# ارزیابی کیفیت شرب آب زیرزمینی شهرکرد بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی بر پایه یک شاخص

سیده سمیرا حشمتی و حبیب‌الله بیگی‌هرچگانی[1*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۱۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۵)


## چکیده

**به‌منظور ارزیابی کیفیت شرب آب زیرزمینی شهرکرد براساس یک شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی، مؤلفه‌های pH، EC، TDS (کل جامدات محلول)، TSS (کل جامدات معلق)، کدورت، $Ca^{2+}$، $Mg^{2+}$، $Na^{+}$، $K^{+}$، $Cl^{-}$، $HCO_3^{-}$ و $SO_4^{2-}$ در ۹۷ حلقه** چاه اندازه‌گیری و سختی کل محاسبه شد. نقشه‌های مؤلفه‌ها به‌روش زمین‌آماری ترسیم شد. این نقشه‌ها حاکی از کیفیت خوب آب در شمال **غربی آبخوان و کاهش کیفیت به‌طرف جنوب آبخوان بود. پس از نرمال‌کردن نقشه هر مؤلفه و تبدیل به نقشه رتبه و استخراج وزن هر مؤلفه از نقشه رتبه، نقشه شاخص GWQI (با مقادیر عددی بین صفر تا ۹۹) تهیه شد. کیفیت آب زیرزمینی شهرکرد براساس میانگین نقشه شاخص، ۸۴، مناسب بوده و شاخص کیفیت از شمال غرب (GWQI=۸۷) به‌سمت جنوب کاهش می‌یابد (GWQI=۸۰). علت این کاهش کیفیت بـه‌وجـود مراکز صنعتی، دامداری و کشاورزی فشرده، تصفیه‌خانه فاضلاب در جنوب دشت و نیز جهت شمال به جنوب گرادیان هیدرولیکی نسبت داده** شد. تحلیل حساسیت به‌روش حذف تک نقشه‌ها نشان داد شاخص **GWQI** در سفره شهرکرد نسبت به **TSS** و تا اندازه‌ای $Na^{+}$ حساس‌تر است. **بنابراین این دو مؤلفه بایستی با دقت و تکرار بیشتری پایش شوند.**


**واژه‌های کلیدی:** سفره شهرکرد، کیفیت آب شرب، شاخص **GWQI**، نقشه‌های نرمال، نقشه‌های رتبه، تحلیل حساسیت، **GIS**

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: beigi.habib@gmail.com



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]

**مقدمه**

ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی به منظور مصرف و مدیریت این منابع امری ضروری است. در ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده از ابزارها و تکنیک‌های مناسب جهت پردازش داده‌های کیفی بسیار کارآمد است. زیرا ارزیابی کیفیت آب با وجود حجم زیاد داده‌ها و تعداد زیاد مؤلفه‌ها مشکل خواهد بود. یکی از روش‌های مفید برای ارزیابی کیفیت آب شاخص کیفیت آب (WQI) است (۶). شاخص‌های کیفیت آب (WQI) به روش‌های مختلفی تعریف و محاسبه می‌شوند. ولی در همه روش‌ها برآیند اثر مؤلفه‌های مختلف کیفی آب در قالب یک عدد کلی که بیانگر کیفیت آب است ارائه می‌شود. از این رو، یک برداشت کلی از کیفیت آب به مدیران منابع آب و مردم عادی انتقال می‌یابد. تعداد و نوع مؤلفه‌های مورد استفاده در محاسبه WQI انعطاف‌پذیر و متغیر است. علاوه بر این، مقدار عددی شاخص هم در بازه های مختلفی قرار می‌گیرند. منظور از GWQI یک شاخص WQI است که برای آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. چون در اینجا هدف ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای شرب است، به همین منظور، از استانداردهای کیفی WHO برای آب شرب در محاسبه GWQI استفاده می‌شود (۹). در مطالعه فعلی شاخص GWQI طوری تعریف شده است که هر چه به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد بهترین کیفیت و هرچه به صفر نزدیکتر باشد پایین‌ترین کیفیت را خواهد داشت (۶).

در ارزیابی GWQI از قواعد ساده و سریع استفاده می‌شود. در مرحله اول تعدادی از مؤلفه‌های فیزیکی شیمیایی آب زیرزمینی اندازه‌گیری می‌شوند. انتخاب مؤلفه‌های کیفی معمولاً بر اساس نوع مصرف غالب در منطقه مورد نظر صورت می‌گیرد. در مرحله دوم بر روی داده‌های به‌دست آمده پردازش‌های مکانی انجام می‌شود. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان 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 مرحله آخر با انجام محاسباتی بر روی نقشه‌های به‌دست آمده از مؤلفه‌های کیفی آب نقشه شاخص GWQI استخراج می‌شود (۹).

در محاسبه GWQI تعیین مؤلفه‌هایی که GWQI نسبت به آنها کمترین و بیشترین حساسیت را دارد حائز اهمیت است. به این منظور از روش تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. نتیجه تحلیل حساسیت تشخیص مؤلفه‌هایی است که در یک سفره آب بیشترین تأثیر را بر کیفیت کلی آب خواهند داشت و بنابراین پایش مکرر، دقیق‌تر و صحیح‌تر آنها ضروری خواهد بود. یکی از روش‌های تحلیل حساسیت GWQI که در محیط GIS انجام‌پذیر است اثر حذف تک نقشه یک مؤلفه بر GWQI است (۶).

چندین مطالعه در زمینه ارزیابی GWQI بر پایه‌یGIS انجام شده است. در یکی از این مطالعات، کیفیت آب زیرزمینی حوزه ناسانو (ژاپن) با استفاده از GWQI در محیط GIS بررسی شد (۶). برای این منظور، مؤلفه‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر، سولفات و TDS در ۵۰ حلقه چاه اندازه‌گیری شد. نقشه‌های این مؤلفه‌ها پس از ترسیم به روش کریجینگ به نقشه‌های نرمال و سپس به نقشه‌های رتبه تبدیل شد. پس از استخراج خلاصه آماری نقشه‌ها از میانگین رتبه هر نقشه به عنوان وزن هر مؤلفه در تهیه نقشه GWQI استفاده شد. با این که مؤلفه‌های TDS و سولفات دارای میانگین وزن بالاتری نسبت به سایر مؤلفه‌ها بودند، تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر در GWQI پس از حذف منیزیم بیشتر از سایر عوامل بودکه نشان دهنده حساسیت بیشتر GWQI به این مؤلفه بود (۶).

به روشی مشابه، کیفیت آب زیرزمینی راجستان واقع در غرب هند بر پایه GIS ارزیابی شد (۹). در این مطالعه از مؤلفه‌های بیشتری برای محاسبه GWQI استفاده شد. برای این منظور از ۵۳ حلقه چاه نمونه‌برداری و مؤلفه‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، سولفات، سختی،pH، TDS و EC در هر نمونه اندازه‌گیری شد. سپس به روش کریجینگ نقشه‌های این مؤلفه‌ها



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]

تهیه شد. براساس نقشه‌های تهیه شده نقشه‌های نرمال و بر مبنای نقشه‌های نرمال، نقشه‌های رتبه به‌دست آمد. سختی، EC، TDS و منیزیم به‌واسطه میانگین وزن بالاتری که نسبت به‌سایر عوامل داشتند بر GWQI مؤثرتر بودند. با این حال، تحلیل حساسیت با حذف تک نقشه نشان داد که شاخص GWQI در این سفره نسبت به سختی، سدیم و سولفات حساس‌تر است و در نتیجه این سه مؤلفه باید با دقت بیشتری پایش شوند (۹). از این دو مطالعه چنین نتیجه می‌شود که علی‌رغم وزن بیشتر برخی مؤلفه‌ها در تعیین GWQI، ممکن است این شاخص نسبت به این مؤلفه‌ها حساسیت کمتری داشته باشد و از طرفی مؤلفه‌های مهم (چه آنهایی که وزن بیشتری دارند و چه آنهایی که GWQI به آنها حساس‌تر است) از یک سفره به سفره دیگر تغییر می‌کند.

تاکنون مطالعه جامعی مبنی بر ارزیابی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) بر پایه‌ی GIS و تحلیل حساسیت در ایران صورت نگرفته است. از طرف دیگر، آب زیرزمینی شهرکرد که از سفره‌های مهم استان چهار محال و بختیاری به‌شمار می‌رود از نظر کیفیت آب شرب سزاوار مطالعه است. هدف از این مطالعه (۱) ارزیابی کیفیت آب شرب آب زیرزمینی شهرکرد با استفاده از GWQI در محیط GIS، (۲) تعیین مؤلفه‌های مؤثر بر GWQI و (۳) تحلیل حساسیت GWQI نسبت به مؤلفه‌های خود در آب زیرزمینی شهرکرد در محیط GIS است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

دشت شهرکرد یکی از دشت‌های مهم استان چهارمحال و بختیاری است. این دشت با وسعتی نزدیک به ۵۵۱ کیلومتر مربع در ″۵۰ ′۱۰ °۵۱ طول جغرافیایی و در ″۷ ′۳۵ °۳۲ عرض جغرافیایی قرار دارد (شکل۱). درصد بالایی از آب‌های زیرزمینی دشت در فصل زراعی برای مصرف در بخش کشاورزی استفاده می‌شود. بخش عمده‌ای از آب شرب مردم شهرستان شهرکرد نیز از همین آبخوان تأمین می‌شود (۳).

### نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه از میانگین نتایج سه نوبت نمونه‌برداری از ۹۷ حلقه چاه استفاده شده است. این چاه‌ها دارای پراکنش نسبتاً خوبی در سطح دشت بودند. هر نوبت نمونه‌برداری در عرض یک هفته در طی تیر، شهریور و آبان ۱۳۸۹ انجام گرفت. نمونه‌ها در بطری‌های ۵۰۰ mL پلی‌اتیلنی تیره‌رنگ که از قبل اسیدشویی و سپس با آب مقطر شستشو داده شده بودند، جمع‌آوری شدند. بطری‌های محتوی نمونه، داخل یخدان به آزمایشگاه منتقل، در یخچال نگهداری و در اسرع وقت براساس استانداردهای APHA(۱۹۹۸) تجزیه شدند (۵). شاخص‌های هدایت الکتریکی (EC) و pH نمونه‌ها با دستگاه Istek مدل PDC ۹۱۵ بلافاصله پس از انتقال به آزمایشگاه قرائت گردید. کل جامدات معلق (TSS)، با عبور ۱۰۰ mL آب از صافی ۰/۴۵ µm و خشکاندن صافی در ۱۰۵°C و توزین با ترازوی آنالیتیک به‌دست آمد.مقدارکل جامدات حل شده (TDS) نمونه‌ها با تبخیر حدود ۱۰۰ mL آب صاف شده و توزین مانده اندازه‌گیری شد. کدورت (Tu) نمونه‌ها با کدورت سنج مدل Compact PC قرائت و با واحد ntu بیان گردید. کلراید ($Cl^-$) در نمونه‌ها بلافاصله پس از انتقال به آزمایشگاه به‌روش تیتراسیون با نیترات نقره اندازه‌گیری شد. سدیم ($Na^+$) و پتاسیم ($K^+$) به‌روش شعله‌سنجی، کلسیم ($Ca^{+2}$) و منیزیم ($Mg^{2+}$) به‌روش تیتر با EDTA ، بی‌کربنات ($HCO_3^-$) به‌روش تیتر با اسیدسولفوریک و سولفات ($SO_4^{-2}$) به‌روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شدند. از یون‌های $Ca^{2+}$ و $Mg^{2+}$ به‌منظور محاسبه سختی کل (TH) استفاده شد. سختی کل آب (TH) بر مبنای کربنات کلسیم معادل از معادله ۱ به‌دست آمد (۵):

$$TH\ (mg\ of\ CaCO_3) = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) * 50 \qquad [1]$$

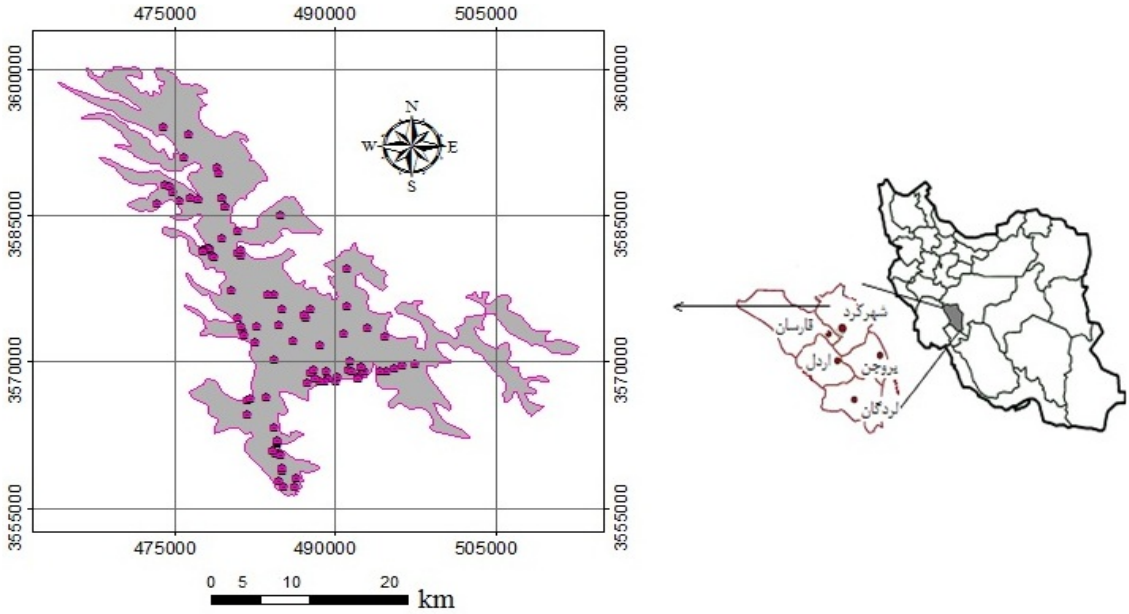
### مراحل تهیه نقشه GWQI

**گام اول:** الگوهای تغییرات مکانی هر یک از مؤلفه‌ها (یعنی مدل واریوگرام و مشخصات آن یعنی دامنه تأثیر، آستانه تأثیر و



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]




**شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت شهرکرد و مرز آبخوان دشت (موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری شده با ● نشان داده شده است)**

اثر قطعه‌ای) با ترسیم واریوگرام تجربی و برازش بهترین مدل نظری به آن در محیط variowin ۲/۲۱ (۱۰) تعیین شد. بهترین مدل‌ها در این مطالعه شامل مدل‌های کروی و گوسی بودند.

**گام دوم:** نقشه‌های هر یک از مؤلفه‌ها براساس واریوگرام منتخب و با استفاده از روش کریجینگ معمولی در محیط ArcGIS ۹/۳ تهیه شد (۸). روش کریجینگ معمولی مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی مؤلفه‌های به‌کار رفته در محاسبه GWQI در آبخوان شهرکرد است که جزئیات آن توسط حشمتی (۱۳۹۰) ارائه شده است (۱).

**گام سوم:** نقشه‌های نرمال شده هر مؤلفه (NI) تهیه شد. نقشه‌ها با استفاده از رابطه زیر نرمال شدند:

$$NI = (C - C_{mdl}) / (C + C_{mdl}) \qquad [۲]$$

که در آن C مقدار هر پیکسل در نقشه اولیه هر مؤلفه و $C_{mdl}$ بیشترین حد مطلوب هر مؤلفه براساس استاندارد (۲۰۱۱) WHO است (۱۱). در نقشه‌های حاصل مقدار هر پیکسل بین ۱- تا ۱+ قرار می‌گیرد.

**گام چهارم:** در این مرحله هر نقشه NI به یک نقشه رتبه تبدیل شد. برای تهیه نقشه‌های رتبه از معادله چند جمله‌ای زیراستفاده شد (۶):

$$R = ۵۰/ \times NI^{۲} + ۵۴/ (NI) + ۵ \qquad [۳]$$

که در آن R: وزن هر پیکسل بر اساس مقدار NI آن و NI: نقشه نرمال هر مؤلفه است. هر پیکسل در نقشه رتبه مقداری بین ۱ تا ۱۰ دارد. رتبه ۱ نشان دهنده کمترین میزان تأثیر بر کیفیت آب و رتبه ۱۰ نشان دهنده بیشترین میزان تأثیر بر کیفیت آب است. کمترین مقدار هر پیکسل در نقشه NI که ۱- است معادل ۱ در نقشه رتبه است. بیشترین مقدار هر پیکسل در نقشه NI که ۱+ است معادل ۱۰ در نقشه رتبه است.

**گام پنجم:** میانگین مقدار پیکسل‌های مربوط به هر مؤلفه از نقشه رتبه آن استخراج شد و به‌عنوان وزن آن مؤلفه در گام بعدی مورد استفاده قرار گرفت.

**گام ششم:** نقشه GWQI از معادله زیر به‌دست آمد:

$$GWQI = ۱۰۰ - [(W_۱R_۱ + W_۲R_۲ + \ldots + W_nR_n) / n] \qquad [۴]$$

که در آن: $W_i$ وزن نسبی هر مؤلفه بوده و مقدار آن بین ۱ تا ۱۰ است. $R_i$ نقشه رتبه هر مؤلفه است و n تعداد مؤلفه‌های کیفی به‌کار رفته در تعیین GWQI است. مقدار پیکسل‌های نقشه GWQI بین صفر تا ۹۹ قرار می‌گیرد. هرچه مقدار



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]

پیکسل‌ها به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشند نشانه کیفیت بهتر آب زیرزمینی و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشند نشانه کیفیت پایین‌تر آب زیرزمینی است (۹).

**گام هفتم:** گروه‌های کیفی آب در نقشه GWQI در ده کلاس از صفر تا ۱۰۰ درصد مقیاس‌بندی شد. به‌طوری‌که کلاس‌های نزدیک‌تر به ۱۰۰ کیفیت بهتر و کلاس‌های نزدیک‌تر به صفر کیفیت ضعیف‌تر را نشان می‌دهند. در ادامه، درصد پوشش و مساحت کلاس‌های کیفیت آب استخراج شد.

### تحلیل حساسیت GWQI نسبت به حذف مؤلفه‌ها

تحلیل حساسیت به‌روش حذف نقشه صورت گرفت. در این تحلیل نقشه GWQI سیزده مرتبه، هر بار با حذف یکی از نقشه‌های رتبه مربوط به یک مؤلفه، تهیه و اثر حذف هر مؤلفه برروی نقشه کلی GWQI که با استفاده از سیزده مؤلفه تهیه شده بود بررسی شد. به‌این منظور نقشه‌های شاخص تغییر از معادله زیر محاسبه شدند:

$$Vwi = ۱۰۰ [(GWQI_{۱۳} - GWQI_{wi}) / GWQI_{۱۳}] \quad [۵]$$

که در آن: $V_{wi}$ شاخص تغییر (٪) بدون نقشه ی i ام؛ $GWQI_{wi}$ نقشه شاخص کیفیت آب بدون نقشه رتبه i ام و $GWQI_{۱۳}$ نقشه شاخص کیفیت آب با حضور سیزده مؤلفه کیفی است. کلیه عملیات گام‌های دوم تا هفتم و تحلیل حساسیت مؤلفه‌ها در محیط ArcGIS ۹/۳ انجام شد (۸).

## نتایج و بحث

خلاصه آماری مربوط به مؤلفه‌های مورد بررسی در آب زیرزمینی شهرکرد در جدول ۱ ارائه شده است. آب زیرزمینی شهرکرد براساس میانه و یا میانگین مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده از جمله کاتیون‌ها و آنیون‌ها و سختی عموماً کیفیت مطلوبی برای شرب دارد. با این حال بیشینه برخی مؤلفه‌ها (EC، TDS و به‌ویژه TSS، کدورت و $Mg^{۲+}$ گاهی از حد مطلوب فراتر می‌رود. در این میان EC و TDS با دو درصد نامطلوبی مسئله خاصی به‌نظر نمی‌رسند. این چاه‌ها معمولاً در جنوب دشت شهرکرد واقع هستند. نه تنها میانگین بلکه حتی کمینه TSS نیز در حد مطلوب نیست. تقریباً در تمام چاه‌ها مقدار TSS از حد مطلوب خارج است. همین‌طور، در ۲۵ درصد چاه‌ها مقدار کدورت خارج از حد مطلوب است. علت این امر در همبستگی این مؤلفه‌ها است (۱). با این حال عدم مطلوبیت TSS حاکی از آن است که با تصفیه فیزیکی یا ته نشینی می‌توان آب شرب مطلوبی برای مردم شهرستان شهرکرد فراهم کرد. مقدار $Mg^{۲+}$ نیز در ۱۳ درصد چاه‌ها بیشتر از حد مطلوب است. آب زیرزمینی شهرکرد از نظر کمینه و بیشینه سختی در گروه سخت تا خیلی سخت قرار دارد که حاکی از پتانسیل رسوب‌گذاری آب در تأسیسات آبی صنایع و سیستم‌های انتقال آب است (۷). در بین شاخص‌های مورد بررسی ضریب تغییرات سولفات، سدیم و پتاسیم به‌طور چشمگیری بیشتر از ۳۰ درصد شده است که نشانه تغییرپذیری زیاد این مؤلفه‌ها در سطح آبخوان است (۲).

### پهنه‌بندی مؤلفه‌های کیفی آب زیرزمینی شهرکرد

نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از مناسب‌ترین مدل تغییرنمای هر مؤلفه (۱) و روش کریجینگ رسم شد (شکل‌های ۲ و ۳). طبق این نقشه‌ها غلظت مؤلفه‌ها در بخش جنوب و جنوب شرقی آبخوان شهرکرد بیشتر از بخش‌های دیگر آبخوان است. در بخش شمال غربی آبخوان نیز غلظت مؤلفه‌ها، عموماً حداقل است (شکل‌های ۲ و ۳).

با توجه به شکل ۲ مقدار pH آب زیرزمینی شهرکرد در اکثر قسمت‌های آبخوان در حدود قابل قبول (۸/۵–۷/۵) براساس استاندارد (WHO۲۰۱۱) قرار دارد (۱۱). در جنوب دشت شهرکرد و در حدود ۲ درصد مساحت آبخوان، مقدار EC در آب زیرزمینی بیشتر از حد مطلوب (۷۵۰ mS/cm) شده است (شکل ۲). در ۱٪ از آبخوان و در جنوب آن مقدار TDS از حد مطلوب (۵۰۰ mg/L) فراتر می‌رود (شکل ۲). براساس نقشه‌های Tu و TSS به‌ترتیب حدود ۹۷ درصد و ۱۰۰ درصد از آبخوان دارای Tu و TSS بیشتر از حد مطلوب هستند (شکل ۲ و جدول ۱). با این حال شدت نامطلوب‌بودن Tu چندان زیاد



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]

**جدول۱. خلاصه آماری مؤلفه‌های کیفی در آب زیرزمینی شهرکرد، حدود مطلوب WHO برای آب شرب، و درصد نمونه‌ای خارج از حد مطلوب (درصد نامطلوبی)**

| مؤلفه | واحد | میانه | میانگین | کمینه | بیشینه | دهک اول | دهک آخر | انحراف معیار | ضریب تغییرات (٪) | WHO (2011)* | درصد نامطلوبی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | — | ۷/۷ | ۷/۶ | ۷/۲ | ۷/۹ | ۷/۵ | ۷/۹ | ۰/۲ | ۲ | ۷/۵ – ۸/۵ | ۰ |
| EC | µS/cm | ۴۳۱ | ۴۵۶ | ۲۶۷ | ۱۰۶۴ | ۳۱۶ | ۶۲۹ | ۱۳۳ | ۲۹ | ۷۵۰ | ۲ |
| TDS | mg/L | ۲۸۳ | ۲۹۶ | ۱۵۰ | ۵۶۷ | ۲۰۴ | ۳۹۹ | ۷۸ | ۲۶ | ۵۰۰ | ۲ |
| TSS | mg/L | ۷۰ | ۷۰ | ۲۵ | ۱۴۳ | ۴۶ | ۹۷ | ۲۲ | ۳۱ | ۲۵ | ۹۸ |
| Tu | ntu | ۵/۵ | ۵/۶ | ۳/۴ | ۱۱/۷ | ۴/۴ | ۶/۵ | ۱/۲ | ۲۰ | ۵ | ۲۵ |
| TH | mg/L | ۲۲۰ | ۲۲۰ | ۱۵۵ | ۳۳۴ | ۱۷۴ | ۲۷۱ | ۳۵ | ۱۶ | ۵۰۰ | ۰ |
| $HCO_3^-$ | mg/L | ۱۱۱ | ۱۱۸ | ۶۳ | ۲۲۲ | ۷۴ | ۱۶۷ | ۳۴ | ۲۹ | ۳۰۰ | ۰ |
| $SO_4^{2-}$ | mg/L | ۲۷ | ۳۱ | ۳/۴ | ۹۷ | ۱۱ | ۵۳ | ۱۹ | ۶۰ | ۲۰۰ | ۰ |
| $Cl^-$ | mg/L | ۸۸ | ۸۹ | ۳۶ | ۱۷۸ | ۶۲ | ۱۱۸ | ۲۵ | ۲۸ | ۲۰۰ | ۰ |
| $Ca^{2+}$ | mg/L | ۵۰ | ۵۰ | ۳۳ | ۶۶ | ۴۰ | ۵۸ | ۶ | ۱۳ | ۷۵ | ۰ |
| $Mg^{2+}$ | mg/L | ۲۲ | ۲۳ | ۵ | ۴۷ | ۱۵ | ۳۳ | ۷ | ۳۱ | ۳۰ | ۱۳ |
| $K^+$ | mg/L | ۰/۵۶ | ۰/۵۹ | ۰/۱۲ | ۲ | ۰/۲۲ | ۰/۹۸ | ۰/۳۳ | ۵۶ | ۱۲ | ۰ |
| $Na^+$ | mg/L | ۱۶ | ۲۴ | ۴ | ۹۰ | ۵ | ۵۷ | ۲۱ | ۸۷ | ۲۰۰ | ۰ |

* : حدود مطلوب (۲۰۱۱) WHO برای آب شرب است. درصد نامطلوبی بیانگر تعداد نمونه آب/چاه است که از بین ۹۷ چاه، میانه مؤلفه در آنها از حد مطلوب (۲۰۱۱) WHO فراتر رفته است.

نیست و Tu حداکثر به ۸/۵ ntu می‌رسد ولی شدت عدول TSS زیاد است (تا ۵ برابر حد مطلوب). نقشهTH نشان می‌دهد که در هیچ جای آبخوان مقدار سختی کل از حد مطلوب (mg/L ۵۰۰) فراتر نرفته است. تنها آب حدود ۵٪ از آبخوان دارای مقدار منیزیم خارج از حد مطلوب است که در جنوب دشت واقع شده است (شکل ۲). نقشه‌های $Ca^{2+}$ ، $Na^+$ و $SO_4^{2-}$ و $Cl^-$ نشان می‌دهند که مقادیر هیچ کدام از این مؤلفه‌ها از حدود مطلوب (۲۰۱۱) WHO فراتر نرفته است (۱۱).

درصد نامطلوبی مستخرج از نقشه هر مؤلفه با درصد نامطلوبی در جدول ۱ مطابقت کلی و خوبی دارد. به‌علاوه نقشه‌ها نشان می‌دهند که عدول مؤلفه‌ها در جنوب و جنوب شرقی آبخوان شهرکرد رخ می‌دهد. جنوب و جنوب شرقی آبخوان جایی است که مراکز صنعتی، تصفیه خانه فاضلاب شهرکرد، دامداری‌های فشرده و کشاورزی پرنهاده در آن واقع است (۴). علاوه بر این جهت گرادیان هیدرولیکی از شمال غربی به‌سوی جنوب دشت است (۴) و احتمال حمل آلاینده‌ها به این بخش از آبخوان قوی است. بیشتربودن غلظت مؤلفه‌ها در این بخش از آبخوان نسبت به بخش‌های دیگر را می‌توان به‌موارد ذکر شده نسبت داد.

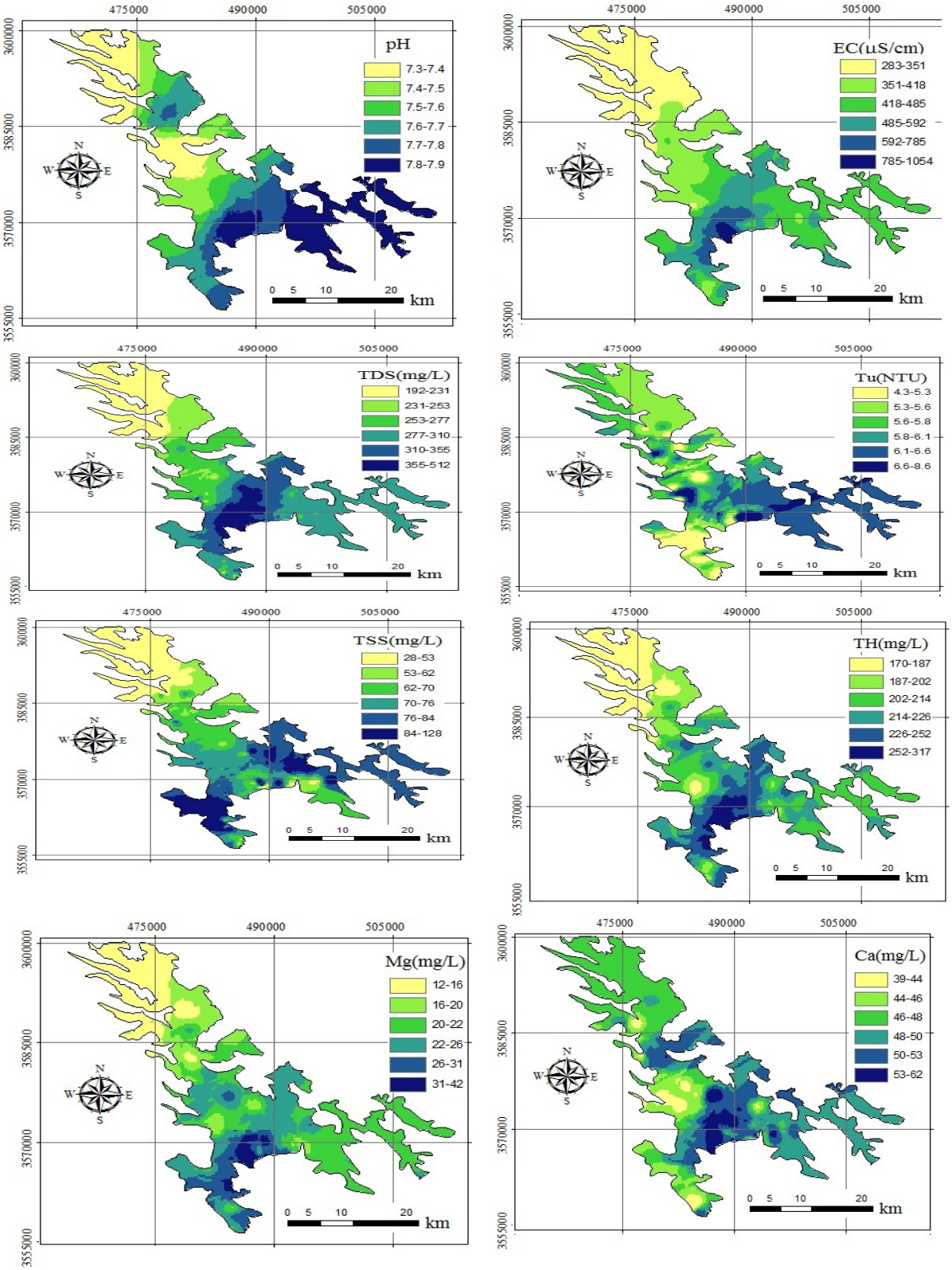
## تعیین وزن مؤلفه‌های کیفی آب زیرزمینی شهرکرد

تعیین مؤثرترین مؤلفه‌ها در تعیین شاخص کیفیت آب زیرزمینی دارای اهمیت است. خلاصه آماری سیزده نقشه رتبه مربوط به ۱۳ مؤلفه در جدول ۲ آورده شده است. میانگین مقدار عددی پیکسل‌های هر نقشه رتبه به‌عنوان وزن مؤلفه درنظر گرفته می‌شود. این وزن در رابطه ۴ اعمال می‌شود تا نقشه GWQI



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]

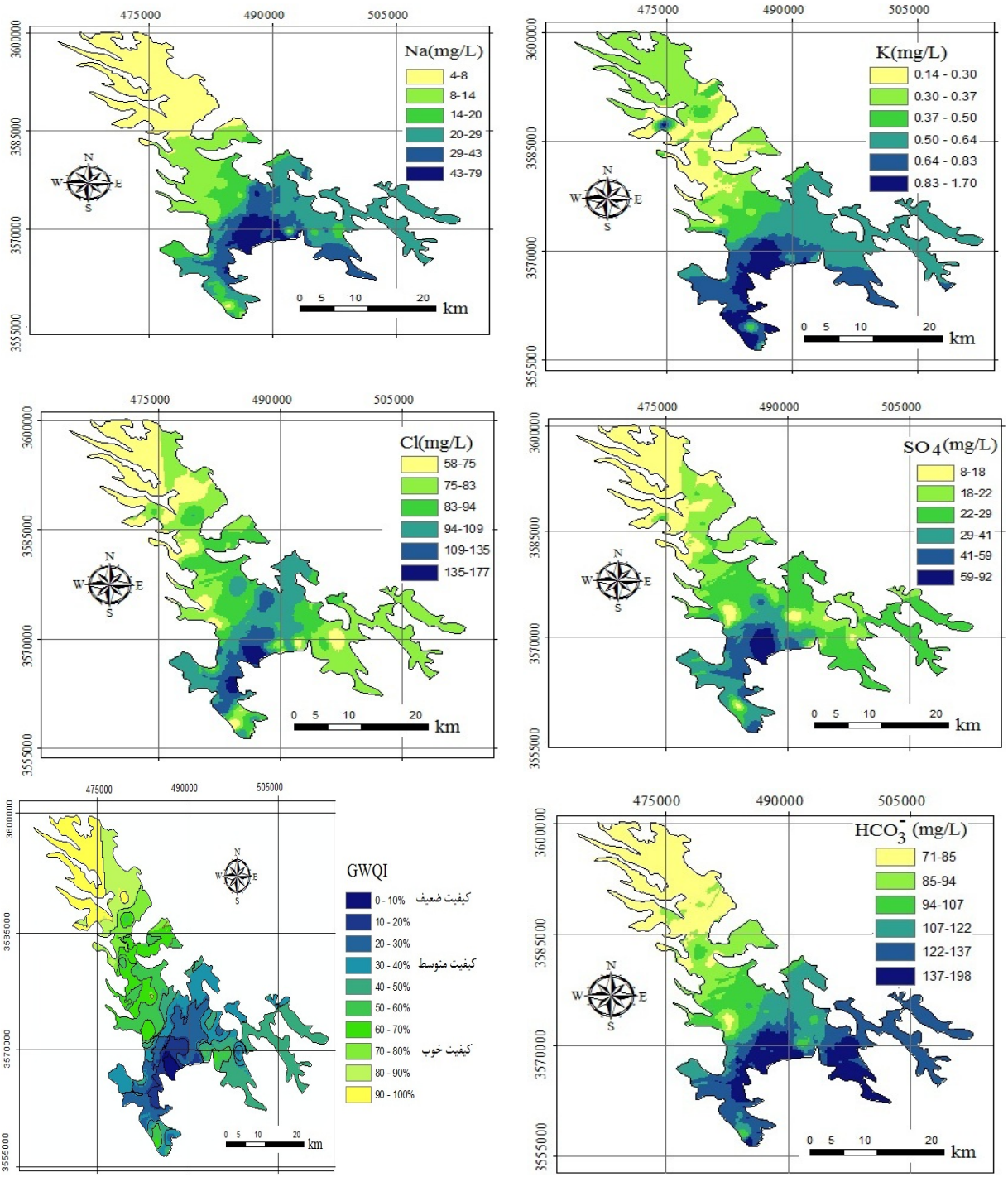



**شکل ۲. نقشه‌های pH، EC ، TDS، TSS، Tu ، TH، $Ca^{2+}$ و $MG^{2+}$ درآب زیرزمینی شهرکرد**



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]




**شکل ۳. نقشه‌های $Na^{+}$، $K^{+}$، $Cl^{-}$، $HCO^{3-}$ و $SO_4^{2-}$ درآب زیرزمینی شهرکرد**

**شکل۴. نقشه‌ی GWQI آب زیرزمینی شهرکرد بر اساس نقشه‌های ۱۳ مؤلفه‌ی اندازه گیری شده**



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]

**جدول ۲. پارامترهای آماری نقشه‌های رتبه سیزده مؤلفه کیفی آب زیرزمینی شهرکرد**

| نقشه رتبه مؤلفه‌ها | کمینه | بیشینه | میانگین* | انحراف معیار |
|---|---|---|---|---|
| pH | ۴/۹ | ۵/۰ | ۴/۹ | ۰/۰ |
| EC | ۳/۱ | ۵/۸ | ۳/۸ | ۰/۴ |
| TDS | ۳/۱ | ۵/۲ | ۳/۷ | ۰/۳ |
| TSS | ۵/۳ | ۸/۳ | ۷/۲ | ۰/۴ |
| Tu | ۲/۱ | ۵/۷ | ۳/۹ | ۱/۱ |
| TH | ۲/۹ | ۴/۰ | ۳/۲ | ۰/۲ |
| $HCO_3^-$ | ۲/۴ | ۴/۱ | ۲/۹ | ۰/۳ |
| $Cl^-$ | ۲/۷ | ۴/۷ | ۳/۳ | ۰/۳ |
| $SO_4^{2-}$ | ۱/۳ | ۳/۴ | ۱/۸ | ۰/۳ |
| $Ca^{2+}$ | ۳/۶ | ۴/۶ | ۴/۱ | ۰/۱ |
| $Mg^{2+}$ | ۳/۲ | ۵/۸ | ۴/۲ | ۰/۵ |
| $Na^+$ | ۱/۱ | ۳/۱ | ۱/۶ | ۰/۴ |
| $K^+$ | ۱/۱ | ۱/۹ | ۱/۳ | ۰/۱ |

* میانگین رتبه هر نقشه (ستون چهارم از سمت راست) به‌عنوان وزن در مرحله بعدی برای محاسبه GWQI به‌کار رفته است.

آب زیرزمینی به‌دست آید.

با توجه به جدول ۲، مؤلفه‌های TSS، pH، $Mg^{2+}$ و $Ca^{2+}$ در آب زیرزمینی شهرکرد به‌ترتیب بیشترین میانگین رتبه از ۴ تا ۷/۲ را دارا هستند و احتمالاً باید باعث کاهش کیفیت آب شوند (۹). در آبخوان شهرکرد، مؤلفه‌های $K^+$، $Na^+$ و $SO_4^{2-}$ و $HCO_3^-$ (با وزن‌های کمتر از ۲) به‌ترتیب کمترین میانگین‌های رتبه (یا وزن) را دارند واحتمالاً تأثیر کمتری در کاهش کیفیت آب زیرزمینی شهرکرد خواهند داشت. در حوضه ناسانو (ژاپن) مؤلفه‌های TDS و $SO_4^{2-}$ به‌ترتیب با وزن‌های ۱/۹ و ۱/۶ دارای میانگین رتبه بالاتر و $Mg^{2+}$ با وزن ۱/۱ دارای کمترین میانگین رتبه نسبت به‌سایر عوامل بودند (۶). در راجستان هند، سختی، EC، TDS و $Mg^{2+}$ به‌ترتیب با وزن‌های ۷/۴۵، ۵/۸۹، ۵/۸۲ و ۵/۴۲ بیشترین تأثیر و مؤلفه‌های $SO_4^{2-}$ و $Na^+$ با وزن های ۳/۰۷ و ۳/۷۷ کمترین تأثیر را بر GWQI داشتند (۹). به‌نظر می‌رسد تفاوت در مؤلفه‌های مهم‌تر یا کم اهمیت‌تر و وزن آنها در هر آبخوان ناشی از سازندهای زمین‌شناختی خاص آبخوان مورد بحث باشد. بنابراین، ماهیت کارستی و آهکی آبخوان شهرکرد می‌تواند دلیل اهمیت بیشتر مؤلفه‌های TSS، pH، $Ca^{2+}$ و $Mg^{2+}$ ، که عمدتاً وابسته به سیستم کارستی هستند، در این آبخوان باشد.

## پهنه‌بندی GWQI

نقشه GWQI آب زیرزمینی شهرکرد در شکل ۴ نشان داده شده است. این نقشه براساس ۱۳ مؤلفه کیفی اندازه‌گیری شده، با استفاده وزن مؤلفه‌ها (جدول ۲، ستون میانگین) و رابطه ۴ ترسیم شده است. آب زیرزمینی دشت شهرکرد عموماً دارای کیفیت بالا (GWQI با میانگین ۸۴) است. کیفیت در شمال غربی آبخوان به حداکثر (GWQI > ۹۰) می‌رسد (شکل ۴). در عین حال در بخش جنوبی آبخوان کیفیت آب ممکن است خیلی پایین (GWQI<۱۰) باشد (شکل ۳). با توجه به شکل ۴، مقدار GWQI از شمال غربی به جنوب دشت کمتر شده که به معنی کاهش کیفیت آب از شمال غربی به حنوب آبخوان است.



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]

**جدول ۳. کلاس‌های کیفیت آب زیرزمینی شهرکرد (بر اساس GWQI) و مساحت و درصد پوشش هر کلاس و محل عمومی وقوع در آبخوان شهرکرد**

| GWQI(%) | کلاس کیفیت آب | درصد پوشش | مساحت ($km^2$) | محل عمومی وقوع |
|---|---|---|---|---|
| ۰-۳۰٪ | پایین | ۱۸ | ۹۷ | جنوب دشت |
| ۳۰-۷۰٪ | متوسط | ۵۵ | ۳۰۵ | شمال تا مرکز دشت |
| ۷۰-۱۰۰٪ | بالا | ۲۷ | ۱۴۹ | شمال غربی دشت |

این روند با روند مؤلفه‌های کیفی در طول آبخوان کاملاً هم خوانی دارد (شکل۲ و۳). در نقشه‌های قبلی (شکل ۲و ۳) هم دیده شد که کیفیت آب براساس هر مؤلفه از شمال غربی به‌سمت جنوب کاهش می‌یافت. بنابراین، GWQI محاسبه شده توانسته است که برآیند مؤلفه‌ها را در آبخوان شهرکرد به‌خوبی منعکس سازد.

در نقشه مقیاس‌بندی شده GWQI کیفیت آب با فاصله‌ی ۱۰٪ از صفر تا ۱۰۰٪ به ۱۰ کلاس تقسیم شده است. سه کلاس با کمترین مقادیر (۳۰٪ - ۰) به‌عنوان گروه با کیفیت پایین طبقه‌بندی شده است. با توجه به نقشه GWQI این سه کلاس در جنوب دشت واقع شده‌اند. چهار کلاس بعدی (۷۰٪-۳۰) در گروه با کیفیت متوسط قرار دارند که عموماً در شمال تا مرکز دشت واقع شده‌اند. سه کلاس آخر (۱۰۰٪-۷۰) در گروه با کیفیت بالا طبقه‌بندی شدند که شمال غربی دشت را پوشش داده‌اند. مساحت کلاس‌های نقشه GWQI به‌همراه درصد پوشش هر کلاس در جدول ۳ داده شده است.

**تحلیل حساسیت GWQI نسبت به مؤلفه های کیفی آن**

وزن بیشتر مؤلفه لزوماً به مفهوم حساسیت GWQI به آن مؤلفه نیست. تنها، تحلیل حساسیت مشخص می‌کند که GWQI به‌کدام مؤلفه‌ها حساس‌تر است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت به‌روش حذف تک نقشه در جدول ۴ آمده است.

در آب زیرزمینی شهرکرد، بزرگ‌ترین میانگین شاخص تغییر مربوط به مؤلفه TSS و سپس $Na^+$ است. بنابراین شاخص GWQI در سفره شهرکرد، نسبت به این مؤلفه‌ها حساس‌تر است. با توجه به جدول ۴، شاخص GWQI به‌ترتیب به مؤلفه‌های TDS، $SO_4^{2-}$، EC و $Mg^{2+}$ کمترین حساسیت را دارد. یعنی حذف آنها تغییرات چندانی در نقشه GWQI ایجاد نمی‌کند (۶). در حوضه ناسانوی ژاپن شاخص GWQI به منیزیم با میانگین شاخص تغییر ۰/۵ درصد بیشترین حساسیت و به TDS با میانگین تغییر ۰/۱ درصد کمترین حساسیت داشت (۶). در راجستان هند شاخص GWQI بیشترین حساسیت را به‌سختی، سولفات و سدیم با میانگین تغییر ۳/۹۸، ۲/۲۶ و ۱/۶۲ و کمترین حساسیت را به بی‌کربنات با میانگین تغییر ۰/۱۹ داشت (۹).

مقایسه نتایج جدول ۳ و ۴ نشان می‌دهد که مؤلفه TSS هم وزن بالایی داشته و هم GWQI به آن حساسیت بیشتری دارد. در واقع این مؤلفه در آب زیرزمینی شهرکرد هم بر الگوی GWQI مؤثرتر است و هم حذف آن باعث تغییرات بیشتری در GWQI می‌شود (۶ و ۹). در راجستان هند نیز دریافتند که مؤلفه سختی هم دارای وزن بالاتری بود و هم GWQI به آن حساسیت بیشتری داشت (۹). به‌نظر می‌رسد که اگر وزن مؤلفه‌ای فاصله فاحشی با مؤلفه‌های بعدی داشته باشد در تحلیل حساسیت نیز ممکن است حساس‌ترین مؤلفه ظاهر شود. در حالی که در آبخوان ناسانوی ژاپن (۶) با این که TDS و $SO_4^{2-}$ وزن بیشتری داشتند، ولی GWQI به $Mg^{2+}$ حساس‌تر بود. بنابراین می‌توان گفت: (۱) حساسیت GWQI به مؤلفه‌هایش از آبخوانی به آبخوان دیگر متفاوت است؛ (۲) شدت حساسیت از آبخوانی به آبخوان دیگر متفاوت است؛ و (۳) وزن بیشتر مؤلفه لزوماً به معنای حساسیت بیشتر GWQI نسبت به آن نیست.



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]

**جدول ۴. خلاصه آماری شاخص تغییر GWQI (واحد به درصد) با حذف تک نقشه در آب زیرزمینی شهرکرد**

| نقشه (مؤلفه) | کمینه | بیشینه | میانگین | انحراف معیار |
|---|---|---|---|---|
| pH | ۰/۶ | ۱/۰ | ۰/۸ | ۰/۱ |
| EC | ۰/۳ | ۰/۴ | ۰/۳ | ۰/۱ |
| TDS | ۰/۱ | ۰/۴ | ۰/۲ | ۰/۱ |
| TSS | ۲/۳ | ۴/۲ | ۳/۵ | ۰/۳ |
| Tu | ۰/۱ | ۱/۶ | ۰/۸ | ۰/۴ |
| TH | ۰/۴ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۰/۰ |
| $HCO_3^-$ | ۰/۴ | ۰/۸ | ۰/۷ | ۰/۰ |
| $Cl^-$ | ۰/۳ | ۰/۷ | ۰/۵ | ۰/۱ |
| $SO_4^{2-}$ | ۱/۰ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰/۱ |
| $Ca^{2+}$ | ۰/۱ | ۰/۹ | ۰/۶ | ۰/۱ |
| $Mg^{2+}$ | ۰/۱ | ۰/۶ | ۰/۴ | ۰/۱ |
| $Na^+$ | ۱/۲ | ۱/۴ | ۱/۳ | ۰/۱ |
| $K^+$ | ۰/۳ | ۰/۸ | ۰/۵ | ۰/۱ |

در جدول ۳ مؤلفه‌های کلسیم و منیزیم دارای میانگین رتبه بالایی هستند ولی در تحلیل حساسیت (جدول ۴) مشخص می‌شود که GWQI نسبت به آنها حساسیت ندارد. برعکس، در ناسانوی ژاپن با این که GWQI به منیزیم حساسیت بالایی داشت ولی این مؤلفه دارای میانگین رتبه‌ی پایینی بود (۶). در همین مطالعه، مؤلفه‌ی TDS دارای میانگین رتبه‌ی بالاتری بود ولی GWQI به آن حساسیت کمی داشت.

شدت حساسیت GWQI به مؤلفه‌هایش نیز از آبخوانی به آبخوان دیگر متفاوت است. در ناسانوی ژاپن مقدار تغییر حساس‌ترین شاخص ($Mg^{2+}$) در GWQI برابر ۰/۵ درصد بود (۶) در حالی که در آبخوان شهرکرد مقدار تغییر حساس‌ترین شاخص تغییر (TSS) در GWQI، ۳/۵ درصد و در راجستان هند مقدار تغییر حساس‌ترین شاخص در GWQI، ۳/۹۸ درصد است (۹).

## نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه بررسی کیفیت آب زیرزمینی شهرکرد براساس شاخص GWQI با استفاده از GIS بود. نتایج نشان داد:

۱. میانگین اکثر مؤلفه‌ها به‌جز TSS و Tu در حدود مطلوب WHO قرار داشت. براساس نقشه‌های TSS و Tu، تقریباً آب زیرزمینی همه آبخوان از حدود مطلوب شرب WHO خارج است. نقشه‌های EC، TDS و $Mg^{2+}$ نشان می‌دهند که در جنوب دشت شهرکرد مقدار این مؤلفه‌ها گاهی خارج از حدود مطلوب WHO برای آب شرب است.

۲. براساس نقشه GWQI کیفیت آب زیرزمینی شهرکرد از خیلی ضعیف (GWQI < ۱۰) در جنوب آبخوان تا خیلی بالا (GWQI > ۹۵) در شمال غربی آبخوان در تغییر است.

۳. براساس میانگین نقشه GWQI (با مقدار ۸۴) آب زیرزمینی شهرکرد عموماً دارای کیفیت مناسبی است. نقشه GWQI



[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]

نشان می‌دهد مقدار این شاخص از شمال غربی به جنوب کاهش می‌یابد که نشان دهنده کاهش کیفیت به‌سمت جنوب است. به‌طوری که در جنوب دشت کیفیت ممکن است خیلی پایین باشد.

۴. در نقشه GWQI حدود ۱۸، **۵۵** و ۲۷٪ از آبخوان به‌ترتیب در کلاس‌های با کیفیت پایین، متوسط و بالا قرار دارد که به‌ترتیب در جنوب، مرکز و شمال غربی دشت (آبخوان) واقع هستند.

۵. در آبخوان شهرکرد مؤلفه‌های TSS، pH، $Mg^{2+}$ و $Ca^{2+}$ بیشترین میانگین رتبه را دارا هستند و تأثیر بیشتری بر مقدار GWQI دارند با این حال، در این آبخوان، شاخص GWQI نسبت به TSS و $Na^{+}$ حساس‌تر است. بنابراین در آب زیرزمینی شهرکرد این دو مؤلفه بایستی با دقت بیشتری بررسی و پایش شوند.

۶. نقشه‌های مؤلفه‌ها نشان داد از شمال به جنوب دشت بر غلظت مؤلفه‌ها افزوده می‌شود. علت آن به شیب هیدرولیکی شمال به جنوب دشت نسبت داده شد. وجود تصفیه خانه فاضلاب، دامداری‌های فشرده، کشاورزی فشرده و مراکز صنعتی نیز از دیگر دلایل احتمالی افزایش غلظت‌ها به‌سمت جنوب هستند.

به‌نظر می‌رسد روش به‌کار رفته حاضر در ترسیم نقشه GWQI برای آبخوان شهرکرد و احتمالاً آبخوان‌های مشابه بسیار مناسب باشد زیرا قادر به‌انعکاس تغییرات مؤلفه‌های کیفی در این آبخوان است. پیشنهاد می‌شود که روش مذکور با درنظرگرفتن نیترات و فسفات نیز اجرا شود.

## منابع مورد استفاده


۱. حشمتی، س. س. ۱۳۹۰. پهنه‌بندی برخی شاخص‌های کیفیت آب زیرزمینی دشت شهرکرد جهت مصارف مختلف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد ۱۳۱ ص.

۲. رضائی، ع.، و ع. ل. میرمحمد میبدی. ۱۳۸۴. *آمار و احتمالات (کاربرد در کشاورزی)*. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.

۳. لاله‌زاری، ر. و س .ح. طباطبائی. ۱۳۸۹. خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی دشت شهرکرد. محیط شناسی ۳۶ (۱): ۶۲-**۵۵**.

۴. میرزایی، س. ۱۳۸۸. ارزیابی آسیب‌پذیری و تهیه نقشه‌های خطر آلودگی آبخوان دشت شهرکرد با استفاده از GIS و مدل‌های دراستیک و سینتکس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد.

5. APHA. 1998. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th ed., American Public Health Association Inc. Washington, USA.
6. Babiker, I., A. Mohamed and T. Hiyama. 2007. Assessing groundwater quality using GIS. Water Resources Management, 21:699–715.
7. Boyd, C. E. 2000. Water Quality, an Introduction. Kluwer Academic Poblishers. 323 pages.
8. ESRI, Inc. 2008. ArcGis TM. Version 9.3.www.esri.com.
9. Machiwal, D., K. J. Madan and C. M. Bimal. 2011. GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard-rock hilly terrain of Western India. Environ. Monitoring Assessment 174:645–663.
10. Pannatier Y. 1998. Variowin: Software for Data Analysis in 2D. Version 2.21. Springer Verlag. 93 pages.
11. World Health Organization (WHO). 2011. Guidelines for Drinking Water Quality. Vol. 1: Recommendations 3rd ed., WHO, Geneva.




[ Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.15.2 ]