

## ارزیابی تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت برخوار استان اصفهان)

### چکیده

آب‌های زیرزمینی از منابع اصلی تأمین آب شرب، صنعت و کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران می‌باشند. برداشت بی‌رویه و ورود مواد آلاینده به داخل این آب‌ها باعث شده کیفیت این آب‌ها در مناطق مختلف دست‌خوش تغییراتی باشد. هدف از انجام این پژوهش مقایسه روش‌های درون‌یابی قطعی و زمین‌آماري جهت پهنه‌بندی داده‌های کیفی دشت برخوار استان اصفهان می‌باشد. در این مطالعه از اطلاعات کیفی ۲۹ چاه آب زیرزمینی برای بررسی پارامترهای کیفی شامل EC, TDS, Cl, SAR, SO<sub>4</sub>, Na, Mg و HCO<sub>3</sub> در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ استفاده شده است. از نرم‌افزار GS+ و محیط GIS جهت تعیین و ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی استفاده شد. سپس ویژگی‌های کیفی با استفاده از روش‌های درون‌یابی قطعی و زمین‌آمار پهنه‌بندی گردیدند و با استفاده از معیارهای ارزیابی خطا، روش برتر برای هر ویژگی کیفی در هر دوره مشخص گردید و نقشه‌ی پهنه‌بندی آن‌ها در محیط GIS ترسیم گردید. نتیجه این مطالعه به‌منظور درک بهتر رفتار کیفی آب‌های زیرزمینی بر اساس ویژگی‌های مختلف، مورد استفاده قرار گرفته و تطابق رویکردها و شاخص‌های مختلف پهنه‌بندی موردسجش قرار گرفته و نقشه‌های کیفیت آب زیرزمینی با توجه به ویژگی‌های کیفی طی دوره مورد مطالعه ترسیم گردید. نتایج نشان داد که میانگین ویژگی‌های کیفی EC, TDS, Cl, SAR, SO<sub>4</sub>, Na, Mg و HCO<sub>3</sub> در سال ۱۳۸۵ به ترتیب برابر با ۹۴۲، ۲۸۱/۷، ۲۷/۲۸، ۶/۴۲۸، ۱۰/۴۰۹، ۲۲/۶۰۲، ۸/۹۳۶ و ۴/۱۷۸ بوده که این مقدار در سال ۱۳۹۵ به ترتیب برابر با ۱۰۰۲، ۳۵۲/۴، ۲۱/۶۰۴، ۶/۰۵۹، ۱۰/۶۴۵، ۱۸/۸۶۹ و ۵/۱۸۵ و ۷/۱۲۶ می‌باشد که این افزایش حاکی از کاهش کیفیت آب بوده است.

**واژگان کلیدی:** آب‌های زیرزمینی، پارامتر کیفی، دشت برخوار، روش زمین‌آمار.

### مقدمه

آب برای حفظ زندگی ضروری است. کمبود آب یکی از چالش‌های جدی عصر حاضر می‌باشد که پیش‌بینی می‌شود در آینده‌ای نزدیک، چنانچه به‌درستی مورد توجه قرار نگیرد به یکی از مهم‌ترین عوامل منازعه بین انسان‌ها و کشورها مبدل گردد (اصغری سراسکانرود و دولتشاهی، ۱۳۹۷). منابع آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین منابع آب به شمار می‌روند که شناخت صحیح و بهره‌برداری اصولی از آن‌ها می‌تواند در توسعه پایدار فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی یک منطقه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش به‌سزایی داشته باشد (ایزدی و همکاران، ۱۳۹۰). آب زیرزمینی بعد از یخچال‌ها بزرگ‌ترین ذخیره آب شیرین زمین محسوب می‌شود و قابل توجه است که آب زیرزمینی فقط ۶ درصد آب‌های موجود در کره زمین را تشکیل می‌دهد. حال آنکه این حجم بسیار ناچیز ۹۸ درصد آب شیرین قابل استفاده شده را تأمین می‌کند (Di Piazza, 2011). بر اساس ارزیابی‌های دانشمندان در نیمه دوم قرن ۲۱ به دلیل تغییرات آب و هوایی مقدار ذخایر آبی جهان ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و کشورهای زیادی با مشکل کمبود آب شیرین مواجه خواهند شد (پیری و بامری، ۱۳۹۳). آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین منبع آب شیرین جهان هستند. آب آشامیدنی دو میلیارد نفر مستقیماً از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود و برای آبیاری بزرگ‌ترین بخش تهیه غذا در جهان استفاده

صیاد اصغری سراسکانرود<sup>۱\*</sup>

بتول زینالی<sup>۲</sup>

احسان قلعه<sup>۳</sup>

۱ و ۲. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۳. دانشجوی دکتری گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

\*مسئول مکاتبات:

s.asghari@uma.ac.ir

کد مقاله: ۱۴۰۰۲۰۸۸۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۹

این مقاله پژوهشی و برگرفته از طرح پژوهشی است.



می‌شود. استفاده از آب زیرزمینی در این اواخر به واسطه افزایش تقاضای آب، به دلیل رشد سریع جمعیت و صنعتی شدن، چندین برابر افزایش یافته است (Chowdhury, 2016). آب‌های زیرزمینی در مقایسه با آب‌های سطحی دارای مزیت‌های مختلفی است که در این بین می‌توان به کیفیت بالاتر و آلودگی کمتر آن‌ها اشاره کرد. ضمن این که در مناطق خشک و بیابانی که آب‌های سطحی به میزان کم دیده می‌شوند، آب‌های زیرزمینی به عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب، قابل دسترس هستند (Abijith et al., 2020). در چند سال اخیر، شاهد افت کمی و کیفی و به هم خوردن تعادل طبیعی منابع آب زیرزمینی هستیم و در اکثر آبخوان‌ها بیلان آب منفی و کیفیت نیز شدیداً افت نموده است (علیزاده، ۱۳۹۴). در چند سال اخیر کیفیت و خواص فیزیکی و شیمیایی آب تغییر کرده است که بدون شک برای منابع طبیعی کشور یک هشدار محسوب می‌شود. ورود آلاینده‌های مختلف کشاورزی، صنعتی و شهری نیز باعث آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی شده است. از این رو مطالعه دقیق آب‌های زیرزمینی به منظور ارائه راهکارهایی در جهت حفاظت، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب‌های زیرزمینی، امری ضروری به نظر می‌رسد (دهقان و همکاران، ۱۳۹۰)؛ بنابراین به منظور حفظ کیفیت آب‌های زیرزمینی اطلاع از پراکنش زمانی و مکانی فاکتورهای کیفی آن‌ها حائز اهمیت است. در این راستا روش‌های زمین‌آمار یکی از روش‌های پیشرفته برای پهنه‌بندی آب‌های زیرزمینی است (Adhikari et al., 2020). در روش‌های زمین‌آمار، تخمین بر اساس ساختار فضایی موجود در محیط موردنظر صورت می‌گیرد. زمین‌آمار به عنوان شاخه‌ای از آمار کاربردی شامل مجموعه مطالعاتی است که به بررسی تغییرات یک پدیده در زمان و مکان می‌پردازد و قادر به مدل‌سازی آن پدیده به صورت قطعی یا غیرقطعی زمانی و مکانی می‌باشد. هدف از این پژوهش بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت برخوار با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و تهیه نقشه توزیع مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی و مقایسه آن‌ها در نقاط مختلف به دلیل کاهش کیفیت آب زیرزمینی در دشت برخوار استان اصفهان در بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۸۵-۱۳۹۵) می‌باشد که تهدیدی جدی برای سلامت مردم منطقه و فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی در منطقه ایجاد کرده است.

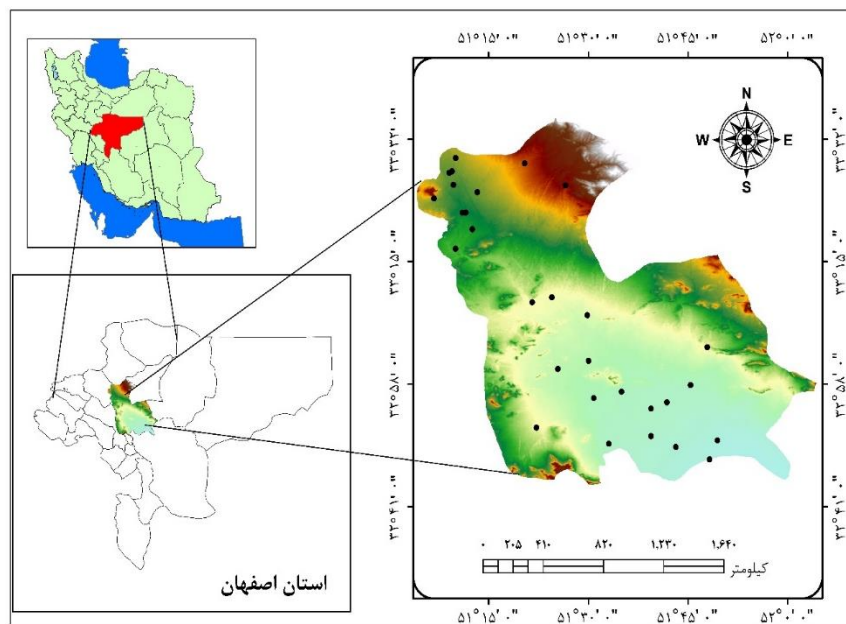
قاسمی و همکاران (۱۳۹۴) تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی دشت خورموج در استان بوشهر را با استفاده از روش زمین‌آمار ارزیابی کردند. هدف آن‌ها از این تحقیق بررسی تغییرات مکانی و زمانی کمی و پارامترهای کیفی ( $SO_4$ ,  $HCO_3$ , Na, Mg, K, Ca, PH, TDS) (EC, SAR, Th, Cl) آب زیرزمینی دشت خورموج واقع در استان بوشهر در دوره‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار GS+ بوده است. مرآت و همکاران (۱۳۹۶) منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز سلیمان شاه در استان کرمانشاه را از نظر کیفی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و GIS پهنه‌بندی نمودند. هدف آن‌ها از این پژوهش، بررسی پراکنش کیفیت آب‌های زیرزمینی در حوضه آبخیز سلیمان شاه و تهیه نقشه آلودگی آب‌های زیرزمینی در اراضی تحت کشاورزی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار بوده است. ایشان به منظور پیش‌بینی پراکنش مکانی ویژگی‌های کل مواد جامد محلول (TDS)، نسبت جذب سدیم (SAR)، کلر و نیترات آب‌های زیرزمینی از ۶۰ چاه موجود در محدوده نمونه‌برداری شده، جهت درون‌یابی از روش‌های کریجینگ و IDW و به منظور انتخاب مدل مناسب از شاخص RSS استفاده نمودند، سپس با استفاده از تکنیک ارزشیابی متقابل و روش‌های ارزیابی خطا، نظیر RMSE و ME مناسب‌ترین روش درون‌یابی را برگزیدند. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد که برای پهنه‌بندی ویژگی‌های مذکور روش کریجینگ معمولی نمایی بر سایر روش‌ها ارجحیت دارد. صمدی و صمدی (۱۳۹۶) در پژوهش خود به بررسی مدل‌سازی تراز، عمق و تغییرات مکانی و زمانی سطح آب‌های زیرزمینی آبخوان کاشان بر اساس استفاده از تکنیک اعتبارسنجی متقابل روش‌های مختلف درون‌یابی قطعی و زمین‌آمار در محیط GIS پرداخته است. برای انجام این تحقیق از اطلاعات سطح آب زیرزمینی ۶۷ چاه مشاهده‌ای در محدوده منطقه موردنظر طی سال‌های ۸۱ تا ۹۰ برای تهیه نقشه سطح آب زیرزمینی آبخوان کاشان موردبررسی و مقایسه قرار گرفته شده است. نتایج ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی نشان داد که توابع چندجمله‌ای محلی با  $MAE = ۱۳/۱۹$ ،  $MBE = ۰/۴۴۴$ ،  $RMSE = ۲۰/۲۹$  و  $R^2 = ۰/۹۹۹$  بیشترین دقت در مدل‌سازی مکانی را دارا بود. پناهی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به بررسی تغییرات زمانی-مکانی ویژگی‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار در دشت مشهد پرداختند. در این مطالعه، اطلاعاتی کیفی ۴۱ چاه آب زیرزمینی برای ماه‌های تغذیه و تخلیه در سال‌های ۱۳۸۰-۱۳۹۳ موردبررسی قرار گرفت. آن‌ها از نرم‌افزار GS+ و محیط GIS جهت تعیین و ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از کریجینگ معمولی با دارا بودن کمترین میزان RMSE و بیشترین  $R^2$  بهترین برآورد را در

منطقه داشته است. همچنین نتایج بررسی ویژگی‌های کیفیت آب نشان داد که به‌غیر از  $Mg$  بقیه پارامترها در طی این سال‌ها تغییرات افزایشی داشته و در بین این پارامترها، هدایت الکتریکی ( $EC$ ) و مجموع املاح محلول ( $TDS$ )، افزایش چشمگیرتری داشته که باعث کاهش کیفیت آب طی این سال‌ها شده است. همچنین نتایج این تحقیق بیانگر این بوده است که علت اصلی کاهش کیفیت آب در دشت مشهد، وجود نواحی صنعتی و مسکونی و توسعه اراضی کشاورزی بوده است. Celik (۲۰۱۵)، تغییرات زمانی تراز آب زیرزمینی در بالادست حوضه آبریز دجله در دیار بکر ترکیه را با استفاده از GIS بررسی و دلایل احتمالی تغییرات آب زیرزمینی را موردتوجه قرارداد. در این بین تغییر اقلیم و به‌طور مشخص افزایش دما و کاهش بارندگی‌ها در چند دهه گذشته عامل مهمی در تغییرات شدید سطح آب زیرزمینی بوده است. Boufekane و Saighi (۲۰۱۹) در پژوهشی به ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌اماری در دشت وادی نیل در شمال شرقی الجزیره پرداختند. نتایج نشان داد که مدل کوکریجینگ نمایی از دقت بیشتری نسبت به دو روش کربجینگ و وزن دهی فاصله معکوس برای هر دو شاخص  $EC$  و  $SAR$  است. Patra و Hossain (۲۰۲۰) نیز در تحقیقی به پهنه‌بندی آلودگی و ارزیابی عناصر کمیاب در آب از طریق مدل سازی زمین‌اماری در ناحیه بیربوم در هند پرداختند. این مطالعه نشان داد که مدل زمین‌اماری تجربی Bayesian Kriging می‌تواند در تجزیه و تحلیل توزیع مکانی آلاینده‌ها در هر منطقه جغرافیایی دقت بهتری داشته باشد. Badeenezhad و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به برآورد شاخص کیفی آب‌های زیرزمینی و بررسی عوامل تأثیرگذار در تغییرات آن‌ها در آب شرب شیراز پرداختند. با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی ( $HCA$ )، در آب‌های زیرزمینی منطقه تحقیقاتی سه گروه باکیفیت وجود دارد: گروه اول از ۸ حلقه چاه، گروه دوم ۱۱ حلقه چاه و گروه سوم ۱۶ حلقه چاه. در این زمینه، نمودار پایپر (Piper) نشان می‌دهد که رخساره‌های آب زیرزمینی منطقه موردبررسی شامل پارامترهای  $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$  و  $HCO_3^-$  می‌باشد که این امر به دلیل تعامل آب با سنگ‌آهک سفره کارست است. همچنین نتایج نشان داد که فعالیت‌های هیدرو شیمیایی آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، بیشتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی است اما تا حدی تحت تأثیر روند طبیعی نیز قرار دارد.

دشت برخوار با توجه به شرایط اقلیمی حاکم بر آن و کمبود بارش و خشک‌سالی‌های متوالی، به منابع آب زیرزمینی وابسته است، به‌طوری‌که در حال حاضر به علت برداشت بی‌رویه از این منابع و پیامدهای حاصل از آن، یکی از دشت‌های ممنوعه کشور محسوب می‌شود؛ بنابراین هدف از این تحقیق، ارزیابی تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی و نیز مقایسه روش‌های مختلف زمین‌آمار در پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی در دشت برخوار و تعیین مناسب‌ترین روش پهنه‌بندی ویژگی‌های کیفی  $EC$ ،  $TDS$ ،  $Cl$ ،  $SAR$ ،  $SO_4$ ،  $Na$ ،  $Mg$  و  $HCO_3^-$  برای بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۸۵ و ۱۳۹۵) می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

دشت برخوار بخشی از زیر حوضه مرغاب، واقع در استان اصفهان می‌باشد که خود بخشی از حوضه باتلاق گاوخونی است. این محدوده بین عرض‌های جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۹ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۶ دقیقه شرقی قرار گرفته است. دشت برخوار از غرب به ارتفاعات مورچه‌خورت، از شمال به ارتفاعات شمالی بخش برخوار، از جنوب به اصفهان و از شرق به سگزی و کوهپایه محدود می‌شود. وسعت منطقه مورد مطالعه ۳۴۷۳ کیلومتر مربع می‌باشد که وسعت مناطق پست و کم ارتفاع و سطح دشت ۲۴۵۹ کیلومتر مربع می‌باشد و ۱۰۱۴ کیلومتر مربع از سطح منطقه مورد مطالعه را کوهستان‌ها و ارتفاعات شامل می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

در انجام این پژوهش از داده‌های مربوط به کیفیت آب زیرزمینی شامل؛ هدایت الکتریکی (EC)، مواد جامد محلول (TDS)، کلراید (Cl)، نسبت جذب سدیم (SAR)، یون سولفات ( $SO_4$ )، سدیم (Na)، منیزیم (Mg) و بی‌کربنات ( $HCO_3$ ) که توسط سازمان آب منطقه‌ای و سازمان آب و فاضلاب استان اصفهان و از ۲۹ چاه نمونه‌برداری برداشت و ثبت شده است، در سطح دشت برخوار استفاده گردید. پایه زمانی مشترک جهت مطالعه سال آبی ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ انتخاب شدند. همگنی داده‌ها برای دوره آماری بین سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ به روش آزمون توالی مورد ارزیابی قرار گرفتند که مطابق روش مذکور هیچ‌گونه ناهمگنی در داده‌ها مشاهده نگردید. مراحل انجام تحقیق بدین ترتیب بود که پس از آماده‌سازی آمار چاه‌های پیژومتری جهت برطرف کردن نواقص موجود در داده‌های مطالعاتی از روش بازسازی داده‌ها استفاده گردید. روش بازسازی استفاده‌شده که صرفاً برای برطرف کردن نواقص در داده‌ها استفاده شد، روش میانینانی می‌باشد که توسط نرم‌افزار Neural Power (بر مبنای شبکه عصبی مصنوعی)، انجام گرفت. جهت نرمال‌سازی داده‌ها از تبدیل‌های لگاریتمی در نرم‌افزار SPSS نسخه شانزدهم استفاده شد و از نرم‌افزار  $GS^+$  برای تحلیل‌های زمین‌آمار استفاده گردید. همچنین به‌منظور استخراج نقشه‌های موردنظر از نرم‌افزار GIS10.5 استفاده شد.

روش‌های استفاده‌شده در این پژوهش به‌منظور درونیابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی شامل مدل‌های جبری (روش وزن دهی فاصله معکوس، چندجمله‌ای جهانی، چندجمله‌ای محلی و توابع پایه شعاعی) و زمین‌آمار (کریجینگ) بوده که توضیحات آن‌ها به شرح زیر می‌باشد: روش وزن دهی فاصله معکوس (Inverse Distance Weighting): از مهم‌ترین روش‌های درونیابی، روش عکس فاصله وزنی می‌باشد. در این روش وزن نقاط نمونه بر روی نقطه مجهول بر اساس فاصله‌ی بین نقاط مجهول محاسبه می‌شود. این اوزان توسط توان وزن دهی کنترل می‌شود. به‌طوری‌که توان‌های بزرگ‌تر، نقاط دورتر از نقطه‌ی مورد تخمین را کاهش می‌دهند و توان‌های کوچک‌تر، وزن‌ها را به طول یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌کنند (Daly, 2006). برای محاسبه ارتباط فاصله‌ای، می‌توان به این نکته اشاره داشت که مقادیر نقاط نزدیک‌تر از نقاطی که دورترند، وزن بزرگ‌تری را به خود می‌گیرند. معادله عمومی به‌صورت زیر است:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad \text{رابطه ۱:}$$

که در آن،  $\hat{Z}(S_0)$ ، مقدار پیش‌بینی شونده برای موقعیت  $S_0$ ؛  $N$ ، تعداد نقاط نمونه‌برداری شده؛  $\lambda_i$ ، وزن اختصاص داده‌شده برای هر نقطه؛ و  $Z(S_i)$  مقدار مشاهده‌شده در موقعیت  $S_i$  می‌باشد.

**روش چندجمله‌ای جهانی (Global Polynomial Interpolation)** از نوع روش‌های قطعی جبری می‌باشد. این روش برای زمانی مناسب می‌باشد که تغییرات مقدار در درون نقاط نمونه‌برداری شده شدید نباشد. همچنین این روش به داده‌های پرت نیز حساس می‌باشد. نتایج درون‌یابی چندجمله‌ای جهانی یک سطح ریاضی هموار است. این روش روندهای تدریجی در سطح را نمایش می‌دهد. موارد استفاده از این روش عبارت‌اند از:

برازش کردن سطحی برای نقاط نمونه‌برداری شده زمانی که سطح به آرامی از منطقه‌ای به منطقه دیگر تغییر کند.

برای آزمون و یا حذف اثرات روند (Albhai et al., 2012).

در این روش یک سطح هموار با استفاده از یک تابع ریاضی (یک چندجمله‌ای با درجات مختلف) به تمام نقاط نمونه ورودی برازش داده می‌شود (قربانی، ۱۳۹۱).

روش چندجمله‌ای محلی (Local Polynomial Interpolation) از نوع روش‌های قطعی جبری می‌باشد و زمانی که بین داده‌ها تغییرات محلی شدید وجود داشته باشد استفاده می‌شود. همچنین این روش به فاصله همسایگی نیز حساس است. درون‌یابی به روش چندجمله‌ای موضعی تعدادی تابع چندجمله‌ای (با درجات مختلف) را به نقاط واقع در یک همسایگی تعیین شده برازش می‌دهد. این کار سبب می‌شود که سطوح با دقت بیشتری ارائه شوند (قربانی، ۱۳۹۱).

توابع شعاع محور (Radial Basis Function) این توانایی را به ما می‌دهند که سطوحی را ایجاد نماییم که هم‌روندهای عام در آن‌ها در نظر گرفته‌شده‌اند و هم تغییرات محلی در آن‌ها لحاظ شده باشند (اسفندیاری‌درآباد و همکاران، ۱۳۹۳). این روش می‌تواند روی داده‌های نویز داری که به‌طور نامنظم در یک منطقه پخش شده‌اند اعمال شده و یک درون‌یابی چند متغیره هموار روی داده‌ها انجام دهد. به عبارت دیگر روش RBF تابعی را می‌یابد که مشابه یک ورقه فلزی نازک است که به‌طور همواری خم شده است و مقید به گذشتن از تمامی داده‌ها هست. این روش یک تابع  $f(x,y)$  را می‌یابد که این تابع نه تنها از تمامی داده‌های موجود می‌گذرد، بلکه مقدار یک تابع انحنا را که میزان هموار بودن تابع  $f(x,y)$  را می‌سنجد را نیز کمینه می‌کند. در روش RBF تابعی که میزان تابع انحنا برای آن مینیمم می‌شود به شکل عمومی زیر می‌باشد و تفاوت روش‌های RBF مختلف در نحوه تعریف تابع RBF در رابطه زیر می‌باشد:

|                                                                           |          |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| $f(x,y) = \sum_{j=1}^n a_j E(\ x - x_j, y - y_j\ ) + b_0 + b_1 x + b_2 y$ | رابطه ۲: |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|

به‌طوری که  $\|\cdot\|$ ، بیانگر طول بردار؛  $x$  و  $y$ ، متغیرهای مکانی؛  $(x_j, y_j)$  مختصات مکانی  $j$  امین نقطه مشاهده‌ای پارامتر  $Z_j$  و  $E$  یک RBF می‌باشد.  $a_j, b_0, b_1, b_2$ ، ضرایبی هستند که باید تعیین شوند تا تابع  $f$  به‌طور صریح مشخص شود.

در روش زمین‌آمار (Kriging) علاوه بر عامل فاصله که در روش‌های مبتنی بر آمار مرسوم حائز اهمیت است، به موقعیت مکانی و همبستگی تغییرات مکانی نقاط نمونه نیز توجه می‌گردد. کریجینگ، بهترین تخمین گر خطی نااریب است و عاری از خطای سیستماتیک می‌باشد. شرط استفاده از این تخمین گر این است که متغیر  $Z$  دارای توزیع نرمال باشد. در غیر این صورت یا باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد و یا این که با تبدیل‌های مناسب توزیع متغیر را به نرمال تبدیل کرد. کریجینگ از این حیث که در آن وزن‌های مقادیر اندازه‌گیری شده مجاور را برای استنتاج پیش‌بینی در هر موقعیتی به کار می‌برد، شبیه روش IDW است. اگرچه، وزن‌ها تنها مبتنی بر فاصله بین نقاط اندازه‌گیری شده و موقعیتی که قرار است پیش‌بینی صورت گیرد، نیست، بلکه مبتنی بر آرایش مکانی سرتاسری میان نقاط اندازه‌گیری شده نیز می‌باشد. برای استفاده از آرایش مکانی

در وزن‌دهی‌ها، کمیت خودهمبستگی مکانی باید تعیین شود. از بین توابع همبستگی، کوواریانس و نیم تغییر نما برای نشان دادن پیوستگی مکانی داده‌ها، نیم تغییر نما بیشترین کاربرد را به خود اختصاص می‌دهد. رابطه نیم تغییر نما به صورت زیر می‌باشد:

|                                                                    |                 |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$ | <p>رابطه ۳:</p> |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|

که در این رابطه  $\gamma(h)$ ، مقدار نیم تغییر نما برای جفت نقاطی است که به فاصله  $h$  از هم قرار دارند؛  $n(h)$  تعداد زوج نقاطی است که به فاصله  $h$  از هم قرار دارند؛  $z(x_i)$ ، مقدار مشاهده‌ای متغیر  $x$  در موقعیت  $i$  و  $z(x_i + h)$ ، مقدار مشاهده‌ای متغیر در فاصله  $h$  از  $x_i$  است. شرط استفاده از این تخمین گر این است که متغیر  $z$  دارای توزیع نرمال باشد، بنابراین:

|                                                                                                   |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $E \left[ Z(x_i) - \sum_{i=1}^n \lambda_i Z^*(x_i) \right] = 0, \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ | <p>رابطه ۴:</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|

که در رابطه فوق  $z(x_i)$ ، مقدار مشاهده‌ای متغیر در نقطه  $i$ ام با مختصات معلوم؛  $z^*(x_i)$ ، مقدار تخمینی در همان نقطه  $i$ ام؛  $\lambda_i$ ، وزن داده‌های مشاهده‌ای؛ و  $E$ ، امید ریاضی است؛ بنابراین شرط ناریبی کریجینگ بیانگر آن است که مجموع ضرایب وزنی تخمین باید مساوی واحد باشد. برای ارزیابی روش‌های زمین‌آمار نیاز به بررسی داده‌ها از نظر ساختار مکانی و میزان همبستگی و برازش مدل آن‌ها از طریق نرم‌افزار GS+ وجود دارد که با استفاده از این نرم‌افزار نیز مدل‌های مختلف روش کریجینگ مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. برای درک بهتر ساختار فضایی نمونه‌های برداشت‌شده و انتخاب بهترین روش در درون‌یابی، خودهمبستگی فضایی (Spatial Autocorrelation) بین نمونه‌ها بررسی می‌شود. این بررسی را می‌توان با ترسیم فاصله بین نمونه‌ها و واریانس ارزش نمونه‌ها یا به عبارت دیگر واریوگرام به دست آورد (صمدی، ۱۳۹۶). به عبارت دیگر نیم تغییر نما یا واریوگرام، کمیتی برداری بوده که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری شده را برحسب مربع تفاضل مقدار دوقطه و با توجه به جهت و فاصله آن‌ها نشان می‌دهد. بزرگی نیم تغییر نما بین نقاط به فاصله بین آن‌ها بستگی دارد. فواصل کوچک‌تر نیم تغییر نما کمتر و فواصل بزرگ‌تر نیم تغییر نما بیشتر را به دست می‌دهند. اجزای یک واریوگرام شامل: واریانس تصادفی بدون ساختار (اثر قطعه‌ای)، شعاع تأثیر، واریانس ساختار دار و آستانه می‌باشد (اصغری سراسکانرود و دولتشاهی، ۱۳۹۷). مقدار واریوگرام در مبدأ مختصات را اثر قطعه‌ای ( $C_0$ ) می‌نامند. از نظر تئوری و در حالت ایده آل مقدار واریوگرام در فاصله صفر باید به حداقل مقدار خود یعنی صفر کاهش یابد، ولی واریوگرام‌های واقعی در عمل به این شکل عمل نمی‌کنند. عواملی که در پیدایش اثر قطعه‌ای مؤثر هستند را می‌توان در دودسته‌ی وجود مؤلفه‌های تصادفی در توزیع متغیر که درواقع به تصادفی بودن فرآیندها برمی‌گردد و خطاهای نمونه‌برداری، آماده‌سازی و آنالیز تقسیم نمود. فاصله‌ای که در آن واریوگرام به حد ثابتی رسیده و به حالت افقی نزدیک می‌شود را دامنه تأثیر می‌نامند. درواقع دامنه تأثیر فاصله‌ای است که در خارج از این فاصله، نمونه‌ها بر هم اثری ندارند زیرا توزیع یک متغیر جغرافیایی با ساختار به‌گونه‌ای است که تشابه آن‌ها برای نقاط نزدیک به هم نسبت به نقاط دور از هم بیشتر است. هر چه دامنه تأثیر بزرگ‌تر شود، ساختار مکانی گسترده‌تر می‌گردد و می‌توان از داده‌های بیشتری برای تخمین مقادیر مجهول استفاده کرد (خسروی و عباسی، ۱۳۹۵). به مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه تأثیر به آن می‌رسد آستانه گفته می‌شود. به عبارت دیگر مقدار واریوگرام را پس از رسیدن به مقدار ثابت آستانه می‌گویند که برابر مجموع اثر قطعه‌ای و بخش ساختار دار نیم تغییر نما می‌باشد. RSS به ریشه دوم میانگین مربع خطاهای استانداردشده گفته می‌شود. هر چه میزان این مقدار نزدیک به یک باشد، مدل موردنظر معتبر است، اما بزرگ‌تر از یک نشانگر برآورد تغییرپذیری کم پیش‌بینی‌هاست (Abijith et al., 2020). پیوستگی مکانی قوی با ضریب تبیین ( $R^2$ ) سنجش می‌شود. پایین بودن آماره  $R^2$  نشان‌دهنده تغییرات تصادفی و وابستگی مکانی ضعیف می‌باشد.

اعتبارسنجی تقاطعی روشی است که اجازه می‌دهد تا با استفاده از اطلاعات و داده‌های موجود (داده‌های اندازه‌گیری شده)، مقادیر تخمین شده با مقادیر واقعی مقایسه گردد. در این روش برای هر یک از نقاط اندازه‌گیری شده که معمولاً تنها ابزار مقایسه می‌باشند، می‌توان تخمین انجام داد و سپس به مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی پرداخت. روش کار به این صورت است که ابتدا با ۸۵ درصد نقاط اندازه‌گیری شده نقشه موردنظر

تهیه گردید و سپس مقادیر پیش‌بینی شده برای ۱۵ درصد نقاط باقی‌مانده را از نقشه به دست آورده شد و در پایان با داشتن مقادیر واقعی و تخمینی می‌توان خطا را برآورد نمود. برای انتخاب هر روش و یا انتخاب پارامتر مناسب در آن نیاز به ارزیابی هست. برای ارزیابی میان میزان دقت و خطا میان مقادیر واقعی و تخمینی معیارهای مختلفی وجود دارد که در اینجا آن‌ها میانگین قدر مطلق مجموع انحرافات (Mean Absolute Deviation)، میانگین انحراف خطا (Mean Bias Error) و ریشه دوم میانگین مربع خطا (Root Mean Square Error) شرح داده می‌شوند:

۱. میانگین قدر مطلق مجموع انحرافات (MAD) که از طریق رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

|          |                                                    |
|----------|----------------------------------------------------|
| رابطه ۵: | $MAD = \frac{\sum_{i=1}^n  Z^*(x_i) - Z(x_i) }{n}$ |
|----------|----------------------------------------------------|

صحت مدل با MAD تعیین می‌شود که مقدار صفر آن نشان‌دهنده صحت ۱۰۰ درصد و هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد حاکی از کم شدن صحت مدل است.

۲. ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) که هر قدر کمتر باشد نشانگر خطای کمتر مدل است. فرمول عمومی روش فوق به صورت رابطه ۶ می‌باشد

|          |                                                              |
|----------|--------------------------------------------------------------|
| رابطه ۶: | $RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}}{n}$ |
|----------|--------------------------------------------------------------|

که در روابط فوق  $Z^*(x_i)$  مقدار برآورد شده متغیر در نقطه  $x_i$ ،  $Z(x_i)$  مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه  $x_i$  و  $n$  تعداد نقاط با متغیر مشاهده‌ای می‌باشد (خسروی و عباسی، ۱۳۸۵).

۳. در مطالعه حاضر مقادیر مشاهده‌شده با استفاده از معیار میانگین انحراف خطا (میانگین بایاس) با مقادیر برآورد شده مقایسه شدند که از طریق رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

|          |                                          |
|----------|------------------------------------------|
| رابطه ۷: | $MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Es - E0)}{N}$ |
|----------|------------------------------------------|

معمولاً از معیار MBE برای تدقیق میزان برآورد استفاده می‌شود. به عبارتی، این معیار نشان می‌دهد که بین مقدار برآورد شده و مشاهده‌شده چه میزان اختلاف وجود دارد. اگر مقدار برابر با صفر باشد نشان‌دهنده آن است که مقادیر نمونه خوب برآورد شده است. در اغلب موارد بین مقدار برآورد شده و مقدار مشاهده‌شده اختلاف‌هایی وجود دارد؛ بنابراین هرچه این شاخص از صفر دور شود نشان می‌دهد که اختلاف بین مقادیر مشاهده‌شده و برآورد بیشتر می‌باشد (قربانی، ۱۳۹۱).

۱. ضریب تبیین ( $R^2$ ) میزان ارتباط بین متغیرها را نشان می‌دهد، اما برای بررسی نوع رابطه بین آن‌ها از رگرسیون استفاده می‌شود. در این روش آماری، رابطه بین متغیرها به صورت تابعی از متغیر وابسته که تغییرات متغیرهای مستقل را پیش‌بینی می‌کنند، تعیین می‌شود. به‌طور کلی از رگرسیون برای رسیدن به اهداف زیر استفاده می‌شود:

تعیین شکل ارتباط بین متغیرها

پیش‌بینی مقادیر وابسته از روی متغیر مستقل (مهدوی و طاهرخانی، ۱۳۹۱).

رگرسیون برای مدل کردن مقدار یک متغیر کمی وابسته که بر رابطه‌ی خطی‌اش با یک یا چند پیشگو بنا شده است به کار می‌رود. مدل رگرسیون فرض می‌کند که یک رابطه‌ی خطی (خط مستقیم) بین متغیر وابسته و هر پیشگو وجود دارد. این رابطه در فرمول (۸) توضیح داده شده است.

|          |                                                   |
|----------|---------------------------------------------------|
| رابطه ۸: | $y_i = b_0 + b_1x_{i1} + \dots + b_px_{ip} + e_i$ |
|----------|---------------------------------------------------|

که در آن  $y_i$  مقدار  $i$  ام متغیر کمی وابسته،  $p$  تعداد پیشگوها،  $b_j$  مقدار ضریب  $j$  ام ( $j=0, \dots, p$ ) و  $x_{ij}$  مقدار مورد  $i$  ام از پیشگوی  $j$  ام است.

۲. ریشه دوم میانگین مربع خطاهای استاندارد شده (RSS) یک روش آماری است که برای اندازه‌گیری میزان واریانس یک مجموعه داده استفاده می‌شود که توسط یک مدل رگرسیون توضیح داده نشده است. همچنین میزان خطای باقیمانده بین عملکرد رگرسیون و مجموعه داده را اندازه‌گیری می‌کند. یک مقدار باقی‌مانده کوچک‌تر از مربع‌ها نشان‌دهنده یک عملکرد رگرسیون است. جمع باقیمانده مربع‌ها همچنین به‌عنوان مجموع مانده‌های مربع شناخته می‌شود. درواقع تعیین می‌کند که یک مدل رگرسیون چگونه داده‌های موجود در مدل را توضیح داده یا نمایان کند. معادله را می‌توان به‌صورت زیر نوشت که در آن  $X$  متغیر مستقل و  $Y$  متغیر وابسته است (آذر و مومنی، ۱۳۹۳):

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| $\sum_{i=0}^n (X_i - X)^2$ | رابطه ۹: |
|----------------------------|----------|

$=X$  میانگین تمام موارد موجود در مجموعه

$=X_i - X$  انحراف معیار هر مورد

## نتایج

جدول ۱ خلاصه آماری نتایج حاصل از اندازه‌گیری نمونه‌ها برای هر دو سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج اندازه‌گیری‌ها، مقادیر هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها در سال ۱۳۸۵ بین ۳۸۸ تا ۲۱۱۲ میکروموس متغیر است که در برخی نمونه‌ها بالاتر از حد استاندارد مجاز ۱۵۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر است. همچنین دامنه تغییرات این پارامتر در سال ۱۳۹۵ بین ۴۸۶ تا ۲۷۸۴ میکروموس است که در این سال نیز برخی از نمونه‌ها بالاتر از حد استاندارد مجاز است. همچنین پارامترهای  $HCO_3$ ،  $Mg$ ،  $Na$ ،  $SO_4$ ،  $SAR$ ،  $Cl$ ،  $TDS$  در هر دو سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ مقدار پایین‌تری از حد مجاز برای آشامیدن دارند.

جدول ۱: خصوصیات آماری پارامترهای کیفی (هدایت الکتریکی به میکروموس بر سانتیمتر و مابقی ویژگی‌ها به).

| سال  | شاخص کیفی                       | تعداد | کمترین | میانگین | بیشترین | انحراف معیار | WHO استاندارد |
|------|---------------------------------|-------|--------|---------|---------|--------------|---------------|
| ۱۳۸۵ | EC (میکروموس بر سانتی‌متر مکعب) | ۲۹    | ۳۸۸    | ۹۴۲     | ۲۱۱۲    | ۳۵۰/۴        | ۱۵۰۰          |
|      | TDS (میلی گرم بر لیتر)          | ۲۹    | ۱۵۲    | ۲۸۱/۷   | ۹۱۲     | ۲۴۳/۲۷       | ۶۰۰           |
|      | Cl (میلی گرم بر لیتر)           | ۲۹    | ۰/۶    | ۲۷/۲۸   | ۱۰۲     | ۲۶/۵۳۳       | ۲۵۰           |
|      | SAR (میلی گرم بر لیتر)          | ۲۹    | ۰/۹۳   | ۶/۴۲۸   | ۱۹/۳    | ۳/۹۶۸        | —             |
|      | $SO_4$ (میلی گرم بر لیتر)       | ۲۹    | ۱/۰۱   | ۱۰/۴۰۹  | ۴۳/۴    | ۱۱/۶۱۷       | ۲۵۰           |
|      | Na (میلی گرم بر لیتر)           | ۲۹    | ۱/۴    | ۲۲/۶۰۲  | ۷۸      | ۲۰/۶۴۶       | ۲۰۰           |
|      | Mg (میلی گرم بر لیتر)           | ۲۹    | ۰/۷    | ۸/۹۳۶   | ۳۲/۵    | ۸/۰۸۱        | ۵۰            |
|      | $HCO_3$ (میلی گرم بر لیتر)      | ۲۹    | ۱/۶    | ۴/۱۷۸   | ۸/۳     | ۱/۵۴۱        | ۵۰۰           |
|      | EC (میکروموس بر سانتی‌متر مکعب) | ۲۹    | ۴۸۶    | ۱۰۰۲    | ۲۷۸۴    | ۲۳۷/۸        | ۱۵۰۰          |
| ۱۳۹۵ | TDS (میلی گرم بر لیتر)          | ۲۹    | ۲۱۶    | ۳۵۲/۴   | ۹۸۲     | ۲۹۵/۱۴       | ۶۰۰           |
|      | Cl (میلی گرم بر لیتر)           | ۲۹    | ۰/۷    | ۲۱/۶۰۴  | ۸۰      | ۱۹/۰۷۲       | ۲۵۰           |



| استاندارد WHO | انحراف معیار | بیشترین | میانگین | کمترین | تعداد | شاخص کیفی                           | سال  |
|---------------|--------------|---------|---------|--------|-------|-------------------------------------|------|
| —             | ۳/۴۱۸        | ۱۴/۱۸   | ۶/۰۵۹   | ۰/۲۷   | ۲۹    | SAR (میلی گرم بر لیتر)              | ۱۳۹۵ |
| ۲۵۰           | ۸/۱۰۹        | ۳۴/۸    | ۱۰/۶۴۵  | ۰/۸    | ۲۹    | SO <sub>4</sub> (میلی گرم بر لیتر)  |      |
| ۲۰۰           | ۱۴/۶۹۸       | ۶۲/۹    | ۱۸/۸۶۹  | ۰/۵    | ۲۹    | Na (میلی گرم بر لیتر)               |      |
| ۵۰            | ۲/۷۰۲        | ۲۰      | ۵/۱۸۵   | ۲/۲    | ۲۹    | Mg (میلی گرم بر لیتر)               |      |
| ۵۰۰           | ۵/۱۳۶        | ۲۲      | ۷/۱۲۶   | ۱      | ۲۹    | HCO <sub>3</sub> (میلی گرم بر لیتر) |      |

نتایج حاصل از درون‌یابی مدل‌های جبری (روش وزن دهی فاصله معکوس، چندجمله‌ای جهانی، چندجمله‌ای محلی و توابع پایه شعاعی) در جدول ۲ آمده است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نسبت به داده‌های پرت حساس است. کوچک‌تر بودن این شاخص دلیلی بر دقت بالاتر تخمین‌ها و یا اختلاف کم بین مقادیر واقعی و مقادیر تخمین زده شده است. در صورتی که RMSE مدل به کاررفته بالاتر از ۷۱ درصد باشد، به معنی عدم دقت قابل قبول برای آن مدل می‌باشد. اطلاعات مندرج در جدول ۴ نشان می‌دهد که با توجه به مقادیر ME و RMSE، روش توابع شعاع محور (RBF) برای هر دو سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است و دارای بیشترین دقت می‌باشد.

جدول ۲: مقادیر آماره‌های ارزیابی برای روش‌های مختلف جبری جهت پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵.

| روش | شاخص کیفی        | سال ۱۳۸۵ |       |        |       | سال ۱۳۹۵ |       |        |       |
|-----|------------------|----------|-------|--------|-------|----------|-------|--------|-------|
|     |                  | RMSE     | ME    | MBE    | MAD   | RMSE     | ME    | MBE    | MAD   |
| IDW | EC               | ۰/۹۴۴    | ۰/۵۹۰ | ۰/۱۸۳  | ۰/۲۴۴ | ۰/۷۲۴    | ۰/۷۳۲ | ۰/۰۶۱  | ۰/۲۲۹ |
|     | TDS              | ۰/۷۶۳    | ۰/۶۲۹ | ۰/۱۷۸  | ۰/۵۷  | ۰/۷۱۶    | ۰/۹۰۳ | ۰/۰۱۰۴ | ۰/۲۸۱ |
|     | Cl               | ۱/۳۷۲    | ۰/۹۳۰ | ۰/۰۴۴۷ | ۰/۳۶۲ | ۰/۴۱۴    | ۱/۵۱۱ | ۰/۰۳۳۸ | ۰/۳۹۱ |
|     | SAR              | ۰/۶۴۴    | ۰/۷۱۱ | ۰/۱۹۸  | ۰/۱۸۶ | ۰/۶۹۸    | ۰/۷۲۴ | ۰/۰۳۷۲ | ۰/۲۸۵ |
|     | SO <sub>4</sub>  | ۰/۴۳۱    | ۰/۸۱۴ | ۰/۰۲۲۳ | ۰/۳۳۵ | ۰/۵۹۱    | ۰/۸۵۷ | ۰/۰۲۴۹ | ۰/۲۲۹ |
|     | NA               | ۰/۶۲۲    | ۰/۹۴۳ | ۰/۰۲۵۴ | ۰/۲۷۴ | ۰/۶۴۳    | ۰/۹۱۹ | ۰/۰۳۶۸ | ۰/۳۴۹ |
|     | MG               | ۱/۲۰۴    | ۰/۸۵۱ | ۰/۰۲۰۳ | ۰/۳۱۵ | ۰/۶۰۲    | ۰/۷۸۵ | ۰/۰۰۴۱ | ۰/۲۳۶ |
| RBF | HCO <sub>3</sub> | ۱/۲۶۹    | ۰/۹۵۲ | ۰/۰۰۸۲ | ۰/۱۸۴ | ۰/۵۰۵    | ۰/۹۹۱ | ۰/۰۱۸۸ | ۰/۱۷۳ |
|     | EC               | ۰/۵۱۸    | ۰/۴۴۷ | ۰/۰۰۶۷ | ۰/۲۲۳ | ۰/۴۴۷    | ۰/۹۳  | ۰/۰۰۳۰ | ۰/۲۰۴ |
|     | TDS              | ۰/۰۴۵    | ۰/۳۹۲ | ۰/۰۰۶۳ | ۰/۲۳۸ | ۰/۶۲۳    | ۰/۳۱۱ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۲۴۷ |
|     | Cl               | ۰/۷۷۸    | ۰/۵۷۴ | ۰/۰۲۳۰ | ۰/۳۳۴ | ۰/۸۴۵    | ۰/۳۹۷ | ۰/۰۱۸۱ | ۰/۳۶۴ |
|     | SAR              | ۰/۰۷۹    | ۰/۹۷۷ | ۰/۰۰۷۱ | ۰/۱۸۱ | ۰/۸۸۰    | ۰/۲۱۵ | ۰/۰۲۳۴ | ۰/۲۶۳ |
|     | SO <sub>4</sub>  | ۰/۳۲۲    | ۰/۹۸۱ | ۰/۰۱۳۰ | ۰/۳۴۵ | ۰/۷۲۴    | ۰/۴۵۹ | ۰/۰۱۲۳ | ۰/۲۰۹ |
|     | NA               | ۰/۱۵۴    | ۰/۱۵۷ | ۰/۰۰۹۵ | ۰/۲۵۶ | ۰/۶۵۳    | ۰/۷۱۱ | ۰/۰۲۱۴ | ۰/۳۰۲ |
|     | MG               | ۰/۳۹۷    | ۰/۶۵۵ | ۰/۰۱۴۱ | ۰/۲۹۱ | ۰/۶۴۳    | ۰/۴۹۸ | ۰/۰۰۴۰ | ۰/۲۱۱ |
|     | HCO <sub>3</sub> | ۰/۴۹۱    | ۰/۱۰۳ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۱۷۷ | ۰/۵۴۴    | ۰/۱۸۱ | ۰/۰۰۲۵ | ۰/۱۴۱ |
|     | EC               | ۰/۶۷۲    | ۰/۷۹۸ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۲۳۶ | ۰/۵۷۹    | ۰/۶۹۳ | ۰/۰۱۵۰ | ۰/۲۰۹ |
|     | TDS              | ۰/۸۲۲    | ۰/۹۶۲ | ۰/۰۰۵۶ | ۰/۲۴۸ | ۰/۵۶۸    | ۰/۸۱۲ | ۰/۰۱۴۳ | ۰/۲۵۴ |
|     | Cl               | ۰/۶۹۸    | ۰/۹۵۱ | ۰/۰۰۶۴ | ۰/۳۳۹ | ۰/۶۰۲    | ۰/۹۹۵ | ۰/۰۱۵۸ | ۰/۲۵۳ |

|       |        |       |       |       |        |       |       |                  |     |
|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|------------------|-----|
| ۰/۲۹۷ | ۰/۰۰۹۰ | ۰/۷۶۳ | ۰/۵۳۱ | ۰/۱۹۱ | ۰/۰۰۳۰ | ۰/۶۸۴ | ۱/۰۳۹ | SAR              | LPI |
| ۰/۲۱۸ | ۰/۰۰۵۳ | ۰/۹۴۴ | ۰/۷۱۶ | ۰/۳۷۳ | ۰/۰۱۰۰ | ۰/۰۳۰ | ۱/۱۷۶ | SO <sub>4</sub>  |     |
| ۰/۳۵۴ | ۰/۰۰۵۳ | ۰/۷۷۸ | ۰/۶۱۲ | ۰/۲۵۹ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۲۱۲ | ۰/۹۰۸ | NA               |     |
| ۰/۲۲۶ | ۰/۰۰۹۱ | ۰/۸۱۱ | ۰/۴۹۱ | ۰/۳۰۶ | ۰/۰۱۸۴ | ۰/۲۸۵ | ۰/۸۸۰ | MG               |     |
| ۰/۱۶۹ | ۰/۰۰۹۲ | ۰/۶۹۸ | ۰/۵۴۴ | ۰/۱۷۲ | ۰/۰۰۲۹ | ۰/۸۸۴ | ۱/۰۷۹ | HCO <sub>3</sub> |     |
| ۰/۲۹۵ | ۰/۰۰۴۶ | ۰/۷۹۱ | ۰/۲۰۴ | ۰/۳۲۹ | ۰/۰۰۷۶ | ۱/۰۲۴ | ۰/۹۴۱ | EC               |     |
| ۰/۳۳۵ | ۰/۰۰۳۴ | ۰/۹۹۸ | ۰/۵۶۸ | ۰/۳۴۱ | ۰/۰۰۷۶ | ۱/۳۸۷ | ۱/۲۱۴ | TDS              | GPI |
| ۰/۴۹۷ | ۰/۰۱۲۶ | ۱/۱۱۲ | ۰/۷۸۵ | ۰/۴۸۶ | ۰/۰۱۳۴ | ۰/۶۷۶ | ۰/۷۴۲ | Cl               |     |
| ۰/۳۱۲ | ۰/۰۱۰۱ | ۰/۸۱۱ | ۰/۵۵۶ | ۰/۲۳۶ | ۰/۰۰۴۸ | ۰/۳۲۳ | ۰/۸۱۵ | SAR              |     |
| ۰/۳۲۹ | ۰/۰۰۰۶ | ۱/۲۵۶ | ۰/۶۹۸ | ۰/۳۷۶ | ۰/۰۰۲۴ | ۰/۷۵۵ | ۰/۶۳۱ | SO <sub>4</sub>  |     |
| ۰/۳۹۷ | ۰/۰۱۱۰ | ۰/۷۹۴ | ۰/۵۴۴ | ۰/۳۶۲ | ۰/۰۰۸۱ | ۰/۶۳۴ | ۰/۵۰۹ | NA               |     |
| ۰/۲۵۸ | ۰/۰۰۱۱ | ۰/۸۱۰ | ۰/۳۰۱ | ۰/۳۴۳ | ۰/۰۰۴۵ | ۰/۹۱۹ | ۰/۴۲۶ | MG               |     |
| ۰/۱۸۳ | ۰/۰۰۱۶ | ۱/۱۳۶ | ۰/۶۴۳ | ۰/۱۷۲ | ۰/۰۰۱۱ | ۰/۵۹۵ | ۰/۷۲۰ | HCO <sub>3</sub> |     |

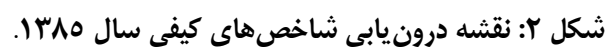
نتایج برازش مدل‌ها به واریوگرام متقابل نشان داد که عناصر مختلف کیفی در دو سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ از مدل‌های متفاوتی تبعیت می‌کنند (جدول ۳).

جدول ۳: نتایج برازش مدل‌ها به واریوگرام متقابل پارامترهای کیفی سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵.

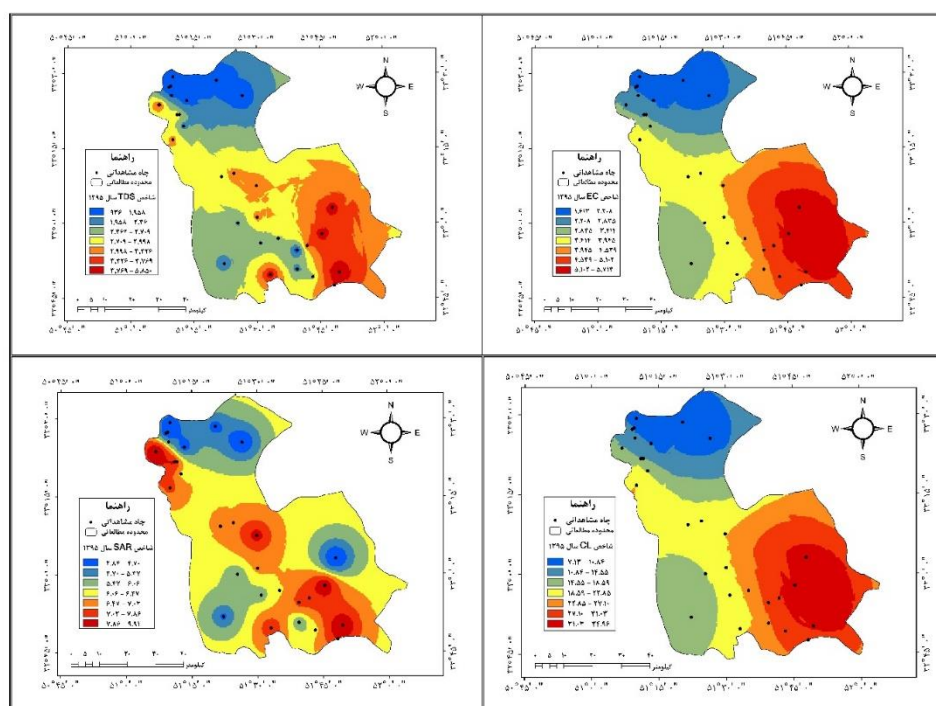
| سال<br>Year | شاخص<br>کیفی     | مدل<br>Model                       | اثر قطعه‌ای<br>Nugget<br>Variance (Co) | آستانه<br>Sill(Co+C) | دامنه<br>تأثیر<br>(A <sub>0</sub> ) | تناسب<br>مکانی<br>Proportion<br>C/(CO+C) | ضریب<br>تبیین<br>(R <sup>2</sup> ) | مجموع مربعات<br>باقیمانده<br>(RSS) |
|-------------|------------------|------------------------------------|----------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| ۱۳۸۵        | EC               | Exponential<br>نمایی               | ۰/۰۶۳                                  | ۰/۳۸۳                | ۹۴۹۰۰                               | ۰/۹۰۲                                    | ۰/۸۶۴                              | ۰/۸۳                               |
|             | TDS              | Exponential<br>نمایی               | ۰/۰۶۸                                  | ۰/۶۳۶                | ۸۸۶۰۰                               | ۰/۸۹۳                                    | ۰/۸۵۶                              | ۰/۷۸                               |
|             | Cl               | Gaussian<br>گوسی                   | ۰/۰۴۱                                  | ۰/۴۶۶                | ۸۳۷۰۰                               | ۰/۹۱۲                                    | ۰/۸۳۶                              | ۰/۸۴                               |
|             | SAR              | Spherical<br>کروی                  | ۰/۰۱۴                                  | ۰/۱۱۳                | ۶۲۱۰۰                               | ۰/۸۷۰                                    | ۰/۷۱۴                              | ۰/۷۷                               |
|             | SO <sub>4</sub>  | Spherical<br>کروی                  | ۰/۰۵۹                                  | ۰/۳۳۵                | ۸۴۸۰۰                               | ۰/۸۲۲                                    | ۰/۸۴۶                              | ۰/۸۹                               |
|             | Na               | Linear<br>خطی                      | ۰/۰۴۹                                  | ۰/۲۹۱                | ۷۹۱۰۰                               | ۰/۸۳۹                                    | ۰/۸۳۵                              | ۰/۹۳                               |
|             | Mg               | Spherical<br>کروی                  | ۰/۰۶۶                                  | ۰/۴۲۶                | ۱۱۰۰۰                               | ۰/۸۴۵                                    | ۰/۸۰۲                              | ۰/۸۶                               |
|             | HCO <sub>3</sub> | to Linear<br>sill<br>خطی آستانه‌ای | ۰/۰۴۲                                  | ۰/۳۱۹                | ۲۲۳۰۰                               | ۰/۸۱۹                                    | ۰/۸۱۳                              | ۰/۹۱                               |
|             | EC               | Exponential<br>نمایی               | ۰/۰۴۶                                  | ۰/۴۱۲                | ۹۰۰۰                                | ۰/۸۸۸                                    | ۰/۹۲۳                              | ۰/۹۴                               |

| سال<br>Year | شاخص<br>کیفی     | مدل<br>Model                       | اثر قطعه‌ای<br>Nugget<br>Variance (Co) | آستانه<br>Sill(Co+C) | دامنه<br>تأثیر<br>(A <sub>0</sub> ) | تناسب<br>مکانی<br>Proportion<br>C/(CO+C) | ضریب<br>تیین<br>(R <sup>2</sup> ) | مجموع مربعات<br>باقیمانده<br>(RSS) |
|-------------|------------------|------------------------------------|----------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|             | TDS              | Linear<br>خطی                      | ۰/۷۳۲                                  | ۰/۱۷۰                | ۷۹۱۶۴                               | ۰/۵۷۲                                    | ۰/۸۹۵                             | ۰/۸۹                               |
|             | Cl               | Exponential<br>نمایی               | ۰/۰۸۶                                  | ۰/۴۶۹                | ۶۰۲۰۰                               | ۰/۸۱۷                                    | ۰/۸۹۸                             | ۰/۸۸                               |
| ۱۳۹۵        | SAR              | Linear<br>خطی                      | ۰/۰۷۳                                  | ۰/۳۰۶                | ۶۸۸۰۰                               | ۰/۷۶۲                                    | ۰/۷۸۴                             | ۰/۸۱                               |
|             | SO <sub>4</sub>  | Spherical<br>کروی                  | ۰/۰۵۴                                  | ۰/۴۵۸                | ۲۳۰۰۰                               | ۰/۸۸۲                                    | ۰/۸۶۸                             | ۰/۸۷                               |
|             | Na               | to Linear<br>sill<br>خطی آستانه‌ای | ۰/۱۱۲                                  | ۰/۴۱۹                | ۴۶۹۰۰                               | ۰/۷۳۲                                    | ۰/۷۶۵                             | ۰/۹۰                               |
|             | Mg               | Gaussian<br>گوسی                   | ۰/۰۵۶                                  | ۰/۸۳۶                | ۶۵۴۶۲                               | ۰/۹۳۳                                    | ۰/۸۹۱                             | ۰/۹۲                               |
|             | HCO <sub>3</sub> | Linear<br>خطی                      | ۰/۰۷۳                                  | ۰/۳۰۶                | ۶۸۸۰۰                               | ۰/۷۶۲                                    | ۰/۷۸۴                             | ۰/۸۵                               |

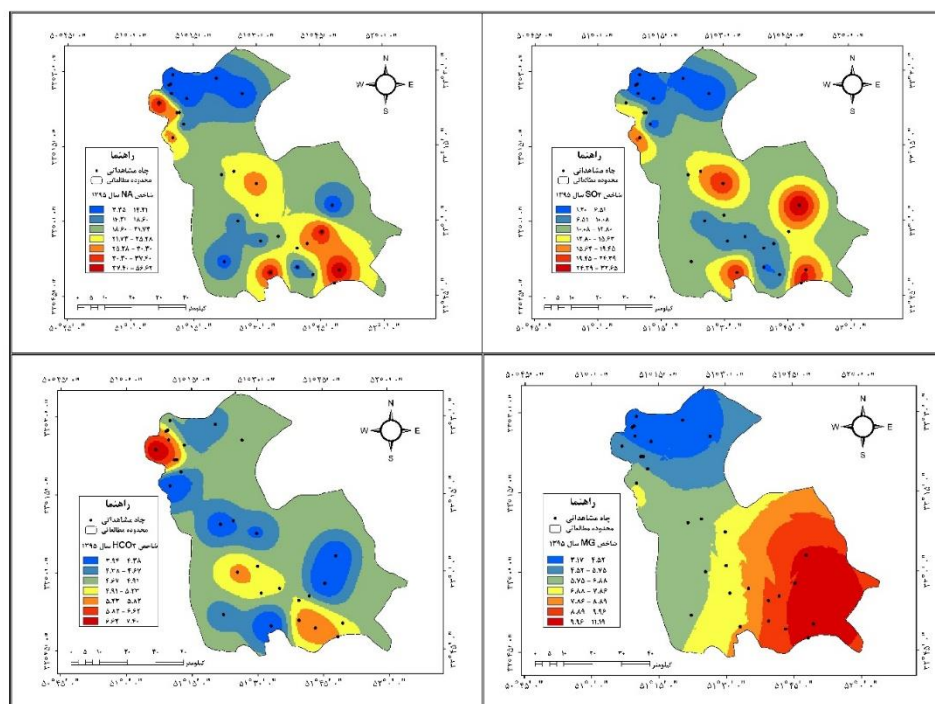
با توجه به میزان بالای وابستگی مکانی و  $R^2$  عنصر هدایت الکتریکی، این عنصر در هر دو سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ از مدل نمایی پیروی می‌کند. شاخص TDS با  $R^2$  برابر ۰/۸۵۶ در سال ۱۳۸۵ از مدل نمایی و در سال ۱۳۹۵ با  $R^2$  برابر ۰/۸۹۵ از مدل خطی پیروی می‌کند. نتایج تحلیل واریوگرافی برای پارامتر غلظت یون کلرید (Cl) در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ نشان می‌دهد عنصر کلرید دارای استحکام مکانی بسیار قوی می‌باشد و به ترتیب از توابع گوسین و نمایی تبعیت می‌کنند. نتایج واریوگرافی پارامتر جذب سدیم (SAR) نشان می‌دهد در هر دو سال استحکام مکانی از ساختار خوبی برای درون‌یابی برخوردار می‌باشد، همچنین تابع کروی و تابع خطی به ترتیب برای سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ برازش خوبی را بر روی واریوگرام‌های متقابل نشان می‌دهند. همچنین پارامترهای  $SO_4$ ، Na، Mg و  $HCO_3$  در سال ۱۳۸۵ به ترتیب از توابع کروی، خطی، کروی و خطی آستانه‌ای و در سال ۱۳۹۵ نیز به ترتیب از کروی، خطی آستانه‌ای، گوسی و خطی پیروی می‌کنند. همان‌طور که از جدول ۲ مشخص می‌باشد، مقدار بالایی از ضریب همبستگی برای تمامی پارامترهای کیفی به‌دست آمده است که درواقع بیانگر نزدیک بودن مقادیر پیش‌بینی گردیده با داده‌های اندازه‌گیری شده و توانایی و دقت بالای روابط بین متغیرهای ورودی با خروجی است. پس از انتخاب بهترین مدل درون‌یابی، نسبت به استخراج نقشه درون‌یابی برای سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ اقدام شد و نقشه حاصل از آن‌ها نیز استخراج گردید (اشکال ۲ و ۳).



با توجه به استخراج نقشه‌های پهنه‌بندی (اشکال ۲ و ۳) ویژگی‌های کیفی سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ مشخص گردید که ویژگی EC در سال ۱۳۸۵ در قسمت جنوب شرق محدوده دارای کمترین مقدار بوده که این شرایط در سال ۱۳۹۵ نیز حاکم است با این تفاوت که در سال ۱۳۹۵، منطقه مرکزی محدوده به سمت غرب افت بیشتری را به همراه داشته است. در سال ۱۳۸۵ تمامی شاخص‌ها در قسمت جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه با بحران بیشتری که به رنگ قرمز مشخص گردیده، مواجه هستند. در سال ۱۳۹۵ دو ویژگی Cl و Mg با تغییرات بسیار اندکی همان رویه سال ۱۳۸۵ را دارند؛ اما ویژگی‌های دیگر مانند SAR، TDS و  $SO_4$  و Na برخلاف سال ۱۳۸۵ که منطقه بحرانی در جنوب شرق منطقه مورد مطالعه قرار داشت، در سال ۱۳۹۵ نه تنها از میزان بحرانی بودن قسمت جنوب شرق کاسته شد بلکه نقاط بحرانی و قرمز رنگ به سمت شمال غرب حرکت کرده و روند جنوب شرق به شمال غرب را در پیش رفته است. میانگین شاخص EC در بازه زمانی ۱۰ ساله به مقدار ۵۸۸ میکرو موس بر سانتی متر افزایش داشته است. شاخص TDS در بازه زمانی مذکور با افزایشی برابر با ۳۹۹ میلی گرم در لیتر مواجه بوده است. شاخص‌های Cl،  $SO_4$ ، Na، Mg و  $HCO_3$  از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ به طور میانگین به ترتیب با ۵/۶۸، ۰/۲۴، ۳/۷۴، ۱/۸۱ و ۱/۰۱ میلی گرم در لیتر افزایش همراه بوده‌اند. همچنین شاخص SAR در ۱۳۹۵ به میزان ۰/۳۷ میکرو موس بر سانتی متر نسبت به سال ۱۳۸۵ افزایش داشته است. بدین ترتیب مشخص می‌شود که تمامی پارامترهای کیفی مورد بررسی در بازه زمانی ۱۰ ساله در دشت بر خوار با افزایش همراه بوده‌اند که این امر می‌تواند متأثر از آلاینده‌های شیمیایی صنعتی موجود در شهرک‌های صنعتی شهرهای اصفهان در جنوب دشت بر خوار و کاشان در شمال این دشت باشد.



شکل ۳: نقشه درون‌یابی شاخص‌های کیفی سال ۱۳۹۵.



ادامه شکل ۳: نقشه درون‌یابی شاخص‌های کیفی سال ۱۳۹۵.

جهت ارزیابی روش‌های درون‌یابی به کاررفته از روش اعتبارسنجی متقاطع استفاده شده است. معیارهای گوناگونی برای این کار وجود دارد که می‌توان به جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAD) و میانگین انحراف خطا (MBE) اشاره کرد. میزان خطاهای به‌دست‌آمده برای نقشه‌های پهنه‌بندی معیارهای کیفی آب زیرزمینی سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵، در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: ارزیابی صحت و دقت نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵.

| سال  | شاخص کیفی        | مدل Model                      | MBE     | MAD    | RMSE   |
|------|------------------|--------------------------------|---------|--------|--------|
| ۱۳۸۵ | EC               | نمایی (Exponential)            | ۰/۰۱۳   | ۰/۰۹   | ۰/۱۱   |
|      | TDS              | نمایی (Exponential)            | ۰/۰۶۲   | ۰/۰۷۱  | ۰/۲۵۵  |
|      | Cl               | گوسی (Gaussian)                | -۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۱۹ | ۰/۰۰۳۸ |
|      | SAR              | کروی (Spherical)               | ۰/۱۸۶   | ۰/۲۷۲  | ۰/۳۶۲  |
|      | SO <sub>4</sub>  | کروی (Spherical)               | -۰/۰۴۶۴ | ۰/۲۲۴  | ۰/۲۷۵  |
|      | Na               | خطی (Linear)                   | -۰/۰۳۰۴ | ۰/۱۱۶  | ۰/۲۳۶  |
|      | Mg               | کروی (Spherical)               | ۰/۰۴۶۷  | ۰/۱۱۸  | ۰/۱۳۹  |
|      | HCO <sub>3</sub> | خطی آستانه‌ای (to sill Linear) | -۰/۰۳۹  | ۰/۰۴۷۳ | ۰/۰۶۹۲ |
|      | EC               | نمایی (Exponential)            | -۰/۰۹۰۲ | ۰/۷۴۲  | ۰/۶۲۱  |
| ۱۳۹۵ | TDS              | خطی (Linear)                   | ۰/۱۱۳   | ۰/۰۸۱  | ۰/۲۳۱  |
|      | Cl               | نمایی (Exponential)            | ۰/۰۴۲   | ۰/۲۱۱  | ۰/۰۹۴  |

| سال  | شاخص کیفی        | مدل Model                      | MBE     | MAD    | RMSE  |
|------|------------------|--------------------------------|---------|--------|-------|
| ۱۳۹۵ | SAR              | خطی (Linear)                   | ۰/۰۷۴   | ۰/۱۰۱  | ۰/۳۱۱ |
|      | SO <sub>4</sub>  | کروی (Spherical)               | ۰/۰۹۹   | ۰/۱۱۷  | ۰/۲۷۰ |
|      | Na               | خطی آستانه‌ای (to sill Linear) | ۰/۱۴۳   | ۰/۲۴۸  | ۰/۱۸۵ |
|      | Mg               | گوسی (Gaussian)                | ۰/۰۷۴   | ۰/۲۰۹  | ۰/۳۶۴ |
|      | HCO <sub>3</sub> | خطی (Linear)                   | -۰/۰۰۷۴ | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۲۳۹ |

### بحث و نتیجه‌گیری

منابع آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین منابع آب به شمار می‌روند که شناخت صحیح و بهره‌برداری اصولی از آن‌ها می‌تواند در توسعه پایدار فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی یک منطقه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش به‌سزایی داشته باشد (Abijith et al., 2020). در چند سال اخیر به علت افزایش حفر چاه‌های عمیق و استخراج بیش‌ازاندازه مخازن آب زیرزمینی در بیشتر حوضه‌ها سطح آب زیرزمینی افت کرده و کیفیت و خواص فیزیکی و شیمیایی آب تغییر کرده است که بدون شک برای منابع طبیعی کشور یک هشدار محسوب می‌شود (Badeenezhad et al., 2020). در این پژوهش در اولین قدم به‌منظور انتخاب بهترین مدل درون‌یابی از بین مدل‌های مختلف، تمامی مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند و تنها مدل‌هایی انتخاب شدند که دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها بودند. با توجه به مقادیر ME و RMSE روش توابع شعاع محور (RBF) برای تمامی ویژگی‌های کیفی برای هر دو سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است. با استفاده از نرم‌افزار GS+ نیز مدل‌های مختلف روش کریجینگ مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت و از میان روش‌های مختلف مدل کریجینگ، روش نمایی برای هر دو سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۸۶۴ و ۰/۹۲۳ به‌عنوان بهترین مدل جهت درون‌یابی ویژگی EC انتخاب‌شده و با استفاده از این مدل، عمل درون‌یابی برای این شاخص انجام شد. شاخص TDS با  $R^2$  برابر ۰/۸۵۶ در سال ۱۳۸۵ از مدل نمایی و در سال ۱۳۹۵ با  $R^2$  برابر ۰/۸۹۵ از مدل خطی، ویژگی غلظت یون کلرید (Cl) در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ به ترتیب از توابع گوسین و نمایی، ویژگی جذب سدیم (SAR) از تابع کروی و تابع خطی به ترتیب برای سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ و ویژگی‌های SO<sub>4</sub>، Na، Mg و HCO<sub>3</sub> در سال ۱۳۸۵ به ترتیب از توابع کروی، خطی، کروی و خطی آستانه‌ای و در سال ۱۳۹۵ نیز به ترتیب از کروی، خطی آستانه‌ای، گوسی و خطی پیروی می‌کنند. پس از انتخاب بهترین مدل‌های درون‌یابی، نسبت به استخراج نقشه درون‌یابی برای سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ اقدام شد و نقشه حاصل از آن‌ها نیز استخراج شد. درنهایت با توجه به استخراج نقشه‌های پهنه‌بندی (اشکال ۲ و ۳) پارامترهای کیفی سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ مشخص گردید که میانگین شاخص EC در بازه زمانی ۱۰ ساله به مقدار ۵۸۸ میکروموس بر سانتی‌متر افزایش داشته است. شاخص TDS در بازه زمانی مذکور با افزایش برابر ۳۹۹ میلی‌گرم در لیتر مواجه بوده است. شاخص‌های Cl، SO<sub>4</sub>، Na، Mg و HCO<sub>3</sub> از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ به‌طور میانگین به ترتیب با ۵/۶۸، ۰/۲۴، ۳/۷۴، ۱/۸۱ و ۱/۰۱ میلی‌گرم در لیتر افزایش همراه بوده‌اند. همچنین شاخص SAR در ۱۳۹۵ به میزان ۰/۳۷ میکروموس بر سانتی‌متر نسبت به سال ۱۳۸۵ افزایش داشته است. بدین ترتیب مشخص می‌شود که تمامی پارامترهای کیفی موردبررسی در بازه زمانی ۱۰ ساله در دشت برخوار با افزایش همراه بوده‌اند.

Boufekane و Saighi (۲۰۱۹) در پژوهشی مشابه به ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آماري در دشت وادی نیل در شمال شرقی الجزیره پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل کریجینگ نمایی دارای RMSE دقیق‌تر نسبت به دو روش کریجینگ و وزن دهی فاصله معکوس برای هر دو شاخص EC و SAR است. نقشه تهیه‌شده با استفاده از روش فوق نشان داد که هدایت الکتریکی (EC) از جنوب به شمال افزایش می‌یابد. همچنین مقادیر زیاد این شاخص در قسمت شمالی دشت (خط ساحلی) وجود دارد که احتمالاً مربوط به آلودگی

آب دریا است. از سوی دیگر توزیع فضایی SAR افزایش استثنایی را از ناحیه مرکزی به شمال نشان می‌دهد. مقادیر بسیار بالای SAR در این قسمت از دشت می‌تواند هم با آلودگی‌های انسانی و هم با حمله دریایی همراه باشد. Hossain و Patra (۲۰۲۰) نیز در تحقیقی به پهنه‌بندی آلودگی و ارزیابی عناصر کمیاب در آب از طریق مدل‌سازی زمین‌آمار در ناحیه بیربوم در هند پرداختند. این مطالعه نشان داد که شبیه‌سازی مونت‌کارلو و مدل زمین‌آمار تجربی Kriging می‌تواند در پیش‌بینی خطرات سلامتی و تجزیه و تحلیل توزیع مکانی آلاینده‌ها در هر منطقه جغرافیایی دقت بهتری داشته باشند.

## منابع

- آذر، ع. و مومنی، م.، ۱۳۹۳. آمار و کاربرد آن در مدیریت. چاپ دوم، انتشارات سمت، ۱۸۳ ص.
- اسفندیاری، ف.، عالی‌جهان، م. و رحیمی، م.، ۱۳۹۷. ارزیابی مدل‌های جبری و زمین‌آمار در تخمین توزیع مکانی سطح ایستابی دشت اردبیل. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، جلد ۳، صفحات ۶۲-۴۴.
- اصغری سراسکانرود، ص. و دولتشاهی، ز.، ۱۳۹۷. بررسی مقادیر املاح و عناصر شیمیایی موجود در منابع آب آشامیدنی شهرستان خرم‌آباد. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۱۸، صفحات ۱۵۴-۱۴۱.
- ایزدی، ع.، دل‌قندی، م. و فراسستی، م.، ۱۳۹۰. برآورد مکانی نسبت جذب سدیم (SAR) و میزان کلر آب زیرزمینی منطقه بوکان با استفاده از روش‌های زمین‌آمار. مجله علوم و مهندسی آبیاری، جلد ۳۴، صفحات ۲۰-۱۱.
- پناهی، ع.ی.، اکبری، م. و بهرنگ، ع.، ۱۳۹۷. بررسی تغییرات زمانی-مکانی پارامترهای کمی و کیفی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار در دشت مشهد. مجله ترویج و توسعه آبخیزداری، ۶ (۲۰): صفحات ۳۵-۲۵.
- پیری، ح. و بامری، ا.، ۱۳۹۳. بررسی روند تغییرات کمی سطح ایستابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت سیرجان). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، شماره ۵ (۱)، صفحات ۴۴-۲۹.
- خسروی، ی. و عباسی، ا.، ۱۳۹۵. تحلیل فضایی داده‌های محیطی با زمین‌آمار. چاپ اول، نشر آذرکلک، ۲۸۲ ص.
- دهقان، م.، رضائیان، ش. و نادری، ج.، ۱۳۹۰. ارزیابی تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت شستر با استفاده از GIS. همایش ژئوماتیک ۹۰، سازمان نقشه‌برداری کشور.
- صمدی، ج. و صمدی، ج.، ۱۳۹۶. مدل‌سازی مکانی-زمانی تغییرات تراز سطح آب‌های زیرزمینی مناطق شهری و روستایی آبخوان کاشان با استفاده از تکنیک‌های GIS. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، شماره ۱۹ (۱)، صفحات ۷۷-۶۳.
- علیزاده، ا.، ۱۳۹۴. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ بیست و نهم، ویرایش پنجم، انتشارات آستان قدس رضوی، ۹۴۲ ص.
- قاسمی، ر.، تباراحمدی، م. خ.، کریمی، و. ا. و عباسی، ا.، ۱۳۹۴. ارزیابی تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی با استفاده از زمین‌آمار (مطالعه‌ی موردی: دشت خورموج، استان بوشهر). دومین همایش ملی راهکارهای پیش روی بحران آب در ایران و خاورمیانه، شیراز، مرکز همایش‌های علمی همایش نگار.
- قربانی، خ.، ۱۳۹۱. رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی: روشی برای ترسیم نقشه‌های هم بارش در استان گیلان. نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره ۲۶ (۳)، صفحات ۷۵۲-۷۴۳.
- مرآتی، ا.، طاهری، ع. و پارسا، ن.، ۱۳۹۶. پهنه‌بندی کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و GIS (مطالعه موردی حوضه آبخیز سلیمان شاه). دانش آب‌و خاک، شماره ۲۷ (۲)، صفحات ۲۴۸-۲۳۷.
- مهدوی، م. و طاهرخانی، م.، ۱۳۹۱. کاربرد آمار در جغرافیا. چاپ چهارم، نشر قومس، ۴۳۲ ص.

Abijith, D., Saravanan, S., Singh, L., Jennifer, J. and Saranya, T., 2020. GIS-based multi criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones- a case study from Ponnaniyar watershed Tamil Nadu India. Journal of Pre-proof, 22: 82-92.

Adhikari, R.K., Mohanasundaram, S. and Shrestha, S., 2020. Impacts of land-use changes on the groundwater recharge in the Ho Chi Minh City Vietnam. Environmental Research, 185: 1-10.



- Albhaisi, M., Brendonck, L. and Batelaan, O., 2012.** Predicted impact of land use change on groundwater recharge of the upper Berg catchment South Africa. *Water Southern African*, 39(2): 211-220.
- Badeenezhad, A., Tabatabaee, H. R., Nikbakht, H. A., Radfard, M., Abbasnia, A., Baghapour, M.A. and Alhamd, M., 2020.** Estimation of the groundwater quality index and investigation of the affecting factors their changes in Shiraz drinking groundwater, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 11: 2352-2369.
- Boufekane, A. and Saighi, O., 2019.** Assessing groundwater quality for irrigation using geostatistical method Case of wadi Nil Plain (North-East Algeria). *Groundwater for Sustainable Development*, 8: 179-186.
- Celik, R., 2015.** Temporal changes in the groundwater level in the Upper Tigris Basin Turkey determined by a GIS technique. *Journal of African Earth Sciences*, 107: 134-143.
- Chowdhury, A., 2016.** Assessment of spatial groundwater level variations using Geostatistics and GIS in Haringhata Block Nadia District West Bengal. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5(5): 276-280.
- Daly, C., 2006.** Guidelines for assessing the stability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology*, 26: 707-721.
- Di Piazza, F., Lo Conti, L. V., Noto, F., Viola, G. and Loggia, L., 2011.** Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13: 396-408.
- Hossain, M. and Patra, P. K., 2020.** Contamination zoning and health risk assessment of trace elements in groundwater through geostatistical modelling. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189: 1-11.
- WHO., 2011.** Guidelines on Technologies for water supply system in small communities, W.H.O, E.M.R.O., and C.F.H.A. Amman. 11(12): 112-113.

