندی محل های حفر چاه جاذب با

محاسبه شاخص کیفیت آب زیرزمینی قابل شرب (DGWQI) می‌باشد.

۴- نقشه شاخص DGWQI نشان داد که بخش‌های مرکزی و شرقی آبخوان دشت بیرجند از نظر مصرف آب شرب شرایط بهتری را نسبت به سایر مکان‌ها مخصوصاً غرب و جنوب غربی آبخوان دارد. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که استفاده از تحلیل زمین‌آمار مبتنی بر GIS به همراه آنالیز DGWQI، روشی ساده و قابل‌اعتماد برای ارزیابی و تفسیر کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب است. همچنین با توجه به اقلیم منطقه و عدم توازن مناسب زمانی و مکانی بارندگی در دشت سبب شده است که افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی منطقه جهت مصارف شرب افزایش داشته است که این امر سبب افزایش آلاینده‌ها به آبخوان دشت بیرجند شده است لذا جهت جلوگیری از ورشکستگی منابع آبی منطقه نیاز به مدیریت مناسب جهت پایداری مناطق نیمه‌خشک می‌باشد.

References

- Aad, G., Abbott, B., Abdallah, J., Khalek, S.A., Aben, R., Abi, B., Abolins, M., AbouZeid, O.S., Abramowicz, H., Abreu, H. and Abreu, R. (2014). Measurements of spin correlation in top-antitop quark events from proton-proton collisions at $s = 7$ TeV using the ATLAS detector. *Phys. Rev. D.*, 90(11), p.112016. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.112016>
- Baudron, P., Alonso-Sarria, F., García-Aróstegui, J. L., Cánovas-García, F., Martínez-Vicente, D. and Moreno-Brotóns, J. (2013). Identifying the origin of groundwater samples in a multi-layer aquifer system with Random Forest classification. *J. Hydrol.*, 499, 303-315. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.009>
- Bidhuri, S. and Khan M. A. (2020). Assessment of ground water quality of central and southeast districts of NCT of Delhi. *J. Geol. Soc. India*, 95, 95-103. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1390-7>
- Chandra, N. A. and Sahoo, S. N. (2020). Indicator kriging approach using a GIS to شاخص آسیب‌پذیری آبخوان شاخص کیفی آب شرب منطقه شرایط مناسبی ندارد
- ۴- نتیجه‌گیری
این پژوهش در آبخوان بیرجند به تحلیل کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب با استفاده از داده‌های پنج‌ساله (۱۳۹۸ - ۱۳۹۳) موردبررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش بیانگر این بود که:
- ۱- پارامترهای TDS، EC و TH اهمیت به‌سزایی در تعیین کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند با قابلیت مصرف شرب دارند.
- ۲- مطابق شاخص کیفیت آب زیرزمینی قابل شرب (DGWQI)، رده کیفی مناسب برای ۶۳٪، ۱۸٪ مساحت رده ضعیف، در ۱۰٪ مساحت رده خیلی ضعیف و در ۹٪ مساحت آبخوان نیز مقادیر شاخص DGWQI در رده غیر آشامیدنی می‌باشد.
- ۳- تحلیل حساسیت بیانگر این می‌باشد که پارامترهای EC، Mg^{2+} و TDS به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها در classify groundwater quality parameters of east Godavari District, Andhra Pradesh, India. Corpus ID: 214704178
- Eftekhari, M. and Akbari, M. (2020). Development of DRASTIC method considering land use to analyze the potential of aquifer pollution in semi-arid regions. *Environ. Water Eng.*, 6(4), 345-359, Doi: <https://doi.org/10.22034/JEWE.2020.236463.1374>. [In Persian].
- Eftekhari, M., Madadi K. and Akbari M. (2019). Monitoring the fluctuations of the Birjand plain aquifer using the GRACE satellite images and the GIS spatial analyses. *J. Watershed Manag. Res.* 32(4), 51-65, Doi: <https://doi.org/10.22092/WMEJ.2019.126204.1218>. [In Persian].
- Hassanpour, M. and Khozaymehnezhad, H. (2018). Placement of nutrient wells for artificial nutrition and improvement of aquifer quality in Birjand plain using treated wastewater. *Iran. J. Res. Environ. Health*, 4(3), 215-226 [In Persian].
- Heshmati, S. (2011). Mapping of some ground water quality index in Shahrekord Plain for various uses. M.Sc. Dissertation,



- Shahrekord University, Shahrekord, Iran, 500p. [In Persian].
- Hu, H., Lin, T., Wang, S. and Rodriguez, L. F. (2017). A cyberGIS approach to uncertainty and sensitivity analysis in biomass supply chain optimization. *Appl. Energy*, 203, 26-40. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.107>
- Keshavarz, A., Khashei-siuki, A. and Najafi, M. (2014). Locating of suitable area of pumping drinking water using FAHP method (Case Study: Birjand Aquifer). *J. Water Wastewater*, 25(3), 135-142 [In Persian].
- Khaledi, B., Akbari, M. and Eftekhari, M. (2020). Database management in ArcGIS. Salehian [In Persian].
- Khodapanah, L., Sulaiman, W. N. A. and Khodapanah, N. (2009). Groundwater quality assessment for different purposes in Eshtehard District, Tehran, Iran. *Europ. J. Sci. Res.*, 36(4), 543-553.
- Kumar, M., Shekhar, A. and Jenifer, M. (2020). Assessing groundwater quality for drinking water supply using hybrid fuzzy-GIS-based water quality index. *Water Res.*, 179(15), 857-867. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115867>
- Machiwal, D., Madan, K. J. and Bimal, C. M. (2011). GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard-rock hilly terrain of Western India. *Environ. Monit. Assess.* 174, 645-663. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1485-5>.
- Mohebbi, M. R., Saeedi, R., Montazeri, A., Labbafi, S., Okaie, S., Abtahi, M. and Mohagheghian, A. (2013). Assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified drinking water quality index (DWQI). *Ecol. Indic.*, 30, 28-34. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.008>
- Pirzadeh, B. and Asvar, T. (2020). Determining spatial and temporal variations of groundwater quality parameters using GIS and interpolation methods (case study: Sirjan Plain). *Irrig. Water Eng.*, 11(2), 266-275. Doi: <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.120736>
- Ramakrishnaiah, C. R., Sadadiv, C. and Ranganna, G. (2009). Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, India. *J. Chem.*, 6(2), 523-530. Doi: <https://doi.org/10.1155/2009/757424>.
- Sandara, K., Sandara, K. P., Ratnakanth, B. and Hanumantha, R. (2010). Assessment and mapping of groundwater quality using geographical information systems, *Int. Eng. Sci. Technol.*, 2(11), 6035-6046.
- Seifi, A., Dehghani, M. and Singh, V. P. (2020). Uncertainty analysis of water quality index (WQI) for groundwater quality evaluation: application of Monte-Carlo method for weight allocation. *Ecol. Indic.*, 117, 106653. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106653>
- Soleimani, H., Nasri, O., Ojaghi, B., Pasalarib, H., Hosseini, M., Hashemzadeh, B., Kavosi A., Masoumi, S., Radfard, M., Adibzadeh, A. and Kiani, F. G. (2018). Data on drinking Water quality using water quality index (WQI) and assessment of groundwater quality for Irrigation purposes in Qorveh&Dehgolan, Kurdistan, Iran, *Data Brief*, 20, 375-386. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.08.022>
- WHO. (2011). Guidelines for Drinking-water Quality, 4th ed., Recommendations. World Health Organization (WHO), Geneva. Available from: www.who.int.



Research Paper

Geostatistical Evaluation with Drinking Groundwater Quality Index (DGWQI) in Birjand Plain Aquifer**Mobin Eftekhari¹, Seyed Ahmad Eslaminejad², Ali Haji Elyasi³ and Mohammad Akbari^{4*}**¹M.Sc. Alumni, Department of Civil Engineering, Water and Hydraulic, Faculty of Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran²MSc. Alumni, Department of Surveying Engineering, Faculty of Surveying Engineering and Spatial Information, University of Tehran, Tehran, Iran³Ph.D. Scholar, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, science and research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran⁴Assist. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran***Corresponding author:** moakbari@birjand.ac.ir**Received:** November 10, 2020**Revised:** March 25, 2021**Accepted:** April 10, 2021**Abstract**

Groundwater is the main source of drinking water in the semi-arid regions of Iran. Therefore, monitoring the quality of this valuable resource is vital. Hence, the purpose of this study was to investigate and prepare a groundwater quality map of Birjand located in the semi-arid region of eastern Iran using GIS-based geostatistical analysis with Drinking Groundwater Quality Index (DGWQI). For this purpose, the collected groundwater quality data of 27 agricultural wells during the years 2014-2019 were used. The results of spatial analysis show that 63% of the aquifer area was in the appropriate quality category, 18% in the poor category, 10% in the very poor category and 9% of the aquifer area was in the non-drinking category. Sensitivity analysis indicated that Mg^{2+} , EC, and TDS parameters with the highest mean change index of 18.98, 20.68 and 19.04 were the most sensitive parameters in calculating DGWQI, respectively. Error evaluation calculated by R^2 and RMSE methods on conventional kriging and spherical variogram models showed good performance for spatial analysis of all parameters including DGWQI, Mg^{2+} , EC, and TDS. The DGWQI map shows that the western and southwestern parts of the aquifer do not have good quality conditions for extracting drinking water.

Keywords: Kriging; Variogram; Sensitivity Analysis; Zoning.