

تحلیل زمین آماری شاخص کیفی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان مرودشت-خرامه، فارس)

افشین هنربخش و یاسر استواری

دوره ۴، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۷، صفحات ۱۹۳ - ۲۰۶

Vol. 4(3), Autumn 2018, 193 - 206

DOI: 10.22034/jewe.2018.112533.1219

**Geostatistical Analysis of Groundwater
Quality Index (Case Study:
Marvdasht-Kharameh Aquifer, Fars)**

Honarbakhsh A. and Ostovari Y.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله: هنربخش ا. و استواری ی. (۱۳۹۷). تحلیل زمین آماری شاخص کیفی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان مرودشت - خرامه، فارس). مجله محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۴، شماره ۳، صفحات: ۱۹۳ - ۲۰۶.

Citing this paper: Honarbakhsh A. and Ostovari Y. (2018). Geostatistical analysis of groundwater quality index (Case study: Marvdasht-Kharameh aquifer, Fars). J. Environ. Water Eng., 4(3), 193 - 206. DOI: 10.22034/jewe.2018.112533.1219

تحلیل زمین‌آماری شاخص کیفی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان مرودشت -

خرامه، فارس)

افشین هنربخش^{۱*} و یاسر استواری^۲

^۱دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

^۲پژوهشگر پسادکتر، بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

*نویسنده مسئول: afshin.honarbaksh@gmail.com

مقاله اصلی

تاریخ دریافت: [۱۳۹۶/۱۰/۰۹]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۷/۰۵/۱۷]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۷/۰۶/۱۵]

چکیده

یکی از روش‌های ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استفاده از شاخص کیفی آب زیرزمینی (GWQI) می‌باشد که یک روش ترکیبی از مؤلفه‌های کیفی مختلف آب زیرزمینی است. هدف از این مطالعه ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت مرودشت-خرامه برای آشامیدن با استفاده از GWQI با استفاده از فناوری زمین‌آمار در محیط GIS بود. برای این منظور از میانگین داده‌های کیفی ۵ ساله ۴۹ چاه استفاده گردید. GWQI با استفاده از روش وزن‌دهی به مؤلفه‌های کیفی محاسبه شد. از روش زمین‌آماری کریجینگ برای بررسی تغییرات مکانی و پهنه‌بندی مؤلفه‌های کیفی و GWQI استفاده گردید. مدل واریوگرام کروی بهترین برازش را بر مؤلفه‌های کیفی و GWQI داشت. نتایج نشان داد که مدل واریوگرام کروی با دامنه تأثیر 19200 m برای GWQI مناسب است. بر اساس تحلیل حساسیت EC، TDS و منیزیم بیشترین تأثیر و pH، سولفات و TA کمترین تأثیر را بر GWQI داشتند. دامنه GWQI از ۴۷ تا ۱۰۰۰ در تغییر بود. بر اساس نقشه GWQI قسمت‌های شمال غربی آبخوان دشت مرودشت-خرامه دارای کیفیت مناسب برای آشامیدن است، در حالی که در قسمت‌های جنوبی غیرقابل استفاده است.

واژه‌های کلیدی: آب آشامیدن؛ کریجینگ؛ آب زیرزمینی؛ GWQI؛ WHO.

۱- مقدمه

آب انجام دادند. نقشه کیفیت آب زیرزمینی بر اساس GWQI با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس فاصله تهیه شد، و مقدار GWQI محاسبه گردید. دامنه GWQI در نمونه‌های آب این منطقه از ۵۴/۴ تا ۸۶/۲ تغییر داشت. همه نمونه‌های آب بر اساس GWQI در کلاس خوب و مناسب برای آشامیدن قرار گرفتند.

(Rokbani et al. 2011) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و شاخص کیفیت آب زیرزمینی به ارزیابی آبخوان انفیدها در جنوب تونس پرداختند. برای این منظور از تعداد ۱۷ چاه نمونه‌برداری کردند و مؤلفه‌های pH، TDS، Cl⁻، EC، Ca²⁺، Mg²⁺، Na⁺، HCO₃⁻، SO₄²⁻، TH را در نمونه‌ها اندازه‌گیری کردند. شاخص کیفیت آب زیرزمینی برای آشامیدن را بر اساس رهنمود سازمان جهانی بهداشت (WHO 2008) محاسبه کردند. مؤلفه‌های کیفی و شاخص GWQI با روش وزن‌دهی معکوس فاصله در محیط GIS پهنه‌بندی و نقشه‌های کیفی ترسیم شد. نتایج نشان داد بر اساس نقشه TH بیشتر آب زیرزمینی منطقه در کلاس خیلی بد طبقه‌بندی می‌شوند. مقدار دامنه GWQI از ۷۷/۹ تا ۲۳۱/۸ تغییر داشت. بر اساس این شاخص ۸۲٪ نمونه‌های آب در کلاس ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی شدند. آن‌ها در کل پیشنهاد دادند که آب زیرزمینی آبخوان انفیدها برای آشامیدن مناسب نیست. (Ishaku (2011) در مطالعه‌ای به ارزیابی GWQI منطقه جیمی‌تایولا واقع در شمال شرقی نیجریه پرداخت. نتایج نشان داد که مقادیر هدایت الکتریکی، نیترات، کلر و اکسیژن محلول در فصل خشک و مقادیر کلر، نیترات، اکسیژن محلول، سختی کل و کروم در فصل مرطوب بیشتر از استاندارد سازمان جهانی بهداشت هستند. به‌طور کلی مقدار GWQI در فصل خشک ۹۶/۴ بود که کیفیت خوب آب را نشان می‌دهد، و در فصل مرطوب ۱۳۸/۵ بود که کیفیت ضعیف آب را نشان می‌دهد. زیادی مقدار GWQI به دلیل بالا بودن مقادیر پارامترهای کلر، نیترات، اکسیژن محلول و شوری تشخیص داده شد. (Rahimi et al. (2017) با ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان اردبیل از نظر شرب با استفاده از شاخص

کیفیت آب با برخی از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیست‌شناختی آب تعریف می‌شود (Ishaku 2011). به‌منظور شناخت وضعیت آب زیرزمینی و پدیده‌هایی که بین آب و زمین وجود دارد شناسایی کیفی آب ضروری خواهد بود. تعیین مشخصات کیفی آب زیرزمینی از جمله ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی نشان خواهد داد که آب تا چه حد برای مصارف مورد نظر مناسب است.

یکی از روش‌های ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استفاده از شاخص GWQI^۱ می‌باشد که یک روش ترکیبی از مؤلفه‌های کیفی مختلف آب زیرزمینی است (Babiker et al. 2007). شاخص‌های کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) به روش‌های مختلفی تعریف و محاسبه می‌شوند ولی در همه‌ی این روش‌ها برآیند اثر مؤلفه‌های مختلف کیفی آب در قالب یک عدد کلی که بیانگر کیفیت آب است ارائه می‌شود. یکی از محاسن GWQI انعطاف‌پذیری آن در استفاده از مؤلفه‌های موجود می‌باشد. به‌عبارت دیگر تعداد مؤلفه‌های کیفی ورودی برای محاسبه‌ی GWQI متغیر است. با استفاده از این عدد و طبقه‌بندی‌های GWQI، تصمیم‌گیری درباره کیفیت آب و قابلیت استفاده آن برای آشامیدن آسان و ساده است (Sing et al. 2011). شاخص کیفیت آب زیرزمینی بر اساس استانداردهای موجود برای آشامیدن طبقه‌بندی می‌شود.

(Jerome and Pius (2010) به ارزیابی GWQI در منطقه صنعتی بنگلور واقع در جنوب هند پرداختند. در نمونه‌های آب زیرزمینی مؤلفه‌های pH، TDS^۲، Cl⁻، EC، TH^۳ و قلیائیت کل (TA^۴) اندازه‌گیری و شاخص GWQI برای هر نمونه تعیین شد. مقدار GWQI در دامنه ۴۹/۲ تا ۴۰۹/۹ تغییر داشت. نتایج نشان داد مقدار مؤلفه‌های کیفی بیشتر از حد تعیین شده بر اساس استانداردهای موجود است. همچنین مقدار بالای GWQI به نامناسب بودن کیفیت آب زیرزمینی این منطقه دلالت دارد. (Sing et al. (2011) با استفاده از GWQI به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه تیگرای اتیوپی به‌منظور آشامیدن پرداختند. برای این منظور تجزیه و تحلیل‌های کامل فیزیکوشیمیایی را بر روی ۲۰ نمونه

³ Total Hardness

⁴ Total Alkalinity

¹ Groundwater Quality Index

² Total Dissolved Solids

نفر و روستاهای زیادی وجود دارد. در اطراف دشت سازندهایی از جنس آهک و در قسمت جنوب غربی دشت مروشدت-خرامه سازندهایی نظیر ساچون و سری هرمز و گچساران وجود دارد (Anonymous 2009).

۲-۲- نمونه‌برداری و تحلیل‌های آزمایشگاهی

در مجموع از داده‌های ۴۹ چاه در نگارش این مقاله بهره گرفته شد و از آنجایی که تغییرات مکانی مد نظر نبود، از میانگین داده‌های ۵ ساله مربوط به هر چاه استفاده شد. موقعیت چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها با دستگاه GPS ثبت شد. نمونه‌های آب در بطری‌های ۲۵۰ ml که قبلاً اسیدشویی و با آب مقطر شسته شده بودند، جمع‌آوری شدند. در موقع نمونه‌برداری نیز هر بطری سه بار با آب نمونه شستشو شد. نمونه‌ها پس از اضافه کردن چند قطره تولوئن برای جلوگیری از واکنش‌های زیستی در داخل یخدان در زیر یخ نگهداری و سریعاً به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های برداشت شده بر اساس استانداردهای (APHA 1998) تجزیه شدند. EC و pH نمونه‌ها با دستگاه Istek (مدل 915PDC) و کل جامدات محلول (TDS) نمونه‌ها با تبخیر ۱۰۰ ml آب و توزین رسوبات مانده اندازه‌گیری شد. کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، کربنات (CO_3^{2-}) و بی‌کربنات (HCO_3^-) به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شدند (APHA 1998). سدیم (Na^+) و پتاسیم (K^+) با روش شعله‌سنجی اندازه‌گیری شدند. نرمال بودن داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمون کلموگرف-اسمیرنف و تجزیه و تحلیل‌های آماری کلاسیک در محیط STATISTICA 8.0 از شرکت (StatSoft Inc, 2008) انجام شد.

TH و TA به ترتیب از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه شدند.

$$TH (CaCO_3 \text{ mg/l}) = 50 \times (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad (1)$$

$$TA (CaCO_3 \text{ mg/l}) = (HCO_3^- + CO_3^{2-}) \quad (2)$$

که در آن غلظت کلسیم، منیزیم، کربنات، و بی‌کربنات بر حسب meq/l است.

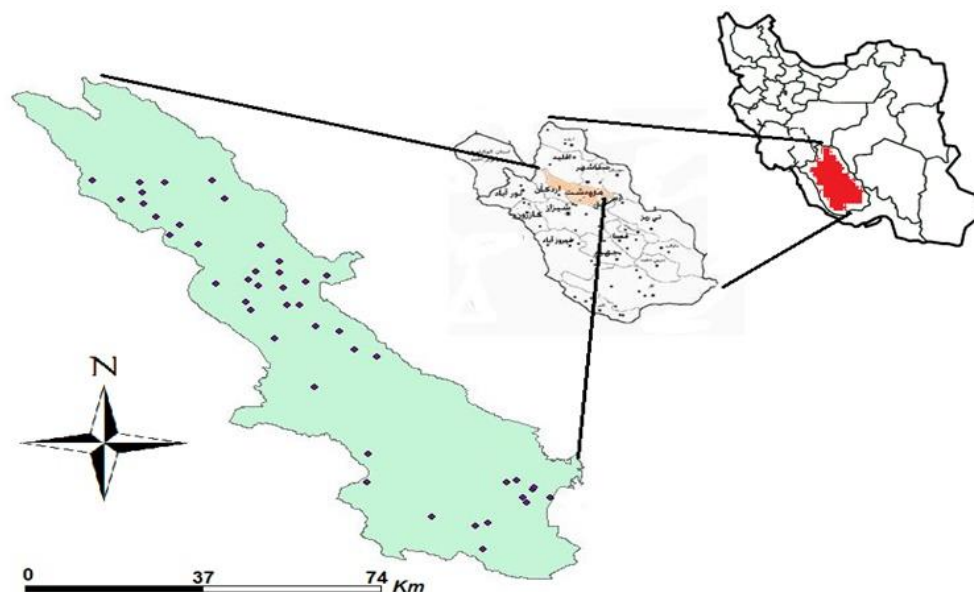
GWQI پرداختند. برای این منظور از اطلاعات ۷۶ حلقه چاه کشاورزی استفاده شد. نتایج نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی آبخوان اردبیل در وضعیت مطلوبی قرار دارد. Ostovari et al. (2017) به ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت لردگان با استفاده از GWQI و زمین‌آمار پرداختند. برای این منظور از اطلاعات کیفی ۳۲ حلقه چاه کشاورزی استفاده شد. نتایج نشان داد دامنه GWQI از ۴۴ تا ۷۴ متغیر بود که بر اساس آن، آب زیرزمینی لردگان در دو کلاس کیفیت خوب و ضعیف برای آشامیدن طبقه‌بندی شد.

دشت مروشدت-خرامه از دشت‌های مهم استان فارس و هم‌چنین ایران از لحاظ کشاورزی و صنعتی است، با توجه به اینکه آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین نیاز آب برای این مصارف می‌باشد، لذا ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی این منطقه از اهمیت بسزایی برخوردار است. تاکنون هیچ مطالعه‌ای به ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های کیفی در دشت مروشدت-خرامه که از دشت‌های مهم کشاورزی استان فارس بشمار می‌رود نپرداخته است. لذا هدف از این مطالعه اندازه‌گیری برخی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت مروشدت-خرامه و محاسبه و پهنه‌بندی شاخص کیفی آب زیرزمینی (GWQI) با استفاده از روش زمین‌آمار کریجینگ می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت مروشدت-خرامه با مساحت Km^2 ۳۹۴۱ در مرکز استان فارس بین طول‌های جغرافیایی $15'$ و 52° تا $27'$ و 53° شرقی و عرض‌های $19'$ و 29° تا $25'$ و 30° شمالی در حوزه آبریز بختگان قرار دارد. شکل (۱) موقعیت دشت مروشدت-خرامه و چاه‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. میانگین دمای سالانه $16^\circ C$ و میانگین بارندگی 400 mm می‌باشد. عمده فعالیت مردم کشاورزی و دامپروری بوده و منبع اصلی آب برای این مصارف، استفاده از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. در این دشت شهر مروشدت با جمعیتی حدود ۱۳۵۰۰۰



شکل ۱- موقعیت دشت مروودشت- خرامه و چاه‌های نمونه‌برداری
 Fig. 1 Location of Marvdasht Plain - Kharameh and sampling wells

جدول ۱- طبقه‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس GWQI
 (Ramakrishnaiah et al. 2009)

Table 1 Classification of drinking water quality based on GWQI

کلاس کیفیت آب	دامنه GWQI
کیفیت خوب	0-100
کیفیت ضعیف	100-200
کیفیت خیلی ضعیف	200-300
غیرقابل آشامیدن	300<

گام سوم) برای هر مؤلفه مقدار QW از رابطه (۵) محاسبه شد.

$$QW_i = Q \times RW_i \quad (۵)$$

و در نهایت GWQI از رابطه‌ی (۶) محاسبه شد.

$$GWQI = \sum QW_i \quad (۶)$$

طبقه‌بندی نوع کیفیت آب بر اساس GWQI در جدول (۱) آمد.

۳-۲- محاسبه شاخص GWQI

برای تعیین شاخص کیفی آب زیرزمینی مراحل زیر انجام شد (Ramakrishnaiah et al. 2009):

گام اول) تعیین وزن هر مؤلفه‌ی کیفی آب زیرزمینی. دامنه وزن هر مؤلفه کیفی بین ۱ تا ۵ تغییر می‌کند: وزن ۱ برای مؤلفه‌ای که کمترین اهمیت و وزن ۵ برای مؤلفه‌ای که بیشترین اهمیت را در کیفیت آب زیرزمینی دارد در نظر گرفته می‌شود (Sing et al. 2011; Ramakrishnaiah et al. 2009). وزن نسبی از رابطه‌ی (۳) محاسبه شد.

$$RW_i = W_i / \sum W_i \quad (۳)$$

که در آن: RW_i وزن نسبی هر مؤلفه کیفی، W_i وزن هر مؤلفه‌ی و $\sum W_i$ مجموع وزن‌های n مؤلفه می‌باشد.

گام دوم) تعیین کیفیت نسبی (Q_i): برای هر مؤلفه از رابطه‌ی (۴) محاسبه شد.

$$Q = (C_i / S_i) \times 100 \quad (۴)$$

که در آن: C_i غلظت یا مقدار هر مؤلفه در هر نمونه آب و S_i استاندارد شرب WHO برای همان مؤلفه می‌باشد.

میانگین متحرک وزنی است و بهترین تخمین‌گر ناریب می‌باشد که علاوه بر مقادیر برآورد شده، میزان خطای تخمین در هر نقطه (رابطه‌ی ۹) را نیز مشخص می‌نماید (Hooshmand et al. 2011).

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i \times f_i \quad (9)$$

که در آن، $F(x, y)$ مقدار غلظت تخمین زده شده در نقطه‌ای با مختصات x و y ؛ n تعداد نقاط اندازه‌گیری شده؛ w_i وزن نسبت داده شده به هر نقطه i ؛ و f_i مقادیر شاخص در هر نقطه اندازه‌گیری i است.

پهنه‌بندی و ترسیم نقشه‌های توزیع مکانی هر شاخص و نیز همبستگی نقشه‌ها در محیط ArcMap 9.3 از شرکت (ESRI Inc. 2008) انجام شد. نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و دیگر تجزیه‌های آماری در محیط STATISTICA 8.0 انجام شد. پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های توزیع مکانی GWQI در محیط ArcMap 9.3 انجام شد.

۳- یافته‌ها و بحث

جدول (۲) خلاصه آماری مولفه‌های کیفی اندازه‌گیری شده در آبخوان دشت مرودشت- خرامه را نشان می‌دهد. مقدار pH از ۶/۹۴ تا ۷/۹۸ در آبخوان دشت مرودشت- خرامه تغییر دارد که این دامنه pH در حد مجاز استاندارد برای آشامیدن می‌باشد (WHO 2008). میانگین مقدار EC، $2440 \mu\text{S/cm}$ شد که این مقدار خیلی بیشتر از حد مجاز استاندارد آب برای آشامیدن (یعنی $600 \mu\text{S/cm}$) می‌باشد.

از نظر مقدار EC تنها ۱۱٪ از نمونه‌های آب پایین‌تر از حد مجاز استاندارد آب برای آشامیدن بودند. میانگین mg/l TDS برای WHO ۲۴۰۰ می‌باشد که این مقدار بالاتر از حد مجاز WHO برای آشامیدن است. ۳۲٪ از نمونه‌ها مقدار TDS کمتر از حد مجاز (600 mg/l) دارند. با توجه به کمینه سختی کل (200 mg/l) آب مرودشت- خرامه آبی سخت است و بر اساس میانگین در رده خیلی سخت قرار می‌گیرد (Scott 2000).

۲-۴- تعیین حساسیت شاخص GWQI

در این مطالعه تحلیل حساسیت مؤلفه‌های به‌کار رفته در محاسبه‌ی GWQI به این صورت انجام شد: شاخص GWQI سیزده مرتبه هر بار با حذف یکی از مؤلفه‌ها محاسبه شد. سپس شاخص تغییر (V_{wi}) از رابطه‌ی (۷) برای هر ۱۳ مؤلفه به دست آمد.

$$V_{wi} = (|GWQI - GWQI_{wi}| / GWQI) \times 100 \quad (7)$$

که در آن، V_{wi} شاخص تغییر (٪) بدون مؤلفه‌ی i ام، $GWQI_{wi}$ شاخص کیفیت آب بدون مؤلفه‌ی i ام، و $GWQI$ شاخص کیفیت آب با در نظرگیری تمام ۱۳ مؤلفه است. پس از به دست آمدن شاخص تغییر برای هر مؤلفه خلاصه آماری شامل کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار محاسبه شد.

۲-۵- برازش مدل واریوگرام

پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها، واریوگرام تجربی $\gamma(h)$ در محیط variowin 2.21 ترسیم گردید و مدل تجربی به آن برازش شد (رابطه‌ی ۸).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (8)$$

که در آن N تعداد جفت مشاهدات، $Z(x_i)$ و $Z(x_i+h)$ مقدار مشاهدات متغیرها در نقطه‌های x_i و x_i+h است (Gaus et al. 2003). مشخصه‌های واریوگرام مشتمل بر دامنه تأثیر، آستانه تأثیر و اثر قطعه‌ای می‌باشد. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر شاخصی از قدرت ساختار مکانی متغیرهاست. چنانچه این نسبت کمتر از ۰/۲۵ شود، نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی و اگر این نسبت بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ قرار گیرد، بیانگر وابستگی مکانی متوسط و چنانچه این نسبت بزرگ‌تر از ۰/۷۵ گردد، نشان‌دهنده‌ی وابستگی مکانی ضعیف خواهد بود (Shi et al. 2007). وابستگی قوی مکانی به این معنی است که در دامنه تأثیر می‌توان متغیر مورد نظر را به‌خوبی تخمین زد.

از روش زمین‌آماري کریجینگ برای پهنه‌بندی مولفه‌های کیفی و شاخص GWQI استفاده گردید. روش کریجینگ متکی بر

جدول ۲- خلاصه آماری مؤلفه‌های کیفی در آب زیرزمینی مرودشت-خرامه

Table 2 Statistical summary of qualitative components in Marvdasht-Kharameh groundwater

مؤلفه	واحد	میانگین	میانه	حداقل	حداکثر	دهک اول	دهک آخر	ضریب تغییرات (WHO 2008)	رنج نمود
pH	—	7.47	7.45	6.94	7.98	7.17	7.71	2.85	6.5-8.5
EC	μS/cm	2440	1416	360	14697	580	11760	118	600
TDS	mg/l	2400	891	347	10270	391	8475	118	600
TH	mg/l	1123	393	200	5470	240	4000	121	500
TA	mg/l	313	292	168	552	206	447	30	120
SO ₄ ²⁻	mg/l	300	104	13	1501	34	925	126	250
Cl ⁻	mg/l	941	161	12	5117	19	3706	151	250
Ca ²⁺	mg/l	217	81	52	838	59	632	108	200
Mg ²⁺	mg/l	146	57	12	840	25	504	129	100
K ⁺	mg/l	7.4	2.4	0.4	32	0.7	27	12	12
Na ⁺	mg/l	398	112	6.0	220	17	1449	138	200

۳-۱- محاسبه GWQI

جدول (۳) مقادیر پیشنهادی وزن برای هر مؤلفه و نتایج محاسبات مراحل مختلف GWQI در آبخوان دشت مرودشت-خرامه را نشان می‌دهد. وزن هر مؤلفه بر اساس اهمیت آن در کیفیت آب برای آشامیدن تعیین شده است (Ramakrishnaiah et al. 2009). میانگین شاخص کیفی آب زیرزمینی (GWQI) در آبخوان دشت مرودشت-خرامه ۲۹۳ و دامنه تغییرات آن از حداقل ۴۶ تا حداکثر ۱۰۰۰ به دست آمد. بر اساس مقدار میانگین GWQI آب زیرزمینی مرودشت-خرامه در کلاس غیرقابل آشامیدن طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۱). مقدار GWQI در ۴۵٪ از نمونه‌ها بین ۰ تا ۱۰۰ (کلاس کیفیت مناسب)، در ۲۳٪ از نمونه‌ها بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ (کلاس ضعیف)، در ۸٪ از نمونه‌ها بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ (کلاس بسیار ضعیف) و در ۲۴٪ از نمونه‌ها بیشتر از ۳۰۰ (کلاس غیرقابل استفاده برای آشامیدن) بود (جدول ۱). EC با میانگین (QW=۶۲)، TDS با میانگین (QW=۵۸) و منیزیم با میانگین (QW=۵۸) بیشترین تأثیر و pH با (QW=۶/۲)، سولفات با (QW=۱۰) و TA با (QW=۱۱) کمترین تأثیر را بر GWQI دارند. با توجه به جدول (۴) بین EC، TDS و منیزیم همبستگی بسیار زیادی دیده می‌شود و این همبستگی می‌تواند از نظر تأثیر بر GWQI قابل توجه باشد.

با توجه به میانگین TH سختی آب زیرزمینی دشت مرودشت-خرامه بیشتر از حد مجاز استاندارد WHO می‌باشد (جدول ۲). مقدار TH در ۵۵٪ از نمونه‌ها در محدوده مجاز برای آشامیدن است. قلیائیت آب سفره‌ی زیرزمینی مرودشت-خرامه از متوسط تا خیلی زیاد متغیر است ولی با توجه به میانگین آن (۳۱۳ mg/l) آبی با قلیائیت خیلی زیاد است (Boyed 2000).

معمولاً قلیائیت و pH یک آب ارتباط نزدیک و مستقیم با یکدیگر دارند. تمامی نمونه‌های آب دشت مرودشت-خرامه از نظر مقدار TA بیشتر از حد مجاز برای آشامیدن هستند (WHO 2008). میانگین غلظت سولفات ۳۰۰ mg/l می‌باشد که مقداری بیشتر از حد مجاز WHO برای آشامیدن می‌باشد. در نتیجه با توجه به اینکه مقدار میانگین غلظت کلرید بیشتر از حد مجاز WHO برای آشامیدن است ولی ۶۱٪ از نمونه‌های آب از نظر مقدار کلرید در محدوده مجاز استاندارد آب برای آشامیدن قرار دارند. ضریب تغییرات همه مؤلفه‌ها به جز pH، TA و K⁺ بیشتر از ۳۰ است که می‌تواند نشان‌دهنده عدم یکنواختی نسبی این مؤلفه‌ها در سطح آبخوان باشد (Rezaei and Mirmohammadi Madibi 2005).

جدول ۳- مقادير پيشنه‌ادي غلظت هر پارامتر بر اساس رهنمود (WHO 2008) و وزن نسبي تعلق گرفته به هر پارامتر در آبخوان دشت مرودشت-خرامه بر اساس (Ramakrishnaiah et al. 2009)

Table 3 Proposed concentration values of each parameter based on the WHO standard (2008) and the relative weight of each parameter in Marvdasht-Kharameh plain aquifer

مؤلفه	واحد	WHO (2008)	وزن هر پارامتر	وزن نسبي (RW_i)	میانگین کیفیت نسبي (Q)	QW
pH	-	6.5-8.5	2	0.060	103	6.2
EC	$\mu\text{S/cm}$	500	3	0.090	686	62
TDS	mg/l	600	4	0.121	480	58
TH	mg/l	500	4	0.121	130	15
TA	mg/l	500	3	0.090	123	11
SO_4^{2-}	mg/l	250	3	0.090	119	10
Cl^-	mg/l	250	4	0.121	376	49
Na^+	mg/l	200	3	0.090	200	18
K^+	mg/l	12	2	0.060	61	3.71
Ca^{2+}	mg/l	100	3	0.060	217	19
Mg^{2+}	mg/l	150	2	0.060	97	58
مجموع	-	-	33	1	-	310

جدول ۴- ضرایب همبستگی اسپیرمن GWQI با مؤلفه‌های کيفی آبخوان دشت مرودشت-خرامه

Table 4 Spearman GWQI Correlation Coefficients with Marvdasht-Kharameh Aquifer Qualitative Components

Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	TA	TH	TDS	EC	pH	
										-0.67*	EC
									0.99*	-0.68*	TDS
								0.97*	0.96*	-0.68*	TH
						-0.25	-0.21	-0.14	0.24		TA
					-0.21	0.90*	0.87*	0.86*	-0.53*		SO_4^{2-}
				0.81*	-0.23	0.96*	0.99*	0.98*	-0.70*		Cl^-
			0.94*	0.87*	-0.34	0.97*	0.96*	0.94*	-0.69*		Ca^{2+}
		0.93*	0.94*	0.88*	-0.16	0.98*	0.99*	0.94*	-0.65*		Mg^{2+}
		0.93*	0.95*	0.99*	0.85*	-0.20	0.96*	0.99*	0.98*	-0.67*	K^+
	0.97*	0.87*	0.93*	0.97*	0.79*	-0.16	0.89*	0.97*	0.96*	-0.66*	Na^+
0.96*	0.99*	0.97*	0.95*	0.99*	0.87*	-0.19	0.98*	0.99*	0.99*	-0.68*	GWQI

با یکدیگر و با GWQI همبستگی معنی‌داری دارند ($p < 0.05$). pH با همه مؤلفه‌ها و GWQI همبستگی منفی دارد. (Ramakrishnaiah et al. 2009) و Mehrjerdi et al. (2008) نیز همبستگی منفی بین pH با مؤلفه‌های کيفی

جدول (۴) ضرایب همبستگی اسپیرمن GWQI با مؤلفه‌های کيفی مورد استفاده در محاسبات را نشان می‌دهد. در آبخوان دشت مرودشت-خرامه به‌جز TA که با هیچ‌کدام از مؤلفه‌ها و GWQI همبستگی ندارد ($p > 0.05$), سایر مؤلفه‌های کيفی

به‌عنوان بهترین مدل گزارش کرد. حساسیت شاخص GWQI به مولفه‌های EC، TDS و منیزیم (جدول ۳ و ۵) و همچنین هم‌بستگی بالای GWQI با مولفه‌های ذکر شده (جدول ۴) می‌تواند از دلایل شباهت مدل‌های واریوگرام باشد. (Mehrerjedi et al. (2008) نیز در پژوهش خود بر روی آبخوان آذربایجان مدل کروی را به‌عنوان بهترین مدل برای GWQI، EC، TDS و منیزیم تعیین نمودند.

جدول ۵- نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل حساسیت GWQI در آب زیرزمینی مرودشت-خرامه

Table 5 Results of GWQI sensitivity analysis in Marvdasht-Kharameh underground water

F*	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار
	mean	min	max	sd
EC	20.65	14.35	25.88	3.33
TH	8.5	5.6	14.5	3.5
TA	9.65	7.5	21.02	6.51
SO ₄ ²⁻	3.28	1.11	8.42	1.35
Cl ⁻	9.54	1.26	21.98	6.55
Ca ²⁺	7.79	3.84	15.80	2.90
Mg ²⁺	18.98	9.33	28.16	4.27
K ⁺	1.14	0.38	2.92	0.47
Na ⁺	4.50	0.56	9.93	2.39

* مؤلفه حذف شده

جدول (۶) مشخصات واریوگرام‌های GWQI و مولفه‌های EC، TDS و منیزیم را نشان می‌دهد. مقدار دامنه تأثیر از 19200 متر برای GWQI تا 69520 متر برای EC متغیر است. (Mehrerjedi et al. (2008) نیز در تحقیق خود دامنه تأثیر برای EC و منیزیم با مدل کروی را ۴۵ km به‌دست آوردند. مقدار دامنه تأثیر EC و منیزیم تقریباً مشابه است، و می‌تواند به دلیل ارتباط نزدیک شوری با غلظت منیزیم باشد. برای هر ۴ مؤلفه نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر بین ۰/۲۷ تا ۰/۴۵ به‌دست آمد که هم‌بستگی متوسط (نسبتاً قوی) را در دامنه تأثیر نشان می‌دهد (Shi et al. 2007). بدین معنی که در دامنه تأثیر پیش‌بینی‌ها نسبتاً قوی و قابل اعتماد می‌باشد.

را گزارش کرده‌اند. همبستگی قوی و معنی‌داری بین EC با TDS و TH دیده می‌شود ($p > 0.05$). Ramakrishnaiah (2009) et al. (2008) و Mehrjerdi et al. (2011) نیز در مطالعات خود این رابطه را نشان داده‌اند.

همبستگی مثبت معنی‌دار و قوی TH با TDS احتمالاً از آنجا ناشی می‌شود که دو یون Ca^{2+} و Mg^{2+} کاتیون‌های عمده تشکیل دهنده‌ی سختی و جامدات حل شده در آب زیرزمینی مرودشت-خرامه بوده و احتمالاً همین دو یون pH آب را نیز بازی و حدود ۷/۶۰ نگه می‌دارند (جدول ۲). از طرف دیگر قلیائیت کل نیز با سختی و pH همبستگی دارد. Rafferty (2000) و (Mehrerjedi et al. (2008) نیز همبستگی معنی‌دار قلیائیت کل و سختی کل را گزارش کرده‌اند. با توجه به وجود سازنده‌های کربناتی موجود در منطقه بین کلسیم و منیزیم یک همبستگی قوی ($r = 0.93$) مشاهده می‌شود ($p < 0.05$). شاخص GWQI با pH کمترین همبستگی ($r = 0.168$) و با EC و TDS، کلرید، پتاسیم و سدیم بیشترین همبستگی را دارد (جدول ۴).

۳-۲- تجزیه و تحلیل حساسیت GWQI

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل حساسیت GWQI در جدول (۵) آمده است. با توجه به جدول (۵)، شاخص GWQI نسبت به مولفه‌های EC، TDS و منیزیم بیشترین حساسیت و نسبت به پتاسیم و سدیم کمترین حساسیت را دارد. نتایج این جدول با نتایج جدول (۳) هم‌خوانی دارد. این بدان معناست که باید مولفه‌های EC، TDS و منیزیم با دقت بیشتری نسبت به سایر مولفه‌های کیفی اندازه‌گیری شوند.

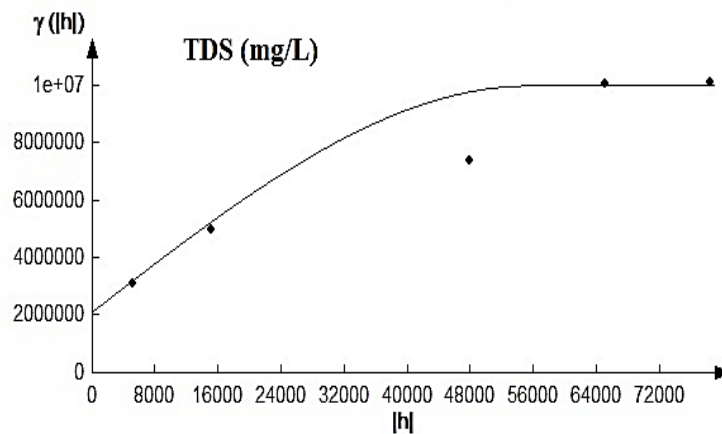
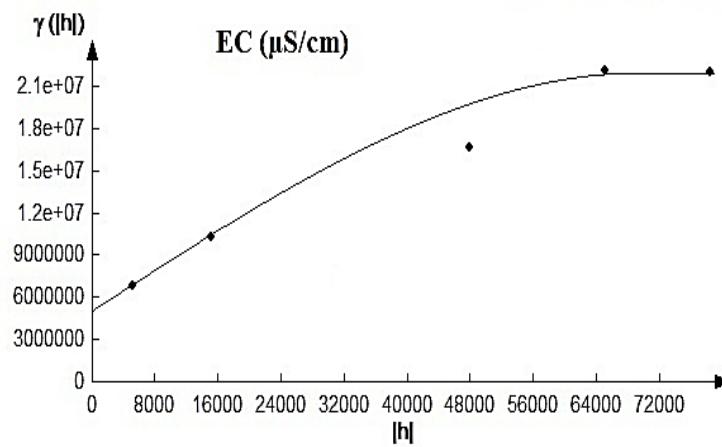
۳-۳- تجزیه و تحلیل زمین‌آمار

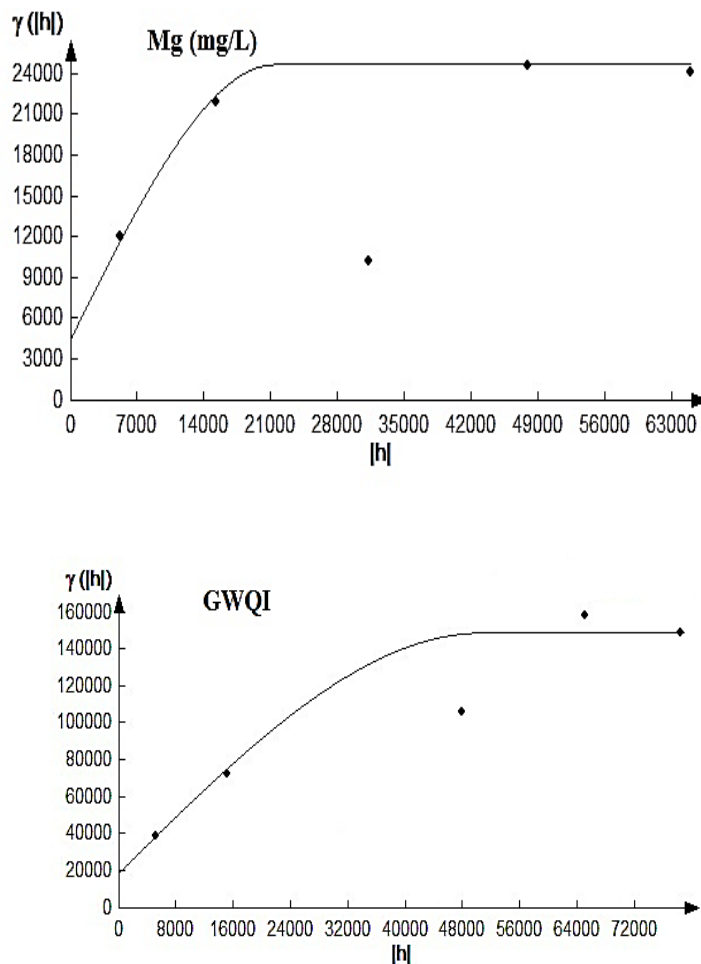
شکل (۲) بهترین واریوگرام‌های برازش داده شده بر GWQI و مولفه‌های EC، TDS و منیزیم که تأثیر بیشتری بر حساسیت GWQI دارند را نشان می‌دهد. برای GWQI و مولفه‌های EC، TDS و منیزیم مدل کروی بهترین برازش را داشت. (Shabani (2008) نیز در مطالعه خود بر آب زیرزمینی دشت ارسنجان برای TDS و pH مدل کروی را

جدول ۶- نتایج تجزیه و تحلیل زمین‌آماري برخی از کاتیون‌ها و آنیون‌های آبخوان دشت مرودشت- خرامه

Table 6 Geostatistical analysis of some aquifer cations and anions of Marvdasht-Karameh plain

کلاس همبستگی مکانی	$\frac{C_0}{C_0 + C}$	اثر قطعه‌ای (C_0) (mg/l)	آستانه تأثیر (C_0+C) (mg/l)	دامنه تأثیر (متر)	مدل	مؤلفه
نسبتاً قوی	0.27	2140000	7900000	55347	کروی	TDS
نسبتاً قوی	0.3	5100000	17000000	69520	کروی	EC
نسبتاً قوی	0.44	4550	20206	21356	کروی	Mg ²⁺
نسبتاً قوی	0.39	50560	130000	19200	کروی	GWQI





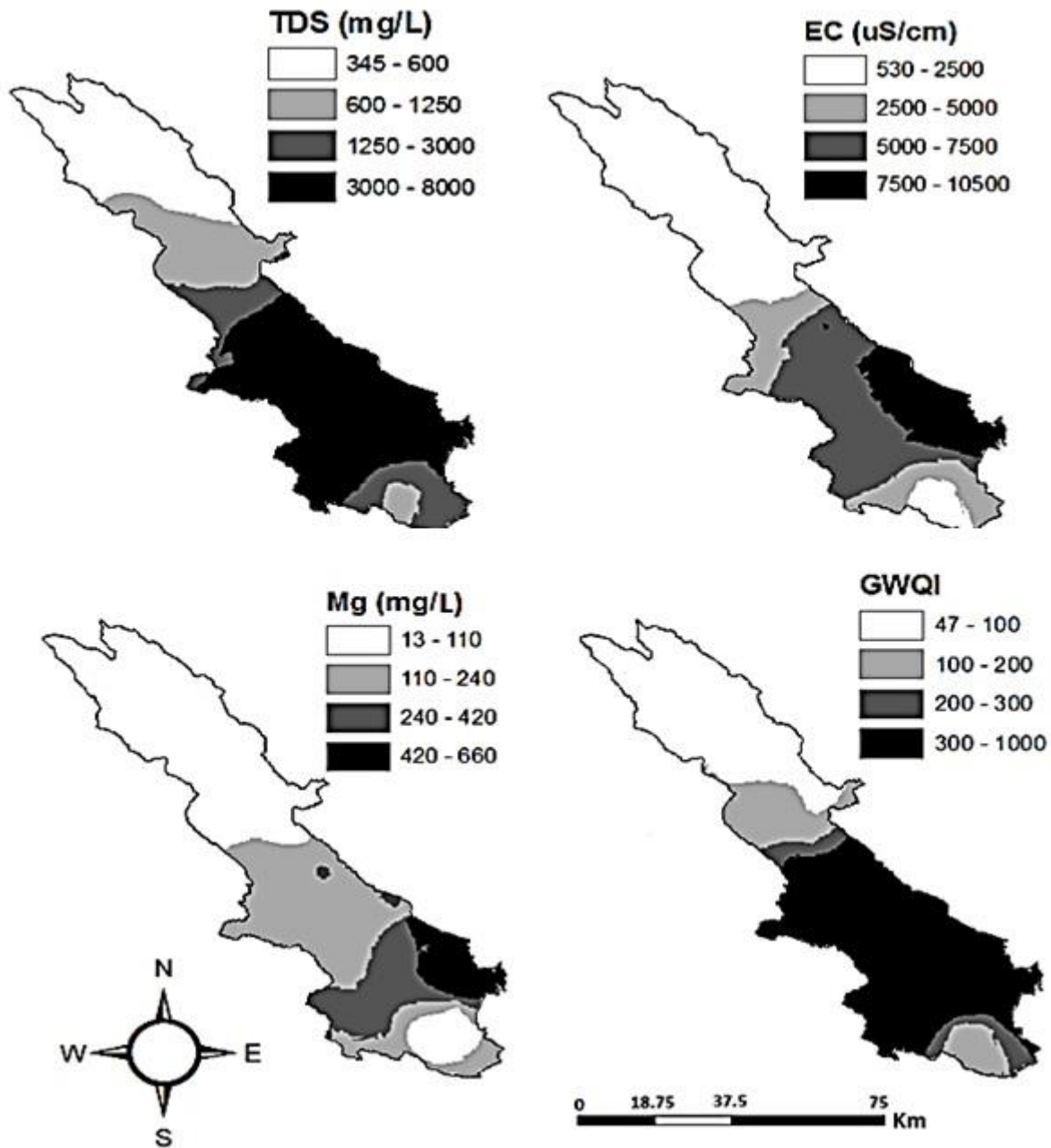
شکل ۲- واریوگرام‌های برازش داده شده بر GWQI و مولفه‌های EC، TDS و منیزیم
 Fig. 2 Variogram fitted on GWQI and EC, TDS and magnesium components

WHO برای آشامیدن است ولی هر چه به سمت جنوب آبخوان پیش رویم از کیفیت آب از نظر TDS و EC کاسته شده تا جایی که در قسمت‌های جنوبی TDS و EC به بیشینه‌ی مقدار خود رسیده و آب غیر قابل استفاده می‌شود (WHO 2008). مقدار EC از $530 \mu\text{S/cm}$ در قسمت‌های شمالی آبخوان تا $10500 \mu\text{S/cm}$ در قسمت‌های جنوبی آبخوان متغیر بود. مقدار GWQI از ۴۷ در قسمت شمالی آبخوان تا ۱۰۰۰ در قسمت‌های جنوبی آبخوان متغیر است. بنابراین کیفیت آبخوان در قسمت‌های شمالی خوب و در قسمت‌های جنوبی غیر قابل استفاده می‌باشد (شکل ۳).

۳-۴- پهنه‌بندی GWQI

شکل (۳) نقشه پهنه‌بندی شاخص GWQI و مولفه‌های حساس در محاسبه GWQI (EC، TDS و منیزیم) در آبخوان دشت مرودشت-خرامه با استفاده از روش کریجینگ معمولی را نشان می‌دهد. تغییرات مقدار هر ۴ مؤلفه روند یکسانی داشته و از قسمت‌های شمال غربی به سمت جنوب شرقی آبخوان در حال افزایش هستند که با توجه به هم‌بستگی بالای EC، TDS و منیزیم با یکدیگر و با GWQI قابل توجیه است.

مقدار TDS از 345 mg/l در قسمت‌های شمالی آبخوان تا 8000 mg/l در قسمت‌های جنوبی آبخوان متغیر است. در قسمت‌های شمال غربی مقدار TDS و EC کمتر از استاندارد



شکل ۳- پهنه‌بندی شاخص GWQI و مولفه‌های حساس در محاسبه GWQI در آبخوان دشت مرودشت-خرامه
 Fig. 3 GWQI indexing and sensitive components in GWQI calculation in Marvdasht-Kharameh plain aquifer

قرار می‌دهند. همچنین وجود سد درودزن در قسمت شمالی دشت باعث تغذیه آب زیرزمینی این ناحیه از آبخوان شده و کیفیت آن را افزایش داده است.

تشکیلات زمین‌شناسی در قسمت‌های شمالی و مرکزی دشت، آهک‌های سروک بوده که بسیار فشرده و سخت می‌باشد. این سازندها حلالیت کمی داشته و کیفیت آب را کمتر تحت تأثیر

جدول ۷- پوشش و مساحت (ha) مربوط به هر پهنه‌ی GWQI در آبخوان دشت مرو دشت- خرامه

Table 7 Coverage and Area (ha) for each GWQI Area in the Marvdasht-Karame Plain

مساحت (Km ²)	مساحت (%)	کلاس کیفیت آب	محدوده‌ی GWQI
1221	31	خوب/مناسب	0 – 100
551	14	ضعیف	100 – 200
197	4	بسیار ضعیف	200 – 300
2009	51	غیر قابل استفاده	>300

با GWQI بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ است که آب زیرزمینی را در کلاس بسیار ضعیف برای آشامیدن قرار می‌دهد. در قسمت شمال غربی آبخوان مقدار GWQI کمتر از ۱۰۰ و کیفیت آب زیرزمینی برای آشامیدن مناسب است.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش تعیین شاخص کیفی آب زیرزمینی (GWQI) به منظور آشامیدن و تحلیل مکانی آن در آب زیرزمینی دشت مرو دشت- خرامه بود. نتایج این پژوهش نشان داد

- ۱- شاخص GWQI با همه مؤلفه‌های به کار رفته به جز TA هم‌بستگی معنی‌دار داشت. ضعیف‌ترین هم‌بستگی آن به مؤلفه‌ی pH مربوط می‌شد و هم‌بستگی GWQI با بقیه مؤلفه‌ها از ۰/۸۰ بیشتر بود. دامنه GWQI از ۴۷ تا ۱۰۰۰ در تغییر بود.
- ۲- مدل واریوگرام کروی با دامنه تأثیر ۱۹۲۰۰ m برای GWQI مناسب است.
- ۳- EC با (QW=۶۲)، TDS با (QW=۵۸) و منیزیم با (QW=۵۸) بیشترین تأثیر و pH با (QW=۶/۲)، سولفات با (QW=۱۰) و TA با (QW=۱۱) کمترین تأثیر را بر GWQI داشتند.

بر اساس نقشه GWQI قسمت‌های شمال غربی آبخوان دشت مرو دشت- خرامه دارای کیفیت مناسب آب به منظور آشامیدن بودند، در حالی که در قسمت‌های جنوبی آب زیرزمینی غیر قابل استفاده بود.

در قسمت جنوب شرقی دشت مرو دشت- خرامه رسوبات گچی- نمکی سروستان و آذرین‌های سری هرمز وجود دارد، که می‌تواند از دلایل کاهش کیفیت آب زیرزمینی در این ناحیه باشد. همچنین در این ناحیه سازندهای مارنی ژیبسی (آهک خاکستری، گچ و دولومیتی گچی حاوی کربنات کلسیم و منیزیم) همراه با رسوبات تبخیری سبب کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌گردند (Anonymous 2009). به این دلیل مقدار TDS، EC، منیزیم و به تبعیت از آن‌ها GWQI در قسمت جنوب شرقی آبخوان دشت مرو دشت- خرامه بیشتر است. علاوه بر دلایل زمین‌شناسی موجود، تغذیه این قسمت از آبخوان با آب رودخانه کر که بعد از گذشت از یک مسیر طولانی به این منطقه وارد می‌شود، می‌تواند از دلایل کاهش کیفیت آب زیرزمینی در این قسمت از آبخوان باشد. ورود پساب‌های صنعتی، فاضلاب‌های شهری و کشاورزی در طول مسیر رودخانه به داخل آن موجب کاهش کیفیت آب این رودخانه شده که در نهایت موجب کاهش کیفیت آب زیرزمینی قسمت جنوب شرقی (منطقه خرامه) آبخوان دشت مرو دشت- خرامه می‌شود. جدول (۷) درصد و مساحت هر پهنه از آبخوان دشت مرو دشت- خرامه را بر اساس کلاس‌بندی GWQI نشان می‌دهد.

بر اساس کلاس‌بندی GWQI برای آشامیدن آبخوان دشت مرو دشت- خرامه به ۴ پهنه تقسیم‌بندی شد (جدول ۷). وسیع‌ترین پهنه (در قسمت جنوب شرقی آبخوان دشت مرو دشت- خرامه) با مساحت ۲۰۰۹ km² (۵۱٪) از مساحت آبخوان) مربوط به پهنه‌ی با GWQI بیشتر از ۳۰۰ است که آب زیرزمینی را در کلاس غیر قابل استفاده برای آشامیدن قرار می‌دهد. کوچک‌ترین پهنه (در ناحیه مرکزی آبخوان) با مساحت ۱۹۷ km² (۴٪) از مساحت آبخوان) مربوط به پهنه‌ی

Reference

- Anonymous, (2009). Update of selection of selected water resources in 46 study areas of Fars province, Marvdasht study area. Report of the Water Qragization by Sangab-Zagros Fras, Iran.
- APHA. (1998). Astandard methods for examination of water and waste water. 20th edition, American Public Health Association, Washington, DC.
- Babiker I., Mohamed A. and Hiyama T. (2007) Assessing groundwater quality using GIS. *Water Resour. Manag.*, 21, 699–715.
- Gaus I. D. G., Kinniburgh J. C. and Webster R. (2003). Geostatistical analysis of arsenic concentration in groundwater in Bangladesh using disjunctive kriging. *Environmental Geology* 44,939-948.
- Hooshmand A., Delghandi M., Izadi A. and Ails A. (2011). Application of kriging and cokriging in spatial estimation of groundwater quality parameters. *African J. Agri. Res.*, 6(14), 3402-3408.
- Ishaku J. M. (2011). Assessment of groundwater quality index for Jimeta-Yola area, Northeastern Nigeria. *J. Geol. and Min. Res.*, 3(9), 219-231
- Jerome C. and Pius A. (2010). Evaluation of water quality index and its impact on the quality of life in an industrial area in Bangalore, South India. *Am. J. Sci. Indust. Res.*, 1(3), 595-603.
- Mehrjerdi R., Zareian M., Mahmodi S. and Heidari A. (2008). Spatial distribution of groundwater quality with geostatistics (Case study: Yazd-Ardakan plain). *World Appl. Sci. J.*, 4(1), 9-17.
- Ostovari Y., Beigi H. and Davoudian A. (2017). Evaluation of Groundwater Quality Index (GWQI) and its ground-based processing in Lordegan plain aquifer. *J. Environ. Sci. Technol.*, 5, 227-238.
- Rafferty K. (2000). Scaling in geothermal heat pump systems. *Geo-Heat Center Oregon Institute of Technology 3201 Campus Drive Klamath Falls*, PP 11-15.
- Ramakrishnaiah C. R., Sadadhiv C. and Rangnna G. (2009). Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. *J. Chem.*, 6(2), 523-530.
- Rezaei A. and Mirmohammadi Madibi A. M. (2005). *Statistics and probabilities (application in agriculture)*. Publishing House Jihad University of Isfahan, Industrial Branch First Printing, 586 pages.
- Rokbani M., Gueddari M. and Bouhlila R. (2011). Use of geographical information system and water quality index to assess groundwater quality in El Khairat Deep Aquifer (Enfidha, Tunisian Sahel). *Iran. J. Energy Environ.*, 2 (2), 133-144.
- Scott H. D. (2000). *Soil physics, agricultural and environmental application*. Iowa State University Press. 415 pages.
- Shabani M. (2008). Determination of the most suitable land-based method for preparing a map of pH changes and TDS of groundwater (Case study: Arsanjan plain). *Water Eng. J.* 1, 47-57 [In Persian].
- Shi J., Wang H., Xu J., Wu J., Lsi X., Zhu H. and Yu C. (2007). Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. *Environ. Geol.* 52, 1-10.
- Sing C., Shahshtri S., Mukhrrjee S., Kumari R., Avater R., Singh A. and Sing R. P. (2011). 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 Resour. Manag.*, 25, 1881–1898.
- WHO. (2008). *Guidelines for drinking-water quality*. 3rd edition, 668 pages.

Geostatistical Analysis of Groundwater Quality Index (Case study: Marvdasht-Kharameh Aquifer, Fars)

Afshin Honarbakhsh^{1*} and Yaser Ostovari²

¹ Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

² Postdoctoral Researcher, Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

*Corresponding author: afshin.honarbakhsh@gmail.com

Original Paper

Received: December 30, 2017

Revised: August 08, 2018

Accepted: September 06, 2018

Abstract

One method of groundwater quality assessment is applying Groundwater quality index (GWQI), which is a combinational method of different quality parameters of groundwater. The aim of this study was to estimate the Marvdasht-Kharameh Plain groundwater quality for drinking by employing GWQI along with applying geostatistics technology in GIS environment. For this purpose, the norm of five years quality data of 49 wells were used. GWQI was estimated by applying inverse distance weighting method to quality parameters. Kriging geostatistics pattern was used for assessing spatial changes and mapping the quality parameters and GWQI. Spherical variogram pattern had the best fitting on quality parameters and GWQI. The results illustrated that spherical variogram pattern with 19200 m effective range is appropriate for GWQI. Based on sensitivity analysis, EC, TDS, and Mg had the most and pH, sulphate and TA had the least influence on GWQI. The GWQI range was variable from 47 to 1000. Upon to GWQI map, the north-western parts of Marvdasht-Kharameh Plain aquifer had suitable quality for drinking while it was not suitable to use in southern parts of aquifer.

Keywords: Drinking Water; Kriging; Groundwater; GWQI; WHO.