



A Systematic Comparison of Geostatistical Methods for Estimation of Groundwater Salinity in Desert Areas
Case Study: Feyz Abad-Mahvelat Plain

E. Bahrami Jovein¹ and S.M. Hosseini^{2}*

Abstract

Study on spatial variation of any groundwater quality parameter is not possible without taking the spatial relationship amongst the parameter values into account. Geostatistical methods are useful tools for conducting such studies. In this study, due to significant spatial and temporal variation of salinity (EC) in Feyz Abad-Mahvelat plain, EC data collected between the years 1386 and 1391 from operational wells in the plain, were analyzed to identify the best Geostatistical method applicable to the EC data in the plain. Although EC values change over time and space, for the spatial analysis an average annual data was considered. Based on the preprocessing of the data, capabilities and properties of different Geostatistical methods, and literature review on the subject, six different Geostatistical methods were selected for the analysis including appropriate types of Ordinary and Universal Kriging and Empirical Bayesian Kriging (EBK). Since there are numerous internal parameters in different methods of Kriging, a systematic multi-step procedure was used to optimize the parameters and to find the best model. To achieve this, 390 combinations of methods and parameters were generated and used in the comparative analysis. First the best models were selected using cross validation and a defined lumped statistical measure that combines two conventional error measures in a single one. Then, sensitivity analysis was performed on the selected best models and also they were evaluated in terms of compliance with the field conditions. The procedure was applied to the first and last year of the available data, separately (year 1386 and year 1391). The results indicated the superiority of the EBK method in terms of both accuracy and performance compared to the other methods. In addition, the generated maps showed the high level of salinity in the northern, southern, and western plain borders and significant salt water intrusion from the western border over time.

Keywords: Salinity, Geostatistics, Empirical Bayesian Kriging (EBK), Cross Validation

Received: August 7, 2014

Accepted: December 26, 2014

مقایسه سازماندار روش‌های زمین آماری برای برآورد شوری آب زیرزمینی در مناطق کویری مطالعه موردی: دشت فیض‌آباد-مهولات

احسان بهرامی جوین^۱ و سید محمود حسینی^{۲}*

چکیده

بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی بدون در نظر گرفتن ارتباط مکانی و موقعیت فضایی آن‌ها امکان‌پذیر نبوده و در نتیجه استفاده از روش‌های زمین آمار جهت بررسی این تغییرات ضروری می‌باشد. در پژوهش حاضر با توجه به تغییرات مکانی و زمانی قابل‌توجه شوری در دشت فیض‌آباد-مهولات، اطلاعات شوری (EC) چاه‌های بهره‌برداري منطقه بین سالهای آبی ۱۳۸۶ الی ۱۳۹۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا روش مناسب زمین آمار برای تجزیه و تحلیل اطلاعات در منطقه مشخص شود. گرچه مقادیر EC در زمان و مکان تغییر می‌کنند، اطلاعات متوسط سالانه برای تجزیه و تحلیل مکانی اطلاعات انتخاب شدند. پس از پردازش اولیه اطلاعات و با توجه به ویژگی‌های روش‌های مختلف زمین آمار و با تکیه بر نتایج تحقیقات گذشته، شش روش زمین آمار شامل انواع کریجینگ معمولی و عمومی مناسب شرایط (کریجینگ معمولی بدون حذف روند، کریجینگ معمولی و عمومی با حذف روند توسط تابع خطی و تابع درجه دو) و روش کریجینگ بی‌زی تجربی موسوم به روش EBK مورد مقایسه قرار گرفتند. با توجه به پارامترهای متعدد روش‌های مختلف کریجینگ، یک فرآیند منظم چند مرحله‌ای جهت بهینه‌سازی پارامترها و انتخاب مدل برتر، با ترکیب روش‌ها و پارامترهای مختلف (۳۹۰ ترکیب) معرفی و به کار گرفته شد. با استفاده از اعتبارسنجی متقابل و با توجه به یک معیار آماری تعریف شده که دو معیار متداول خطا را ترکیب می‌کند، مدل‌های برتر انتخاب و به منظور آنالیز حساسیت و تطابق با واقعیت‌های میدانی منطقه بررسی بیشتر شدند. جهت اطمینان از انتخاب روش برتر، مراحل یاد شده هم برای سال اول و هم برای سال آخر دارای اطلاعات (سال‌های آبی ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱) استفاده شدند. نتایج، نشان‌دهنده کارایی و دقت بالاتر روش EBK نسبت به سایر روش‌ها بود. علاوه بر این نقشه‌های تولید شده، بر بالا بودن میزان شوری در مرزهای شمالی، جنوبی و غربی دلالت کرده و پیشروی محسوس شوری از مرزهای غربی را با گذشت زمان نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی: شوری، زمین‌آمار، کریجینگ بی‌زی تجربی، اعتبارسنجی متقابل.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۵/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۰/۵

1- PhD Student, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Professor, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email:shosseini@um.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

زیرزمینی از جمله شوری و نیترات با استفاده از روش‌های مختلف آماری پرداخته و همگی به برتری روش‌های زمین آمار بر آمار کلاسیک با توجه به نتیجه تحقیقات خود صحت گذاشته و روش کریجینگ را قابل اعتمادترین روش در تخمین‌هایشان معرفی کرده‌اند. در سایر کشورها نیز تحقیقات فراوانی در حوزه تخمین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی صورت پذیرفته که این نتایج را تأیید می‌نماید [Alsaaran (2000) ، Yuesun et al. (2009) ، Ahmed (2002) ، Ella et al. (1999) ، Dagostino et al. (1998) ، Istok and Cooper (1998) ، Rizzo and Mouser (2000) ، Dick and Gerrard (2006) ، Gaus et al. (2003) ، Kelinhu et al. (2005) ، Barca and Pasarella (2007)] .

در یک تحقیق جدید (Khattak et al., 2014)، که اهمیت پژوهش حاضر را نیز برجسته‌تر می‌کند، محققین به منظور تعیین سطوح شوری در چاه‌های کم عمق (کمتر از ۳۰ متر) در منطقه لاهور پاکستان و مقایسه آن با استانداردهای آبیاری گیاه از روش کریجینگ استفاده کردند. در این راستا در یک فضای مقایسه‌ای ساده به مقایسه روش کریجینگ معمولی و کریجینگ بیزی پرداختند و نتیجه‌گیری نمودند که روش دوم، مجموع مربعات خطای پیش‌بینی کم‌تری تولید می‌کند.

با گسترش روزافزون روش‌ها و قابلیت‌های نرم‌افزاری، آنچه استفاده از روش کریجینگ را مشکل می‌سازد، انتخاب روش مناسب از میان روش‌های موجود و همچنین وجود پارامترهای متعدد در هر کدام از این روش‌ها می‌باشد. بدیهی است انتخاب تصادفی روش و پارامترهای آن منجر به جواب با دقت قابل قبول و یا دقیقترین جواب نخواهد گردید. بنابراین وجود یک فرآیند منظم جهت انتخاب روش و پارامترهای آن ضروری به نظر می‌رسد و این در حالی است که در تحقیقات یادشده این موضوع چندان مورد توجه نبوده است.

با توجه به این مسئله هدف از پژوهش حاضر ارائه یک دستورالعمل و فرآیند منظم برای انتخاب روش کریجینگ مناسب و بهینه کردن پارامترهای آن می‌باشد که در قالب یک مطالعه موردی بر روی پارامتر هدایت الکتریکی در دشت فیض‌آباد- مهولات پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل نقش بهینه‌کردن و تنظیم پارامترهای درونی هر روش کریجینگ بر روی میزان خطای روش را برجسته می‌کند. علاوه بر این، روش جدیدتر کریجینگ بیزی تجربی موسوم به روش EBK^۲ نیز مورد تحقیق و مقایسه با سایر روش‌ها قرار گرفته است.

در حال حاضر اکثر نیاز آبی مناطق نیمه‌خشک و خشک کشور با توجه به عدم وجود آب‌های سطحی مستمر و مناسب، از منابع آب زیرزمینی و از طریق چاه‌های حفر شده تأمین می‌گردد (ولایتی، ۱۳۷۸). به همین دلیل بررسی مستمر کمی و کیفی این منبع تأمین آب از اهمیت زیادی در این مناطق برخوردار می‌باشد. علاوه بر این برداشت‌های بیش از حد در سال‌های اخیر با توجه به خشکسالی‌های رخ داده، نه تنها بر کیفیت و میزان منابع آب زیرزمینی تأثیر گذاشته، بلکه بر کیفیت آن نیز مؤثر بوده است. این اثر به ویژه در مناطق مجاور با منابع شوری مانند آبخوان‌های مجاور با کویرها و دق‌ها، با توجه به پدیده پیشروی شوری در اثر پایین افتادن تراز هیدرولیکی در ناحیه آب شیرین محسوس‌تر است. وجود این مسئله در چنین مناطقی نیاز به مدیریت بهینه و کارآمد منابع آب زیرزمینی را روشن می‌سازد. بدیهی است که اشراف کامل بر تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی یکی از ابزارهای مهم مدیریتی در این حوزه می‌باشد و لازم است با استفاده از روش‌های آماری پهنه‌بندی مکانی در طول سال‌های دارای آمار صورت پذیرد.

بررسی تغییرات مکانی مشخصات فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی در بسیاری از محیط‌ها از جمله خاک بدون در نظر گرفتن موقعیت فضایی و ارتباط مکانی نقاط امکان‌پذیر نیست. لذا، از علم زمین آمار که ارتباط فضایی بین مقادیر مختلف، فاصله و جهت قرارگیری متغیرها را در نظر می‌گیرد (Bryan, 1988)، استفاده می‌شود.

از میان روش‌های مختلف زمین آمار، روش کریجینگ^۱ کاربرد گسترده‌تری در علوم داشته است. این روش یک تحلیل خاص رگرسیونی است که بر منطق «میانگین متحرک وزن‌دار» استوار بوده و می‌توان گفت بهترین تخمین‌گر خطی ناریب می‌باشد (حسنی پاک، ۱۳۷۷).

قابلیت‌های مناسب این روش از جمله دقت مناسب، تعیین خطای تخمین و در نظر گرفتن ساختار فضایی داده‌ها باعث شده است تا در هیدروژئولوژی از این روش استفاده فراوان شود. پژوهشگران متعددی در مناطق مختلف ایران [رضا سکوتی اسکویی (۱۳۹۱)، سامانی و یاری (۱۳۸۷)، قهرمان و همکاران (۱۳۸۲)، یاری و کوچک‌زاده (۱۳۸۷)، تقی‌زاده و همکاران (۱۳۸۷)، شعبانی (۱۳۹۰)، قاسمی زبیرانی و همکاران (۱۳۸۵)، اوسطی و همکاران (۱۳۹۱)، نظری‌زاده و همکاران (۱۳۸۵)، احمد آلی و همکاران (۱۳۸۷) و محمدرضا هاشمی جزی و همکاران (۱۳۸۹)] به بررسی مکانی پارامترهای کیفی آب

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی کلی منطقه مورد مطالعه

سال در برخی از چاه‌ها یکبار و در برخی ۲ الی ۳ بار برداشت گردیده‌اند، اطلاعات موجود یک سال آبی برای هر چاه میانگین‌گیری شده و حاصل به عنوان نماینده شوری چاه در آن سال ملاک عمل قرار گرفته است. باید توجه داشت که این اطلاعات از چاه‌های بهره‌برداری اخذ شده‌اند که موقعیت مکانی، عمقی و زمانی برداشت‌ها بر اساس طراحی یک شبکه منظم برداشت اطلاعات تنظیم نشده است. بنابراین تعداد داده‌ها در سال‌های مختلف با هم متفاوت بوده و بازه‌ای بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ چاه را شامل می‌شود.

محدوده مطالعاتی مهولات- فیض‌آباد با مساحت ۲۱۴۵ کیلومتر مربع واقع در حوضه آبریز کویر مرکزی و در محدوده‌ای به طول جغرافیایی $58^{\circ} 58'$ تا $59^{\circ} 03'$ و عرض جغرافیایی $34^{\circ} 48'$ تا $35^{\circ} 11'$ قرار دارد. این محدوده مطالعاتی با کشیدگی شرقی- غربی، از شمال با محدوده‌های مطالعاتی کاشمر و ازغند، از شرق با محدوده‌های مطالعاتی رشتخوار و جنگل، از جنوب با محدوده مطالعاتی بجستان- یونسی و عمرانی- بیمرغ و از غرب با محدوده کاشمر هم‌مرز است. موقعیت حوضه مطالعاتی فیض‌آباد- مهولات و پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری آن در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

۲-۳- مبانی آماری و ریاضی

مبانی استفاده شده در این تحقیق همان مفاهیم اولیه علم زمین‌آمار از جمله تعریف متغیر ناحیه‌ای، همسانگردی و ناهمسانگردی، انواع روش‌های کریجینگ و غیره می‌باشد که در منابع و مقالات متعددی به آن‌ها اشاره گردیده است و در این قسمت از آوردن آن‌ها اجتناب می‌شود. جهت بررسی کاملتر مبانی می‌توان به مراجع (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷) و (تقفیان و همکاران، ۱۳۹۰) مراجعه نمود.

شبکه آبراهه سطحی از ارتفاعات شمالی دشت ازغند سرچشمه گرفته و به صورت مسیل‌های مختلف (پنج مسیل) با امتداد شمالی- جنوبی وارد محدوده مطالعاتی فیض‌آباد می‌شوند. این مسیل‌ها پس از تغذیه آبخوان آبرفتی به سمت غرب تغییر جهت داده و به کویر نمک بجستان می‌پیوندند. سازندهای سخت این محدوده مطالعاتی با کشیدگی شرقی- غربی، مساحت اندک و مورفولوژی صخره‌ساز در حاشیه شمالی گسترده شده‌اند و بخش شرقی و جنوبی این محدوده مطالعاتی را رسوبات رسی و کنگلومرایی متعلق به نئوژن تشکیل می‌دهند.

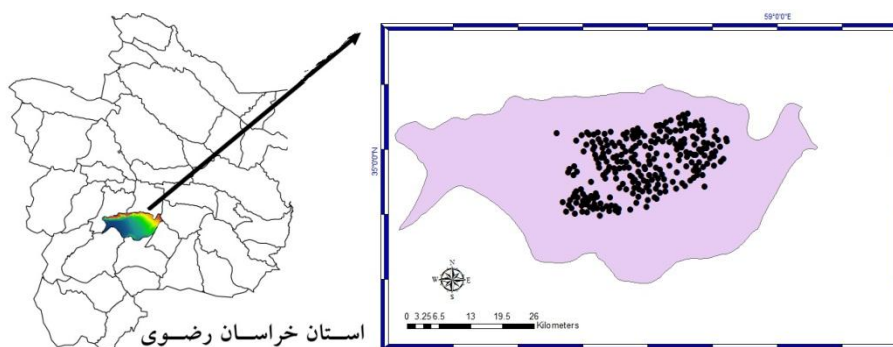
در این قسمت تنها به روش کریجینگ بیزی تجربی موسوم به روش EBK و چگونگی ارزیابی دقت و صحت مدل نیم‌تغییرنگار^۴ انتخابی و فرآیند تخمین در پژوهش حاضر اشاره می‌شود.

۲-۳-۱- روش EBK

این روش یک روش درونیابی زمین‌آمار است که سختی‌های مربوط به ساختن یک مدل کریجینگ معتبر را خودکار می‌نماید، به عبارت دیگر در تحلیل‌های زمین‌آمار نیاز به تنظیم دستی پارامترها به منظور دستیابی به نتایج دقیق است، اما در روش کریجینگ بیزی تجربی به طور اتوماتیک این پارامترها طی یک فرآیند شبیه‌سازی محاسبه می‌گردند.

۲-۲- اطلاعات مورد بررسی

داده‌ها، شوری (هدایت الکتریکی^۳) برداشت شده از چاه‌های بهره‌برداری منطقه بین سال‌های آبی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱ می‌باشند که توسط یگان‌های گشت و حفاظت شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی اندازه‌گیری و جمع‌آوری شده‌اند. علاوه بر این، داده‌های شوری جمع‌آوری شده توسط بخش مطالعات این شرکت نیز به اطلاعات اضافه گردیده است. با توجه به این که داده‌ها در هر



شکل ۱- موقعیت حوضه مطالعاتی و پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری فیض‌آباد- مهولات

در نتیجه تعداد زیادی نیم‌تغییرنگار برای هر زیرمجموعه تولید می‌شود که اگر با هم رسم شوند، یک توزیعی از نیم‌تغییرنگار مشاهده خواهد شد. برای هر موقعیت، از یک توزیع نیم‌تغییرنگار واحد برای پیش‌بینی استفاده می‌شود که با استفاده از مجموع وزنی توزیع‌های زیرمجموعه‌های احاطه‌کننده آن موقعیت محاسبه می‌شود (Krivoruchko, 2012).

در روش‌های معمولی کریجینگ فرآیند میان‌بایی به عنوان یک میانگین کلی به علاوه تغییرات مستقل حول میانگین دنبال می‌شود. بنابراین، تغییرات بزرگ به سمت میانگین جمع شده و در نتیجه مقادیر پیش‌بینی هرگز خیلی دور و منحرف نیستند. این در حالی است که در روش EBK از یک تابع تصادفی ذاتی درجه 0 (IRF-0) استفاده می‌شود که فرض تمایل به سمت یک میانگین کلی را در نظر نمی‌گیرد (Krivoruchko, 2012).

پارامترهای جدیدی که در این روش مطرح می‌شوند عبارتند از:

- ۱- اندازه زیرمجموعه: تعداد داده‌های هر زیرمجموعه
- ۲- فاکتور همپوشانی: میانگین تعداد زیرمجموعه‌هایی که هر نقطه داخل آن‌ها قرار می‌گیرد.
- ۳- تعداد شبیه‌سازی^۹: تعداد نیم‌تغییرنگارهای تولید شده برای هر زیرمجموعه

۲-۳-۲- ارزیابی دقت و صحت مدل نیم‌تغییرنگار انتخابی و فرآیند تخمین به روش کریجینگ

با توجه به وجود روش‌های متعدد و نیز پارامترهای مختلف در روش‌های متفاوت بایستی نتایج حاصل از استفاده از روش‌های مختلف ارزیابی شود. جهت این امر روش اعتبارسنجی متقابل^{۱۰} مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این روش با توجه به وجود مجموعه داده‌های ورودی شامل n نمونه اندازه‌گیری شده به صورت $Z(x_1), \dots, Z(x_n)$ ، یکی از نقاط معلوم $(Z(x_k))$ حذف شده و با استفاده از سایر داده‌ها و نیز نیم‌تغییرنگار انتخابی، مقدار متغیر در x_k و نیز واریانس تخمین آن یعنی به ترتیب Z_k^* ، σ_k^2 تعیین می‌گردند (Kitanidis, 1993). سپس با استفاده از روابط زیر مقدار خطا^{۱۱} (e) و خطای استاندارد شده^{۱۲} (se) محاسبه می‌شوند:

$$e = Z(x_k) - Z_k^* \quad (7)$$

$$se = \frac{Z(x_k) - Z_k^*}{\sigma_k} \quad k = 1, \dots, n \quad (8)$$

فرق دیگر این روش با سایر روش‌های کریجینگ این است که در این روش خطاهای مربوط به برآورد نیم‌تغییرنگار در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در سایر روش‌های کریجینگ، نیم‌تغییرنگار از مکان‌های با داده‌های مشخص استفاده می‌کند و سپس از این نیم‌تغییرنگار منفرد برای پیش‌بینی در مکان‌های نامشخص استفاده می‌شود. در نتیجه از آنجایی که عدم قطعیت برآورد نیم‌تغییرنگار را در محاسبات وارد نمی‌نمایند، منجر به برآورد خطای استاندارد پیش‌بینی پایین می‌شوند. از جمله مزایای روش EBK می‌توان به مواردی چون، نیاز به حداقل فعل و انفعال مدل‌سازی، پیش‌بینی خطای استاندارد دقیق‌تر از سایر روش‌های کریجینگ، پیش‌بینی دقیق‌تر داده‌های نسبتاً غیر ایستا و دقت بیشتر از سایر روش‌های کریجینگ برای مجموعه داده‌های کوچک اشاره نمود. در مقابل این مزایا معایبی را می‌توان برای آن برشمرد. از جمله این معایب این است که در این روش، زمان فرآیند در صورت افزایش تعداد نقاط ورودی، اندازه زیرمجموعه^۷ و یا افزایش فاکتور همپوشانی^۸، بسیار سریع افزایش می‌یابد. غیر قابل دسترس بودن اعمال غیرهمگنی و روش کوکریجینگ نیز از جمله ضعف‌های این روش می‌باشد (Krivoruchko, 2012).

برخلاف سایر روش‌های کریجینگ که از حداقل مربع خطاها استفاده می‌کنند، پارامترهای نیم‌تغییرنگار در روش EBK با ماکزیمم درست‌نمایی مقید^۵ (REML) برآورد می‌شوند. با توجه به محدودیت‌های محاسباتی REML برای مجموعه داده‌های بزرگ، داده‌های ورودی به زیر مجموعه‌های دارای همپوشانی در یک اندازه مشخص تقسیم می‌شوند. در هر زیرمجموعه نیم‌تغییرنگار مطابق با فرآیند زیر برآورد می‌شود:

- ۱- نیم‌تغییرنگار در هر زیرمجموعه با توجه به داده‌ها، برآورد می‌شود.
- ۲- با استفاده از نیم‌تغییرنگار گام ۱ به عنوان یک مدل، داده‌های جدید در هر موقعیت داده‌های ورودی به صورت کاملاً بی‌قید و شرط شبیه‌سازی می‌شوند.
- ۳- یک نیم‌تغییرنگار جدید از داده‌های شبیه‌سازی شده برآورد می‌شود، سپس وزنی برای این نیم‌تغییرنگار با استفاده از قاعده بیزی^۶ محاسبه می‌شود.
- ۴- گام ۲ و ۳ در یک تعداد مشخصی تکرار می‌شوند. در هر تکرار، نیم‌تغییرنگار محاسبه شده در گام یک برای شبیه‌سازی یک مجموعه جدید داده‌ها در یک موقعیت مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و داده‌های شبیه‌سازی شده برای تخمین یک نیم‌تغییرنگار جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۴- روش تحقیق

فرآیند تحقیق که با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.2 صورت پذیرفته است، شامل ۲ مرحله کلی بوده که شرح آن در ادامه آورده می‌شود.

۲-۴-۱- پردازش اطلاعات

پس از نمایش داده‌ها در محیط GIS، مراحل زیر جهت پردازش داده‌ها صورت گرفته است.

الف- بررسی پیوستگی مکانی داده‌ها

این مرحله، با بررسی ابر نیم‌تغییرنگار داده‌ها صورت می‌پذیرد. داده‌های مکانی که نیم‌تغییرنگار آنها با افزایش فاصله به طور منظم افزایش می‌یابد و به مقدار آستانه می‌رسد، دارای همبستگی مکانی هستند و در غیر اینصورت تصویر مناسبی از پیوستگی مکانی متغیر را نشان نمی‌دهد.

ب- مشخص کردن و حذف داده‌های پرت^{۱۳}

با توجه به وجود دو نوع داده پرت کلی^{۱۴} و محلی^{۱۵} برای حذف هر کدام از آن‌ها از یک روش استفاده گردیده است.

ب-۱- حذف داده پرت کلی

جهت این امر، ابر نیم‌تغییرنگار داده‌ها توسط نرم‌افزار تولید شد. معمولاً در شرایط وجود داده‌های پرت کلی، ابر نیم‌تغییرنگار دارای دو لایه تقریباً متمایز شامل تراکم اصلی مجموعه نقاط و نقاط پراکنده بالای آن می‌باشد. مطابق (Krivoruchko, 2011) مناطقی که در لایه فوقانی ابر نیم‌تغییرنگار قرار داشتند، انتخاب گردیدند. این انتخاب منجر به نمایش ارتباطات نقاط انتخابی روی نقشه شد (شکل ۳). حال چنانچه نقاط انتخابی همه متصل به یک یا دو نقطه خاص بودند، آن نقاط خاص، احتمالاً پرت کلی بوده و پس از بررسی در صورت عدم توجیه منطقی از داده‌ها حذف گردیدند. لازم به توضیح است که قضاوت در مورد مرز جدایی دو لایه ابر نیم‌تغییرنگار دستورالعمل خاصی ندارد و به قضاوت چشمی و نهایتاً بررسی داده‌های پرت و تأیید آن توسط کاربر بستگی دارد.

ب-۲- حذف داده‌های پرت محلی

با استفاده از بخش خوشه‌بندی^{۱۶} نمودار Voroni در نرم‌افزار ArcGIS این مرحله صورت پذیرفته است. در نقشه‌های تهیه شده در این قسمت همانند ایجاد شبکه تیسن به هر یک از چاه‌ها،

این کار به صورت مشابه برای تمام نمونه‌ها انجام گرفته و در هر بار یک نمونه حذف می‌شود. به این روش مقادیر e_1 تا e_n و se_1 تا se_n محاسبه می‌گردند. پس از آن مشخصه‌های آماری زیر با استفاده از روابط مربوطه محاسبه می‌شوند:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e_k \quad (9)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n se_k \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n e_k^2}{n}} \quad (11)$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (se_k)^2}{n}} \quad (12)$$

که در روابط (۹) الی (۱۲)، MBE میانگین خطاها، $RMSE$ ریشه دوم میانگین مربع خطاها، MSE میانگین خطاهای استاندارد شده و $RMSSE$ ریشه دوم میانگین مربع خطاهای استاندارد شده می‌باشند. با استفاده از پارامترهای آماری محاسبه شده می‌توان به ارزیابی مدل و فرآیند تخمین پرداخت. یک مدل خوب و قابل قبول بایستی حائز دو مشخصه باشد: اولاً نارایب بوده و ثانیاً خطاهای استاندارد آن معتبر باشند.

جهت نارایب بودن داده‌ها بایستی میانگین خطاها (MBE) نزدیک به صفر باشد، ولی با توجه به این که مقادیر وابسته به مقیاس داده‌ها می‌باشند، بهتر است از خطاهای استاندارد شده در این زمینه استفاده کرد. بنابراین هرچه MSE (میانگین خطاهای استاندارد شده) کمتر بوده و به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل از جهت نارایی عملکرد بهتری را دارا می‌باشد. برای معتبر بودن خطاهای استاندارد بایستی میانگین واریانس‌های تخمین کربجینگ به ریشه دوم میانگین مربع خطاها نزدیک باشد. به جای بررسی مستقیم این امر، می‌توان از ریشه دوم میانگین مربع خطاهای استاندارد شده ($RMSSE$) استفاده نمود. هر چه $RMSSE$ نزدیک‌تر به یک باشد، مدل در این مشخصه معتبرتر می‌باشد. $RMSSE$ بزرگتر از یک نشانگر کم‌برآورد تغییرپذیری پیش‌بینی‌ها و $RMSSE$ کوچکتر از یک نشانگر بیش‌برآورد می‌باشد (Krivoruchko, 2011).

با توجه به مباحث فوق می‌بایستی سه پارامتر را در بررسی مدل خوب و معتبر بررسی نمود: $RMSE$ کم، MSE نزدیک به صفر و $RMSSE$ نزدیک به یک.

معمولی با حذف روند توسط تابع خطی و تابع درجه دو و کریجینگ عمومی^{۲۱} با حذف روند توسط تابع خطی و تابع درجه دو انتخاب گردیدند. علاوه بر این روش‌ها، روش EBK نیز با توجه به قابلیت‌های مناسب آن جهت میان‌یابی و تولید سطوح مورد استفاده قرار گرفت.

ب- انجام فرایند محاسباتی جهت انتخاب بهترین مدل با پارامترهای بهینه‌شده و تولید سطوح میان‌یابی‌شده شوری

علاوه بر خود روش، پارامترهای موجود در هر روش نیز در نتایج خروجی تأثیرگذار می‌باشند. در روش‌های کریجینگ معمولی و عمومی پارامترهای متعددی از جمله تعداد نقاط همسایگی مؤثر در تخمین نقطه مجهول، نوع مدل نیم تغییرنگار، اندازه گام‌های^{۲۲} مدل نیم‌تغییرنگار و تعداد گام‌ها وجود دارند که طبق فرآیند، واسنجی و بهینه گردیده‌اند. در روش EBK نیز پارامترهای اندازه زیرمجموعه، فاکتور هم‌پوشانی و تعداد شبیه‌سازی مورد واسنجی قرار گرفته‌اند. مراحل طی شده جهت انجام این بخش به ترتیب زیر می‌باشند:

۱- در ابتدا، در مورد پارامتر کیفی شوری فرض گردید محیط همسانگرد باشد. همسانگرد بودن محیط بر این مبنای فیزیکی تفسیر می‌گردد که با توجه به وجود جریان چند بعدی آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه، اختلاط کاملی از پارامتر شوری در محیط وجود دارد. این فرض در انتها با توجه به عدم تغییر پارامترهای نیم تغییرنگار با تغییر جهت آن مورد تأیید قرار گرفت.

۲- نرم‌افزار ArcGIS، ده مدل نیم تغییرنگار مختلف را که به دو دسته کلی مدل‌های گوسی و نمایی تقسیم‌بندی می‌شوند، شبیه‌سازی می‌کند. در نظر گرفتن همه مدل‌ها منجر به افزایش تصاعدی تعداد حالات مورد بررسی و در نتیجه طولانی شدن تحقیق می‌گردید، در نتیجه از هر دسته، ۲ مدل انتخاب گردید. نحوه انتخاب این ۴ مدل بر این اساس صورت پذیرفت که هر ده روش در یک مدل استاندارد جهت تخمین اعمال گردیده و سپس با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل و با توجه به سه معیار کنترلی ذکر شده (بخش ۲-۳-۲)، ۴ مدل (از هر دسته ۲ مدل بهتر) انتخاب گردیدند. (منظور از مدل استاندارد در این قسمت مدلی است که اندازه گام آن برابر میانگین فاصله بین نقاط و نزدیکترین همسایه‌های^{۲۳}، تعداد گام‌ها برابر نصف بزرگترین فاصله نقاط تقسیم بر اندازه گام و تعداد نقاط همسایگی آن برابر پیش فرض نرم‌افزار می‌باشد).

۳- جهت اندازه گام مدل نیم‌تغییرنگار، ابتدا میانگین فاصله بین نقاط و نزدیکترین همسایه‌های انتخاب گردید، زیرا این انتخاب باعث می‌شود تا در هر گام حداقل مقدار کمی از جفت نقاط موجود باشد (Krivoruchko, 2011). سپس ۱۰٪ و ۲۰٪ بیشتر و کمتر از این

ناحیه‌ای اختصاص داده می‌شود. با توجه به بازه تغییرات داده‌ها، نواحی در ۵ دسته تقسیم‌بندی شده (برای داده‌های شوری) و چنانچه ناحیه‌ای با هیچ یک از نواحی هم مرز خود، دسته یکسانی نداشته باشد، به رنگ خاکستری نشان داده می‌شود که احتمال پرت بودن آن می‌باشد (شکل ۴).

پس از مشخص شدن گزینه‌های پرت محلی با استفاده از نمودار Voroni، این نقاط از لحاظ منطقی و مشخصات هیدروژئولوژی بررسی گردیدند و پس از محرز شدن اشتباه در برداشت، حذف گردیدند.

ج- بررسی روند^{۱۷} داده‌ها

حذف روند جهت اطمینان از فرض ایستایی صورت می‌پذیرد، علاوه بر این تشخیص روند در داده‌ها در انتخاب روش‌های کریجینگ بسیار مؤثر خواهد بود. نرم‌افزار ArcGIS دارای قابلیت نمایش روند داده‌ها در دو صفحه x-z و y-z بوده که از این قابلیت جهت تشخیص وجود روند داده‌ها در دو جهت شمالی- جنوبی و شرقی- غربی در این پژوهش استفاده گردید.

د- بررسی نرمال بودن داده‌ها و تبدیل داده‌ها به داده‌های نرمال

با توجه به فرضیات روش‌های کریجینگ هر چه داده‌ها به توزیع نرمال نزدیکتر باشند، نتایج مناسب‌تری به دست خواهند آمد. جهت بررسی نرمال بودن داده‌ها از نمودار فراوانی و از نمودار Q-Q نرمال استفاده گردید. در استفاده از نمودار فراوانی، نزدیک بودن میانگین به میانه، چولگی^{۱۸} نزدیک به صفر و کشیدگی^{۱۹} نزدیک به سه بیانگر نرمال بودن داده‌ها می‌باشد و در نمودار Q-Q نرمال چنانچه داده‌ها دارای توزیع نرمال باشند، پراکنش نقاط نزدیک خط ۴۵ درجه می‌باشد.

با توجه به بررسی انجام شده در این مرحله، چنانچه داده‌ها دارای توزیع نرمال نباشند با تبدیل داده‌ها توسط توابع Log و Box-Cox توزیع داده‌ها مجدد بررسی و بهترین روش در تبدیل داده‌ها به داده‌هایی با توزیع نرمال انتخاب می‌گردد.

۲-۴-۲- میان‌یابی و تولید نقشه‌های هم‌تراز شوری

الف- انتخاب روش میان‌یابی

با توجه به ویژگی‌های روش‌های مختلف کریجینگ و پس از پردازش اطلاعات و کسب شناخت مناسب از توزیع و مشخصات داده‌ها، روش‌های کریجینگ معمولی^{۲۰} بدون حذف روند، کریجینگ

۸- جهت بهینه‌سازی پارامترهای روش EBK نیز همانند مراحل ذکر شده در مورد روش‌های کریجینگ معمولی و عمومی عمل گردید. در این روش ۶ حالت برای میانگین تعداد زیرمجموعه‌هایی که هر نقطه داخل آن‌ها قرار می‌گیرد (۰/۱، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵)، ۵ حالت برای تعداد داده‌ها در هر زیرمجموعه (۹۸، ۹۹، ۱۰۰، ۱۰۱، ۱۰۲) و ۳ حالت برای تعداد نیم تغییرنگارهای تولید شده برای هر زیرمجموعه (۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰) با توجه به پیش‌فرض‌های نرم‌افزار و اعمال در یک مدل استاندارد انتخاب گردید (منظور از مدل استاندارد در این قسمت مدلی است که سایر متغیرهای آن غیر از پارامتر مورد بررسی بر اساس پیش‌فرض‌های نرم‌افزار تنظیم شده باشد). نود حالت ساخته شده از ترکیب پارامترهای فوق جهت تخمین و میان‌یابی مورد استفاده قرار گرفته و معیارهای آماری محاسبه گردیدند. در نهایت با توجه به معیارهای $RMSE$ کم و $|I - RMSE| + |MSE|$ نزدیک به صفر بهترین حالت مشخص گردید.

۹- با مقایسه مدل‌های انتخابی گام ۶ (پس از تأیید در گام ۷) و گام ۸ براساس معیارهای آماری و پس از بررسی انطباق با واقعیت‌های فیزیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه بهترین مدل جهت تولید سطوح شوری منطقه در آن سال انتخاب و نقشه پهنه‌بندی شوری تهیه گردید.

۱۰- پس از انجام مراحل ۹ گانه فوق برای میان‌یابی شوری سال آبی ۱۳۸۶ (اولین سال دارای اطلاعات)، جهت اطمینان از انتخاب روش مناسب و تعمیم آن به سایر سال‌ها، فرآیند ۹ مرحله‌ای یادشده عیناً برای سال آبی ۱۳۹۱ (آخرین سال دارای اطلاعات) نیز انجام پذیرفت. سپس روش منتخب جهت تخمین در تک تک سال‌ها به کار گرفته شده و پس از بهینه کردن پارامترهای آن طبق مراحل گفته شده در قبل، نقشه‌های شوری تمامی سال‌های اطلاعاتی تولید گردیدند.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

شکل ۲ ابر نیم تغییرنگار داده‌های سال‌های آبی ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲ و مباحث ارائه شده در بخش پردازش اطلاعات (قسمت الف بخش ۲-۴-۱) پیوستگی مکانی داده‌ها در شکل ب مشهود بوده و در شکل الف نیز پس از حذف داده‌های پرت کلی طبق آنچه در مرحله بعد مشاهده می‌شود (شکل ۳- الف)، روند ابر نیم‌تغییرنگار اصلاح شده نشان‌دهنده پیوستگی مکانی داده‌ها می‌باشد. شکل ۳ نمودارهای مربوط به تشخیص داده‌های پرت کلی و شکل ۴ نمودار Voroni جهت تشخیص داده‌های پرت محلی را برای سال‌های آبی ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

فاصله نیز جهت بهینه کردن این پارامتر و بررسی اثر آن روی نتایج مدل انتخاب گردیدند (مجموعاً ۵ اندازه گام). لازم به ذکر است در مدل‌هایی که کمتر و یا بیشتر کردن این فاصله، منجر به بهبود صعودی نتایج می‌گردید، این تغییر گام، بیش از ۲۰٪ نیز تا هنگام وجود این روند صعودی، ادامه پیدا کرد.

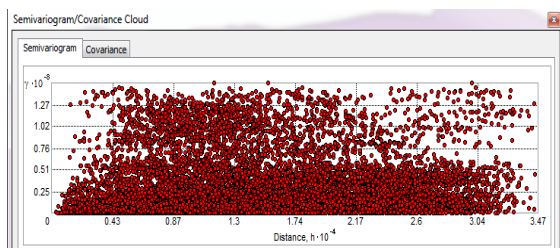
۴- تعداد گام‌ها براساس اندازه گام‌های انتخابی در مرحله قبل و با توجه به این نکته که بهتر است ضرب اندازه گام در تعداد گام تقریباً نصف بزرگترین فاصله بین نقاط باشد، محاسبه گردید.

۵- جهت تعیین ماکزیمم تعداد نقاط همسایگی مؤثر در تخمین، با توجه به پیش‌فرض ۵ در نرم‌افزار، و پس از تست تعداد نقاط مختلف در یک مدل استاندارد با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، ۳ حالت ۵، ۷ و ۳ نقطه همسایگی جهت اعمال در محاسبات در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است جهت تعیین نقاط همسایگی از روش دایره‌ی ۴ قطاعی استفاده گردید، در نتیجه اعداد همسایگی فوق بیانگر ماکزیمم نقاط همسایگی در هر قطاع می‌باشند.

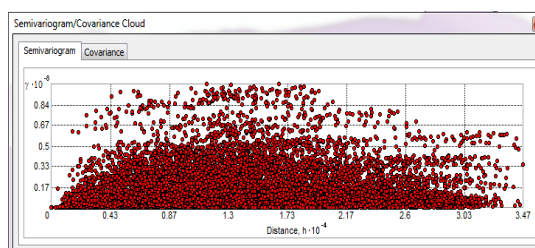
۶- جهت انتخاب بهترین روش (از میان ۵ روش کریجینگ معمولی و عمومی اشاره شده در قسمت الف بخش ۲-۴-۲)، مناسب‌ترین مدل نیم تغییرنگار (از میان ۴ مدل انتخابی در گام ۲)، اندازه گام بهینه (از میان ۵ اندازه گام انتخابی در گام ۳) و نیز تعداد نقاط همسایگی مناسب (از میان ۳ عدد انتخابی در گام ۵)، ترکیب‌های مختلف این متغیرها که منجر به ۳۰۰ حالت گردید، مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از هر ترکیب، عمل تخمین و میان‌یابی اطلاعات توسط نرم‌افزار صورت پذیرفته و معیارهای آماری $RMSE$ ، MSE و $RMSE$ محاسبه گردیدند.

با توجه به معیارهای یک مدل خوب و معتبر (بخش ۲-۳-۲) که بایستی MSE نزدیک به صفر و $RMSE$ نزدیک به ۱ داشته باشد، این دو پارامتر در پارامتر دیگری به صورت $|I - RMSE| + |MSE|$ ادغام شدند. در نهایت از میان هر روش (کریجینگ معمولی و عمومی) ترکیبی که در آن این پارامتر جدید، نزدیکترین مقدار به صفر را دارا بود و علاوه بر آن $RMSE$ کمتری نیز داشت، به عنوان بهترین مدل آن روش انتخاب گردید.

۷- جهت اطمینان از عملکرد مناسب مدل‌های انتخابی در گام ۶، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای سقف^{۲۴}، دامنه تأثیر^{۲۵} و اثر قطعه‌ای^{۲۶} نیم تغییرنگار صورت پذیرفت. به این منظور، تعداد ۱۰ نقطه از داده‌های ورودی با پراکنندگی مناسب در همه جهات انتخاب و با تغییر ۱۰ درصدی هر کدام از پارامترهای فوق، اثر آن بر روی تغییرات سایر پارامترها و مقدار پیش‌بینی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده تغییرات بزرگ نشانه نامناسب بودن مدل و عدم اطمینان به آن می‌باشد.

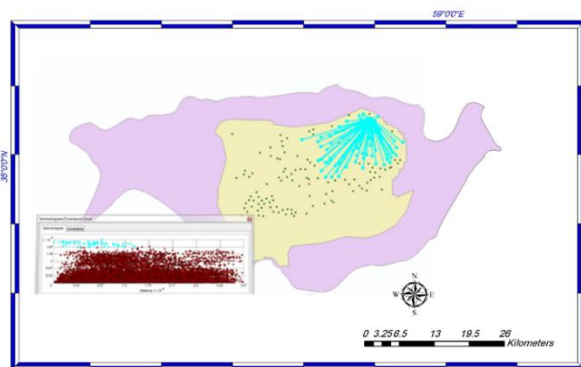


ب

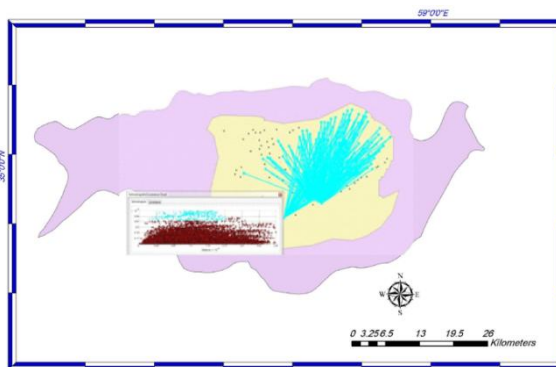


الف

شکل ۲- ابر نیم تغییرنگار داده‌ها الف- سال آبی ۱۳۸۶ و ب- سال آبی ۱۳۹۱

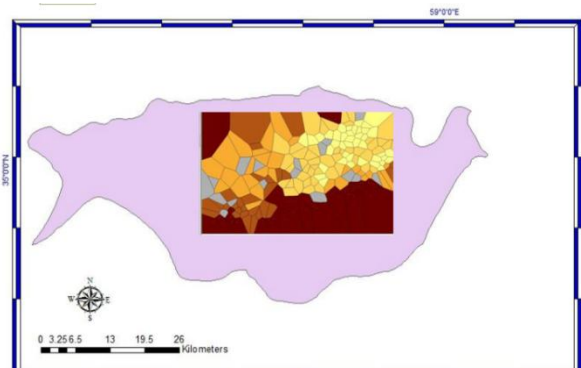


ب

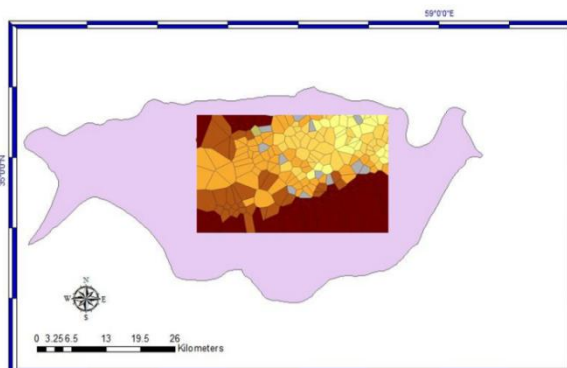


الف

شکل ۳- تشخیص داده‌ی پرت کلی در داده‌های شوری الف- سال آبی ۱۳۸۶ و ب- سال آبی ۱۳۹۱



ب



الف

شکل ۴- نمودار Voroni مربوط به داده‌های شوری الف- سال آبی ۱۳۸۶ و ب- سال آبی ۱۳۹۱

همانطور که در شکل مربوط به تشخیص روند داده‌ها (شکل ۵) مشاهده می‌گردد با چرخش جهات حدود ۲۰ الی ۳۰ درجه در جهت خلاف ساعتگرد نسبت به شرق، روند سهمی‌گون در جهت شمال غربی - جنوب شرقی و روند خطی در جهت شمال شرقی - جنوب غربی در داده‌های شوری سال‌های آبی ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ مشهود می‌باشد. این نتیجه در سایر سال‌های آبی نیز برقرار بود که در این قسمت تنها به عنوان نمونه سال اول و آخر اطلاعاتی ارائه می‌گردد.

بررسی نرمال بودن داده‌ها نیز بر اساس شکل‌های نمودار فراوانی و Q-Q نرمال رسم‌شده برای سال‌های آبی ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱، مؤید این

لازم به ذکر است بسیاری از گزینه‌های احتمالی پرت تشخیص داده شده توسط نمودارهای اشکال ۳ و ۴ در سال‌های آبی متفاوت، پس از بررسی و با توجه به مشخصات کیفی آب زیرزمینی منطقه پرت تشخیص داده نشدند. این نقاط به ویژه در ناحیه انتقال بین آب شور و شیرین مشاهده گردیدند، زیرا از یکطرف با شوری پایین و از طرف دیگر با شوری بالا در تماس هستند. در نتیجه با هیچکدام از همسایگان مجاور خود هم‌دسته نبوده و در نمودار Voroni به رنگ خاکستری و پرت تشخیص داده شدند، در حالی که با واقعیت‌های فیزیکی منطقه سازگار بوده و پرت نمی‌باشند.

دیگر انتخاب نمود. حساسیت روش‌های کریجینگ پس از مدل نیم‌تغییرنگار به ترتیب به نقاط همسایگی و اندازه گام می‌باشد. با توجه به این که طبق جدول ۱، روش کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع درجه دو در میان روش‌های کریجینگ معمولی و عمومی از لحاظ $|MSE| + |1 - RMSSE|$ بهترین نتایج را دارا بود، آنالیز حساسیت حالت منتخب این روش صورت پذیرفت. نتایج به دست آمده برای ۱۰ نقطه انتخابی نشان می‌دهد که تغییر ۱۰ درصدی اثر قطعه‌ای موجب تغییر زیاد شعاع تأثیر و مقدار پیش‌بینی شده می‌گردد که با توجه به مطالب اشاره شده در بخش روش تحقیق نشانه عدم کارایی مطمئن مدل می‌باشد. جدول ۲ نشان دهنده نتایج برای یکی از نقاط انتخابی می‌باشد.

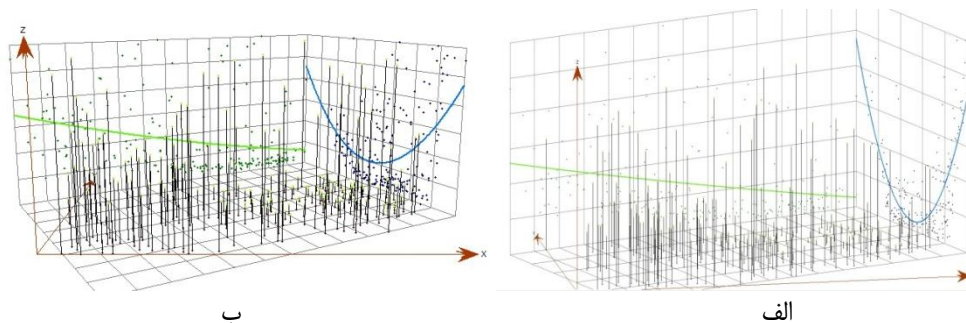
جدول ۳، دوازده ترکیب روش EBK را از میان ۹۰ حالت ارزیابی شده و حالت منتخب آن را نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در روش EBK میانگین تعداد زیرمجموعه‌های دربرگیرنده هر نقطه بیشترین اثر را بر روی نتایج خروجی داشته و پس از آن به ترتیب تعداد داده‌ها در هر زیرمجموعه و تعداد نیم‌تغییرنگارهای تولید شده برای هر زیرمجموعه بر روی نتایج اثرگذار هستند.

در ضمن انتخاب هر پارامتر نیز بایستی در ترکیب با سایر متغیرها صورت پذیرد و نمی‌توان اثرات آن‌ها را بر روی هم نادیده گرفت. نکته مهم دیگر که از مقایسه جداول ۲ و ۳ برداشت می‌شود دقت بسیار مناسب روش EBK با توجه به معیارهای آماری برآورد شده (نزدیک به صفر بودن $|MSE| + |1 - RMSSE|$ و کم بودن $RMSE$) می‌باشد. علاوه بر این، حساسیت جواب‌های خروجی به تغییر پارامترها در روش EBK کمتر از روش‌های کریجینگ عمومی و معمولی بوده که یک مزیت برای این روش محسوب می‌شود.

بود که داده‌های شوری در منطقه از چولگی بالایی برخوردار می‌باشند. علت این امر را می‌توان در تغییرات شدید شوری در مرزهای جنوبی و غربی منطقه جستجو نمود. در نتیجه با تبدیل داده‌ها توسط توابع Log و Box-cox درجه یک، توزیع داده‌ها مجدداً بررسی و بهترین روش در تبدیل داده‌ها به داده‌هایی با توزیع نرمال انتخاب گردید. نتایج نشان داد که داده‌های لگاریتم‌گیری شده به توزیع نرمال نزدیکتر می‌باشند. مقایسه سه معیار نزدیک بودن میانگین به میانه، چولگی نزدیک به صفر و کشیدگی نزدیک به سه (قسمت د بخش ۴-۲-۱) نیز مؤید این امر بود.

با توجه به نتایج ارائه شده در مرحله پردازش اطلاعات، با عنایت به پیوستگی مکانی داده‌ها، وجود روند سهمی‌گون در جهت شمالی-جنوبی و روند خطی در جهت شرقی-غربی و عدم مشخص بودن میانگین ثابت داده‌ها، روش‌های کریجینگ معمولی بدون حذف روند و کریجینگ معمولی و عمومی با حذف روند توسط تابع خطی و تابع درجه دو، بهترین گزینه‌ها برای میان‌یابی اطلاعات حاضر به نظر می‌رسند که همراه با روش EBK در ادامه تحقیق در فرآیند میان‌یابی و تولید نقشه‌های هم‌تراز شوری بررسی شدند. جدول ۱، مقادیر MSE , $RMSE$ و $|MSE| + |1 - RMSSE|$ را برای دو حالت برتر هر کدام از ۵ روش کریجینگ معمولی و عمومی اعمال شده در اطلاعات شوری سال ۱۳۸۶ نشان می‌دهد که از میان ۳۰۰ حالت آزمایش شده انتخاب گردیده‌اند. طبق جدول ۱، روش کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع درجه دو در میان روش‌های کریجینگ معمولی و عمومی از لحاظ $|MSE| + |1 - RMSSE|$ بهترین نتایج را دارا می‌باشد ولی از طرف دیگر بالاترین $RMSE$ را دارا می‌باشد. بررسی‌های جزئی‌تر بر اساس معیار $|MSE| + |1 - RMSSE|$ ، نشان می‌دهد که هر چند مدل نیم‌تغییرنگار بیشترین اثر را در نتایج روش‌های کریجینگ معمولی و عمومی نسبت به سایر پارامترها دارد، ولی نمی‌توان آن را به صورت مستقل و بدون در نظر گرفتن ترکیب آن با متغیرهای



شکل ۵- روند داده‌ها مربوط به داده‌های شوری الف- سال آبی ۱۳۸۶ و ب- سال آبی ۱۳۹۱

جدول ۱- پارامترهای آماری دو مدل برتر هر کدام از روشهای کریجینگ معمولی و عمومی ارزیابی شده در تحقیق (سال آبی ۱۳۸۶)

رتبه	$ MSE + I - RMSSE $	RMSSE	MSE	RMSE	ماکزیمم نقاط همسایگی	تعداد گام	اندازه گام (متر)	مدل نیم تغییرنگار	روش تخمین
۱	۰/۰۸۶	۹۷۵۷/۰	۰۶۱۶/۰	۲/۱۱۶۸	۷	۱۶	۱۰۴۰	J-Bessel	کریجینگ معمولی بدون حذف روند
۲	۰/۱۰۴۶	۰/۹۶۳۱	۰/۰۶۷۶	۱۱۶۷/۹	۷	۲۰	۸۴۰	J-Bessel	کریجینگ معمولی با حذف روند توسط تابع خطی
۱	۰/۲۲۵۴	۱/۱۸۷۷	-۰/۰۳۸	۱۱۴۲/۷	۳	۲۳	۷۴۰	Exponential	کریجینگ معمولی با حذف روند توسط تابع خطی
۲	۰/۲۲۵۵	۱/۱۸۷۸	-۰/۰۳۸	۱۱۴۲/۷	۳	۱۶	۱۰۴۰	Exponential	کریجینگ معمولی با حذف روند توسط تابع درجه دو
۱	۰/۰۹۸	۱/۰۵۵۹	-۰/۰۴۲	۱۱۵۵	۳	۱۶	۱۰۴۰	Exponential	کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع درجه دو
۲	۰/۰۹۸	۱/۰۵۵۷	-۰/۰۴۲	۱۱۵۵/۱	۳	۱۵	۱۱۴۰	Exponential	کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع خطی
۱	۰/۱۵۹	۱/۰۹۸۵	۰/۰۶۰۴	۱۰۳۱/۵	۳	۲۰	۸۴۰	J-Bessel	کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع خطی
۲	۰/۱۵۹۱	۱/۰۹۸۶	۰/۰۶۰۵	۱۰۳۱/۶	۳	۲۳	۷۴۰	J-Bessel	کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع خطی
۱	۰/۰۰۱۷	۱	۰/۰۰۱۷	۱۲۸۳/۸	۷	۱۸	۹۴۰	J-Bessel	کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع درجه دو
۲	۰/۰۰۳۵	۰/۹۹۷۴	۰/۰۰۰۹	۱۲۸۳	۷	۱۸	۹۴۰	Exponential	کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع درجه دو

جدول ۲- مقادیر آنالیز حساسیت روش منتخب کریجینگ عمومی با مرتبه دوم حذف روند به تغییرات ۱۰ درصدی اثر قطعه‌ای

شماره نقطه انتخابی	X (متر)	Y (متر)	اثر قطعه‌ای (متر)	مقدار پیش‌بینی شده (میکرو زیمسن)	خطای استاندارد	سقف (متر)	شعاع تاثیر (متر)
۶	۶۴۰۱۷۱	۳۸۷۰۸۲۴	۰/۰۳۳۳۷۶	۳۶۴۹/۶۴۸	۳۸۵/۵۹۷۴	۰/۰۰۳۹۰۴	۵۹۱۲/۹۶۷
			۰/۰۳۵۸۲۷	۳۶۳۹/۰۸۹	۳۸۴/۸۶۵۲	۰/۰۰۱۵۵۸	۵۹۴۴/۲۸۸
			۰/۰۳۸۳۲۳	۳۹۷۶/۵۲۷	۳۸۲/۸۹۲	۰	۱۶۹۲۰

سال اول و آخر اطلاعات موجود، روش EBK جواب‌های مناسب‌تری را دارا بود، این روش انتخاب و برای میان‌بایی شوری سایر سال‌ها به کار گرفته شد. در هر سال، پارامترهای این روش براساس فرآیند ذکر شده، بهینه گردیده و سطوح شوری تهیه گردیدند.

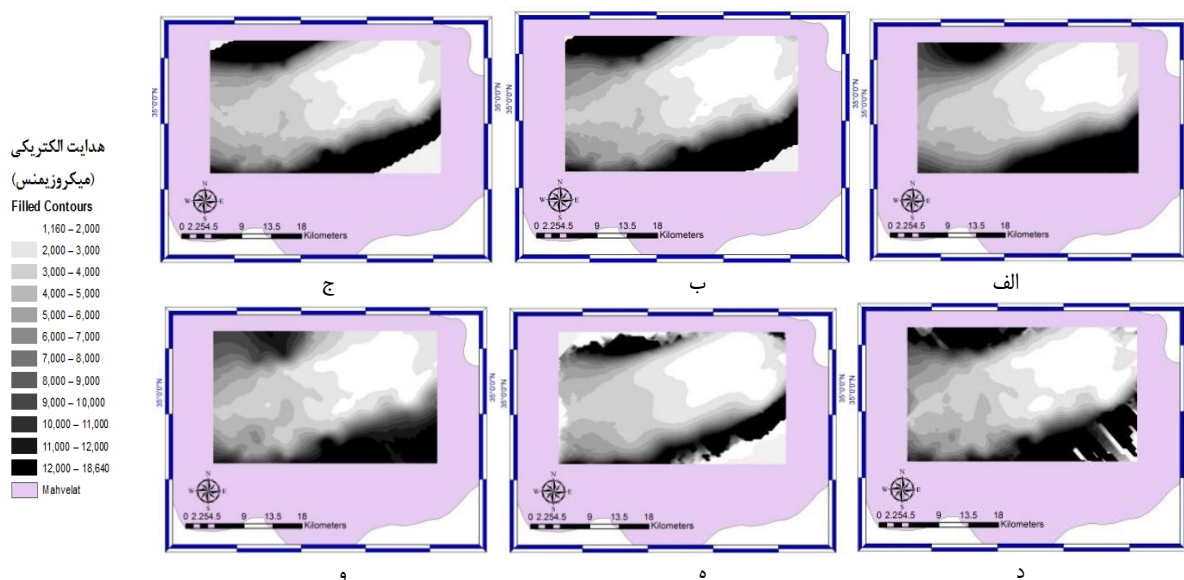
با توجه به رتبه‌بندی متفاوت روش‌ها در سال‌های مختلف (سال ۱۳۸۶ در مقایسه با سال ۱۳۹۱) و همچنین تفاوت پارامترهای روش منتخب (روش EBK) در سال‌های مختلف می‌توان استنباط کرد تعمیم نتایج مربوط به اطلاعات یک منطقه خاص در زمان خاص به سایر مکان‌ها و زمان‌ها صحیح نبوده و بایستی برای هر دسته اطلاعات موجود، فرآیند انتخاب روش و پارامترهای آن به صورت جداگانه صورت پذیرد.

علاوه بر توجه به معیارهای آماری، با توجه به نقشه‌های تولید شده توسط بهترین حالت هر روش (شکل ۶) سطوح تولیدی توسط روش‌های کریجینگ عمومی در مرزهای شمالی و جنوبی با واقعیت‌های هیدرولوژیکی منطقه همخوانی مناسبی نشان نداده که نتایج حاصل از آنالیز حساسیت را مبنی بر عدم کارایی مناسب این مدل تأیید می‌نماید. با توجه به مباحث اشاره شده، روش EBK معتبرترین روش در تخمین شوری سال ۱۳۸۶ می‌باشد.

جداول ۴ و ۵، همانند جداول ۱ و ۳ مقادیر معیارهای آماری مربوط به سال آبی ۱۳۹۱ (بهترین حالت هر روش بر اساس معیار $|MSE| + |I - RMSSE|$) را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در این سال نیز، روش EBK با توجه به نزدیکی بسیار زیاد معیار $|MSE| + |I - RMSSE|$ به مقدار صفر (۰/۰۰۷۵) و کم بودن $RMSE$ بهترین نتایج را دارا می‌باشد. با توجه به این که در

جدول ۳- پارامترهای آماری مدل‌های روش EBK بررسی شده در تحقیق (سال آبی ۱۳۸۶)

رتبه	$ MSE + I - RMSSE $	RMSSE	MSE	RMSE	میانگین تعداد زیرمجموعه‌های در برگیرنده هر نقطه	تعداد نیم تغییرنگارهای تولید شده برای هر زیرمجموعه	تعداد داده‌ها در هر زیرمجموعه	روش تخمین
۱۰	۰/۰۲۷	۱/۰۱۰	۰/۰۱۷	۱۱۰۶/۹۶	۰/۰۱	۱۰۰	۹۸	EBK
۱۴	۰/۰۰۷۵	۱/۰۰۰	۰/۰۰۷	۱۱۱۵/۵۲	۵			
۹	۰/۰۲۵	۱/۰۰۸	۰/۰۱۷	۱۱۰۶/۳۳	۰/۰۱	۲۰۰	۱۰۰	
۳	۰/۰۰۷۹	۰/۹۹۹	۰/۰۰۷	۱۱۱۴/۷۶	۵			
۷	۰/۰۲۲	۱/۰۰۴	۰/۰۱۷	۱۱۰۶/۵۹	۰/۰۱	۱۰۰	۱۰۰	
۵	۰/۰۰۹	۱/۰۰۲	۰/۰۰۷	۱۱۱۶/۳۹	۵			
۸	۰/۰۲۳	۱/۰۰۵	۰/۰۱۷	۱۱۰۶/۸	۰/۰۱	۲۰۰	۱۰۰	
۲	۷۰/۰۰۷	۰/۹۹۹	۰/۰۰۷	۱۱۱۷/۰۳	۵			
۱۱	۰/۰۷۷	۰/۹۴۰	۰/۰۱۷	۱۱۱۱/۹۴	۰/۰۱	۱۰۰	۱۰۲	
۶	۰/۰۱۰	۱/۰۰۲	۰/۰۰۷	۱۱۱۵/۹۶	۵			
۱۲	۰/۰۸۳	۰/۹۳۳	۰/۰۱۷	۱۱۱۳/۱۱	۰/۰۱	۲۰۰	۱۰۲	
۴	۰/۰۰۸	۰/۹۹۹	۰/۰۰۷	۱۱۱۶/۳۹	۵			



شکل ۶- نقشه‌های شوری تولید شده توسط مدل منتخب هر روش (الف- کریجینگ معمولی بدون حذف روند، ب- کریجینگ معمولی با حذف روند توسط تابع خطی، ج- کریجینگ معمولی با حذف روند توسط تابع درجه ۲، د- کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع خطی، ه- کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع درجه دو، و- EBK)

مختلف، با توجه به نقشه‌های تولید شده، بیانگر سرعت بالای پیشروی شوری از مرز غربی و جنوب غربی به سمت مرکز دشت می‌باشد. علت این پیشروی را می‌توان در برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و در نتیجه پایین افتادن تراز هیدرولیکی آب شیرین در مرکز دشت جستجو نمود. در اثر این پدیده، آب شور مرزهای غربی ناشی از دق تشکیل شده به سمت مرکز دشت و آب‌های شیرین حرکت می‌نماید. جهت تقویت این بحث به عنوان نمونه پیشروی دو تراز شوری ۴۰۰۰ و ۶۰۰۰ میکروزیمنس بین دو سال ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ در شکل ۸ نشان داده شده است.

پارامترهای بهینه شده روش EBK در سال‌های مختلف در جدول ۶ و همچنین سطوح شوری تولیدی در شکل ۷ مشاهده می‌شوند.

نقشه‌های تولید شده در سال‌های مختلف نشان دهنده بالا بودن میزان شوری در مرزهای شمالی، جنوبی و غربی منطقه می‌باشند. علت شوری در مرزهای شمالی و جنوبی با توجه به ساختار زمین‌شناسی توجیه‌پذیر بوده و شوری بالا در مرزهای غربی نیز به مجاورت با دق تشکیل شده ناشی از پخش کالشور نسبت داده می‌شود. علاوه بر بررسی مکانی، بررسی زمانی شوری در سال‌های

جدول ۴- پارامترهای آماری مدل برتر هر کدام از روشهای کریجینگ معمولی و عمومی ارزیابی شده در تحقیق (سال آبی ۱۳۹۱)

رتبه	$ MSE + I - RMSSE $	RMSSE	MSE	RMSE	ماکزیمم نقاط همسایگی	تعداد گام	سایز گام	مدل نیم تغییرنگار	روش تخمین
۱	۰/۰۸۶	۱/۰۶۲	۰/۰۲۵	۲۱۸۵/۱۸۰	۵	۷	۱۸۶۰	Exponential	کریجینگ معمولی بدون حذف روند
۱	۰/۴۴۱	۱/۳۹۷	-۰/۰۴۴	۲۲۲۷/۴۳۶	۵	۱۶	۱۰۶۰	Exponential	کریجینگ معمولی با حذف روند توسط تابع خطی
۱	۰/۴۶۶	۱/۴۲۰	-۰/۰۴۶	۳۶۳۶/۸۳	۵	۱۶	۱۰۶۰	Exponential	کریجینگ معمولی با حذف روند توسط تابع درجه دو
۱	۰/۰۴۸	۰/۹۸۴	۰/۰۳۲	۲۵۲۱/۸۸۱	۵	۲۰	۸۶۰	J-Bessel	کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع خطی
۱	۰/۰۳۷	۰/۹۹۶	-۰/۰۳۳	۲۵۳۱/۹۰۵	۵	۲۰	۸۶۰	J-Bessel	کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع درجه دو

جدول ۵- پارامترهای آماری مدل برتر روش EBK تست شده در تحقیق (سال آبی ۱۳۹۱)

رتبه	$ MSE + I - RMSSE $	RMSSE	MSE	RMSE	میانگین تعداد زیرمجموعه‌های دربرگیرنده هر نقطه	تعداد نیم تغییرنگارهای تولید شده برای هر زیرمجموعه	تعداد داده‌ها در هر زیرمجموعه	روش تخمین
۱	۰/۰۰۷۵	۱/۰۱۳۰۸۶	-۰/۰۰۳۸	۲۲۸۰/۴۳	۰/۰۱	۵۰	۹۰	EBK

جدول ۶- پارامترهای بهینه شده روش EBK در سال‌های مختلف آبی

سال آبی	تعداد نیم تغییرنگارهای تولید شده برای هر زیرمجموعه	تعداد داده‌ها در هر زیرمجموعه	میانگین تعداد زیرمجموعه‌های دربرگیرنده هر نقطه
۱۳۸۶	۱۰۰	۹۸	۵
۱۳۸۷	۱۰۰	۹۰	۰/۰۱
۱۳۸۸	۱۰۰	۹۵	۰/۰۱
۱۳۸۹	۲۰۰	۸۵	۵
۱۳۹۰	۱۰۰	۹۹	۰/۰۱
۱۳۹۱	۵۰	۹۰	۰/۰۱

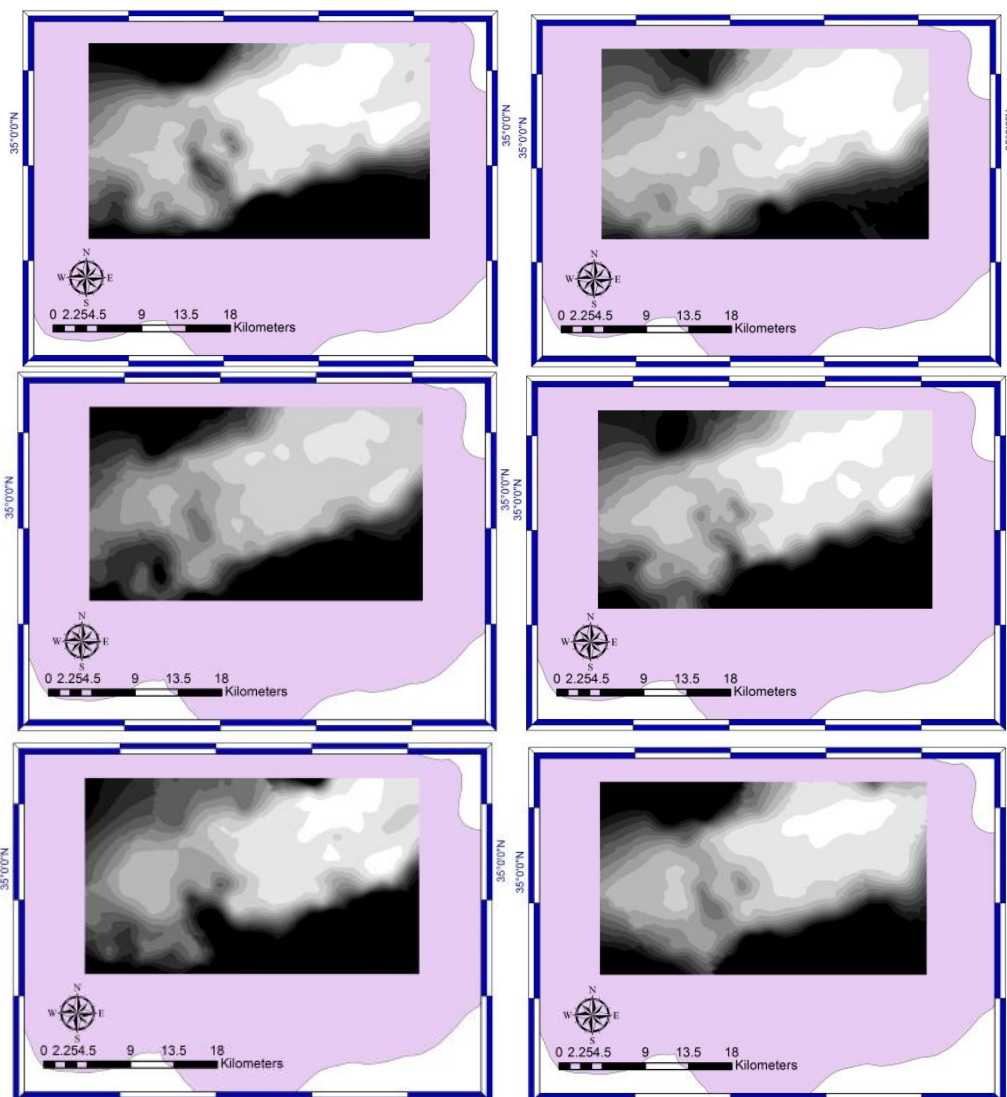
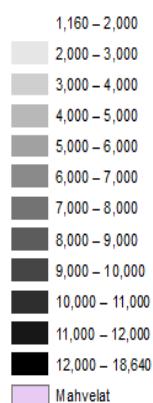
۴- خلاصه و جمع‌بندی

مختلف بر اساس یک فرآیند نه مرحله‌ای انجام گردید. این مراحل شامل انتخاب بازه‌های منطقی از مقادیر متغیرها (نیم‌تغییرنگار، اندازه گام، تعداد گام و حداکثر نقاط همسایگی برای روش‌های کریجینگ و میانگین تعداد زیرمجموعه‌های دربرگیرنده هر نقطه، تعداد داده‌ها در هر زیرمجموعه و تعداد نیم‌تغییرنگارهای تولید شده برای هر زیرمجموعه برای روش EBK)، ترکیب آن‌ها و مقایسه حالت‌های مختلف ایجاد شده با روش اعتبارسنجی متقابل بر اساس معیارهای آماری منتخب بود. این مراحل هم برای سال اول و هم برای سال آخر دارای اطلاعات (به ترتیب سال‌های آبی ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱) صورت گرفت و نتایج نشان داد که روش EBK نسبت به سایر روش‌های کریجینگ عملکرد بهتری را چه از لحاظ معیارهای آماری و چه از لحاظ تطابق با واقعیت‌های منطقه نشان می‌دهد.

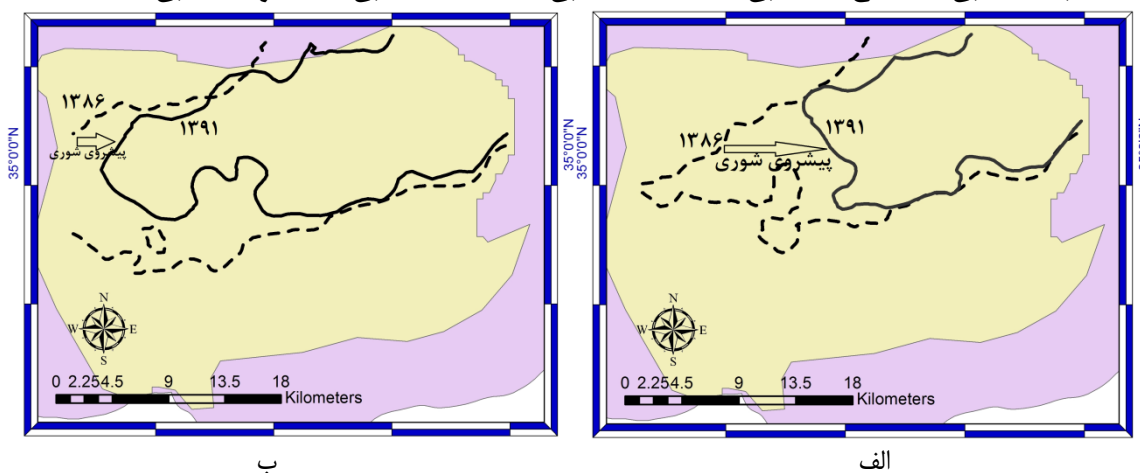
در تحقیق حاضر پس از فرآیند پردازش اطلاعات که شامل بررسی پیوستگی مکانی داده‌ها، مشخص کردن و حذف داده‌های پرت، بررسی روند و تبدیل داده‌ها به داده‌های نرمال می‌باشد، شناخت لازم از داده‌ها کسب شده و روش‌های مناسب کریجینگ به منظور میان‌یابی و تولید سطوح شوری برای اطلاعات موجود از یک سال خاص در دشت مهورات - فیض‌آباد انتخاب گردیدند. این روش‌ها شامل کریجینگ معمولی بدون حذف روند، کریجینگ معمولی و عمومی با حذف روند توسط تابع خطی و تابع درجه دو و روش کریجینگ بیزی تجربی موسوم به روش EBK بودند. سپس، با توجه به تعدد پارامترهای روش‌های کریجینگ، بهینه‌کردن مدل‌های

هدایت الکتریکی
(میکروزیمنس)

Filled Contours



شکل ۷- نقشه‌های شوری تولید شده توسط مدل EBK با پارامترهای بهینه‌شده در سال‌های آبی مختلف (الف- سال آبی ۱۳۸۶، ب- سال آبی ۱۳۸۷، ج- سال آبی ۱۳۸۸، د- سال آبی ۱۳۸۹، ه- سال آبی ۱۳۹۰، و- سال آبی ۱۳۹۱)



شکل ۸- پیشروی شوری بین سال آبی ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ (الف- تراز شوری ۴۰۰۰ میکروزیمنس، ب- تراز شوری ۶۰۰۰ میکروزیمنس)

۵- مراجع

احمدالی خ، نیک مهر س، لیاقت ع (۱۳۸۷) ارزیابی روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ در تخمین شوری و اسیدیته عمقی خاک (مطالعه موردی: اراضی منطقه بوکان). مجله پژوهش آب ایران، سال ۲، شماره ۳: ۶۴-۵۵.

اوسطی خ، سلاجقه ع، آرخی ص (۱۳۹۱) تغییرات مکانی میزان نیترات در آب زیرزمینی با استفاده از زمین آمار (مطالعه موردی: دشت کردان). مجله منابع طبیعی ایران، سال ۶۵، شماره ۴: ۴۶۱-۴۷۲.

تقی‌زاده ر، محمودی ش، خزایی ح، حیدری ا (۱۳۸۷) بررسی روش‌های درون‌یابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان. مجله علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، سال ۵، شماره ۲: ۷۰-۶۳.

تقیان ب، دانش کار آراسته پ، رحیمی بندرآبادی س، فتاحی ا، محمدرزاده م (۱۳۹۰) راهنمای روش‌های توزیع مکانی عوامل اقلیمی با استفاده از داده‌های نقطه‌ای. وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، معاونت نظارت راهبردی، کد ۵۸۵-۱۱۵-۱۳۰.

حسنی‌پاک ع (۱۳۷۷) زمین‌آمار. انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ۳۱۴ صفحه.

سامانی ج، یاری م (۱۳۸۷) بررسی تغییرات زمانی و مکانی شوری آب زیرزمینی با استفاده از روش کریجینگ. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران.

سکوئی اسکویی ر (۱۳۹۱) تغییرات زمانی و مکانی شوری آب زیرزمینی دشت ارومیه. مجله حفاظت منابع آب و خاک، سال ۱، شماره ۴: ۲۶-۱۹.

شعبانی م (۱۳۹۰) ارزیابی روش‌های زمین آماری در تهیه نقشه‌های کیفی آب‌های زیرزمینی و پهنه‌بندی آن‌ها (مطالعه موردی: دشت نیریز، استان فارس). جغرافیای طبیعی، سال ۱۳، شماره ۴: ۸۳-۹۶.

قهرمان ب، حسینی م، عسگری ح (۱۳۸۲) کاربرد زمین آمار در ارزیابی شبکه‌های پایش کیفی آب زیرزمینی. امیرکبیر، سال ۱۴، شماره ۵۵: ۹۸۱-۹۷۱.

قاسمی زیارانی ا، فریادی ش، شیخ کاظمی ش (۱۳۸۵) پهنه‌بندی آلودگی حوضه آبخیز سد کرج با استفاده از نرم‌افزار GIS. اولین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران.

به عنوان نمونه معیار آماری $|MSE| + |I - RMSSE|$ در سال‌های آبی ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ دارای مقدار $0/075$ بود که مقدار نزدیک به صفر این معیار نشان‌دهنده عملکرد قوی این روش بر اساس این معیار آماری ترکیبی می‌باشد. این نتایج به همراه مزیت‌های کلی این روش از جمله کم بودن تعداد متغیرها، خودکار شدن بیشتر فرآیند تخمین و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های انتخاب نیم‌تغییرنگار، می‌تواند نشانگر کارایی بالای روش در تولید سطوح شوری در آب زیرزمینی باشد. سپس، روش انتخابی پس از بهینه‌کردن پارامترها، برای تولید سطوح شوری در سایر سال‌ها (سال‌های آبی ۱۳۸۷ الی ۱۳۹۰) نیز استفاده شد.

علاوه بر نکات یاد شده، مشخص نمودن میزان اثرگذاری پارامترها بر نتایج میان‌یابی روش‌های مختلف، عدم امکان تعمیم روش بهینه به‌دست آمده برای یک دسته اطلاعات به سایر مکان‌ها و زمان‌ها، تعیین چگونگی پراکندگی مکانی شوری در منطقه و پیشروی مشهود شوری از مرزهای غربی و جنوب غربی دشت مهولات - فیض‌آباد به سمت مرکز دشت در سال‌های مختلف از دیگر نتایج بارز این تحقیق مرتبط با مطالعه پدیده شوری می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Kriging
- 2- Empirical Bayesian Kriging
- 3- EC
- 4- Semivariogram
- 5- Restricted Maximum Likelihood
- 6- Bayes Rule
- 7- Subset Size
- 8- Overlap Factor
- 9- Number of Simulation
- 10- Cross Validation
- 11- Error
- 12- Standardized Error
- 13- Outliers
- 14- Global
- 15- Local
- 16- Cluster
- 17- Trend
- 18- Skewness
- 19- Kurtosis
- 20- Ordinary Kriging
- 21- Universal Kriging
- 22- Lag size
- 23- Average Nearest Neighbor
- 24- Sill
- 25- Range
- 26- Nugget

- Ella V, Melvin S, Kanwar R (1999) Spatial analysis of NO₃- N03-N concentration in glacial till. ASAE-SCGR Annual International Meeting, 18- 21 July, Toronto, Ontario, Canada, ASAE Paper No. 992004.
- Gallichand J (1991) Kriging of hydraulic conductivity for subsurface drainage design. J. of Irrig. and Drain. Eng., ASCE117(5): 667- 679.
- Gaus I, Kinniburgh G, Talbot C and Webster R (2003) Geostatistical analysis of arsenic concentration in groundwater in Bangladesh using disjunctive kriging, Environmental Geology 44: 939- 948.
- Istok D, Cooper R (1998) Geostatistics Applied to Groundwater Pollution. III: Global Estimates, Journal of Environmental Engineering 114 (4): 915- 928.
- Kelinhu U., Yuangfang H., Hong Li L., Deli Chan Ch, Edlin D (2005) Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain. Enviroment International 31: 893- 903.
- Khattak A, Ahmed N, Hussein I, Qazi A, Alikhan S, Rehman A, Iqbal N (2014) Spatial distribution of salinity in shallow Groundwater used for crop irrigation. Pak. J. Bot 46(2): 531-537.
- Kitanidis P (1993) Geostatitics, Chapter 20 in Handbook of Hydrology. McGraw- Hill, New York, 1424p.
- Krivoruchko K (2012) Empirical Bayesian Kriging, Implemented in ArcGIS Geostatistical Analyst. Arc user 15(4):6-10.
- Krivoruchko K (2011) Spatial Statistical Data Analysis for GIS Users. Esri Press, Redlands, CA, 928p.
- Rizzo D, Mouser J (2000) Evaluation of geostatistics for combined hydrochemistry and microbial community fingerprinting at a waste disposal site, P:1-11.
- YueSun A, Shaozhong Kang F, Zhang L (2009) Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. J. Environ. Model. and Software 24: 1163- 1170.
- نظری زاده ف، ارشادیان ب، زند وکیلی ک (۱۳۸۵) بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بالا رود در استان خوزستان. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوزه‌های کارون و زاینده‌رود، شهرکرد.
- هاشمی جزی م، آتشگاهی م، حمیدیان ا (۱۳۸۹) برآورد مکانی مؤلفه‌های کیفی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین آمار (مطالعه موردی: دشت گلپایگان). مجله منابع طبیعی ایران، سال ۶۳، شماره ۴: ۳۵۷-۳۴۷.
- یاری ر، کوچک زاده م (۱۳۸۷) مقایسه روش‌های زمین آماری برای پیش‌بینی پراکنش مکانی شوری آب زیرزمینی. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، تبریز.
- ولایتی س (۱۳۷۸) پیامدهای ناشی از اضافه برداشت آب خانه‌های زیرزمینی. مجله دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه فردوسی مشهد، شماره اول و دوم: ۱۲۴-۱۰۷.
- Ahmed S (2002) Groundwater monitoring network design: application of Geostatistics with a few Case studies from a granitic aquifer in a semiarid region. In: Groundwater Hydrology, M. M. Sherif, V. P. Singh and M. Al- Rashed (Eds.), Balkema, Tokyo, Japan. 2:37- 57.
- Alsaaran N (2000) Optimal interpolation and isarithmic mapping of groundwater salinity in Tebrak area, central Saudi Arabia. J. King Saudi Univ 12 (2): 49- 58.
- Barca E, 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.
- Bryan R (1988) Introducing Geostatistics- Estimating Spatial Data, Critical Water Issues and Computer Applications, ASCE: 374- 379.
- Dagostino V, Greene E, Passarella , Vurro G (1998) Spatial and temporal study of nitrate concentration in groundwater by means of coregionalization. Environmental Geology 36: 285-295.
- Dick J, Gerard B (2006) Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. Geoderma 138: 86- 95.