

صاحب امتیاز: انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران  
مدیرمسئول: رضا اردکانیان  
سردبیر: رضا کراچیان، استاد دانشگاه تهران

اعضای هیأت تحریریه:

حمیدرضا صفوی: دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان  
مهدی ضرغامی: دانشیار دانشگاه تبریز  
ناصر طالب بیدختی: استاد دانشگاه شیراز  
بهزاد عطائی آشتیانی: استاد دانشگاه صنعتی شریف  
امین علیزاده: استاد دانشگاه فردوسی مشهد  
حسنعلی غیور: استاد دانشگاه اصفهان  
محمد کارآموز: استاد دانشگاه تهران  
رضا مکنون: استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

رضا اردکانیان: استادیار دانشگاه صنعتی شریف  
عباس افشار: استاد دانشگاه علم و صنعت ایران  
غلامعباس بارانی: استاد دانشگاه شهید باهنر کرمان  
مسعود تابش: استاد دانشگاه تهران  
علی خلیلی: استاد دانشگاه تهران  
شهناز دانش: دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد  
علیرضا سپاسخواه: استاد دانشگاه شیراز

ویراستاران فنی این شماره:

دکتر عباس افشار  
دکتر علی خلیلی  
دکتر علیرضا سپاسخواه  
دکتر مهدی ضرغامی  
دکتر امین علیزاده  
دکتر محمد کارآموز  
دکتر مسعود تابش  
دکتر شهناز دانش  
دکتر حمیدرضا صفوی  
دکتر بهزاد عطائی آشتیانی  
دکتر حسنعلی غیور



ویراستار بخش انگلیسی: آزاده استادرحیمی  
طراح روی جلد مجله: کورش قاضی مراد  
صفحه آرای: هایدی صابری  
ناظر چاپ: امیر روحنواز  
دبیر داخلی: معصومه مقدسی پور

\*هزینه اشتراک سالانه شرکتها: ۶۰۰۰۰۰ ریال \*هزینه اشتراک سالانه اشخاص ۴۵۰۰۰۰ ریال \* قیمت این شماره ۱۵۰۰۰۰ ریال

آدرس دبیرخانه تهران: خیابان فلسطین شمالی، نرسیده به زرتشت - کوچه پرویز  
روشن - شماره ۲۸ - طبقه چهارم - انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران - تلفن:  
۰۲۱-۸۸۹۱۵۶۸۶

پست الکترونیک: ir\_wra@yahoo.com

وب سایت انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران: www.Iranwra.com

وب سایت دریافت مقالات: www.Iranwrajournal.ir

ISSN 2347-1735



## پیشگفتار<sup>۱</sup>

بحران آب در ایران به یک بحران ملی تبدیل شده است. دریاچه‌ها و تالاب‌های بسیاری خشک شده‌اند، بسیاری از رودخانه‌های پرآب خروشی ندارند و کشاورزان بسیاری از مناطق، از کم‌شدن آب و عمیق‌تر شدن چاه‌ها گلهمند هستند. سوال مهمی که در یافتن راه‌حل بحران آب باید به آن پاسخ داد این است که علت یا علل اصلی پیدایش این بحران چیست؟

مدعای این پیشگفتار آن است که عدم توجه به مسایل اقتصاد آب، یکی از دلایل اصلی پیدایش بحران آب در ایران است و در نتیجه هر راه‌حلی باید با توجه دقیق به این مسأله طرح شود. افراد اجتماع در تصمیم‌گیری‌های خود معمولاً بر اساس نفع شخصی عمل می‌کنند. تصمیم‌گیری برای استفاده از منابع آب نیز از این قاعده مستثنی نیست. اینکه کشاورز در مصرف آب چقدر دقت بخرج دهد، فن‌آوری‌های کم‌آبر استفاده کند، یا محصولات کم‌آبر را کشت کند، به میزان دسترسی وی به منابع آبی و قیمتی که برای برداشت از این منابع باید بپردازد بستگی دارد. در نظامی که قیمت مشخصی برای آب وجود دارد، تخصیص منابع آب نیز می‌تواند به صورت بهینه صورت پذیرد چراکه فردی که ارزش اقتصادی بیشتری از مصرف آب تولید می‌کند، می‌تواند آب را از دیگری خریداری کند.

البته آب در حفظ تعادل‌های زیست‌محیطی نیز نقشی کلیدی ایفا می‌کند. به عنوان مثال، وجود دریاچه‌های طبیعی مانند ارومیه، بختگان و پریشان، تعادلی در اکوسیستم برقرار می‌کند که خود تولید ارزش به حساب می‌آید؛ اما از آنجاکه پس از ایجاد این ارزش، همگان از آن بهره‌مند می‌شوند و نمی‌توان به سادگی کسی را از آن محروم کرد، هیچ‌یک از افراد منفعت‌طلب، علاقه‌ای به تخصیص سهم آب خود به این مقوله ندارند. استفاده شخصی از آب به تولید محصول و نفع شخصی منجر می‌شود، درحالی‌که در تأمین نیاز آبی محیط زیست، نفع مستقیمی به کشاورز نمی‌رساند (غیر از اهمیتی که برای محیط‌زیست قایل‌اند). وقتی تمام کشاورزان یک منطقه بر این اساس تصمیم‌گیری کنند، حاصل جمع مصرف آب آنها، آبی برای محیط زیست باقی نخواهد گذاشت. در این شرایط لازم است دولت با ایفای نقش مؤثر، مانع برهم‌خوردن تعادل‌های زیست محیطی شود.

در گذشته، آب کشاورزی بیشتر به عنوان یک حق شناخته می‌شد و افراد باتوجه به دوری و نزدیکی به منابع آبی و نیز سرمایه‌گذاری‌هایی که در برداشت از این منابع انجام می‌دادند (مانند حفر کانال یا قنات)، از این حق برخوردار می‌شدند. اعمال این حقوق نیز در سطح روستاها و با نظارت میرآب یا سازوکارهای مشابهی انجام می‌شد. در این ساختار، آب به عنوان یک منبع مشترک و با مدیریت بزرگ روستا و با نگاه به نیازهای محیط زیست استفاده می‌شد. باتوجه به نظارت دقیق افراد روستا و مدیریت متمرکز استفاده از منابع آب، قیمت و بازار در نظام سنتی تخصیص آب نقشی نداشت. دو دلیل عمده، باعث اضمحلال این نظام مبتنی بر حقوق مالکیت سنتی<sup>۲</sup> شده است. با پیشرفت تکنولوژی‌های تأمین آب (پمپ‌های مکشی، ماشین‌های حفاری و ...) هزینه ایجاد دسترسی فردی به آب کاهش یافته است. از طرف دیگر، با بزرگ شدن روستاها و گسترش کشاورزی در اطراف روستاهایی که دیگر اجتماع کوچکی از افراد آشنا نبودند، اعمال و نظارت بر حق‌آبه‌ها و نظم‌بخشی سنتی با مشکل مواجه شد.

در کشور ما، ضعیف‌شدن نظام سنتی مدیریت منابع آب با تقویت نظام مدرن مبتنی بر حقوق مالکیت قابل اعمال توسط دولت همراه نبوده است. دولت تمرکز اصلی خود را بر تشویق کشاورزی و تسهیل دسترسی به منابع آب کشاورزی قرار داده است و نظام تخصیص آب و اعمال حقوق مالکیت مدرن<sup>۳</sup> را به حال خود رها کرده است. سیاست‌هایی مانند خرید تضمینی محصولات کشاورزی و بارانه روی نهاده‌های تولید، وقتی با وجود آب تقریباً مجانی همراه شود، نتیجه‌ای جز گسترش مخرب کشاورزی نخواهد داشت. در واقع دولت هزینه استفاده از نهاده‌های کشاورزی را بدون توجه به اکوسیستم مناطق مختلف کاهش داده است و از طرف دیگر محصول تولید شده را نیز با قیمت تضمینی خریداری کرده است. لذا منطقی‌ترین کار برای کشاورزان تلاش برای استفاده هرچه بیشتر از آب و خاک برای استفاده از تسهیلات ایجاد شده توسط

۱- این پیشگفتار توسط جناب آقای دکتر محمد وصال، عضو هیأت علمی دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه صنعتی شریف نوشته شده است و توسط سردبیر و اعضای هیأت تحریریه مجله ویرایش و تکمیل شده است.

2- Traditional property rights  
3- Modern property rights

دولت است. تخریب جنگلها و تبدیل مراتع به زمین‌های کشاورزی و دست‌اندازی به انواع منابع آبی بدون توجه به نیازهای محیط زیست از نتایج طبیعی این سیاست‌ها خواهد بود.

در این شرایط اولویت اصلی سیاست‌گذار باید ایجاد و اعمال حقوق مالکیت آب باشد. یعنی اولاً باید مشخص باشد که چطور افراد می‌توانند منابع آبی را در اختیار بگیرند و ثانیاً چطور می‌توانند آن‌را مبادله کنند. در نتیجه‌ی وجود حقوق مالکیت مستحکم، حفر چاه و استحصال از رودخانه‌ها و دیگر منابع آبی تنها با اجازه قانون صورت می‌گیرد. وقتی مالکیت برای آب تعریف و اعمال شد، در این صورت مبادله حقوق آب نیز معنی می‌یابد. البته به دلیل محلی بودن منابع آب و دشواری انتقال آن لازم است دولت در ایجاد بازار آب<sup>1</sup> مشارکت فعال داشته باشد، اما مداخلاتی که به تقویت حقوق مالکیت آب منجر نشود و نظام مبادله مبتنی بر قیمت‌ها را ایجاد نکند، عملاً انگیزه‌های اقتصادی مصرف‌کننده و تولیدکننده آب را در نظر نمی‌گیرد.

در نظام مدرن مبتنی بر حقوق مالکیت قابل اعمال آب، سیاست‌گذار می‌تواند از دو طریق نیاز آبی محیط زیست را تأمین کند. اول، بطور قانونی سهمی از آب را به عنوان نیاز محیط زیست تعریف می‌کند و مالکیت آن را به سازمان متولی حفاظت از محیط زیست می‌دهد. این سهم می‌تواند قابل مبادله باشد؛ بدین معنی که در شرایطی که ارزش افزوده استفاده از آب در مصارف دیگر بیشتر از مصارف محیط‌زیستی است، افراد امکان خرید سهم آب محیط زیست را داشته باشند. دوم، دولت می‌تواند آب مورد نیاز برای محیط زیست را از کشاورزانی که مالک آب هستند خریداری کند. در این صورت کشاورزان قسمتی یا همه آب خود را برای یک دوره کوتاه‌مدت یا بلندمدت به دولت منتقل می‌کنند و از آنجا که مالکیت همه منابع آب تعریف شده است، نمی‌توانند از منبع دیگری نیاز آبی خود را تأمین کنند مگر آنکه قیمت آن را به مالک بپردازند. این موضوع در طرح به کاشت برای احیای دریاچه ارومیه به طور جدی توسط ستاد احیا در حال پیگیری است ولی در عمل دارای چالش‌های جدی‌ای است.

بدیهی است که تعریف حقوق مالکیت آب و راه‌اندازی بازار آب نیازمند مطالعاتی است که از حوصله این نوشته مختصر خارج است. به عنوان مثال لازم است با شیوه‌های نوین پایش و البته طراحی صحیح نظام انگیزشی مأموران اعمال قانون، جلوی حفر چاه‌های غیرقانونی و پمپ‌های غیرمجاز گرفته شود. در غیر این صورت عملاً حقوق مالکیت تعریف نشده باقی می‌ماند چراکه هر کسی با پرداخت هزینه اولیه حفر چاه غیرمجاز می‌تواند به منابع آب با قیمت صفر دست یابد. هدف نوشته حاضر تنها ترسیم چارچوب کلی نظام انگیزشی کشاورزان و کلاً مصرف‌کنندگان آب و لزوم توجه به مباحث اقتصاد آب به عنوان یکی از راهکارهای خروج از بحران آب در کنار شیوه‌های دیگر مبتنی بر روش‌های مهندسی کاهش مصرف آب، تغییر الگوهای رفتاری در زمینه استفاده از آب و ایجاد باورهای اجتماعی در زمینه بحران آب می‌باشد. بدیهی است در این راستا به جز شناسایی عوامل ایجاد بحران آب و به ویژه تأثیر تک تک این عوامل که الزاماً در کلیه مناطق کشور نیز یکسان نیستند، نیاز است راهکار جامعی مشتمل بر مدیریت عرضه و تقاضای آب، اقتصاد آب، تغییر در اولویت‌های مصرف و نیز توسعه در راستای برنامه‌های آمایشی صورت گیرد.

مجله تحقیقات منابع آب ایران آمادگی دارد تجارب کارشناسان محترم و نظرات پژوهشگران گرامی در زمینه‌های مرتبط با پیشگفتار فوق را به چاپ برساند.



## فهرست مطالب

### مقالات علمی - پژوهشی:

- ۱ مقایسه سازماندار روش‌های زمین آماری برای برآورد شوری آب زیرزمینی در مناطق کویری  
مطالعه موردی: دشت فیض آباد - مهولات  
احسان بهرامی جوین و سید محمود حسینی
- ۱۶ ارزیابی ذی‌مدخلان در بخش آب (مطالعه‌ی موردی: محدوده‌ی مطالعاتی رفسنجان)  
سمیرا غفوری فرد، علی باقری، شاهرخ شجری
- ۲۹ ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در حل مسئله بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنه:  
مقایسه چهار الگوریتم  
رامتین معینی
- ۴۷ تغییرات پله‌ای غیرنظام‌مند در پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی استوکاستیکی بارش روزانه چندایستگاهی  
بیژن قهرمان و احسان امینی
- ۵۶ انتخاب نوع لوله مناسب در ساخت شبکه‌های آبرسانی به مناطق کم جمعیت با روش OWA-TOPSIS و لحاظ اجماع گروهی  
مهدی ضرغامی، سمیه باغبانی و علی نیکجوفر
- ۷۰ بررسی اثرات تغییر اقلیم بر فرآیند تبدیل برف به رواناب، مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود  
آزاده احمدی، امین خرمیان، حمیدرضا صفوی
- ۸۳ تخصیص بهینه آب در شبکه‌های آبیاری در شرایط لحاظ تغییرات شوری، مطالعه موردی: شبکه‌های آبیاری زاینده‌رود  
مجید دلاور، سعید مرید و مهنوش مقدسی
- ۹۷ ارزیابی روش‌های ماشین بردار پشتیبان، تحلیل تفکیک خطی و درجه دوم در شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی  
دشت شهرکرد  
عبداله رضائی چرمهینه و محمد ذونعمت کرمانی
- ۱۰۶ بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی حوضه آبریز تسوج به روش ریز مقیاس نمایی آماری  
مجید رضایی بنفشه، طاهره جلالی عنصرودی، مهدی ضرغامی و اصغر اصغری مقدم
- ۱۱۶ تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها: مرور پیشینه مطالعات و چشم‌انداز مطالعات آتی  
نجمه مهجوری مجد
- ۱۳۵ تحلیل عدم قطعیت تاثیر سیستم‌های آبیاری تحت فشار بر جریان خروجی از حوضه دریاچه ارومیه،  
مطالعه موردی: حوضه زربینه‌رود  
ظاهر طلوعی، مجید دلاور، سعید مرید و حجت احمدزاده
- یادداشت فنی  
۱۴۶ مدل‌سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل‌های هوشمند هیبریدی  
محمدعلی قربانی، عاطفه ازانی، سمیه محمودی وانعلیا
- ۱۵۱ بررسی روند بارش در ۳۲ ایستگاه سینوپتیک ایران با روش ناپارامتری و جمع متحرک داده با مرتبه ۱ تا ۴۸ ماهه  
طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۵  
محمد رضا اختصاصی، فرشید جهانبخشی، محمد رضا کوثری





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

E. Bahrami Jovein<sup>1</sup> and S.M. Hosseini<sup>2\*</sup>

### 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 فیض آباد-مهولات

احسان بهرامی جوین<sup>۱</sup> و سید محمود حسینی<sup>۲\*</sup>

### 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 بهره‌برداری 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 بی‌بی 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 بی‌بی 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

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<sup>۱</sup> 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

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 صحنه 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)، Ella et al. (1999)، Ahmed (2002)، Yuesun et al. (2009)، Dagostino et al. (1998)، Istok and Cooper (1998)، Dick and Gerrard (2006)، Rizzo and Mouser (2000)، 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<sup>۲</sup> نیز مورد تحقیق و مقایسه با سایر روش‌ها قرار گرفته است.



## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۲- 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.

### ۲-۳- مبانی آماری و ریاضی

مبانی استفاده شده در این تحقیق همان مفاهیم اولیه علم زمین آمار 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 (ثقفیان و همکاران، ۱۳۹۰) مراجعه نمود.

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

### ۲-۳-۱- روش EBK

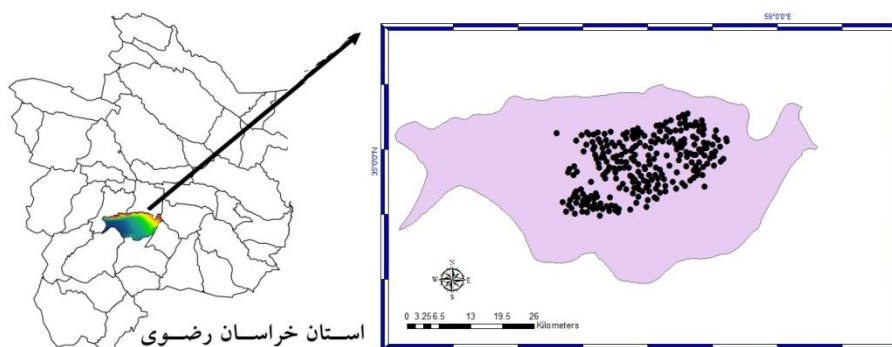
این روش یک روش درونیابی زمین آماری است که سختی‌های مربوط به ساختن یک مدل کریجینگ معتبر را خودکار می‌نماید، به عبارت دیگر در تحلیل‌های زمین آمار نیاز به تنظیم دستی پارامترها به منظور دستیابی به نتایج دقیق است، اما در روش کریجینگ بیزی تجربی به طور اتوماتیک این پارامترها طی یک فرآیند شبیه سازی محاسبه می‌گردند.

محدوده مطالعاتی مِهولات- فیض‌آباد با مساحت ۲۱۴۵ کیلومترمربع واقع در حوضه آبریز کویر مرکزی و در محدوده‌ای به طول جغرافیایی ۵۸° ۵۸' تا ۵۹° ۰۳' و عرض جغرافیایی ۳۴° ۴۸' تا ۳۵° ۱۱' 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- مِهولات و پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری آن در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

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.

### ۲-۲- اطلاعات مورد بررسی

داده‌ها، شوری (هدایت الکتریکی)<sup>۳</sup> 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- مِهولات

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<sup>۷</sup> و یا افزایش فاکتور همپوشانی<sup>۸</sup>، 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 (REML<sup>۹</sup>) 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<sup>۱۰</sup> 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.

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 ۰ (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<sup>۹</sup>: 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<sup>۱۱</sup> 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  $Z_k^*$  و  $\sigma_k^2$  تعیین می‌گردند (Kitanidis, 1993). سپس با استفاده از روابط زیر مقدار خطا<sup>۱۱</sup> ( $e$ ) و خطای استاندارد شده<sup>۱۲</sup> ( $se$ ) محاسبه می‌شوند:

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

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

## 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<sup>۱۳</sup>

با توجه به وجود دو نوع داده پرت کلی<sup>۱۴</sup> و محلی<sup>۱۵</sup> 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<sup>۱۶</sup> نمودار Voroni در نرم‌افزار ArcGIS این مرحله صورت پذیرفته است. در نقشه‌های تهیه شده در این قسمت همانند ایجاد شبکه تپسن 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 ناریب بوده و ثانیاً خطاهای استاندارد آن معتبر باشند.

جهت ناریب 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 ناریبی عملکرد بهتری را دارا می‌باشد. برای معتبر بودن خطاهای استاندارد بایستی میانگین واریانس‌های تخمین کریجینگ 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.

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<sup>۱۷</sup> 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<sup>۱۸</sup> نزدیک به صفر و کشیدگی<sup>۱۹</sup> 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<sup>۲۰</sup> بدون حذف روند، کریجینگ

معمولی با حذف روند توسط تابع خطی و تابع درجه دو و کریجینگ عمومی<sup>۲۱</sup> 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<sup>۲۲</sup> 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 این‌مبنای 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 می‌گردد، 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<sup>۲۳</sup>، تعداد گام‌ها برابر نصف بزرگترین فاصله نقاط تقسیم بر اندازه گام و تعداد نقاط همسایگی آن برابر پیش‌فرض 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

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  $RMSSE$  محاسبه گردیدند.

با توجه به معیارهای یک مدل خوب و معتبر (بخش ۲-۳-۲) که بایستی  $MSE$  نزدیک به صفر و  $RMSSE$  نزدیک به ۱ داشته باشد، این دو پارامتر در پارامتر دیگری به صورت  $|MSE| + |1 - RMSSE|$  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<sup>۲۴</sup>، دامنه تأثیر<sup>۲۵</sup> و اثر قطعه‌ای<sup>۲۶</sup> نیم تغییرنگار صورت پذیرفت. به این منظور، تعداد ۱۰ نقطه از داده‌های ورودی با پراکندگی 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.

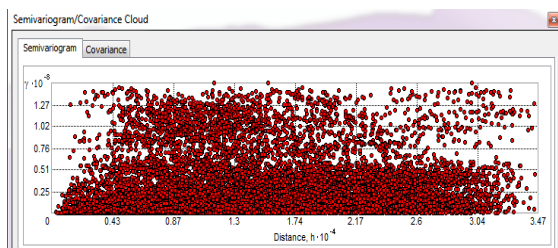
۸- جهت بهینه‌سازی پارامترهای روش EBK نیز همانند مراحل ذکر شده در مورد روش‌های کریجینگ معمولی و عمومی عمل گردید. در این روش ۶ حالت برای میانگین تعداد زیرمجموعه‌هایی که هر نقطه داخل آن‌ها قرار می‌گیرد (۰/۱، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵)، ۵ حالت برای تعداد داده‌ها در هر زیرمجموعه (۹۸، ۹۹، ۱۰۰، ۱۰۱، ۱۰۲) و ۳ حالت برای 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  $|MSE| + |1 - RMSSE|$  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.

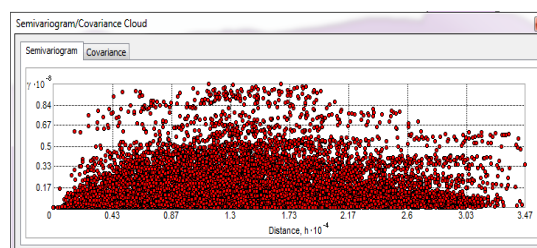
۱۰- پس از انجام مراحل ۹ گانه فوق برای میان‌یابی شوری سال آبی ۱۳۸۶ (اولین سال دارای اطلاعات)، جهت اطمینان از انتخاب روش مناسب و تعمیم آن به سایر سال‌ها، فرآیند ۹ مرحله‌ای یادشده عیناً برای سال آبی ۱۳۹۱ (آخرین سال دارای اطلاعات) نیز انجام پذیرفت. سپس روش منتخب جهت تخمین در تک تک سال‌ها به کار گرفته شده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

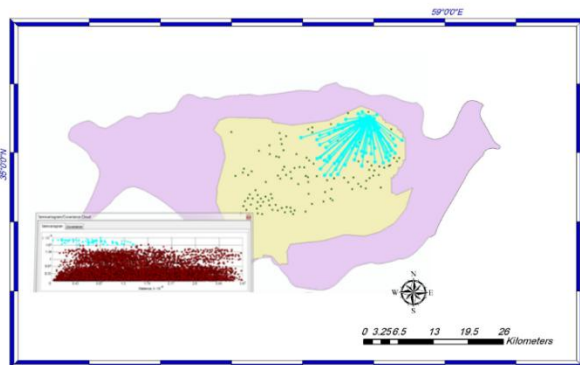


ب

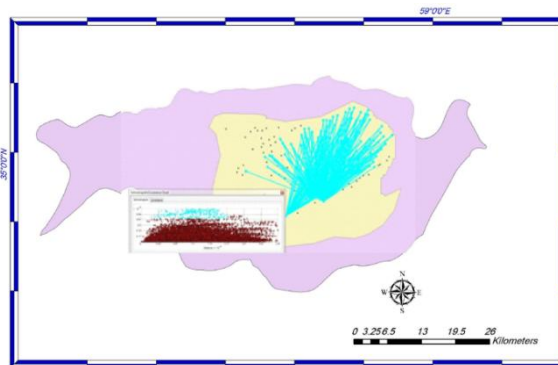


الف

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

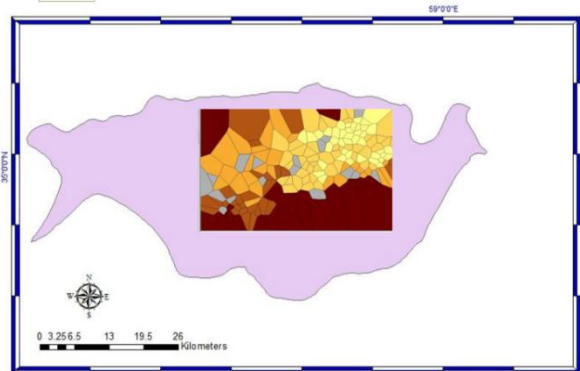


ب

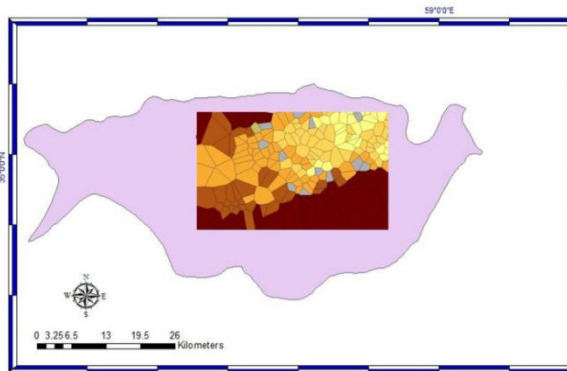


الف

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.

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.

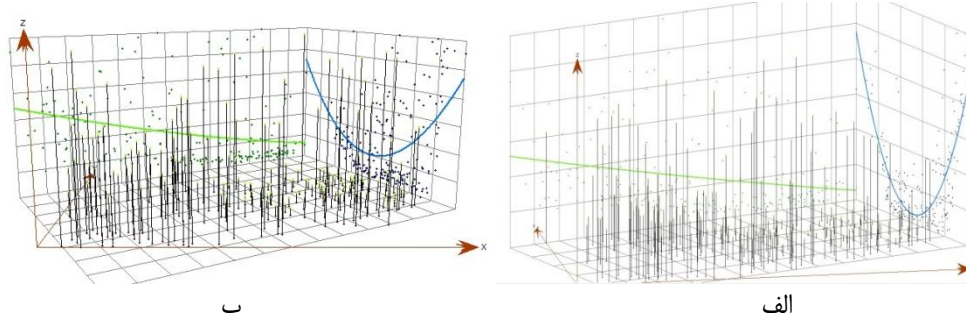
با توجه به نتایج ارائه شده در مرحله پردازش اطلاعات، با عنایت به پیوستگی مکانی داده‌ها، وجود روند سهمی‌گون در جهت شمالی- جنوبی و روند خطی در جهت شرقی- غربی و عدم مشخص بودن میانگین ثابت داده‌ها، روش‌های کریجینگ معمولی بدون حذف روند و کریجینگ معمولی و عمومی با حذف روند توسط تابع خطی و تابع درجه دو، بهترین گزینه‌ها برای میان‌یابی اطلاعات حاضر به نظر می‌رسیدند که همراه با روش EBK در ادامه تحقیق در فرآیند میان‌یابی و تولید نقشه‌های هم‌تراز شوری بررسی شدند. جدول ۱، مقادیر  $RMSE$ ،  $MSE$ ،  $RMSE$  و  $|1 - RMSE| + |MSE|$  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  $|1 - RMSE| + |MSE|$  بهترین نتایج را دارا می‌باشد ولی از طرف دیگر بالاترین  $RMSE$  را دارا می‌باشد. بررسی‌های جزئی‌تر بر اساس معیار  $|1 - RMSE| + |MSE|$ ، نشان می‌دهد که هر چند مدل نیم تغییرنگار 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

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  $|1 - RMSE| + |MSE|$  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  $|1 - RMSE| + |MSE|$  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.



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  +  1 - RMSSE $ | RMSSE  | MSE    | RMSE   | ماکزیم نقاط همسایگی | تعداد گام | اندازه گام (متر) | مدل نیم تغییرنگار | روش تخمین                                    |
|------|-----------------------|--------|--------|--------|---------------------|-----------|------------------|-------------------|----------------------------------------------|
| ۱    | ۰/۰۸۶                 | ۹۷۵۷/۰ | ۰/۰۶۱۶ | 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 خطی      |
| 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 میان‌یابی 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.

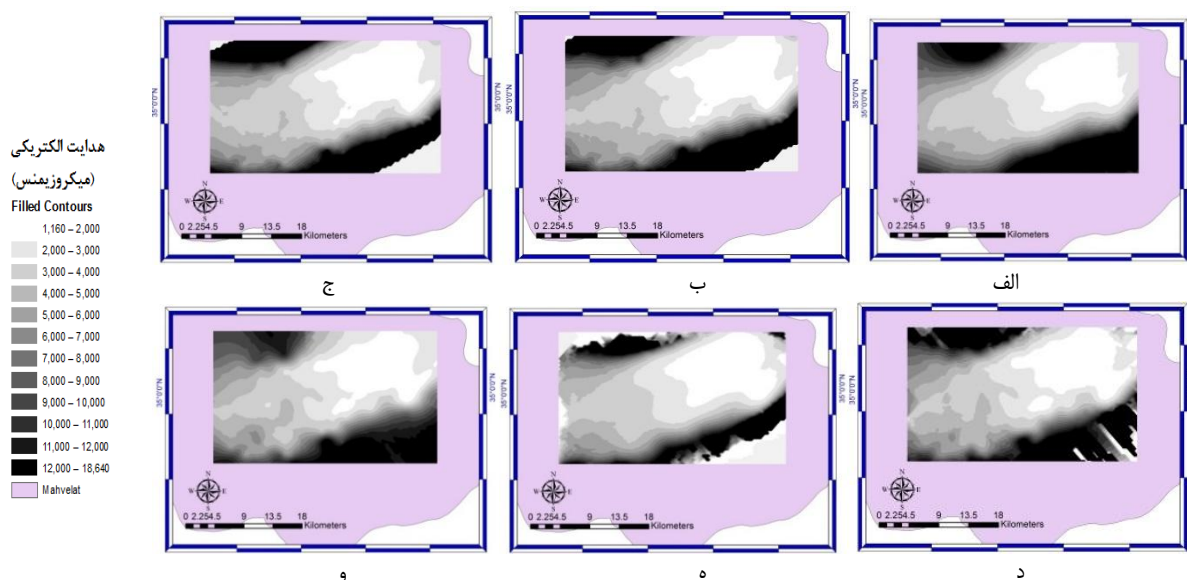
علاوه بر توجه به معیارهای آماری، با توجه به نقشه‌های تولید شده توسط بهترین حالت هر روش (شکل ۶) سطوح تولیدی توسط روش‌های کریجینگ عمومی در مرزهای شمالی و جنوبی با واقعیت‌های هیدرولوژیکی منطقه همخوانی مناسبی نشان نداده که نتایج حاصل از آنالیز حساسیت را مبنی بر عدم کارایی مناسب این مدل تأیید می‌نماید. با 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  $|MSE| + |1 - RMSSE|$ ) را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، در این سال نیز، روش EBK با توجه به نزدیکی بسیار زیاد معیار  $|MSE| + |1 - RMSSE|$  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)

| روش تخمین | تعداد داده‌ها در هر زیرمجموعه | تعداد نیم تغییرنگارهای تولید شده برای هر زیرمجموعه | میانگین تعداد زیرمجموعه‌های در برگزیده هر نقطه | RMSE    | MSE   | RMSSE | $ MSE  +  1 - RMSSE $ | رتبه |
|-----------|-------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------|-------|-------|-----------------------|------|
| EBK       | ۹۸                            | ۱۰۰                                                | ۰/۰۱                                           | ۱۱۰۶/۹۶ | ۰/۰۱۷ | ۱/۰۱۰ | ۰/۰۲۷                 | ۱۰   |
|           |                               |                                                    | ۵                                              | ۱۱۱۵/۵۲ | ۰/۰۰۷ | ۱/۰۰۰ | ۰/۰۰۷۵                | ۱۷   |
|           |                               | ۲۰۰                                                | ۰/۰۱                                           | ۱۱۰۶/۳۳ | ۰/۰۱۷ | ۱/۰۰۸ | ۰/۰۲۵                 | ۹    |
|           |                               |                                                    | ۵                                              | ۱۱۱۴/۷۶ | ۰/۰۰۷ | ۰/۹۹۹ | ۰/۰۰۷۹                | ۳    |
|           | ۱۰۰                           | ۱۰۰                                                | ۰/۰۱                                           | ۱۱۰۶/۵۹ | ۰/۰۱۷ | ۱/۰۰۴ | ۰/۰۲۲                 | ۷    |
|           |                               |                                                    | ۵                                              | ۱۱۱۶/۳۹ | ۰/۰۰۷ | ۱/۰۰۲ | ۰/۰۰۹                 | ۵    |
|           |                               | ۲۰۰                                                | ۰/۰۱                                           | ۱۱۰۶/۸  | ۰/۰۱۷ | ۱/۰۰۵ | ۰/۰۲۳                 | ۸    |
|           |                               |                                                    | ۵                                              | ۱۱۱۷/۰۳ | ۰/۰۰۷ | ۰/۹۹۹ | ۷۰/۰۰۷                | ۲    |
|           | ۱۰۲                           | ۱۰۰                                                | ۰/۰۱                                           | ۱۱۱۱/۹۴ | ۰/۰۱۷ | ۰/۹۴۰ | ۰/۰۷۷                 | ۱۱   |
|           |                               |                                                    | ۵                                              | ۱۱۱۵/۹۶ | ۰/۰۰۷ | ۱/۰۰۲ | ۰/۰۱۰                 | ۶    |
|           |                               | ۲۰۰                                                | ۰/۰۱                                           | ۱۱۱۳/۱۱ | ۰/۰۱۷ | ۰/۹۳۳ | ۰/۰۸۳                 | ۱۲   |
|           |                               |                                                    | ۵                                              | ۱۱۱۶/۳۹ | ۰/۰۰۷ | ۰/۹۹۹ | ۰/۰۰۸                 | ۴    |



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)**

| روش تخمین                                    | مدل نیم تغییرنگار | سایز گام | تعداد گام | ماکزیمم نقاط همسایگی | RMSE     | MSE    | RMSSE | $ MSE  +  1 - RMSSE $ | رتبه |
|----------------------------------------------|-------------------|----------|-----------|----------------------|----------|--------|-------|-----------------------|------|
| کریجینگ معمولی بدون حذف روند                 | Exponential       | ۱۸۶۰     | ۷         | ۵                    | ۲۱۸۵/۱۸۰ | ۰/۰۲۵  | ۱/۰۶۲ | ۰/۰۸۶                 | ۱    |
| کریجینگ معمولی با حذف روند توسط تابع خطی     | Exponential       | ۱۰۶۰     | ۱۶        | ۵                    | ۲۲۲۷/۴۳۶ | -۰/۰۴۴ | ۱/۳۹۷ | ۰/۴۴۱                 | ۱    |
| کریجینگ معمولی با حذف روند توسط تابع درجه دو | Exponential       | ۱۰۶۰     | ۱۶        | ۵                    | ۳۶۳۶/۸۳  | -۰/۰۴۶ | ۱/۴۲۰ | ۰/۴۶۶                 | ۱    |
| کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع خطی      | J-Bessel          | ۸۶۰      | ۲۰        | ۵                    | ۲۵۲۱/۸۸۱ | ۰/۰۳۲  | ۰/۹۸۴ | ۰/۰۴۸                 | ۱    |
| کریجینگ عمومی با حذف روند توسط تابع درجه دو  | J-Bessel          | ۸۶۰      | ۲۰        | ۵                    | ۲۵۳۱/۹۰۵ | -۰/۰۳۳ | ۰/۹۹۶ | ۰/۰۳۷                 | ۱    |

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

| روش تخمین | تعداد داده‌ها در هر زیرمجموعه | تعداد نیم تغییرنگارهای تولید شده برای هر زیرمجموعه | میانگین تعداد زیرمجموعه‌های دربرگیرنده هر نقطه | RMSE    | MSE     | RMSSE    | $ MSE  +  1 - RMSSE $ | رتبه |
|-----------|-------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------|---------|----------|-----------------------|------|
| EBK       | ۹۰                            | ۵۰                                                 | ۰/۰۱                                           | ۲۲۸۰/۴۳ | -۰/۰۰۳۸ | ۱/۰۱۳۰۸۶ | ۰/۰۰۷۵                | ۱    |

**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                                           |

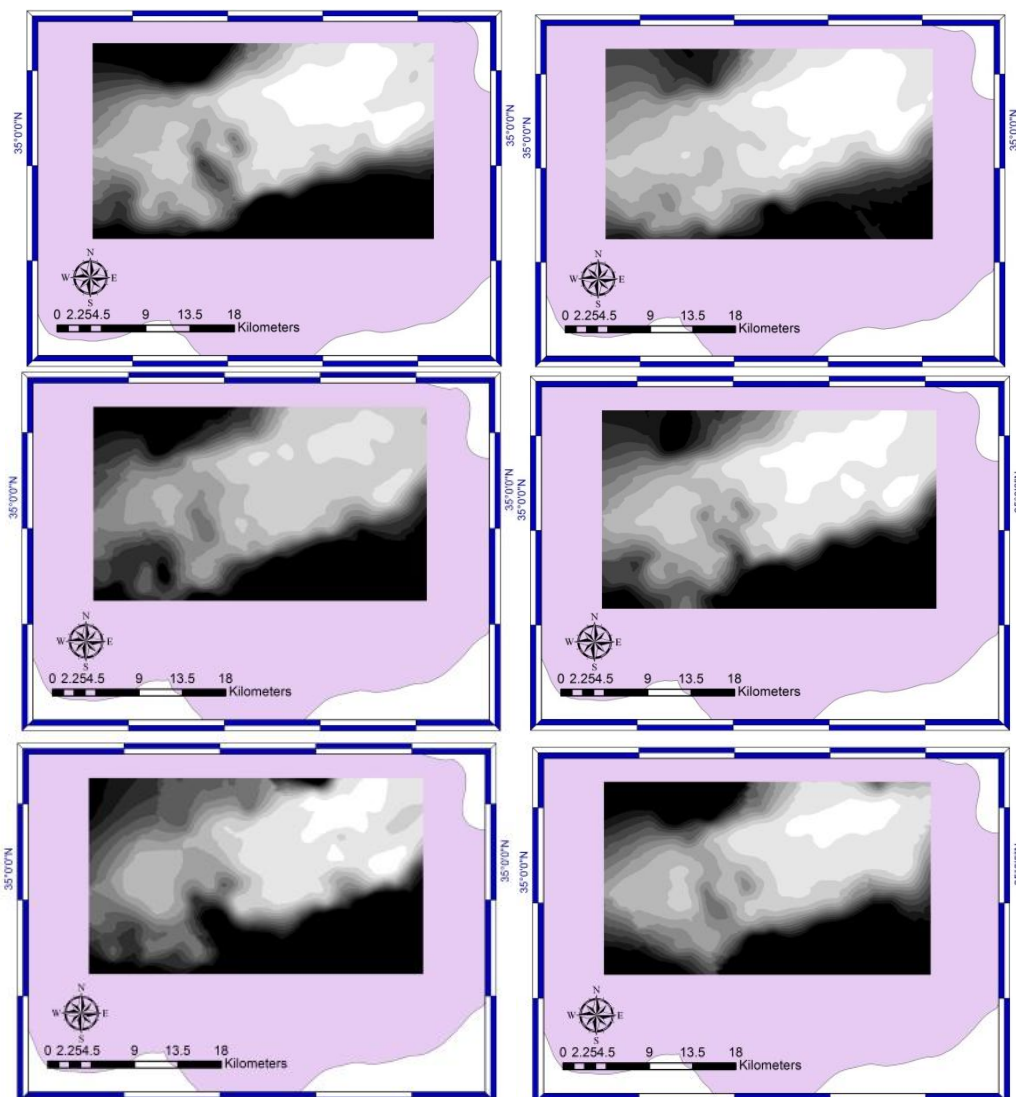
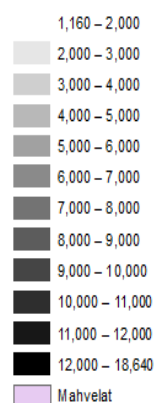
#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

مختلف بر اساس یک فرآیند نه مرحله‌ای انجام گردید. این مراحل شامل انتخاب بازه‌ای 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.

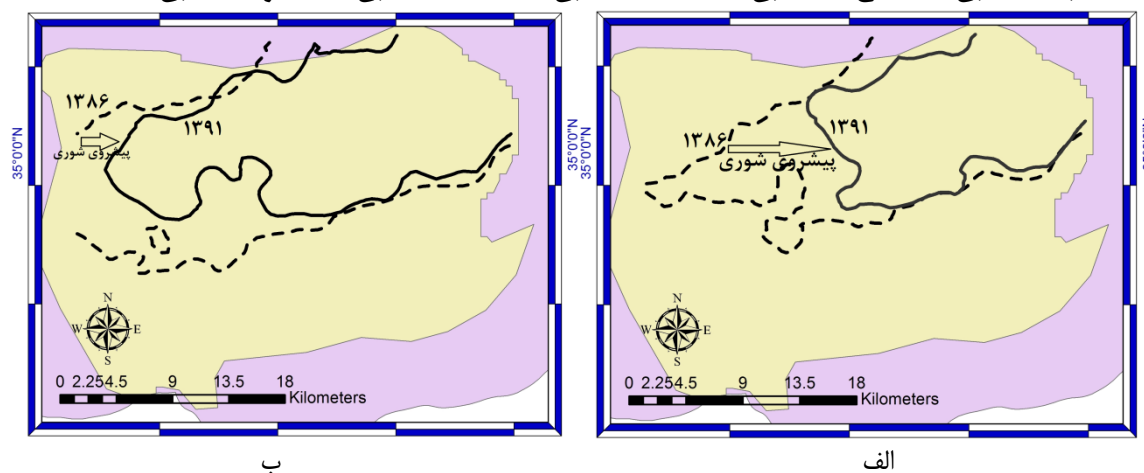
در تحقیق حاضر پس از فرآیند پردازش اطلاعات که شامل بررسی پیوستگی مکانی داده‌ها، مشخص کردن و حذف داده‌های پرت، بررسی روند و تبدیل داده‌ها به داده‌های نرمال می‌باشد، شناخت لازم از داده‌ها کسب شده و روش‌های مناسب کریجینگ به منظور میان‌یابی و تولید سطوح شوری برای اطلاعات موجود از یک سال خاص در دشت مہولات - 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)

به عنوان نمونه معیار آماری  $|MSE| + |1 - RMSSE|$  در سال‌های آبی ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ دارای مقدار ۰/۰۰۷۵ 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

## 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، دانش‌کار آراسته پ، رحیمی بندرآبادی س، فتاحی ا، محمدزاده 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، 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.

سکوتی اسکوتی 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.

- Ella V, Melvin S, Kanwar R (1999) Spatial analysis of NO<sub>3</sub>- 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. Environment 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) Geostatistics, 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.