

## ارزیابی تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مرند با استفاده از روش ترکیب غیرنظارت شده (شاخص GWQI و GQI)

مرنزی نجیب<sup>۱</sup>، اصغر اصغری مقدم<sup>۲</sup>، عطاالله ندیری<sup>۳\*</sup>، الهام فیجانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲. استاد گروه علوم زمین دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۳. استاد پردیس علوم / دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۴/۲۰، تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۱۱/۱۱)

### چکیده

آبخوان دشت مرند یکی از دشت‌های بزرگ و با فعالیت‌های وسیع کشاورزی و صنعتی است که در سال‌های اخیر در زمره آبخوان‌های بحرانی و ممنوعه قرار گرفته است. یکی از مشکلات کاهش سطح آب زیرزمینی، تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی است که روی چگونگی مصارف و مدیریت آنها تأثیر دارد. بنابراین، در این تحقیق با استفاده از ۴۶ نمونه آبی از چاه، قنات و چشمه‌ها در خردادماه ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ و آنالیز پارامترهای یون‌های اصلی، فرعی و کمیاب، شاخص‌های کیفیت آب زیرزمینی GQI و GWQI محاسبه شد. نقشه‌های خروجی این دو شاخص نشان از تفاوت در تعیین رده‌های کیفیت آب شرب منطقه است، انتخاب یکی از این دو شاخص برای تعیین قابلیت شرب منابع آبی منطقه ممکن نبود. بنابراین، در این پژوهش با توجه به تفاوت موجود در خروجی‌های دو شاخص استفاده شده، برای دستیابی به یک نقشه واحد روش ترکیب غیرنظارت شده معرفی و استفاده شد. نتایج پژوهش گویای این است که روش غیرنظارت شده (Unsupervised method) با داشتن CI بالاتر نسبت به دو شاخص یادشده، روش ایده‌آل‌تری برای ارزیابی کیفیت منابع آبی منطقه و تعیین صحیح‌تر رده‌های قابلیت شرب است. نتایج نشان داد دشت مرند در کلاس‌های متوسط و قابل قبول از نظر شاخص GWQI و GQI قرار دارد. بیشترین و کمترین مقدار شاخص GWQI و GQI به ترتیب در جنوب و شمال غربی دشت مشاهده شد. مقایسه نقشه‌های شاخص کیفیت آب شرب در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ نشان‌دهنده کاهش کیفیت آب طی ۵ سال اخیر است.

**کلیدواژه‌ها:** شاخص GQI، شاخص GWQI، دشت مرند، روش غیرنظارت شده و کیفیت آب‌های زیرزمینی.

## مقدمه

در نواحی خشک و نیمه‌خشک اهمیت آب زیرزمینی به عنوان منابع آب بیشتر به چشم می‌خورد [۱]. کاهش کیفیت و کمیت آب با گذشت زمان، باعث ایجاد شرایط تهدیدکننده‌ای برای برخی جوامع شده است [۲]. یک سوم جمعیت جهان از آب‌های زیرزمینی برای شرب استفاده می‌کنند، از این‌رو بررسی و پایش کیفیت آب زیرزمینی می‌تواند نقش مهمی در دستیابی به توسعه پایدار ایفا کند [۳]. تغییر کیفیت آب زیرزمینی در یک منطقه تابعی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی است که بیشتر تحت تأثیر سازندهای زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی قرار گرفته‌اند [۴]. با توجه به تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی که می‌تواند بر اثر فعالیت‌های انسانی و طبیعی صورت گیرد، بررسی و مطالعه این منابع به منظور حفظ کیفیت آنها ضروری است. تأمین امنیت آب از نظر کمی و کیفی برای رفع نیازهای انسان و اکوسیستم، یکی از مسائل مورد بحث در قرن ۲۱ است و به طور بالقوه تحت تأثیر بسیاری از عوامل طبیعی و انسانی قرار می‌گیرد [۵]. فریز و چری (۱۹۹۷) این عوامل را به منشأ آب، میزان تبخیر آن ناحیه، انواع سنگ و کانی‌های موجود در مسیر (زمین‌شناسی و کانی‌شناسی حوضه)، فرایندهای شیمیایی حاکم در آبخوان، سرعت حرکت آب و مدت زمان تماس آب و مواد معدنی در مسیر جریان، تقسیم کرده است [۶].

یکی از روش‌های ساده و دور از پیچیدگی‌های ریاضی و آماری که می‌تواند شرایط کیفی آب را بازگو کند، استفاده از شاخص‌های کیفی آب است. از مهم‌ترین شاخص‌هایی که تا کنون توسط پژوهشگران برای ارزیابی کیفی آب استفاده شده است، شامل شاخص‌های  $WQI^1$  [۷]،  $NSFWQI^2$  [۸]،  $WQI^3$  [۹]،  $WQI^4$  [۱۰]،  $OWQI^5$  [۱۱]،  $GWQI^6$  [۱۲] هستند. با توجه به شاخص‌های ارائه‌شده برای ارزیابی کیفیت آب شرب،  $GWQI$  و  $GQI$  جزء شاخص‌های پرکاربرد برای پهنه‌بندی کیفی آب بوده که نسبت به سایر شاخص‌های ارزیابی کیفیت آب به دلیل سادگی و در دسترس بودن مشخصه‌های کیفی، توسط

بیشتر محققان به کار گرفته شده است [۱۳]. شاخص‌های  $GWQI$  و  $GQI$  از نوع شاخص‌های با مقیاس کاهش و افزایشی هستند یعنی با افزایش میزان آلودگی آب، مقدار آنها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. از جمله شاخص‌ها که برای آنالیز کیفی آب از نظر شرب کاربرد دارد،  $GWQI$  و  $GQI$  هستند که امروزه این شاخص‌ها با توجه به قابلیت زیاد آن در بیان و توصیف اطلاعات کیفی آب و همچنین، به‌کارگیری پارامترهای مهم و تأثیرگذار در ارزیابی و مدیریت کیفیت آب زیرزمینی، در بسیاری از نقاط جهان مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرند [۱۴]. شاخص کیفی  $GQI$  در واقع نوعی شاخص کیفی است که از ادغام پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی به دست می‌آید. به دلیل سهولت استفاده و بیان نتایج به زبان ساده و قابل فهم این شاخص امروزه در سطح جهان بسیار کاربردی و عمومی شده است. نخستین بار این شاخص توسط هورتون (۱۹۶۵) برای توزیع مکانی و زمانی آب رودخانه‌ها ارائه شد [۱۵]. این شاخص معیاری برای تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی و تعیین تناسب آن برای اهداف شرب و نوعی ابزار مؤثر بر برقراری ارتباط بین اطلاعات کیفی آب است [۱۶]. شاخص  $GQI$ ، از یک روش ریاضی برای تبدیل کردن تعداد زیاد داده‌های کیفی آب به یک عدد استفاده می‌کنند. یکی از محاسن  $GQI$  انعطاف‌پذیری آن در استفاده از مؤلفه‌های موجود است. به بیان دیگر، تعداد مؤلفه‌های کیفی ورودی برای محاسبه  $GQI$  متغیر است. با استفاده از این عدد و طبقه‌بندی‌های  $GQI$ ، تصمیم‌گیری درباره کیفیت آب و قابلیت استفاده آن برای شرب آسان و ساده خواهد بود [۱۷]. در تعیین  $GQI$  معمولاً از استانداردهای  $WHO^7$  استفاده می‌شود [۱۸]. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی به کمک شاخص کیفی  $GQI$  که بر پایه GIS استوار است، توسط Babiker و همکاران (۲۰۰۷) ارائه شده است [۱۹]. شاخص  $GWQI$  از کاربردی‌ترین شاخص‌ها در بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر آشامیدن است که پارامترهای مختلف را با یکدیگر تلفیق می‌کند و با معیارهای جهانی مثل استاندارد سازمان بهداشت جهانی ( $WHO$ ) ارتباط می‌دهد. این شاخص به عنوان ابزاری کاربردی در بررسی کیفیت آب برای مصارف شرب شناخته شده است [۲۰ و ۲۱].

1. Water Quality Index
2. National Sanitation Foundation Water Quality I
3. Water Quality with minimum subsidence
4. Water Quality with five subsidence
5. Oregon water quality index
6. Groundwater Quality Index

### پیشینه تحقیق

رضا و سینگ (۲۰۱۰) در پژوهشی به ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه اریسا هند اقدام و از غلظت  $Mg^{+2}$ ،  $Ca^{+2}$  و  $NO_3^{2+}$  برای محاسبه GQI استفاده کردند. بر اساس نتایج پژوهش یادشده، دامنه GQI در فصل خشک (تابستان) از ۱۴ تا ۵۷ و در فصل بارندگی (زمستان) از ۱۹ تا ۶۷ تغییر داشت. بنابراین، نتیجه گرفته شد که افزایش املاح محلول طی دوره بارندگی موجب کاهش کیفیت آب در مقایسه با فصل تابستان شده است [۲۲]. همچنین، جها و مجبول (۲۰۱۵) برای شناسایی منابع آلوده‌کننده آب در منطقه اودایپور هندوستان از شاخص GQI استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که فلوراید، سدیم، EC و TDS به طور درخور توجهی رو به افزایش است [۲۳]. استیگر و همکاران (۲۰۰۶) کاربرد شاخص کیفیت آب زیرزمینی به عنوان ابزار ارزیابی در سیاست‌های کشاورزی-محیطی را بررسی کردند و با هدف مدیریت تأثیر توأم کشاورزی روی پارامترهای کلیدی شیمی و قابلیت شرب آب زیرزمینی با روش تحلیل عاملی به بررسی کیفیت آب زیرزمینی در پرتغال پرداختند [۲۴]. بابیکر و همکاران (۲۰۰۷) در دشت ناسونو منطقه توجیگی ژاپن به منظور ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی از شاخص GQI استفاده کردند و برای تهیه داده‌ها از اندازه‌گیری فصلی تعداد ۵۰ حلقه چاه اطراف دشت بهره بردند. بررسی GQI نشان داد کیفیت آب منطقه از نظر شرب خوب بوده، ولی در قسمت جنوب شرق منطقه مقدار GQI پایین‌تر از همه‌جا بوده و در نتیجه، کیفیت سطح پایین‌تری نسبت به بقیه قسمت‌های دشت دارد. این ضریب نیز آشکار کرد که عواملی مثل عمق سطح آب زیرزمینی ساختار ژئومورفولوژیکی، نوع کاربری از عوامل مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه هستند [۱۹]. شاخص GWQI به وسیله شارما و پاتل در سال ۲۰۱۰ برای بررسی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان سورتی در هندوستان به کار گرفته شده است. آنها پنج فراسنج TDS، pH، EC، TH و Cl را بر کیفیت آب زیرزمینی آبخوان یادشده مؤثر می‌دانند و بیان می‌کنند که فراسنجهای مختلفی در سایر مناطق می‌توانند در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی مؤثر در نظر گرفته شوند [۱۷]. جودوی و زارع (۱۳۸۸) کیفیت آب زیرزمینی را از نظر شرب در آبخوان دشت فیض‌آباد در جنوب غرب مشهد از طریق برآورد شاخص GQI بررسی

کردند و به این نتیجه رسیدند که روش GQI با روش‌های دیگر ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی همخوانی دارد و می‌توان از آن به عنوان یک شاخص مورد اطمینان برای بررسی تغییرات مکانی و حتی زمانی کیفیت آب زیرزمینی استفاده کرد [۲۵]. رحمانی و همکاران (۱۳۹۰) در دشت ایذه پیون خوزستان در جنوب غرب ایران، کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب را بررسی کردند که در نتایج این تحقیق مقدار ۹۲ برای GQI به دست آمد و نشان داد کیفیت آب زیرزمینی در این دشت در رده مناسب قرار دارد [۲۶]. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۲) با بررسی تغییرات کیفی منابع آب باختر کوه سرخ با استفاده از شاخص کیفی GQI به این نتیجه رسیدند که مقدار این شاخص از پیرامون به سمت مرکز منطقه مطالعه‌شده کاهش یافته که این کاهش می‌تواند ناشی از عوامل زمین‌شناسی، جهت جریان و همچنین، سامانه گرمایی فعال در منطقه باشد [۲۷]. سعیدی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مقادیر میانگین ۸ پارامتر شیمیایی حاصل از ۱۶۳ نمونه، شاخص کیفی در سطح استان قزوین را محاسبه کردند و نقشه کیفیت و منطقه‌بندی آب‌های شرب را فراهم آوردند [۲۸]. میرعبی و همکاران (۱۳۸۹) برای بررسی تعدادی از پارامترهای شیمیایی و تهیه نقشه کیفی آب زیرزمینی دشت ابرکوه از روش GQI استفاده کردند. این روش از طریق نرمال کردن و اندیس‌گذاری ۷ پارامتر شیمیایی مؤثر بر کیفیت آب شرب از جمله TDS،  $SO_4^{2-}$ ،  $NO_3^-$ ،  $Mg^{+2}$ ،  $Ca^{+2}$ ،  $Na^+$ ،  $Cl^-$  و مقایسه آنها نسبت به استاندارد سازمان جهانی بهداشت (WHO) در سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام شد و میزان GQI حدود ۷۳ محاسبه شد که نشان‌دهنده کیفیت قابل قبول آب زیرزمینی ابرکوه به لحاظ مصرف شرب است [۲۹]. خسروی و همکاران (۱۳۹۸) برای بررسی وضعیت تغییرات زمانی و مکانی شاخص GQI در دشت یزد-اردکان به این نتیجه رسیدند که از میان شش پارامتر بررسی‌شده، سه پارامتر مواد جامد محلول (TDS)، سدیم و کلر با داشتن بیشترین ضریب رتبه‌بندی به ترتیب دارای بیشترین تأثیر در مقدار شاخص GQI و در نتیجه، کیفیت آب زیرزمینی هستند. آنها در مجموع، نتیجه گرفتند که روند شاخص GQI در منطقه مطالعه‌شده نزولی است و کاربری اراضی نقش بسیار زیادی در کاهش میزان شاخص GQI و در نتیجه، کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت یزد- اردکان دارد

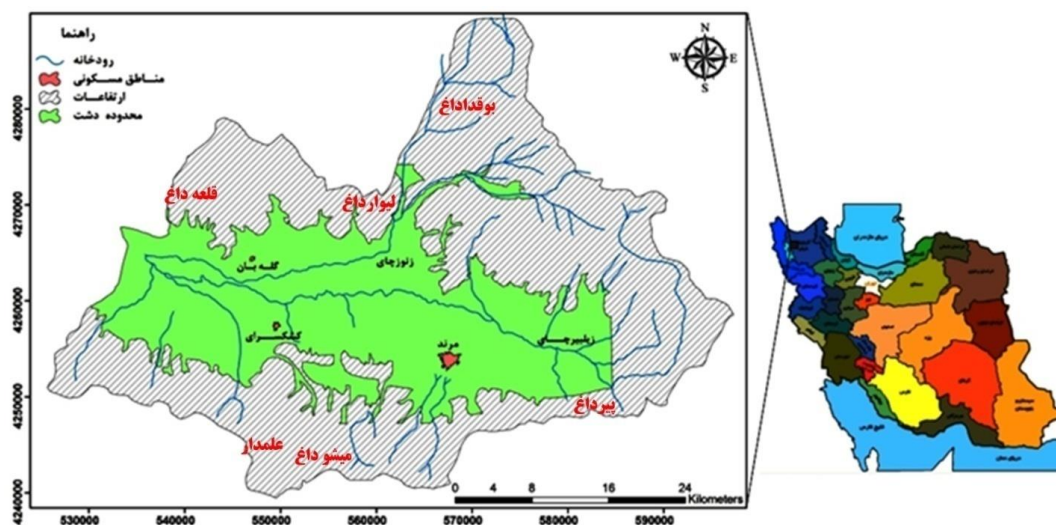
غرب ایران در استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. این دشت از شمال شرق به منطقه جلفا دوزال و از شمال غرب و غرب به ترتیب به دشت هرزندات و خروجی زوزچای و زلیبیرچای و حوضه آبریز قطورچای و از جنوب به حوضه آبریز دریاچه ارومیه محدود می‌شود و بخشی از حوضه آبریز دریاچه خزر است. کوه‌های میشو و پیرداغ در جنوب و کوه‌های بوقدداغ و قلعه داغ در شمال دشت مهم‌ترین ارتفاعات منطقه را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). رودخانه زلیبیرچای بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه منطقه است که از دامنه‌های جنوبی کوه سلطان جهانگیر واقع در حد مشترک حوضه حاجی‌لرچای و زلیبیرچای سرچشمه می‌گیرد و در جهت جنوب و به موازات خط تقسیم حوضه حرکت می‌کند و سپس، به سمت غرب منحرف می‌شود و در جهت شرق به غرب و به موازات زوزچای به مسیر خود ادامه می‌دهد. رودخانه زوزچای یکی دیگر از رودخانه‌های منطقه است که از دامنه غربی رشته‌کوه‌های کیامکی سرچشمه می‌گیرد و در جهت شرقی- غربی حرکت می‌کند و بعد از عبور از جنوب شهر زوز و دریافت مسیل‌هایی، وارد دشت مرنده می‌شود. براساس داده‌های هواشناسی موجود (ایستگاه چرچر مرنده) برای یک دوره ۵۰ ساله (۱۳۴۸-۱۳۹۸)، میانگین بارش سالانه ۲۸۶/۳ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه دشت ۱۱/۹۱ درجه سانتی‌گراد است. اقلیم حاکم بر منطقه بر اساس اقلیم نمای آمبرژه از نوع خشک سرد و بر اساس طبقه‌بندی دومارتن از نوع نیمه‌خشک محاسبه شده است [۳۲].

[۳۰]. شهیدی و همکاران (۱۳۹۹) با بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت جنگل در استان خراسان رضوی، مقدار شاخص GWQI در منطقه بین ۶۹/۶۶ تا ۲۳۹/۱۲ و مقدار شاخص AWQI بین ۵۶/۴۹ تا ۱۸۹/۴۸ محاسبه شد، مشخص شد کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه جنگل در حد ضعیف و نامناسب قرار دارد که علت آن نیز بالا بودن مقدار جامدات محلول کل آب است [۳۱]. در این پژوهش مجموعه پارامترهای جامعی که وجود آنها در منابع آب زیرزمینی محتمل است؛ شامل عناصر اصلی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، عناصر فرعی و عناصر کمیاب برای تعیین کیفیت آب شرب با توجه به سلامت مصرف‌کنندگان انتخاب شد که امری ضروری بوده و درواقع، با توجه به ارزیابی‌های انجام‌شده در حیطه پژوهش‌های کیفیت آب برای اهداف شرب برای نخستین بار از مجموعه پارامترهایی با این جامعیت استفاده شد. برای ارزیابی کیفیت آب شرب منطقه از دو شاخص GWQI و GQI به کار گرفته شد و همچنین، در حیطه بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی برای اهداف آشامیدن، برای نخستین بار روش ترکیب غیر نظارت‌شده به منظور تعیین دقیق‌تر رده‌های کیفیت آب شرب ارائه و در نهایت، انتخاب بهترین روش برای تعیین رده‌های کیفیت آب شرب محدوده مطالعه‌شده انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مطالعاتی

دشت مرنده با وسعت تقریبی ۵۹۰ کیلومترمربع در شمال



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه‌شده

### زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

بر اساس تقسیم‌بندی نبوی (۱۳۵۵) منطقه مطالعه شده جزئی از زون البرز غربی - آذربایجان است [۳۳]. مهم‌ترین سازندهای زمین‌شناسی که در محدوده مطالعاتی دیده می‌شوند، عبارت‌اند از: سازندهای سلطانیه، باروت، میلا، ائوسن، میوسن، پلیوسن و همچنان، رسوبات آبرفتی کواترن که در بخش وسیعی از منطقه رخنمون دارند. قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه مطالعه شده، مربوط به تشکیلات کهر است که لیتولوژی این سازند به صورت شیست و شیل‌های میکادار، به مقدار کم دولومیت استروماتولیتی، ماسه‌سنگ بسیار دانه‌ریز، توف، ریولیت و میان‌لایه‌های از آهک تیره‌رنگ بلورین و چرت است، که در قسمت جنوب مرند قابل ملاحظه است. در دامنه‌های شمالی کوه‌های میشو، سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی به سن پلیوسن به صورت گدازه، برش، توف، کنگلومرا، ماسه‌سنگ و توف‌ماسه‌ای برون‌زد داشته و با دگرشیبی روی واحد مختلف میوسن جای گرفته است. در نواحی شمالی دشت مرند و ارتفاعات اطراف یامچی، سنگ‌های آتشفشانی شامل گدازه، برش و گاهی توف به رنگ خاکستری تیره با ترکیب داسیتی - آندزیتی و پیروکلاست رخنمون دارند (شکل ۲) [۳۴].

آبخوان دشت از رسوبات آبرفتی دوران چهارم تشکیل شده است. رسوبات آبرفتی ساختمان اصلی دشت را تشکیل می‌دهند و نواحی مختلف به صورت رسوبات آبرفتی قدیمی، مخروط‌افکنه، تراس‌های آبرفتی جدید و رسوبات رودخانه‌ای است که ضخامتشان متغیر و در بررسی‌های ژئوفیزیکی و حفاری‌های اکتشافی ۲۰ تا ۳۲۰ متر تعیین شده است. ضخامت رسوبات آبرفتی به طور کلی از حاشیه به سمت مرکز دشت افزایش می‌یابد. جنس سنگ کف دشت مرند در قسمت‌های شمالی از جنس ولکانیک‌ها و رسوبات آذر آواری ائوسن، در شرق و جنوب شرقی از جنس کنگلومرای پلیوسن و در قسمت‌های غربی از جنس رسوبات تبخیری میوسن است و شیب آن به طور کلی به سمت مرکز دشت است [۳۴].

بر اساس آمار منابع آب زیرزمینی دشت مرند در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸، تعداد ۶۶۲ حلقه چاه عمیق فعال با تخلیه ۱۲۸/۸ میلیون متر مکعب و تعداد ۱۳۵ حلقه چاه نیمه‌عمیق فعال با تخلیه سالانه ۱/۸۷ میلیون مترمکعب و

تعداد ۸۲ دهنه چشمه دایر با تخلیه ۱۱/۵۵ میلیون مترمکعب و تعداد ۱۳۸ رشته قنات با تخلیه معادل ۸۳/۴۳ میلیون مترمکعب مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. از کل تخلیه صورت‌گرفته در محدوده مطالعاتی مرند، ۲۵/۱ میلیون مترمکعب برای مصارف شرب، ۲/۶ میلیون متر مکعب برای مصارف صنعت و ۱۹۶ میلیون مترمکعب به منظور مصارف کشاورزی استفاده می‌شود. وضعیت اقتصادی مرند بیشتر بر پایه کشاورزی استوار است. تمام منطقه مرند بنا به شرایط طبیعی، برای دامداری، کشاورزی و باغداری مناسب است [۳۵].

### نمونه‌برداری و تجزیه شیمیایی

به منظور ارزیابی وضعیت هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی، ۴۶ نمونه از منابع آب زیرزمینی دشت مرند در خردادماه ۱۳۹۸ برداشت شد. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۳ نشان داده شده است. پارامترها و یون‌های اندازه‌گیری شده شامل اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، سختی (TH)، کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی و یون‌های فرعی (نیترات و فلوراید) و آرسنیک مورد سنجش قرار گرفتند. کاتیون‌های سدیم و پتاسیم به روش نورسنج شعله‌ای، آنیون‌های سولفات و نیترات به روش اسپکتروفتومتری و سایر کاتیون‌ها و آنیون‌ها به روش حجم‌سنجی در آزمایشگاه آب‌شناسی دانشگاه تبریز اندازه‌گیری شدند. در آنالیز شیمیایی عناصر یادشده از دستورالعمل روش‌های استاندارد برای آنالیز آب و فاضلاب استفاده شد [۳۶]. درخور یادآوری است در این تحقیق برای مقایسه از نتایج آنالیز شیمیایی منابع انتخابی کیفی دشت مرند در خردادماه ۱۳۹۳ نیز استفاده شد. جدول ۱ توصیف آماری نتایج آنالیز هیدروشیمیایی نمونه‌های آنالیزشده در خردادماه ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد. همچنین، غلظت‌های آستانه را برحسب دو استاندارد سازمان بهداشت جهانی و سازمان استاندارد تحقیقات صنعتی ایران بیان می‌کند. سازمان بهداشت جهانی به عنوان بالاترین نهاد بین‌المللی در کنترل کیفیت آب، چهارچوبی برای آلاینده‌های مختلف آب آشامیدنی ارائه داده است. علاوه بر آن، استاندارد ملی آب شرب ایران که توسط مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI) در سال ۱۳۸۸ و بر مبنای دستورالعمل سازمان بهداشت جهانی تدوین شده است نیز بر کنترل

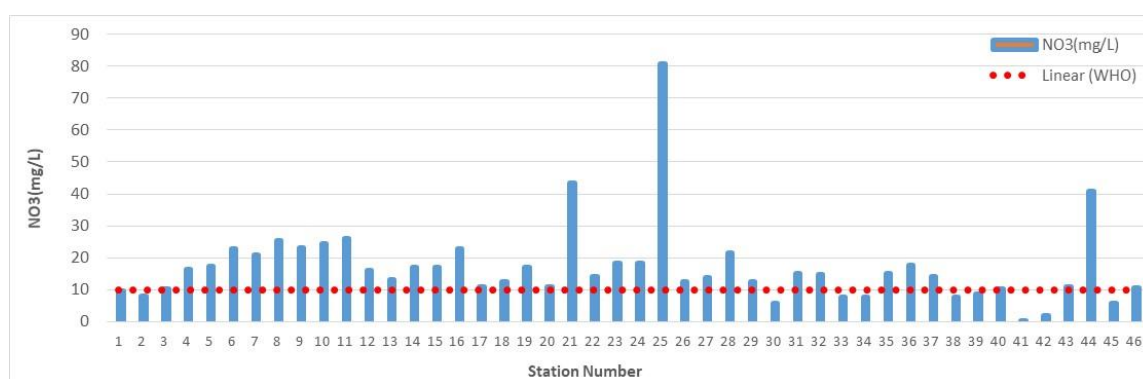


آشامیدنی، وجود نیترات است که تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی وارد منابع آبی می‌شود و موجبات خطر برای سلامتی انسان را در پی دارد. نیترات یک ماده غیر ضروری برای انسان است و افزایش بیش از حد آن اثرات نامطلوبی دارد. تحقیقات نشان داده ۹۰ درصد از نیترات ورودی به بدن انسان از طریق سبزیجات و میوه‌ها است. نیترات پس از ورود به بدن وارد براق دهان می‌شود و پس از آن، توسط فلور دهان به نیتريت تبدیل می‌شود. نیتريت حاصل از احیای نیترات معدنی و آلی پس از ورود به سیستم گردش خون آهن هموگلوبین را اکسید کرده و از ظرفیت ۲ به ظرفیت ۳ تبدیل می‌کند که در نتیجه، هموگلوبین به متهموگلوبین (تبدیل ظرفیت اکسیژن‌رسانی بسیار کمتری از هموگلوبین) دارد و در نتیجه، به بافت‌ها اکسیژن کافی نمی‌رسد و بعد از مدتی رنگ پوست (در ناحیه دور چشم و دهان) به تیرگی می‌گراید و از این‌رو به آن سندرم طفل آبی (BlueBaby) می‌گویند. این عارضه اولین نشانه مسمومیت با نیترات است و نوزادان کمتر از شش ماه آسیب‌پذیرترین گروه سنی در این مورد هستند، زیرا نوزادان به خلاف بزرگسالان علاوه بر اسیدیتة زیاد معده و زیادی باکتری‌های طبیعی احیا کننده نیترات فاقد آنزیم برگشت‌دهنده متهموگلوبین به هموگلوبین هستند. از دیگر علائم افزایش متهموگلوبین می‌توان به سردرد خواب‌آلودگی و اشکال در تنفس اشاره کرد. نیترات همچنین باعث سرطان به‌ویژه سرطان معده می‌شود. همچنین، در افراد سالمند که به دلایلی سیستم آنزیمی آنها صدمه دیده، ممکن است عوارض شدیدتری را به دنبال داشته باشد. همچنین، زنان باردار نیز جزء گروه پرخطر برشمرده می‌شوند [۴۰]. بر این اساس، برای تعیین مقدار مجاز نیترات در آب بدون ایجاد اثر سوء، مطالعات مختلفی نشان دادند که سطح غلظت نیترات در آب بدون ایجاد اثر سوء ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر است [۴۱]. طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی، غلظت نیترات در آب شرب نباید از ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر بیشتر نباشد [۱۸]. وجود فلوراید در آب بسیار مهم بوده و مقدار آن از ۱ تا ۴۶ نقطه نمونه برداری است.

۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر در آب آشامیدنی برای سالم نگه داشتن لثه و مینای دندان ضروری است. اگر غلظت فلوراید از ۱/۷ میلی‌گرم بر لیتر فراتر رود، اثر مسموم‌کنندگی دارد و از مضرات فلوراید می‌توان به خشکی مفاصل، ناهنجاری‌های اسکلتی، خطر ابتلا به سرطان، آسیب‌های ژنتیکی، تیروئید و آسیب عملکرد سیستم عصبی در انسان را نام برد. البته، عوارض جانبی ایجادشده توسط آن به مقدار مصرف آب آلوده به صورت روزانه، وزن بدن فرد، و توانایی بدن را برای فیلتر کردن و از بین بردن مواد شیمیایی وابسته است. براساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی، حد مجاز فلوراید در آب آشامیدنی ۱/۵ میلی‌گرم در لیتر است [۴۲]. از مهم‌ترین اثرات سوء آرسنیک می‌توان به ناراحتی‌های عصبی، ایجاد زخم روی پوست و ابتلا به سرطان‌ها اشاره کرد. آرسنیک عملکرد سلول ایمنی را مختل می‌کند و با توجه به اینکه آرسنیک عنصری غیرضروری و سمی در بدن است؛ نمی‌توان استاندارد، حد طبیعی و یا مرجعی برای آن مشخص کرد. سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA) حداکثر مجاز غلظت آرسنیک در آب آشامیدنی را ۱۰ میکروگرم بر لیتر مشخص کرده‌اند. بر پایه استاندارد ملی ایران نیز حداکثر مجاز غلظت آرسنیک در آب آشامیدنی ۱۰ میکروگرم بر لیتر تعیین شده است. با بیان این اثرات سوء برای پارامترهای دخیل در ارزیابی کیفیت آب شرب دشت مرنده می‌توان گفت که نیترات جزء تأثیرگذارترین پارامتر بر آب شرب و در نتیجه آن، سلامت اهالی منطقه است، به طوری که با توجه به نتایج آنالیزها میزان آلودگی نیترات دشت مرنده در برخی مناطق دشت بیشتر از ۸ برابر استاندارد سازمان بهداشت جهانی گزارش شده است که شکل ۲ مقایسه این آنومالی‌ها را با مقادیر استاندارد سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد. در شکل ۲ خط‌چین قرمز رنگ بیانگر حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای نیترات و نمودارهای میله‌ای مقادیر اندازه‌گیری شده این عنصر در

جدول ۱. اطلاعات آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی و مقایسه با مقادیر آستانه استاندارد

مشخصه	واحد	حداقل	حداکثر	متوسط	واریانس	انحراف معیار	ISIRI	WHO
pH	-	6.40	8.6	7.8	0.23	0.48	7.5	6.5-9
EC	µs/cm	389	5360	1732.6	1619134	1272	500	1000
HCO <sub>3</sub>	mg/L	176.84	945.2	343.5	28562	169.0	800	-
CL	mg/L	14.18	1240.8	318.9	115578	339.9	400	250
SO <sub>4</sub>	mg/L	12.08	512.1	137.4	11639	107.8	400	250
NO <sub>3</sub>	mg/L	0.05	80.9	16.7	162	12.7	50	10
F	mg/L	0.43	1.5	0.8	0.06	0.2	4	1.5
Ca	mg/L	16.83	472.8	94.9	7863	88.7	300	300
Mg	mg/L	4.86	184.7	52.8	1778	42.2	200	30
Na	mg/L	11.50	609.2	190.7	22661	150.5	250	200
K	mg/L	1.56	15.2	5.6	12.4	3.5	12	12
As	mg/L	0	0.03	0.004	0.00004	0.01	0.01	0.01
TH	(mg/L.CaCO <sub>3</sub> )	64	1940	454	148888	386	150	150



شکل ۳. مقادیر نیترات موجود در منابع آب دشت مرند در مقایسه با استاندارد سازمان بهداشت جهانی

## یافته‌ها

این فرایند شامل تغییر مکانی اندازه‌گیری‌ها و تبدیل‌های چندباره داده‌های کیفیت آب زیرزمینی به صورت یک مقدار رتبه‌بندی شاخص کیفیت آب زیرزمینی است.

در گام نخست نقشه‌های رستری ۱۳ مؤلفه کیفی اندازه‌گیری‌شده با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ ساده در محیط ArcGIS 10.5 برای خردادماه ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ جداگانه تهیه شدند. سپس، برای اینکه داده‌های متفاوت دارای یک مقیاس و معیار مشترک شوند، با استفاده از رابطه ۱ غلظت‌های هر پیکسل (Ci) در نقشه‌های رستری تهیه شده و با مقدار استاندارد WHO (جدول ۲) در نرم‌افزار ArcGIS ارتباط داده شد (رابطه ۱).

$$C = \frac{X - C_{WHO}}{X + C_{WHO}} \quad (1)$$

نتیجه این یکسان‌سازی مقیاس‌ها، تولید نقشه جدید است که ارزش پیکسل‌های آنها بین -۱ و ۱ تغییر

می‌کند. هر چه ارزش‌های هر پیکسل در نقشه‌های حاصل از یکسان‌سازی مقیاس‌ها برای هر متغیر، به ۱- نزدیک‌تر باشند، نشانه آلودگی کمتر و هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشند، نشانه آلودگی بیشتر آن متغیر در منطقه است.

در مرحله بعد نقشه‌های حاصل از یکسان‌سازی مقیاس‌ها برای هر متغیر به یک نقشه رتبه‌بندی با محدوده بین ۱ تا ۱۰ تبدیل شد. در این نقشه‌ها رتبه ۱ نشان‌دهنده کیفیت خوب آب زیرزمینی و رتبه ۱۰ بیانگر کیفیت بد آب زیرزمینی است. در واقع، در این تبدیل واحد باید مقدار ۱- در نقشه تولیدشده در مرحله پیش به ۱ در نقشه رتبه‌بندی‌شده و همچنین، مقادیر صفر به ۵ و ۱ به ۱۰ در نقشه رتبه‌بندی‌شده تغییر کند. به این‌منظور، از رابطه ۲ که یک تابع چندجمله‌ای است، برای تبدیل واحد هر پیکسل نقشه (C) به مقدار جدید (r) استفاده شد [۱۹]:

$$r = 0.5 \times C^2 + 4.5 \times C + 5 \quad (2)$$

به منظور ایجاد یک نقشه که نماینده همه ۱۳ متغیر



زیرزمینی و مقدار رتبه‌بندی میانگین نقشه رتبه‌بندی آن است. پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر کیفیت آب‌های زیرزمینی (میزان میانگین بالا) دارند، در ارزیابی کلی کیفیت آب زیرزمینی مهم‌ترند. در نهایت، با تقسیم حاصل ضرب رتبه هر پارمتر در وزن میانگین آن بر تعداد کل پارامترها، شاخص کیفیت آب زیرزمینی با محدوده مقدار شاخص بین صفر تا ۱۰۰ به دست آمد. مقادیر نزدیک به عدد ۱۰۰ نشان‌دهنده کیفیت مطلوب هستند. همچنین، مقادیر نزدیک به صفر کیفیت نامطلوب را نشان می‌دهند [۴۴]. بعد از محاسبه شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) برای هر دو دوره نقشه‌های این شاخص بر اساس جدول ۲ طبقه‌بندی و نقشه‌های GQI بر اساس جدول ۳ پهنه‌بندی شد. در این جدول با افزایش درجه مقادیر GQI افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۴ و ۵ نقشه‌های پهنه‌بندی آب زیرزمینی دشت مرند از نظر شاخص GQI به ترتیب در خردادماه ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد.

شیمیایی است و کیفیت آب زیرزمینی را از نظر کمی در مقایسه با استاندارد WHO نشان دهد با استفاده از رابطه شاخص GQI (رابطه ۳) لایه‌های مربوط به متغیرها تلفیق شدند.

$$GQI = 100 - \left( \frac{r_1 w_1 + r_2 w_2 + \dots + r_n w_n}{n} \right) \quad (3)$$

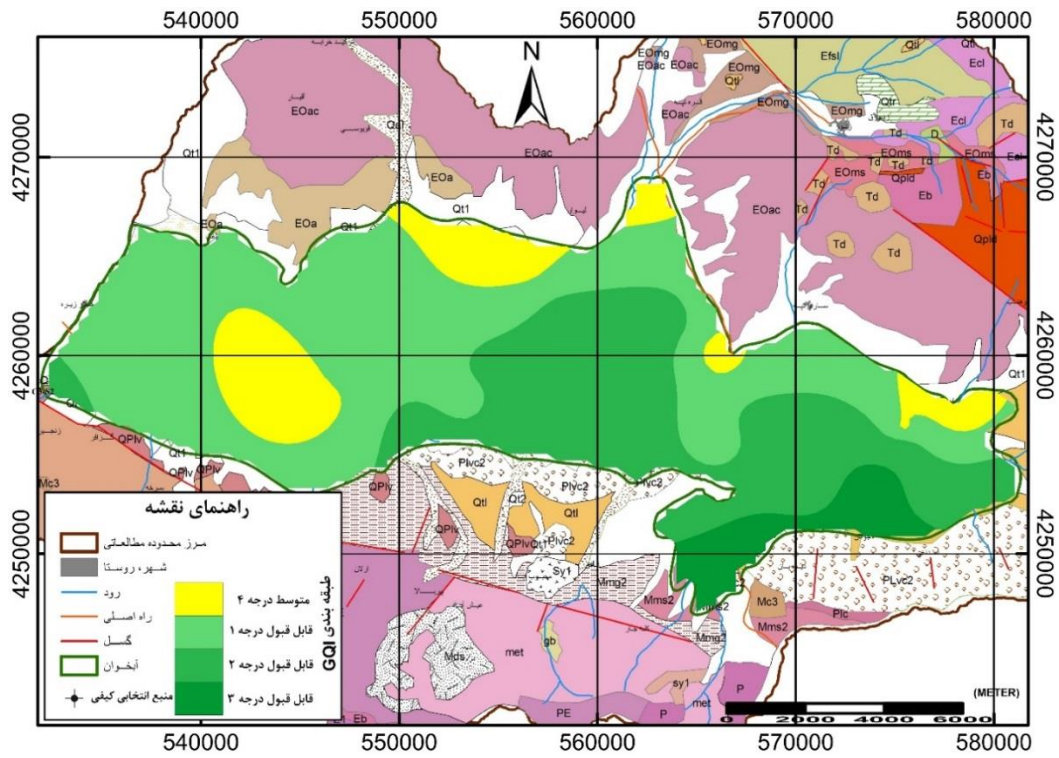
در این فرمول  $r$  رتبه هر پیکسل از نقشه‌های رتبه‌بندی شده و  $w$  وزن نسبی هر یک از این متغیرها است که برابر با مقدار میانگین غلظت متغیر پیکسل‌ها در نقشه رتبه‌بندی شده آن متغیر ( $r$ ) و  $n$  تعداد پارامترهای مورد مطالعه است. برای محاسبه GQI در واقع از متغیرهای مختلف میانگین وزنی گرفته می‌شود که متغیرهای با مقدار بیشتر (تفاوت بیشتر با استاندارد) وزن نسبی بیشتر و در نتیجه، تأثیرگذاری بیشتری دارند [۴۳]. رابطه شاخص کیفیت آب زیرزمینی نشان‌دهنده ترکیب خطی میانگین فاکتورها است. وزن مختص هر پارامتر بیان‌کننده اهمیت نسبی آن پارامتر در آب

جدول ۲. تقسیم‌بندی کیفیت آب بر پایه GQI [۱۹]

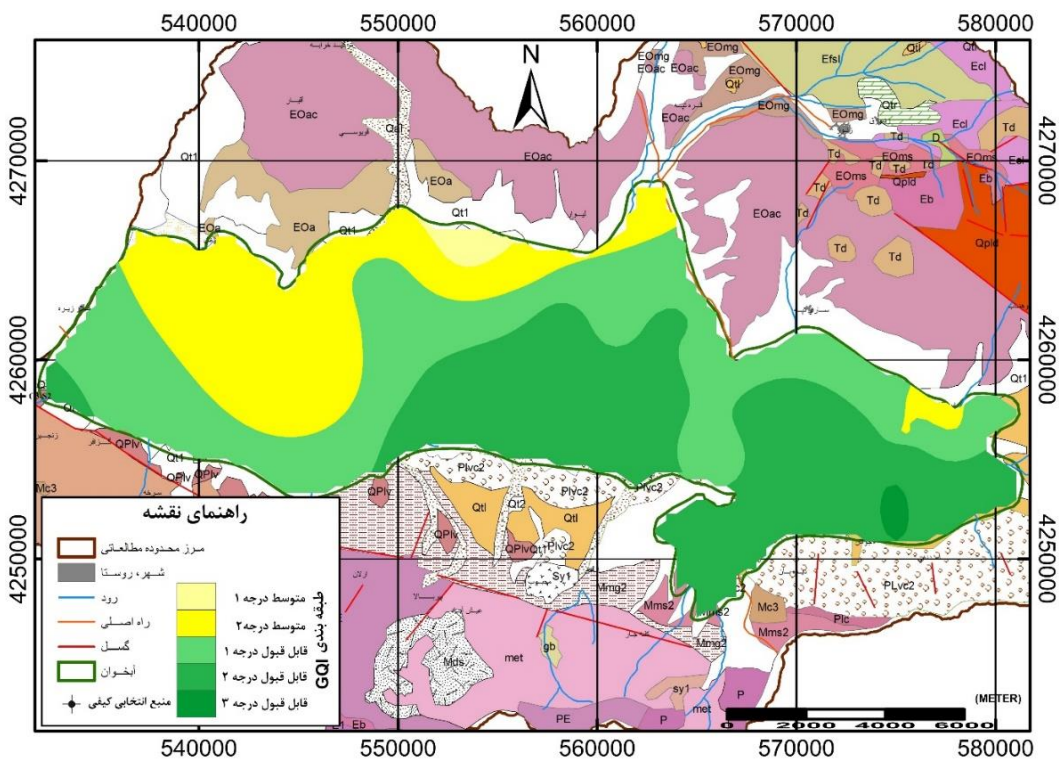
کیفیت آب	پایین	ضعیف	متوسط	قابل قبول	مناسب
GQI	۲۵-۰	۵۰-۲۶	۷۰-۵۱	۹۰-۷۱	۱۰۰-۹۱

جدول ۳. تقسیم‌بندی کیفیت آب تدقیق شده بر پایه GQI

کیفیت آب	پایین					ضعیف				
	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
GQI	۱-۵	۶-۱۰	۱۱-۱۵	۱۶-۲۰	۲۱-۲۵	۲۶-۳۰	۳۱-۳۵	۳۶-۴۰	۴۱-۴۵	۴۶-۵۰
کیفیت آب	متوسط					قابل قبول			مناسب	
	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
GQI	۵۱-۵۵	۵۶-۶۰	۶۱-۶۵	۶۶-۷۰	۷۱-۷۵	۷۶-۸۰	۸۱-۸۵	۸۶-۹۰	۹۱-۹۵	۹۶-۱۰۰



شکل ۴. پهنه بندی آب زیرزمینی دشت مرند از نظر شاخص GQI در خردادماه ۱۳۹۳

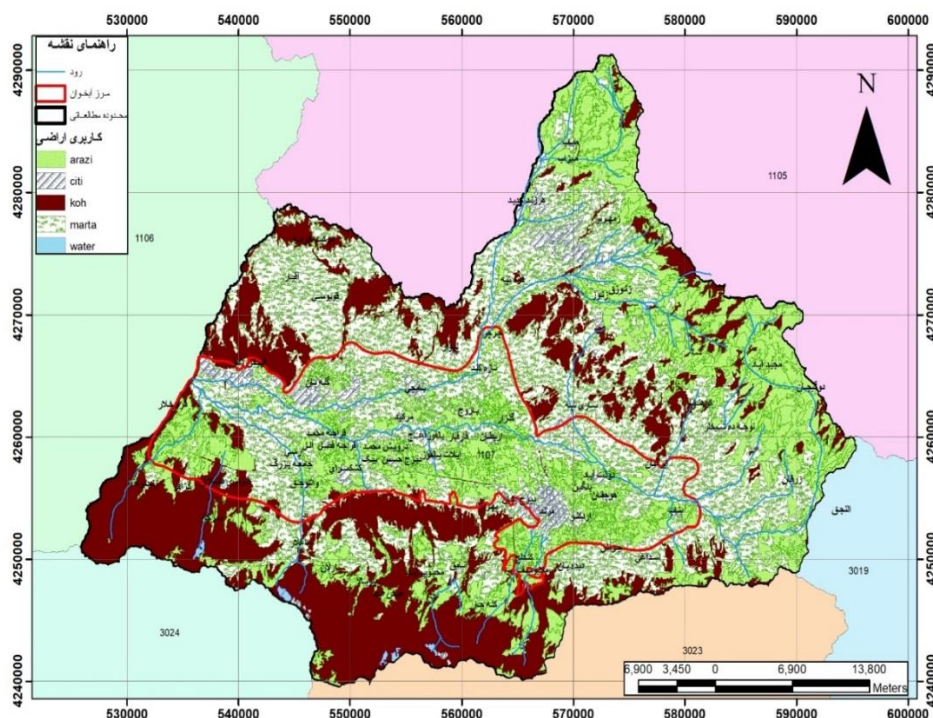


شکل ۵. پهنه بندی آب زیرزمینی دشت مرند از نظر شاخص GQI در خردادماه ۱۳۹۸

نجیب و همکاران: ارزیابی تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مرند با استفاده از روش ترکیب غیرنظارت شده ... ۱۰۷۱

شاخص GQI با نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۹۸ مشاهده می‌شود مناطق با کاربری اراضی کشاورزی با مناطقی که از لحاظ شاخص GQI در کلاس قابل قبول درجه ۲ و ۳ و همچنین، مناطق با کاربری مراتع با مناطقی که در کلاس متوسط درجه ۱ و ۲ تطابق کاملی دارند.

برای بررسی تأثیر کاربری اراضی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و مقایسه آن با نقشه‌های GQI، نقشه کاربری اراضی سال ۱۳۹۸ از نقشه پایه کاربری اراضی تهیه شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع، تهیه شد (شکل ۶). با مقایسه نقشه پهنه‌بندی آب زیرزمینی دشت مرند از نظر



شکل ۶. نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی مرند در سال ۱۳۹۸

دشت مرند است. نقشه‌های شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) بعد از محاسبه با استفاده از جدول‌های ۲ و ۳ طبقه‌بندی شد. نتایج حاصل از طبقه‌بندی سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. با توجه به نقشه خردادماه ۱۳۹۸ میزان شاخص GQI از شرق دشت به طرف شمال و شمال غرب کاسته شده و کیفیت آب زیرزمینی نیز کاهش یافته است. مقایسه نقشه‌های شاخص GQI در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد در سال ۱۳۹۳ فقط بخشی از شرق و غربی و مناطقی شمالی دشت در کلاس متوسط (شاخص GQI کمتر از ۷۰) و باقی آن در کلاس‌های چهارگانه قابل قبول قرار می‌گیرد، اما در سال ۱۳۹۸ نه تنها بخشی از شرق، بلکه نواحی شمالی و شمال غربی دشت نیز در کلاس متوسط (شاخص GQI کمتر از ۷۰) قرار می‌گیرد و از وسعت مناطق با کلاس قابل قبول کاسته شده است.

جدول ۳ میانگین مقدار و نقشه رتبه‌بندی (r) هر سیزده پارامتر مورد بررسی و میانگین شاخص GQI را برای خردادماه ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. همچنین، در این جدول استانداردهای WHO آورده شده است. غلظت یون‌ها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر است. نتایج جدول یادشده نشان می‌دهد میانگین پارامترهای بی‌کربنات، کلسیم، کلر، فلوراید، سختی و pH طی دوره پنج‌ساله افزایشی داشته‌اند که باعث افزایش میانگین نقشه رتبه‌بندی (r) آنها و تأثیر منفی بر شاخص GQI می‌شود. سولفات، سدیم، منیزیم و به مقدار خیلی کم هدایت الکتریکی پارامترهایی هستند که در این طی این دوره پنج‌ساله کاهش یافته و این کاهش اثر مثبتی بر روند تغییرات شاخص GQI گذاشته است. در کل، روند تغییرات میانگین شاخص GQI منفی بوده که نشان‌دهنده کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی در

جدول ۴. اطلاعات آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی و مقایسه با مقادیر آستانه استاندارد

ماه - سال	عنوان	pH	EC (µS/cm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	F (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	As (mg/L)	TH	GOI
خرداد ماه ۱۳۹۳	میانگین مقدار میانگین رتبه‌بندی r	7.4	1771	262.4	307	162.2	17.35	0.26	74.1	55.17	197	8.12	0.012	411	74.4
		4.97	5.78	3.2	4.6	3.7	2.6	2.05	2.36	5.7	4.4	3.9	4.75	6.7	-
خرداد ماه ۱۳۹۸	میانگین مقدار میانگین رتبه‌بندی r	7.8	1732	343.5	319	137.4	16.7	0.83	94.9	52.8	191	5.6	0.008	454	73.9
		5.09	5.69	3.7	4.5	3.45	2.75	3.7	2.6	5.58	4.4	3.28	4.017	6.7	-
	استاندارد (WHO)	7.5	1000	600	250	250	50	1.5	300	30	200	12	0.01	150	-

q: رتبه کیفی که از طریق فرمول ۵ محاسبه می‌شود:

$$q = \left[ \left\{ \frac{V_{actual} - V_{ideal}}{V_{standard} - V_{ideal}} * 100 \right\} \right] \quad (5)$$

$V_{actual}$ : آن میزان پارامتر کیفی آب که با آنالیز آزمایشگاهی به دست می‌آید.

$V_{ideal}$ : آن مقدار پارامتر کیفی آب که می‌توان از جدول‌های استاندارد به دست آورد. این مقدار برای pH برابر ۷ و برای سایر پارامترهای کیفی آب صفر است.

$V_{standard}$ : استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای پارامترهای کیفی آب.

در این پژوهش پارامترهای دخیل در محاسبه عبارت است از: pH، TH،  $Na^+$ ،  $K^+$ ،  $Ca^{+2}$ ،  $Mg^{+2}$ ،  $SO_4^{-2}$ ،  $Cl^-$ ،  $HCO_3^{-3}$ ،  $NO_3^{-3}$ ، EC، As،  $F^-$ .

بعد از محاسبه شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) برای هر دو دوره نقشه‌های این شاخص بر اساس تقسیم‌بندی جدول ۵ طبقه‌بندی شده و نقشه‌های GWQI بر اساس جدول ۶ پهنه‌بندی شد. در این جدول با افزایش درجه مقادیر GWQI افزایش می‌یابد. شکل‌های ۷ و ۸ نقشه‌های پهنه‌بندی آب زیرزمینی دشت مرند از نظر شاخص GWQI به ترتیب در خردادماه ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد.

شاخص GWQI از کاربردی‌ترین شاخص‌ها در بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر آشامیدن است که پارامترهای مختلف را با یکدیگر تلفیق و با معیارهای جهانی مثل استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) ارتباط می‌دهد. برای محاسبه شاخص GWQI به هریک از پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی، با توجه به نقش و درجه اهمیت تأثیر، عامل وزنی (wi) بین ۱- ۵ اختصاص داده می‌شود [۴۵]. برای محاسبه شاخص GWQI ابتدا باید وزن هر یک از شاخص‌های کیفی آب را مشخص و سپس، از طریق رابطه ۴ مقدار شاخص را برای هر چاه تعیین کرد. جدول ۵ وزن هر یک از شاخص‌های مؤثر بر محاسبه شاخص GWQI را نشان می‌دهد. میزان وزن‌های نسبی هر پارامتر مقادیر تجربی بوده که با توجه به اهمیت هر ترکیب از طریق قضاوت مهندسی براساس مطالعات پیشین [۴۶] و نظر متخصصان حوضه کیفیت آب شرب [۴۷] به دست آمده است. در روشی که توسط Chander Kumar و همکاران برای به دست آوردن شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی ارائه شده است، فرمول ۴ برای محاسبه GWQI استفاده شده است [۴۸]:

$$GWQI = Anti \log[\sum w \log_{10} q_n] \quad (4)$$

W: ضریب وزنی که مطابق با جدول‌ها به دست می‌آید.



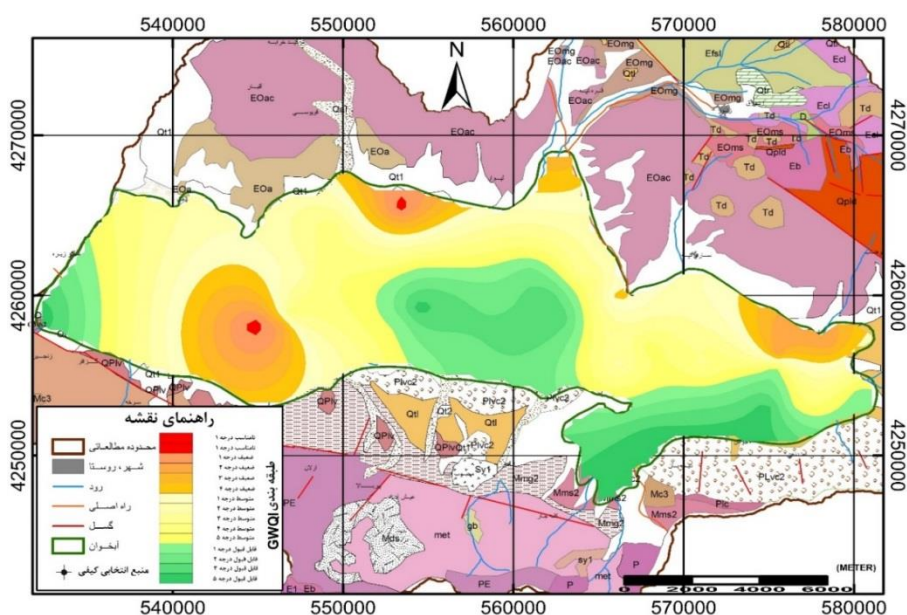
نجیب و همکاران: ارزیابی تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مرنده با استفاده از روش ترکیب غیرنظارت شده ... ۱۰۷۳

جدول ۵. مقادیر استاندارد و وزن‌های اختصاص یافته به هر پارامتر و طبقه‌بندی رده‌های کیفیت منابع آبی از لحاظ شرب (بر مبنای شاخص GQI و GWQI)

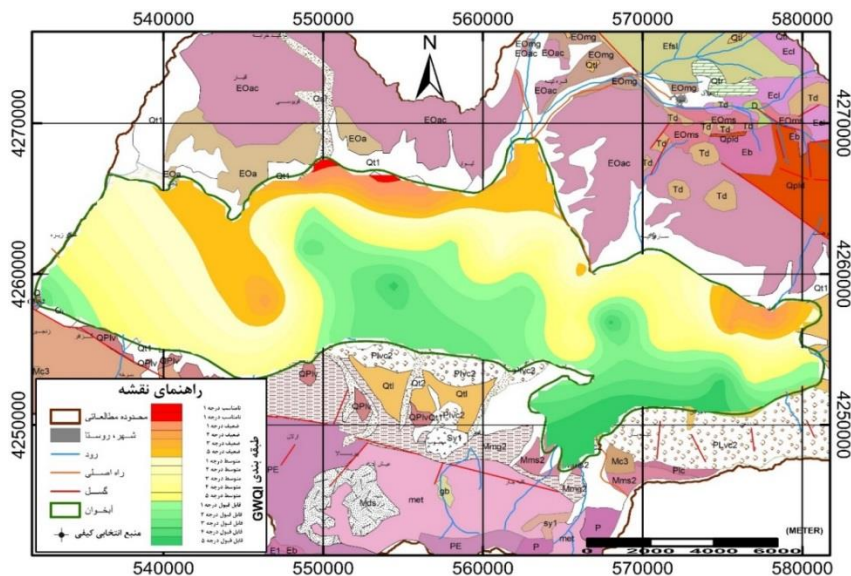
Parameter	ISIRI	WHO standard	GWQI		GQI
			Weight Factor	Relative weight (wi)	Weight
pH	7.5	6.5 - 9	2	0.061	7.08
Na <sup>+</sup>	250	200	3	0.091	4.56
K <sup>+</sup>	12	12	1	0.03	5.46
Ca <sup>+2</sup>	300	300	2	0.061	4.76
Mg <sup>+2</sup>	200	30	2	0.061	3.54
TH	150	150	1	0.03	8.08
As	0.01	0.01	5	0.151	7
Cl <sup>-</sup>	400	250	3	0.091	4.22
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	800	600	2	0.061	5.52
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	400	250	2	0.061	4.22
F <sup>-</sup>	4	1.5	2	0.061	6.7
EC	500	1000	3	0.091	7.74
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50	10	5	0.15	10
<b>Total weight</b>			<b>33</b>	<b>1</b>	<b>-</b>
GQI	0 - 25	26 - 50	51 - 70	71 - 90	91 - 100
	Water unsuitable for drinking	Very poor water	Poor water	Good water	Excellent water
GWQI	0 - 25	25 - 50	50 - 75	75 - 100	100 <
	Excellent water	Good water	Poor water	Very poor water	Water unsuitable for drinking

جدول ۶. تقسیم‌بندی کیفیت آب تدقیق شده بر پایه GWQI

کیفیت آب	مناسب					قابل قبول					
	۵	۴	۳	۲	۱	۵	۴	۳	۲	۱	
GWQI	۵-۱	۱۰-۵	۱۵-۱۰	۲۰-۱۵	۲۵-۲۰	۳۰-۲۵	۳۵-۳۰	۴۰-۳۵	۴۵-۴۰	۵۰-۴۵	
کیفیت آب	متوسط					ضعیف					پایین
	۵	۴	۳	۲	۱	۵	۴	۳	۲	۱	۱
GWQI	۵۵-۵۰	۶۰-۵۵	۶۵-۶۰	۷۰-۶۵	۷۵-۷۰	۸۰-۷۵	۸۵-۸۰	۹۰-۸۵	۹۵-۹۰	۱۰۰-۹۵	بیش از ۱۰۰



شکل ۷. پهنه‌بندی آب زیرزمینی دشت مرنده از نظر شاخص GWQI در خردادماه ۱۳۹۳



شکل ۸. پهنه‌بندی آب زیرزمینی دشت مرند از نظر شاخص GWQI در خردادماه ۱۳۹۸

$$X_{norm} = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (7)$$

در رابطه یادشده  $X_{norm}$  شاخص کیفیت نرمال‌شده،  $X_i$  شاخص کیفیت و  $X_{max}$  و  $X_{min}$  به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین میزان شاخص کیفیت را نشان می‌دهد. برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از روش‌های به کاررفته در ارزیابی کیفیت آب شرب محدوده مطالعه‌شده، از داده‌های غلظت نیترات استفاده شد. به این منظور، مقادیر پارامتر نیترات با بیشترین آلاینده‌گی و تأثیرگذار بر کیفیت آب شرب و به تبع آن، مؤثر بر سلامت ساکنان تقسیم‌بندی و سپس، تعداد چاه‌هایی که مقادیر آنومالی آنها با نقشه‌های شاخص‌ها و روش ترکیب غیرنظارت‌شده دارای ارزش یکسانی است و در یک گروه قرار می‌گیرد، به عدد ۴ ضرب شد. آن تعداد از چاه‌هایی که مقادیر آنومالی‌های تأثیرگذار بر سلامت افراد و رده کیفیت آب زیرزمینی آن به مقدار ۱، ۲ و ۳ اختلاف دارند، به ترتیب در اعداد ۳، ۲ و ۱ ضرب می‌شوند. سپس، مقادیر حاصل با هم جمع بسته می‌شود و شاخص همبستگی (CI) قابل محاسبه است که همبستگی بین نقشه‌های کیفیت آب شرب و مقادیر آنومالی‌ها را نشان می‌دهد [۴۹]. (CI) بالاتر به معنای همبستگی بیشتر است. در پژوهش حاضر نتایج نشان داد GWQI ضریب همبستگی بیشتری با میانگین مقادیر آنومالی (نیترات) دارد که نشان‌دهنده انطباق بیشتر این آنومالی با نقشه کیفیت آب است و درصد رده‌های

با توجه به نقشه خردادماه ۱۳۹۸ میزان شاخص GWQI از شرق و جنوب و بخشی از جنوب غربی دشت به طرف شمال و شمال غرب کاسته شده و کیفیت آب زیرزمینی نیز کاهش یافته است. مقایسه نقشه‌های شاخص GWQI در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد در سال ۱۳۹۸ وسعت مناطقی از دشت به‌ویژه در مناطق شمالی و شمال غرب با درجه ضعیف و نامناسب نسبت به سال ۱۳۹۳، افزایش درخور توجهی مطابق شکل‌های ۷ و ۸ دارد که نشان‌دهنده کاهش کیفیت آب طی ۵ سال اخیر است.

روش ترکیب غیرنظارت‌شده نوعی روش میانگین‌گیری وزنی ساده است که با تجمیع نتایج ۲ شاخص GWQI و GQI می‌توان از مزایای هر دو روش بهره برد. برای انجام روش ترکیب غیرنظارت‌شده باید توزیع مکانی نتایج هر دو روش در بازه یکسانی تغییر کند. به این منظور، نتایج روش‌ها بین بازه صفر و یک نرمال‌سازی شد. ترکیب نتایج حاصل از ۲ روش با رابطه ۶ و نرمال‌سازی داده‌ها با رابطه ۷ انجام شده است:

$$\text{Unsupervised Method} = \frac{CI_{As-NO3} \times GQI + CI_{As-NO3} \times GWQI}{\sum CI_i} \quad (6)$$

در رابطه یادشده GWQI و GQI شاخص کیفیت آب زیرزمینی،  $CI_i$  شاخص همبستگی بین داده‌های نیترات و آرسنیک با نقشه‌های نهایی هر دو شاخص است. روش ترکیبی غیرنظارت‌شده ترکیب نتایج هر دو شاخص GQI و GWQI را نشان می‌دهد (رابطه ۷).

آنومالی‌ها تعیین می‌شود. به بیان دیگر، روشی که شاخص همبستگی بیشتری دارد، بیشترین وزن به آن اختصاص یافته که در پژوهش حاضر به GWQI با داشتن بالاترین CI، بیشترین وزن اختصاص یافت که از مجموع ضرب وزن‌ها در شاخص کیفیت مختص هر روش، تقسیم بر مجموع وزن‌ها، شاخص کیفیت روش ترکیب غیرنظارت شده تعیین می‌شود، i بیانگر موقعیت تعداد سلول‌ها است. نقشه ترکیبی شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی در خردادماه ۱۳۹۳ و خردادماه ۱۳۹۸ توسط رابطه ۶ به دست آمد (شکل‌های ۹ و ۱۰). با توجه به نتایج به دست آمده کیفیت آب شرب محدوده مطالعه شده در ۴ رده غیرقابل شرب، خیلی ضعیف، ضعیف و خوب دسته‌بندی شده است و خروجی روش ترکیب غیرنظارت شده همبستگی بیشتری (CI) نسبت به GWQI و GQI دارد. مقایسه نقشه‌های شاخص کیفیت آب شرب منطقه مطالعه شده در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد در سال ۱۳۹۸ وسعت مناطقی از دشت به‌ویژه در مناطق شمالی و شمال غرب با درجه ضعیف و نامناسب نسبت به سال ۱۳۹۳، افزایش درخور توجهی را مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد نشان‌دهنده کاهش کیفیت آب طی ۵ سال اخیر است. جدول‌های ۷ و ۸ به ترتیب انطباق نقاط اندازه‌گیری آنومالی نیترات در چندین سطح با مقادیر رده‌های کیفیت نقشه‌های خروجی در خردادماه ۱۳۹۳ و خردادماه ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد.

کیفیت آب و تعداد این دسته‌بندی کیفیت‌ها در هر دو شاخص متفاوت از هم بوده و خروجی شاخص‌ها در محدوده مطالعه شده نشان‌دهنده این است که ۲ شاخص ارزیابی کیفیت آب شرب، با وجود ساختار محاسبه‌ای یکسان و داشتن تعداد پارامتر یکسان در این ارزیابی، نتایج متفاوتی را برای تعیین رده‌های کیفیت آب شرب و به‌ویژه تعیین مناطق غیرقابل شرب که حساس‌ترین بخش برای مراقبت از سلامت ساکنان منطقه است؛ ارائه می‌دهند. در نتیجه، انتخاب یکی از این دو شاخص (GQI, GWQI) با توجه به خروجی متفاوت نقشه‌های نهایی و رده‌های کیفیت، به عنوان بهترین و کاراترین شاخص ارزیابی کیفیت آب شرب محدوده مطالعه شده، منطقی به نظر نمی‌رسد. بنابراین، در ادامه پژوهش برای بهبود نتایج و تعیین دقیق‌تر مناطق غیرقابل شرب روش غیرنظارت شده که ترکیب نتایج شاخص‌های GWQI و GQI است؛ به کار گرفته شد تا از مزایای هر دو شاخص برای مشخص ساختن دقیق رده‌های کیفیت آب شرب استفاده شود. در دشت مرند روش ترکیبی پس از اینکه لایه‌های مختص به توزیع مکانی شاخص کیفیت هر دو روش تهیه و نرمال‌سازی شد؛ شاخص همبستگی بین خروجی هر دو شاخص و استاندارد مجموع داده‌های آنومالی‌ها به دست آمد. در روش ترکیب غیرنظارت شده وزن هر یک از روش‌ها، با به دست آوردن شاخص همبستگی (CI) بین نتایج

جدول ۷. انطباق نقاط اندازه‌گیری آنومالی نیترات در چندین سطح با مقادیر رده‌های کیفیت نقشه‌های خروجی در خردادماه ۱۳۹۳

روش	نیترات	کیفیت				CI
		High	Moderate	Low	Very Low	
GWQI	Good water	3	0	17	0	123
	Poor water	2	0	11	2	
	Very poor water	3	0	2	0	
	Water unsuitable for drinking	1	0	2	0	
GQI	Good water	5	0	5	0	138
	Poor water	4	0	27	2	
	Very poor water	0	0	0	0	
	Water unsuitable for drinking	0	0	0	0	

جدول ۸. انطباق نقاط اندازه‌گیری آنومالی نیترات در چندین سطح با مقادیر رده‌های کیفیت نقشه‌های خروجی در خردادماه ۱۳۹۸

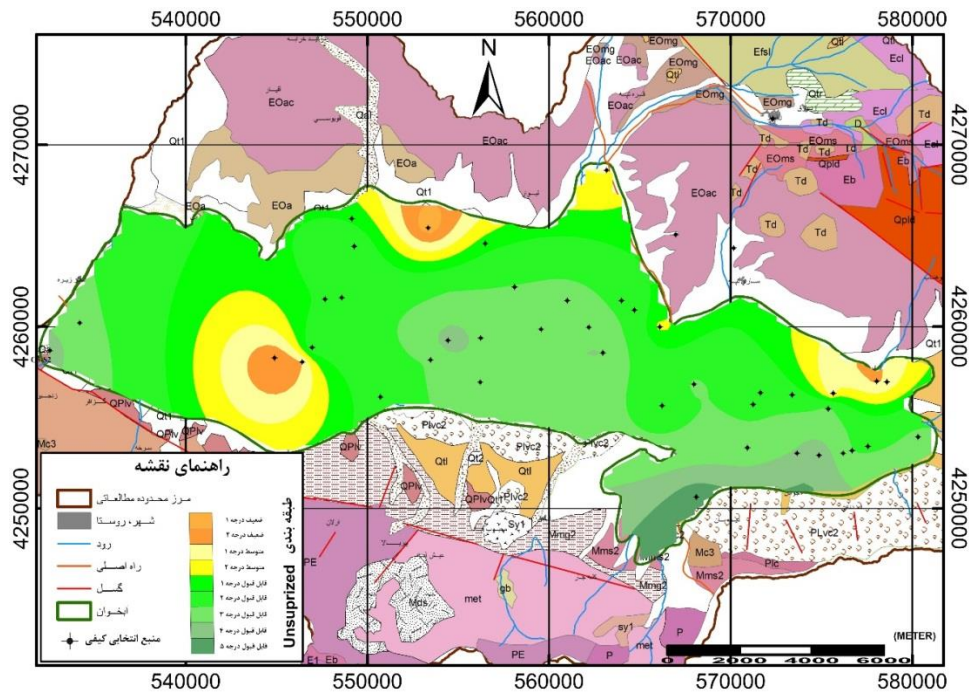
روش	نیترات	کیفیت				CI
		High	Moderate	Low	Very Low	
GWQI	Good water	0	2	14	1	126
	Poor water	1	9	3	1	
	Very poor water	1	6	5	1	
	Water unsuitable for drinking	0	0	0	0	
GQI	Good water	1	12	17	1	110
	Poor water	1	3	4	3	
	Very poor water	0	0	0	0	
	Water unsuitable for drinking	0	0	0	0	

جدول ۹. مقادیر پارامترهای استفاده شده برای ارزیابی کیفیت آب شرب در خردادماه ۱۳۹۸ و تعیین رده کیفیت ۴۶ منبع نمونه برداری با استفاده از روش ترکیب غیرنظارت شده

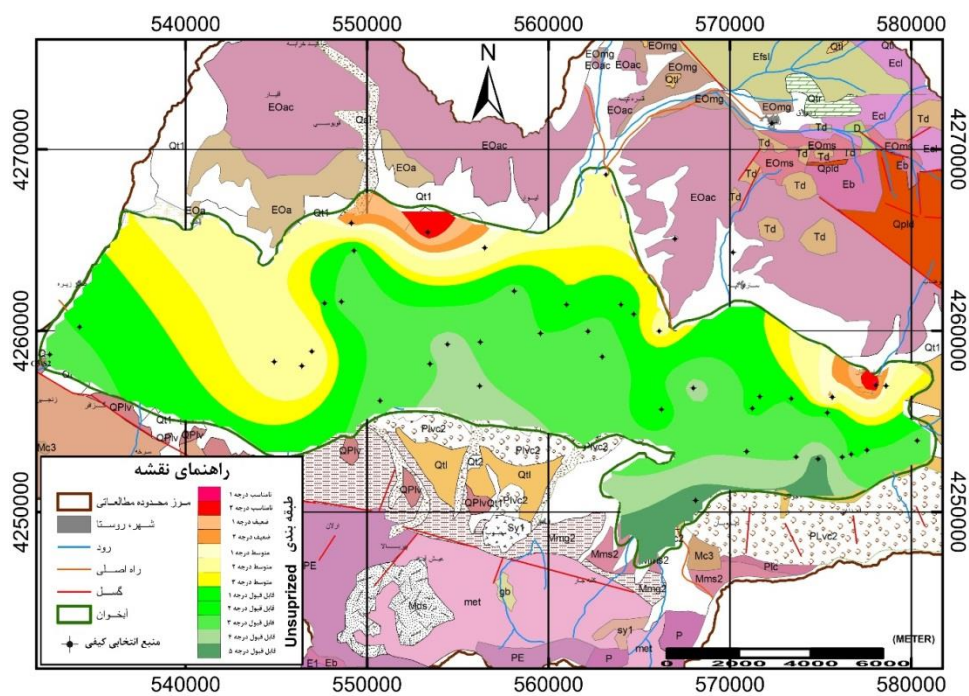
شماره ایستگاه	نام محل	X	Y	pH	EC (µS/cm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	F (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	As (mg/L)	TH	GWQI	GQI	Unsupervised method
۱	دیزج علیا	۵۶۸۱۰۶	۴۲۵۰۶۲۸	۷.۵	۸۲۹	۳۴۴.۵۴	۴۶۰.۹	۶۲.۸۰	۹.۵۷	۰.۵۴	۸۴.۱۵	۳۷.۹۲	۲۰.۶۹	۱.۵۶	۰.۰۰۰۶	۳۶۶	۲۸.۱۶	۷۹.۲۹	۹۸.۲۰
۲	اردکلو	۵۷۰۹۲۳	۴۲۵۳۳۴۴	۷.۸	۹۲۳	۴۰۵.۵۲	۶۲۰.۴	۳۸.۵۳	۸.۰۹	۰.۷۳	۶۰.۱۱	۳۶.۴۶	۷۱.۳۷	۴.۶۹	۰.۰۰۰۴	۳۰۰	۴۳.۳۱	۷۷.۳۷	۸۸.۹۴
۳	اوسدانی	۵۷۴۸۷۰	۴۲۵۲۹۲۰	۸.۲	۳۸۹	۱۸۲.۹۴	۲۱.۳۷	۱۲.۰۸	۱۰.۳۵	۰.۸۰	۱۷.۶۳	۴.۸۶	۵۷.۴۸	۳.۵۲	۰.۰۱۰۰۶	۶۴	۳۰.۶۱	۸۱.۷۲	۹۸.۰۲
۴	بناب	۵۸۰۳۳۲	۴۲۵۳۹۳۶	۸	۷۸۰	۲۲۸.۸۸	۸۸.۶۳	۷۲.۴۷	۱۶.۲۰	۰.۸۷	۶۸.۱۲	۱۴.۵۸	۷۱.۳۷	۳.۵۲	۰.۰۰۰۷۶	۳۳۰	۵۲.۲۳	۷۷.۱۸	۸۴.۱۶
۵	بناب	۵۷۷۵۵۱	۴۲۵۳۴۱۷	۷.۹	۸۵۱	۲۵۰.۰۲	۱۰۶.۳۵	۶۷.۶۳	۱۷.۳۳	۰.۸۰	۴۹.۶۹	۱۵.۵۶	۱۰.۵۷۵	۵.۰۸	۰.۰۱۱۳	۱۸۸	۵۸.۷۴	۷۶.۳۷	۸۰.۵۱
۶	بناب	۵۷۶۶۶۶	۴۲۵۳۱۸۴	۸.۶	۸۵۶	۲۲۳.۵۸	۱۰۶.۳۵	۶۷.۶۳	۲۲.۸۳	۰.۹۰	۴۹.۶۹	۱۶.۰۴	۱۰.۵۷۵	۵.۴۷	۰.۰۱۲۷	۱۹۰	۶۴.۸۷	۷۵.۶۵	۷۶.۹۰
۷	بناب	۵۷۶۱۸۷	۴۲۵۳۰۳۵	۸.۲	۵۲۱	۲۰۷.۳۴	۳۹.۰۰	۳۸.۵۳	۲۰.۷۲	۱.۲۷	۲۲.۴۴	۵۸.۳	۸۲.۷۶	۳.۹۱	۰.۰۱۷۶	۸۰	۴۷.۹۳	۷۸.۴۶	۸۷.۲۶
۸	ایرغان	۵۷۵۵۵۱	۴۲۵۳۳۳۱	۷.۹	۱۵۴۶	۲۵۶.۱۲	۳۷۷.۵۲	۲۱۹.۸۱	۲۵.۴۴	۱.۰۶	۶۴.۹۱	۳۰.۱۴	۲۲.۷۰	۴.۳۰	۰.۰۰۰۹۶	۲۸۶	۸۶.۰۱	۷۲.۲۵	۶۴.۰۴
۹	ایرغان	۵۷۵۶۴۷	۴۲۵۳۳۳۱	۷.۴	۳۱۶۰	۴۷۵.۵۵	۷۵۳.۳۱	۱۲۰.۷۸	۲۳.۱۱	۱.۱۸	۱۱۶.۲۰	۷۵.۳۵	۴۴۱.۴۱	۱۲.۵۱	۰.۰۱۰۵	۶۰۰	۱۲۰.۴۴	۶۷.۲۶	۴۳.۳۳
۱۰	ایرغان	۵۷۸۶۰۱	۴۲۵۳۹۵۱	۷.۵	۲۴۵۰	۳۹۶.۳۸	۵۷۶.۰۶	۸۲.۳۰	۲۴.۲۴	۰.۷۵	۴۸.۰۸	۵۱.۰۴	۴۰.۴۶۲	۱۱.۳۴	۰.۰۰۸۶	۳۳۰	۹۶.۲۰	۷۰.۲۱	۵۷.۶۵
۱۱	ایرغان	۵۷۸۰۴۹	۴۲۵۳۹۹۶	۷.۸	۳۹۱۰	۴۹۳.۹۵	۹۳۰.۵۶	۲۲۷.۰۶	۲۶.۰۸	۰.۹۵	۱۱۶.۲۰	۷۷.۷۸	۶۰.۹۳۴	۱۵.۲۵	۰.۰۱۱	۶۱۰	۱۴۲.۸۶	۶۵.۹۶	۳۰.۷۵
۱۲	هوجقان	۵۷۵۳۶۹	۴۲۵۵۴۷۶	۸.۵	۸۳۳	۱۷۶.۸۴	۱۰۹.۹۰	۹۱.۹۷	۱۶.۰۶	۰.۹۶	۳۲.۰۶	۱۱.۱۸	۱۳۱.۰۴	۳.۹۱	۰.۰۱۶	۱۲۶	۶۰.۸۲	۷۶.۷۲	۷۹.۵۶
۱۳	هوجقان	۵۷۳۶۵۸	۴۲۵۳۰۳۵	۸.۲	۵۱۶	۲۴۴.۹۲	۲۱.۳۷	۲۶.۵۷	۱۳.۱۰	۱.۱۷	۱۶.۸۳	۶.۳۳	۸۵.۰۶	۳.۱۳	۰.۰۳۳۴	۶۸	۴۴.۷۱	۷۸.۸۴	۸۹.۱۶
۱۴	دولت آباد	۵۷۱۶۴۵	۴۲۵۳۶۶۴	۸.۱	۹۵۱	۳۳۷.۸۳	۱۳۴.۷۱	۸۶.۶۹	۱۶.۹۱	۰.۸۸	۳۸.۴۷	۲۰.۴۲	۱۳۳.۳۴	۳.۱۳	۰.۰۱۱۰۵	۱۸۰	۶۲.۴۱	۷۶.۰۸	۷۸.۴۲
۱۵	دولت آباد	۵۷۳۳۸۵	۴۲۵۳۶۴۳	۸	۱۰۷۴	۳۱۹.۵۳	۱۵۹.۵۳	۱۲۵.۶۱	۱۶.۹۸	۰.۵۲	۵۹.۳۰	۱۶.۵۳	۱۴۴.۸۴	۴.۳۰	۰.۰۰۶۵۸	۲۱۶	۶۰.۲۷	۷۶.۲۱	۷۹.۶۲
۱۶	بنگین	۵۷۱۲۴۷	۴۲۵۵۷۲۱	۷.۹	۸۹۱	۲۳۷.۸۳	۱۰۶.۳۵	۹۶.۶۲	۲۲.۶۲	۰.۹۰	۴۸.۹۱	۱۷.۹۹	۱۱۱.۵۰	۵.۰۸	۰.۰۱۱۳	۱۹۶	۶۳.۹۱	۷۵.۵۶	۷۷.۳۹
۱۷	ساری تپه	۵۷۰۱۷۴	۴۲۶۴۲۱۷	۷.۱	۲۳۳۰	۴۳۲.۹۷	۳۹۸.۸۱	۱۸۸.۴۱	۱۰.۷۰	۱.۰۳	۱۰۰.۱۸	۸۷.۵۰	۲۲۷.۶۰	۴.۶۹	۰.۰۰۱۱	۶۱۰	۵۹.۲۹	۷۲.۱۲	۷۸.۲۴
۱۸	ساری تپه و دولت مزند	۵۷۶۸۳۳	۴۲۵۶۸۳۶	۸	۶۸۹	۲۲۸.۶۸	۸۱.۵۴	۳۶.۸۳	۱۲.۳۹	۰.۵۸	۳۶.۸۶	۲۷.۲۲	۶۲.۰۷	۳.۹۱	۰.۰۰۱	۲۰۴	۳۴.۰۶	۷۹.۷۷	۹۵.۲۷
۱۹	زنوز	۵۷۲۳۰۸	۴۲۷۱۴۲۰	۷.۴	۹۲۸	۵۰۹.۱۹	۱۴.۱۸	۲۴.۱۶	۱۷.۰۵	۰.۴۴	۱۲۱.۰۱	۳۲.۵۷	۱۱۵۰	۱.۹۵	۰.۰۰۵۶	۴۳۶	۳۵.۲۸	۷۷.۳۵	۹۳.۲۱
۲۰	چرچر	۵۶۳۱۷۱	۴۲۶۸۰۰۱	۷.۳	۳۱۵۰	۴۵۷.۳۶	۵۷۶.۰۶	۵۱۲.۰۹	۱۰.۷۰	۰.۶۴	۱۶۰.۲۸	۱۰۴.۵۱	۴۰.۴۶۲	۶.۲۶	۰.۰۰۲۱	۸۳۰	۸۶.۱۵	۶۹.۴۹	۶۲.۶۷
۲۱	جاده مزند - جلفا	۵۶۶۹۶۸	۴۲۶۵۰۰۹	۸.۵	۲۲۳۰	۲۱۹.۵۳	۳۹۸.۸۱	۳۳۸.۱۷	۴۳.۳۵	۱.۱۹	۱۲۰.۲۱	۶۰.۷۶	۲۵۷.۴۹	۲.۳۵	۰.۰۰۲۲	۵۵۰	۹۳.۷۹	۷۰.۱۹	۵۸.۹۲
۲۲	گلزار	۵۶۳۹۹۲	۴۲۶۱۴۳۹	۸.۶	۹۳۹	۲۱۰.۳۸	۱۲۷.۶۲	۸۶.۶۹	۱۴.۰۹	۰.۶۹	۳۰.۴۵	۱۶.۵۳	۱۴۷.۱۴	۳.۹۱	۰.۰۱۵۸	۱۴۴	۶۲.۲۳	۷۶.۴۱	۷۸.۴۶
۲۳	گلزار	۵۶۶۶۶۴	۴۲۶۰۹۲۰	۷.۹	۱۲۳۵	۳۰۴.۹۱	۱۸۰.۸۰	۱۰۶.۳۸	۱۸.۹۹	۰.۷۱	۴۶.۴۸	۳۳.۲۳	۱۸۱.۶۲	۵.۴۷	۰.۰۱۲۶	۲۱۴	۷۲.۵۰	۷۶.۲۴	۷۱.۹۳
۲۴	گلزار	۵۶۶۰۹۸	۴۲۵۹۸۵۵	۷.۵	۱۸۶۱	۵۱۸.۳۴	۲۸۷.۱۵	۹۶.۶۲	۱۸.۵۵	۰.۷۳	۷۶.۱۳	۵۱.۰۴	۳۳۹.۱۰	۷.۴۳	۰.۰۱۲۹	۴۰۰	۸۹.۴۷	۷۱.۰۱	۶۱.۶۱
۲۵	دیزج بکان	۵۶۶۳۳۳	۴۲۵۵۶۵۱	۷.۵	۱۳۸۹	۵۲۷.۴۹	۱۲۰.۵۳	۸۶.۶۹	۸۰.۸۷	۰.۸۸	۸۴.۹۵	۸۰.۶۹	۶۴.۳۷	۷.۴۳	۰.۰۰۱۶	۵۴۴	۶۸.۵۵	۷۱.۶۵	۷۳.۰۷
۲۶	ایرطان	۵۶۲۹۷۵	۴۲۵۸۵۶۴	۸.۱	۷۵۶	۳۰۴.۹۱	۶۲۰.۴	۳۸.۵۳	۱۲.۶۱	۰.۴۷	۳۶.۰۶	۳۸.۹۹	۵۷.۴۸	۱.۹۵	۰.۰۰۰۷	۲۵۰	۴۵.۶۱	۷۸.۱۳	۸۸.۳۵
۲۷	ایرطان	۵۶۲۱۸۶	۴۲۵۹۹۶۴	۸	۸۹۱	۳۰۴.۹۱	۱۰۲.۸۱	۴۸.۳۱	۱۳.۳۳	۰.۳۳	۴۴.۰۸	۳۸.۹۹	۷۸.۱۷	۳.۹۱	۰.۰۰۶۷	۲۷۰	۵۱.۵۹	۷۷.۰۶	۸۴.۶۵
۲۸	باروج	۵۶۱۰۰۴	۴۲۶۲۱۴۳	۷.۷	۱۲۸۶	۳۲۰.۱۵	۱۱۳.۵۳	۲۱.۳۵	۰.۷۳	۶۵.۷۱	۲۹.۵۵	۱۶۰.۹۳	۵۰.۸	۰.۰۱۱۶	۲۸۶	۷۵.۹۱	۷۳.۴۹	۷۰.۰۰	
۲۹	یامچی	۵۵۸۱۱۱	۴۲۶۲۱۷۷	۷.۶	۹۷۹	۳۲۹.۳۰	۱۱۵.۲۱	۵۳.۱۴	۱۲.۴۶	۰.۵۹	۴۹.۶۹	۲۱.۳۹	۱۲۴.۱۵	۴.۳۰	۰.۰۰۰۶	۲۱۲	۵۱.۹۳	۷۷.۰۳	۸۴.۶۶
۳۰	یامچی	۵۵۶۴۸۶	۴۲۶۴۵۶۵	۶.۶	۴۶۶۰	۹۴۵.۲۱	۹۷۴.۸۸	۳۱۴.۰۲	۵۵.۵	۰.۹۳	۳۳۴.۵۷	۱۷۲.۵۷	۴۳۲.۲۱	۱۴.۸۶	۰.۰۱۰۲	۱۵۲۰	۹۸.۷۹	۶۵.۱۶	۵۳.۹۲
۳۱	یامچی	۵۵۳۳۴۹	۴۲۶۵۴۳۳	۶.۴	۵۳۶۰	۹۴۵.۲۱	۱۲۴.۷۵	۳۶۷.۱۶	۱۵.۱۴	۰.۷۴	۴۷۲.۸۳	۱۸۴.۷۳	۴۳۶.۸۱	۱۴.۸۶	۰.۰۱۶۳	۱۹۴۰	۱۳۱.۷۹	۶۳.۲۵	۳۵.۳۹
۳۲	قارقال	۵۵۹۵۶۵	۴۲۵۹۸۵۲	۸	۹۵۲	۳۱۱.۰۰	۱۰۲.۸۱	۷۲.۴۷	۱۴.۷۲	۰.۸۵	۴۴.۰۸	۴۸.۶۱	۷۴.۷۲	۲.۳۵	۰.۰۰۹۳	۳۱۰	۵۸.۹۲	۷۵.۷۲	۸۰.۱۱
۳۳	یالقوز آغاج	۵۵۶۲۳۹	۴۲۵۹۳۷۱	۸.۱	۸۶۶	۲۵۰.۰۲	۹۷.۴۹	۸۶.۹۶	۷.۷۴	۰.۷۸	۴۴.۰۸	۳۴.۵۱	۸۰.۴۷	۳.۹۱	۰.۰۰۴۶	۲۵۲	۴۷.۰۶	۷۷.۵۴	۸۷.۲۹
۳۴	یالقوز آغاج	۵۵۶۲۱۲	۴۲۵۹۴۴۴	۸.۳	۷۷۵	۲۲۸.۸۸	۷۰.۹۰	۸۲.۰۹	۷.۷۴	۰.۶۷	۴۸.۰۸	۳۵.۴۹	۵۴.۰۳	۱.۹۵	۰.۰۰۳۹	۲۶۶	۴۱.۸۰	۷۸.۶۱	۹۰.۶۰
۳۵	قراجه فیض اله	۵۴۶۹۳۱	۴۲۵۸۸۵۵	۷.۸	۴۲۶۰	۵۲۷.۴۹	۱۰۶.۳۵	۱۸۸.۴۱	۱۴.۹۳	۰.۷۷	۲۴۴.۴۳	۱۲۳.۹۶	۴۵۹.۸۰	۵.۴۷	۰.۰۰۰۹	۱۱۲۰	۹۳.۵۷	۶۸.۵۸	۵۸.۲۹
۳۶	قراجه فیض اله	۵۴۶۴۱۳	۴۲۵۸۰۶۱	۷.۴	۴۴۴۰	۵۴۲.۷۳	۱۱۰.۷۸۱	۲۰.۲۹۰	۱۷.۵۴	۰.۹۸	۲۶۰.۶۶	۱۲۳.۹۶	۴۸۲.۷۹	۶.۶۵	۰.۰۰۱۲	۱۱۶۰	۹۹.۷۷	۶۹.۷۲	۵۴.۵۸
۳۷	ارسی	۵۴۴۸۹۱	۴۲۵۸۱۷۸	۷.۷	۳۳۴۰	۲۵۴.۰۷	۷۹۷.۶۳	۳۳۳.۶۸	۱۳.۹۵	۱.۲۴	۱۸۰.۳۲	۸۵.۰۷	۳۹۵.۴۳	۵.۴۷	۰.۰۰۱۵	۸۰۰	۸۹.۷۵	۶۹.۳۹	۶۰.۷۰
۳۸	زنجیره - قرخلار	۵۳۴۱۵۸	۴۲۶۰۲۰۲	۷.۹	۲۰۵۰	۴۵۴.۳۱	۳۵۴.۵۰	۱۴۴.۹۳	۷.۶۷	۰.۶۰	۴۴.۰۸	۸۹.۳۳	۲۴۳.۶۹	۱۰.۱۷	۰.۰۰۱۱۶	۴۸۰	۵۳.۳۰	۷۲.۹۸	۷۸.۶۴
۳۹	زنجیره	۵۳۲۵۲۵	۴۲۵۸۶۸۴	۸	۱۰۸۴	۲۱۹.۵۳	۱۴۱.۸۰	۱۵۴.۵۹	۸.۵۹	۰.۷۱	۶۴.۱۱	۳۸.۹۹	۹۸.۸۶	۳.۹۱	۰.۰۰۱۲	۳۲۰	۴۴.۲۵	۷۷.۰۲	۸۸.۵۵
۴۰	کشکسرای	۵۵۰۷۳۳	۴۲۵۹۱۲۸	۸.۲	۱۲۶۲	۱۸۹.۰۴	۳۳۳.۹۷	۱۴۰.۱۳	۱۰.۱۴	۰.۴۷	۶۰.۱۱	۴۱.۳۲	۱۴۰.۳۴	۳.۱۳	۰.۰۰۰۹	۳۳۰	۴۵.۹۹	۷۶.۷۹	۸۷.۵۲
۴۱	قراجه محمد	۵۴۸۵۹۰	۴۲۶۱۶۰۴	۷.۹	۲۱۰۰	۳۳۱.۷۳	۳۸۱.۰۹	۳۰۹.۱۸	۰.۰۵	۰.۹۸	۱۴۶.۶۶	۸۸.۹۶	۱۴۰.۳۴	۸.۶۰	۰.۰۱۶۷	۷۳۲	۴۴.۹۳	۷۰.۳۶	۸۵.۰۹
۴۲	قراجه محمد	۵۴۷۶۶۳	۴۲۶۱۵۰۶	۸	۳۳۶۰	۳۹۸.۸۱	۸۴۱.۹۴	۲۳۶.۷۲	۱.۶۷	۱.۰۸	۲۲۸.۴۰	۱۲۱.۵۳	۲۷۵.۸۸	۷.۴۳	۰.۰۰۲۱	۱۰۷۰	۷۰.۵۸	۶۹.۹۲	۷۱.۱۸
۴۳	گله بان	۵۴۹۲۸۳	۴۲۶۴۴۲۱	۷	۱۵۰۴	۳۳۵.۴۰	۲۴۴.۶۱	۱۲۵.۶۱	۱۰.۸۴	۰.۶۷	۹۶.۱۷	۴۴.۲۴	۱۴۷.۱۴	۶.۲۶	۰.۰۰۷۹	۴۲۲	۵۲.۹۳	۷۳.۳۷	



نجیب و همکاران: ارزیابی تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت مرند با استفاده از روش ترکیب غیرنظارت شده ... ۱۰۷۷



شکل ۹. نقشه ترکیبی شاخص کیفیت آب شرب منطقه مطالعه شده در خردادماه ۱۳۹۳



شکل ۱۰. نقشه ترکیبی شاخص کیفیت آب شرب منطقه مطالعه شده در خردادماه ۱۳۹۸

## نتایج و بحث

منطقه بالاتر از حد استاندارد است و در واقع، با توجه به ۱۳ پارامتر اندازه‌گیری شده برای منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعه شده، بیشترین آنومالی مربوط به نیترات است که این پارامتر به دلیل تأثیرگذار بودن در سلامت ساکنان منطقه بالاترین وزن اختصاصی را در تعیین

طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی از بین ۴۶ نقطه نمونه برداری شده، ۳۶ حلقه چاه آنومالی نیترات دارد که تحت تأثیر بالا بودن سطح آب زیرزمینی و فعالیت‌های کشاورزی این آلاینده بر بیشتر موقعیت‌های نمونه برداری

(۷۰) قرار می‌گیرد و بر وسعت مناطق با کلاس قابل قبول کاسته شده است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده کیفیت آب شرب محدوده مطالعه‌شده در ۴ رده غیرقابل شرب، خیلی ضعیف، ضعیف و خوب دسته‌بندی شده است و خروجی روش ترکیب غیرنظارت‌شده همبستگی بالاتری (CI) نسبت به GWQI و GQI دارد. با توجه به نتایج حاصل‌شده در خردادماه ۱۳۹۸، تعداد ۳۱ نمونه در محدوده قابل قبول، ۶ نمونه در محدوده متوسط و ۳ نمونه در محدوده ضعیف قرار می‌گیرد. مقایسه نقشه‌های شاخص کیفیت آب شرب منطقه مطالعه‌شده در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد در سال ۱۳۹۸ وسعت مناطقی از دشت به‌ویژه در مناطق شمالی و شمال غرب با درجه ضعیف و نامناسب نسبت به سال ۱۳۹۳، افزایش درخور توجهی دارد، که بیانگر کاهش کیفیت آب طی ۵ سال اخیر است.

#### منابع

- [1]. Shanmugam Packialakshmi, Ambujam N.K. A Hydrochemical and Geological Investigation on the Mambakkam Mini Watershed, Kancheepuram District, Tamil Nadu. J.Environmental Monitoring and Assessment May. 2012; 184(5):3293-306.
- [2]. Adepelumi, A., B.D.Ako, T.R.Ajayi, O. Afolabi, and E.J. Omotoso. Delineation of saltwater intrusion into the freshwater aquifer of Lekki Peninsula, Lagos, Nigeria, Environ. Geol.2009; 56,5. 927-933.
- [3]. Mosaferi, M., Shakerkhatibi, M., Dastgiri, S., Asghari Jafar-abadi, M., Khataee, A., & Sheykholeslami, S. Natural arsenic pollution and hydrochemistry of drinking water of an urban part of Iran. Avicenna Journal of Environmental Health Engineering. 2014; 1(1):164-173.
- [4]. Singh, EJ. Gupta, A. and Singh, NR. Groundwater quality in Imphal West district, Manipur,India, with multivariate statistical analysis of data. Environmental Science and Pollution Research Int. 2013; 20:2421-2434.
- [5]. Amangabara G T, Ejenma E. Groundwater quality assessment of Yenagoa and environs Bayelsa State, Nigeria between 2010 and 2011. 2012; 2(2):20-29.
- [6]. Freeze R A, Cherry J A. Groundwater. Prentice-Hall Inc New Jersey.1979.

شاخص کیفیت از آن خود می‌کنند. براساس نتایج شاخص‌های GQI و GWQI، مقدار شاخص GQI در سال ۱۳۹۸ از نظر عددی در محدوده ۶۳ تا ۸۱ تغییر می‌کند و از نظر استانداردهای آب آشامیدنی در رده کیفیت ضعیف، خوب و عالی دسته‌بندی شده‌اند. طبق نتایج شاخص GWQI هم مقادیر عددی در محدوده ۲۸ تا ۱۴۲ نوسان دارد و در ۴ رده کیفیت غیرقابل شرب، خیلی ضعیف، ضعیف و خوب قرار دارند. هر دو شاخص با توجه به نزدیک بودن سازوکار محاسبه و داشتن پارامترهای یکسان برای محاسبه هر دو شاخص، نتایج متفاوتی ارائه دادند که انتخاب یکی از این دو را به عنوان شاخص برتر در ارزیابی کیفیت آب شرب دشت مرند با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین، در ادامه پژوهش با معرفی و به کار گرفتن روش ترکیب غیرنظارت‌شده نتایج قابل قبول‌تری حاصل شد که با توجه به صحت‌سنجی انجام‌شده این نتیجه تأیید شده است. در واقع، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه شاخص GQI، GWQI و روش ترکیب غیرنظارت‌شده بهترین انتخاب برای تعیین رده‌های کیفیت آب شرب منطقه، روش ترکیب غیرنظارت‌شده است. جدول ۹ نتایج خروجی شاخص‌ها و روش ترکیب غیرنظارت‌شده را به همراه رده‌های کیفیت آب برای هر منبع نمونه‌برداری و غلظت ۱۳ پارامتر مورد بررسی در این پژوهش از ۴۶ نقطه نمونه‌برداری را در سال ۱۳۹۸ نشان می‌دهد.

میانگین پارامترهای بی‌کربنات، کلسیم، کلر، فلوراید، سختی و pH طی دوره پنج‌ساله افزایشی داشته‌اند که باعث افزایش میانگین نقشه رتبه‌بندی (r) آنها و تأثیر منفی بر شاخص GQI می‌شود. سولفات، سدیم، منیزیم پارامترهایی هستند که در این طی این دوره پنج‌ساله کاهش یافته و این کاهش اثر مثبتی بر روند تغییرات شاخص GQI گذاشته است. در کل، روند تغییرات میانگین شاخص GQI منفی بوده که نشان‌دهنده کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی در دشت مرند است. مقایسه پهنه‌بندی شاخص GQI در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۸ نشان می‌دهد در سال ۱۳۹۳ فقط بخشی از شرق و جنوب شرقی دشت در کلاس متوسط (شاخص GQI کمتر از ۷۰) و باقی آن در کلاس‌های چهارگانه قابل قبول قرار می‌گیرد، اما در سال ۱۳۹۸ نه تنها بخشی از شرق، بلکه نواحی شمالی و شمال غربی دشت نیز در کلاس متوسط (شاخص GQI کمتر از

- [7]. Lobato, T.C., Hauser-Davis, R.A., Oliveira, T.F., Silveira, A.M., Silva, H.A.N, Tavares, M.R.M. Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: a case study in the amazon region. *J Hydrol.* 2015; 522(6):74-83.
- [8]. Giordani G, Zaldívar JM, Viaroli P. Simple tools for assessing water quality and trophic status in transitional water ecosystems. *Ecol Indic.* 2009; 9(9):82-91.
- [9]. Fernández-Cavia, J., Rovira, C., Díaz-Luque, P., Cavaller, V. Water quality index (WQI) for official tourist destination websites. Proposal for an assessment system. *Tourism Manage Prospect.* 2014; 9:5-13.
- [10]. Terrado, M., Barceló, D., Tauler, R., Borrell, E., De Campos, S., Barceló, D. Surface-water-quality indices for the analysis of data generated by automated sampling networks. *Trends Anal Chem.* 2010; 29:40-52.
- [11]. Hurley T., Sadiq, R., Mazumder, A. Adaptation and evaluation of the Canadian council of ministers of the environment water quality index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality. *Water Res.* 2012; 46(35):44-52.
- [12]. Tziritis, E., Panagopoulos, A., Arampatzis, G. Development of an operational index of water quality (PoS) as a versatile tool to assist groundwater resources management and strategic planning. *J Hydrol.* 2014; 517:339-50.
- [13]. Yidana, S.M., Banoeng-Yakubo, B., Akabzaa, T.M. Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. *J Afr Earth Sci.* 2010; 58:220-34.
- [14]. Simoes, F. S., Moreira, A. B., Bisinoti, M. C., S. Gimenez, M. N. and Yabe, M. J. S. Water Quality Index as a Simple Indicator of Aquaculture Effects on Aquatic Bodies. *Ecological Indicators.* 2008; 8(5): 476- 484.
- [15]. Horton, R.K. An index number system for rating water quality. *Water Pollution Control Federation.* 1965; 37(3):300-305.
- [16]. Latha, S., and Rao, N. Assessment and Spatial Distribution of Quality of Groundwater in Zone II and III, Greater Visakhapatnam, India Using Water Quality Index (WQI) and GIS. *International Journal of Environmental Science.* 2010; 1(2):198-212.
- [17]. Sharma, N.D., and Patel, J.N. Evaluation of groundwater quality index of the urban segments of Surat City, India. *International Journal of Geology.* 2010; 1(4):1-4.
- [18]. WHO (World Health Organization). *Guidelines for Drinking Water Quality, Second addendum, Vol. 1, Recommendations, -3rd ed., ISBN 9789241547604.* 2008; 1-515.
- [19]. Babiker, I. S., Mohamed, M. A. A., Hiyama, T. Assessing groundwater quality using GIS, *Water Resources Management.* 2007; 21,699-715.
- [20]. Bordalo, A. A., W. Nilsumranchit, and K. Chalermwat. *Water Quality and Uses of the Bangpakongriver (Eastern Thailand): Water Res.* 2001; 15(35): 3642- 3635.
- [21]. Mishra, P.C. and R.K. Patel. Study of the Pollution Load in the Drinkingwater of Rairangpur, a Small Tribal Dominatedtown of North Orissa. *Indian J. Environment and Ecoplanning.* 2001; 5(2):293-298.
- [22]. Reza, R., and Sing, G. Assessment of groundwater quality status by using water quality index method in Orissa, India. *World Applied Sciences Journal.* 2010; 9(12):1392-1397.
- [23]. Machiwal, D. and Jha., M.K. Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies, Part A.* 2015; 1131-1143.
- [24]. Stigter T.Y., Ribeiro L., Carvalho Dill A. M. M. Application of a groundwater quality index as an assessment and communication tool in agro-environmental policies-Two Portuguese case studies", *Journal of Hydrology.* 2006; 578-591.
- [25]. Joodavi, A., Zare, M. Introduction of GQI index to evaluate groundwater quality for drinking water purposes. *Twenty-seventh Conference of Earth Sciences and Thirteenth Conference of the Geological Society of Iran.* 2010 Feb 20; 4-22 [Persian]
- [26]. Rahmani, Gh., Chitsazan, M., Zarehsefat, M and Kalantari., N. Evaluation of groundwater quality of Izeh Pion plain in terms of drinking water using GQI index, 4th Iranian Water Resources Management Conference, AmirKabir University of Technology. 2011. [Persian]
- [27]. Soleimani, S., Mahmoudi Qaraei, M. H., Qasemzadeh, F., Sayareh, A. Investigation of qualitative changes in water resources west of the Red Mountain using GQI quality index in GIS environment. *Journal of Earth Sciences.* Fall 2013; 23(89):175-182. [Persian]
- [28]. Saeedi M., Abessi O., Sharifi F., Meraji H. Development of groundwater quality index. *Environ Monit Assess.* 2010;163:327-335.

- [29]. Mir Arabi, A., Jamali, M., Mahmoudi Sivand, S. and Godrat, M. Zoning of drinking water quality through quality index in GIS environment, National Conference on Water with Clean Water Approach, Shahid Beheshti University - Shahid Abbaspour Technical and Engineering Campus. 2010. [Persian]
- [30]. Khosravi, H. Heydari, A. Nasabpour, S. Study of temporal and spatial changes of groundwater quality in Yazd-Ardakan plain using GQI index, Journal of Geographical Information (Sepehr), Winter 2020; 26(104). [Persian]
- [31]. Shahidi, A., and Khadempour, F. Investigation of groundwater quality status of forest plain of Khorasan Razavi province using GWQI and AWQI indices and its zoning with GIS. Hydrogeomorphology. 2021; 6(22):1-20. [Persian]
- [32]. East Azerbaijan Regional Water Company Report on the status of groundwater resources, including wells, springs and aqueducts Study areas. 2021. [Persian]
- [33]. Nabavi, M. H. An introduction to the geology of Iran. Geological Publications of the country. 1977. [Persian]
- [34]. Geological Survey of Iran. Map of Tabriz-Poldasht with Scale 1: 250,000. 1994. [Persian]
- [35]. East Azerbaijan Regional Water Company. Report on the prohibition of exploitation of groundwater resources in Marand study area, publication number 2161. 2021. [Persian]
- [36]. Rice, E.W., Baird R.B., Eaton, A.D. Standard methods for the examination of water and wastewater, 23RD Edition. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation ISBN: 9780875532875. 2017.
- [37]. ISIRI. Water- The preservation and handling of water samples- Code of practice, ISIRI number 9886. available: <http://www.isiri.org/>. 2009.
- [38]. Bouyoucos G. J. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils, Agron. 1962; 56, 464-465.
- [39]. Condon, M.R., Traver, R.G., Fergusson, W.B. and Chadderton, R.A. Parameter Estimation for a Groundwater Model. Water Resource Bulletin. 1993; (29):36-4.
- [40]. EPA. Standard Operating Procedure for Groundwater Sampling. New England: The Office of Environmental Measurement and Evaluation. 2003.
- [41]. DES. Nitrate and Nitrite: Health Information Summary; Environmental Fact Sheet. New Hampshire Department of Environmental Services. ARD-EHP-16. 2006.
- [42]. Hammer, M.J. Water and Wastewater Technology. Prentice-Hall International Inc., 2nd ed., New Jersey. 1986.
- [43]. Hiyama, T. Evaluation of groundwater vulnerability (and susta inability), 20th UNESCO. IHP DOL 10.107/S 11269-006-9059-6. 2010.
- [44]. Dashti Barmaki, M., Rezaei, M., Saberi Nasr, A. Evaluation of Groundwater Quality Index (GQI) in Lenjanat aquifer using GIS, Journal of Engineering Geology. Summer 2014; 8(2):21-38. [Persian]
- [45]. Babai, Y., Alavi Moghaddam, M., Qasemzadeh, F., Arbabzvar, M.H. Arsenic contamination of ground- water in the Kashmar Koohsorkh. Environmental Science and Technology. 2007; 10(3):31-5. [Persian].
- [46]. Housseini, D., M. Coulibaly and Rodriguez, J. Development of performance indicators for small Quebec drinking water utilities. Environmental Management. 2004; 73(3):243-255.
- [47]. Goher, ME., Hassan, AM., Abdel-Moniem, AH., El-sayed, SM. Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia canal, Nile River, Egypt. Egypt J Aqua Res. 2014; 40(2):25-33.
- [48]. Chander Kumar, S., Satyanarayan, Sh., Saumitra, M., Rina, k. Application of GWQI to assess effect of land use change on groundwater quality in lower Shiwaliks of Punjab: remote Sensing and GIS based approach. Water Resource management. 2011; (25): 1881-98.
- [49]. Fijani, E., Nadiri, A. A., Moghaddam, A. A., Tsai, F. T. C., Dixon, B. Optimization of DRASTIC method by supervised committee machine artificial intelligence to assess groundwater vulnerability for Maragheh-Bonab plain aquifer, Iran. Journal of Hydrology. 2013; 503, 89-100.