

Comparison of Interpolation Methods for Groundwater Quality Assessment Based on Hydrogeological Characteristics of Shallow Aquifers (Case Study: Babol-Amol Aquifer)

SEYEDEH MONA TABANDEH¹, MAJID KHOLGHI^{2*}, SEYED ABBAS HOSSEINI¹

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Art, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(Received: Nov. 8, 2020- Revised: Dec. 8, 2020- Accepted: Dec. 12, 2020)

ABSTRACT

Groundwater quality management planning is based on spatial distribution of the effective parameter in aquifer pollution. In this study, different interpolation methods in Babol-Amol shallow aquifer were evaluated according to its hydrogeological characteristics. After initial data processing, 21 deterministic and geostatistical interpolation methods with linear and nonlinear relationships including inverse distance weighted (IDW), ordinary kriging (OK), lognormal ordinary kriging (Log_OK), disjunctive kriging (DK), empirical Bayesian kriging (EBK), natural neighbor (NN), trend surface (TS) and Spline were compared in order to select the most suitable interpolation method. The total dissolved solids (TDS) parameter was used in Babol-Amol coastal shallow aquifer near the Caspian Sea in north of Iran. The seven error criteria were used for verification in cross-validation of all sampling wells. The results indicated that the nonlinear Log_OK method produced better results in Babol-Amol aquifer with 71.43 percentage of error criteria. Therefore, it can be concluded that the non-linear Log_OK method had promising performance in shallow aquifers based on their hydrogeological characteristics.

Keywords: Groundwater Contamination, TDS Parameter, Shallow Aquifer, Linear and Nonlinear Spatial Interpolation, Aquifer Characteristics.

* Corresponding Author's Email: kholghi@ut.ac.ir

مقایسه‌ی عملکرد روش‌های درون‌یابی برای ارزیابی کیفی آب‌زیرزمینی بر مبنای خصوصیات آبخوان‌های کم‌عمق (مطالعه موردی: آبخوان بابل-آمل)

سیده منا تابنده^۱، مجید خلقی^{۲*}، سید عباس حسینی^۱

۱. گروه مهندسی عمران آب، دانشکده عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۹/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۹/۲۲)

چکیده

برنامه‌ریزی مدیریت کیفی سفره‌های آب‌زیرزمینی براساس تغییرات مکانی پارامتر موثر در آلودگی آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد. در این مقاله روش‌های مختلف درون‌یابی در آبخوان کم‌عمق بابل-آمل با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پس از پردازش اولیه اطلاعات جهت انتخاب روش درون‌یابی مناسب، ۲۱ روش درون‌یابی قطعی و زمین‌آمار با عملکرد خطی و غیرخطی اعم از روش عکس فاصله (IDW)، کریجینگ معمولی (OK)، کریجینگ معمولی لوگ نرمال (Log_OK)، کریجینگ گسسته (DK)، کریجینگ تجربی بیزی (EBK)، همسایگی طبیعی (NN)، سطح روند (TS) و اسپلاین (Spline) مورد مقایسه قرار گرفتند. پارامتر کل جامدات محلول (TDS) در آبخوان کم‌عمق ساحلی بابل-آمل در مجاورت دریای خزر در شمال ایران در این تحقیق بکار گرفته شد. برای صحت‌سنجی نتایج از ۷ معیار ارزیابی خطا در اعتباریابی حذفی تمامی چاه‌های مشاهداتی غلظت استفاده گردید. نتایج نشان داده است که روش غیرخطی Log_OK در آبخوان کم‌عمق بابل-آمل در ۷۱/۴۳ درصد موارد معیارهای ارزیابی خطا، نتایج بهتری ارائه داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش غیرخطی Log_OK کارایی مناسبی در آبخوان‌های کم‌عمق بر مبنای خصوصیات هیدروژئولوژیکی آن‌ها دارد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی آب‌زیرزمینی، پارامتر TDS، آبخوان کم‌عمق، درون‌یابی مکانی خطی و غیرخطی، خصوصیات آبخوان.

مقدمه

یکی از ابزارهای مهم مدیریتی در حوزه‌ی منابع آب، تسلط کامل بر روند تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب‌زیرزمینی است (Lee et al., 2007). بدین جهت از علم زمین‌آمار که ارتباط مکانی بین فاصله، جهت قرارگیری و مقادیر متغیرها را در نظر می‌گیرد و دارای توانمندی‌های خوبی نظیر افزایش دقت تخمین، کاهش نمونه‌برداری و به تبع آن کاهش هزینه می‌باشد، استفاده می‌شود. نظم و ترتیب زمین‌آمار تکنیک‌های بسیار مفیدی را برای بررسی داده‌های دارای توزیع مکانی نظیر آلودگی آب‌زیرزمینی فراهم می‌کند (Arslan, 2012). کمبود داده‌های مشاهداتی آب-زیرزمینی سبب پیدایش عدم قطعیت قابل توجهی می‌گردد (Liu et al., 2004). دانش زمین‌آمار به عنوان یک تکنیک قدرتمند برای تعیین عدم قطعیت در علوم گوناگونی مانند آب‌زیرزمینی،

ژئوشیمی و منابع آب و خاک مورد توجه قرار گرفته است (Arslan, 2012). روش‌های درون‌یابی در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، ابزار قدرتمندی برای پیش‌بینی مقادیر می-باشند (Gong et al., 2014). انتخاب یک روش زمین‌آمار مناسب برای تخمین آلودگی آبخوان و رسم نقشه‌های هم‌ارزش آلودگی، بسیار حائز اهمیت است.

(Martinez-Cob, 1996) از سه روش درون‌یابی زمین‌آمار کریجینگ معمولی^۲ (OK)، کوکریجینگ^۳ (Co-K) و کریجینگ باقیمانده‌ی اصلاح شده^۴ برای درون‌یابی میانگین درازمدت تبخیر تعرق و بارش سالانه استفاده نمودند. ایشان دریافتند که هیچ‌یک از این روش‌ها بر دیگری برتری ندارد. (Khattak et al., 2014) برای تعیین سطح شوری چاه‌های کم‌عمق پاکستان از روش دو روش کریجینگ معمولی و بیزی^۵ (BK) استفاده کردند و به این

* نویسنده مسئول: kholghi@ut.ac.ir

1 Geographic Information System
2 Ordinary Kriging
3 Co-Kriging
4 Modified Residual Kriging
5 Bayesian Kriging

معمولی لوگ نرمال (Log_OK)، روش کریجینگ گسسته^۷ (DK)، روش کریجینگ تجربی بیزی (EBK)، همسایگی طبیعی^۸ (NN)، اسپلاین و سطح روند (TS) توسط ۷ معیار ارزیابی خطا در اعتباریابی حذفی تمامی چاه‌های مشاهداتی غلظت، برآورد شده و بهترین روش درون‌یابی بر حسب ویژگی‌های آبخوان معرفی گردیده است.

مواد و روش‌ها

توصیف محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی بابل_آمل با مساحت ۱۴۴۵ کیلومتر مربع، در محدوده‌ای به طول جغرافیایی ۱۱° ۵۲' تا ۵۲° ۵۲' و عرض جغرافیایی ۳۶° ۱۸' تا ۳۶° ۴۴' در یک منطقه ساحلی (ساحل دریای خزر) استان مازندران در شمال ایران قرار دارد. متوسط بارش سالانه و دمای محدوده به ترتیب ۸۷۰ mm و ۱۷/۹ °C است.

سه رودخانه‌ی اصلی بابل، هراز و تالار از جنوب به شمال دشت به ترتیب با دبی متوسط ۴۹۳ MCM/year، ۹۴۰ و ۳۱۱ جریان دارند. منابع اصلی تغذیه‌ی این رودخانه‌ها، ذوب برف و بارش است. پس از آبیاری قسمت زیادی از زمین‌های کشاورزی، این رودخانه‌ها وارد دریای خزر می‌شوند. فعالیت اصلی و سنتی مردم منطقه، کشاورزی و باغداری با ۱۰۱۰۰۰ هکتار سطح زیر-کشت برنج و پرتقال است. عمدتاً آب مورد نیاز دشت را رودخانه‌ها و آبخوان‌ها تأمین می‌کنند. تعامل طبیعی رودخانه-آبخوان مانند یک روند دائمی سود-ضرر در تمام فصول رخ می‌دهد. آبخوان بابل_آمل به عنوان تأمین‌کننده ۶۳ درصد آب مورد نیاز مصارف خانگی و کشاورزی-باغداری، نقش مهمی را در منطقه ایفا می‌کند. موقعیت حوضه‌ی مطالعاتی بابل_آمل در شکل (۱) نشان داده شده است.

خصوصیات هیدروژئولوژیکی

آبخوان بابل_آمل آبرفتی و آزاد^{۱۱} است. منبع اصلی تغذیه‌ی آن، بارش و تعامل رودخانه-آبخوان است. جنس سنگ بستر این آبخوان رسی است. رسوبات مخروط‌افکنه‌ای معمولاً درشت‌دانه و شامل قلوه سنگ، شن و ماسه می‌باشند که در تناوب با رسوبات ریزدانه مانند رس و سیلت قرار دارند. دانه‌بندی و جنس رسوبات ناپیوسته در گسترش جانبی و عمق، بسیار متفاوت است. نواحی غرب آبخوان بابل_آمل، تحت تأثیر رودخانه‌ی هراز قرار داشته و حوزه‌ی عمیقی با ضخامت زیاد از رسوبات آبرفتی را بوجود آورده

نتیجه رسیدند که روش دوم دارای دقت بیشتری است. Mirzaei and Sakizadeh (2015) برای تخمین ۱۷ یون آلاینده‌ی آب-زیرزمینی، به مقایسه‌ی سه روش درون‌یابی IDW، OK و EBK (EBK) پرداختند. نتایج حاکی از آن است که روش EBK با اختلاف کم نسبت به سایر روش‌ها دارای دقت بالاتری است. Plouffe *et al.* (2015) برای تخمین بارش ماهانه از روش‌های IDW، اسپلاین صفحه نازک^۲ (TPS)، OK و BK در ماه‌های کم‌بارش و پربارش دو سال دارای میانگین بارش سالانه حداکثر و حداقل استفاده نمودند. ایشان دریافتند که روش‌های BK و TPS به ترتیب برای برآورد بارش‌های حداقل و حداکثر دارای دقت بالاتری می‌باشند. Babu (2016) روش‌های درون‌یابی سطح روند^۳ (TS)، IDW، OK^۴ (UK) و اسپلاین را برای برآورد الگوی مکانی و زمانی بارش مورد ارزیابی قرار داد. نتایج بیان‌گر آن است که روش TS دارای بالاترین دقت برآورد است در صورتی که روش‌های OK و UK با وجود مقادیر خطای بالاتر، سطح درون‌یابی شده‌ی هموار^۵ و واقعی‌تری به دست می‌دهند و از این رو به عنوان بهترین روش شناخته شدند. Gol *et al.* (2017) به مقایسه‌ی روش‌های درون-یابی کریجینگ بلوکی^۶، Co-K و IDW با توان‌های ۱، ۲ و ۴ برای تخمین توزیع مکانی کربن خاک پرداختند. ایشان دریافتند که روش Co-K دارای دقت بالاتری است. Rufo *et al.* (2018) پس از بهینه‌سازی پارامترهای مشخصه‌ی هر روش، از سه روش درون-یابی اسپلاین، IDW و OK برای تخمین سطوح الکترومغناطیسی استفاده نمودند. ایشان دریافتند که روش IDW دارای دقت بالاتری نسبت به سایرین است. Njeban (2018) برای برآورد توزیع مکانی سطح آب‌زیرزمینی به مقایسه‌ی چهار روش درون-یابی IDW، OK، UK^۷ (SK) و RBF پرداخت. نتایج حاکی از آن است که روش UK بهترین نتیجه را حاصل می‌نماید.

با توجه به این که تاکنون ارزیابی دقیقی از تأثیر خصوصیات آبخوان بر انتخاب نوع روش درون‌یابی صورت نگرفته است، تحقیق حاضر به مقایسه‌ی روش‌های درون‌یابی خطی و غیرخطی به منظور ارائه‌ی یک دستورالعمل منسجم برای دست‌یابی به روشی با بالاترین دقت بر پایه‌ی خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان پرداخته است. لذا پارامتر کل جامدات محلول^۸ (TDS) که عمده-ترین آلاینده آب‌زیرزمینی است، در آبخوان کم‌عمق دشت بابل_آمل مازندران واقع در یک منطقه‌ی جغرافیایی مهم ایران با استفاده از ۲۱ ترکیب مختلف روش‌های درون‌یابی اعم از روش عکس فاصله (IDW)، کریجینگ معمولی (OK)، روش کریجینگ

7 Simple Kriging
8 Total Dissolved Solids
9 Disjunctive Kriging
10 Natural Neighbor
11 Unconfined

1 Empirical Bayesian Kriging
2 Thin Plate Spline
3 Trend Surface
4 Universal Kriging
5 Smooth
6 Block Kriging

است که گسترش آن به حاشیه‌ی دریای خزر کشیده شده است. حوزه‌های مقاوم رسوبی در بخش مرکزی و شرق محدوده، تحت تأثیر مخروط‌افکنه‌های سجادرود و رودخانه‌های بابل و تالار بوجود آمده است. این حوزه در مقایسه با حوزه‌ی رسوبی هراز، گسترش محدودی دارد. نقشه‌ی زمین‌شناسی در شکل (۲) نمایش داده شده است.

طبق آزمایشات پمپاژ، میزان تغییرات ضریب قابلیت انتقال آبخوان بابل-آمل در محدوده‌ی ۱۴۶ تا ۱۵۱۲ مترمربع برروز متغیر می‌باشد. بخش غربی دشت به سبب گسترش آبرفت‌های رودخانه‌ی هراز، در مقایسه با بخش شرقی دارای ضریب قابلیت انتقال بیشتری است. نقشه‌ی توزیع مکانی ضریب قابلیت انتقال در شکل (۳) ارائه شده است.

عمق سطح آب‌زیرزمینی از ۰/۵ m تا ۳۷ متغیر است و تغییرات گرادیان هیدرولیکی در این آبخوان از (m/۱۰۰۰) ۲/۴ تا ۵/۵ است. براساس نتایج آزمایشات ژئوفیزیک، متوسط ضخامت لایه اشباع آبخوان بابل-آمل حدود ۸۰ m است. تراز آب‌زیرزمینی و خطوط جریان در شکل (۴) نشان داده شده‌اند.

در محدوده‌ی مورد مطالعه، خروجی آبخوان از چاه‌های پمپاژ برای تأمین نیاز آبی بخش‌های کشاورزی و خانگی MCM ۳۲۳ است و ۶۹ MCM - متوسط بیلان آب‌زیرزمینی طی یک

دوره‌ی ۱۲ ساله با افت سطح آب‌زیرزمینی ۰/۸ m است. از نظر هیدروژئوشیمی، میزان^۱ (EC) در آبخوان بابل-آمل از ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ $\mu\text{moh/cm}$ متغیر است که طبق رابطه‌ی (۱) به TDS تبدیل گردید. نقشه‌ی هم‌ارزش TDS (ppm) شامل رودخانه‌های اصلی محدوده در شکل (۵) نمایش داده شده است.

منابع آماری

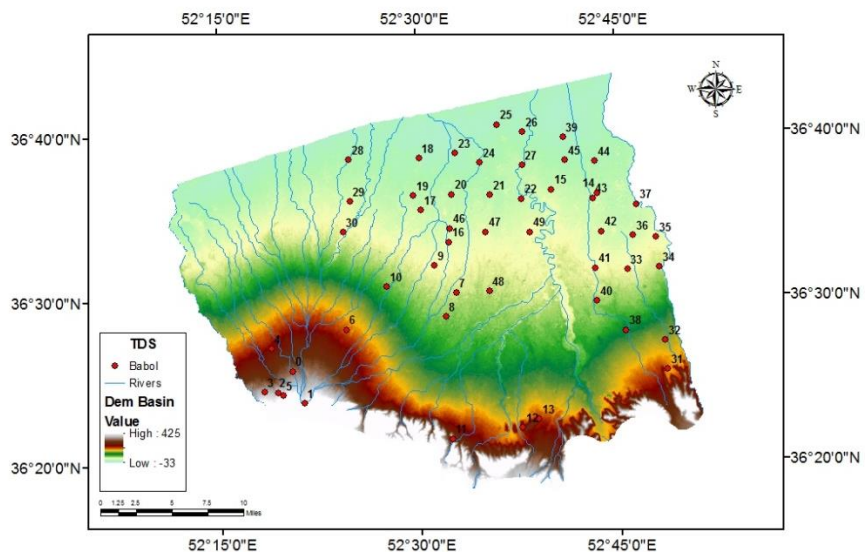
چاه‌های نمونه‌برداری غلظت تقریباً به‌طور یکنواخت در منطقه توزیع شده‌اند تا بیان‌گر خصوصیات کل آبخوان باشند. موقعیت هر چاه نمونه‌برداری با^۲ (GPS) ثبت شده است. پارامتر کل جامدات محلول (TDS) از داده‌های EC که یکی از آلاینده‌های مهم آب‌زیرزمینی در محدوده‌ی مطالعاتی است، با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه شده است (Rhoades et al., 1999):

$$\text{TDS} = 0.64 * \text{EC} \quad (\text{رابطه ۱})$$

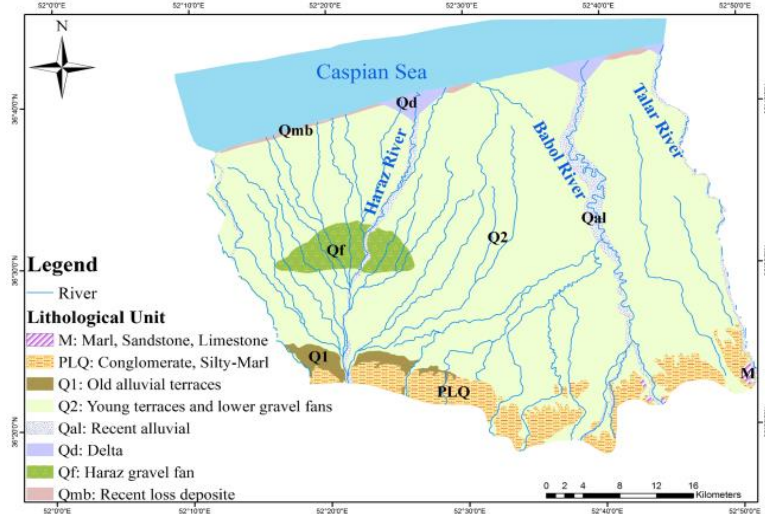
اطلاعات مربوط به ۵۰ چاه مشاهداتی غلظت TDS آبخوان بابل-آمل طی ۱۴ سال آبی (۱۳۷۴ تا ۱۳۸۸) از سازمان محیط زیست تهران اخذ شده است. موقعیت چاه‌های مشاهداتی که به منظور نشان دادن خصوصیات هیدروژئولوژیکی کل منطقه به‌طور یکنواخت در سطح آبخوان پراکنده شده‌اند، در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- روش‌های برتر پژوهش‌های پیشین

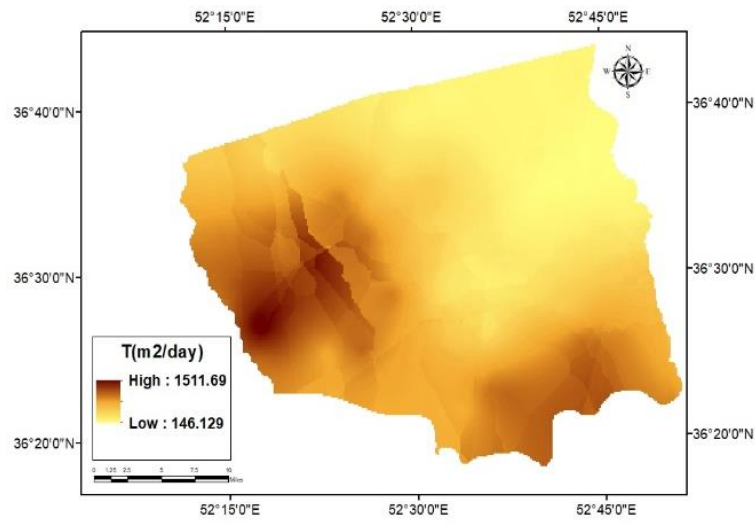
روش برتر	روش‌های مورد مقایسه	مرجع	رشته	مطالعه موردی
Log_OK	OK, Log_OK, IDW	Kravchenko and Bullock, 1999	کشاورزی و خاکشناسی	۱
OK & IDW	OK, IDW, TPS	Schloeder et al., 2001	کشاورزی و خاکشناسی	۲
Similar	OK, Log_OK, DK, IK, MBK	Moyeed and Papritz, 2002	کشاورزی و خاکشناسی	۳
DK	DK, Conditional Geostatistical Simulation	Barca and Passarella, 2007	هواشناسی و منابع آب	۴
Log_OK	IDW, Ok, Log_OK	Hua et al., 2009	هواشناسی و منابع آب	۵
Log_OK	OK, DetOK, AniOK, OCK, ResOK, Log_OK	Chiu et al., 2009	هواشناسی و منابع آب	۶
IDW	IDW, OK, Spline	Kablouti et al., 2012	هواشناسی و منابع آب	۷
OK	IDW, NeN, OK, UK, Simple average	Joseph et al., 2013	محیط زیست	۸
Spline	POD, Spline	Wang et al., 2013	هیدرولیک محاسباتی	۹
IDW	IDW, OK-Gaussian, OK-Spherical, OCK	Gong et al., 2014	هواشناسی و منابع آب	۱۰
EBK	OK, EBK	Khattak et al., 2014	هواشناسی و منابع آب	۱۱
OK	IDW, GPI, LPI, Spline-r, Spline-t, Ok, UK, SK	Yao et al., 2014	هواشناسی و منابع آب	۱۲
EBK	IDW, OK, EBK	Mirzaei and Sakizadeh, 2015	هواشناسی و منابع آب	۱۳
EBK & TPS	IDW, TPS, OK, EBK	Plouffe et al., 2015	هواشناسی و منابع آب	۱۴
kriging & NN	IDW, NN, Spline, RBF, kriging, LPI	Szypuła, 2016	زمین‌شناسی	۱۵
Ok, UK, Trend	IDW, Spline-r, Spline-t, trend, Ok, UK	Babu, 2016	زمین‌شناسی	۱۶
TR & NN	IDW, NN, TR	Salekin et al., 2018	هواشناسی و منابع آب	۱۷
IDW	IDW, OK, Spline	Rufo et al., 2018	محیط زیست	۱۸



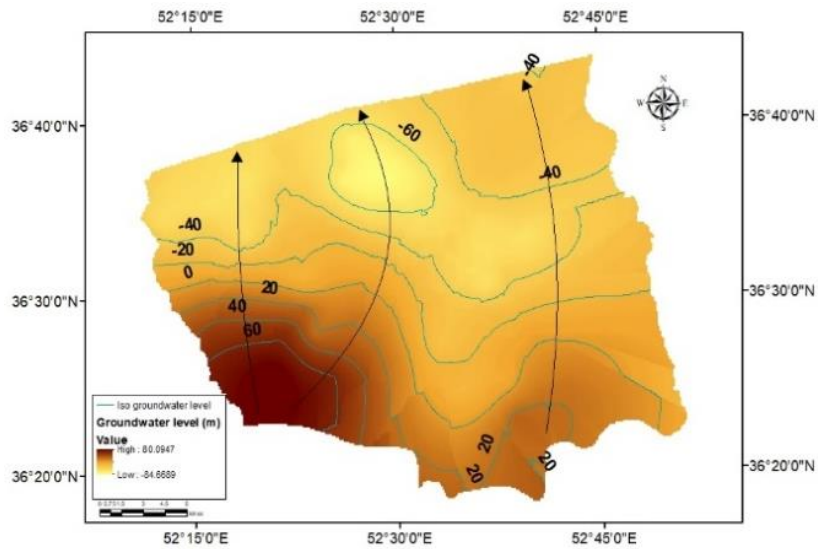
شکل ۱- موقعیت حوضه‌ی مطالعاتی و پراکندگی چاه‌های مشاهده‌ی غلظت بابل_آمل



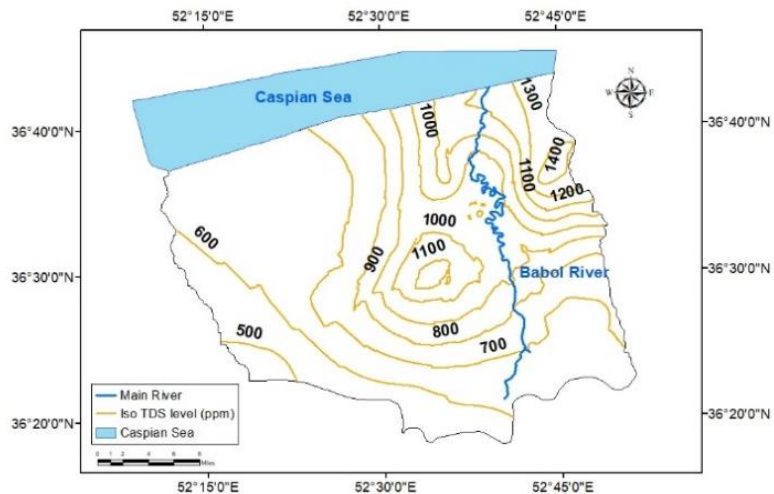
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی



شکل ۳- نقشه توزیع مکانی ضریب قابلیت انتقال



شکل ۴- نقشه تراز آب زیرزمینی و خطوط جریان



شکل ۵- نقشه هم‌ارزش TDS (ppm) شامل رودخانه‌های اصلی

مبانی ریاضی و آماری

در این پژوهش مفاهیم اولیه علم زمین‌آمار مانند تعریف همسانگردی، ناهمسانگردی و انواع روش‌های درون‌یابی به کار رفته است که در منابع متعددی به آن‌ها اشاره گردیده است لذا در این جا از آوردن آن‌ها اجتناب می‌شود. برای مطالعه‌ی کامل این مبانی می‌توان به (Duffy and Germani, 2013) مراجعه نمود. روش‌های به کار رفته در این تحقیق اعم از OK, IDW, TS, NN, EBK, DK, Log_OK و اسپلین، به استناد جدول (۱) روش‌های برتر پژوهش‌های پیشین می‌باشند. در این بخش فقط به توضیح روش Log_OK که دقیق‌ترین روش درون‌یابی این تحقیق می‌باشد، می‌پردازیم.

روش کریجینگ معمولی لوگ‌نرمال (Log_OK)^۱

علی‌رغم روش‌های تخمین غیرخطی، نمی‌توان از داده‌های غیر-نرمال در تخمین به روش خطی استفاده نمود زیرا در این صورت اثر عدم تناسب واریانس با میانگین وجود خواهد داشت. راه حل این مسئله، تبدیل داده‌ها است. بهتر است پس از نرمال‌سازی داده‌ها با یک روش تبدیل مناسب، از روش‌های خطی نظیر کریجینگ معمولی برای تخمین داده‌ها استفاده کرد. سپس مقادیر برآورد شده را با یک تبدیل معکوس به مقادیر واقعی تبدیل نمود (Isaaks and Srivastava, 1989).

چنانچه $Z(x)$ مقدار متغیر ناحیه‌ای Z در نقطه‌ای با موقعیت x در مجموعه نقاط مجهول D باشد، به قسمی که توزیع نرمال $Z(x)$ به صورت $Y(x) = \ln Z(x)$, $x \in D$ باشد، هدف تخمین مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x_0)$ است. مرحله‌ی اصلی تبدیل مسئله از Z به توزیع نرمال ثابت Y است. مقدار $Y(x_0)$ به صورت زیر برآورد می‌شود:

(رابطه ۲)

$$\hat{Y}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \ln Z(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i)$$

که در آن: $\hat{Y}(x_0)$ مقدار برآورد شده‌ی $Y(x_0)$ ، λ_i وزن

کریجینگ و n تعداد کل داده‌های مشاهداتی است. تبدیل معکوس $\hat{Y}(x_0)$ به $\hat{Z}(x_0)$ طبق رابطه‌ی زیر به صورت نارایب است:

$$\hat{Z}(x_0) = \exp(\hat{Y}(x_0) + \frac{\sigma_{Y,K}^2}{2}) - m_Y \quad (3 \text{ رابطه})$$

که در آن: $\hat{Z}(x_0)$ مقدار برآورد شده‌ی $Z(x_0)$ ، $\sigma_{Y,K}^2$ واریانس

کریجینگ Y و m_Y ضریب لاگرانژ است. شرح کامل این روش در مرجع (Dowd, 1982) ذکر شده است.

ارزیابی دقت روش‌های مختلف درون‌یابی

اعتباریابی حذفی^۳ یکی از روش‌های متداول برای مقایسه‌ی عملکرد روش‌های درون‌یابی است (Yao et al., 2014). در این روش یکی از نقاط معلوم $(Z(x_i))$ از مجموعه‌ی نتایی داده‌های ورودی $\{Z(x_1), \dots, Z(x_n)\}$ حذف و با استفاده از سایر داده‌ها، مقدار متغیر محذوف در مکان x_i $(Z^*(x_i))$ توسط یکی از روش‌های درون‌یابی برآورد می‌گردد. این پروسه تا برآورد مقدار همه‌ی نقاط مجموعه تکرار می‌شود.

در این پژوهش برای برآورد بهترین روش درون‌یابی، ابتدا اعتباریابی حذفی تمامی چاه‌های مشاهداتی غلظت صورت گرفت. سپس با استفاده از روابط زیر، γ معیار ارزیابی خطا اعم از میانگین خطا^۴ (ME) یا میانگین خطای انحراف^۵ (MBE)، میانگین خطای مطلق^۶ (MAE)، میانگین خطای نسبی^۷ (MRE)، مربعات خطا^۸ (MSE)، جذر میانگین مربعات خطا^۹ (RMSE)، ضریب نش و ساتکلیف^{۱۰} (NSE) و درصد اریبی^{۱۱} (PBIAS) محاسبه گردید:

$$\text{ME or MBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (\text{رابطه ۴})$$

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

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z^*(x_i) - Z(x_i)}{Z(x_i)} \right| \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2 \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2 \right]^{1/2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - O]^2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$\text{PBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z^*(x_i)]}{\sum_{i=1}^n Z(x_i)} * 100 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در روابط فوق: $Z^*(x_i)$ مقدار درون‌یابی شده چاه i ام،

$Z(x_i)$ مقدار مشاهداتی چاه i ام، n تعداد کل چاه‌ها، O : میانگین

مقادیر مشاهداتی کل چاه‌ها می‌باشد.

به دلیل وابستگی مقادیر به مقیاس داده‌ها، استفاده از

خطاهای استاندارد شده در این زمینه توصیه می‌شود. یک مدل

ایده‌آل باید نارایب بوده و خطاهای استاندارد آن نیز معتبر باشند

(Krivoruchko, 2011). بهترین مدل برازش داده شده، مدلی

است که خطاهای استاندارد ME، MSE و PBIAS نزدیک به صفر،

NSE نزدیک به یک و کمترین میزان RMSE، MAE و MRE را

دارا باشد.

8 Mean Squared Error

9 Root Mean Squared Error

10 Nash-Sutcliffe Efficiency

11 Percentage BIAS

1 Lognormal Ordinary Kriging

2 Stationary

3 Cross Validation

4 Mean Error

5 Mean Bias Error

6 Mean Absolute Error

7 Mean Relative Error

فرآیند تحقیق

در این پژوهش از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 طی پروسه‌ی زیر استفاده شده است:

تحلیل داده‌ها

بررسی پیوستگی مکانی داده‌ها

بدین منظور ابر نیم‌تغییرنگار^۱ داده‌ها با استفاده از روش کریجینگ معمولی توسط نرم‌افزار GIS تولید شد. چنان‌چه ابر نیم‌تغییرنگار داده‌های مکانی با افزایش فاصله به‌طور منظم افزایش یابد تا به مقدار آستانه برسد، آن داده‌ها دارای همبستگی مکانی مناسبی می‌باشند.

حذف داده‌های پرت عام^۲ و محلی^۳

به‌طور معمول ابر نیم‌تغییرنگار داده‌ها در صورت وجود داده‌های پرت عام، به دو بخش تقریباً جداگانه متشکل از مجموعه نقاط متراکم و نقاط پراکنده‌ی فوقانی تقسیم می‌شود. برای تشخیص داده‌های پرت عام، ابتدا نقاط پراکنده واقع در لایه‌ی بالایی ابر-نیم‌تغییرنگار داده‌ها انتخاب و موقعیت آن‌ها روی نقشه مشخص شد. سپس یک یا دو نقطه‌ی خاص که تمام نقاط انتخابی به آن‌ها متصل بودند، شناسایی گردید. این نقاط خاص همان داده‌های پرت عام بوده که در صورت فقدان توجیه منطقی و مشخص شدن اشتباه در برداشت، از داده‌ها حذف شدند (Krivoruchko, 2011). حذف داده‌های پرت محلی توسط بخش دسته‌بندی^۴ نمودار ورونوی^۵ نرم‌افزار GIS انجام شده است. به این صورت که حول هر یک از چاه‌های مشاهداتی TDS، یک چندضلعی ورونوی ساخته می‌شود. با در نظر گرفتن بازه تغییرات داده‌ها، چندضلعی‌ها به تعدادی زیربازه تقسیم می‌شوند. در صورت عدم وجود دسته‌ی مشترک بین هر چندضلعی با نواحی هم‌مرز خود، آن چندضلعی محتمل به پرت بودن است و با رنگ خاکستری نمایش داده می‌شود. پس از بررسی مشخصات هیدروژئولوژی چاه‌های مشاهداتی واقع در چندضلعی‌های ورونوی خاکستری، در صورت عدم وجود توجیه منطقی، این نقاط پرت محلی تشخیص داده شده و از شبکه حذف گردیدند (Bahrami Jovein and Hosseini, 2015).

تعیین روند داده‌ها

تشخیص روند داده‌ها در انتخاب نوع روش درون‌یابی موثر می‌باشد. بنابراین در این تحقیق آنالیز روندیابی^۶ داده‌ها در دو جهت شمالی-جنوبی و شرقی-غربی انجام شده است.

۲-۵-۲- درون‌یابی و تولید نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی

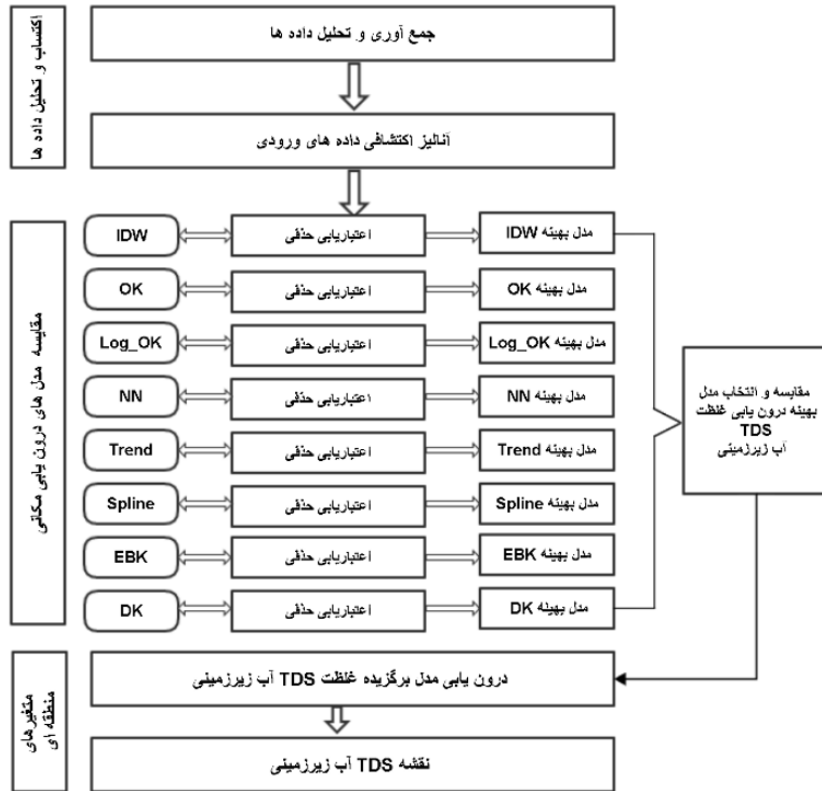
علاوه بر نوع روش درون‌یابی، پارامترهای موجود در هر روش شامل تعداد نقاط همسایگی موثر، نوع و اندازه‌ی گام‌های مدل نیم‌تغییرنگار، تعداد گام‌ها، فاکتور هم‌پوشانی و غیره نیز در دقت نتایج تأثیر بسزایی دارند. بدین‌منظور پس از پردازش داده‌ها و بهینه‌سازی پارامترهای مرتبط با هر روش، درون‌یابی غلظت TDS با روش‌های مختلف درون‌یابی به روش اعتباریابی حذفی انجام گرفت و نقشه‌های توزیع مکانی TDS برای مقایسه‌ی تفاوت میان حدود آلودگی روش‌های مختلف درون‌یابی و انتخاب بهترین روش تولید شدند. در نهایت روش برتر با توجه به معیارهای ارزیابی خطا، گزینش و پس از انطباق با خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه، از آن برای تولید نقشه‌های پهنه‌بندی TDS استفاده شد. بر اساس استاندارد سازمان جهانی بهداشت^۸ (WHO)، ماکزیمم مقدار مجاز غلظت TDS برابر ۱۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر^۹ (ppm) است. نمودار گردش کار مراحل انجام پژوهش در شکل (۶) ارائه شده است.

نتایج و بحث

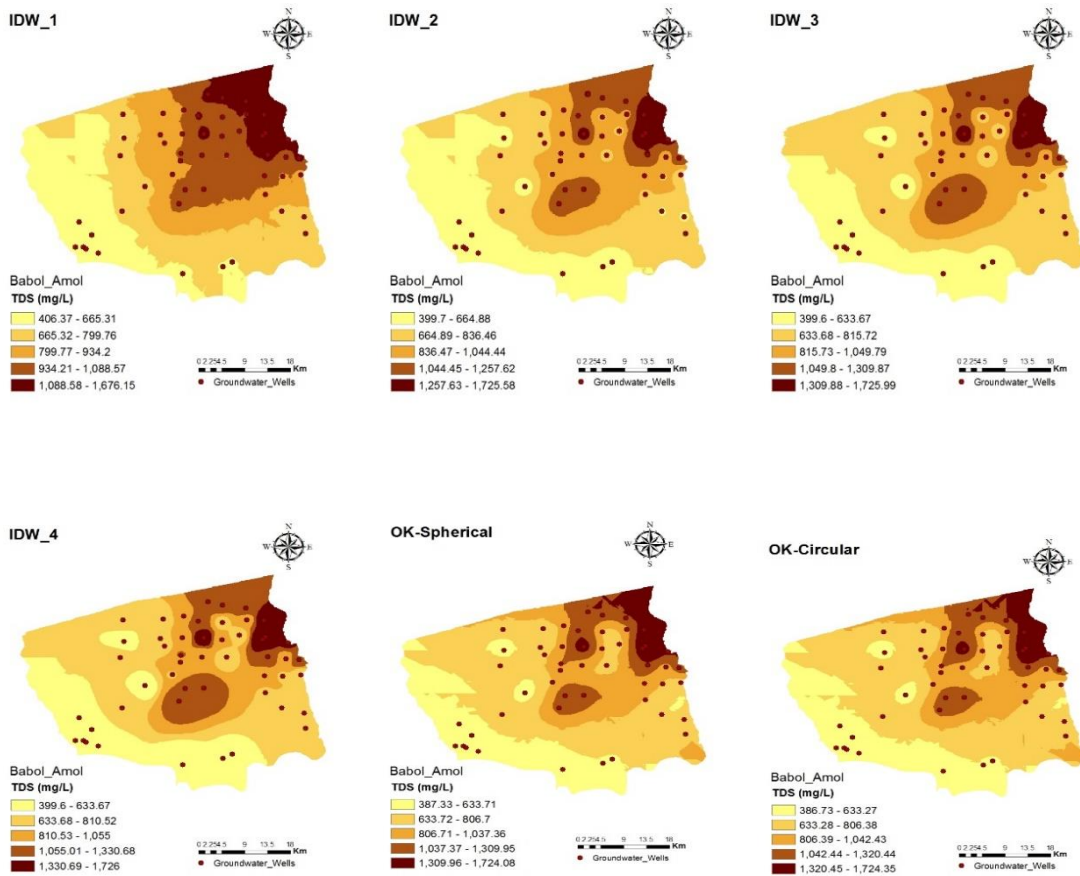
نقشه‌های تولید شده توسط ۲۱ حالت مختلف روش‌های درون‌یابی خطی و غیرخطی در شکل (۷) ارائه شده است. این روش‌ها در مورد پارامتر TDS در آبخوان کم‌عمق بابل_آمل بر روی ۵۰ چاه مشاهداتی غلظت به کار گرفته شده است تا نتایج خروجی به‌طور جامع قادر به بیان خصوصیات آبخوان باشد. نقشه‌های پهنه‌بندی نشان‌دهنده‌ی غلظت زیاد TDS در بخش‌های شمال، شمال‌شرقی و مرکز آبخوان بابل_آمل است که با توجه به ساختار زمین‌شناسی منطقه و محل قرارگیری صنایع، بخش کشاورزی و باغات موجود در اطراف قائمشهر و جنوب بابل توجیه‌پذیر است. برحسب انتظار، کیفیت آب‌زیرزمینی با حرکت جریان آب-زیرزمینی به‌طرف پایین‌دست کاهش می‌یابد که این امر عمدتاً به علت شسته‌شدن^{۱۰} فاضلاب‌های شهری و کشاورزی است که منطبق بر نقشه‌های پهنه‌بندی TDS شکل (۷) می‌باشد. همچنین افول کیفیت آب‌زیرزمینی در پایین‌دست منطقه‌ی مورد مطالعه، با توزیع جمعیت محدوده هم‌خوانی دارد به نحوی که توزیع جمعیت در نواحی پایین‌دست دشت بابل_آمل در مقایسه با نواحی بالادست، بسیار بیشتر است.

7 Lag
8 World Health Organization
9 parts per million
۱۰ Leach-scour

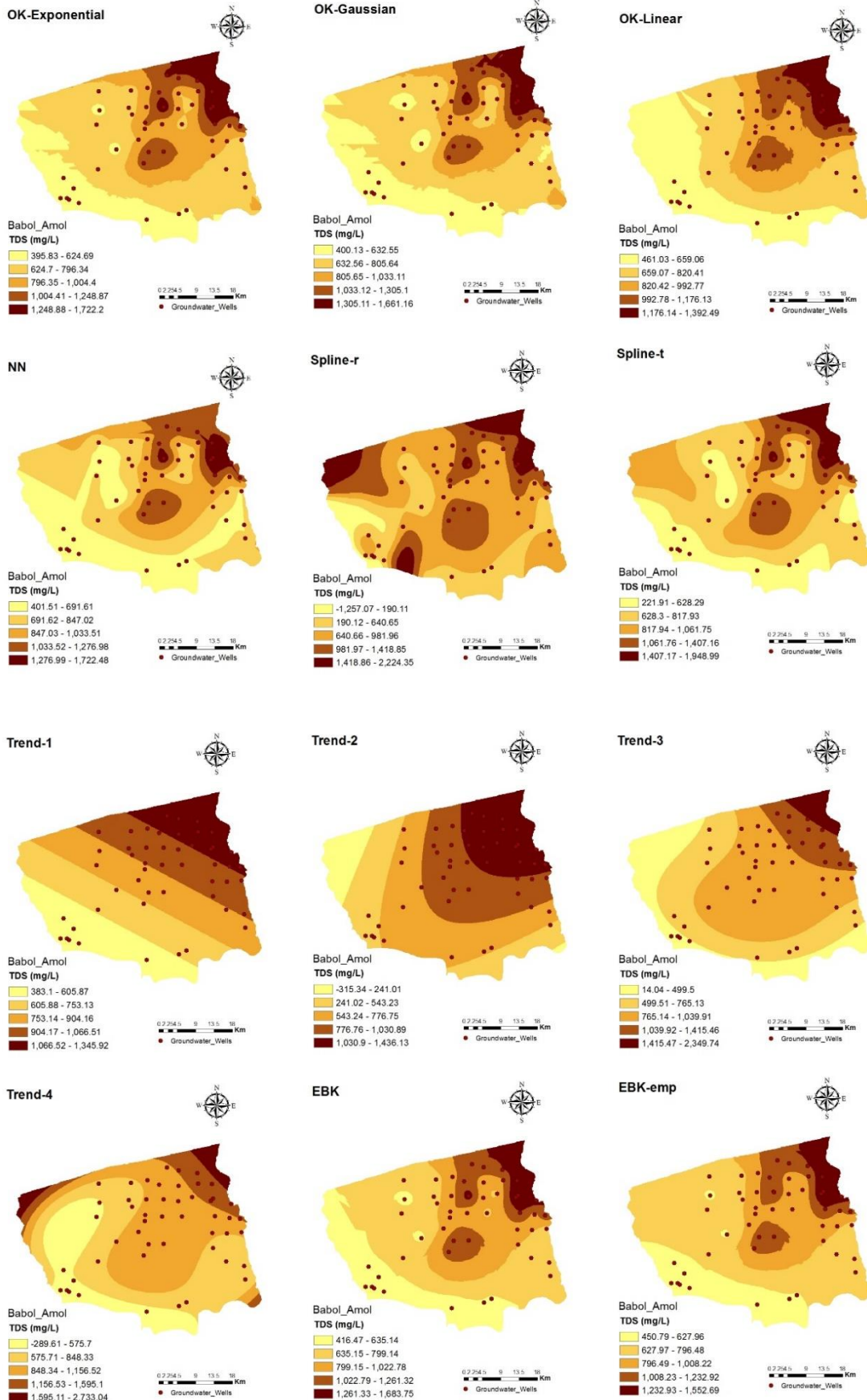
1 Semivariogram
2 Global Outliers
3 Local Outliers
4 Cluster
5 Voronoi
6 Trend Analysis



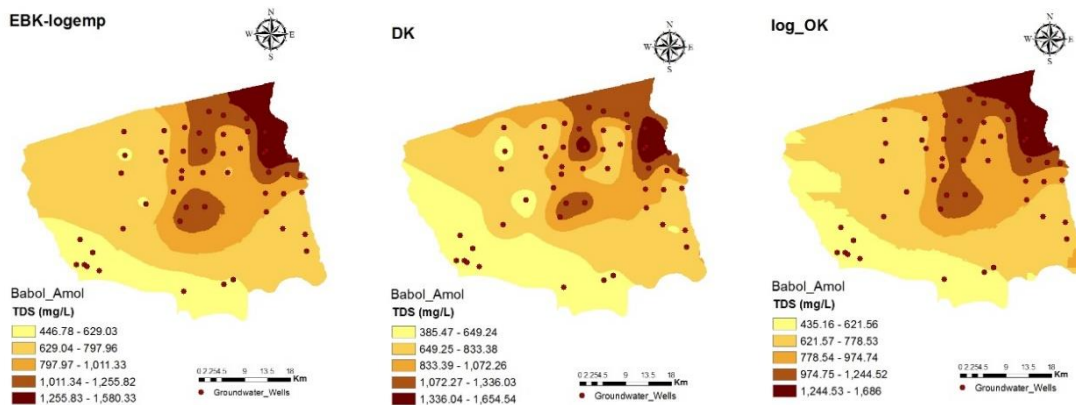
شکل ۶- نمودار گردش کار مراحل انجام پژوهش



شکل ۷- نقشه‌های توزیع مکانی TDS آبخوان بابل-آمل، تولید شده توسط روش‌های مختلف درون‌یابی (راهنمای نقشه، معرف مقدار غلظت TDS پیش‌بینی شده است)



شکل ۷- ادامه نقشه‌های توزیع مکانی TDS آبخوان بابل_آمل، تولید شده توسط روش‌های مختلف درون‌یابی (راهنمای نقشه، معرف مقدار غلظت TDS پیش‌بینی شده است)



ادامه شکل ۷- نقشه‌های توزیع مکانی TDS آبخوان بابل_آمل، تولید شده توسط روش‌های مختلف درون‌یابی (راهنمای نقشه، معرف مقدار غلظت TDS پیش‌بینی شده است)

به ترتیب با مقادیر NSE نزدیک‌تر به یک، بهترین نتایج را دارا می‌باشند. کم‌ترین مقدار |PBIAS| مربوط به روش Trend-1 می‌باشد. پارامتر وزن تأثیر بسزایی در دقت درون‌یابی دارد به نحوی که با افزایش توان IDW، مقادیر MAE و MRE کاهش و NSE افزایش یافته است. در مجموع، روش Log_OK در آبخوان کم‌عمق بابل_آمل در ۷۱/۴۳ درصد معیارهای ارزیابی خطا نسبت به سایر روش‌ها نتایج دقیق‌تری را ارائه داده است. هرچند روش IDW نیز دارای عملکرد خوبی بوده است.

جدول (۲) معیارهای اعتباریابی حذفی استاندارد پارامتر TDS مربوط به روش‌های مختلف درون‌یابی در آبخوان بابل_آمل را نشان می‌دهد. روش Log_OK با کمترین مقدار RMSE، MAE، MRE و MSE، بهترین نتیجه را ارائه داده است. مقادیر نزدیک به صفر |ME|، بیان‌گر اریب بودن کمتر داده‌ها است. روش Trend-1 با کمترین مقدار ME، منجر به حصول دقیق‌ترین نتیجه شده است. روش‌های EBK-emp و EBK-logemp به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. روش‌های Log_OK و EBK-logemp

جدول ۲- عملکرد اعتباریابی حذفی و رتبه‌بندی روش‌های درون‌یابی مختلف

روش	منطقه مطالعاتی	PBIAS	NSE	MSE	MRE	MAE	ME	RMSE
IDW_1	بابل_آمل	-۰/۵۰۹	۰/۱۹۷	۰/۳۳۹	۰/۵۳۱	۰/۶۹۷	۰/۵۰۹	۰/۵۸۳
IDW_2	بابل_آمل	-۰/۴۹۴	۰/۳۰۰	۰/۲۹۶	۰/۴۶۵	۰/۶۲۵	۰/۴۹۴	۰/۵۴۴
IDW_3	بابل_آمل	-۰/۵۱۱	۰/۳۲۶	۰/۲۸۵	۰/۴۳۵	۰/۵۸۷	۰/۵۱۱	۰/۵۳۴
IDW_4	بابل_آمل	-۰/۵۴۱	۰/۳۰۵	۰/۲۹۴	۰/۴۲۹	۰/۵۷۷	۰/۵۴۱	۰/۵۴۲
OK-Spherical	بابل_آمل	-۰/۴۲۸	۰/۳۰۶	۰/۲۹۳	۰/۴۵۴	۰/۶۰۰	۰/۴۲۸	۰/۵۴۲
OK-Circular	بابل_آمل	-۰/۴۲۶	۰/۳۰۲	۰/۲۹۵	۰/۴۵۲	۰/۶۰۰	۰/۴۲۶	۰/۵۴۳
OK-Exponential	بابل_آمل	-۰/۴۲۷	۰/۳۰۲	۰/۲۸۲	۰/۴۴۸	۰/۵۹۱	۰/۴۲۷	۰/۵۳۱
OK-Gaussian	بابل_آمل	-۰/۴۵۴	۰/۱۱۱	۰/۳۷۶	۰/۵۱۴	۰/۶۸۷	۰/۴۵۴	۰/۶۱۳
OK-Linear	بابل_آمل	-۰/۴۲۸	۰/۲۸۹	۰/۳۰۱	۰/۴۵۲	۰/۶۰۱	۰/۴۲۸	۰/۵۴۸
NN	بابل_آمل	-۰/۵۴۰	۰/۳۵۸	۰/۲۷۱	۰/۴۶۵	۰/۵۹۰	۰/۵۴۰	۰/۵۲۱
Spline-r	بابل_آمل	-۱	-۱/۳۶۶	۱	۱	۱	۱	۱
Spline-t	بابل_آمل	-۰/۶۰۳	۰/۱۷۸	۰/۳۴۷	۰/۵۴۷	۰/۶۳۸	۰/۶۰۳	۰/۵۸۹
Trend-1	بابل_آمل	-۰/۲۶۰	-۰/۰۷۵	۰/۴۵۵	۰/۵۱۲	۰/۷۲۸	۰/۲۶۰	۰/۶۷۴
Trend-2	بابل_آمل	-۰/۵۳۳	-۰/۲۶۳	۰/۵۴۳	۰/۶۳۵	۰/۸۵۵	۰/۵۳۳	۰/۷۳۱
Trend-3	بابل_آمل	-۰/۵۵۰	-۰/۱۸۴	۰/۵۰۰	۰/۶۴۳	۰/۸۲۳	۰/۵۵۰	۰/۷۰۷
Trend-4	بابل_آمل	-۰/۵۰۳	۰/۱۰۹۱	۰/۳۸۴	۰/۵۲۴	۰/۶۷۵	۰/۵۰۳	۰/۶۲۰
EBK	بابل_آمل	-۰/۴۹۲	۰/۳۳۷	۰/۲۸۰	۰/۴۵۰	۰/۵۸۳	۰/۴۹۲	۰/۵۲۹
EBK-emp	بابل_آمل	-۰/۳۹۴	۰/۴۰۹	۰/۲۵۰	۰/۴۰۸	۰/۵۳۶	۰/۳۹۴	۰/۵۰۰
EBK-logemp	بابل_آمل	-۰/۳۹۹	۰/۴۱۵	۰/۲۴۷	۰/۴۰۲	۰/۵۲۶	۰/۳۹۹	۰/۴۹۷
DK	بابل_آمل	-۰/۴۸۲	۰/۴۱۵	۰/۲۴۷	۰/۴۴۹	۰/۵۷۷	۰/۴۸۲	۰/۴۹۷
Log_OK	بابل_آمل	-۰/۴۵۰	۰/۴۲۲	۰/۲۴۴	۰/۳۹۸	۰/۵۱۱	۰/۴۵۰	۰/۴۹۴

است. نتایج اصلی این تحقیق در آبخوان کم عمق بابل-آمل به شرح زیر است:

۱. روش Log_OK با کمترین مقدار RMSE، MAE، MRE و MSE بهترین نتیجه را ارائه داد. روش Trend-1 با کمترین مقدار ME، دقیق ترین نتیجه را حاصل نمود. روش های EBK-emp و EBK-logemp به ترتیب در رتبه های بعدی قرار دارند. روش های Log_OK و EBK-logemp، با مقادیر NSE نزدیک تر به یک، نتایج بهتری را نشان دادند. کمترین مقدار |PBIAS|، مربوط به روش Trend-1 بود. با افزایش توان IDW، مقادیر MAE و MRE کاهش و NSE افزایش یافتند.

۲. در نتیجه، روش Log_OK در ۷۱/۴۳ درصد معیارهای ارزیابی خطا، نتایج دقیق تری را ارائه داده است. اگرچه روش IDW نیز دارای عملکرد خوبی بوده است.

۳. علاوه بر این، می توان نتیجه گیری کرد که که الگوی درون یابی غلظت TDS در آبخوان های کم عمق، به مقدار زیادی تحت تأثیر خصوصیات مختلف هیدروژئولوژیکی قرار نگرفت. این می تواند به برخی دلایل از جمله: وجود دریای خزر با آب شور در دشت ساحلی بابل-آمل، عمق کم آب زیرزمینی، فعالیت های کشاورزی و تعامل نزدیک رودخانه-آبخوان باشد.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

طبق مطالعات پیشین، Hua *et al.* 2009 دریافتند که روش Log_OK با ME کم تر (۰/۰۳۱۹۳-) و نیز RMSE کم تر (۰/۹۵۸۲)، بهترین روش برای تخمین عمق آب زیرزمینی است. Keblouti *et al.* 2012 نتیجه گرفتند که روش IDW با کم ترین مقدار ME (۶/۹٪)، بهترین روش برآورد بارش سالانه می باشد. Mirzaei and Sakizadeh (2015) دریافتند که روش EBK با کمترین مقادیر RMSE (۷/۰۳۷)، MAE (۵/۷۱۱)، MRE (۰/۰۷۹) و MSE (۴۹/۵۲) و ME نزدیک تر به صفر (۰/۱۶۳)، NSE بیشتر (۰/۳۰۸) و |PBIAS| کم تر (۰/۲۱۳)، بهترین روش درون یابی یون های آلاینده ی آبخوان است. Gol *et al.* (2017) این نتیجه رسیدند که روش Co-K با RMSE کم تر (۰/۳۳۴۲)، MAE کم تر (۰/۲۲۹۲) و ضریب همبستگی^۱ (R^۲) بیشتر (۰/۸۴)، بهترین روش برای تخمین توزیع مکانی کربن خاک می باشد. Njeban (2018) دریافت که روش UK به دلیل RMSE کم تر (۱۰/۶۵)، ME کم تر (۵/۳۶۵) و مقدار R^۲ بیشتر (۰/۹۸۱)، بهترین روش درون یابی سطح آب زیرزمینی است.

نتیجه گیری

این پژوهش برای اولین بار، به مقایسه ی دقت ۲۱ روش درون یابی در تخمین توزیع مکانی غلظت TDS آب زیرزمینی در آبخوان کم-عمق بر مبنای خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان پرداخته

REFERENCES

- Arslan, H. (2012). Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: The case of Bafra Plain, Turkey. *Agric Water Manag* 113: 57–63.
- Babu, B.S. (2016.) Comparative Study on the Spatial Interpolation Techniques in GIS. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 7, Issue 2. ISSN 2229-5518.
- Bahrami Jovein, E. and Hosseini, S.M. (2015). A Systematic Comparison of Geostatistical Methods for Estimation of Groundwater Salinity in Desert Areas Case Study: Feyz Abad-Mahvelat Plain. *Iran-Water Resources Research*, Volume 11, No 2 (In Persian).
- Barca, E. and Passarella, G. (2007). Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation. A comparison between disjunctive kriging and geostatistical simulation. *Environ Monit Assess* 137: 261–273.
- Chiu, C., Lin, P. and Lu, K. (2009). GIS-based Tests for Quality Control of Meteorological Data and Spatial Interpolation of Climate Data. *Mountain Research and Development* 29(4): 339–349.
- Dowd, P.A. (1982). Lognormal kriging: the general case. *Math. Geol* 14(5): 474–500.
- Duffy, D.J. and Germani, A. (2013). C# for Financial Markets, Chapter 13: Interpolation Methods in Interest Rate Applications. *The Wiley Finance Series*, 97 8-0-470-03008-0, 856p.
- Gol, C., Bulut, S. and Bolat, F. (2017). Comparison of different interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon and some soil properties in the Black Sea backward region of Turkey. *Journal of African Earth Sciences* 134: 85–91.
- Gong, G., Mattevada, S. and O'Bryant, SE. (2014). Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. *Environ Res* 130: 59–69.
- Hua, Z., Debai, M. and Cheng, W. (2009). Optimization of the spatial interpolation for groundwater depth in Shule River Basin. *Environmental Science and Information Application Technology*.
- Isaaks, E. H. and Serivastava, R. M. (1989). An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, 561p.
- Joseph, J., Sharif, HO., Sunil, T. and Alamgir, H. (2013). Application of validation data for assessing spatial interpolation methods for 8-hour ozone or other sparsely monitored constituents. *Environ Pollut* 178 :411–418.

- Kablouti, M., Ouerdachi, L. and Boutagha- ne, H. (2012). Spatial interpolation of annual precipitation in Annaba-Algeria-comparison and evaluation of methods. *Energy Procedia* 18: 468–475.
- Khattak, A., Ahmed, N., Hussein, I., Qazi, A., Alikhan, S., Rehman, A. and Iqbal, N. (2014). Spatial distribution of salinity in shallow Groundwater used for crop irrigation. *Pak. J. Bot* 46(2): 531–537.
- Kravchenko, A.K. and Bullock, D.G. (1999). A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal* 91: 393–400.
- Krivoruchko, K. (2011). *Spatial Statistical Data Analysis for GIS Users*. Esri Press, Redlands, CA, 928p.
- Lee, J.J., Jang, C.S., Wang, S.W. and Liu, C.W. (2007). Evaluation of potential health risk of arsenic-affected ground- water using indicator kriging and dose response model. *Sci Total Environ* 384: 151–162.
- Liu, C.W., Jang, C.S. and Liao, C.M. (2004). Evaluation of arsenic contaminat- ion potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan). *Sci Total Environ* 321: 173–188.
- Martinez-Cob, A. (1996). Multivariate ge- ostatistical analysis of evapotranspirati- on and precipitation in mountainous ter- rain. *J Hydrol* 174: 19–35.
- Mirzaei, R. and Sakizadeh, M. (2015). Comparison of interp- olation methods for the estimation of groundwater conta- mination in Andimeshk-Shush Plain, Southwest of Iran. *Environ Sci Pollut Res* 23: 2758–2769.
- Moyeed, R.A. and Papritz, A. (2002). An empirical comparison of kriging metho- ds for nonlinear spatial point prediction. *Mathematical Geology* 34(4): 365–386.
- Njeban, H.S. (2018). Comparison and Evaluation of GIS-Based Spatial Interp- olation Methods for Estimation Ground- water Level in AL-Salman District- Southwest Iraq. *Journal of Geographic Information System* 10: 362–380.
- Plouffe, C.C.F., Robertson, C. and Chandr- apala, L. (2015). Comparing interpolati- on techniques for monthly rainfall ma- pping using multiple evaluation criteria and auxiliary data sources: A case study of Sri Lanka. *EnvironModel Softw* 65: 57–71.
- Rhoades, J.D., Chanduvi, F. and Lesch, S. (1999). *Soil salinity assessment: meth- ods and interpretations of electrical con- ductivity measurements*. FAO irrigation and drainage paper No. 57, Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 165p.
- Rufo, M., Antolín, A., Paniagua, J.M. and Jiménez, A. (2018). Optimization and comparison of three spatial interpolatio- n methods for electromagnetic levels in the AM band within an urban area. *Environmental Research* 162: 219–225.
- Salekin, S., Burgess, J.H., Morgenroth, J., Mason, E.G. and Meason, D.F. (2018). A Comparative Study of Three Non-Geostatistical Methods for Optimising Digital Elevation Model Interpolation. *International Journal of Geo-Informati- on* 7(8): 300.
- Schloeder, C.A., Zimmerman, N.E. and Jacobs, M.J. (2001). Comparison of methods for interpolating soil propert- ies using limited data. *Soil Science Soc- iety of Ameri- can Journal* 65: 470–479.
- Szypuła, B. (2016). Geomorphometric co- mparison of DEMs built by different interpolation methods. *Landform Anal- ysis*, 32: 45–58.
- Wang, X., ang, Y., Cao, Z., Zou, W., Wang, L., Yu, G., Yu, B. and Zhang, J. (2013). Comparison Study on Linear In- terpolation and Cubic B-Spline Interpolation Proper Orthogonal Decompositi- on Methods. *Advances in Mechanical Engineering*, Article ID 561875.
- Yao, L., Huo, Z., Feng, S., Mao, M., Kang, S., Chen, J., Xu, J. and Steenhuis, T. S. (2014). Evaluation of spatial interpolati- on methods for groundwater level in an arid inland oasis, northwest China. *Environmental Earth Sciences* 71:1911–1924.