

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند برای مصارف شرب با استفاده از شاخص **PIG** و شاخص اصلاح‌شده **LPIG** مبنی بر **AHP**

ملیکا راستگو^{۱*}، فرزین نصیری صالح^۲، عباس خاشعی سیوکی^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲

DOI: 10.22103/nrswe.2023.20384.1016

چکیده

برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به عنوان یک منبع ضروری برای مصارف شرب، مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه خشک، کیفیت آن را تهدید می‌کند. کیفیت پایین آب‌های زیرزمینی به دلیل نفوذ آب شور به سفره‌های زیرزمینی، سلامت انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بنابراین ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی امری مهم است. در تحقیق حاضر نتایج ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب در آبخوان دشت بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی با استفاده از شاخص آلودگی آب‌های زیرزمینی (PIG) توضیح داده شده است. در این مطالعه داده‌های کیفی PH، TDS، منیزیم، سدیم، کلسیم، کلر، نیترات، فلوراید، بی‌کربنات، سولفات و پتاسیم مربوط به ۲۰ حلقه چاه برای سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ جمع‌آوری شد. به منظور محاسبه شاخص PIG نقشه پارامترها با استفاده از روش درونیابی مناسب (کریجینگ و IDW) بر مبنای خطای RMSE و R^2 در محیط ArcGIS تهیه و از استاندارد آب شرب WHO، به عنوان رهنمود استفاده شد. با توجه به وجود اثرات محلی پارامترهای مختلف و وجود برخی پارامترهای کیفی غالب در سطح آبخوان، برای افزایش دقت الگوی PIG از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای اصلاح وزن‌ها و توسعه یک شاخص بهینه محلی استفاده شد. نقشه شاخص آلودگی اصلاح شده (LPIG)، مقدار شاخص را در حدود ۰/۸-۵/۵ گزارش می‌دهد و سطح کیفی آبخوان را به ۵ دسته با آلودگی ناچیز، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم می‌کند که به ترتیب ۹/۷، ۱۵/۵، ۳۵/۹، ۲۳/۹ و ۱۵/۱ درصد از سطح منطقه را پوشش می‌دهد. آلودگی زیاد و بسیار زیاد نواحی غرب و جنوب غرب آبخوان به فعالیت‌های کشاورزی در این نواحی مرتبط است.

واژگان کلیدی: آبخوان دشت بیرجند، آب زیرزمینی، AHP، LPIG، PIG

*۱ - نویسنده مسئول و دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. ایمیل:

melika_rastgoo@modares.ac.ir

۲ - استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳ - استاد گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

مقدمه

امروزه به دلیل کمبود آب‌های سطحی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، منابع آب‌زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی و قابل اعتماد برای تامین آب موردنیاز مصارف مختلف به‌ویژه شرب به‌شمار می‌روند (Zhou et al. 2021).

در مدیریت یکپارچه منابع آب، حفظ کیفیت آب به‌ویژه در مناطقی که با محدودیت نسبی آب مواجه‌اند به عنوان یکی از ارکان اصلی برنامه‌ریزی مطرح می‌شود (Dolatkordestani et al. 2019).

آلودگی آب‌زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی شایع و آشکار است. روند رشد نرخ آلودگی این منابع ناشی از بارندگی‌های نامنظم، رشد سریع شهرنشینی، آبیاری‌های فشرده، مصرف کودها و سموم کشاورزی، صنعتی شدن، رشد جمعیت و به‌تبع آن آلودگی‌های انسانی نگران‌کننده است (Adimalla et al. 2020; Gao et al. 2020). پاکسازی منابع آب‌زیرزمینی بسیار سخت، زمان‌بر، پرهزینه و گاهاً غیرممکن است. بنابراین بهترین راه‌حل پیشگیری است (Mohebbi Tafreshi and Mohebbi Tafreshi 2017). ضرورت شناخت وضعیت فعلی کیفیت منابع آب‌زیرزمینی هر منطقه را قبل از اتخاذ هرگونه تصمیم مدیریتی دوچندان می‌کند.

در جامعه تحقیقات کیفی آب روش‌های عددی و آماری مختلفی برای ارزیابی مصارف شرب مورد استفاده قرار گرفته‌است. روش‌های سنتی کنترل کیفیت آب، بر مبنای اندازه‌گیری پارامترهای کیفی خاص و مقایسه با استانداردهای موجود بنا شده‌اند. اما از آنجایی که در این روش‌ها، تصمیم‌گیری بر مبنای یک پارامتر خاص انجام می‌شود، رویکرد مناسبی نیستند (Hosseini Moghari and Ebrahimi 2015). یکی از راه‌های بررسی کیفیت آب از نظر شرب استفاده از نمودار شولر^۱ است (Schoeller 1965). این نمودار کیفیت آب آشامیدنی را برای منابع نقطه‌ای تخمین می‌زند علی‌رغم مزایای این روش، بررسی مکانی کیفیت آب با استفاده از این نمودار غیر ممکن است

و تعداد پارامترهای کیفیت آب برای برآورد کیفیت محدود است. این درحالی است که در اغلب موارد به بررسی مکانی کیفیت آب از لحاظ شرب و با در نظر گرفتن غلظت همه یون‌های اصلی در کل سطح منطقه نیاز است (Dokou et al. 2015; Mohebbi Tafreshi and Mohebbi Tafreshi 2017). با توجه به حجم زیاد داده‌ها و مؤلفه‌ها، یکی از روش‌های مفید ارزیابی کیفیت آب‌زیرزمینی، استفاده از شاخص‌های کیفیت آب است. این شاخص‌ها به روش‌های مختلف تعریف شده اما در همه روش‌ها برآیند اثر طیف وسیعی از پارامترهای کیفیت آب در یک رابطه ریاضی در قالب یک عدد کلی و بی‌بعد، میزان سلامتی آب برای استفاده احتمالی و مدیریت تخصیص آن را بیان می‌کند. در سال‌های اخیر شاخص‌های کیفی متعددی توسعه یافته‌اند. تعداد و نوع پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شاخص‌های کیفی، متغیر و انعطاف‌پذیر است. علاوه بر این، مقدار عددی شاخص نیز در بازه‌های مختلفی قرار می‌گیرد (Babiker et al. 2007; El-Zeiny and Elbeihet 2019). در ارزیابی شاخص‌های کیفی از قواعد ساده، سریع و قابل فهم استفاده می‌شود. در گام نخست تعدادی از مؤلفه‌های فیزیکی و شیمیایی آب‌زیرزمینی بر اساس نوع مصرف در منطقه انتخاب می‌شوند. در گام بعد پردازش مکانی بر روی داده‌ها صورت می‌گیرد. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌عنوان یک ابزار کارآمد و قوی برای ذخیره، تحلیل و پردازش داده‌های مکانی، امکان سازمان‌دهی و درون‌یابی حجم زیادی از داده‌های مکانی را در مدت زمان کم فراهم می‌کند. در گام آخر با انجام محاسباتی بر روی نقشه‌های به‌دست آمده از مؤلفه‌های کیفی آب، نقشه شاخص کیفیت آب زیرزمینی استخراج می‌شود (Heshmati and Beigi Harchegani 2014; Dandge and Patil 2022). تاکنون مطالعات زیادی در راستای ارزیابی و توسعه شاخص‌های کیفی آب‌های زیرزمینی مبنی بر GIS در سطح دنیا انجام شده‌است. در مطالعه‌ای (Tiwari et al. 2018) کیفیت آب آشامیدنی حوضه پرتاپگرا^۲ هند را

² Pratapgarh¹ Shouller

شاخص AIG آلودگی ناچیزی را در سطح منطقه مطالعاتی بیان کردند.

یکی از کارآمدترین روش‌ها برای انجام تحلیل‌های چندمعیاره، روش تحلیل سلسله مراتبی^۵ است که برای اولین بار توسط Saaty در سال ۱۹۸۰ مطرح شد. AHP ابزاری جهت ساده‌سازی تصمیم‌گیری‌های پیچیده است، با این توصیف که در تحلیل تصمیم چند معیاره به جای استفاده از یک معیار سنجش بهیچگی از چندین معیار سنجش ممکن است استفاده گردد و به تصمیم‌گیرنده این امکان را می‌دهد که تعامل بین معیارهای مختلف را در موقعیت‌های پیچیده ارائه دهد (Huang et al. 2011). در تحقیقات مرتبط با حوزه آب‌های زیرزمینی روش فرآیند سلسله مراتبی کاربرد ویژه‌ای دارد. این روش در برخی از پژوهش‌های مرتبط با مکان‌یابی مناطق با پتانسیل آب‌زیرزمینی استفاده شده است (Achu et al. 2020; Aykut 2021). هم‌چنین در حوزه کیفیت منابع آب‌زیرزمینی نیز کاربرد دارد (Eldaw et al. 2019; Karakuş 2019; al. 2021).

عدم وجود رودخانه دائمی و توزیع ناهمگون زمانی و مکانی بارش در محدوده دشت بیرجند، موجب شده تا منابع آب‌زیرزمینی به عنوان اصلی‌ترین منبع آب مصرفی در بخش شرب و کشاورزی در این منطقه شناسایی شود. گسترش فعالیت‌های کشاورزی و جمعیت و به تبع آن افزایش چاه‌ها در سال‌های اخیر، موجب افت سطح آب‌زیرزمینی در دشت شده است. عدم تعادل تغذیه و برداشت آب از سفره موجب فرسودگی سفره شده که تهدیداتی از قبیل تجاوز آب‌شور و آلودگی آبخوان را به دنبال دارد. آلودگی آبخوان نیز هزینه‌های بالای تصفیه و جایگزینی منابع جدید را به دنبال دارد. لذا هدف از پژوهش حاضر پهنه‌بندی کیفی آبخوان دشت بیرجند با استفاده از شاخص آلودگی آب‌زیرزمینی و توسعه یک شاخص بهینه

براساس شاخص کیفیت آب^۱ (WQI) و تکنیک GIS ارزیابی کردند. آن‌ها با بهره‌گیری از داده‌های ۱۲ پارامتر کیفی حاصل از ۵۵ نمونه در سطح حوضه، بیان داشتند که بیش از یک‌سوم منابع موجود برای استفاده شرب مناسب نبوده و شاخص کیفیت در بازه مقادیر ۵۲ تا ۳۴۵ متغیر است که کیفیت از شرایط خوب تا نامناسب را در سطح حوضه نشان می‌دهد.

در مطالعه‌ای (Shahidi and Khadempour 2020) به بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت جنگل استان خراسان رضوی از نظر شرب توسط شاخص‌های کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) و متوسط شاخص کیفیت (AWQI) پرداختند. آن‌ها از داده‌های ۸ پارامتر کیفی مربوط به ۱۰ حلقه چاه در بازه زمانی ۱۳۹۵-۱۳۸۶ استفاده کردند. نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های کیفیت آب نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی حوضه ضعیف و نامناسب است زیرا که مقادیر بالای TDS در تعیین مقدار شاخص غالب است.

شاخص آلودگی آب‌های زیرزمینی^۲ (PIG) برای اولین بار توسط (SubbaRao 2012) مطرح شد. در مطالعه‌ای (SubbaRao et al. 2018) با استفاده از شاخص PIG، آب‌زیرزمینی بخشی از ایالت تل‌انگانا^۳ هند را برای مصارف شرب و شناسایی مؤلفه‌های کیفی مؤثر در تغییرات کیفیت آب‌زیرزمینی ارزیابی کردند. آنها ۱۱ پارامتر کیفیت آب را به‌عنوان پارامترهای ورودی انتخاب نمودند. براساس روند تغییرات شاخص PIG (۱/۳۷ - ۰/۶۹) ۸۰ درصد از سطح منطقه آلودگی ناچیز و ۲۰ درصد از سطح منطقه آلودگی کم را نشان داد.

در مطالعه‌ای (Nath et al. 2021) به‌منظور بررسی کیفیت آب شرب و آبیاری حوضه تتیار^۴ از تکنیک‌های تحلیل کیفی آب مانند شاخص‌های کیفیت آب و تحلیل فضایی در GIS بهره بردند و در حوزه مصارف شرب، براساس

^۴ Thettiyar

^۵ Analytical hierarchy process

^۱ Water Quality Index

^۲ pollution index of groundwater

^۳ Telangana

هم متفاوت است. آبخوان دشت بیرجند در استان خراسان جنوبی واقع شده است و طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن^۴ اقلیم حوضه از نوع خشک می‌باشد و به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تامین آب شرب منطقه مطرح است. منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است (Southern Khorasan Regional Water Company. 2008; Iran (Water Resources Management Company. 2016).

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل داده‌های کیفی آب زیرزمینی ($F, K, Na^{2+}, Cl^{-}, Mg^{2+}, Ca^{2+}$ ، SO_4, NO_3, PH, HCO_3) (TDS، Ca^{2+})، SO_4, NO_3, PH, HCO_3) حلقه چاه شرب و کشاورزی مربوط به سال ۱۳۹۹-۱۳۹۸ از سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان جنوبی اخذ شده است که از این تعداد ۱۲ چاه کشاورزی می‌باشد.

در این پژوهش قبل از محاسبه شاخص آلودگی آب زیرزمینی، ابتدا لازم است تا نقشه رستری توزیع مکانی هر ۱۱ پارامتر کنترل کیفیت در محدوده آبخوان دشت بیرجند تهیه گردد. به‌این منظور روش‌های مختلف درون‌یابی با هم مقایسه شده و بهترین روش بر مبنای کمترین مقدار $RMSE^5$ و بیشترین مقدار ضریب تعیین R^2 انتخاب گردید. نقشه‌ها بر اساس روش کریجینگ معمولی و IDW پهنه‌بندی شدند.

شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG)

شاخص PIG برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی توسط SubbaRao در اوایل سال ۲۰۱۲ ارائه شد و به‌طور وسیعی در ارزیابی کیفیت آب شرب به‌کار رفت. این شاخص تاثیر نسبی معیارهای شیمیایی کنترل‌کننده کیفیت آب را بر کیفیت کلی آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد و میزان آلودگی را در یک مقیاس عددی نمایش می‌دهد.

محلی مبنی بر شاخص PIG به کمک روش سلسله مراتبی می‌باشد. مطالعات پیشین درخصوص ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه با استفاده از شاخص‌های رایج کنترل کیفیت بوده لذا شاخص محلی می‌تواند تغییرات کیفی را متناسب با مشکلات منطقه بررسی کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت بیرجند، یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبخیز کویرلوت می‌باشد. مختصات جغرافیایی آن بین طول‌های 58° و 41° تا 59° و 46° شرقی و عرض‌های 32° و 35° تا 33° و 8° شمالی قرار گرفته است. میانگین بارندگی حوضه آبخیز استان ۱۷۰ میلی‌متر در سال است. مساحت کلی حوضه آبخیز بیرجند $3455 km^2$ کیلومتر مربع می‌باشد که از این مقدار سهم دشت $1045 km^2$ و مابقی را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی یک منطقه اثر می‌گذارند. دشت بیرجند بخشی از زون زمین ساختی ایران مرکزی بوده و در حاشیه زون فلیش شرق ایران قرار دارد. به لحاظ زمین‌شناسی به سه ناحیه سنگی افیولیت‌ها^۱ و آمیزه‌های رنگین^۲، رسوبات نوع فلیش^۳ و سنگ‌های آذرآواری جوان تقسیم می‌شود. براساس پراکنندگی چاه‌های مشاهده‌ای و بهره‌برداری، و با در نظر گرفتن پهنه‌های که پژوهش‌های ژئوفیزیک توسط شرکت ست‌کوپ در سال ۱۳۵۰ در آن انجام شده بود، دو آبخوان آبرفتی تشخیص داده‌شد. تپه‌های باریکی توسط رخساره-های نئوژن از شرق به غرب حوضه کشیده شده که حوضه را به دو ناحیه تقسیم می‌کند. آبخوان مرک از آبرفت‌های عهدحاضر تشکیل شده و آبخوان مرکزی (بیرجند) توسط رسوبات دانه‌درشت حاصل از فرسایش کوه‌های باگران پوشیده شده است. شرایط هیدروژئولوژیکی این دو ناحیه با

⁴ De Martonne

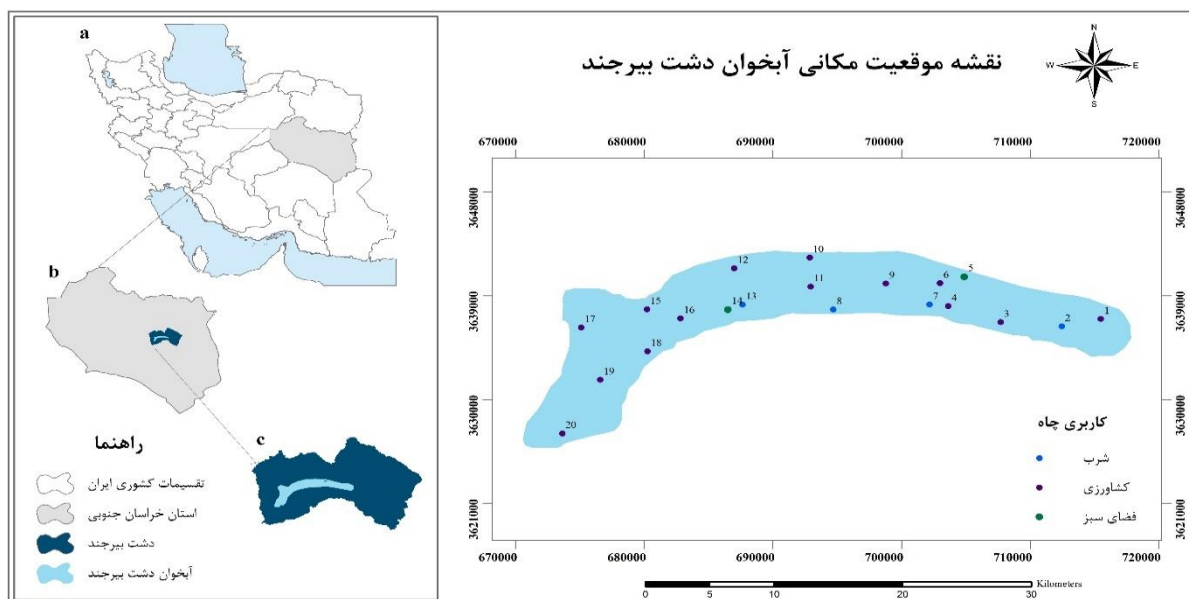
⁵Root Mean Square Error

⁶ R-squared correlation

¹ Ophiolith

² Colored Melange

³ Phylish



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی در ایران (a)، استان خراسان جنوبی (b) و دشت (c)

$$W_p = \frac{R_w}{\sum R_w} \quad (1)$$

محاسبه غلظت S_c

در این مرحله غلظت هر پارامتر کیفی آب با توجه به استاندارد کیفیت آب آشامیدنی آن بی‌بعد می‌شود. مقدار S_c طبق رابطه (۲) به دست می‌آید (SubbaRao 2012).

$$S_c = \frac{c}{D_s} \quad (2)$$

c غلظت هر پارامتر کیفی و D_s مقدار مجاز پارامتر کنترل-کننده کیفیت آب براساس استاندارد کیفیت آب شرب می‌باشد. در این پژوهش از حدود مجاز استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) به‌عنوان رهنمود استفاده شد مقدار مجاز هر پارامتر در جدول (۱) ارائه شده‌است.

محاسبه کیفیت کلی آب O_w

در این مرحله برای محاسبه مقدار O_w طبق رابطه (۳) وزن هر پارامتر در مقدار S_c ضرب می‌شود (SubbaRao 2012).

$$O_w = W_p \times S_c \quad (3)$$

SubbaRao پارامترهای کلسیم، منیزیم، کلر، سدیم، پتاسیم، فلوراید، سولفات، نترات، بی‌کربنات، کل جامدات-مجلول و PH را به‌عنوان شاخص‌های آلودگی در محاسبه شاخص خود به‌کاربرد (Egbueri 2020). الگوریتم محاسبه PIG در ۵ مرحله به‌شرح زیر دنبال می‌شود:

تعیین وزن نسبی R_w

SubbaRao بر اساس تاثیری که هر پارامتر بر سلامت انسان دارد مقادیری بین ۱ تا ۵ را به هر پارامتر اختصاص داد که این مقادیر همان وزن نسبی است. حداقل مقدار R_w برابر ۱ و به مفهوم کمترین نقش در سلامت و حداکثر مقدار R_w برابر ۵ و به مفهوم بیشترین نقش در سلامت می‌باشد (SubbaRao 2012). مقادیر وزن نسبی هر پارامتر کیفی در جدول (۱) ارائه شده‌است.

محاسبه وزن W_p

برای ارزیابی سهم نسبی هر یک از متغیرهای کیفی آب بر کیفیت کلی آن، پارامتر وزن از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. این رابطه نسبت وزن نسبی هر پارامتر را به مجموع وزن نسبی همه پارامترها می‌سنجد (SubbaRao 2012).

محاسبه شاخص PIG

سناریوهای مختلف را به مدیران می دهد. این روش به علت ماهیت ساده و در عین حال جامعی که دارد بسیار مورد توجه و کاربرد قرار گرفته است. (Ghodsipour 2002). مراحل اجرای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به شرح ذیل می باشد:

تدوین ساختار سلسله مراتبی

نخستین گام در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، ساختن سلسله مراتب است. ساختار سلسله مراتبی یک نمایش گرافیکی از مساله پیچیده واقعی می باشد که در راس آن هدف کلی مساله و در سطح بعدی، معیارها قرار دارند.

شاخص آلودگی آب های زیرزمینی طبق رابطه (۴) با مجموع تمام مقادیر O_w که توسط تمام پارامترهای کیفیت آب هر نمونه در مراحل قبل محاسبه شده، به دست می آید.

$$PIG = \sum O_w \quad (4)$$

طبقه بندی شاخص PIG طبق مقادیر ارائه شده توسط SubbaRao در جدول (۲) نشان داده شده است.

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی^۱

AHP یک روش تصمیم گیری چندمعیاره برای تجزیه و تحلیل تصمیمات پیچیده با معیارهای متعدد است که اولین بار در سال ۱۹۸۰ توسط Saaty مطرح شد. این روش بر اساس مقایسه زوجی عوامل، بنا نهاده شده و امکان بررسی

جدول (۱): مقادیر وزن نسبی، وزن و حدود مجاز استاندارد آب شرب سازمان بهداشت جهانی (WHO)

Water quality parameter	Units	Relative weight (Rw)	Weight parameter (Wp)	WHO(2011)
TDS	mg/l	۵	۰/۱۲۲	۱۰۰۰
PH	-	۵	۰/۱۲۲	۷/۵
NO ₃ ⁻	mg/l	۵	۰/۱۲۲	۴۵
Mg ²⁺	mg/l	۲	۰/۰۴۹	۵۰
Ca ²⁺	mg/l	۲	۰/۰۴۹	۷۵
Cl ⁻	mg/l	۴	۰/۰۹۷	۲۵۰
Na ²⁺	mg/l	۴	۰/۰۹۷	۲۰۰
Hco ₃ ⁻	mg/l	۳	۰/۰۷۳	۳۰۰
So ₄ ²⁻	mg/l	۵	۰/۱۲۲	۲۰۰
F ⁻	mg/l	۵	۰/۱۲۲	۱/۲
K ⁺	mg/l	۱	۰/۰۲۵	۱۰
Sum		۴۱	۱	

جدول (۲): طبقه بندی آلودگی آب بر اساس شاخص PIG (SubbaRao, 2012).

Range of PIG	Classification
< ۱	آلودگی ناچیز
۱ - ۱/۵	آلودگی کم
۱/۵ - ۲	آلودگی متوسط
۲ - ۲/۵	آلودگی زیاد
> ۲/۵	آلودگی بسیار زیاد

¹ Analytic Hierarchy Process

محاسبه وزن معیارها

انتخاب وزن برای پارامترها مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین گام است. در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی عوامل به صورت زوجی طبق مقیاس ۹ کمیتی Saaty (جدول ۳) با یکدیگر مقایسه شده و بالاترین ارجحیت به معیاری تعلق می‌گیرد که حداکثر تاثیر را در تعیین هدف دارد. برای محاسبه وزن پارامترها ابتدا ماتریس نرمالیزه طبق رابطه (۵) با تقسیم مقدار هر عنصر در ماتریس مقایسه زوجی به مجموع مقادیر ستون خودش تشکیل می‌شود. سپس بردار وزن طبق رابطه (۶) از میانگین عناصر هر سطر ماتریس نرمال حاصل می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (5)$$

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ij}}{n} \quad (6)$$

m تعداد ستون، n تعداد سطر، a_{ij} درایه‌های ماتریس مقایسه زوجی و r_{ij} درایه‌های ماتریس نرمالیزه به‌ازای گزینه i و w_i وزن گزینه i ام (Ghodsipour 2002).

محاسبه نرخ ناسازگاری

یکی از مزایای روش AHP بررسی سازگاری قضاوت‌هاست. برای محاسبه نرخ ناسازگاری، ابتدا باید ماتریس مقایسه زوجی در بردار وزن ضرب شود. این مقدار برابر $\lambda_{max} \times w$

است. مقدار λ_{max} از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. سپس مقدار شاخص ناسازگاری از رابطه (۸) و نرخ ناسازگاری از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} \right| \quad (7)$$

$$I.I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

$$I.R = \frac{I.I}{R.I.I} \quad (9)$$

در روابط فوق λ_{max} حداکثر مقدار ویژه، AW_i حاصل ضرب ماتریس مقایسه زوجی در ماتریس وزن معیار، W_i بردار وزن معیار می‌باشد. R.I.I شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی است و براساس تعداد درایه‌های ماتریس (n) از جدول (۴) استخراج می‌شود (Ghodsipour 2002).

در صورتی که مقادیر نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ باشد سازگاری ماتریس تصمیم قابل قبول است (Eldaw et al. 2021).

نرم‌افزار Expert Choice برای تحلیل مسائل چند معیاره با استفاده از روش فرآیند سلسله مراتبی طراحی شده‌است. این نرم‌افزار دارای یک بخش گرافیکی است که قادر است قضاوتی از معیارها و هدف نهایی را ارائه دهد و به‌واسطه آنالیز حساسیتی که انجام می‌دهد باعث افزایش دقت و اعتبار در نتایج می‌شود (Yunus et al. 2013).

جدول (۳): مقادیر ترجیحات برای مقایسات زوجی معیارها (Saaty. 1980)

مقدار عددی	قضاوت شفاهی
۹	اهمیت مطلق
۷	اهمیت خیلی بیشتر
۵	اهمیت بیشتر
۳	اهمیت اندکی بیشتر
۱	اهمیت مساوی
۰.۲، ۰.۴، ۰.۸	حالات میانی

جدول (۴): مقادیر شاخص ناسازگاری ماتریس‌های تصادفی (Ghodsipour. 2002)

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
R.I.I	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۵

رابطه (۱۰) و بر مبنای تعداد پیکسل‌های هر کلاس (i) برای نقشه PIG (E_i) و نقشه LPIG (O_i) محاسبه شد (Kordi 2008).

$$x^2 = \sum_i \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (10)$$

آزمون کای اسکور با فرض ۰ و ۱ آغاز می‌شود. فرض صفر به مفهوم شباهت و نزدیکی نتایج و فرض یک به معنای وجود تفاوت معنادار در نتایج می‌باشد. کای اسکور بحرانی برای قبول یا رد فرض صفر معرفی می‌شود. در صورتی که کای اسکور محاسبه شده از مقدار بحرانی کمتر باشد، نتایج حاصل از هر دو روش تفاوت چندانی با همدیگر ندارند و فرض صفر مورد تایید است. اما در صورتی که از مقدار بحرانی بیشتر باشد، نتایج با همدیگر تفاوت معنادار دارند و فرض صفر رد می‌شود. مقدار بحرانی کای اسکور بر اساس دو پارامتر درجه آزادی (DF) و سطح معنی‌داری تعیین می‌شود. در این پژوهش سطح معنی‌داری ۵ درصد در نظر گرفته شد (Kordi 2008). درجه آزادی طبق رابطه (۱۱) برابر ۴ و مقدار بحرانی کای اسکور متناظر آن در جداول مربوطه، برابر ۹/۴۸۸ می‌باشد.

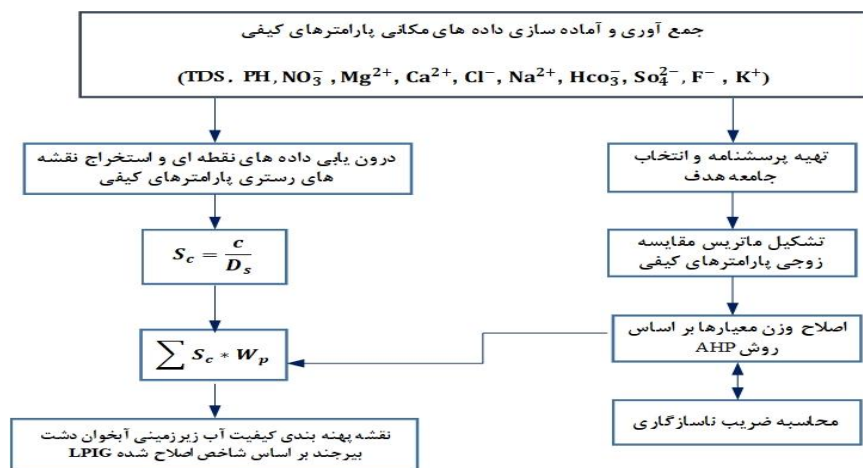
$$DF = (n - 1) \times (m - 1) = 4 \quad (11)$$

در رابطه فوق n تعداد کلاس نقشه و m تعداد نقشه می‌باشد.

در این پژوهش به منظور اصلاح شاخص PIG و توسعه یک شاخص محلی از روش سلسله مراتبی برای اصلاح وزن‌های محاسبه شده در گام دوم محاسبات شاخص PIG استفاده شد. شکل (۲) مراحل انجام تحقیق را نشان می‌دهد. در ابتدا به منظور محاسبه وزن معیارها، فرم‌هایی جهت نظرخواهی از کارشناسان حوزه آب و منابع آب زیرزمینی تهیه گردید. تعداد ۲۴ نفر از کارشناسان خبره با استفاده از مقادیر جدول (۳) به مقایسه زوجی معیارها پرداختند. بعد از تشکیل ساختار سلسله مراتبی در محیط نرم‌افزار Expert Choice و وارد کردن پرسشنامه‌های کارشناسان (شکل ۳)، سازگاری ماتریس مقایسه زوجی هر کارشناس بر اساس ضریب ناسازگاری گزارش شده در نرم‌افزار کنترل شد و سپس در تصمیم‌گیری گروهی شرکت داده شدند و وزن هر معیار کیفی حاصل شد.

آزمون Chi-square

به منظور تعیین وجود یا عدم وجود تفاوت معنادار مابین نتایج دو شاخص، از آزمون کای اسکور استفاده شد. جهت انجام آزمون کای اسکور تعداد طبقات کلاس بندی هر دو نقشه مورد مقایسه باید با هم برابر باشند. به همین منظور نقشه نهایی حاصل از هر دو شاخص PIG و LPIG به ۵ کلاس طبقه بندی شد. در این تحقیق مقدار کای اسکور از



شکل (۲): فلوچارت مراحل توسعه شاخص محلی آلودگی آب زیرزمینی (LPIG) آبخوان دشت بیرجند

	ca	cl	Na	Mg	TDS	PH	SO4	NO3	K	F	HCO3
ca		1.0	1.0	1.0	5.0	5.0	1.0	1.0	7.0	7.0	7.0
cl			1.0	1.0	5.0	5.0	1.0	1.0	7.0	7.0	7.0
Na				1.0	7.0	7.0	1.0	1.0	7.0	7.0	7.0
Mg					5.0	7.0	7.0	1.0	5.0	7.0	7.0
TDS						1.0	5.0	5.0	3.0	3.0	1.0
PH							5.0	5.0	3.0	3.0	3.0
SO4								1.0	5.0	5.0	5.0
NO3									5.0	5.0	5.0
K										3.0	3.0
F											3.0
HCO3	Incon:	0.06									

شکل (۳): نمونه ماتریس مقایسه زوجی یکی از کارشناسان Expert Choice

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت سهم هر یک از پارامترهای کنترل کیفیت را در کیفیت نهایی آب‌زیرزمینی (خروجی مدل) مشخص می‌کند و نشان می‌دهد که خروجی مدل تا چه اندازه به مقادیر متغیرهای مستقل (ورودی) حساس است. تحلیل

$$V_{wi} = \frac{(LPIG - LPIG_{wi})}{LPIG} \times 100 \quad (12)$$

V_{wi} شاخص تغییر برحسب درصد بدون پارامتر i LPIG شاخص آلودگی آب‌زیرزمینی محلی با ۱۱ پارامتر و $LPIG_{wi}$ شاخص آلودگی آب‌زیرزمینی بدون پارامتر i .

نتایج و بحث

ارزیابی پارامترهای کنترل‌کننده کیفیت آب‌زیرزمینی:

به‌منظور پهنه‌بندی کیفی آبخوان دشت بیرجند از اطلاعات ۲۰ نمونه آب‌زیرزمینی استفاده شد. بررسی نتایج آماری پارامترهای کنترل‌کننده کیفیت آب‌زیرزمینی (جدول ۵) نشان می‌دهد که مقادیر pH در بازه ۸/۱۴ - ۷/۱۶ با مقدار متوسط ۷/۵۶ متغیر است و در محدوده مجاز استاندارد WHO برای مصارف شرب قرار می‌گیرد. میانگین TDS نمونه‌های برداشت‌شده دشت مقدار (mg/l) ۳۰۲۴/۲۵ است و طبق استاندارد WHO آب را برای آشامیدن نامناسب می‌کند. تنها ۵۵ درصد از نمونه‌ها، مقادیر مطلوبی از TDS را به خود اختصاص داده‌اند. غلظت کاتیون‌های Ca با میانگین

حساسیت حذفی برای بررسی تاثیر حذف پارامترهای کیفی در محاسبه شاخص LPIG استفاده شد. در این روش هر پارامتر را به‌صورت جداگانه از محاسبات حذف و میزان تغییرپذیری شاخص طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود (Hu et al. 2017; Eftekhari et al. 2021).

(mg/l) ۹۷/۸۶، Mg با میانگین (mg/l) ۱۳۵/۶۹، K با میانگین (mg/l) ۲۱/۹ و Na با میانگین (mg/l) ۸۰۸/۹ از مقادیر مجاز استاندارد WHO فراتر است. به طوری‌که براساس مقادیر سدیم گزارش شده در نمونه‌ها تنها ۴۰ درصد نمونه‌ها شرایط مطلوبی دارند. همچنین میانگین غلظت آنیون‌های Cl و SO4 فراتر از محدوده مجاز شرب است. اما میانگین غلظت NO3، HCO3 و F نشان می‌دهد که نمونه‌ها شرایط مطلوب‌تری جهت بهره‌گیری در مصارف شرب دارند.

با بررسی میزان غلظت هر پارامتر کیفی در نمونه‌های آب-زیرزمینی مربوط به سال آبی ۱۳۹۹-۱۳۹۸، می‌توان مشاهده کرد که در بیشتر نمونه‌ها، غلظت‌ها فراتر از حدود مجازند که نشان از آلودگی شیمیایی آب‌زیرزمینی در سطح دشت دارد. همین امر لزوم پهنه‌بندی کیفی آبخوان برای کنترل میزان آلودگی و نواحی آلوده‌شده را دوچندان می‌کند.

جدول (۵): نمایه‌های آماری پارامترهای شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت بیرجند

Parameter	Units	Mean	Min	Max	SD	CV	WHO(2011)
TDS	mg/l	۳۰۲۴/۲۵	۹۳۵/۴۵	۱۲۳۳۴/۱	۲۶۸۷/۱۲	۰/۸۹	۱۰۰۰
PH	-	۷/۵۶	۷/۱۶	۸/۱۴	۰/۲۷	۰/۰۳۶	۶/۵ - ۸
NO_3^-	mg/l	۲۶/۸۶	۱۰/۲۶	۸۷/۵۷	۱۸/۷۱	۰/۷	۴۵
Mg^{2+}	mg/l	۱۳۵/۶۹	۶۳/۳	۲۵۲/۸	۶۳/۵۱۲	۰/۴۷	۵۰
Ca^{2+}	mg/l	۹۷/۸۶	۲۴/۸۴	۲۷۲/۴	۶۷/۴۸	۰/۶۹	۷۵
Cl^-	mg/l	۱۰۷۷/۷۱	۱۹۸/۶۷	۴۲۶۸/۱۱	۱۰۱۴/۰۲	۰/۹۴	۲۵۰
Na^{2+}	mg/l	۸۰۸/۹۶	۱۷۳/۸۶	۴۲۱۲/۵	۹۱۳/۲۵	۱/۱۳	۲۰۰
HCO_3^-	mg/l	۳۰۲/۸	۱۴۰/۸۱	۵۴۸/۶۸	۱۱۳/۷	۰/۳۷	۳۰۰
So_4^{2-}	mg/l	۷۷۸/۹	۱۴۱/۵۷	۳۸۵۰/۸۴	۸۲۴/۴۵	۱/۰۶	۲۰۰
F^-	mg/l	۰/۵۴	۰	۱/۱۹	۰/۳	۰/۵۴	۱/۲
K^+	mg/l	۲۱/۱۹	۱/۲۸	۷۹/۳	۱۹/۴۴	۰/۹۲	۱۰

منجر به افزایش مقدار شاخص می‌شود. جدول (۶) مقادیر وزن و O_w را نشان می‌دهد که O_w اثر وزن و غلظت پارامتر می‌باشد. مقادیر شاخص PIG چاه‌های محدوده خوسف، تقاب، محمدیه، حاجی‌آباد و بیشه پایین را برای مصارف شرب نامناسب نشان می‌دهد. این چاه‌ها در حال حاضر کاربری کشاورزی و فضای سبز دارد.

شاخص آلودگی آب زیرزمینی محلی بر مبنای روش فرابند سلسله مراتبی: (LocalPIG)

به منظور توسعه روشی مؤثر برای ارزیابی کیفیت آب- زیرزمینی جهت مصارف شرب در آبخوان دشت بیرجند، روش AHP برای محاسبه ارزش و وزن هر معیار استفاده شد و شاخص آلودگی آب زیرزمینی محلی (LPIG) ارائه شد. بعد از ساخت درخت سلسله مراتب در محیط Expert Choice و تشکیل ماتریس مقایسات زوجی کارشناسان، ضرایب ناسازگاری کنترل شد. تنها تعداد ۱۸ کارشناس در تصمیم‌گیری گروهی شرکت داده شدند و سپس وزن معیارهای کیفی حاصل شد. مطابق شکل (۴) وزن پارامترهای Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Cl^- ، Na^{2+} ، F^- ، K^- ، SO_4 ، NO_3 ، PH ، HCO_3 و TDS به ترتیب ۰/۰۵۲، ۰/۰۶۳، ۰/۰۶۳، ۰/۰۶۳، ۰/۰۶۹، ۰/۰۳۶، ۰/۰۲۲، ۰/۰۷۷، ۰/۰۲۹۲، ۰/۱۲۷، ۰/۰۳۷ و ۰/۱۶۳ می‌باشد که نشان از اهمیت و تاثیر هر پارامتر در

شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG):

نقشه پهنه‌بندی شاخص PIG بر اساس محاسبات رستری طبق روابط (۲) تا (۴) در محیط ArcGIS حاصل شد. نقشه طبقه‌بندی آب زیرزمینی بر اساس شاخص PIG و مقادیر مرزی ارائه شده توسط SubbaRao تناسب شیمیایی آب را برای مصارف شرب نشان می‌دهد. مقادیر PIG در بازه ۶/۰۸ - ۰/۸ متغیر است و آب زیرزمینی این منطقه را در پنج کلاس آلودگی ناچیز تا خیلی زیاد طبقه‌بندی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که ۹/۶، ۱۲/۱۸، ۱۵/۰۹، ۳۶/۷۲ و ۲۹/۰۹ درصد از سطح آبخوان به ترتیب متعلق به کلاس‌های آلودگی ناچیز (رنگ سبز کم‌رنگ)، آلودگی کم (رنگ سبز تیره)، آلودگی متوسط (رنگ زرد)، آلودگی زیاد (رنگ آبی کم‌رنگ) و آلودگی بسیار زیاد (رنگ آبی تیره) می‌باشد و می‌توان گفت تنها ۳۴/۱۷ درصد از سطح منطقه تاحدودی برای برداشت جهت مصارف شرب مناسب است. نقشه پهنه-بندی کیفیت بر اساس شاخص PIG روند افزایش آلودگی را از شرق به غرب نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر O_w (رابطه ۳) پارامترهای SO_4^{2-} ، Na و Cl به ترتیب بیشترین تاثیر را در محاسبه PIG داشتند. این درحالیست که پارامترهای F و HCO_3^- کمترین تاثیر را در محاسبه شاخص داشتند. مقادیر شاخص متاثر از وزن و مقادیر نرمال شده غلظت پارامترها می‌باشد. هر چه وزن و غلظت پارامتر بیشتر باشد

پارامترهای TDS، Na^{2+} و SO_4 بیشترین تاثیر را در مقدار شاخص LPIG داشتند.

شکل (۵) نقشه پهنه‌بندی کیفیت آبخوان دشت بیرجند را براساس شاخص PIG و LPIG نشان می‌دهد. مطابق شکل (۵) روند افول کیفیت از نوار شرقی و شمالی به نوار غربی و جنوبی آبخوان، افزایشی است. مقایسه سطح آلودگی منطقه با استفاده از دو شاخص PIG و LPIG نشان می‌دهد که شاخص LPIG روند تغییرات آلودگی را ملایم‌تر می‌کند و مساحت بیشتری به طبقه آلودگی ناچیز، کم و متوسط تعلق گرفته است و همچنین بسیاری از نواحی که با استفاده از شاخص PIG در طبقه آلودگی زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌بود را اصلاح کرده‌است.

تعیین شاخص کلی کیفیت آب‌زیرزمینی دارد. ضریب ناسازگاری برابر ۰/۰۲ است که صحت قضاوت‌ها و اوزان به-دست آمده را تأیید می‌کند. پارامترهای NO_3 ، TDS و PH به‌ترتیب اثرگذاری بیشتری در تعیین کیفیت آب‌زیرزمینی منطقه دارند. نقشه LPIG با انجام محاسبات رستری در محیط ArcGIS و جایگزینی وزن‌ها در رابطه (۳) حاصل شد. مقادیر شاخص LPIG در بازه ۵/۵ - ۰/۸۲ متغیر است. نتایج حاصل از این شاخص به ترتیب ۹/۷، ۱۵/۳۷، ۳۵/۸۸، ۲۳/۹۲ و ۱۵/۱ درصد از سطح منطقه را با آلودگی ناچیز، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد شناسایی کرد. ۶۰/۹۵ درصد از سطح منطقه تاحدودی برای برداشت جهت مصارف شرب مناسب است. براساس مقادیر O_w (جدول ۶) به‌ترتیب

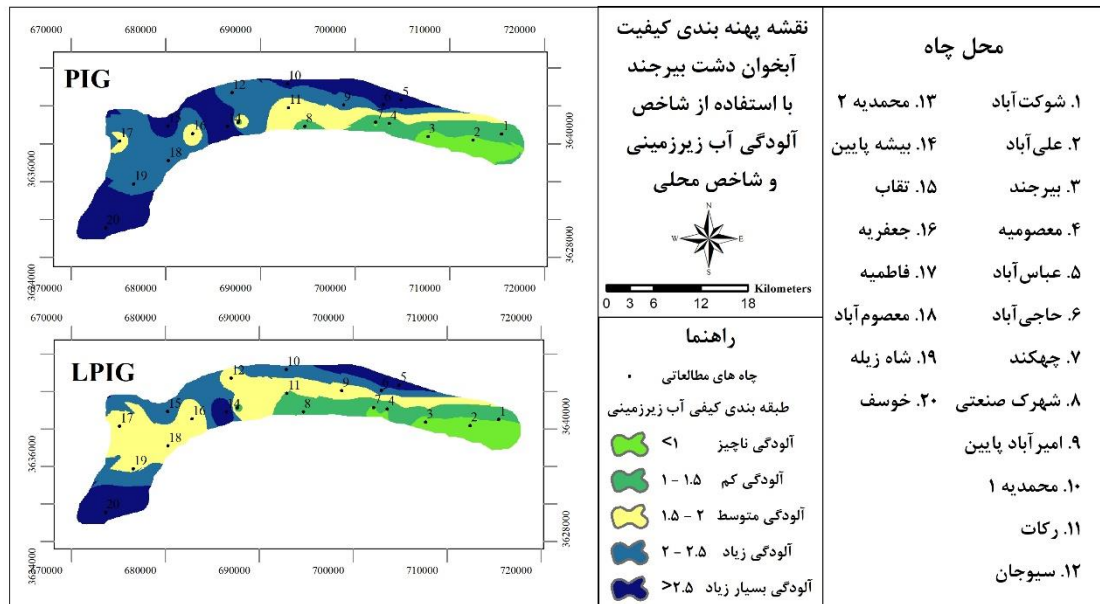
Overall Inconsistency = .02



شکل (۴): وزن نهایی محاسبه شده توسط نرم افزار Expert Choice

جدول (۶): مقادیر وزن و O_w در شاخص‌های آلودگی آب‌زیرزمینی

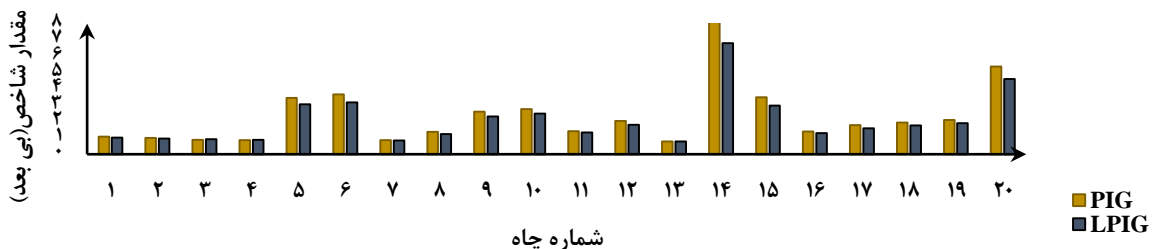
پارامتر	شاخص LPIG		شاخص PIG	
	میانگین O_w	وزن	میانگین O_w	Weight
TDS	۰/۴۹۱	۰/۱۶۳	۰/۳۶۷	۰/۱۲۲
PH	۰/۱۲۷	۰/۱۲۷	۰/۱۲۲	۰/۱۲۲
NO_3^-	۰/۱۷۴	۰/۲۹۲	۰/۰۷۳	۰/۱۲۲
Mg^{2+}	۰/۱۶۸	۰/۰۶۳	۰/۱۳۱	۰/۰۴۹
Ca^{2+}	۰/۰۶۷	۰/۰۵۲	۰/۰۶۳	۰/۰۴۹
Cl^-	۰/۲۶۳	۰/۰۶۳	۰/۴۰۵	۰/۰۹۷
Na^{2+}	۰/۳۰۲	۰/۰۶۹	۰/۴۲۵	۰/۰۹۷
Hco_3^-	۰/۰۳۴	۰/۰۳۷	۰/۰۶۷	۰/۰۷۳
So_4^{2-}	۰/۲۵۵	۰/۰۷۷	۰/۵۰۵	۰/۱۲۲
F^-	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲	۰/۰۵۷	۰/۱۲۲
K^+	۰/۰۳۹	۰/۰۳۶	۰/۰۴۴	۰/۰۲۵



شکل (۵): نقشه پهنه بندی کیفیت آبخوان دشت بیرجند بر اساس شاخص PIG و LPIG

بالای هر دو شاخص در غرب و جنوب غربی آبخوان به علت تجمع چاه های کشاورزی و فعالیت های کشاورزی در این نواحی است. مقادیر بالای شاخص به علت تأثیر زیاد وزن و سنگ های جنوب شرقی آبخوان افیولیتی و انحلال ناپذیر بوده و کیفیت آب در این نواحی مطلوب تر است. با توجه به شکل (۵) تجمع چاه های شرب نیز در این نواحی است. با پیشروی به سمت شمال و نواحی غربی آبخوان، به علت وجود تشکیلات گچی و نمکی (کنگلو مرای نئوژن)، افزایش میزان انحلال پذیری و مقادیر غلظت TDS از کیفیت آب کاسته می شود.

با مقایسه وزن های پارامترهای کیفی در دو شاخص می توان مشاهده کرد که در شاخص LPIG پارامترهای کیفی که در تعیین سلامت آب در منطقه مؤثرند، وزن بیشتری داشته و هر پارامتر وزن مخصوص به خود را دارد. این امر درک طبقه بندی آب را بهبود بخشیده و خطاهای احتمالی ناشی از تخصیص وزن تصادفی در شاخص PIG را کاهش می دهد. مقایسه مقادیر دو شاخص در چاه های منطقه (شکل ۶) نشان از نتایج خوش بینانه تر شاخص LPIG دارد. مطابق شکل (۵) هر دو شاخص چاه هایی با کاربری شرب را در محدوده آلودگی کم و با کیفیت مناسب نشان دادند (کاربری هر چاه در شکل (۱) مشخص شده است). مقادیر



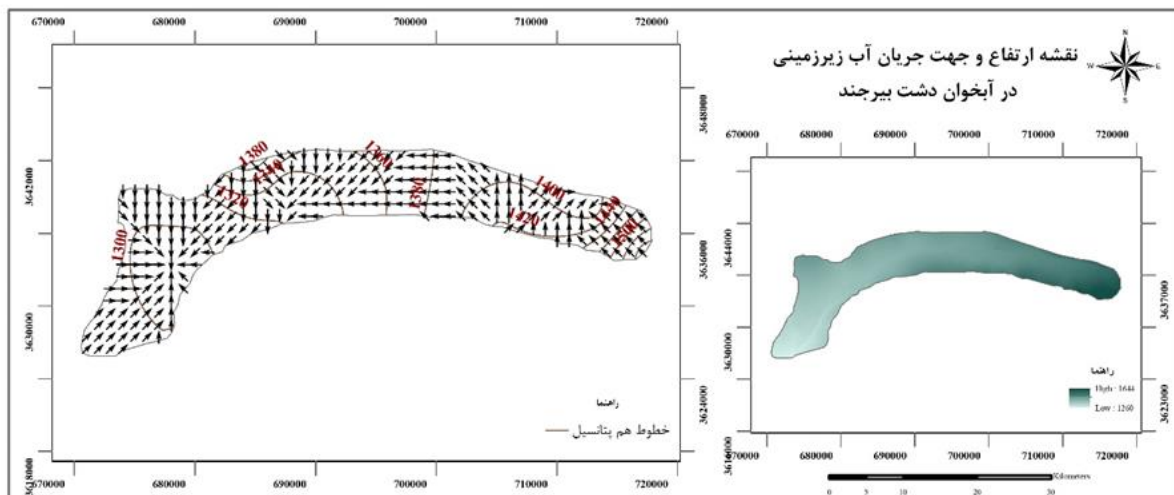
شکل (۶): مقادیر شاخص PIG و LPIG در چاه های سطح منطقه مطالعاتی

از هر دو روش تفاوت چندانی با همدیگر ندارند. اما اگر مقدار χ^2 بیشتر از مقدار بحرانی آن باشد نتایج با همدیگر تفاوت معنادار دارند. نتایج آزمون Chi-square نشان می‌دهد که مقدار آن از مقدار بحرانی فراتر است. در نتیجه این دو نقشه باهم تفاوت معناداری دارند که نشان می‌دهد ضرایب AHP بر روی مقادیر PIG توانسته تاثیر بگذارد. در نتیجه شاخص LPIG در ارزیابی کیفیت آب شرب در آبخوان دشت بیرجند مناسب شناخته شد.

جدول (۷) نتایج تحلیل حساسیت حذف هر پارامتر را نشان می‌دهد. پارامترهای TDS، Na، Cl⁻ و SO₄ با بیشترین مقدار میانگین تغییرپذیری به ترتیب حساس‌ترین پارامترها در محاسبه شاخص LPIG بوده و پارامترهای K، F و HCO₃ کمترین تاثیر را در محاسبه شاخص LPIG داشتند، در نتیجه این پارامترها اثر قابل توجهی بر LPIG ندارند.

به منظور بررسی جهت جریان آب‌ریزمینی، خطوط هم‌پتانسیل رسم گردید. جریان از پتانسیل بیشتر به پتانسیل کمتر حرکت می‌کند و جهت آن عمود بر خطوط هم‌پتانسیل می‌باشد. جهت کلی جریان آب‌ریزمینی از جنوب به شمال غرب و از شرق به غرب آبخوان می‌باشد و کاهش ارتفاعات در این مسیر مشاهده می‌شود. نقش زمان ماند، سن آب و طولانی بودن مسیر جریان خود گواهی بر روند پیشروی آلودگی در این مسیر و افزایش شوری است (شکل ۷). کلیه نتایج به دست آمده با نتایج تحقیقات پیشین توسط (Keshavarz et al. 2014)، (Eftekhari et al. 2021) که در زمینه کیفیت منابع آب‌ریزمینی در دشت بیرجند انجام شده بود نیز هم‌خوانی دارد.

مقدار Chi-square محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱۰) برابر ۲۴۶۶۱/۷ می‌باشد. اگر برای هر طبقه کلاس‌بندی شده، $\chi^2 \neq 0, O \neq E$ و کمتر از ۹/۴۸۸ باشد نتایج حاصل



شکل (۷): نقشه ارتفاع و جهت جریان آب‌ریزمینی در منطقه مورد مطالعه

جدول (۷): نتایج تحلیل حساسیت حذف پارامتر بر شاخص LPIG

Removed Parameter	Mean	Min	Max	SD	Removed Parameter	Mean	Min	Max	SD
TDS	۲۴/۲۱	۱۰/۶۳	۴۸/۰۸	۵/۳۴	Na ²⁺	۱۴/۹۴	۵/۳۲	۳۸/۰۲	۴/۵
PH	۷/۵۷	۲/۱۹	۱۶/۰۳	۳/۰۶	Hco ₃ ⁻	۲/۱۱	۰/۵۳	۸/۳۴	۱/۴۲
NO ₃ ⁻	۱۰/۲۳	۳/۳	۳۳/۸	۴/۸۳	So ₄ ²⁻	۱۲/۷۵	۳/۷۳	۳۱/۰۳	۳/۵۶
Mg ²⁺	۹/۰۴	۲/۹۶	۱۴/۷۷	۲/۱۴	F ⁻	۰/۹۳	۳/۲	۱/۹	۰/۳۷
Ca ²⁺	۳/۳۶	۱/۱۴	۶/۷۲	۰/۸۹	K ⁺	۲	۰/۳۶	۷/۳۳	۰/۸
Cl ⁻	۱۲/۸۲	۱/۹۱	۲۲/۹۵	۳/۶۸					

و میزان انحلال پذیری آن نسبت داد. نتایج حاصل از این شاخص به ترتیب ۹/۷، ۱۵/۳۷، ۳۵/۸۸، ۲۳/۹۲ و ۱۵/۱ درصد از سطح منطقه را با آلودگی ناچیز، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد شناسایی کرد. ۶۰/۹۵ درصد از سطح منطقه تاحدودی برای برداشت جهت مصارف شرب مناسب است. اصلاح وزن با توجه به شرایط دشت منجر به نتایج بهتری از وضعیت کیفی آبخوان در مقایسه با شاخص PIG شد.

نتایج آنالیز حساسیت حذف پارامتر بیانگر این بود که پارامترهای TDS، Na، Cl⁻ و SO₄ به ترتیب حساس ترین پارامترها در محاسبه شاخص آلودگی آبخوان زمینی محلی (LPIG) می باشند.

کیفیت آبخوان از شرق به غرب و از جنوب به شمال منطقه روبه کاهش است و بخش های شرقی و مرکزی به ترتیب اولویت، برای اهداف شرب مناسب است. با توجه به جهت جریان آبخوان زمینی و کاهش ارتفاعات این نتیجه منطقی است. شاخص LPIG را می توان برای آبخوان های آبرفتی به عنوان یک شاخص مورد اعتماد در تصمیمات مدیریتی جهت پایداری منابع آبخوان زمینی در مناطق خشک و نیمه-خشک استفاده کرد. همچنین می توان از سایر روش های تصمیم گیری چندمعیاره در اصلاح وزن شاخص های مختلف کیفی و توسعه شاخص های جدید در آبخوان های مختلف استفاده کرد.

پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از روش AHP برای اصلاح شاخص PIG روشی ساده و قابل اعتماد برای ارزیابی کیفیت آب جهت استفاده در مصارف شرب می باشد و می توان از شاخص LPIG برای آبخوان های آبرفتی به عنوان یک شاخص مورد اعتماد استفاده کرد.

نتیجه گیری

باتوجه به اقلیم و بارندگی های پراکنده در سطح دشت بیرجند، منابع آبخوان زمینی به عنوان اصلی ترین منبع تامین آب شرب به شمار می روند. برداشت های بی رویه از این منابع علاوه بر کمیت، کیفیت این منابع را نیز تهدید می کند. لذا در پژوهش حاضر برای تعیین سطوح کیفیت آبخوان زمینی آبخوان دشت بیرجند از شاخص آلودگی آبخوان زمینی (PIG) استفاده شد. رنج تغییرات شاخص از ۰/۸ تا ۶/۰۸ متغیر است که نشان از آلودگی بخش وسیعی از منطقه و نامناسب بودن آن برای برداشت شرب است. به منظور افزایش دقت الگوی PIG و کاهش خطای ناشی از تخصیص وزن مستقیم به هر پارامتر، روش سلسله مراتبی برای اصلاح وزن پارامترهای کیفی و توسعه یک شاخص بهینه محلی استفاده شد و شاخص محلی LPIG برای آبخوان توسعه یافت. شاخص جدید مقادیر خوش بینانه تری از وضعیت کیفی آبخوان ارائه داد. مقادیر بالای TDS باعث افزایش مقدار شاخص شد که می توان این موضوع را به بافت خاک

منابع

1. Achu A.L., Thomas J., and Reghunath R. 2020. Multi-criteria decision analysis for delineation of groundwater potential zones in a tropical river basin using remote sensing, GIS and analytical hierarchy process (AHP). *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100365. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100365>
2. Adimalla N., Qian H., and Nandan M.J. 2020. Groundwater chemistry integrating the pollution index of groundwater and evaluation of potential human health risk: A case study from hard rock terrain of south India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206, 111217. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111217>
3. Aykut T. 2021. Determination of groundwater potential zones using geographical information systems (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) between Edirne-Kalkansogut (northwestern Turkey). *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100545. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100545>

4. Babiker I.S., Mohamed M.A., and Hiyama T. 2007. Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resources Management*, 21(4): 699-715. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9059-6>
5. Dandge K.P., and Patil S.S. 2022. Spatial distribution of ground water quality index using remote sensing and GIS techniques. *Applied Water Science*, 12(1): 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01546-7>
6. Dokou Z., Kourgialas N.N., and Karatzas G.P. 2015. Assessing groundwater quality in Greece based on spatial and temporal analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(12): 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4998-0>
7. Dolatkordestani M., Nohegar A., and Janizadeh S. 2019. Groundwater quality zoning using WQI and Geo-statistical Methods for various consumptions. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 8(24): 95-108 (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22052/deej.2018.7.24.59>
8. Eftekhari M., Eslaminezhad S.A., Haji Elyasi A., and Akbari M. 2021. Geostatistical Evaluation with Drinking Groundwater Quality Index (DGWQI) in Birjand Plain Aquifer. *Environment and Water Engineering*, 7(2): 267-278 (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.256731.1464>
9. Egbueri J.C. 2020. Groundwater quality assessment using pollution index of groundwater (PIG), ecological risk index (ERI) and hierarchical cluster analysis (HCA): a case study. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100292. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100292>
10. Eldaw E., Huang T., Mohamed A.K., and Mahama Y. 2021. Classification of groundwater suitability for irrigation purposes using a comprehensive approach based on the AHP and GIS techniques in North Kurdufan Province, Sudan. *Applied Water Science*, 11(7): 1-19. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01443-z>
11. El-Zeiny A.M., and Elbeih S.F. 2019. GIS-based evaluation of groundwater quality and suitability in Dakhla Oases, Egypt. *Earth Systems and Environment*, 3(3): 507-523. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00112-1>
12. Gao Y., Qian H., Ren W., Wang H., Liu F., and Yang F. 2020. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121006. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121006>
13. Ghodsipour S.H. 2002. Analytical Hierarchy Process (AHP). Amirkabir University press, Tehran (In Persian).
14. Heshmati S.S., and Beigi Harchegani H. 2014. A GIS-based Assesment of Drinking Quality of Shahrekord Groundwater using an Index. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 18(69): 179-191 (In Persian).
15. Hosseini Moghari S.M., and Ebrahimi K. 2015. Development of a Fuzzy Water Quality Index (FWQI)-Case study: Saveh Plain. *Water and Soil*, 29(5): 1117-111130 (In Persian).
16. Hu H., Lin T., Wang S., and Rodriguez L.F. 2017. A cyberGIS approach to uncertainty and sensitivity analysis in biomass supply chain optimization. *Applied Energy*, 203, 26-40. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.107>
17. Huang I.B., Keisler J., and Linkov I. 2011. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of The Total Environment*, 409(19): 3578-3594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022>
18. Karakuş C.B. 2019. Evaluation of groundwater quality in Sivas province (Turkey) using water quality index and GIS-based analytic hierarchy process. *International Journal of Environmental Health Research*, 29(5): 500-519. <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1551521>

19. Keshavarz A., Khashei-siuki A., and Najafi M.H. 2014. Locating of suitable area of pumping drinking water using FAHP method (Case study: Birjand aquifer). *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 25(3): 135-142. (In Persian).
20. Kordi M. 2008. Comparison of Fuzzy and Crisp Analytic Hierarchy Process (AHP) Methods for Spatial Multicriteria Decision Analysis in GIS. Master. Thesis, University of Gavle. <http://hig.divaportal.org/smash/get/diva2:120251/FULLTEXT01>
21. Mohebbi Tafreshi A., and Mohebbi Tafreshi G. 2017. Qualitative zoning of groundwater for drinking purposes in Lenjan plain using GQI method through GIS. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 4(4): 209-215. <http://dx.doi.org/10.15171/EHEM.2017.29>
22. Nath A.V., Selvam S., Reghunath R., and Jesuraja K. 2021. Groundwater quality assessment based on groundwater pollution index using Geographic Information System at Thettiyyar watershed, Thiruvananthapuram district, Kerala, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(7):1-26. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06820-1>
23. Report. 2016. Studies on updating water resources balance in the study area of watershed level2 of Lut Desert. Iran Water Resources Management Company. third revision (In Persian).
24. Saaty T.L. 1980. The analytical hierarchy process, planning, priority. Resource allocation. RWS publications, USA.
25. Schoeller H. 1965. Qualitative evaluation of groundwater resources. Methods and techniques of groundwater investigations and development. UNESCO, 5483.
26. Shahidi A., and Khadempour F. 2020. Investigating the Qualitative Satus of Groundwater in the Plain of Khorasan Razavi Province Using GWQI and AWQI Indexes and Its Zoning with Geographic Information System (GIS). *Hydrogeomorphology*, 7(22): 1-20 (In Persian). <https://dx.doi.org/10.22034/hyd.2020.10802>
27. Southern Khorasan Regional Water Company. 2008. Report on prolongation of the prohibition of the study area of Birjand. 4616.(In Persian).
28. SubbaRao N. 2012. PIG: a numerical index for dissemination of groundwater contamination zones. *Hydrological Processes*, 26(22): 3344-3350.
29. SubbaRao N.S., Sunitha B., Rambabu R., SubbaRao P.V., SubbaRao P.S., Spandana B.D., Sravanthi M., and Marghade D. 2018. Quality and degree of pollution of groundwater, using PIG from a rural part of Telangana State, India. *Applied Water Science*, 8(8): 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0864-x>
30. Tiwari A.K., Singh A.K., and Mahato M.K. 2018. Assessment of groundwater quality of Pratapgarh district in India for suitability of drinking purpose using water quality index (WQI) and GIS technique. *Sustainable Water Resources Management*, 4(3): 601-616. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0144-1>
31. Yunus R.M., Samadi Z., Yusop N.M., and Omar, D. 2013. Expert choice for ranking heritage streets. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 101, 465-475. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.07.220>
32. Zhou Y., Li P., Chen M., Dong Z., and Lu C. 2021. Groundwater quality for potable and irrigation uses and associated health risk in southern part of Gu'an County, North China Plain. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(2): 813-835. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00553-y>

Evaluation of groundwater quality for drinking purpose in birjand aquifer using PIG index and modified LPIG index based on AHP method

Melika Rastgoo*¹, Farzin Nasirisaleh², Abbas Khasheisiuki³

DOI: 10.22103/nrswe.2023.20384.1016

Abstract

Indiscriminate extraction of groundwater resources as an essential resource for drinking purposes, especially in arid and semi-arid regions, threatens the quality of these resources. Low quality of groundwater because of infiltration of salt water into aquifers, affects human health, so evaluating groundwater quality is important. In this paper the results of evaluating groundwater quality for drinking purpose in birjand aquifer, located in South Khorasan province, by using the pollution index of groundwater (PIG), have been explained. In this study, the qualitative data of PH, TDS, Mg, Na, Ca, Cl, NO₃, F, HCO₃, SO₄, K related to 20 wells for 2019-2020 were collected. In order to calculate the PIG, the parameter map was prepared using the appropriate interpolation method (Kriging and IDW) based on the RMSE and R² in ArcGIS and the WHO standard was used as a guide. Due to the existence of local effects of various parameters and the existence of some dominant quality parameters in the samples, to increase the accuracy of the PIG model, the Analytical Hierarchy Method (AHP) was used to modify the weights and develop a local optimal index. The computed values of the revised pollution index map (LPIG), varied from 0.8 to 5.5, and divides the quality level of the aquifer into 5 classes with insignificant, low, moderate, high and very high pollution, It covers 9.7%, 15.5%, 35.9%, 23.9% and 1.15% of the area, respectively. A high pollution in the western and southwestern areas of the aquifer is attributed to agricultural activities in these areas.

Keywords: Birjand aquifer, Groundwater quality, AHP, LPIG, PIG

¹*- MSc. Student of Engineering and Water Resources Management, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (* Corresponding author: melika_rastgoo@modares.ac.ir).

² - Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

³ - Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.