

کلید واژه‌ها: کیفیت آب زیرزمینی، خوردگی، رسوب گذاری، زمین‌آمار، حوضه رودخانه حبله‌رود

مقدمه

خوردگی یکی از پیچیده‌ترین و پرهزینه‌ترین مشکلات مربوط به تامین آب آشامیدنی می‌باشد [۲۰ و ۲۲]. فرآیند خوردگی 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]. زبان‌های اقتصادی، بروز مشکلات مزه، بو، رنگ و ایجاد لکه و افزایش کدورت از مهم‌ترین مشکلات مربوط به خوردگی در آب‌های شرب است [۱]. علاوه بر خسارت‌های مالی ناشی از خوردگی، مهم‌ترین مسئله بهداشتی مربوط به خوردگی، 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 خوردگی 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 رسوب گذاری یا خوردگی کاربرد شاخص‌های خوردگی (لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس^۶ و تهاجمی^۵) است. رسوب گذاری 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 رسوب گذاری می‌تواند باعث مشکلاتی مانند مسدود شدن 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 خوردگی و رسوب گذاری 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

ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با تاکید بر پتانسیل خوردگی و رسوب گذاری 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 خوردگی و رسوب گذاری از دیدگاه اقتصادی و بهداشتی از اهمیت زیادی برخوردار است. این تحقیق با هدف بررسی پتانسیل خوردگی و رسوب گذاری 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 خوردگی و رسوب گذاری 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 رسوب گذاری 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 ۳۵/۷۵، ۱۷/۳۲، ۴۲/۵۶ و ۹۶/۷۲ درصد از حوضه حالت رسوب‌گذار دارد. در مجموع، بررسی شاخص‌های خوردگی و رسوب گذاری نشان داد که آب زیرزمینی حوضه تمایل به رسوب گذاری دارد. بنابراین، برنامه‌ریزی مناسب جهت جلوگیری از آسیب‌های اقتصادی و مضرات بهداشتی ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راهکارهای کاهش رسوب گذاری در وهله اول تعیین مناطق پرخطر و سپس تعدیل pH به زیر حد اشباع می‌باشد.

- 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 زمین‌آماري 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 زمین‌آماري شامل دو مرحله می‌باشد: مرحله اول شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که به وسیله آنالیز نیم‌تغییرنما^۱ قابل بررسی می‌باشد [۱۰]. مرحله دوم تخمین متغیر موردنظر بوده که به مرحله اول وابسته است. لازم به ذکر است شرط استفاده از روش‌های زمین‌آماري، توزیع نرمال داده‌ها است. در زمینه بررسی آب‌های آشامیدنی به لحاظ خوردگی مطالعات زیادی انجام شده است. ولی در زمینه بررسی هم‌زمان خوردگی و کاربرد زمین‌آمار مطالعات زیادی انجام نشده است. علی‌پور و همکاران [۳] با بررسی خوردگی 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 خوردگی است و دلیل آن را افزایش میزان TDS بیان کرده‌اند. خوردسندی 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 خوردگی دشت لردگان پرداختند.

1. Semi Variogram

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 خوردگی کم تا متوسط داشت. آن‌ها بیان داشتند که به دلیل حضور سازندهای کربناتی، پتانسیل رسوب‌گذاری بر پتانسیل خوردگی غلبه دارد. میرزاییگی 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. ودیعی 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 خوردگی 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 خوردگی 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 خوردگی 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 ۳۶° عرض شمالی و ۵۱°۳۹' تا ۵۳°۸' طول شرقی و با مساحت ۱۲۶۶۰ کیلومتر مربع 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, TH, TDS, CO₃, HCO₃ 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 خوردگی و رسوب‌گذاری (جدول ۱) شامل روش‌های لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس و تخریبی شد [۱، ۱۴، ۱۹ و ۲۲].

$C = \text{Log}_{10}(\text{TH}) - 0.4$ (۴) در روش‌های بالا متغیر pH_s از فرمول زیر قابل محاسبه است:

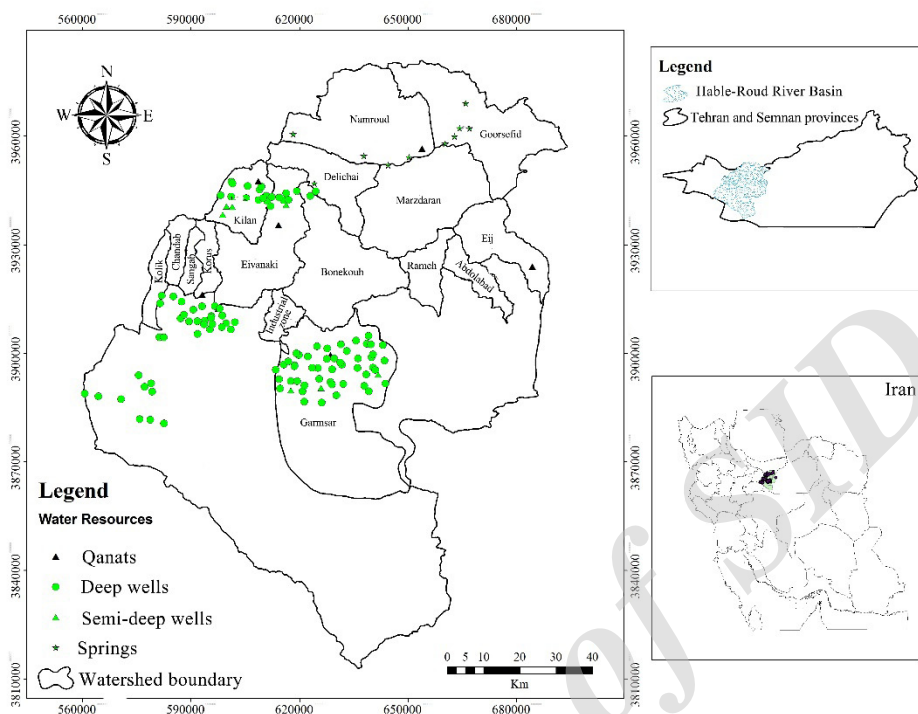
$D = \text{Log}_{10}(\text{T.ALK})$ (۵) $\text{pH}_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$ (۱)

$\text{T.ALK} = \text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ (۶) که در آن:

در روش شاخص تخریبی A معادل قلیائیت کل و H معادل pH_{eq} متغیر نیز از

$A = (\text{Log}_{10}(\text{TDS}) - 1) / 10$ (۲)

$B = -13.12 * \text{Log}_{10}(\text{°C} + 273) + 34.55$ (۳)



شکل ۱- موقعیت حوضه رودخانه حبله‌رود در 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 خوردگی 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

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

معادله زیر به دست می‌آید.

$$pH_{eq} = 1.465 + \text{Log}(T.ALK) + 4.54 \quad (7)$$

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

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

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

که در آن، $y(h)$ مقدار واریوگرام برای جفت نقاط در فاصله (h) ، مقدار $Z(x_i + h)$ مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر در مکان $(x_i + h)$ ، $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر در مکان x_i ، n تعداد اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در محدوده مورد مطالعه است [۸].

روش‌های مختلف درون‌یابی

روش عکس فاصله (IDW^1) : در این روش مقدار فاکتور وزنی $(i\lambda)$ با استفاده از معادله (۹) محاسبه می‌شود [۲]:

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-a}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-a}} \quad (9)$$

که در آن، D_i فاصله بین نقطه برآورد شده و مقدار مشاهده شده در نقطه 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 دامنه کوتاه از تغییرات در داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد و به فواصل همسایگی در پنجره متحرک حساس است. بدین گونه که پنجره حرکت کرده و مقادیر سطحی در مرکز هر پنجره در هر نقطه به وسیله برازش یک چندضلعی تخمین زده می‌شود. این روش انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به روش تخمین‌گر جهانی دارد.

روش توابع شعاعی (RBF^4) : تابع شعاعی تابعی به صورت $\Phi_j(X) = \Phi(X - X_j)$ است که وابسته به فاصله بین $x = Rd$ و نقطه

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

ثابت $X_j \in Rd$ است. در این تابع، Φ تابعی پیوسته و وابسته به هر زیرمجموعه $\Omega \in Rd$ است. R نشان‌دهنده فاصله اقلیدوسی بین هر جفت نقطه در مجموعه 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^۵: کریجینگ یک روش تخمین است که بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار استوار است و بهترین تخمین‌گر خطی نارایب است^۶ [۷]. در صورتی که $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر در مکان x_i باشد، Z_0 مقدار تخمین‌زده شده متغیر در نقطه (x_0) از ترکیب خطی زیر (۱۰) است:

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (10)$$

که در آن، λ_i : وزن داده شده به متغیر x در نقطه 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، نرمال بودن متغیر است.

برای ارزیابی روش‌های زمین‌آمار و انتخاب بهترین روش از نرم‌افزار ArcGIS که توانایی انجام تکنیک ارزیابی متقابل را دارد و معیار آماری ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شد که معادله محاسبه آن به صورت (۱۱) است:

$$RMSE = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(x_i) - Z(x_i))^2 \right] / n} \quad (11)$$

که در آن، $\hat{Z}(x_i)$: مقدار برآورد شده در نقطه x_i ، $Z(x_i)$: مقدار اندازه‌گیری‌شده در نقطه x_i ، i : شماره نقاط، n : تعداد نقاط مشاهده شده معیار. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای همه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود و در پایان به ازای هر نقطه مشاهده‌ای یک نقطه 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

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

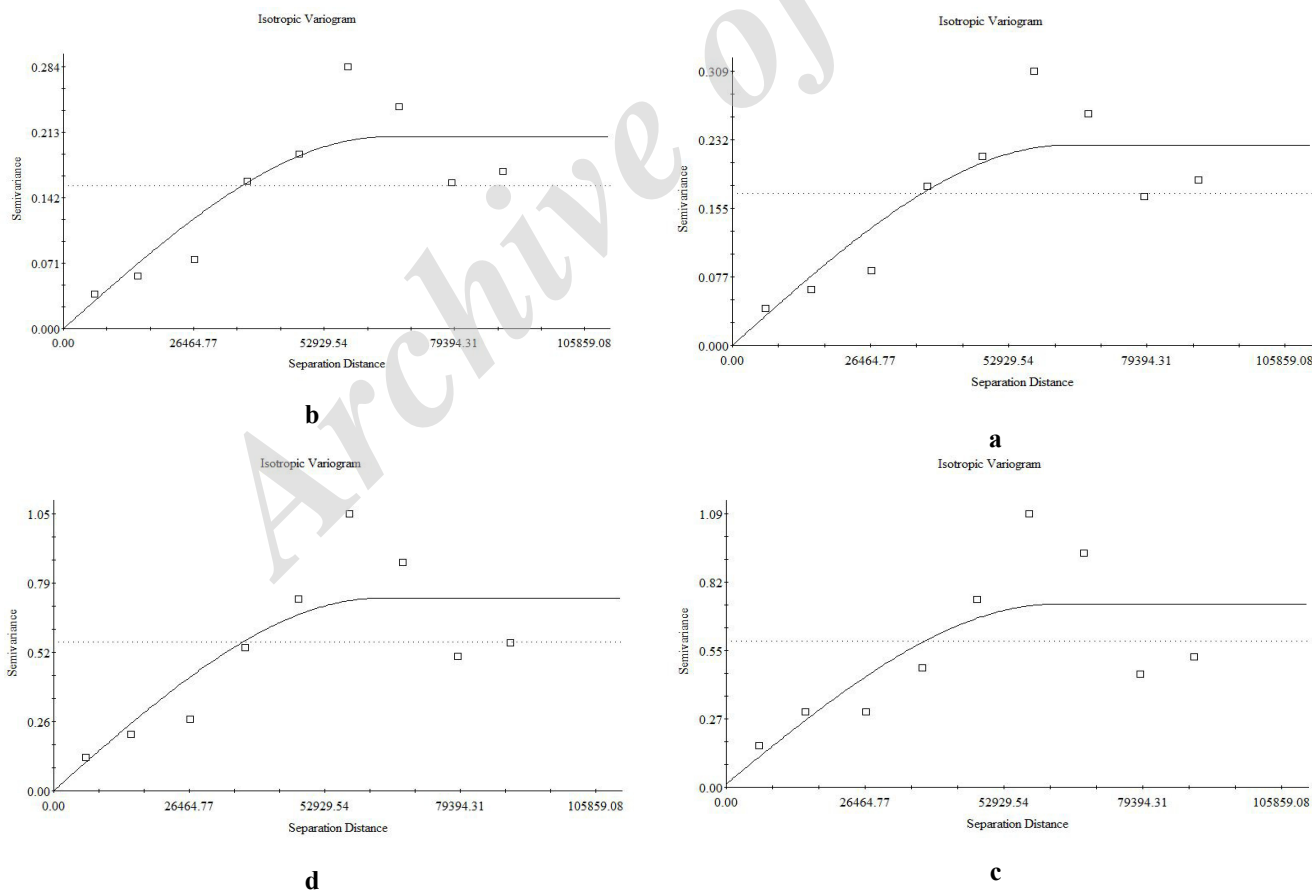
Table 2. Statistics of the indices investigated

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

جدول ۳: مشخصات مدل واریوگرام منتخب برای شاخص‌های مورد بررسی

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

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



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

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

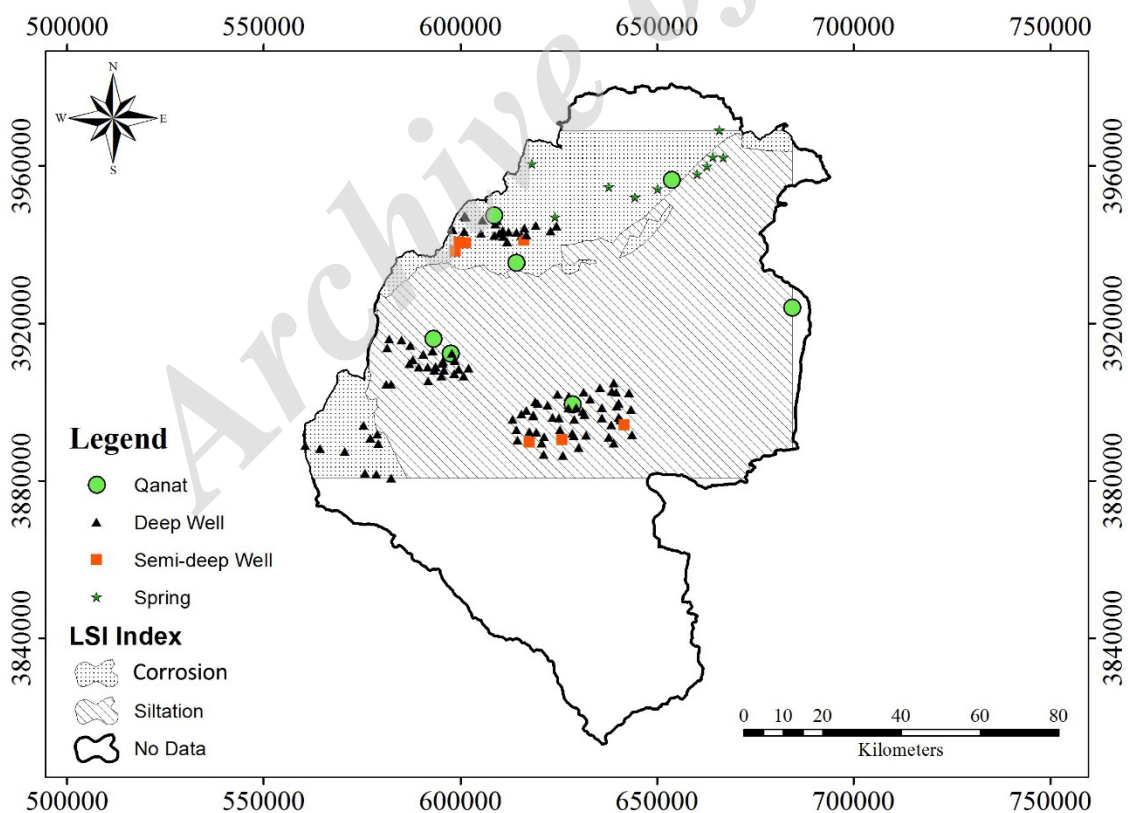
مناسب‌ترین روش میان‌یابی

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.

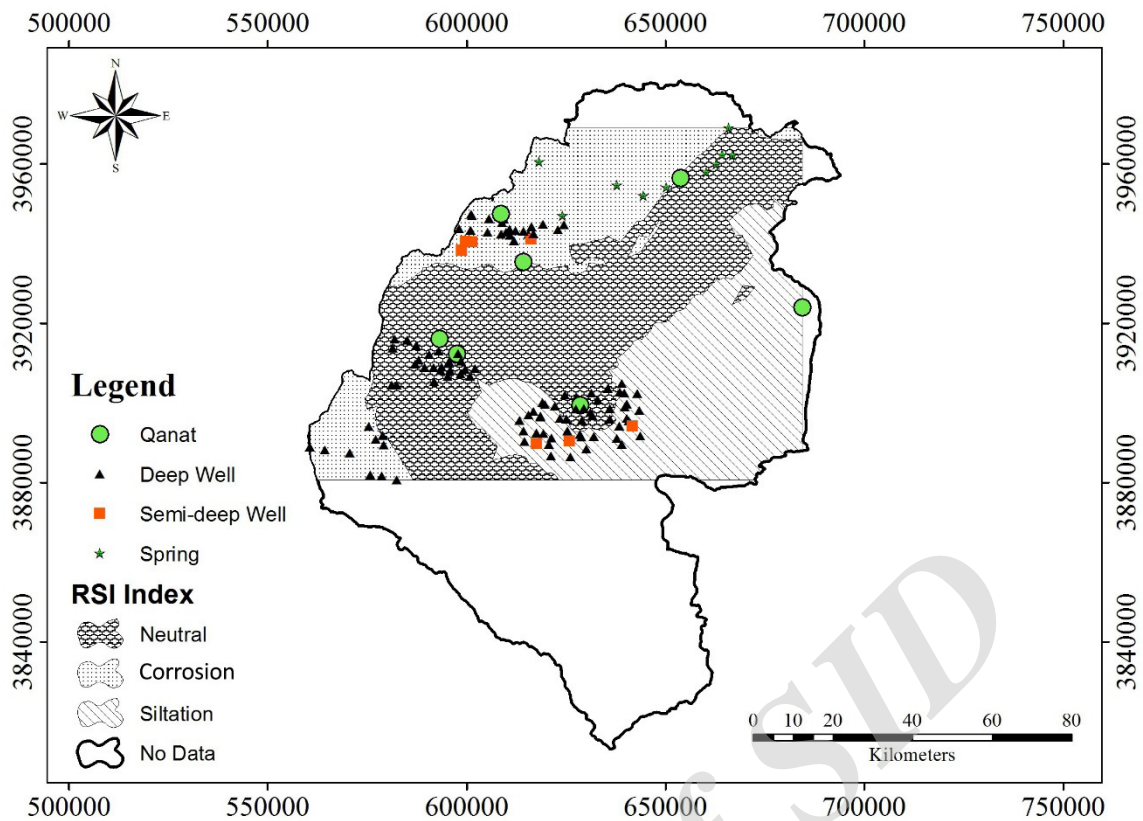
جدول ۴- مقادیر RMSE شاخص‌های مورد مطالعه با استفاده از روش‌های زمین‌آماري
Table. 4 RMSE values of the indices using geostatistical methods

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



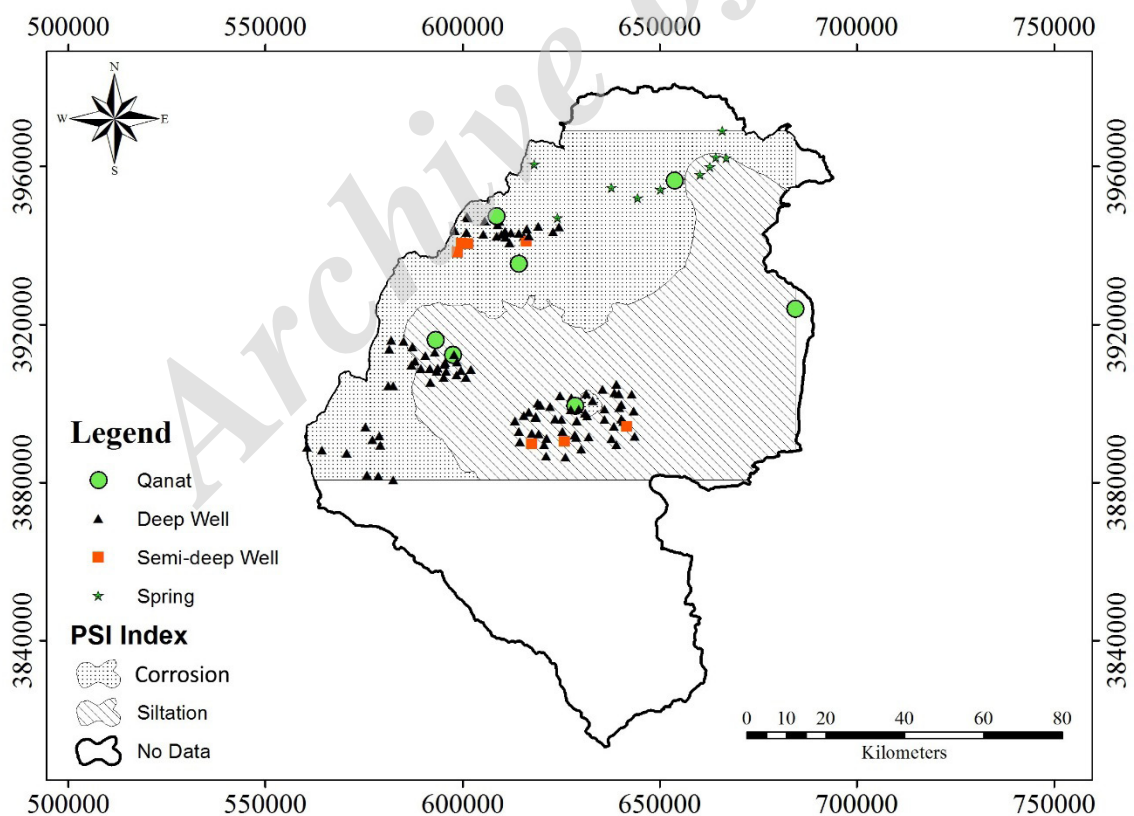
شکل ۳- پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی بر اساس شاخص لانژلیه در حوضه رودخانه حبله‌رود

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



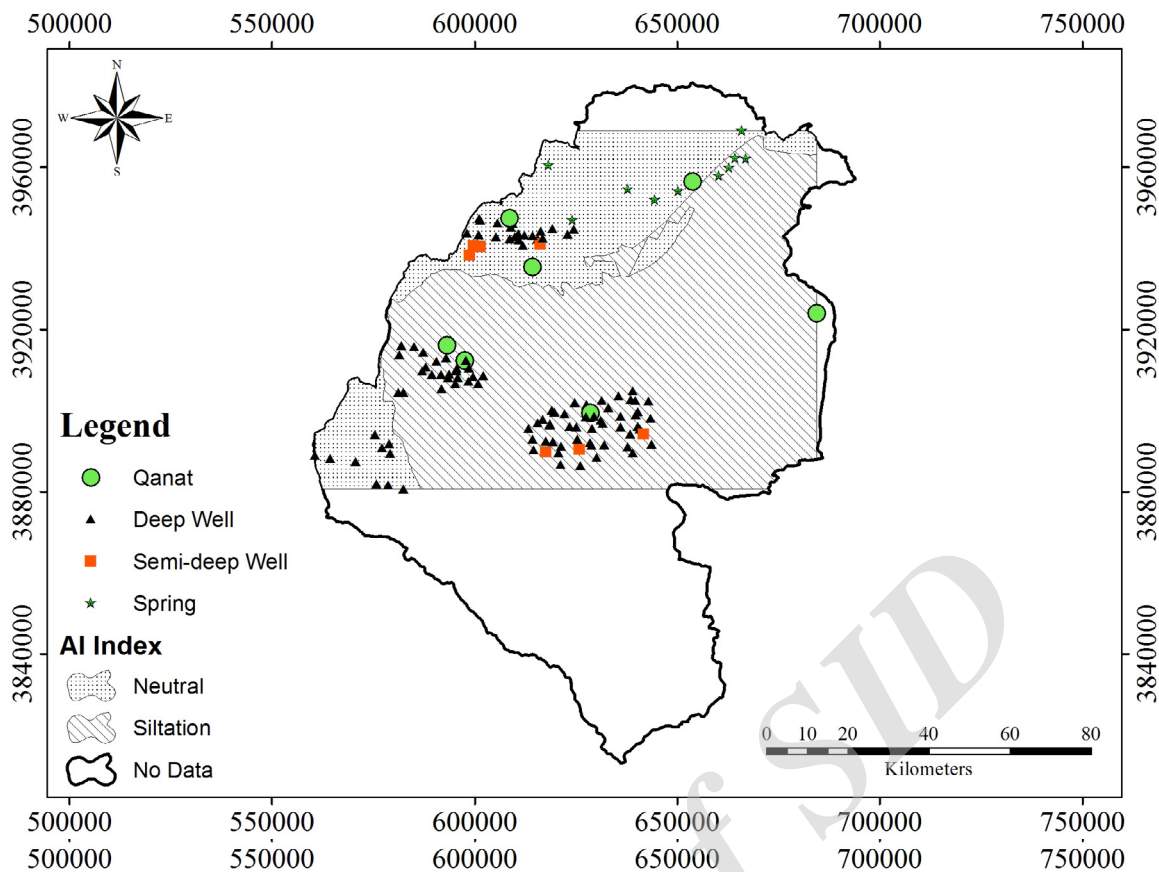
شکل ۴- پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی بر اساس شاخص رایزنر در حوضه رودخانه حبله‌رود

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 خوردگی و رسوب‌گذاری برای شاخص‌های مختلف

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

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

خورندگی و رسوب گذاری آب از اهم مسائلی است که در پایش سیستم های 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 پدیده های فوق می تواند باعث آسیب های بهداشتی و اقتصادی فراوانی گردد. بررسی ها نشان داده که در کشور مقادیر قابل توجهی از آب (بیش از ۲۰ درصد) در اثر نشت از شبکه های توزیع آب در اثر خورندگی هدر می رود و همچنین در اثر رسوب گذاری در لوله ها افت فشار (کاهش ظرفیت انتقال) حاصل می شود. این موارد خود باعث افزایش مضاعف فشار به منابع آب های سطحی و زیرزمینی می شود که سلامت و پایداری آبخیزها را به خطر می اندازد. میانگین محاسبه شاخص های LSI, RSI, PSI و AI نشان می دهد که آب اکثر منابع آب زیرزمینی موجود در حوضه رودخانه حبله رود دارای پتانسیل رسوب گذاری هستند. بر اساس شاخص LSI تعداد ۱۰۹ منبع (۸۴/۵ درصد) رسوب گذار و ۲۰ منبع (۱۵/۵ درصد) خورنده هستند. بر اساس شاخص PSI تعداد ۶۶ منبع (۵۱/۱۷ درصد) رسوب گذار و ۶۳ منبع (۴۸/۸۳ درصد) خورنده هستند. بر اساس شاخص AI تعداد ۱۰۱ منبع (۷۸/۳ درصد) تمایل به رسوب گذاری 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 رسوب گذار با ۳۷ منبع (۲۸/۶۸ درصد) تقسیم بندی شد. با توجه به شناخت منطقه و نقشه زمین شناسی حوضه رودخانه حبله رود (وجود لایه های آهکی فراوان و سنگ های تبخیری) نتایج دو شاخص لانژلیه و تخریبی به واقعیت نزدیک ترند. بررسی ارتباط بین جنس لایه های زمین و کیفیت شیمیایی آب نشان داد که وجود آهک، لایه های آهکی و سنگ های تبخیری در بیشتر سطح منطقه مورد مطالعه به ویژه در مناطق مرکزی و پایین دست حوضه، سبب افزایش سختی و رسوب گذاری آن شده است. نتایج این تحقیق با نتایج ملکوتیان و همکاران [۱۶]، کینسلا و همکاران [۱۳]، استواری و همکاران [۱۹] و گو تیر و همکاران [۶] که منابع آب حوضه های مورد مطالعاتی را به دلیل وجود لایه های آهکی و سازندهای کربناتی رسوب گذار تعریف کردند هم خوانی دارد. همچنین لازم به ذکر است که افزایش دمای آب در پایین دست حوضه (۱۶/۵ درجه سانتی گراد) و وجود بی کربنات کلسیم بالا (۳۵۳ mg/l) نیز در امر رسوب گذاری تأثیر بالایی داشته است که با نتایج لیانگ و همکاران [۱۴]، رفایت و همکاران [۲۰] و تقی پور 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 محدوده های فیروزکوه و ایوانکی و همچنین مقادیر بالای TDS می باشد. نتایج این بخش از تحقیق مطالعات علی پور و همکاران [۳]، آگاتمور و اوکولو [۱]، آرکو [۴]، خورسندی و همکاران [۱۲] و میرزاییگی و همکاران [۱۷] مبنی بر

اثر سولفات و کاهش دمای آب بر خورندگی را مورد تأیید قرار می دهد. بنابراین، این تحقیق اطلاعات با ارزشی در مورد وضعیت خورندگی و رسوب گذاری منطقه و عوامل مؤثر بر تمایل آب به خورندگی و رسوب گذاری در حوضه رودخانه حبله رود ارائه داد و نتایج این تحقیق می تواند اطلاعات مهمی را جهت تحقیقات مربوط به خورندگی آب مناطق دیگر ارائه نماید. همچنین به متصدیان تأمین آب آشامیدنی کمک خواهد کرد تا اقدامات لازم جهت کنترل عوامل خورندگی اعمال نمایند.

استفاده از راه کارهایی همچون تعدیل دمای آب، تعدیل pH استفاده از ترکیبات بازدارنده رسوب گذاری و استفاده از ابزارهای تصفیه ای با هزینه و تکنولوژی پایین جهت پیشگیری از بروز رسوب گذاری و در مورد خورندگی نیز رنگ زدن لوله ها و استفاده از لوله های مقاوم پلی اتیلنی به جای لوله های فلزی توصیه می شود. در عمل بهترین کار برای ممانعت از خورندگی آن است که با ایجاد یک لایه یکنواخت رسوب کربنات کلسیم از خورندگی جلوگیری شود. روش های دیگری نیز جهت جلوگیری از خورندگی وجود دارد، از جمله استفاده از مواد ممانعت کننده خورندگی (Inhibitor) نظیر سیلیکات سدیم که با تشکیل لایه در سطوح داخلی لوله های فلزی از خورندگی ممانعت به عمل می آورد. کاهش خورندگی و رسوب گذاری افزایش کیفیت آب را به دنبال دارد که یکی از اهداف آبخیزداری می باشد.

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*

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. Najji, 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. Najji, 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.
- 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*.