



مجله پژوهش از دور

GIS ایران

سنجش از دور و GIS ایران / سال هفتم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۴
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.7, No. 2, Summer 2015

۱۰۷-۱۲۰



ارزیابی کیفیت شرب آب زیرزمینی دشت لردگان با استفاده از شاخص GWQI در محیط GIS

یاسر استواری^{۱*}، حبیب‌الله بیگی هرچگانی^۲، سیده سمیرا حشمتی^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۳. کارشناس ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۷/۲۶

چکیده

شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) یکی از شاخص‌های مهم در تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی است. هدف پژوهش حاضر ارزیابی کیفیت شرب آب زیرزمینی لردگان براساس شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) است. به این منظور، در ۳۲ حلقه چاه pH، EC، TDS (کل جامدات محلول)، TSS (کل جامدات معلق)، کدورت، یون‌های اصلی، نیترات (NO_3^{2-}) و فسفات (PO_4^{2-}) اندازه‌گیری و سختی کل محاسبه شد. نقشه مؤلفه‌ها به روش وزن‌دهی معکوس فاصله رسم شد. به منظور محاسبه شاخص GWQI نقشه هر مؤلفه نرمال شد و براساس آنها نقشه‌های رتبه به دست آمدند. سپس با استخراج وزن هر مؤلفه از نقشه، رتبه آن و نقشه شاخص GWQI تهیه شد. آب زیرزمینی لردگان براساس میانگین نقشه GWQI با مقدار ۸۳ کیفیت مناسبی داشت. نقشه GWQI نشان داد که کیفیت آب شرب از جنوب غرب به سمت شمال کاهش می‌یابد، که به وجود مراکز کشاورزی فشرده، تصفیه‌خانه فاضلاب در شمال دشت و سازند گچساران در شمال دشت نسبت داده شد. تحلیل حساسیت به روش حذف تک‌نقشه‌ها نشان داد که شاخص GWQI در آبخوان لردگان نسبت به Tu و TSS و تا اندازه‌ای Na^+ حساس‌تر است و این دو مؤلفه بایستی با دقت و تکرار بیشتری اندازه‌گیری شوند.

کلیدواژه‌ها: آبخوان لردگان، کیفیت آب شرب، شاخص GWQI، نقشه‌های نرمال، نقشه‌های رتبه، تحلیل حساسیت، GIS.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: شهرکرد، کیلومتر ۲ جاده سامان دانشگاه لردگان، دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک، صندوق پستی ۱۱۵.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و بالارفتن استانداردهای زندگی، تقاضای آب از منابع زیرزمینی روبه افزایش است. به دنبال افزایش مصرف آب‌های زیرزمینی کیفیت این منابع کاهش می‌یابد، بنابراین ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی ضروری است (Sandara et al., 2010). در ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده از ابزارها و تکنیک‌های مناسب برای پردازش داده‌های کیفی بسیار کارآمد است، زیرا ارزیابی کیفیت آب با وجود حجم زیاد داده‌ها دشوار است (Sharma & Patel, 2010). یکی از روش‌های مفید برای ارزیابی کیفیت آب، شاخص کیفیت آب (WQI) است (Babiker et al., 2007). شاخص‌های کیفیت آب (WQI) به روش‌های مختلفی تعریف و محاسبه می‌شوند، ولی در همه روش‌ها برآیند اثر مؤلفه‌های مختلف کیفی آب در قالب عددی کلی که بیانگر کیفیت آب است ارائه می‌شود (حشمتی، ۱۳۹۰).

شاخص کیفیت آب است که برای آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. یکی از محاسن GWQI انعطاف‌پذیری آن در استفاده از مؤلفه‌های موجود است. در تعیین GWQI معمولاً از استانداردهای WHO برای آب شرب استفاده می‌شود. ابتدا تعدادی از مؤلفه‌های فیزیکی-شیمیایی آب زیرزمینی اندازه‌گیری می‌شوند (Babiker et al., 2007 و حشمتی، ۱۳۹۰) و پس از انجام پردازش‌های مکانی، نقشه هر مؤلفه کیفی تهیه می‌شود. سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزاری کارآمد برای پردازش‌های مکانی و درون‌یابی مؤلفه‌هاست. در مرحله آخر با انجام محاسباتی روی نقشه‌های به دست آمده از مؤلفه‌های کیفی آب، نقشه شاخص GWQI استخراج می‌شود (Machiwal et al., 2011). ساندرآ کومار و همکاران (۲۰۱۰) ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی را جام (هند) را با استفاده از GWQI انجام دادند. در این مطالعه مؤلفه‌های pH، EC، کدورت، کلر و سختی کل اندازه‌گیری و شاخص GWQI محاسبه شدند و نقشه مؤلفه‌ها و GWQI تهیه

شد. نتایج نشان دادند که غلظت عوامل مورد بررسی به دلیل سختی و کلر بالا بود. براساس GWQI کیفیت آب در وضعیت نامناسبی بود.

راما کریشنا و همکاران (۲۰۰۹) شاخص کیفیت آب زیرزمینی تامکورتالوک (هند) را بررسی و از مؤلفه‌های pH، EC، TDS، TH، آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی استفاده کردند. در مطالعه آنها دامنه شاخص کیفیت آب بین ۸۹ تا ۶۶۰ به دست آمد و مقادیر بالای WQI ناشی از سختی آب، TDS و بی‌کربنات بود. نتایج نشان دادند که مصرف آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه باید با ملاحظات صورت گیرد. در این تحقیق بین سختی، منیزیم، بی‌کربنات، کلر، جامدات محلول و سولفات هم‌بستگی مثبت و معناداری وجود داشت.

رضا و سینگ (۲۰۱۰) وضعیت کیفی آب زیرزمینی اوریسا در هند را با استفاده از شاخص کیفیت آب (GWQI) بررسی کردند. نمونه‌های آب از ۲۴ حلقه چاه در تابستان و زمستان جمع‌آوری شدند. مؤلفه‌های pH، TDS، TH، کدورت، کلراید، کلسیم و منیزیم برای محاسبه شاخص GWQI استفاده شدند. کلسیم و منیزیم از کاتیون‌های مؤثر بر کیفیت آب بودند. شاخص کیفیت آب در دامنه ۱۴ تا ۵۷ در تابستان و در دامنه ۱۹ تا ۶۷ در زمستان قرار گرفت. غلظت جامدات محلول در فصل سرد بیشتر بود که نشانه کاهش کیفیت آب بود. آنها نتیجه گرفتند که زیادی املاح محلول در طول دوره بارندگی موجب کاهش کیفیت آب در مقایسه با فصل تابستان شده است.

در محاسبه GWQI تحلیل حساسیت اهمیت زیادی دارد. نتیجه تحلیل حساسیت تشخیص مؤلفه‌هایی است که در یک آبخوان بیشترین (یا کمترین) تأثیر را بر کیفیت کلی آب خواهند داشت. یکی از روش‌های تحلیل حساسیت GWQI که در محیط GIS انجام‌پذیر است، اثر حذف تک‌نقشه یک مؤلفه بر GWQI است (Babiker et al., 2007).

یکی نیستند؛ و دیگر اینکه ممکن است از یک آبخوان به آبخوانی دیگر تغییر کنند.

تاکنون مطالعات چندانی در خصوص ارزیابی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) بر پایه GIS و تحلیل حساسیت در ایران انجام نشده و صرفاً تعداد محدودی مؤلفه در نظر گرفته شده است. آب زیرزمینی لردگان که از آبخوان‌های مهم استان چهارمحال و بختیاری به‌شمار می‌رود از نظر کیفیت آب شرب درخور مطالعه است. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی کیفیت آب شرب آب زیرزمینی لردگان با استفاده از GWQI در محیط GIS، تعیین مؤلفه‌های مؤثرتر بر GWQI، و تحلیل حساسیت GWQI نسبت به مؤلفه‌های خود در آب زیرزمینی لردگان به‌روش حذف تک‌نقشه است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی دشت لردگان

دشت لردگان یکی از دشتهای مهم استان چهارمحال و بختیاری است. این دشت با وسعتی نزدیک به ۶۰ کیلومتر مربع در طول‌های جغرافیایی ۵۰°۴۷ تا ۵۰°۱۰ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۱°۱۸ تا ۳۱°۳۷ قرار دارد (شکل ۱). در شکل سمت چپ شماره‌چاه‌ها، موقعیت شهر لردگان و برخی از روستاها و رودخانه‌ی نیشان مشخص شده است. بخش‌هایی که نمونه‌برداری نشده مرتع بوده و زمین کشاورزی و چاه مشاهده‌ای وجود نداشته است.

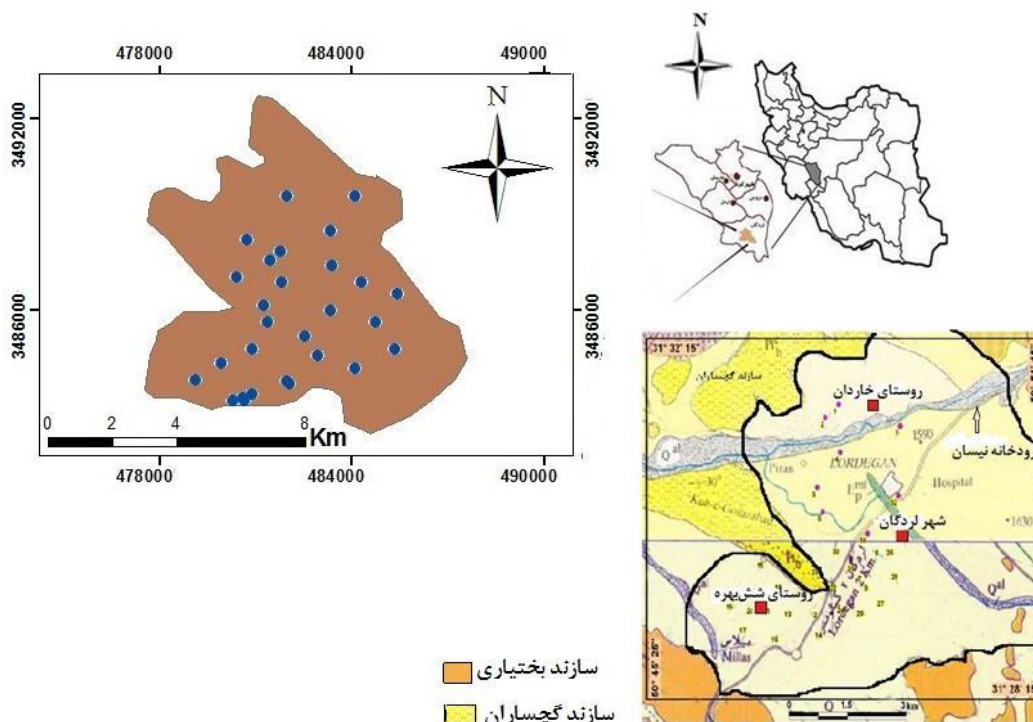
حجم زیادی از آب‌های زیرزمینی دشت در بخش کشاورزی در فصل زراعی استفاده می‌شود و بخش عمده‌ای از آب شرب مردم شهر لردگان نیز از همین آبخوان تأمین می‌شود. سازندهای آسماری چهارم شامل سنگ‌های آهکی و دولومیتی، سازندهای غالب زمین‌شناسی منطقه هستند. در شمال‌غرب دشت نیز سازند گچساران شامل مارن‌های خاکستری و قرمز همراه با گچ و نمک رخنمون دارد.

تاکنون، چندین مطالعه در زمینه ارزیابی GWQI بر پایه GIS انجام شده است. بایکر و همکاران (۲۰۰۷) شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) حوضه ناسانو (ژاپن) را در محیط GIS بررسی کردند. مؤلفه‌های Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، K^+ ، Cl^- و SO_4^{2-} و کل جامدات محلول (TDS^1) در ۵۰ حلقه چاه اندازه‌گیری شد. از نقشه‌های تهیه‌شده به‌روش کریجینگ، نقشه‌های نرمال و از هر نقشه نرمال نقشه‌های رتبه به‌دست آمد. میانگین وزن مؤلفه‌های TDS و SO_4^{2-} بیش از سایر مؤلفه‌ها بود. در تحلیل حساسیت مشخص شد که حذف Mg^{2+} در مقایسه با حذف سایر مؤلفه‌ها باعث تغییر بیشتری در GWQI می‌شود و حساسیت شاخص GWQI بیش از Mg^{2+} است.

کومار و همکاران (۲۰۱۰) به ارزیابی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی منطقه آندراپرادش هند با استفاده از GWQI در محیط GIS پرداختند. در ۱۷۰ نمونه آب چاه مؤلفه‌های pH، کدورت، قلیائیت کل و نترات اندازه‌گیری و از روش وزن‌دهی معکوس فاصله برای پهنه‌بندی شاخص‌های مؤلفه‌های کیفی استفاده شد. میانگین وزن مؤلفه‌های کدورت و pH بالاتر از سایر مؤلفه‌ها بود. آنها بیان کردند که محاسبه شاخص GWQI با استفاده از نقشه‌های کیفی در محیط GIS مناسب‌تر از روش‌های محاسباتی است.

لاتا و راتو (۲۰۱۰) به ارزیابی و توزیع مکانی کیفیت آب زیرزمینی در ویساخپتام هند با استفاده از GWQI در محیط GIS پرداختند. برای این منظور مؤلفه‌های pH، قلیائیت، کل جامدات محلول، سختی کل (TH^2) و کلرید در ۲۴ چاه اندازه‌گیری شدند. از روش وزن‌دهی معکوس فاصله برای پهنه‌بندی مؤلفه‌های کیفی استفاده شد. مؤلفه‌های pH و منیزیم، میانگین وزن بالاتری از سایر مؤلفه‌ها داشتند. نتایج نشان دادند که آب زیرزمینی برای هدف شرب در اغلب مناطق کیفیت نامناسبی دارد. از مطالعات مذکور نتیجه‌گیری می‌شود که مؤلفه‌هایی که تأثیر بیشتری بر GWQI دارند و مؤلفه‌هایی که GWQI به آنها حساس‌تر است لزوماً

1. Total Dissolve Solid
2. Total Hardness



شکل ۱. موقعیت چاه‌ها و محدوده دشت لردگان (نقشه سمت چپ) و نقشه زمین‌شناسی منطقه (نقشه سمت راست). در نقشه سمت راست موقعیت چاه‌ها، شهر لردگان، برخی روستاها و رودخانه نیسان نیز مشخص است

منبع: شرکت آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۷

۲-۲- نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

در پژوهش حاضر از میانگین نتایج چهار نوبت نمونه‌برداری (یک نوبت در بهار، دو نوبت در تابستان و یک نوبت در پاییز) سال ۱۳۸۹ از ۳۲ حلقه چاه در سال ۱۳۸۹ استفاده شد. نمونه‌ها در بطری‌های ۵۰۰ میلی‌لیتر پلی‌اتیلنی تیره‌رنگ که از قبل اسیدشویی و سپس با آب مقطر شست‌وشو داده شده بودند، جمع‌آوری شدند. بطری‌های محتوی نمونه، داخل یخدان زیر یخ به آزمایشگاه گروه خاک‌شناسی دانشگاه شهرکرد منتقل و در یخچال نگهداری و در اسرع وقت براساس استانداردهای (۱۹۹۸) APHA تجزیه شدند. شاخص‌های هدایت الکتریکی و pH نمونه‌ها با دستگاه istek مدل ۹۱۵PDC بلافاصله پس از انتقال به آزمایشگاه قرائت شد. نیترات نمونه‌ها بلافاصله به روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شد. کل جامدات معلق

(TSS^1) با عبور ۱۰۰ میلی‌لیتر آب از صافی $0.45 \mu m$ و خشکاندن صافی در $105^\circ C$ درجه سانتی‌گراد و توزین با ترازوی آنالیتیک به دست آمد. فسفر ذره‌ای پیش از عبور آب از صافی $0.45 \mu m$ و فسفر محلول بعد از عبور آب از صافی $0.45 \mu m$ به روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شد. مقدار کل جامدات حل‌شده نمونه‌ها با تبخیر حدود ۱۰۰ میلی‌لیتر آب صاف‌شده و توزین مانده اندازه‌گیری شد. کدورت (Tu^2) نمونه‌ها با کدورت‌سنج مدل PC Compact قرائت و با واحد ntu بیان شد. کلراید در نمونه‌ها بلافاصله پس از انتقال به آزمایشگاه به روش تیتراسیون با نیترات نقره اندازه‌گیری شد. سدیم و پتاسیم به روش شعله‌سنجی، کلسیم و

1. Total Suspended Solid
2. Turbidity

هر مؤلفه از نقشه رتبه آن استخراج شد و به‌عنوان وزن آن مؤلفه مورد استفاده قرار گرفت.

گام پنجم: سرانجام، نقشه GWQI از رابطه (۴) به‌دست آمد (Babiker et al., 2007):

رابطه (۴)

$$GWQI = 100 - [(W_1R_1 + W_2R_2 + \dots + W_nR_n) / n]$$

که در آن، W_i وزن نسبی هر مؤلفه و مقدار آن بین ۱ تا ۱۰؛ R_i نقشه رتبه هر مؤلفه؛ و n تعداد مؤلفه‌های کیفی به‌کاررفته در تعیین GWQI است. مقدار پیکسل‌های نقشه GWQI بین صفر تا ۱۰۰ قرار می‌گیرد. هرچه مقدار پیکسل‌ها به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد نشانه کیفیت بهتر آب زیرزمینی و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد نشانه کیفیت پایین‌تر آب زیرزمینی است (Machiwal et al., 2011).

گام ششم: گروه‌های کیفی آب در نقشه GWQI در ده رده از صفر تا ۱۰۰ درصد طبقه‌بندی شدند، به‌طوری‌که رده‌های نزدیک‌تر به ۱۰۰ کیفیت بهتر و رده‌های نزدیک‌تر به صفر کیفیت ضعیف‌تر را نشان می‌دهند. در ادامه، درصد پوشش و مساحت رده‌های کیفیت آب استخراج شدند.

۲-۴- تحلیل حساسیت GWQI به حذف مؤلفه‌ها

تحلیل حساسیت به‌روش حذف نقشه صورت گرفت. در این تحلیل نقشه WQI پانزده مرتبه و هر بار با حذف یکی از نقشه‌های رتبه مربوط به یک مؤلفه، تهیه شد و اثر حذف هر مؤلفه روی نقشه کلی GWQI که با استفاده از پانزده مؤلفه تهیه شده بود بررسی شد. برای این منظور، نقشه‌های شاخص تغییر از رابطه (۵) محاسبه شدند (Machiwal et al., 2011):

رابطه (۵)

$$V_{wi} = [(GWQI_{15} - GWQI_{wi}) / GWQI_{15}]100$$

که در آن، V_{wi} شاخص تغییر بدون نقشه i ام، $GWQI_{wi}$ نقشه شاخص کیفیت آب بدون نقشه رتبه i ام، و $GWQI_{15}$ نقشه شاخص کیفیت آب با حضور پانزده مؤلفه کیفی است. کلیه عملیات تهیه نقشه

منیزیم به‌روش تیتراژ با EDTA، بی‌کربنات به‌روش تیتراژ با اسیدسولفوریک و سولفات به‌روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شدند. از یون‌های Ca^{2+} و Mg^{2+} به‌منظور محاسبه سختی کل استفاده شد. سختی کل آب برمبنای کربنات کلسیم معادل از رابطه (۱) به‌دست آمد (Boyd, 2000):

رابطه (۱)

$$TH (\text{mg of CaCO}_3) = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) * 50$$

۲-۳- مراحل تهیه نقشه GWQI

گام نخست: نقشه‌های همه ۱۵ مؤلفه کیفی اندازه‌گیری شده با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس فاصله در محیط ArcGIS9.3 تهیه شدند (ESRI Inc, 2008).

گام دوم: نقشه‌های نرمال‌شده هر مؤلفه (NI) با استفاده از رابطه (۲) تهیه شدند:

رابطه (۲)

$$NI = (C - C_m) / (C + C_m)$$

که در آن، C مقدار هر پیکسل در نقشه اولیه هر مؤلفه و C_m بیشترین حد مطلوب هر مؤلفه براساس استاندارد (۲۰۱۱) WHO است (Machiwal et al., 2011). در نقشه‌های حاصل مقدار هر پیکسل بین ۱- تا ۱+ قرار می‌گیرد.

گام سوم: هر نقشه NI به یک نقشه رتبه تبدیل شد. برای تهیه نقشه‌های رتبه از معادله چندجمله‌ای رابطه (۳) استفاده شد (Babiker et al., 2007):

رابطه (۳)

$$R = 0.5 * (NI)^2 + 4.5 (NI) + 5$$

که در آن، R وزن هر پیکسل براساس مقدار NI آن، و NI نقشه نرمال هر مؤلفه است. مقدار هر پیکسل در نقشه رتبه بین ۱ تا ۱۰ است. رتبه ۱ نشان‌دهنده کمترین میزان تأثیر بر کیفیت آب و رتبه ۱۰ نشان‌دهنده 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 چهارم: میانگین مقدار پیکسل‌های مربوط به

آب زیرزمینی آبخوان لردگان در جدول ۱ آمده‌اند. فسفر محلول در نمونه‌ها مشاهده نشد و فسفر نشان داده‌شده در جدول ۱ فسفر ذره‌ای است.

GWQI و تحلیل حساسیت مؤلفه‌ها در محیط Arc Map9.3 انجام شدند (ESRI Inc, 2008).

۳- نتایج و بحث

شاخص‌های آماری مربوط به مؤلفه‌های مورد بررسی در

جدول ۱. شاخص‌های آماری مؤلفه‌های کیفی در آبخوان لردگان، حدود مطلوب WHO برای آب شرب و درصد عدول

مؤلفه	واحد	میانگین	میانه	حداقل	حداکثر	دهک اول	دهک آخر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	WHO (2011)*	درصد عدول
pH	—	۷/۵۳	۷/۵۳	۷/۴۰	۷/۷۰	۷/۴۲	۷/۶۶	۰/۰۸	۱/۱	۷/۵ - ۸/۵	۰
EC	μS/cm	۶۹۲	۶۶۱	۴۵۱	۹۶۰	۵۶۴	۸۸۴	۱۲۲	۱۸	۷۵۰	۲۲
TDS	mg/L	۳۸۶	۳۷۷	۲۷۱	۵۳۶	۳۱۸	۴۷۹	۶۲	۱۶	۵۰۰	۶
TSS	mg/L	۳۰	۲۹	۱۹	۴۵	۲۴	۴۰	۶	۲۱	۲۵	۵۶
Tu	ntu	۷/۶	۷/۳	۵/۰	۱۱/۴	۶/۲	۱۰/۱	۱/۶	۲۱	۵	۹۴
TH	mg/L	۲۰۹	۲۰۶	۱۵۴	۲۶۴	۱۶۷	۲۵۱	۲۹	۱۴	۵۰۰	۰
HCO ₃ ⁻	mg/L	۱۶۶	۱۵۸	۱۴۴	۲۳۵	۱۳۳	۲۰۹	۳۱	۱۹	۳۰۰	۰
SO ₄ ²⁻	mg/L	۸۵	۸۰	۲۸	۳۰۷	۳۶	۱۱۹	۵۰	۵۹	۲۰۰	۰
Cl ⁻	mg/L	۵۹	۶۸	۴۰	۱۱۵	۴۰	۹۲	۲۰	۳۰	۲۰۰	۰
Ca ²⁺	mg/L	۲۷	۲۶	۱۵	۴۶	۱۷	۳۷	۸	۳۰	۷۵	۰
Mg ²⁺	mg/L	۳۴	۳۴	۱۹	۴۹	۲۳	۴۷	۸	۲۵	۳۰	۵۷
K	mg/L	۱/۵	۱/۲	۰/۷	۳/۵	۰/۸	۲/۶	۰/۸	۵۱	۱۲	۰
Na ⁺	mg/L	۱۲	۱۲	۸	۱۸	۹	۱۶	۲/۷	۲۳	۲۰۰	۰
NO ₃ ⁻	mg/L	۱۰/۰	۹/۴	۶/۲	۱۶/۰	۸/۵	۱۱/۶	۲/۰	۲۰	۵۰	۰
PO ₄ ²⁻	mg/L	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۸	۰/۰۱۷	۰/۰۶	۰/۰۲	۴۶	۰/۲	۰

* حدود مطلوب WHO (۲۰۱۱) برای آب شرب است. درصد عدول بیانگر تعداد نمونه آب/چاه است که از بین ۳۲ چاه، میانه مؤلفه در آنها از حد مطلوب WHO (۲۰۱۱) فراتر رفته است.

کدورت خارج از حد مطلوب است. مقدار Mg²⁺ نیز در ۵۷ درصد چاه‌ها بیشتر از حد مطلوب است. عدم‌مطلوبیت TSS حاکی از آن است که با تصفیه فیزیکی یا ته‌نشینی می‌توان آب شرب مطلوبی برای مردم شهرستان لردگان فراهم کرد. آب زیرزمینی لردگان از نظر کمینه و بیشینه سختی در گروه سخت تا خیلی سخت قرار دارد که حاکی از پتانسیل

آب زیرزمینی آبخوان لردگان براساس میانه یا میانگین مؤلفه‌های اندازه‌گیری‌شده از جمله کاتیون‌ها و آنیون‌ها و سختی (منهای TSS و کدورت) عموماً کیفیت مطلوبی برای شرب دارد. با این حال مقدار برخی مؤلفه‌ها (EC, TDS و به‌ویژه TSS، کدورت و Mg²⁺) گاهی از حد مطلوب فراتر می‌رود. تقریباً در تمام چاه‌ها مقدار TSS از حد مطلوب خارج است و در ۵۶ درصد چاه‌ها مقدار

شور و گچی گچساران در این بخش آبخوان و تغذیه این بخش از آبخوان با آب رودخانه شور نیسان که گنبدهای نمکی دشت مجاور عبور می‌کنند، می‌تواند عامل افزایش EC و TDS در قسمت شمالی آبخوان باشد. بر اساس نقشه‌های Tu و TSS به ترتیب حدود ۱۰۰ درصد و ۵۳ درصد از آبخوان دارای Tu و TSS بیشتر از حد مطلوب هستند (شکل ۲ و جدول ۱). با این حال شدت عدول Tu از حد مطلوب چندان زیاد نیست و Tu حداکثر به ۱۱/۴ ntu می‌رسد ولی شدت عدول TSS زیاد است (تا دوبرابر حد مطلوب). مقدار نیترات و فسفر در کلیه قسمت‌های آبخوان به ترتیب کمتر از ۲۰ mg/L و ۰/۲ mg/L بود که کمتر از حد استاندارد WHO بود.

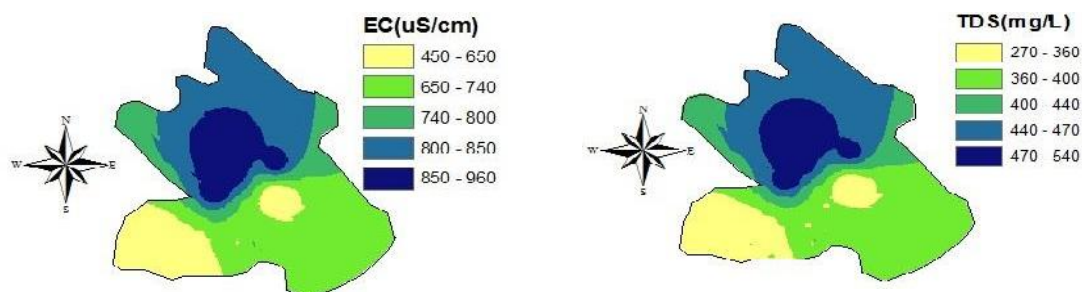
نقشه TH نشان می‌دهد که در هیچ کجای آبخوان مقدار سختی کل از حد مطلوب (۵۰۰ mg/L) فراتر نرفته است. آب حدود ۷۰ درصد از آبخوان دارای مقدار منیزیم خارج از حد مطلوب است که در شمال دشت واقع شده است (شکل ۲). در این بخش آبخوان، حضور سازند گچساران که شامل تشکیلات مارنی و دولومیتی است، احتمالاً عامل زیادی منیزیم است (شرکت آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۷). نقشه‌های Ca^{2+} ، Na^+ و SO_4^{2-} و Cl^- نشان می‌دهند که مقادیر هیچ‌کدام از این مؤلفه‌ها از حدود مطلوب (WHO ۲۰۱۱) فراتر نرفته است.

رسوب‌گذاری آب در تأسیسات آبی صنایع و سیستم‌های انتقال آب است (Boyd, 2000).

۳-۱- پهنه‌بندی مؤلفه‌های کیفی آب زیرزمینی لردگان

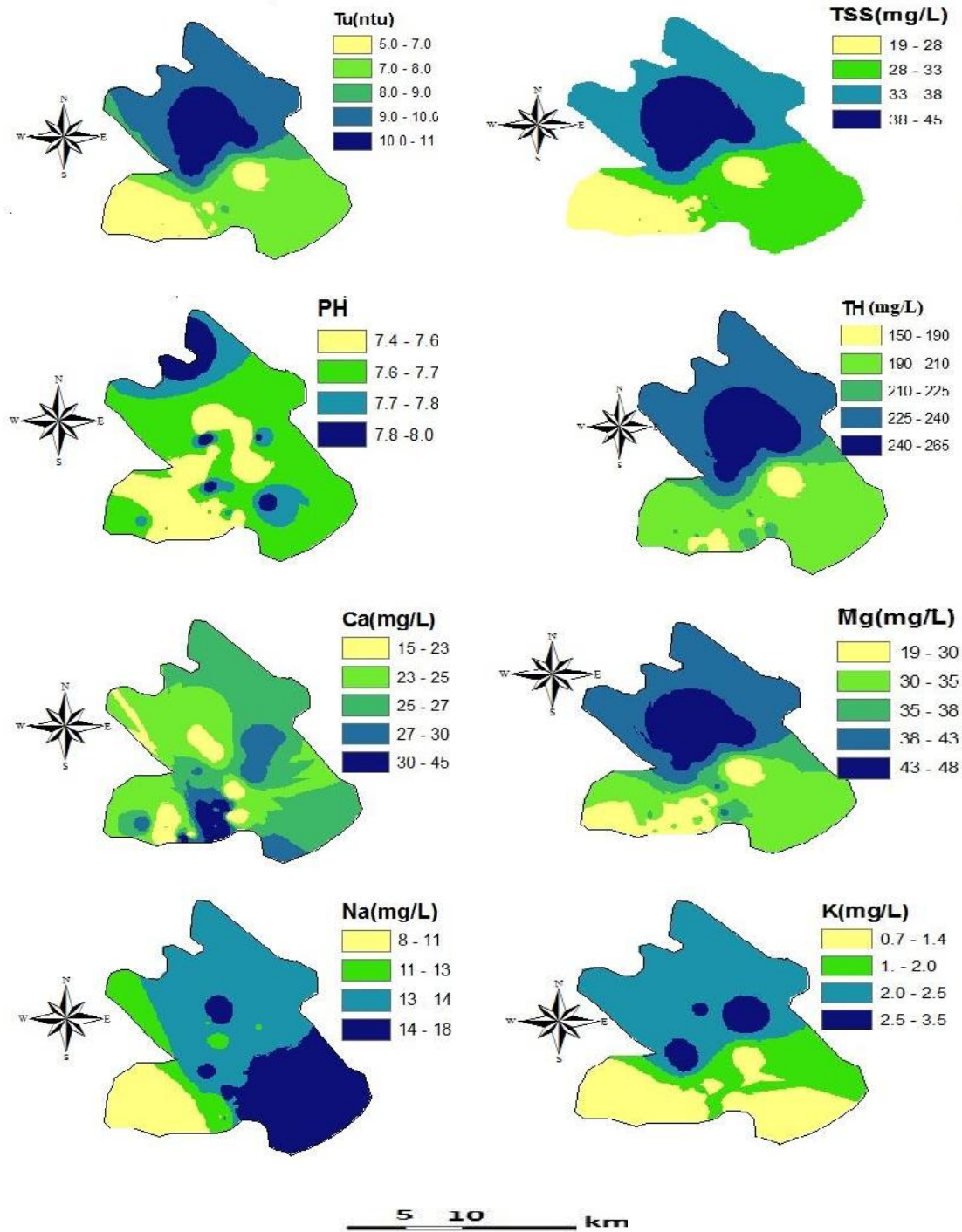
نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس فاصله رسم شدند (شکل ۲). طبق نقشه‌های شکل ۲ غلظت مؤلفه‌ها در بخش شمال و شمال‌غربی آبخوان لردگان بیشتر از بخش‌های دیگر آبخوان است. در قسمت‌های شمالی آبخوان حضور سازند شور و گچی گچساران موجب افزایش شوری و املاح محلول این بخش از آبخوان شده است (شرکت آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۷). در بخش جنوب‌غربی آبخوان میزان/غلظت مؤلفه‌ها عموماً حداقل است. در قسمت‌های جنوبی، سازند بختیاری با مقدار شوری و املاح کمتری از سازند گچساران، کیفیت آب زیرزمینی را کمتر کاهش می‌دهد. با توجه به شکل ۲ مقدار pH آب زیرزمینی در اکثر قسمت‌های آبخوان در حدود پذیرفتنی (۷/۵-۸/۵) بر اساس استاندارد WHO قرار دارد (WHO, 2011).

در نزدیک به ۲۰ درصد مساحت آبخوان (شمال دشت لردگان)، مقدار EC در آب زیرزمینی بیشتر از حد مطلوب (۷۵۰ $\mu S/cm$) شده است (شکل ۲). در ۷ درصد از آبخوان (شمال) مقدار TDS از حد مطلوب (۵۰۰ mg/L) فراتر می‌رود (شکل ۲). حلالیت سازند

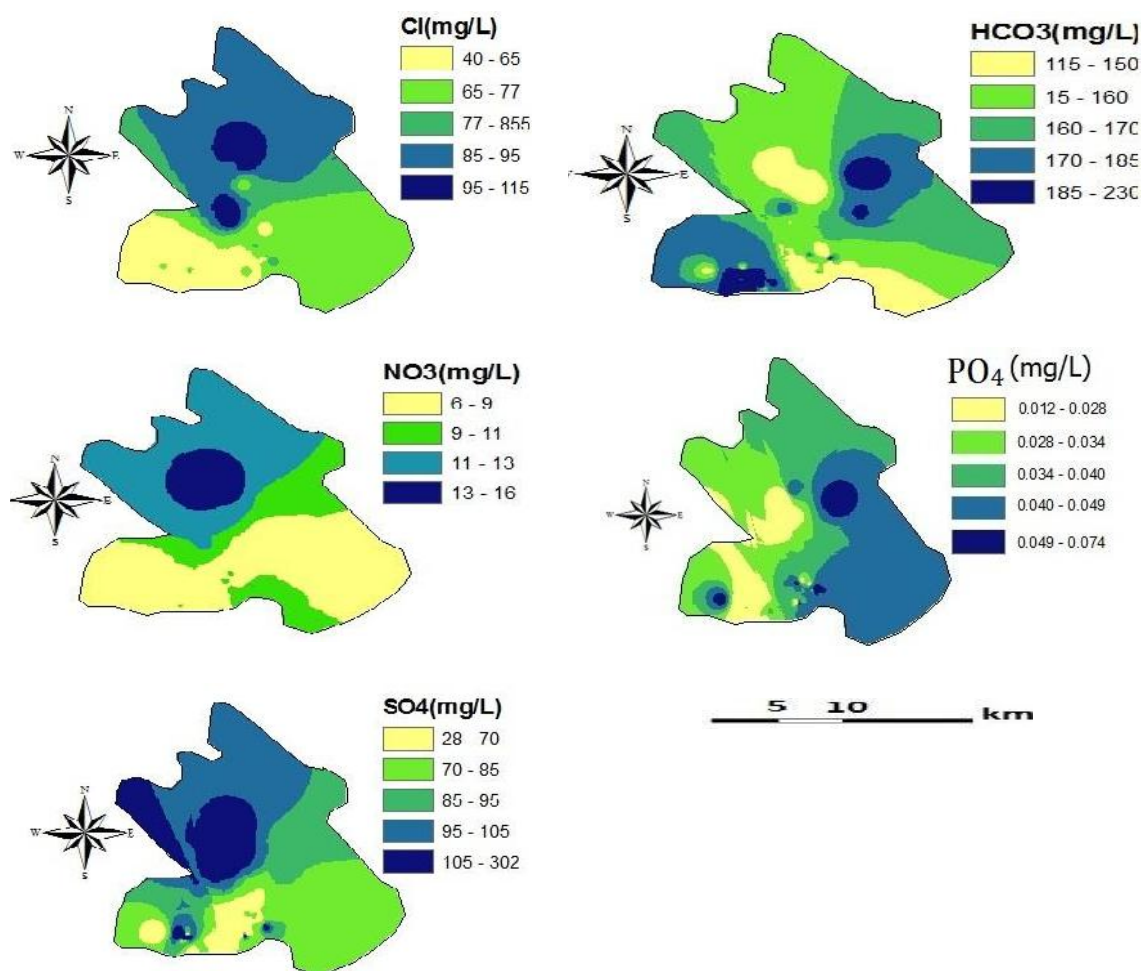


شکل ۲. نقشه‌های EC، TDS، TSS، Tu، pH، TH، Ca^{2+} ، Mg^{2+} و Na^+ در آب زیرزمینی آبخوان لردگان

ياسر استواری و همکاران



ادامه شکل ۲. نقشه‌های EC، TDS، TSS، Tu، pH، TH، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ و K^+ در آب زیرزمینی آبخوان لردگان



ادامه شکل ۲. نقشه‌های Cl⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, PO₄²⁻ و SO₄²⁻ در آب زیرزمینی آبخوان لردگان

دلایل، غلظت مؤلفه‌های کیفی در این بخش از آبخوان بیشتر از بخش‌های دیگر است.

۳-۲- تعیین وزن مؤلفه‌های کیفی آب زیرزمینی لردگان

تعیین مؤثرترین مؤلفه‌ها در تعیین شاخص کیفیت آب زیرزمینی دارای اهمیت است. شاخص‌های آماری ۱۴ نقشه رتبه مربوط به ۱۴ مؤلفه در جدول ۲ آمده شده است. میانگین مقدار عددی پیکسل‌های هر نقشه رتبه به عنوان وزن مؤلفه در نظر گرفته می‌شود. این وزن در رابطه (۴) اعمال می‌شود تا نقشه GWQI آب زیرزمینی

درصد عدول به دست آمده از نقشه هر مؤلفه با درصد عدول در جدول ۱ مطابقت کلی و خوبی دارد. نقشه‌ها نشان می‌دهند که عدول مؤلفه‌ها در شمال و شمال غربی آبخوان رخ می‌دهد. شمال آبخوان جایی است که تصفیه‌خانه فاضلاب لردگان و کشاورزی پرنهاده در آن واقع است. علاوه بر این جهت گرادیان هیدرولیکی از جنوب به سوی شمال دشت است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۷) و احتمال حمل آلاینده‌ها به این بخش از آبخوان قوی است، همچنین سطح آب زیرزمینی در این ناحیه از آبخوان از سایر قسمت‌ها بالاتر است (شرکت سهامی آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۷). به همین

دارای کمترین میانگین رتبه نسبت به سایر عوامل بودند (Babiker et al., 2007). در راجستان هند، سختی، EC، TDS و Mg^{2+} به ترتیب با وزن‌های ۷/۴۵، ۵/۸۹، ۵/۸۲ و ۵/۴۲ بیشترین تأثیر و مؤلفه‌های SO_4^{2-} و Na^+ با وزن‌های ۳/۰۷ و ۳/۷۷ کمترین تأثیر را بر GWQI داشتند (Machiwal et al., 2011). به نظر می‌رسد تفاوت در مؤلفه‌های مهم‌تر یا کم‌اهمیت‌تر و وزن آنها در هر آبخوان ناشی از سازندهای زمین‌شناختی خاص آبخوان و نیز کاربری زمین (در مورد نیترا و فسفر) مورد بحث باشد. بنابراین، ماهیت آهکی آبخوان لردگان می‌تواند دلیل اهمیت بیشتر مؤلفه‌های TSS، pH، کدورت و Mg^{2+} ، که عمدتاً وابسته به سیستم کارستی هستند، در این آبخوان باشد (شرکت سهامی آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۷).

به‌دست آید. با توجه به جدول ۲ مؤلفه‌های TSS، Tu، Mg^{2+} ، EC و pH در آب زیرزمینی لردگان به ترتیب بیشترین میانگین رتبه از ۶/۱۵ تا ۴/۹۱ را دارا هستند و احتمالاً باید باعث کاهش کیفیت آب شوند (Kumar et al., 2011).

در آبخوان آندراپرادش (ایالات جنوب هند) و pH بیشترین رتبه (Kumar et al., 2011) و در آبخوان ویساخپتام (جنوبی‌ترین منطقه در هند) pH و Mg^{2+} بیشترین رتبه را داشتند (Latha & Rao, 2010). در آبخوان لردگان، مؤلفه‌های K^+ و Na^+ (با وزن‌های کمتر از ۲) به ترتیب کمترین میانگین‌های رتبه (یا وزن) را دارند و احتمالاً تأثیر کمتری در کاهش کیفیت آب زیرزمینی لردگان دارند. در حوضه ناسانو (ژاپن) مؤلفه‌های TDS و SO_4^{2-} به ترتیب با وزن‌های ۱/۹ و ۱/۶ دارای میانگین رتبه بالاتر و Mg^{2+} با وزن ۱/۱

جدول ۲. شاخص‌های آماری نقشه‌های رتبه‌سزده مؤلفه کیفی آب زیرزمینی لردگان

مؤلفه	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
pH	—	۴/۸۲	۵/۰	۴/۹۱	۰/۰۲
EC	$\mu S/cm$	۳/۹۱	۵/۵۵	۴/۹۷	۰/۲۸
TDS	mg/L	۳/۷۱	۵/۱۶	۴/۵۶	۰/۲۵
TSS	mg/L	۴/۴۵	۶/۳۲	۵/۶۱	۰/۳۴
Tu	ntu	۴/۹۷	۶/۸۳	۶/۱۵	۰/۳۳
TH	mg/L	۲/۷۵	۳/۶۶	۳/۳۳	۰/۱۶
HCO_3^-	mg/L	۳/۱۰	۴/۴۲	۳/۷۳	۰/۱۳
SO_4^{2-}	mg/L	۱/۹۱	۵/۹۳	۳/۴۱	۰/۲۵
Cl ⁻	mg/L	۲/۲۳	۳/۸۲	۳/۱۴	۰/۲۶
Ca^{2+}	mg/L	۲/۲۲	۳/۹۵	۲/۹۳	۰/۱۲
Mg^{2+}	mg/L	۴/۰۴	۶/۱۰	۵/۴۸	۰/۳۴
K	mg/L	۱/۴۰	۲/۶۵	۱/۹۷	۰/۲۶
Na^+	mg/L	۱/۲۸	۱/۵۸	۱/۴۴	۰/۰۵
NO_3^-	mg/L	۱/۷۹	۲/۸۲	۲/۲۹	۰/۱۶
PO_4^{2-}	mg/L	۱/۴۱	۳/۰۵	۲/۱۵	۰/۱۸

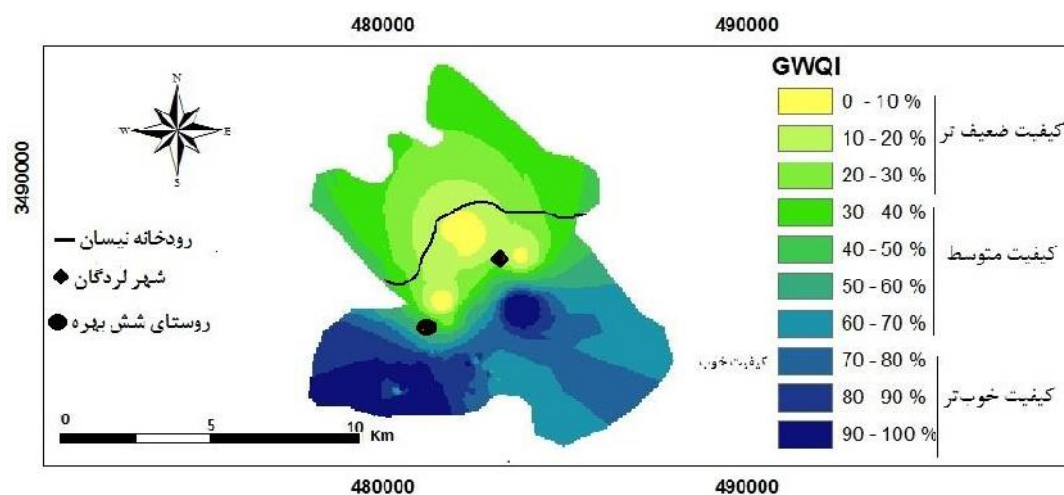
* میانگین رتبه هر نقشه (ستون چهارم از سمت راست) به‌عنوان وزن در مرحله بعدی برای محاسبه GWQI به‌کار رفته است.

۳-۲- پهنه‌بندی GWQI

نقشه GWQI آب زیرزمینی لردگان در شکل ۳ نشان داده شده است. این نقشه براساس ۱۵ مؤلفه کیفیت اندازه‌گیری شده با استفاده از وزن مؤلفه‌ها (جدول ۲، ستون میانگین) و رابطه (۴) رسم شده است. آب زیرزمینی دشت لردگان عموماً دارای کیفیت بالا (GWQI با میانگین ۸۳) است. به‌طور نسبی کیفیت از جنوب به شمال دشت کاهش دارد (شکل ۳). این روند با روند مؤلفه‌های کیفی در طول آبخوان کاملاً هم‌خوانی دارد (شکل ۲). در اکثر نقشه‌های قبلی نیز دیده می‌شود که کیفیت آب براساس هر مؤلفه از جنوب‌غربی به سمت شمال کاهش یافت. بنابراین، GWQI محاسبه شده توانست که برآیند مؤلفه‌ها را در

آبخوان لردگان به‌خوبی منعکس سازد.

در نقشه GWQI ده رده کیفیت آب با فاصله ۱۰ درصد از ۰ تا ۱۰۰ درصد تعریف شده است. سه رده با کمترین مقادیر (۳۰-۰ درصد) به‌عنوان گروه با کیفیت پایین‌تر طبقه‌بندی شده است با توجه به نقشه GWQI این سه رده در شمال دشت واقع شده‌اند. چهار رده بعدی (۷۰-۳۰ درصد) در گروه با کیفیت متوسط قرار دارند که عموماً در جنوب‌شرقی دشت واقع شده‌اند. سه رده آخر (۱۰۰-۷۰ درصد) در گروه با کیفیت بالاتر طبقه‌بندی شدند که جنوب‌غربی دشت را پوشش دادند. مساحت رده‌های نقشه GWQI به همراه درصد پوشش هر رده در جدول ۳ داده شده است.



شکل ۳. نقشه GWQI آبخوان لردگان براساس نقشه‌های ۱۵ مؤلفه اندازه‌گیری شده

جدول ۳. رده‌های کیفیت آب زیرزمینی لردگان (بر اساس GWQI) و مساحت و درصد پوشش هر رده و محل عمومی وقوع در آبخوان شهرکرد

محل عمومی وقوع	مساحت (km ²)	درصد پوشش	رده کیفیت آب	GWQI (%)
شمال	۱۵/۵	۲۶	پایین‌تر	۰-۳۰٪
جنوب تا مرکز دشت	۲۶/۵	۴۴	متوسط	۳۰-۷۰٪
جنوب‌غربی دشت	۱۸	۳۰	بالاتر	۷۰-۱۰۰٪

۳-۳- تحلیل حساسیت GWQI به مؤلفه‌های کیفی آن

تحلیل حساسیت مشخص می‌کند که GWQI به کدام مؤلفه‌ها حساس‌تر است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت به روش حذف تک‌نقشه در جدول ۴ آمده است. در آب زیرزمینی آبخوان لردگان، بزرگ‌ترین میانگین شاخص تغییر مربوط به مؤلفه Tu و سپس TSS و Na^+ است. شاخص GWQI در آبخوان لردگان به این مؤلفه‌ها حساس‌تر است، زیرا مقادیر مؤلفه‌های کدورت و بار معلق بسیار حساس است و خطای بسیار کم سبب تغییر مقدار در مقدار این مؤلفه‌ها می‌شود. با توجه به جدول ۴، شاخص GWQI به ترتیب به مؤلفه‌های TDS، SO_4^{2-} ، HCO_3^- و TH کمترین حساسیت را دارد، یعنی حذف آنها تغییرات چندانی در نقشه GWQI ایجاد نمی‌کند (بابیکر و همکاران، ۲۰۰۷). 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 را داشته است (Babiker et al., 2007).

مقایسه نتایج جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که مؤلفه Tu و TSS هم وزن بالایی دارد و هم GWQI به آن حساسیت بیشتری دارد. این مؤلفه در آب زیرزمینی لردگان هم بر الگوی GWQI مؤثرتر است و هم حذف آن باعث تغییرات بیشتری در GWQI می‌شود (Machiwal et al., 2011; Babiker et al., 2007). ماشیوال و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که مؤلفه سختی هم دارای وزن بالاتری است و هم GWQI به آن حساسیت بیشتری دارد. به نظر می‌رسد اگر وزن مؤلفه‌ای فاصله فاحشی با مؤلفه‌های بعدی دارد در تحلیل حساسیت نیز ممکن است به‌عنوان حساس‌ترین مؤلفه ظاهر شود. در آبخوان ناسانوی ژاپن با اینکه TDS و SO_4^{2-} وزن بیشتری داشتند، GWQI به Mg^{2+} حساس‌تر بود (Babiker et al., 2007). 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 به آن نیست.

جدول ۴. شاخص‌های آماری شاخص تغییر GWQI با حذف تک‌نقشه در آب زیرزمینی آبخوان لردگان

مؤلفه	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
pH	—	۰/۵۳	۰/۸۲	۰/۶۶	۰/۰۶
EC	$\mu\text{S}/\text{cm}$	۰/۴۷	۰/۸۷	۰/۷۴	۰/۰۶
TDS	mg/L	۰/۲۶	۰/۵۱	۰/۴۱	۰/۰۴
TSS	mg/L	۰/۹۲	۱/۵۵	۱/۳۱	۰/۰۲
Tu	ntu	۱/۳۹	۲/۱۱	۱/۸۵	۰/۱۲
TH	mg/L	۰/۳۰	۰/۴۷	۰/۴۱	۰/۰۲
HCO_3^-	mg/L	۰/۰	۰/۴۱	۰/۱۸	۰/۰۸
SO_4^{2-}	mg/L	۰/۰۲	۰/۷۰	۰/۳۶	۰/۰۴
Cl^-	mg/L	۰/۳۴	۰/۶۵	۰/۵۲	۰/۰۲
Ca^{2+}	mg/L	۰/۳۱	۰/۷۸	۰/۶۲	۰/۰۷
Mg^{2+}	mg/L	۰/۶۶	۱/۴۲	۱/۱۹	۰/۱۱
K	mg/L	۰/۸۹	۱/۱۲	۱/۰۲	۰/۰۳
Na^+	mg/L	۰/۹۶	۱/۳۳	۱/۱۸	۰/۰۶
NO_3^-	mg/L	۰/۷۸	۱/۰۳	۰/۹۱	۰/۰۴
PO_4^{2-}	mg/L	۰/۷۳	۱/۱۷	۰/۹۶	۰/۰۷

۵- منابع

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

شرکت سهامی آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۷، طرح مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب زیرزمینی محدوده‌های مطالعاتی کیار، شلمزار و لردگان، گزارش زمین‌شناسی.

APHA, 1998, **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**, 20th Edition, American Public Health Association Inc. Washington, USA.

Babiker I., Mohamed A., & Hiyama T., 2007, **Assessing Groundwater Quality using GIS**, Water Resources Management 21, PP. 699-715.

Boyd C.E., 2000, **Water Quality, an introduction**, Kluwer Academic Publishers, 323 pages.

ESRI Inc., 2008, ArcGisTM. Version 9.3. www.esri.com.

Kumar S., Kumar P., Babu R. & Rao C., 2010, **Assessment and mapping of ground water quality using GIS**, International Journal of Engineering Science and Technology, 2(11), PP. 6035-6046.

Latha S. & Rao N., 2010, **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, (2), PP.198-212.

در جدول ۲ مشاهده می‌شود که مؤلفه سدیم دارای میانگین رتبه پایینی است ولی در تحلیل حساسیت مشخص شد که GWQI نسبت به آن حساسیت نشان می‌دهد (جدول ۴). برعکس، در ناسانوی ژاپن با اینکه GWQI به منیزیم حساسیت بالایی داشت، این مؤلفه دارای میانگین رتبه پایینی بود (Babiker et al., 2007). در همین مطالعه، مؤلفه TDS دارای میانگین رتبه بالاتری بود ولی GWQI به آن حساسیت کمی داشت. بنابراین با قاطعیت بیشتری می‌توان گفت مؤلفه‌ای که وزن بالایی دارد لزوماً همان مؤلفه‌ای نیست که GWQI به آن حساسیت بالایی دارد یا برعکس.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان دادند که:

۱. براساس نقشه GWQI کیفیت آب زیرزمینی لردگان به‌طور نسبی از جنوب به شمال دشت به دلیل وجود سازندهای شور و گچساران در قسمت شمالی کاهش دارد.

۲. براساس میانگین نقشه GWQI (با مقدار ۸۳) آب زیرزمینی لردگان عموماً دارای کیفیت مناسبی است.

۳. در نقشه GWQI حدود ۲۶، ۴۴ و ۳۰ درصد از آبخوان به ترتیب در رده‌های با کیفیت پایین، متوسط و بالا قرار دارد که به ترتیب در شمال، مرکز و جنوب غربی دشت (آبخوان) واقع هستند.

۴. در آبخوان لردگان مؤلفه‌های Tu ، TSS، Mg^{2+} و EC بیشترین میانگین رتبه را دارند و تأثیر بیشتری بر مقدار GWQI می‌گذارند.

۵. در آبخوان لردگان، شاخص GWQI نسبت به Tu و TSS و Na^+ حساس‌تر است.

به نظر می‌رسد روش به کاررفته در مطالعه حاضر در رسم نقشه GWQI برای آبخوان لردگان و احتمالاً آبخوان‌های مشابه بسیار مناسب است، زیرا می‌تواند تغییرات مؤلفه‌های کیفی را در این آبخوان نشان دهد.

- Machiwal D., Madan K.J. & Bimal C.M., 2011, **GIS-based Assessment and Characterization of Groundwater Quality in a Hard-rock Hilly Terrain of Western India**, Environmental Monitoring Assessment, 174, PP. 645–663.
- Ramakrishnaiah C.R., Sadadhiv C. & Rangna G., 2009, **Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India**, E-Journal of Chemistry, 6(2), PP. 523-530.
- Reza R & Sing G., 2010, **Assessment of Ground Water Quality Status by using Water Quality Index Method in Orissa, India**, World Applied Sciences Journal, 9 (12), PP. 1392-1397.
- Sandara-Kumar K., Sandara Kumar P., Ratnakanth B. & Hanumantha R., 2010, **Assessment and Mapping of Groundwater Quality using Geographical Information Systems**, International Journal of Engineering Science and Technology, 2(11), PP. 6035-6046.
- Sharma N. & Patel J.N., 2010, **Evaluation of Groundwater Quality Index of the Urban Segments of Surat City, India**, International Journal of Geology, 1(4), PP. 1-4.
- World Health Organization (WHO), 2011, **Guidelines for Drinking Water Quality**, Vol. 1, Recommendations (3rd ed), WHO, Geneva.