

ارزیابی روش‌های مختلف زمین‌آماري مبتنی بر GIS در پیش‌بینی و پهنه‌بندی تهاجم شوری در آبخوان‌های استان
آذربایجان غربی
توحید علیقلی نیا، نگار رسولی مجد و حسین رضایی

دوره ۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحات ۱۷۶ - ۱۶۲

Vol. 2(2), Summer 2016, 162-176

Evaluation of Different Geostatistical
Methods Based on GIS for Predicting and
Zoning Salinity Invasion at West Azarbaijan
Aquifers

Aligholinia T., Rasouli Majd N. and Rezaie H.



www.jewe.ir

OPEN  ACCESS

نحوه ارجاع به مقاله: علیقلی نیا ت.، رسولی مجد ن. و رضایی. (۱۳۹۵). ارزیابی روش‌های مختلف زمین‌آماري مبتنی بر GIS در پیش‌بینی و پهنه‌بندی تهاجم شوری در آبخوان‌های استان آذربایجان غربی، محیط زیست و مهندسی آب، جلد ۲، شماره ۲، صفحات: ۱۷۶-۱۶۲

How to cite this paper: Aligholinia T., Rasouli Majd N. and Rezaie H. (2016). Evaluation of different geostatistical methods based on GIS for predicting and zoning salinity invasion at West Azarbaijan aquifers, J. Environ. Water Eng, 162-176.

ارزیابی روش‌های مختلف زمین‌آماری مبتنی بر GIS در پیش‌بینی و پهنه‌بندی تهاجم شوری در آبخوان‌های استان آذربایجان غربی

توحید علیقلی نیا^{۱*}، نگار رسولی مجد^۲ و حسین رضایی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم مهندسی آب (آبیاری و زهکشی)، دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه ارومیه

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

*نویسنده مسئول: tohid323@yahoo.com

تاریخ دریافت: [۱۳۹۴/۱۰/۰۶]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۱۲/۲۳]

چکیده

در سفره‌های آب‌های ساحلی، گسترش داخلی آب دریا شایع‌ترین دلیل برای افزایش شوری است. استان آذربایجان غربی نیز به دلیل قرارگیری در کنار دریاچه فوق‌اشباع از نمک و افت شدید آب‌های زیرزمینی این منطقه، در معرض تهاجم شوری قرار دارد. در این مطالعه به‌منظور ارزیابی آثار تهاجم شوری به سفره‌های آب‌های زیرزمینی استان آذربایجان غربی از روش‌های زمین‌آماري با مدل‌های مختلف استفاده شده است. به‌منظور تحلیل روش‌های درونیابی از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و معکوس فاصله (IDW) با متغیرهای وزن داده‌شده و بدون آن استفاده گردید. برای ارزیابی دقت مدل‌های تدوین‌شده تخمین‌گر زمین‌آماري، از معیارهای آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای بایاس (MBE) استفاده گردید. بر اساس نتایج نشان این تحقیق از مدل‌های مختلف مورد استفاده، مدل کروی در روش کریجینگ، مدل کروی با متغیر کمکی Ca در روش کوکریجینگ، مدل توان ۲ در روش IDW و مدل توان ۲ با متغیر وزن داده‌شده Hco_3 ، به‌عنوان بهترین مدل‌ها انتخاب گردیدند. از بین روش‌های استفاده‌شده برای درونیابی نسبت تهاجم شوری در منطقه مورد مطالعه نیز، روش کوکریجینگ کمترین میزان خطا را نشان داد. مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی تهاجم شوری نیز نشان می‌دهد که مدل معکوس فاصله نسبت به مقادیر حداقل و حداکثر حساس بوده و مقادیر آن‌ها را در ناحیه بیشتری از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. این در حالی است که مدل‌های کریجینگ و کوکریجینگ دقیق‌تر بوده و پهنه‌بندی را با دقت بیشتری انجام می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: سیستم اطلاعات جغرافیایی، زمین‌آمار، کریجینگ، نسبت تهاجم شوری، IDW

۱- مقدمه

سفره‌های آب زیرزمینی از منابع آبی مهم می‌باشند که به دلیل استفاده بی‌رویه از آن‌ها، سطح این سفره‌های زیرزمینی افت قابل‌ملاحظه‌ای داشته است. افزایش جمعیت و در نتیجه آن افزایش بهره‌برداری از این منابع ارزشمند باعث شده که نه تنها کمیت منابع آب زیرزمینی کاهش یابد بلکه کیفیت این منابع نیز رو به نامناسب بودن پیش رود. تغییر کیفیت آب زیرزمینی و شور شدن منابع آب در حال حاضر خطری بزرگ در راه توسعه کشاورزی کشور بخصوص در اراضی خشک می‌باشد. استفاده از روش‌های آماری در بررسی تغییرات شوری و املاح می‌تواند گام مهمی در بهره‌برداری صحیح از منابع آب باشد. روش‌های آماری مختلفی برای پهنه‌بندی وجود دارد که از جمله آن می‌توان به روش زمین‌آمار اشاره نمود. یکی از بهترین روش‌های تحلیل داده‌های نقطه‌ای و پیش‌بینی، درون‌یابی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی با استفاده از زمین‌آمار می‌باشد (Gundogdu و Esen, 2010). طی چند دهه اخیر مبنای علم زمین‌آمار به خوبی گسترش یافته است و توانایی‌های این شاخه از آمار در بررسی و پیش‌بینی متغیر مکانی مشخص شده است (Isaaks و Srivastava, 1989). این روش‌ها به دلیل در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها، از اهمیت زیادی برخوردار هستند. در بررسی‌های آمار کلاسیک نمونه‌هایی که از کل جامعه به منظور شناخت آن برداشت می‌شوند، فاقد بعد مکانی بوده و در نتیجه مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد مقدار همان کمیت در نمونه‌گیری به فاصله معین و معلوم در بر نخواهد داشت. درحالی‌که در زمین‌آمار افزون بر مقدار یک کمیت معین در یک نمونه، موقعیت مکانی نمونه نیز مورد توجه قرار می‌گیرد (Zamani et al, 2011). بنابراین انتظار می‌رود که روش‌های زمین‌آمار، با در نظر گرفتن همبستگی و ساختار مکانی داده‌ها و قابلیت استفاده از روابط بین متغیرها، دارای دقت بیشتری باشند. مرور تحقیقات پیشین نیز نشان می‌دهد که روش‌های زمین‌آمار برای بررسی توزیع مکانی پارامترهای محیطی و هیدرولوژیکی و نحوه تغییرات آن مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در بیشتر مواقع دارای دقت مناسبی بوده‌اند.

(Aleml et al. 1988) با مقایسه کاربرد روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ به این نتیجه رسیدند که واریانس هدایت الکتریکی با عامل درصد رس خاک در روش کوکریجینگ کمتر از روش کریجینگ است. لذا با استفاده از روش کریجینگ در تعداد نمونه‌برداری خاک و هزینه‌ها تجزیه مربوطه صرفه‌جویی می‌شود. (Phillip et al. 1992) برای برآورد بارندگی سالانه در حوضه ویلنت در غرب ایالت اورگن از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ رونددار و کوکریجینگ استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که در منطقه مورد مطالعه، روش کریجینگ رونددار و کوکریجینگ، در برابر روش کریجینگ معمولی مناسب‌تر هستند. (Prudhomme و Reed 1999) برای یافتن یک روش ساده برای رسم نقشه متوسط حداکثر بارش روزانه در طول سال در نواحی کوهستانی اسکاتلند، روش‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ تصحیح شده را انتخاب کردند و با مقایسه نتایج، روش کریجینگ را برای رسم نقشه نهایی برگزیدند. (Wang et al. 1999) از روش‌های زمین‌آمار برای بررسی تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی خاک‌های شور ساحلی استفاده کردند. در مجموع، جمع‌بندی آن‌ها نشان داد که روش مناسب زمین‌آمار در برآورد یک متغیر، به نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای تأثیرگذار بر آن بستگی دارد و نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر مناطق تعمیم داد. (Goovaerts 2000) روش‌های مختلف کریجینگ را برای تعیین تغییرات مکانی بارندگی در پرتغال بررسی کرد و نتایج کار را با روش رگرسیون خطی با در نظر گرفتن ارتفاع و روش‌های یک متغیره تیسن و عکس فاصله مقایسه کرد و به این نتیجه رسید که روش‌های کریجینگ دقت بیشتری دارند. (Droque et al 2002) برای تهیه نقشه مکانی بارش‌های کوهستانی در شمال شرقی فرانسه از روش کریجینگ و کوکریجینگ روند دار استفاده کردند. (Diodato و Ceccarelli 2005) با استفاده از روش‌های زمین‌آمار چند متغیره به تهیه نقشه‌های مکانی بارش در کوه‌های سانپو واقع در ایتالیا پرداختند. (Cheng et al. 2008) برای تخمین میانگین منطقه‌ای بارش و تخمین نقطه‌ای در مناطق بدون ایستگاه به ارزیابی شبکه باران‌سنجی با کاربرد روش‌های زمین‌آمار پرداختند. Robinson و Metternicht (2006) مطالعاتی بر روی کارایی روش‌های میان‌یابی مکانی برای نشان دادن خواص خاک انجام دادند. در این مقاله از چهار روش کریجینگ ساده، کریجینگ لگاریتمی، IDW، Spline، برای میان‌یابی (EC, PH, OM) که تأثیر زیادی بر تولید محصول در زمین

دارند استفاده شده است. (Fetouani et al. 2008) در مطالعه‌ای به بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت ترینا در شمال شرقی مراکش از نظر نیترات آمونیوم و آلودگی‌های باکتریولوژیکی پرداختند. آن‌ها از روش کریجینگ برای مطالعه و پهنه‌بندی نقشه کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تغییرات معنی‌دار کیفیت آب در مقایسه با مطالعات قبلی بود. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که توسعه اراضی کشاورزی در این مناطق باعث تخریب بیشتر کیفیت آب‌های زیرزمینی خواهد شد. Adhikary et al. (2010) به بررسی کیفیت آب زیرزمینی و آلودگی آن در دهلی هند پرداختند. آن‌ها برای این منظور از روش‌های کریجینگ معمولی و روند دار استفاده کردند. نتایج کار آن‌ها حاکی از افزایش آلودگی آب زیرزمینی از نظر املاح نیترات در شمال و غرب منطقه مورد مطالعه بود. همچنین آن‌ها با مقایسه روش‌های درون‌یابی، روش کریجینگ روند دار را بهتر و کاراتر ارزیابی نمودند. Machiwal et al. (2012) با استفاده از روش‌های زمین‌آماری به بررسی سطح آب زیرزمینی در هند پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از روش کریجینگ با سه مدل کروی، توانی و نمایی استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که، باوجود دقت بالای هر سه مدل در درون‌یابی، دقت مدل توانی بیشتر از سایر مدل‌ها می‌باشد.

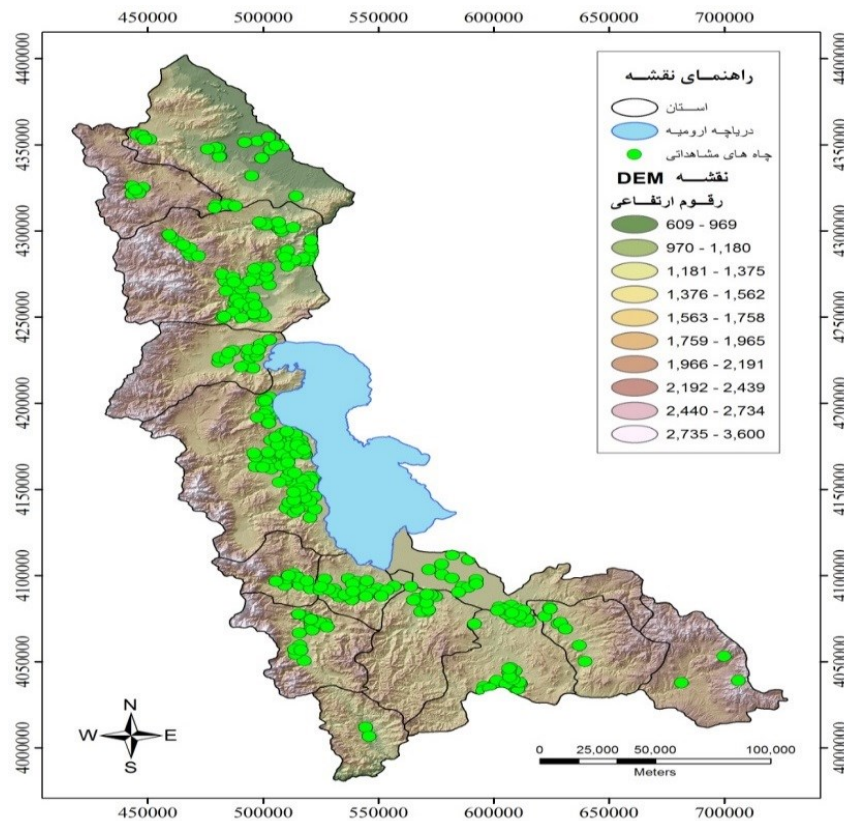
Masoudian (2003) برای تهیه نقشه هم‌دمای ایران، روش کریجینگ را مناسب دانست. Rahimi Bondarabadi و Saghafian (2005) قابلیت چند روش درون‌یابی از جمله میانگین متحرک وزنی و کریجینگ را برای برآورد توزیع مکانی بارندگی ماهانه و سالانه جنوب غربی ایران را بررسی کرد. نتایج نشان داد که روش کریجینگ تغییرات مکانی بارندگی در منطقه را بهتر نشان داده و با توپوگرافی منطقه هماهنگی بیشتری دارد. (Shabani 2009) جهت تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آماری در تهیه نقشه‌های تغییرات PH و TDS آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان از ۸۳ حلقه چاه نمونه‌برداری کرده و پس از نرمال‌سازی داده‌ها در محیط SPSS، از روش‌های زمین‌آماری کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی و روش‌های معین مانند عکس فاصله (IDW)، تابع شعاعی (RBF)، تخمین‌گر موضعی (LDI) و تخمین‌گر عام (GPI) استفاده نمود. (Zamani et al. 2011) به ارزیابی روش‌های زمین‌آماری در بررسی روش‌های محاسبه خشکسالی در استان فارس پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در پهنه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص DPI، روش کریجینگ معمولی و در مورد شاخص RAI، روش عکس فاصله (IDW) دارای نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی می‌باشد. از دیگر مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به مطالعات (Sanches 2001)، (Liu et al. 2004)، (Kelin, Hu et al. 2005)، (Richardson 2005)، (Flipo et al. 2007)، (Charle و Degr 2010) و (Aalianvari et al. 2013) اشاره کرد. این مطالعات نشان‌دهنده تناسب برخی از روش‌های زمین‌آماری برای بررسی تغییرات مکانی کیفی آب زیرزمینی می‌باشد.

هدف از این مطالعه، بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی استان آذربایجان غربی از نظر شوری و پدیده تهاجم شوری و انتخاب روش مناسب پهنه‌بندی، درون‌یابی و پیش‌بینی با روش‌های زمین‌آماری و روش معین عکس فاصله می‌باشد. انتخاب روش مناسب پهنه‌بندی از میان روش‌های موجود، می‌تواند در بحث مدیریت منابع آب و مبارزه با پدیده تهاجم شوری در مناطق مستعد خطر، کاربردی و ضروری باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، اطلاعات شیمیایی اندازه‌گیری شده‌ی ۳۱۸ چاه مشاهداتی در استان آذربایجان غربی آنالیز شد. پائین آمدن سطح آب دریاچه تأثیر بسیاری در حرکت آب‌های زیرزمینی داشته و باعث تغییرات فراوانی در کیفیت آب‌های زیرزمینی مناطق مختلف اطراف دریاچه ارومیه شده است. منطقه مورد مطالعه در محدوده‌ی دریاچه ارومیه قرار دارد. شکل (۱) منطقه‌ی مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- منطقه‌ی مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های مشاهداتی

چاه‌های مذکور برای بررسی وضعیت سطح ایستابی آب و کیفیت شیمیایی دشت‌ها بر اساس اصول علمی و آماری حفر شده‌اند. لازم به ذکر است که چاه‌ها به‌صورتی انتخاب شدند که تقریباً تمام دشت‌های استان را پوشش دهند.

۲-۲- تهاجم شوری

در سفره‌های آب‌های ساحلی، تجاوز داخلی آب دریا شایع‌ترین دلیل برای افزایش شوری است. با این حال، منابع یا فرآیندهای دیگری می‌تواند به شوری آب‌های زیرزمینی دامن زند. استان آذربایجان غربی نیز به دلیل قرارگیری در کنار دریاچه فوق‌اشباع از نمک و افت شدید آب‌های زیرزمینی این منطقه، در معرض تهاجم شوری قرار دارد. در این مطالعه به‌منظور ارزیابی آثار تهاجم شوری به سفره‌های آب‌های زیرزمینی استان آذربایجان غربی و آسیب‌پذیری منطقه از این مسأله، ابتدا اطلاعات موجود مربوط به آنالیز شیمیایی چاه‌های استان در سال ۱۳۹۰ مبنای کار قرار گرفت. برای تعیین روند تغییرات کیفیت و شوری آب چاه‌ها از هر چاه در هر سال در ماه‌های چهارم، پنجم و ششم نمونه‌گیری شده و پارامترهای Ca ، HCO_3 ، SO_4 آب این چاه‌ها اندازه‌گیری شد. یکی از خصوصیات بارز نفوذ آب شور، وجود غلظت بیشتر کلسیم در آب است. به‌منظور نشان دادن تأثیر این غلظت و بررسی نفوذ آب شور (SWI)^۱ از رابطه (۱) استفاده می‌شود (Cheng و Bear، 2010)

$$SWI = \frac{Ca}{HCO_3 + SO_4} \quad (1)$$

¹ Salt Water Intrusion

که در آن واحد تمامی پارامترها برحسب میلی‌اکی‌والان در لیتر بوده و مقادیر بیشتر نسبت SWI (بیشتر از یک)، نشان‌دهنده نفوذ آب‌شور می‌باشد.

۲-۳- روش‌های زمین‌آمار

از تکنیک زمین‌آمار به‌صورت گسترده‌ای در مطالعات هیدروژئوشیمیایی استفاده می‌شود. این تکنیک با آنالیز پیوستگی مکانی و تغییرات زمانی متغیرهای هیدروژئوشیمیایی انجام می‌شود. به این منظور، تغییرپذیری مکانی متغیرها با متغیر نماهای تجربی مشخص می‌شود و متغیرها با روش‌های معمول پهنه‌بندی می‌گردند. در این تحقیق به‌منظور تحلیل روش‌های درون‌یابی از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و معکوس فاصله (IDW) با متغیرهای وزن داده‌شده و بدون آن استفاده گردید. در روش کریجینگ و کوکریجینگ جهت تحلیل مکانی داده‌ها از سمی‌واریوگرام استفاده گردد که با استفاده از نرم‌افزار GIS محاسبه شد. برای انجام بهترین میان‌یابی مهم‌ترین گام ارائه مدلی مناسب بر سمی‌واریوگرام است. مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش جهت برازش شامل مدل کروی، مدل نمائی، مدل گوسی و مدل منطقی می‌باشد. در روش کوکریجینگ با توجه به وجود همبستگی بین نسبت (SWI) و پارامترهای Ca ، HCO_3 و SO_4 ، از پارامترهای مذکور به‌عنوان متغیر کمکی، جهت تخمین تهاجم شوری استفاده گردید. دلیل استفاده از متغیر کمکی برای تخمین تهاجم شوری، بهره‌گیری از داده‌هایی که در نقاط بیشتری اندازه‌گیری شده باشند نیست، بلکه به این وسیله خطا را پائین آورده و تخمین مکانی بهتری به وجود می‌آید. همچنین از آنجائی که شرط اساسی در استفاده از روش کریجینگ و کوکریجینگ، نرمال بودن داده‌ها است، بنابراین ابتدا داده‌های مربوط به نسبت (SWI) با استفاده از تبدیلات خودکار BoxCox نرمال گردید (SAbbaiah و Krishna، 2007).

۲-۳-۱- روش کریجینگ

این روش متکی بر میانگین متحرک وزنی است و بهترین تخمین‌گر نا اریب می‌باشد که علاوه بر مقادیر برآورد شده، میزان خطای تخمین در هر نقطه را نیز مشخص می‌نماید. علی‌رغم تمام مزایای این روش، نرمال کردن تغییرات در هنگام تخمین سبب می‌شود که واریانس نمونه‌های تخمین زده‌شده نسبت به نقاط واقعی تغییرات کمتری داشته باشد، بدین معنی که مقدار تغییرات در پیش‌بینی مدل، کمتر از واقعیت می‌باشند (Xu et al. 2006). در مجموع موفقیت این روش در درون‌یابی متغیرها کاملاً وابسته به دقت در انتخاب مدل داده‌ها با تجربی سمی‌واریوگرام دارد. اگر در انتخاب مدل دقت کافی نشود نتیجه درون‌یابی مناسب نخواهد بود. بعضاً به دلایلی از جمله همساز نبودن ساختار مکانی، ساختار عمومی، دقت کم داده‌ها و عدم تجانس مکانی داده‌ها نتایج حاصل از این روش از دقت کافی برخوردار نیستند. روش کریجینگ برپایه نظریه متغیرهای ناحیه‌ای می‌باشد و همبستگی مکانی بین داده‌ها نقش اساسی در آن بازی می‌کنند. کریجینگ یک برآوردگر خطی به شکل رابطه (۲) می‌باشد:

$$z' = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

z' مقدار متغیر مکانی برآورد شده، $z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده‌شده در نقطه x_i ، λ_i وزن آماری که به نمونه x_i نسبت داده می‌شود و بیانگر اهمیت نقطه i ام در برآورد است. در محاسبه کریجینگ ابتدا سمی‌واریوگرام تجربی $\gamma(h)$ از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

که در آن N تعداد جفت مشاهدات، $Z(x_i)$ و $Z(x_i+h)$ مقدار مشاهدات متغیرها در نقطه x_i و x_i+h است. بعد از محاسبه سمی واریوگرام تجربی، جهت انتخاب بهترین مدل درونیابی، مدل‌های تئوری سمی واریوگرام کروی، نمائی، پایدار و گوسی برازش داده خواهند شد و بهترین مدل انتخاب می‌گردد.

۲-۳-۲- روش معکوس فاصله

معکوس فاصله یک روش وزن‌دهی متوسط بوده که در آن داده‌ها از طریق رابطه انحراف معیار یک نقطه از سایر نقاط به دست می‌آیند. زمانی که یک نقطه بر گره شبکه منطبق شود، فاصله این نقطه تا گره برابر صفر بوده، بنابراین در این حالت وزن تخصیص داده‌شده به نقطه یادشده برابر یک و وزن سایر نقاط اطراف گره برابر با صفر می‌باشد. روابط مورد استفاده در این روش به صورت رابطه‌های (۴) و (۵) است:

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{z_j}{h_{ij}}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{h_{ij}^B}} \quad (4)$$

$$h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

که در آن‌ها، h_{ij} اختلاف فاصله مؤثر بین گره شبکه (j) و نقطه همسایگی گره (i)، Z مقدار تخمین زده‌شده پارامتر، Z_j مقدار واقعی پارامتر Z در همسایگی گره، d_{ij} فاصله بین گره شبکه (j) و نقطه همسایگی گره (i)، B توان وزن داده‌شده، σ ضریب هموار کننده می‌باشد.

۲-۳-۳- روش کوکریجینگ

همان‌طور که در آمار کلاسیک نیز روش‌های چند متغیره وجود دارد، در زمین‌آمار نیز می‌توان با روش کوکریجینگ که بر اساس همبستگی بین متغیر اصلی و یک متغیر کمکی استوار است به تخمین متغیر اصلی پرداخت. معادله کوکریجینگ به صورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$z'(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i) \sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot U(x_k) \quad (6)$$

که در آن، λ_i وزن مربوط به متغیر Z در موقعیت x_i ، λ_k وزن مربوط به متغیر کمکی U در موقعیت x_k ، $U(x_k)$ مقدار مشاهده‌ای متغیر کمکی در موقعیت x_k می‌باشد. محاسبه نیم تغییر نمای متقابل ۱ برای محاسبه اوزان به صورت رابطه (۷) می‌باشد:

$$\gamma_{zy}(h) = \frac{1}{2} n [z(x_i + h) - z(x_i)] * [Y(x_k + h) - Y(x_k)] \quad (7)$$

که در آن $\gamma_{zy}(h)$ نیم تغییر نمای متقابل بین متغیر Z و Y ، $Z(x_k)$ متغیر مشاهده‌شده و $Y(x_k)$ متغیر کمکی می‌باشد. در این پژوهش از پارامترهای Ca ، HCO_3 و SO_4 به عنوان متغیر کمکی استفاده شده است. بررسی نیم تغییر نمای داده‌های در کل دوره آماری بیانگر مناسب بودن آن‌ها برای انجام روش‌های زمین‌آمار است.

۲-۴- معیارهای ارزیابی مدل

برای ارزیابی دقت مدل‌های تدوین‌شده تخمین‌گر زمین‌آمار، از معیارهای آماری ضریب تبیین (R^2)، جذر مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای بایاس استفاده شد. روابط شاخص‌های کمی سه‌گانه مذکور در روابط (۸) الی (۱۰) نشان داده‌شده است. بر اساس این شاخص‌های کمی، مدل برتر دارای مقدار حداکثر $|R|$ و حداقل RMSE و MBE خواهد بود.

$$R = \frac{Cov(O_i, E_i)}{\sqrt{Var(O_i)Var(E_i)}} \quad (۸)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (۹)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i) \quad (۱۰)$$

که در آن‌ها، O_i مقادیر مشاهداتی، E_i مقادیر برآوردی، $Cov(O_i, E_i)$ ، $Var(O_i, E_i)$ به ترتیب کوواریانس و واریانس بین داده‌های مشاهداتی و برآوردی می‌باشند. ضریب تبیین (R^2) نشان‌دهنده میزان همبستگی بین مقادیر برآورد شده به وسیله مدل و مقادیر واقعی می‌باشد. ضریب همبستگی، درواقع رابطه خطی مقادیر مشاهداتی و برآوردی مدل را بیان می‌کند ولی میزان انحراف مقادیر برآوردی از مقادیر مشاهداتی را نشان نمی‌دهد. یعنی ممکن است تمامی مقادیر برآوردی کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از مقادیر مشاهداتی محاسبه شده باشند. هرچند ضریب همبستگی به عنوان یکی از شاخص‌های بسیار مهم در ارزیابی عملکرد مدل‌ها محسوب می‌شوند ولی این شاخص به تنهایی به عنوان معیاری جهت مقایسه عملکرد مدل‌ها کافی نبوده و لازم است علاوه بر آن، شاخص‌های دیگری برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شود ((Legates و McCabe, 1999), (Farboudfam et al., 2009), (Sanikhani و Kisi, 2012)).

۳- نتایج و بحث

نسبت ته‌اجم شوری (SWI) از فرمول (۱) و با استفاده از پارامترهای Ca ، HCO_3 و SO_4 محاسبه گردید. داده‌های هرکدام از این پارامترها مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفته و شاخص‌های آماری آن نظیر مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و واریانس بدست آمد. جدول (۱) مقادیر تجزیه و تحلیل آماری مقادیر مربوط به هر یک از پارامترهای Ca ، HCO_3 و SO_4 و نسبت ته‌اجم شوری (SWI) را نشان می‌دهد.

جدول ۱- نتایج تجزیه آماری مقادیر نسبت ته‌اجم شوری و پارامترهای Ca ، HCO_3 و SO_4 آب زیرزمینی منطقه					
پارامتر	حداقل	حداکثر	متوسط	انحراف معیار	واریانس
Ca	۰/۴	۱۱۳	۳/۶۴	۶/۵۷	۴۳/۲۸
SO_4	۰/۲	۳۷	۳/۸۹	۵/۳۲	۲۸/۳۹
HCO_3	۱/۵	۳۱	۵/۶	۳/۸۱	۱۴/۵۶
SWI	۰/۰۲	۴/۴۵	۰/۴۳	۰/۴۱	۰/۱۷

با توجه به جدول (۱)، حداقل، حداکثر و میانگین مقدار نسبت (SWI) به ترتیب برابر ۰/۰۲، ۴/۴۵ و ۰/۴۳ بدست آمد که این نشان‌دهنده وضعیت مطلوب آب‌های زیرزمینی استان آذربایجان غربی (به جز در تعدادی نقاط که مقدار آن بیشتر از یک است) از نظر ته‌اجم شوری می‌باشد. به منظور تحلیل روش‌های درون‌یابی از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و معکوس فاصله (IDW) با متغیرهای وزن داده شده و بدون آن استفاده گردید. همچنین برای تعیین مدل بهینه جهت تخمین نسبت ته‌اجم شوری، با اعمال هرکدام از مدل‌های کروی، مدل نمایی، مدل گوسی و مدل منطقی، از شاخص‌های آماری RMSE و MBE استفاده گردید، که نتایج آن در جداول شماره (۲) و (۳) قابل مشاهده است.

جدول ۲- انحراف و خطای روش کریجینگ با واریوگرام های مختلف

روش	مدل واریوگرام	RMSE	MBE
Kriging	گوسی	۰/۱۸۳	۰/۰۰۹۹
	منطقه	۰/۱۸۱	۰/۰۰۹۸
	نمایی	۰/۱۸	۰/۰۰۹۷
	کروی	۰/۱۸	۰/۰۰۹۷

جدول ۳- انحراف و خطای روش کوکریجینگ با واریوگرام ها و داده های کمکی مختلف

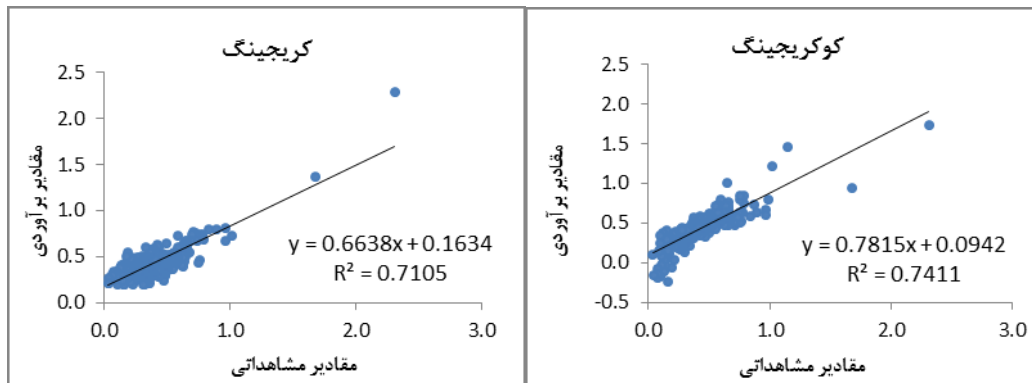
روش	مدل واریوگرام	متغیر کمکی	تعداد داده کمکی	RMSE	MBE
Cokriging	گوسی	Ca	۱	۰/۱۷۲	۰/۰۰۹۴
		HCO ₃ , SO ₄	۲	۰/۱۹۲	۰/۰۱۰۴
		Ca, HCO ₃ , SO ₄	۳	۰/۱۹۴	۰/۰۱۰۵
	منطقه	Ca	۱	۰/۱۴۸	۰/۰۰۸۱
		HCO ₃ , SO ₄	۲	۰/۱۸۹	۰/۰۱۰۳
		Ca, HCO ₃ , SO ₄	۳	۰/۱۲۶	۰/۰۰۶۸
	نمایی	Ca	۱	۰/۱۵۱	۰/۰۰۸۲
		HCO ₃ , SO ₄	۲	۰/۱۸۴	۰/۰۱
		Ca, HCO ₃ , SO ₄	۳	۰/۱۴۳	۰/۰۰۷۷
	کروی	Ca	۱	۰/۱۴۴	۰/۰۰۷۸
		HCO ₃ , SO ₄	۲	۰/۱۹۵	۰/۰۱۰۶
		Ca, HCO ₃ , SO ₄	۳	۰/۱۸۲	۰/۰۰۹۸

با توجه به جدول (۲)، بهترین مدلی که قادر به توجیه مکانی نسبت تهاجم شوری می باشد، مدل های نمائی و کروی می باشند. در جدول (۳) نیز، مدل کروی با متغیر کمکی Ca، کمترین خطا (RMSE) و انحراف (MBE) را دارد و به عنوان بهترین مدل شناخته می شود. پس از روش های کریجینگ و کوکریجینگ، روش معکوس فاصله (IDW) در دو حالت با متغیرهای وزن داده شده و بدون آن و با توان های ۲، ۳، ۴ و ۵ مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۴) دقت تخمین روش IDW را با توان های مختلف در توجیه مکانی نسبت تهاجم شوری را نشان می دهد.

جدول ۴- انحراف و خطای روش معکوس

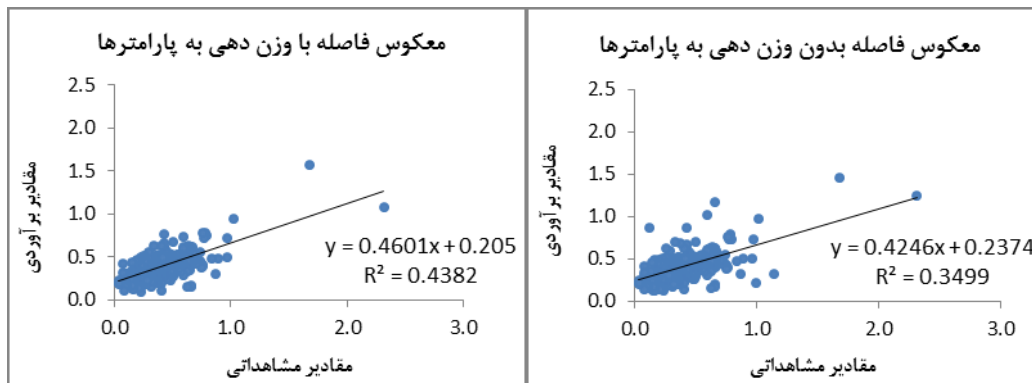
روش	متغیر وزن داده‌شده	توان	RMSE	MBE
بدون پارامتر وزن داده‌شده				
IDW	.	۲	0/182	0/0098
	.	۳	0/193	0/0105
	.	۴	0/191	0/0104
	.	۵	0/201	0/0109
با پارامتر وزن داده‌شده				
Ca	.	۲	۰/۲۲	۰/۰۱۱۹
	.	۳	۰/۲۲۳	۰/۰۱۲۱
	.	۴	۰/۲۲۳	۰/۰۱۲۱
	.	۵	۰/۲۲۲	۰/۰۱۲
HCO ₃	.	۲	۰/۱۸۴	۰/۰۱
	.	۳	۰/۱۸۸	۰/۰۱۰۲
	.	۴	۰/۱۹۴	۰/۰۱۰۵
	.	۵	۰/۱۹۹	۰/۰۱۰۸
SO ₄	.	۲	۰/۱۹۸	۰/۰۱۰۷
	.	۳	۰/۲	۰/۰۱۰۸
	.	۴	۰/۲۰۲	۰/۰۱۰۹
	.	۵	۰/۲۰۳	۰/۰۱۱

نتایج ارزیابی با روش IDW با متغیرهای وزن داده‌شده و بدون آن، نشان می‌دهد که مدل با توان ۲، کمترین خطا و انحراف را ایجاد می‌کند. با کاربرد HCO₃ به‌عنوان متغیر وزن داده‌شده، مقدار RMSE و MBE کاهش می‌یابد این در حالی است که استفاده از متغیرهای Ca و SO₄ باعث افزایش خطا و مقدار انحراف می‌گردد. برای هر روش با توجه به شاخص‌های آماری RMSE و MBE بهترین مدل تعیین گردید. بدین ترتیب برای روش کریجینگ، مدل کروی؛ روش کوکریجینگ، مدل کروی با متغیر کمکی Ca؛ روش IDW، مدل توان ۲ و برای روش IDW با متغیر وزن داده‌شده، مدل با توان ۲ و متغیر HCO₃، به‌عنوان بهترین مدل‌ها انتخاب گردیدند. به‌منظور بررسی میزان همبستگی بین مقادیر برآورد شده به‌وسیله مدل و مقادیر واقعی از ضریب تبیین (R^2) استفاده گردید. نتایج ارزیابی مدل‌های انتخابی روش‌های زمین‌آماري از نظر همبستگی، در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل‌های مذکور، ملاحظه می‌شود که خط برازش مقادیر برآوردی با استفاده از روش کوکریجینگ ($R^2=0/74$) مطابقت بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.



ب- روش کوکریجینگ

الف- روش کریجینگ

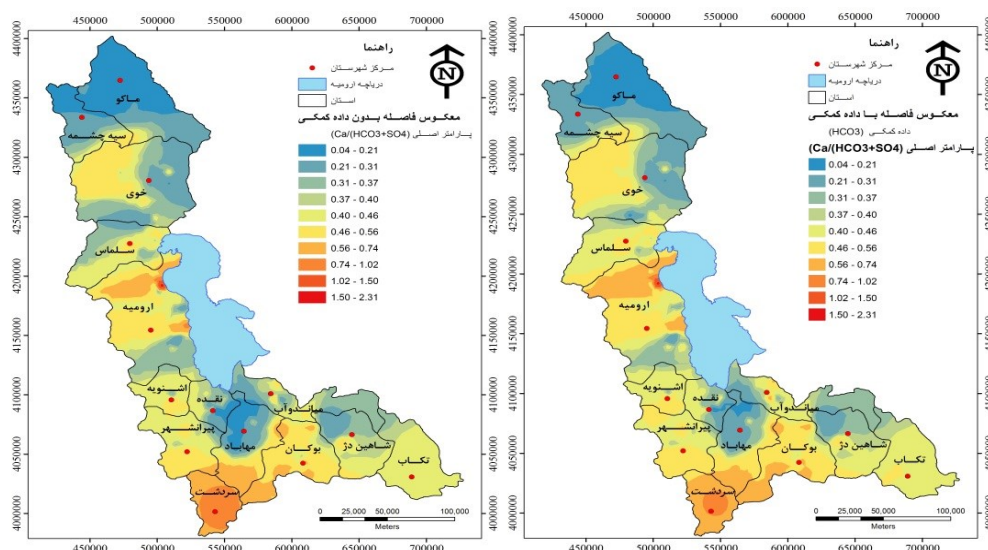


د- روش IDW بدون وزن دهی

ج- روش IDW با وزن دهی

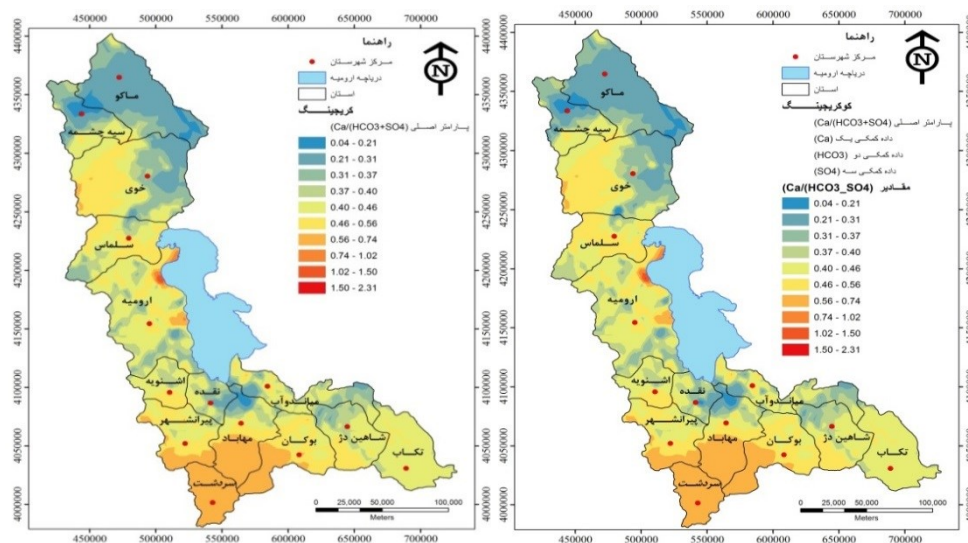
شکل ۲- ارزیابی برآورد نسبت تهاجم شوری به روش الف- کریجینگ، ب- کوکریجینگ، ج- IDW با وزن دهی و د- IDW بدون وزن دهی

در مطالعه حاضر برای تهیه نقشه تهاجم شوری از روش‌های زمین‌آماري با مدل‌های منتخب استفاده شد که نتایج آن‌ها در شکل (۳) ارائه گردیده است. حداقل و حداکثر نسبت تهاجم شوری (SWI) در محدوده مورد مطالعه به ترتیب ۰/۰۲ و ۴/۴۵ می‌باشد. همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد بیشترین مقدار این نسبت در قسمت غربی حاشیه دریاچه ارومیه (منطقه کهریز) و کمترین مقدار آن در شمال استان آذربایجان غربی (منطقه ماکو) اتفاق افتاده است. افت شدید سفره‌های آب زیرزمینی حاشیه دریاچه ارومیه و قرارگیری عمیق‌ترین بخش دریاچه ارومیه در حاشیه شمالی دریاچه (منطقه کهریز)، می‌تواند علت نفوذ آب شور دریاچه به سمت سفره‌های آب زیرزمینی این مناطق باشد. مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی تهاجم شوری با استفاده از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و معکوس فاصله (IDW) نشان می‌دهد که هر دو حالت مدل معکوس فاصله (با متغیر وزن داده‌شده و بدون متغیر وزن داده‌شده)، نسبت به مقادیر حداقل و حداکثر حساس بوده و مقادیر آن‌ها را در ناحیه بیشتری از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد و این به دلیل میزان وزنی است که در این روش به هر یک از مقادیر حداقل و حداکثر داده می‌شود. این در حالی است که مدل‌های کریجینگ و کوکریجینگ دقیق‌تر بوده و پهنه‌بندی را با دقت بیشتری انجام می‌دهند. (Reed و Prudhomme (1999)، Goovaerts (2000)، Robinson (2006) و Metternicht (2010)، Adhikary et al. (2010) و Rahimi Bondarabadi (2005) نیز کریجینگ و کوکریجینگ را روش مناسب‌تری از روش معکوس فاصله (IDW) معرفی نموده‌اند.



الف-روش (IDW) بدون متغیر وزن داده‌شده

ب-روش (IDW) با متغیر وزن داده‌شده



ج-روش کریجینگ

د-روش کوکریجینگ

شکل ۳ - توزیع مکانی نسبت تهاجم شوری با روش الف- IDW بدون وزن دهی ب- IDW با وزن دهی ج- کریجینگ و د- کوکریجینگ

۴- نتیجه گیری

روش‌های زمین‌آماري از مهم‌ترین روش‌های درون‌یابی است که امروزه به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها استفاده می‌گردد. در مطالعه حاضر برای تهیه نقشه‌های تهاجم شوری از روش‌های زمین‌آماري با مدل‌های مختلف استفاده شد که نتایج کلی به شرح ذیل می‌باشند:

۱- از بین مدل‌های مختلف مورد استفاده، مدل کروی در روش کریجینگ، مدل کروی با متغیر کمکی Ca در روش کوکریجینگ، مدل توان ۲ در روش IDW و مدل با توان ۲ با متغیر وزن داده‌شده HCO_3 ، به‌عنوان بهترین مدل‌ها انتخاب گردیدند.

۲- از بین روش‌های استفاده شده برای درون‌یابی نسبت تهاجم شوری در منطقه مورد مطالعه نیز، روش کوکریجینگ کمترین میزان خطا را نشان داد. مهم‌ترین علت بهبود نتایج در روش کوکریجینگ، استفاده از متغیر کمکی در ایستگاه مطالعاتی است.

۳- مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی تهاجم شوری با استفاده از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و معکوس فاصله (IDW) نشان می‌دهد که هر دو حالت مدل معکوس فاصله (با متغیر وزن داده‌شده و بدون متغیر وزن داده‌شده)، نسبت به مقادیر حداقل و حداکثر حساس بوده و مقادیر آن‌ها را در ناحیه بیشتری از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. این در حالی است که مدل‌های کریجینگ و کوکریجینگ دقیق‌تر بوده و پهنه‌بندی را با دقت بیشتری انجام می‌دهند.

بررسی مطالعات انجام‌شده و نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که به‌طور کلی روش‌های درون‌یابی زمین‌آمار، بسته به نوع متغیر و همچنین ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه، تراکم نقاط اندازه‌گیری و نحوه آرایش آن‌ها، دقت متفاوتی را ارائه می‌کنند. لذا لازم است که برای هر منطقه و هر متغیر، بررسی‌های جداگانه انجام گرفته تا یک روش مناسب برای منطقه مورد نظر و پارامتر مورد بررسی حاصل گردد.

References

- Aalianvari, A., Maleki Tehrani, M. and Soltanimohammadi, S. (2013). Application of geostatistical methods to estimation of water flow from upper reservoir of Azad pumped storage power plant. Arab. J. Geosci. 6, 2571–2579.
- Adhikary, P. P., Chandrasekharan, H., Chakraborty, D. and Kamble, K. (2010). Assessment of groundwater pollution in West Delhi, India using geostatistical approach. Environ. Monit. Assess. 167, 599–615.
- Alemi, M. H., Shahriari, M. R., and Nielsen, D. R. (1988). Kriging and cokriging of soil properties. Soil Technol., 1: 117- 132.
- Bear, J. and Cheng, A.H.D. (2010). Modeling groundwater flow and contaminant transport. Vol. 23. Springer Science & Business Media, 2010.
- Bruland, G.L. and Richardson, C.J. (2005). Spatial variability of soil properties in created, restored, and paired natural wetlands. Soil Sci. Soc. Ame. J. 69, 273–284.
- Cheng, K., Lin, S., and Liou, J.J. (2008). Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics. Hydrol. Proc. 22: 2554-2564.
- Diodato, N. and Ceccarelli, M. (2005). Interpolation processes using multivariate geostatistics for mapping of climatological precipitation mean in the Sannio Mountains (southern Italy), Earth Surface Proc. Landforms. 30: 259-268.
- Droque, G., Humbert, J., Deraisme, J., Mahr, N., and Freslon, N. (2002). A statistical topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall. Inter. J. Climat. 22(5): 599-613.

- Farboudfam N., Ghorbani M. A. and Alami M. T. (2009). River flow prediction using genetic programming (case study: Lighvan River Watershed), *Water Soil Sci.*, 19(1), 107-123 [In Persian].
- Fetouani, S., Sbaa M., Vanclooster, M. and Bendra, B. (2008). Assessing groundwater quality in the irrigated plain of Triffa (North-east Morocco). *J. Agri. Water Manag.*, 95: 133-142.
- Flipo, N., Jeanne', N., Poulin, M., Even, S., and Ledoux, E. (2007). Assessment of nitrate pollution in the Grand Morin aquifers (France). Combined use of geostatistics and physically based modeling. *Environ. Poll.*, 146, 241-256.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approach for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J. Hydrol. Amsterdam*, 228(1 and 2), 113-129.
- Gundogdu, I. B. and Esen, O. (2010). The importance of secondary variables for mapping of meteorological data. International Conference on Cartography and GIS. 15-20 June, 2010. Nessebar, Bulgaria.
- Isaaks, E. H., and Srivastava, R. M. (1989). An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York. 541 pp.
- Kelin, H., Yuangfang, H., Hong, L., Baoguo, L., Deli, C., White, R. E. (2005). Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain. *Environ. Int.*, 31. 896 – 903.
- Krishna M. B. R. and Sabbaiah, G. (2007). Geostatistical analysis for estimation of mean rainfalls in Andhra Pradesh, India. *Int. J. Geol.*, 3(1), 35-51.
- Legates, D. R., and McCabe, G. J., (1999). Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydro climatic model validation. *Water Resour. Res.*, 3 (1): 233-241.
- Liu, C. W., Jang, C. S. and Liao, C. M. (2004). Evaluation of arsenic contamination potential using indicator kriging in the Yun-Lin aquifer (Taiwan). *Sci. Total Environ.*, 321, 173-88.
- Machiwal. D., Mishra, A., Jha, M. K., Sharma, A. and Sisodia, S. S. (2012). Modeling short-term spatial and temporal variability of groundwater level using geostatistics and GIS. *Nat. Resour. Res.*, 21, 117-137.
- Masoudian S. (2003). Analysis of Iran's monthly temperature, *J. Human Sci.*, Isfahan, 15(1), 87-96 [In Persian].
- Phillip, D. L., Dolph, J. and Marks, D. (1992). A comparison of geostatistical procedure for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agr. Forest. Meteorol.*, (58), 119-141.
- Prudhomme, C. and Reed, D. W. (1999). Mapping extreme rainfall in mountainous region using geostatistical techniques. *Int. J. Climatol.*, 19(2), 1337-1356.

- Robinson, T. P. and Metternicht, G. (2006). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Comput. Elect. Agri.*, 50(2), 97-108.
- Saghafian B. and Rahimi Bondarabadi S. (2005). Comparison of interpolation and extrapolation methods for estimating spatial distribution of annual rainfall, Iran. *Water Resour. Res.*, 1(2), 74-84.
- Sanches, F. (2001). Mapping groundwater quality variables using PCA and geostatistics: a case study of Bajo Andarax, southeastern Spain. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*. 46(2):227-242.
- Sanikhani, H. and Kisi, O. (2012). River flow estimation and forecasting by using two different adaptive Neuro-Fuzzy approaches. *Water Res. Manag.*, 26, 1715–1729.
- Shabani M. (2009). Determine the most appropriate method of geostatistics in mapping groundwater pH and TDS (case study: Plain Arsanjan). *J. Water Manag. Eng.*, 2(3), 47-57 [In Persian].
- Wang, J. H., Wu, Y. W. and Fu. Q. L. (1999). Study on spatial variability in conductivity of the coastal saline soils. *J. Zhejiang Agri. Uni.*, 25(2), 139-142.
- Xu, C., Gong, L., Jiang, T., Chen, D. and Singh, V.P. (2006). Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *J. Hydrol.*, 327, 81– 93.
- Zamani R., Akhonali A.M., Solaimani K., Ansari F. and Allahbakhshian P. (2011). Application of geostatistics in zone classification of drought severities (case study: Fars Province), *J. Watershed Manag. Res.*, 3(6), 15-29 [In Persian].

Evaluation of Different Geostatistical Methods Based on GIS for Predicting and Zoning Salinity Invasion at West Azarbaijan Aquifers

Tohid Aligholinia^{1*}, Negar Rasouli Majd² and Hossein Rezaie³

¹MSc. Student of Water Engineering (Irrigation and Drainage), Faculty of Water Engineering. Urmia University, Urmia, Iran

² PhD Student of Water Management Engineering, Faculty of water Engineering. Urmia University, Urmia, Iran

³ Associate Prof., Faculty of water Engineering. Urmia University, Urmia, Iran

*Corresponding Author: tohid323@yahoo.com

Received: December 27, 2015

Accepted: March 13, 2016

Abstract

In coastal aquifers, infiltration and internal extending seawater is the most common reason for the increased salinity. Locating adjacent to the hypersaline lake and a sharp drop in groundwater in the region has exposed West Azerbaijan Province to salinity invasion. In this study, geostatistical methods with various models were used to evaluate the effects of the salinity invasion toward the groundwater aquifers in West Azerbaijan. In order to analyze the interpolation methods, the kriging, cokriging, and inverse distance weight (IDW) with weighted variables and without weighted variables were used. To assess the accuracy of the developed models of geostatistical estimator, the coefficient of determination (R^2), root square error (RMSE), and mean bias error (MBE) were used. Based on the results of this study, it was found that spherical kriging model, the spherical cokrigings model with Ca auxiliary, Model 2 in IDW method and Model 2 with HCO_3 as variable weighted in IDW method were selected as the best models. Among the methods used for interpolation of salinity invasion in the study area, cokriging method showed the lowest error. Comparison of the zoning maps of salinity invasion showed that IDW model was sensitive to minimum and maximum values and showed those values in wider area in the study area. However, kriging and cokriging models are more accurate and perform the zoning with more accuracy.

Keywords: GIS, Land Statistics, Kriging, Salinity Invasion Compared, IDW