نشریه علمی- پژوهشی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering

سال دوازدهم- شماره ۴۳- زمستان ۱۳۹۷

Vol. 12, No. 43, Winter 2019

ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با تاکید بر پتانسیل خورندگی و رسوب‌گذاری آب‌ها در حوضه رودخانه حبله‌رود

امید اسدی نلیوان[۱]، امیر سعدالدین[۲]، غلامحسین کرمی[۳] و واحد بردی شیخ[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۲

چکیده

کیفیت آب‌های زیرزمینی به ویژه خورندگی و رسوب‌گذاری از دیدگاه اقتصادی و بهداشتی از اهمیت زیادی برخوردار است. این تحقیق با هدف بررسی پتانسیل خورندگی و رسوب‌گذاری آب‌های زیرزمینی در حوضه رودخانه حبله‌رود با توجه به افزایش جمعیت و نیاز آبی بیشتر و در نتیجه اهمیت فزاینده آبهای زیرزمینی انجام شده است. در این تحقیق از شاخص‌های خورندگی و رسوب‌گذاری لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و تخریبی و همچنین نرم‌افزار ArcGIS به منظور پهنه‌بندی شاخص‌ها در سطح حوضه با استفاده از روش‌های زمین‌آمار استفاده شد. با توجه به میانگین شاخص‌ها (لانژلیه: ۰/۶۷؛ رایزنر: ۶/۵۱؛ پوکوریوس: ۶/۰۹؛ تخریبی: ۱۲/۸۹)، بیشتر سطح حوضه حبله‌رود (به طور متوسط ۷۴٪) پتانسیل رسوب‌گذاری دارد. با توجه به معیار کارایی RMSE دو شاخص لانژلیه و رایزنر با استفاده از روش کریجینگ، شاخص پوکوریوس با روش IDW و شاخص تخریبی با روش RBF پهنه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که آبهای زیرزمینی بر اساس شاخص‌های لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و تخریبی به ترتیب در ۷۵/۳۵، ۳۲/۱۷، ۵۶/۴۲ و ۷۲/۹۶ درصد از حوضه حالت رسوب‌گذار دارد. در مجموع، بررسی شاخص‌های خورندگی و رسوب‌گذاری نشان داد که آب زیرزمینی حوضه تمایل به رسوب‌گذاری دارد. بنابراین، برنامه‌ریزی مناسب جهت جلوگیری از آسیب‌های اقتصادی و مضرات بهداشتی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راهکارهای کاهش رسوب‌گذاری در وهله اول تعیین مناطق پرخطر و سپس تعدیل pH به زیر حد اشباع می‌باشد.

کلید واژه‌ها: *کیفیت آب زیرزمینی، خورندگی، رسوب‌گذاری، زمین‌آمار، حوضه رودخانه حبله‌رود*

مقدمه

خورندگی یکی از پیچیده‌ترین و پرهزینه‌ترین مشکلات مربوط به تامین آب آشامیدنی می‌باشد [۲۰ و ۲۲]. فرآیند خورندگی باعث ایجاد مشکلاتی همچون ایجاد حفره در لوله‌ها، کاهش طول عمر تأسیسات و هدررفت آب می‌شود که هزینه‌های زیادی را به دنبال خواهد داشت [۱۶ و ۱۷]. زیان‌های اقتصادی، بروز مشکلات مزه، بو، رنگ و ایجاد لکه و افزایش کدورت از مهم‌ترین مشکلات مربوط به خورندگی در آب‌های شرب است [۱]. علاوه بر خسارت‌های مالی ناشی از خورندگی، مهم‌ترین مسئله بهداشتی مربوط به خورندگی، حضور فلزات سنگین مانند سرب، مس، روی و آرسنیک بوده که باعث ایجاد بیماری‌های متعددی همچون مسمومیت، تخریب سیستم اعصاب مرکزی، سرطان، بیماری‌های قلبی و عروقی و ضایعات پوستی می‌شوند [۱، ۱۴ و ۱۹]. عوامل متعددی در فرآیند خورندگی تأثیرگذارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به pH، درجه حرارت، TH، TDS و میکروارگانیسم‌ها در آب اشاره کرد [۱۸ و ۲۱]. یکی از روش‌های ساده بررسی تمایل آب به رسوب‌گذاری یا خورندگی کاربرد شاخص‌های خورندگی (لانژلیه[۵]، رایزنر[۶]، پوکوریوس[۷] و تهاجمی[۸]) است. رسوب‌گذاری فرآیندی است که در آن کاتیون‌هایی مانند کلسیم و منیزیم با سایر مواد محلول در آب واکنش داده و به شکل لایه‌ای در جداره داخلی لوله‌ها ته‌نشین می‌شوند [۳ و ۱۱]. فرآیند رسوب‌گذاری می‌تواند باعث مشکلاتی مانند مسدودشدن لوله‌ها، کاهش دبی عبوری و افزایش افت فشار در شبکه آب‌رسانی شود که این امر باعث افزایش هزینه نگهداری و مرمت تأسیسات آبی خواهد شد [۹ و ۱۲]. با توجه به موارد فوق بررسی آب‌های آشامیدنی و پهنه‌بندی آن‌ها از لحاظ خورندگی و رسوب‌گذاری ضروری است. پیشرفت‌های اخیر در معرفی و بسط روش‌های غیرکلاسیک باعث افزایش تمایل برای استفاده از زمین‌آمار به منظور بررسی و شناخت بیشتر این تغییرات شده است [۵]. زمین‌آمار شاخه‌ای از علم آمار کاربردی است که قادر

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۲- نویسنده مسئول و دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، پست الکترونیک: amir.sadoddin@gmail.com
۳- دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود
۴- دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

5. Langelier Saturation Index
6. Ryznar Stability Index
7. Puckorius Scaling Index
8 . Aggressive Index

به ارائه مجموعه وسیعی از تخمین‌گرهای آماری به منظور برآورد خصوصیت موردنظر در مکانی که نمونه‌برداری نشده با استفاده از اطلاعات حاصله از نقاط نمونه‌برداری شده می‌باشد [۱۰]. با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌تواند مقادیر عظیمی از داده‌ها را با سرعت زیاد و هزینه بسیار کم، نگهداری و بازیابی نمود. همچنین استفاده از GIS، امکان تحلیل‌های زمین‌آماری را برای کاربر فراهم می‌کند [۲]. در زمین‌آمار می‌توان بین مقادیر یک کمیت در نمونه‌ها و فاصله و جهت قرار گرفتن نمونه‌ها نسبت به هم ارتباط برقرار کرد. در زمین‌آمار ابتدا به بررسی وجود یا عدم وجود ساختار مکانی بین داده‌ها پرداخته می‌شود. در صورت وجود ساختار مکانی، تغییرات ایجاد شده در یک فضای معین شانس بیشتری برای تأثیرگذاری روی فضاهای نزدیک به خود را نسبت به فضاهای دورتر از خود دارند [۱۰]. زمین‌آمار مبتنی بر «تئوری متغیرهای ناحیه‌ای» است. هر متغیری که در فضای سه‌بعدی توزیع شده باشد و دارای وابستگی مکانی باشد، متغیر ناحیه‌ای نامیده می‌شود. در صورتی که متغیر ناحیه‌ای دارای ساختار مکانی مناسبی باشد، می‌توان به برآورد متغیر موردنظر در نقاط فاقد آمار، دست یافت. تخمین زمین‌آماری شامل دو مرحله می‌باشد: مرحله اول شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که به وسیله آنالیز نیم‌تغییرنما[1] قابل بررسی می‌باشد [۱۰]. مرحله دوم تخمین متغیر موردنظر بوده که به مرحله اول وابسته است. لازم به ذکر است شرط استفاده از روش‌های زمین‌آماری، توزیع نرمال داده‌ها است. در زمینه بررسی آب‌های آشامیدنی به لحاظ خورندگی مطالعات زیادی انجام شده است. ولی در زمینه بررسی هم‌زمان خورندگی و کاربرد زمین‌آمار مطالعات زیادی انجام نشده است. علی‌پور و همکاران [۳] با بررسی خورندگی و رسوب‌گذاری آب در شبکه‌های آب شهر بندرعباس با استفاده از شش شاخص رایزنر، لانژلیه، لارسون-اسکولد، پوکوریوس، تخریبی و تست ماربل به این نتیجه رسیدند که آب در این شهر دارای خاصیت خورندگی است و دلیل آن را افزایش میزان TDS بیان کرده‌اند. خورسندی و همکاران [۱۲] در تحقیقی بر روی منابع آب مناطق روستایی ارومیه به این نتیجه رسیدند که آب منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های رایزنر، لانژلیه، لارسون-اسکولد و پوکوریوس در اکثر منابع خورنده است که دلیل آن را کاهش دمای آب بیان کرده‌اند. ملکوتیان و همکاران [۱۶] در مطالعه‌ای در رفسنجان با استفاده از چهار شاخص لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و تخریبی به این نتیجه رسیدند که آب منطقه مورد مطالعه در محدوده رسوب‌گذار است. آگاتمور و اوکولو [۱] در تحقیقی در کشور نیجریه با استفاده از سه شاخص رایزنر، لانژلیه و لارسون-اسکولد به این نتیجه رسیدند که آب منطقه مورد مطالعه در محدوده خورنده می‌باشد و بین غلظت آهن و شاخص‌های مورد بررسی ارتباط مستقیم و مثبتی وجود دارد. استواری و همکاران [۱۹] طی تحقیقی با استفاده از زمین‌آمار و دو شاخص رایزنر و لانژلیه به بررسی خورندگی دشت لردگان پرداختند. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص لانژلیه ۷۶ درصد آبخوان دارای پتانسیل رسوب‌گذاری کم و بر اساس شاخص رایزنر ۸۴ درصد از آبخوان پتانسیل خورندگی کم تا متوسط داشت. آن‌ها بیان داشتند که به دلیل حضور سازندهای کربناتی، پتانسیل رسوب‌گذاری بر پتانسیل خورندگی غلبه دارد. میرزابیگی و همکاران [۱۷] با بررسی ۵ شاخص رایزنر، لانژلیه، لارسون-اسکولد، پوکوریوس و تخریبی در آب شرب روستاهای خراسان رضوی به این نتیجه رسیدند که آب در بخش‌های مورد مطالعه خورنده است و بر اساس شاخص لانژلیه، آب در تمامی مناطق رسوب‌گذار می‌باشد. ودیعتی و همکاران [۲۳] در تحقیقی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی را با استفاده از مدل استنتاج فازی مورد بررسی قرار دادند و کیفیت آب را در سه طبقه مطلوب، قابل قبول و غیرقابل قبول تقسیم‌بندی کردند.

حوضه رودخانه حبله‌رود به دلیل برداشت آب زیرزمینی بیش از حد مجاز بهره‌برداری با مشکلات زیادی از لحاظ کیفیت آب مواجه است. با توجه به اینکه تا به حال در این حوضه به لحاظ خورندگی و رسوب‌گذاری مطالعه‌ای انجام نگرفته و با توجه به نیاز به توسعه شبکه آب‌رسانی جدید به دلیل افزایش جمعیت، بررسی و پهنه‌بندی آب به لحاظ خورندگی و رسوب‌گذاری ضروری به نظر می‌رسد تا مدیران و مسئولان با توجه به نتایج این تحقیق بتوانند تصمیمات آگاهانه و مبتنی بر اطلاعات علمی مفید اتخاذ نمایند. بنابراین، هدف تحقیق حاضر بررسی و پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی به لحاظ رسوب‌گذاری و خورندگی با استفاده از چهار شاخص لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و تخریبی و روش زمین‌آمار و نرم‌افزار ArcGIS است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه با مختصات ۳۵° تا ۱۰′ ۳۶ عرض شمالی و ′۳۹ ۵۱° تا ′۸ ۵۳° طول شرقی و با مساحت ۱۲۶۶۰ کیلومترمربع در دو استان سمنان و تهران واقع شده است (شکل ۱). فیزیوگرافی و توپوگرافی این محدوده شامل بخش‌های کوهستانی، تپه ماهور و دشت می‌باشد. بخش شمالی آن عمدتاً کوهستان‌ها و تپه‌ها و همچنین دشت‌های میان‌کوهی در محدوده استان تهران و بخش‌های دشتی آن عمدتاً در استان سمنان واقع شده است. بارندگی متوسط سالیانه این حوضه حدود ۲۳۱ میلی‌متر و دمای متوسط سالیانه آن حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۱۵]. به طور کلی سازندهای منطقه مورد مطالعه مربوط به دوران سنوزوئیک است که مقاطعی از سازندهای دوره‌های کواترنر و ترشیاری در آن قابل ملاحظه می‌باشد.

جهت انجام این تحقیق ابتدا داده‌های مورد نیاز شامل pH, HCO_3, CO_3, TH, TDS و درجه حرارت منابع آب موجود در حوضه (چاه، چشمه و قنات)، از شرکت مدیریت منابع ایران (دوره آماری ۱۳۸۱ الی ۱۳۹۴) دریافت شد. سپس مبادرت به محاسبه شاخص‌های خورندگی و رسوب‌گذاری (جدول ۱) شامل روش‌های لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و تخریبی شد [۱، ۱۴، ۱۹ و ۲۲].

1. Semi Variogram

در روش‌های بالا متغیر pH_s از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$pH_s = (9.3+A+B)-(C+D) \quad (۱)$$

که در آن:

$$A = (Log_{10}(TDS)-1)/10 \quad (۲)$$

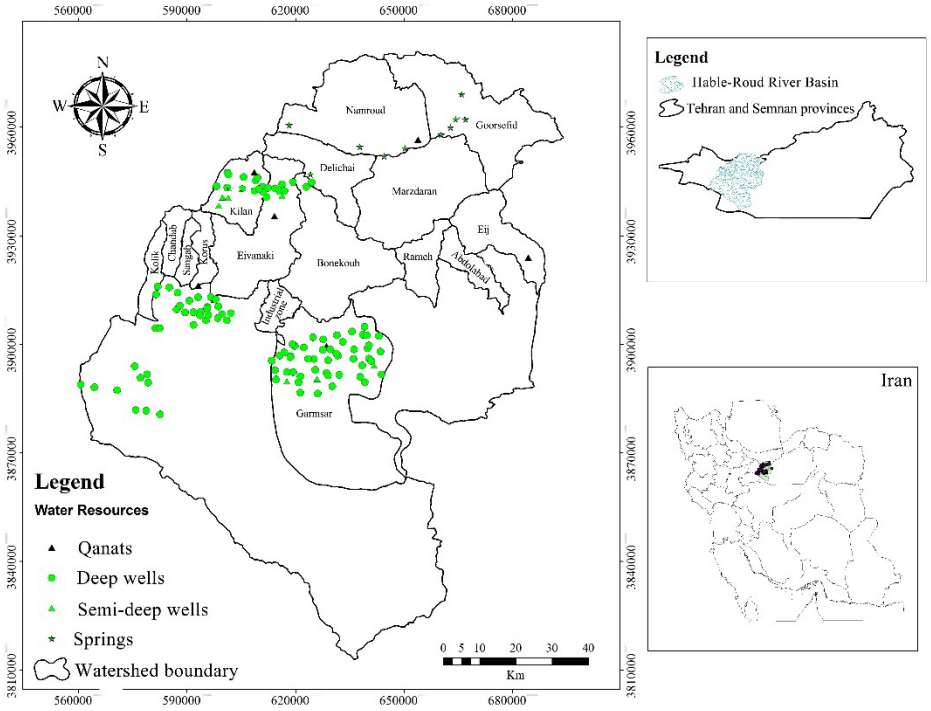
$$B = -13.12 * Log_{10}(^{o}C+273)+ 34.55 \quad (۳)$$

$$C = Log_{10}(TH)- 0.4 \quad (۴)$$

$$D = Log_{10}(T.ALK) \quad (۵)$$

$$T.ALK = HCO3+ CO3 \quad (۶)$$

در روش شاخص تخریبی A معادل قلیائیت کل و H معادل سختی بر حسب کربنات کلسیم است. همچنین متغیر pH_{eq} نیز از



شکل ۱- موقعیت حوضه رودخانه حبله‌رود در ایران و استان‌های تهران و سمنان

Fig 1. Location of the Hable_Roud River Basin in Iran and in provinces of Tehran & Semnan

جدول ۱- شاخص‌های مورد استفاده در تجزیه و تحلیل خورندگی و رسوب‌گذاری آب‌های زیرزمینی و راهنمای تفسیر آن‌ها

Table. 1 Indices used for the analysis of corrosion and siltation of groundwater and the guideline for the interpretation

شاخص	شرایط آب (تفسیر شاخص)	مقدار شاخص
Index	Water conditions (Index interpretation)	Index value
شاخص رایزنر	رسوب‌گذاری (Siltation)	RSI<6
Ryznar Index	تثبیت شده (Neutral)	6<RSI<7
$RSI= 2pH_s- pH$	خورندگی (Corrosion)	RSI>7
شاخص لانژلیه	رسوب‌گذاری (Siltation)	LSI>0
Langelier Index	تثبیت شده (Neutral)	LSI=0
LSI= pH- pHs	خورندگی (Corrosion)	LSI<0
شاخص تخریبی	خورندگی (Corrosion)	AI<10
Aggressive Index	تثبیت شده (Neutral)	10<AI<12
AI= pH+ log (A)*(H)	رسوب‌گذاری (Siltation)	AI>12
شاخص پوکوریوس	خورندگی (Corrosion)	PSI>6
Puckorius Index	رسوب‌گذاری (Siltation)	PSI<6
PSI= 2pHs- pHeq		

معادله زیر به دست می‌آید.

$$pH_{eq} = 1.465 + Log(T.ALK) + 4.54 \quad (۷)$$

در ادامه روش‌های زمین‌آمار (IDW, LPI, GPI, LPI و Kriging Ordinary) و نیم‌تغیرنما مورد بررسی قرار گرفت.

برای تعیین میزان ارتباط مکانی یک متغیر تصادفی در زمین‌آمار از نیم‌تغییرنما استفاده می‌شود. نیم‌تغییرنما کمیتی برداری است که میزان ارتباط مکانی بین نقاط اندازه‌گیری‌شده را بر حسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و درنظرگرفتن فاصله و جهت آن‌ها نشان می‌دهد. یک نیم‌تغییرنما، با استفاده از مقادیر معلوم مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. فرم محاسباتی یک نیم‌تغییرنما به‌صورت فرمول (۸) است:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{n}(Z(x_i + h) - Z(x_i))^2 \quad (۸)$$

که در آن، y(h) مقدار واریوگرام برای جفت نقاط در فاصلهٔ (h)، Z(xi + h): مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر در مکان (x_i + h)، ($Z(x_i)$: مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در مکان x_i، n تعداد اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در محدودهٔ مورد مطالعه است [۸].

روش‌های مختلف درون‌یابی

روش عکس فاصله (IDW[1]): در این روش مقدار فاکتور وزنی (iλ) با استفاده از معادلهٔ (۹) محاسبه می‌شود [۲]:

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-a}}{\sum_{i=1}^{n} D_i^{-a}} \quad (۹)$$

که در آن، Di فاصلهٔ بین نقطهٔ برآورد شده و مقدار مشاهده شده در نقطهٔ i؛ a: توان وزن‌دهی، n: تعداد نقاط مشاهده شده است. این روش دارای توان‌های مختلف است که در این تحقیق، توان دارای کمترین خطا برگزیده شد.

روش چندجمله‌ای جهانی (GPI[2]): این روش مدلی را بر نقاط نمونه‌برداری برازش می‌دهد که می‌تواند یک سطح چندضلعی با توان یک، دو و یا چهار باشد. بهترین کاربرد این روش در سطوح با تغییرات ملایم و تدریجی است. این روش نیز دارای توان‌های مختلف است و توان دارای کمترین خطا برگزیده شد.

روش چندجمله‌ای محلی (LPI[3]): این روش یک دامنهٔ کوتاه از تغییرات در داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد و به فواصل همسایگی در پنجرهٔ متحرک حساس است. بدین‌گونه که پنجره حرکت کرده و مقادیر سطحی در مرکز هر پنجره در هر نقطه به‌وسیلهٔ برازش یک چندضلعی تخمین زده می‌شود. این روش انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش تخمین‌گر جهانی دارد.

روش توابع شعاعی (RBF[4]): تابع شعاعی تابعی به‌صورت Φj(X)=Φ(X-Xj) است که وابسته به فاصلهٔ بین x=Rd و نقطهٔ ثابت Xj ε Rd است. در این تابع، Φ تابعی پیوسته و وابسته به هر زیرمجموعه Ω ε Rd است. R نشان‌دهندهٔ فاصلهٔ اقلیدوسی بین هر جفت نقطه در مجموعهٔ Ω است. این روش دارای پنج تابع کرنل (Completely Regularized Spline, Spline With Tension, Multiquadric, Inverse Multiquadric, Thin Plate Spline) است که در این تحقیق، روش دارای کمترین مقدار RMSE، انتخاب شد.

روش کریجینگ[5]: کریجینگ یک روش تخمین است که بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است و بهترین تخمین‌گر خطی ناریب است[6] [۷]. درصورتی‌که $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری‌شدهٔ متغیر در مکان x_i باشد، Z_0 مقدار تخمین‌زده‌شده متغیر در نقطهٔ (x_0) از ترکیب خطی زیر (۱۰) است:

$$Z_0 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(X_i) \quad (۱۰)$$

که در آن، λ_i: وزن داده شده به متغیر x در نقطهٔ i، n: تعداد نقاطی که متغیر در آن‌ها اندازه‌گیری شده است. این نوع کریجینگ را کریجینگ خطی می‌نامند؛ زیرا ترکیب خطی از n داده است. شرط استفاده از این تخمین‌گر، نرمال‌بودن متغیر است.

برای ارزیابی روش‌های زمین‌آماری و انتخاب بهترین روش از نرم‌افزار ArcGIS که توانایی انجام تکنیک ارزیابی متقابل را دارد و معیار آماری ریشهٔ دوم میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شد که معادلهٔ محاسبهٔ آن به‌صورت (۱۱) است:

$$RMSE = \sqrt{[\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)\right)^2]/n} \quad (۱۱)$$

که در آن، $\hat{Z}(x_i)$: مقدار برآوردشده در نقطهٔ x_i، $Z(x_i)$: مقدار اندازه‌گیری شده در نقطهٔ x_i، i: شمارهٔ نقاط، n: تعداد نقاط مشاهده شده معیار. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیهٔ نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای همهٔ نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود و در پایان به ازای هر نقطهٔ مشاهده‌ای یک نقطهٔ برآورد وجود خواهد داشت.

نتایج

استفاده از روش‌های زمین‌آمار مستلزم بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده‌ها است که توسط آنالیز واریوگرام این امر بررسی می‌شود و شرط استفاده از این آنالیز نرمال بودن است. در این تحقیق با توجه به هیستوگرام شاخص‌ها، کل شاخص‌ها نرمال بودند. برخی از خصوصیات مهم آماری راجع به شاخص‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

همچنین نتایج حاصل از برازش مدل واریوگرام نشان داد که بهترین مدل برازش داده شده به شاخص PSI مدل کروی و برای شاخص‌های LSI, RSI و AI مدل گوسی می‌باشد. جدول ۳ مشخصات بهترین مدل واریوگرام برای شاخص‌های مورد بررسی

1. Inverse Distance Weighting
2. Global Polynomial Interpolation
3. Local Polynomial Interpolation
4. Radial Basis Function

5. Kriging
6. Best linear unbiased prediction

را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲ بهترین واریوگرام به تفکیک شاخص‌ها نشان داده شده است. با توجه به واریوگرام‌ها همبستگی مکانی مناسبی در سطح حوضه مشاهده می‌شود.

جدول ۲- نتایج آنالیز آماری شاخص‌های مورد بررسی

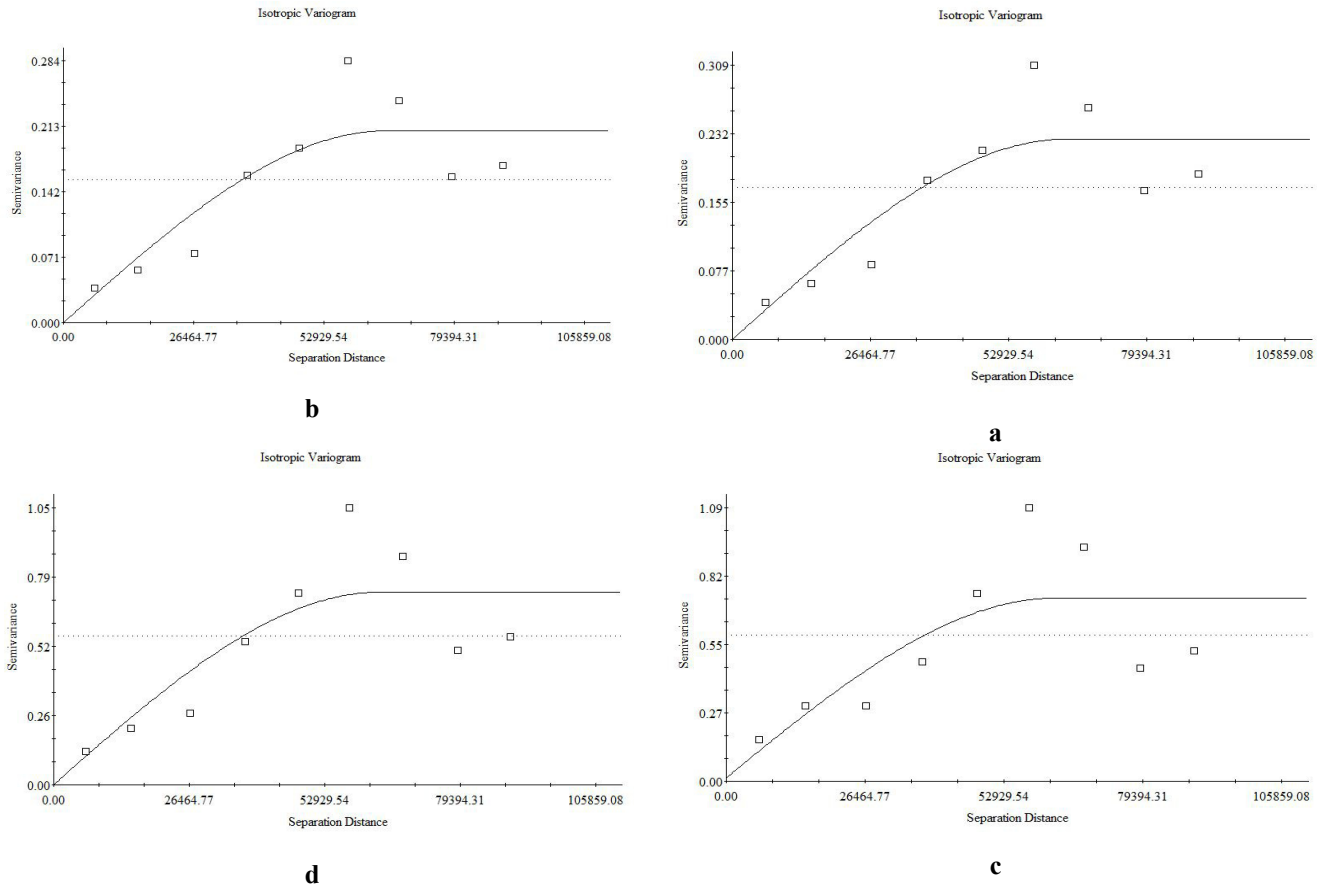
Table 2. Statistics of the indices investigated

کشیدگی	چولگی	انحراف معیار	میانه	میانگین	حداکثر	حداقل	تعداد نمونه	شاخص‌ها
Kurtosis	Skewness	Std. Dev	Median	Mean	Max.	Min.	Sample size	Index
2.31	-0.48	0.39	0.79	0.67	1.48	-0.42	129	LSI
2.34	0.43	0.74	6.3	6.51	8.71	4.92	129	RSI
2.79	0.29	0.76	5.97	6.09	8.62	4.32	129	PSI
2.31	-0.48	0.41	13.3	12.89	13.73	11.71	129	AI

جدول ۳: مشخصات مدل واریوگرام منتخب برای شاخص‌های مورد بررسی

Table. 3 Specifications of the chosen variograms for the indices investigated

RSS	R^2	C/(C0+C)	شعاع تأثیر (متر)	آستانه	اثر قطعه‌ای	مدل	شاخص‌ها
RSS	R^2	C/(C0+C)	Effective range (m)	Sill	Nugget	Model	Index
0.013	0.759	0.924	56118.44	0.208	0.0001	Gaussian	LSI
0.234	0.693	0.923	54559	0.741	0.001	Gaussian	RSI
0.339	0.56	0.981	62800	0.733	0.014	Spherical	PSI
0.016	0.75	0.923	55079	0.23	0.017	Gaussian	AI



شکل ۲- واریوگرام‌های مربوط به شاخص‌های خورندگی و رسوب‌گذاری d: RSI؛ c: PSI؛ b: LSI؛a: AI

Fig 2. Variograms of corrosion and siltation indices a: AI؛ b: LSI؛ c: PSI؛ d: RSI

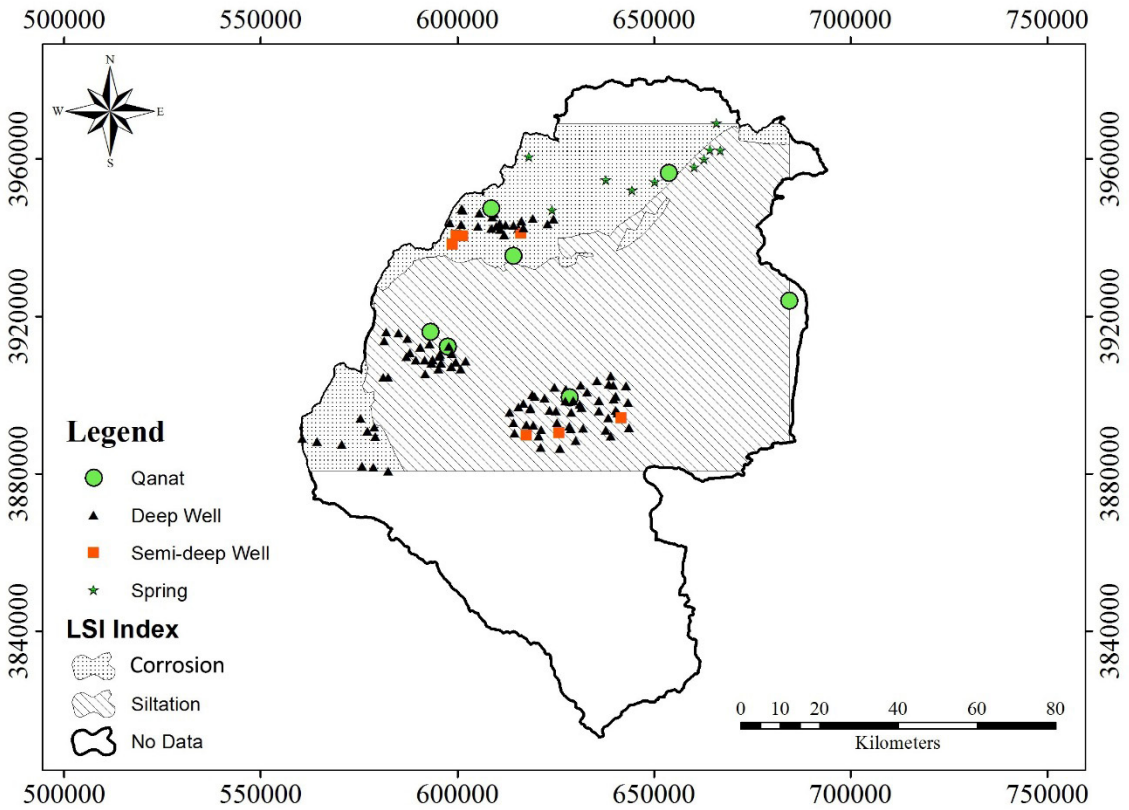
مناسب‌ترین روش میان‌یابی

برای تعیین مناسب‌ترین روش میان‌یابی در بین روش‌های درون‌یابی از مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. نتایج نشان داد (جدول ۴) که شاخص AI با استفاده از روش تخمین‌گر توابع شعاعی و تابع کرنال (Spline With Tension)، شاخص PSI با استفاده از روش IDW (توان یک) و شاخص‌های RSI و LSI با استفاده از روش کریجینگ و مدل گوسی کمترین میزان RMSE را داشته و جهت تهیه نقشه توزیع مکانی شاخص‌ها از این روش‌ها استفاده شد (شکل ۳ الی ۶). همچنین جدول ۵ میزان مساحت هر یک از طبقات موجود در شکل‌های مورد اشاره را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقادیر RMSE شاخص‌های مورد مطالعه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری

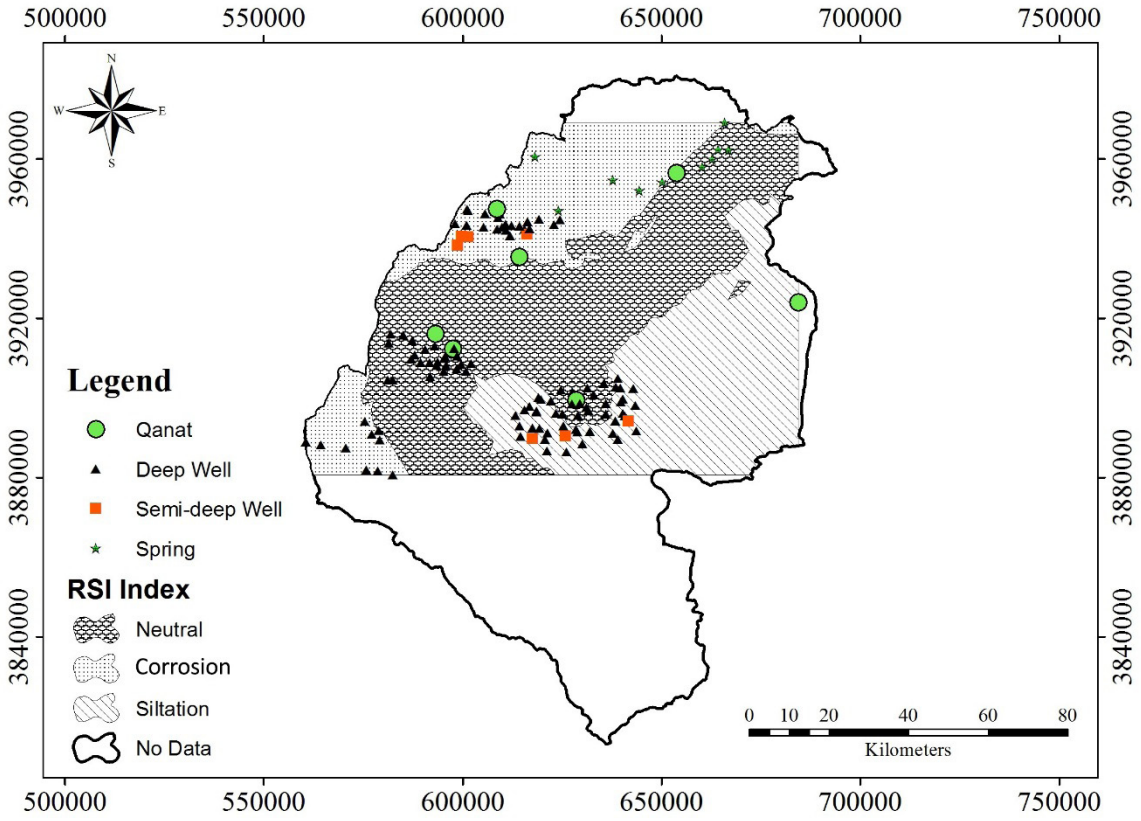
Table. 4 RMSE values of the indices using geostatistical methods

مدل انتخابی	روش تخمین انتخابی با توجه به RMSE کمتر	Kriging	RBF	LPI	GPI	IDW	شاخص
Chosen model	Estimation method selection according to RMSE	Kriging	RBF	LPI	GPI	IDW	Index
Gaussian	Kriging	0.2	0.23	0.22	0.23	0.21	LSI
Gaussian	Kriging	0.38	0.41	0.39	0.42	0.4	RSI
Power (1)	IDW	0.45	0.45	0.46	0.47	0.44	PSI
Spline	RBF	0.23	0.22	0.24	0.25	0.23	AI



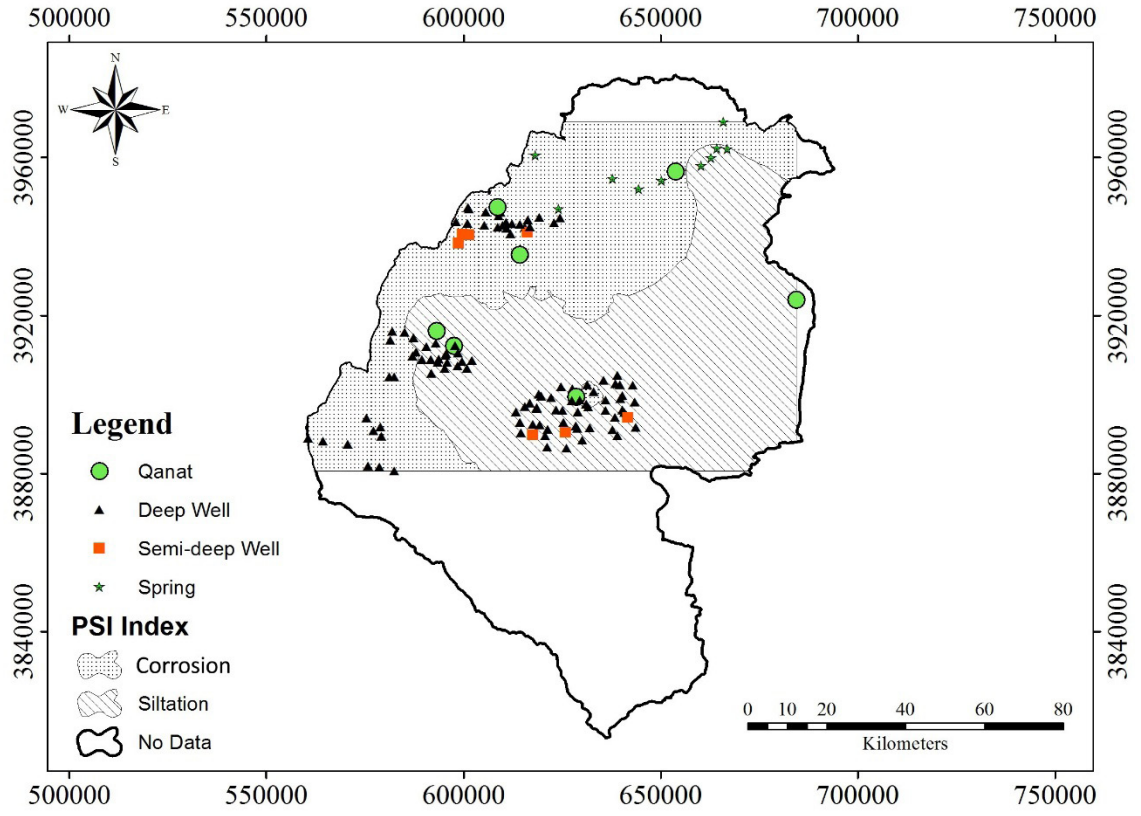
شکل ۳- پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی بر اساس شاخص لانژلیه در حوضه رودخانه حبله‌رود

Fig. 3 Zonation of groundwater resources based on the Langelier Saturation Index for the Hable-Roud River Basin



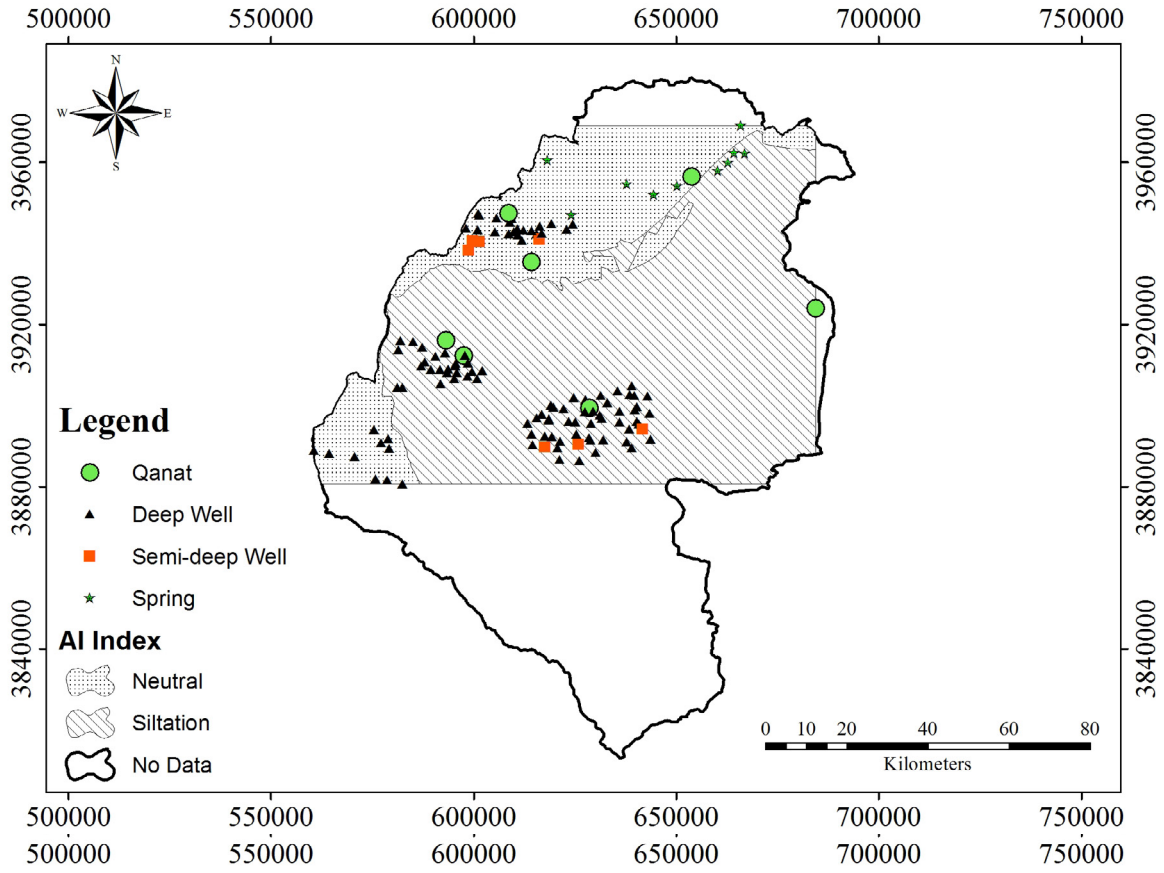
شکل ۴- پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی بر اساس شاخص رایزنر در حوضه رودخانه حبله‌رود

Fig. 4 Zonation of groundwater resources based on the Ryznar Stability Index for the Hable-Roud River Basin



شکل ۵- پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی بر اساس شاخص پوکوریوس در حوضه رودخانه حبله‌رود

Fig. 5 Zonation of groundwater resources based on the Puckorius scaling for the Hable-Roud River Basin



شکل ۶- پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی بر اساس شاخص تخریبی در حوضه رودخانه حبله‌رود

Fig. 6 Zonation of groundwater resources based on the Aggressive Index for the Hable-Roud River Basin

جدول ۵- توزیع مساحت طبقات خورندگی و رسوب‌گذاری برای شاخص‌های مختلف

Table 5. Areal distribution of corrosion and siltation classes for different indices

شاخص تخریبی (Aggressive Index)			شاخص لانژلیه (Langelier Index)		
وضعیت Condition	مساحت (هکتار) Area (ha)	درصد مساحت Area (Percent)	وضعیت Condition	مساحت (هکتار) Area (ha)	درصد مساحت Area (Percent)
خورندگی (Corrosion)	232308	27.04	خورندگی (Corrosion)	211769	24.65
رسوب‌گذاری (Siltation)	626975	72.96	رسوب‌گذاری (Siltation)	647512	75.35
شاخص پوکوریوس (Puckorius Index)			**شاخص رایزنر (Ryznar Index)**		
وضعیت Condition	مساحت (هکتار) Area (ha)	درصد مساحت Area (Percent)	وضعیت Condition	مساحت (هکتار) Area (ha)	درصد مساحت Area (Percent)
رسوب‌گذاری (Siltation)	484721	56.42	رسوب‌گذاری (Siltation)	276506	32.17
خورندگی (Corrosion)	374560	43.58	حالت تعادل (Neutral)	388145	45.17
			خورندگی (Corrosion)	194629	22.65

بحث و نتیجه‌گیری

خوردندگی و رسوب‌گذاری آب از اهم مسائلی است که در پایش سیستم‌های توزیع آب شرب، کشاورزی و صنعت باید با دقت بیشتری مورد توجه قرار گیرد، زیرا عدم توجه به کیفیت شیمیایی آب از نظر تعادل شیمیایی و پیدایش هر کدام از پدیده‌های فوق می‌تواند باعث آسیب‌های بهداشتی و اقتصادی فراوانی گردد. بررسی‌ها نشان داده که در کشور مقادیر قابل‌توجهی از آب (بیش از ۲۰ درصد) در اثر نشت از شبکه‌های توزیع آب در اثر خورندگی هدر می‌رود و همچنین در اثر رسوب‌گذاری در لوله‌ها افت فشار (کاهش ظرفیت انتقال) حاصل می‌شود. این موارد خود باعث افزایش مضاعف فشار به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود که سلامت و پایداری آبخیزها را به خطر می‌اندازد. میانگین محاسبه شاخص‌های LSI, RSI, PSI و AI نشان می‌دهد که آب اکثر منابع آب زیرزمینی موجود در حوضه رودخانه حبله‌رود دارای پتانسیل رسوب‌گذاری هستند. بر اساس شاخص LSI تعداد ۱۰۹ منبع (۸۴/۵ درصد) رسوب‌گذار و ۲۰ منبع (۱۵/۵ درصد) خورنده هستند. بر اساس شاخص PSI تعداد ۶۶ منبع (۵۱/۱۷ درصد) رسوب‌گذار و ۶۳ منبع (۴۸/۸۳ درصد) خورنده هستند. بر اساس شاخص AI تعداد ۱۰۱ منبع (۷۸/۳ درصد) تمایل به رسوب‌گذاری و ۲۸ منبع (۲۱/۷ درصد) خورندگی متوسط دارند. بر اساس شاخص RSI سطح منطقه به سه طبقه خورنده با تعداد ۳۹ منبع (۳۰/۲۳ درصد)، حالت تعادل با ۵۳ منبع (۴۱/۰۸ درصد) و رسوب‌گذار با ۳۷ منبع (۲۸/۶۸ درصد) تقسیم‌بندی شد. با توجه به شناخت منطقه و نقشه زمین‌شناسی حوضه رودخانه حبله‌رود (وجود لایه‌های آهکی فراوان و سنگ‌های تبخیری) نتایج دو شاخص لانژلیه و تخریبی به واقعیت نزدیک‌ترند. بررسی ارتباط بین جنس لایه‌های زمین و کیفیت شیمیایی آب نشان داد که وجود آهک، لایه‌های آهکی و سنگ‌های تبخیری در بیشتر سطح منطقه مورد مطالعه به ویژه در مناطق مرکزی و پایین دست حوضه، سبب افزایش سختی و رسوب‌گذاری آن شده است. نتایج این تحقیق با نتایج ملکوتیان و همکاران [۱۶]، کینسلا و همکاران [۱۳]، استواری و همکاران [۱۹] و گوتیر و همکاران [۶] که منابع آب حوضه‌های مورد مطالعاتی را به دلیل وجود لایه‌های آهکی و سازندهای کربناتی رسوب‌گذار تعریف کردند هم‌خوانی دارد. همچنین لازم به ذکر است که افزایش دمای آب در پایین‌دست حوضه (۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد) و وجود بی‌کربنات کلسیم بالا (۳۵۳ mg/l) نیز در امر رسوب‌گذاری تأثیر بالایی داشته است که با نتایج لیانگ و همکاران [۱۴]، رفایت و همکاران [۲۰] و تقی‌پور و همکاران [۲۲] در یک راستا است. همچنین خورندگی در شمال، شمال غربی و جنوب غربی حوضه به دلیل غلظت بالای سولفات در آب زیرزمینی، کاهش دمای آب در محدوده‌های فیروزکوه و ایوانکی و همچنین مقادیر بالای TDS می‌باشد. نتایج این بخش از تحقیق مطالعات علی‌پور و همکاران [۳]، آگاتمور و اوکولو [۱]، آرکو [۴]، خورسندی و همکاران [۱۲] و میرزابیگی و همکاران [۱۷] مبنی بر اثر سولفات و کاهش دمای آب بر خورندگی را مورد تائید قرار می‌دهد. بنابراین، این تحقیق اطلاعات با ارزشی در مورد وضعیت خورندگی و رسوب‌گذاری منطقه و عوامل مؤثر بر تمایل آب به خورندگی و رسوب‌گذاری در حوضه رودخانه حبله‌رود ارائه داد و نتایج این تحقیق می‌تواند اطلاعات مهمی را جهت تحقیقات مربوط به خورندگی آب مناطق دیگر ارائه نماید. همچنین به متصدیان تامین آب آشامیدنی کمک خواهد کرد تا اقدامات لازم جهت کنترل عوامل خورندگی اعمال نمایند.

استفاده از راه‌کارهایی همچون تعدیل دمای آب، تعدیل pH، استفاده از ترکیبات بازدارنده رسوب‌گذاری و استفاده از ابزارهای تصفیه‌ای با هزینه و تکنولوژی پایین جهت پیشگیری از بروز رسوب‌گذاری و در مورد خورندگی نیز رنگ زدن لوله‌ها و استفاده از لوله‌های مقاوم پلی‌اتیلنی به جای لوله‌های فلزی توصیه می‌شود. در عمل بهترین کار برای ممانعت از خورندگی آن است که با ایجاد یک لایه یکنواخت رسوب کربنات کلسیم از خورندگی جلوگیری شود. روش‌های دیگری نیز جهت جلوگیری از خورندگی وجود دارد، از جمله استفاده از مواد ممانعت‌کننده خورندگی (Inhibitor) نظیر سیلیکات سدیم که با تشکیل لایه در سطوح داخلی لوله‌های فلزی از خورندگی ممانعت به عمل می‌آورد. کاهش خورندگی و رسوبگذاری افزایش کیفیت آب را به دنبال دارد که یکی از هداف آبخیزداری می‌باشد.

منابع

1. Agatemor, C. and Okolo, P.O. 2008. Studies of corrosion tendency of drinking water in the distribution system at the University of Benin. The Environmentalist. 28(4): 379-384.

2. Ahmadi, S.H. and Sedghamiz, A. 2008. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. Environment Monitoring Assessment. 138:357–368.

3. Alipour, V. Dindarloo, K. Mahvi, A. and Rezaei, L. 2015. Evaluation of corrosion and scaling tendency indices in a drinking water distribution system: a case study of Bandar Abbas city, Iran. Journal Water Health. 13(1): 203-209.

4. Arko, O. 2013. Assessment of scaling properties of groundwater with elevated sulfate concentration: a case study from Ergene Basin, Turkey. Arab Journal Geosciences. 6: 4377-4385.

5. Chandrasekharana, H. Sarangia, A. Nagarajanb, M. Singha, V. Natarajanc, K. and Anbazhagan, S. 2009. Variability of soil–water quality due to Tsunami-2004 in the coastal belt of Nagapattinam District. Tamilnadu Journal of

Environmental Management. 89: 63–72.

6. Gauthier, G. Chao, Y. Horner, O. Ramos, O.A. Hui, F. and Lédion J. 2012. Application of the Fast Controlled Precipitation method to assess the scale-forming ability of raw river waters. Desalination. 299: 89-95.

7. Goldberger, A.S. 1962. Best linear unbiased prediction in the generalized linear regression model. Journal of the American Statistical Association. 57: 369-375.

8. Hasani Pak, A. 2013. GeoStatistical (5th Ed.). The Tehran University Press, Tehran, 328 p. (in Persian)

9. Hoseinzadeha, E. Yusefzadeh, A. Rahimi, N. and Khorsandi, H. 2013. Evaluation of Corrosion and Scaling Potential of a Water Treatment Plant. Archives of Hygiene Science. 2(2): 41-47.

10. Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M. 1989. An introduction to applied Geostatistics. Oxford University Press, New York. 561 p.

11. Kalantari, R. Yari, A. Ahmadi, E. Azari, A. Tahmasbi Zade, M. and Gharagazlo, F. 2013. Survey of corrosion and scaling potential in drinking water resources of the villages in Qom province by use of four stability indexes (With Quantitative and qualitative analysis. Archives of Hygiene Science. 2(4): 127-134.

12. Khorsandi, H. Mohammadi, A. Karimzadeh, S. and Khorsandi, J. 2015. Evaluation of corrosion and scaling potential in rural water distribution network of Urmia, Iran. Journal Desalination and Water Treatment. 57(23): 10585-10592.

13. Kinsela, A.S. Jones, A.M. Collins, R.N. and Waite, T.D. 2012. The impacts of low-cost treatment options upon scale formation potential in remote communities reliant on hard groundwater. A case study: Northern Territory, Australia. Science Total Environment. 416: 22-31.

14. Liang, J. Deng, A. Xie, R. Gomez, M. Hu, J. Zhang, J. Ong, C. and Adin, A. 2014. Impact of elevated Ca (2+)/ Mg (2+) concentrations of reverse osmosis membrane desalinated seawater on the stability of water pipe materials. Journal Water Health. 12(1): 24-33.

15. Mahini, AS. Jazi, H. Karimipour, H. Mehri, A. Kamyab, HR. Zareh, A. Mansuri, M. Shariatpanahi, F. Rastin, M. Najafinezhad, A. Pishdad, L. and Momeni, I. 2012. Assessment and land use planning for integrated watershed management Hableh-rud Basin. Publications Pune, Tehran. 338p. (in Persian)

16. Malakootian, M. Mobini, M. and Sharife, I. 2014. Evaluation of Corrosion and Scaling Potential of Wells Drinking Water and Aqueducts in Rural Areas Adjacent to Rafsanjan Fault in During October to December 2013. Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences. 13(3): 293-304. (In Persian)

17. Mirzabeygi, M. Mahvi, A. Naji, M. and Abbasnia, A. 2016. Evaluation of corrosion and scaling indices of drinking water in the villages of Khorasan Razavi province in 2013. Iranian Journal of Research in Environmental Health. 2(1): 60-70.

18. Mirzabeygi, M. Naji, M. Yousefi, N. Shams, M. Biglari, H. and Mahvi, A. 2016. Evaluation of corrosion and scaling tendency indices in water distribution system: a case study of Torbat Heydariye, Iran. Desalination and Water Treatment. 57(54): 25918-25926.

19. Ostvari, Y. Byegi, H. and Davodian, A. 2015. Geostatistical processing Scaling and corrosion potential groundwater Lordegan plain. Journal of Environmental Science and Technology. 17(2): 45-61.

20. Refait, Ph. Jeannin, M. Sabot, R. Antony, H. and Pineau, S. 2015. Corrosion and cathodic protection of carbon steel in the tidal zone: Products, mechanisms and kinetics. Corrosion Science. 90: 375-382.

21. Shams, M. Mohamadi, A. and Sajadi, S.A. 2012. Evaluation of Corrosion and Scaling Potential of Water in Rural Water Supply Distribution Networks of Tabas, Iran. World Applied Sciences Journal. 17(11): 1484-1489.

22. Taghipour, H. Shakerkhani, M. Pourakbar, M. and Belvasi, M. 2012. Corrosion and Scaling Potential in Drinking Water Distribution System of Tabriz, Northwestern Iran. Health Promotion Perspectives. 2(1): 103-111.

23. Vadiati, M. Asghari Moghaddam, A. and Nakhaei, M. 2017. Groundwater Quality Assessment for Agricultural Purposes Using Fuzzy Inference Model. Journal of Iran-Watershed Management Science & Engineering. 10(35): 73-80.

نشریه علمی- پژوهشی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management
Science & Engineering
Vol. 12, No. 43, Winter 2019
سال دوازدهم- شماره ۴۳- زمستان ۱۳۹۷

Abstract

Groundwater Quality Assessment with an Emphasis on Potential Siltation and Corrosion for the Hable-Roud River Basin

O. Asadi Nalivan[1], A. Sadoddin[2], Gh. H. Karami[3] and V. Berdi Sheikh[2]

Received: 04-10-2017 Accepted: 12-06-2018

Groundwater quality, especially siltation and corrosion, are of great importance considering economic and health concerns. Due to the growing population and increasing water demands in the Hable-Roud river basin and therefore increasing importance of groundwater, this research aims to assess the potential of corrosion and siltation in groundwater resources. In this research, the Langelier Saturation Index, Ryznar Stability Index, Puckorius Scaling Index and Aggressive Index indicators were used for corrosion and siltation assessment and geostatistical analyses tools in ArcGIS were applied for zonation of the indicators across the watershed. Given the average values obtained (0.67 for LSI; 6.51 for RSI; 6.09 for PSI; 12.89 for AI), a large portion of the study area (about 74%) is faced with a siltation condition. Considering the minimum values of RMSE, the two indices of LSI and RSI were interpolated using the Kriging method, while the IDW and RBF were considered for the interpolation of the PSI and AI indices, respectively. Results suggest that, based on the SI indicator, 75.3% of the total area encounters a siltation condition while the figures change for AI as 72.96%, for PSI as 56.42% and for RSI as 32.17%. In general, assessment of the corrosion and siltation indicators indicates a siltation status for the groundwater resources of the basin, which necessitates developing a suitable management plan to prevent its economic and health consequences. One of the appropriate ways to deal with the siltation issue is to identify critical areas and then adjust water pH to under saturation level.

Keywords: Groundwater quality, Corrosion, Siltation, Geostatistics, the Hable-Roud river basin.

1. Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
2. Corresponding author and Associate Professor, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Email: amir.sadoddin@gmail.com
3- Associate Professor, Faculty of Earth Science, Shahrood University of Technology