



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی

سال هجدهم، شماره‌ی ۶۱
بهار ۱۳۹۷، صفحات ۱۴۰-۱۲۵

رسول جانی^۱

اولویت‌سنجی روش‌های درون‌یابی فضایی در پهنه‌بندی مقاومت خاک (مطالعه موردی: شهرک پرواز)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۴/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۲/۴

چکیده

مطالعات ژئوتکنیکی برای شناسایی خصوصیات فیزیکی خاک در طراحی سازه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. حفر گمانه، نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی علاوه بر صرف هزینه و زمان گاهی منجر به تلفات و خسارات جبران‌ناپذیری مثل انفجار لوله‌های گاز، واژگونی ساختمان‌های مجاور و غیره می‌شود. در ساختمان‌های متعارف می‌توان با استفاده از روش‌های درون‌یابی فضایی بدون انجام آزمایش‌های لازم این مشکل را حل نمود. در مطالعه حاضر از روش‌های درون‌یابی کریجینگ، روش عکس فاصله وزنی، توابع پایه شعاعی، چند جمله‌ای جهانی و چند جمله‌ای محلی برای پهنه‌بندی مقاومت مجاز خاک شهرک پرواز استفاده شده است. داده‌های مورد استفاده مربوط به مقاومت مجاز خاک ۵۱ حلقه چاه در شهرک پرواز شهر تبریز می‌باشد. نتایج اعتبارسنجی حاکی از آن است که از بین روش‌های درون‌یابی؛ روش کریجینگ معمولی با مدل کروی با بیش‌ترین ضریب همبستگی و کم‌ترین مجاز خاک می‌باشد.

کلید واژه‌ها: مقاومت مجاز خاک، کریجینگ، فاصله وزنی معکوس، توابع پایه شعاعی، چند جمله‌ای.

مقدمه

در بررسی‌های آمار کلاسیک، اجزایی یا نمونه‌های که از کل جامعه به منظور شناخت آن برداشت می‌شود، فاقد اطلاعات موقعیتی در فضا بوده و در نتیجه مقدار اندازه‌گیری شده یک کمیت معین در یک نمونه خاص هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد مقدار همان کمیت در نمونه دیگری با فاصله معین معلوم در بر نخواهد داشت. به عبارت دیگر، نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری نمونه‌ها مستقل از موقعیت فضایی آن‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرد؛ بنابراین مقدار یک کمیت در یک نمونه هیچ‌گونه اطلاعاتی درباره مقدار آن کمیت در نمونه‌های دیگر به فواصل مختلف به دست نمی‌دهد. در حالی که در زمین آمار علاوه بر مقدار یک کمیت معین در یک نمونه، موقعیت فضایی نمونه نیز مورد توجه قرار می‌گیرد؛ به عبارت دیگر باید بتوان بین مقادیر مختلف یک کمیت در جامعه نمونه‌ها و فاصله و جهت قرارگیری نمونه‌ها نسبت به هم ارتباطی برقرار کرد. این ارتباط فضایی (فاصله و جهتی) بین مقدار یک کمیت در جامعه و نمونه‌های برداشت شده ممکن است در قالب‌های ریاضی قابل بیان باشد به این قالب ریاضی ساختار فضایی گفته می‌شود. در خصوص ساختار فضایی و روش‌های مختلف درون‌یابی تحقیقات زیادی صورت گرفته است که در زیر به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

(Nourani et al (2005) با استفاده از زمین‌آمار مدلی برای برآورد مکانی بار رسوبی تلخه‌رود ارائه نمودند و نتایج نشان داد که مدل واریوگرام گوسی، بهترین مدل برای برآورد مکانی می‌باشد. همچنین در برآورد بار معلق، روش کوکریجینگ در مقایسه با روش کریجینگ نتایج بهتری ارائه می‌دهد. (Hossein Alizadeh et al (2008) مقایسه‌ای بین روش‌های زمین‌آمار و مورگان-فینی برای برآورد فرسایش خاک در حوضه آبخیز مهر سبزواری انجام دادند. در این تحقیق طرح آشیانه‌ای بین دو واحد منابع اراضی موجود و مقادیر k در محل‌های مختلف نمونه‌برداری اختلاف معناداری داشت و نامناسب بودن آن را در فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهد. (Vafakhah et al (2008) کارایی روش زمین‌آمار در برآورد عمق و چگالی برف را مورد بررسی و نشان دادند که برآورد مقادیر عمق و چگالی برف با تحلیل واریوگرام به دست آمده به روش کریجینگ معمولی مناسب است. (Hoshmand and Salari (2009) هدایت هیدرولیکی خاک را در محیط GIS با استفاده از روش زمین‌آمار پهنه‌بندی نموده و از بین روش‌های زمین‌آمار روش کریجینگ با واریوگرام کروی و روش IDW با توان دو بیش‌ترین دقت را در برآورد هدایت هیدرولیکی دارا بود. (Nekomal and mirabbasi (2017) دقت دو روش وزن دهی عکس فاصله و کریجینگ معمولی را برای درون‌یابی داده‌های سطح آب زیرزمینی دشت سرخون استان هرمزگان مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل نشان داد دقت روش کریجینگ نسبت به روش وزن‌دهی عکس فاصله بالاتر است. در همین ارتباط (Zabihi et al (2011) توزیع مکانی بارندگی سالانه در استان قم را با استفاده از دو روش کریجینگ و عکس فاصله با توان‌های ۱ تا ۳ ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که در محدوده مورد مطالعه روش کریجینگ، مناسب‌ترین روش تخمین بارندگی سالانه است. (Nakhbafi and Ejlali (2011) مقاومت مجاز خاک شهرداری منطقه ۲ تبریز را با استفاده از روش زمین‌آمار تخمین زدند و نتایج حاکی از مناسب بودن مدل کریجینگ

بوده است. (Mohamadi et al (2012 تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی دشت کرمان را با روش های زمین آمار بررسی نموده و واریوگرام مدل گوسی به عنوان بهترین مدل برازش شده انتخاب شده است. (Delbari et al (2013 برای پهنه بندی فراسنج های کیفی آب زیرزمینی دشت کرمان از روش کریجینگ معمولی و لوگ کریجینگ استفاده نموده که هر دو روش مذکور از دقت مشابهی برای تخمین فراسنج های شوری و سدیمی برخوردار بودند. Ejlali et al (2014 ریز پهنه بندی مقاومت زمین شهرک پرواز تبریز را با استفاده از مدل زمین آمار انجام دادند و نتایج نشان داد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل واریوگرام کروی هماهنگی خوبی دارد. (Rouhani and Hal (1988 از زمین آمار برای طراحی پهنه شبکه نمونه گیری آب زیرزمینی جهت تخمین سطح ایستایی استفاده نمودند.

(Desbaretts et al (2013 از اطلاعات کد ارتفاعی زمین در محیط GIS برای تخمین سطح آب زیرزمینی استفاده نمودند. (Vijay and Remadevi (2006 نشان دادند که در تخمین سطح آب زیرزمینی روش کریجینگ نسبت به روش فاصله معکوس دقت بالاتری دارد.

با نگاهی به مطالعات صورت گرفته مشخص می شود در اغلب تحقیقات تنها از روش کریجینگ برای پهنه بندی استفاده می شود. از این رو در این تحقیق سعی شده است توانایی سایر روش های درون یابی فضایی در پهنه بندی مقاومت مجاز خاک نیز ارزیابی شود.

مواد و روش ها

برای تعیین مقاومت مجاز خاک ابتدا گمانه زنی انجام شده و نمونه خاک در اعماق مختلف خاک برداشته می شود و سپس با انجام آزمایش های مختلف، مقدار پارامترهای مربوط به خصوصیات خاک تعیین می گردد. از روی پارامترهای به دست آمده، ظرفیت باربری خاک از لحاظ گسیختگی برشی و نشست محاسبه و با اعمال ضریب اطمینان لازم با هم مقایسه می شوند؛ هر کدام کوچک تر باشد به عنوان مقاومت مجاز خاک انتخاب خواهد شد (Braja, 1941). در این تحقیق گزارش های مطالعات ژئوتکنیکی مربوط به محدوده شهرک پرواز که به شهرداری و سازمان نظام مهندسی ارائه شده است جمع آوری و مورد استفاده قرار گرفته است. برای پهنه بندی مقاومت مجاز خاک در منطقه نیز از روش های مختلف درون یابی استفاده شده است که در زیر به روش کار آن ها پرداخته می شود.

فاصله معکوس وزنی^۲ (IDW): روش فاصله معکوس وزنی با وزن دهی به داده های اطراف نقطه مورد برآورد، کمیت مجهول را به دست آورده و درون یابی را انجام می دهد؛ بنابراین هر نقطه اندازه گیری شده (مشاهده ای) دارای یک اثر محلی است و با افزایش فاصله، از تاثیر آن کاسته می شود. بدین ترتیب نقاط نزدیک تر دارای وزن بیشتری هستند (Issak and Srivastava, 1989). در این روش مقدار وزن w_i از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\pi}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\pi}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن $D_i^{-\pi}$ فاصله نقطه i ام تا نقطه تخمین زده شده، π توان وزن دهی فاصله و n تعداد مشاهدات می باشد. در این تحقیق از ۱ تا ۳ برای تخمین استفاده شد.

روش چندجمله‌ای جهانی^۳ (GPI): این روش با استفاده از تابع ریاضی، یک رویه هموار را بر نقاط نمونه برداری شده برازش می دهد. این روند به تدریج تغییر می کند و الگوی تغییرات داده‌ها را ضبط می کند و یک سطح هموار را به داده‌های نقطه‌ای اعمال می کند. در این روش امکان جستجو و محاسبه نقاط مجهول با استفاده از نقاط موجود در همسایگی آن‌ها وجود ندارد و فقط یک چندجمله‌ای بر تمامی داده‌ها برازش داده می شود (Johnston et al, 2001). روش چندجمله‌ای محلی^۴ (LPI): این روش نیز همانند روش GPI از تابع چندجمله‌ای جهت درونیابی استفاده می کند و تنها تفاوت آن‌ها در این است که در این روش تعداد زیادی چندجمله‌ای بر داده‌های محدود در یک همسایگی معین برازش داده می شود (Eivazi and Mosaedi, 2012:55).

توابع پایه شعاعی^۵ (RBF): توابع پایه شعاعی، از نوع شبکه‌های رو به جلو همراه با یک لایه میانی هستند. شبکه‌های توابع پایه شعاعی دارای پایه ریاضی بسیار قوی، بر مبنای فرضیه منظم سازی برای حل مسائل مشکل می باشند. این شبکه‌ها تقریباً به طور کلی از سه لایه شامل ورودی، مخفی و خروجی تشکیل شده اند. توابع پایه شعاعی منظم به عنوان تابع تحریک نورون‌های لایه مخفی مورد استفاده قرار می گیرند. عموماً آموزش شبکه RBF به دو بخش تقسیم می شود. بخش اول عمدتاً یادگیری از نوع بدون نظارت است که با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی، پارامترهای توابع پایه (مراکز و عرض‌ها) با استفاده از اطلاعات ورودی تعیین می شود و در بخش دوم که یادگیری از نوع با نظارت است، وزن‌های بین لایه میانی و لایه خروجی با استفاده از روش‌های کاهش شیب و رگرسیون خطی تعیین می شود.

- کریجینگ^۶

برآوردها از طریق زمین‌آمار شامل دو مرحله است که مرحله اول تشخیص و مدل‌سازی ساختار مکانی است در این مرحله که ساختار مکانی متغیرها با استفاده از واریوگرام صورت می گیرد و در مرحله دوم زمین‌آمار با استفاده از روش‌های کریجینگ نسبت به برآورد و پیش‌بینی نقاط مجهول مورد استفاده قرار می گیرد. بر خلاف روش‌های آمار کلاسیک، روش‌های زمین‌آمار ضمن در نظر گرفتن موقعیت مکانی نقاط و ارتباط بین آن‌ها از کارایی بیش تری برای تجزیه و تحلیل برخوردار می باشند. این روش‌ها قادر به مدل‌سازی مناسب زمانی و مکانی جهت توصیف متغیر ناحیه‌ای، با در نظر گرفتن مولفه‌های تغییرپذیری ساختاری و تصادفی هستند. اساس این روش‌ها تخمین مقدار نامعلوم

3- Global Polynomial Interpolation

4- Local polynomial Interpolation

5- Radial Basis Functions

6- Kriging

متغیر مکانی Z به عنوان یک عدد تصادفی با یک توزیع احتمالاتی مشخص در نقطه ای دلخواه از منطقه مورد مطالعه است. در زمین آمار، تجزیه و تحلیل ساختار تغییرات مکانی متغیرها با استفاده از واریوگرام صورت می گیرد. واریوگرام، تغییرات فاصله ای یا ساختار تغییرپذیری یک متغیر خاص را نشان داده و از ابزارهای اساسی زمین آمار جهت بررسی تغییرات مکانی بارش سالانه می باشد. محاسبه واریوگرام به صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$\sigma^2(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، $\gamma(h)$: مقدار نیم تغییرنا برای جفت نقاطی است که به فاصله h از هم قرار دارند، $n(h)$: تعداد زوج نقاطی است که به فاصله h از هم قرار دارند، $z(x_i)$: مقدار مشاهده های متغیر X در موقعیت I و $z(x_{i+h})$: مقدار مشاهده ای متغیر در فاصله h از x_i است. به مقدار نیم تغییرنا به ازای $h=0$ ، اثر قطعه ای (C_0) گفته می شود. با افزایش h ، مقدار نیم تغییرنا تا فاصله معینی اضافه می شود و پس از آن به حد ثابتی می رسد که به آن حد آستانه (C_0+C) می گویند. به فاصله بین نمونه ها که از آن به بعد مقادیر متغیر در نقاط مجاور تأثیر چندانی بر یکدیگر ندارند، دامنه یا شعاع تأثیر (A_0) گفته می شود. نیم تغییرنا که در بالا به آن اشاره شد؛ متداول ترین ابزاری است که همبستگی مکانی را در زمین آمار بررسی می کند. نیم تغییرنا میزان عدم تشابه را بین مقادیر یک ویژگی هنگامی که فاصله بین نمونه ها افزایش می یابد، نشان می دهد. در عمل برای محاسبه نیم تغییرنا تجربی از رابطه (۲) استفاده می شود (Issak and Srivastava, 1989). آنالیز همبستگی مکانی بر اساس ساختار واریوگرام ها که وجود وابستگی مکانی را در بین متغیرهای بارندگی تعیین می کنند، صورت می گیرد. واریوگرام ها برای تعیین همبستگی و دامنه وابستگی مکانی مورد استفاده قرار می گیرند. کریجینگ، تکنیک درون یابی خطی است که بهترین برآورد خطی نارایب را برای متغیرهای مکانی فراهم می کند و مطابق رابطه (۳) می باشد (Goovaerts, 1997).

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن $Z^*(x_0)$ مقدار تخمین زده شده متغیر Z در نقطه ای به مختصات x_0 ، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر Z در نقطه ای به مختصات x_i و λ_i وزن نسبت داده شده به متغیر Z در نقطه x_i و n تعداد مشاهدات می باشد (Delbari, 2013).

کریجینگ معمولی $(OK)^v$: این روش یکی از روش های کریجینگ است که نسبت به دیگر روش های کریجینگ بیش تر استفاده می شود. در این روش مقادیر نقطه مجهول از مقادیر معلوم نقاط اطراف و از یک مدل واریوگرام به دست می آید.

کریجینگ ساده^۸ (SK): در این نوع از کریجینگ میانگین داده‌ها معلوم و مستقل از مختصات فرض می‌شود در این روش دقت نسبت به کریجینگ معمولی کم تر بوده اما نتایج این روش هموارتر می‌باشد.

کریجینگ جهانی^۹ (UK): در این روش فرض می‌شود که در داده‌ها روند وجود دارد و این روند می‌تواند با یک تابع قطعی، مانند یک تابع چندجمله‌ای مدل شود. در این صورت میانگین دیگر ثابت نبوده و واریانس ابزار مناسبی برای مدل‌سازی نمی‌باشد. در این حالت باید واریوگرام را با استفاده از باقی‌مانده‌ها تهیه کرد و مدلی برای تشریح روند ساخت. در این حالت کریجینگ بر روی باقی‌مانده‌ها انجام خواهد شد.

برای اجرای روش‌های درونیابی بیان شده از نرم‌افزار ArcGis استفاده شده است. این نرم‌افزار علاوه بر پهنه‌بندی، اعتبارسنجی داده‌ها را نیز انجام می‌دهد. بدین ترتیب که یک نقطه به‌طور موقت حذف و با استفاده از سایر نقاط و اعمال روش درونیابی مورد نظر مقداری برای این نقطه تخمین زده می‌شود. سپس این نقطه به محل خود برگردانده شده و نقطه بعدی حذف می‌گردد و به همین ترتیب برای تمام نقاط، برآورد صورت می‌گیرد. در پایان مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده با استفاده از معیارهای همچون میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، میانگین خطا (MBE)، خطای مجذور میانگین ((RMSE، نش‌ساتکلیف ((NASH و ضریب تعیین (R^2) ارزیابی می‌شوند.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z^*(x_i) - z(x_i)| \quad \text{رابطه (۴)}$$

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i))^2}{n}} \quad NRMSE = RMSE / \bar{X} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$z^*(x_i)$: مقدار برآورد شده متغیر در x_i ، $z(x_i)$: مقدار مشاهده‌ای متغیر در x_i ، n : تعداد نقاط با متغیر مشاهده‌ای.

ضریب کارایی نش‌ساتکلیف اهمیت نسبی واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده را در مقایسه با واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد و به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

رابطه (۷)

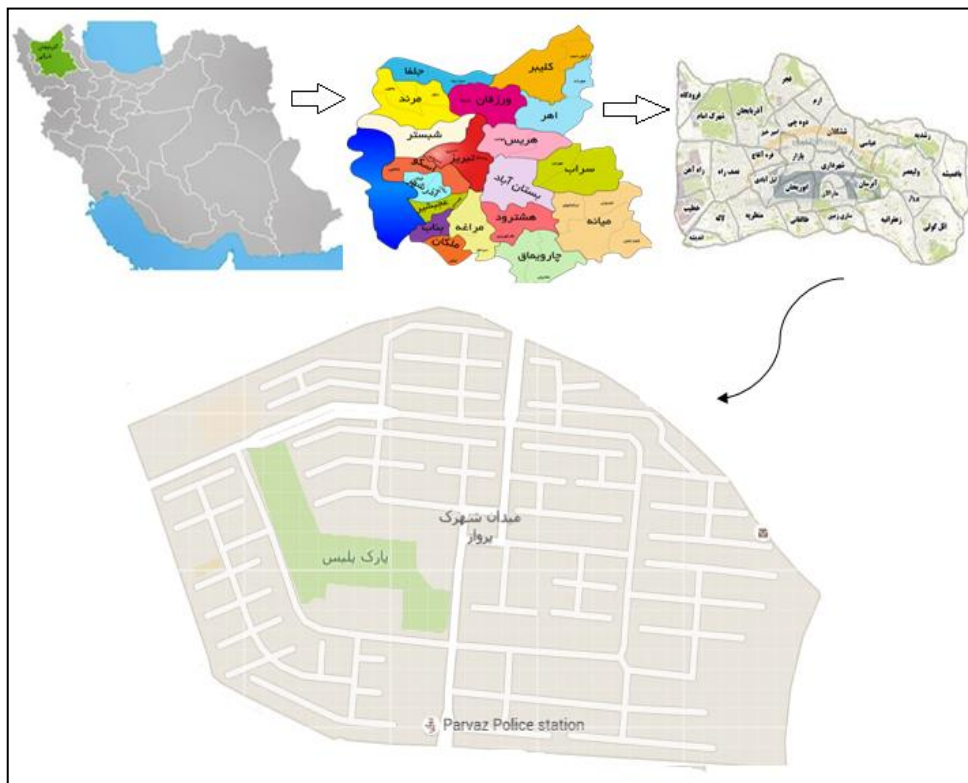
$$Nash(NSE) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_m - x_s)^2}{\sum_{i=1}^n (x_m - \bar{x}_m)^2}$$

x_s = داده شبیه‌سازی شده (برآورد شده)، x_m = داده اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای)، \bar{x}_m = متوسط داده اندازه‌گیری شده و n = تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. قابل ذکر است که اعداد به‌دست آمده از این معیار هر چه به عدد ۱

نزدیک تر باشد ایده آل تر است و همچنین هرچه مقادیر شاخص های MAE, RMSE و MBE به صفر نزدیک تر باشد مدل از دقت برآورد بیش تر و خطای کم تری برخوردار است.

منطقه مورد مطالعه

شهرک پرواز در بخش ۹ منطقه ۲ شهرستان تبریز قرار گرفته است. این قسمت از دشت تبریز یک فرونشست فشاری بوده که از بخش شمال شرق و شرق محتمل راندگی طبقات رسوبی نئوژن بر روی خود می باشد. ساختار اصلی در محدوده مورد مطالعه را تناوبی از ماسه سنگ هوازده و شن و ماسه همراه با قلوه سنگ می باشد. این ساختار دارای شکستگی حاصل از فعالیت های تکتونیکی می باشد. به طور عمده ماسه سنگ هوازده به همراه شن و ماسه مترکم بستر اصلی منطقه را تشکیل می دهد. در (شکل ۱ و ۲) به ترتیب موقعیت منطقه و گمانه های مورد مطالعه و در (جدول ۱) ویژگی داده های آماری نشان داده شده است.



شکل ۱: محدوده شهرک پرواز در شهر تبریز، استان آذربایجان شرقی

جدول ۱- آمار توصیفی داده های مقاومت مجاز خاک

| تعداد گمانه | میانگین | انحراف معیار | چولگی | ضریب تغییرات |
|-------------|---------|--------------|-------|--------------|
| ۵۱ | ۲/۷۵ | ۰/۰۸۵ | ۰/۴ | ۰/۰۳ |



شکل ۲: وضعیت قرارگیری نقاط نمونه برداری شده در شهرک پرواز

یافته‌ها و بحث

نتایج روش‌های مختلف درون‌یابی از جمله IDW با توان ۱ الی ۳ و سکتورهای مختلف (کل، ۴ و ۴ با ۴۵ درجه و ۸)، GPI درون‌یابی چندجمله‌ای جهانی با توان‌های ۱ الی ۳، RBF با بخش‌های عملکردی اسپلاین کششی^{۱۰} (SWT)، اسپلاین منظم کامل^{۱۱} (CRS) و اسپلاین صفحه نازک^{۱۲} (TPS) به همراه سکتورهای چهارگانه و در آخر هم درون‌یابی چندجمله‌ای محلی (LPI) با توان‌های ۱ الی ۳ که به منظور پهنه‌بندی داده‌های موجود و شناخت مناسب‌ترین روش درون‌یابی انجام شد.

- روش فاصله وزنی معکوس (IDW)

(جدول ۲) مربوط به نتایج روش فاصله وزنی معکوس به ازای توان‌های مختلف از ۱ تا ۳ و سکتورهای مختلف می‌باشد با توجه به نتایج ارائه شده در این جدول مشاهده می‌شود با افزایش توان فاصله نتایج بهتر می‌شود ولی بهتر شدن نتایج تا توان ۳ ادامه داشته و بعد از آن ضعیف‌تر می‌شود و از بین سکتورها، سکتور کامل در هر یک از توان‌ها

10- Spline with Tension

11- Completely Regularized Spline

12- Thin Plate spline

بهتر عمل نموده است؛ بنابراین از بین مدل های مختلف روش فاصله وزنی معکوس، توان ۳ با سکتور کامل برای اعتبارسنجی نهایی انتخاب می شود که در (شکل ۳) نقشه مربوط به پهنه بندی این مدل آمده است.

جدول ۲- نتایج روش فاصله وزنی معکوس

| روش درون یابی | Power | Sector | MBE | MAE | NRMSE | R ² | NASH |
|---------------|-------|--------|----------|----------|---------|----------------|-------|
| IDW | ۱ | full | ۰/۰۰۲۰۰ | ۰/۰۰۰۳۹۸ | ۰/۰۲۵۷۳ | ۰/۹۱۶ | ۰/۹۰۶ |
| | | ۴ | ۰/۰۰۰۳۵۷ | ۰/۰۰۰۴۹۵ | ۰/۰۳۰۰۳ | ۰/۹۲۹ | ۰/۸۷۲ |
| | | ۴/۴۵ d | ۰/۰۰۲۰۵۲ | ۰/۰۰۰۴۹۴ | ۰/۰۲۹۹۰ | ۰/۹۲۳ | ۰/۸۷۳ |
| | | ۸ | ۰/۰۰۰۴۷ | ۰/۰۰۰۶۴۶ | ۰/۰۳۷۸۴ | ۰/۹۲۲ | ۰/۷۹۷ |
| | ۲ | full | ۰/۰۰۱۸۰۹ | ۰/۰۰۰۳۶۴ | ۰/۰۲۳۰۷ | ۰/۹۲۸ | ۰/۹۲۴ |
| | | ۴ | ۰/۰۰۱۶۷۱ | ۰/۰۰۰۳۷۹ | ۰/۰۲۳۸۲ | ۰/۹۳۲ | ۰/۹۱۹ |
| | | ۴/۴۵ d | ۰/۰۰۲۱۷۵ | ۰/۰۰۰۳۷۸ | ۰/۰۲۴۰۱ | ۰/۹۳۰ | ۰/۹۱۸ |
| | | ۸ | ۰/۰۰۲۰۶۹ | ۰/۰۰۰۴۱۴ | ۰/۰۲۶۰۰ | ۰/۹۲۷ | ۰/۹۰۴ |
| | ۳ | full | ۰/۰۰۱۳۹۶ | ۰/۰۰۰۳۴۳ | ۰/۰۲۲۵۰ | ۰/۹۲۹ | ۰/۹۲۸ |
| | | ۴ | ۰/۰۰۱۴۸۸ | ۰/۰۰۰۳۴۷ | ۰/۰۲۲۵۴ | ۰/۹۳۰ | ۰/۹۲۸ |
| | | ۴/۴۵ d | ۰/۰۰۱۵۷۴ | ۰/۰۰۰۳۴۸ | ۰/۰۲۲۶۶ | ۰/۹۲۹ | ۰/۹۲۷ |
| | | ۸ | ۰/۰۰۲۰۶۹ | ۰/۰۰۰۴۱۴ | ۰/۰۲۶۰۰ | ۰/۹۲۷ | ۰/۹۰۴ |

روش چندجمله ای جهانی (GPI)

در این روش با توجه به (جدول ۳) توان های مختلف ۱ الی ۳ مورد بررسی قرار گرفت. توان ۲ بهترین نتیجه را نسبت به بقیه از نظر میزان خطا و همبستگی داشته است و ضعیف ترین نتیجه مربوط به توان ۱ است؛ بنابراین توان دو روش چندجمله ای جهانی برای اعتبارسنجی نهایی انتخاب می شود. در (شکل ۴) پهنه بندی مربوط به این مدل نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج روش چندجمله ای جهانی

| روش درون یابی | Order | MBE | MAE | NRMSE | R ² | NASH |
|---------------|-------|-----------|----------|---------|----------------|-------|
| GPI | ۱ | -۰/۰۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۴۳۹ | ۰/۰۲۹۶۶ | ۰/۸۷۵ | ۰/۸۷۵ |
| | ۲ | -۰/۰۰۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۳۵۳ | ۰/۰۲۲۶۲ | ۰/۹۲۷ | ۰/۹۲۷ |
| | ۳ | -۰/۰۰۰۰۲۵ | ۰/۰۰۰۳۵۲ | ۰/۰۲۲۹۴ | ۰/۹۲۵ | ۰/۹۲۵ |

- روش توابع پایه شعاعی (RBF)

نتایج درون یابی روش تابع پایه شعاعی در سه مدل و چهار سکتور مختلف بررسی شده است. می توان گفت در بین سکتورها، سکتور کامل نسبتاً قوی تر عمل نموده و از بین مدل ها، مدل های SWT و CRS نتایج مشابهی با اختلاف

کم‌تری نسبت به هم ارایه نمودند؛ بنابراین یکی از مدل‌ها با سکتور کامل برای اعتبارسنجی نهایی انتخاب می‌شوند که در اینجا مدل SWT با سکتور کامل به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب و در (شکل ۵) نمایش داده می‌شود.

- روش چندجمله‌ای محلی (LPI)

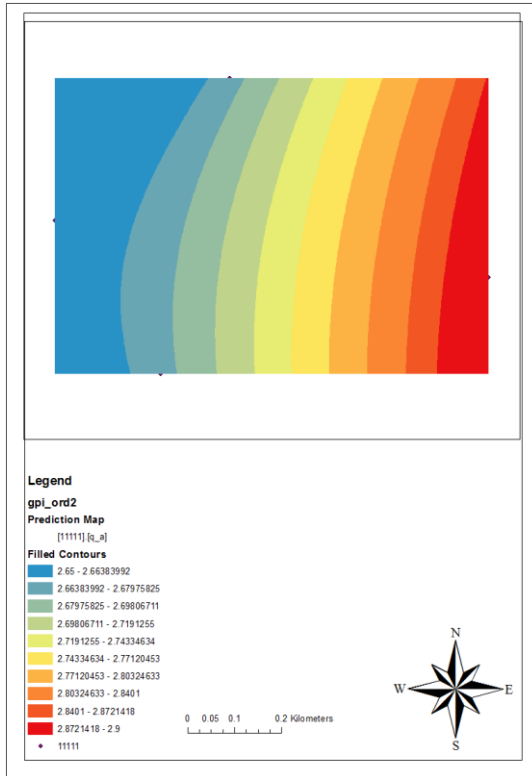
این روش نیز با توان‌های ۱ الی ۳ بررسی شد. در این روش از نظر همبستگی تغییرات از روند مناسبی برخوردار نبود. به‌طوری که بیش‌ترین همبستگی مربوط به توان ۱ و کم‌ترین آن مربوط به توان ۲ بود. (شکل ۶) پهنه‌بندی توان ۲ روش چندجمله‌ای محلی می‌باشد.

جدول ۴- نتایج روش توابع پایه شعاعی

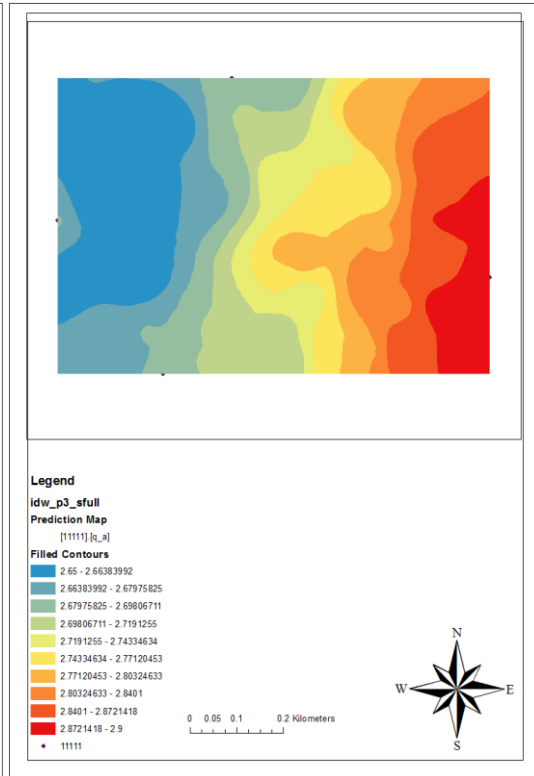
| روش درونیابی | Model | Sector | MBE | MAE | NRMSE | R ² | NASH |
|--------------|-------|--------|----------|----------|---------|----------------|-------|
| RBF | CRS | full | ۰/۰۰۰۶۵۹ | ۰/۰۰۰۲۹۹ | ۰/۰۱۹۹۲ | ۰/۹۴۴ | ۰/۹۴۳ |
| | | ۴ | ۰/۰۰۰۵۱۲ | ۰/۰۰۰۳۰۹ | ۰/۰۲۰۴۹ | ۰/۹۴۱ | ۰/۹۴۰ |
| | | ۴/۴od | ۰/۰۰۰۷۴۲ | ۰/۰۰۰۳۱۱ | ۰/۰۲۰۴۷ | ۰/۹۴۱ | ۰/۹۴۰ |
| | | ۸ | ۰/۰۰۰۵۱۸ | ۰/۰۰۰۳۱۲ | ۰/۰۲۰۷۷ | ۰/۹۴۰ | ۰/۹۳۹ |
| | SWT | full | ۰/۰۰۰۵۲۹ | ۰/۰۰۰۳۰۲ | ۰/۰۱۹۹۴ | ۰/۹۴۳ | ۰/۹۴۳ |
| | | ۴ | ۰/۰۰۰۵۲۱ | ۰/۰۰۰۳۰۷ | ۰/۰۲۰۱۷ | ۰/۹۴۲ | ۰/۹۴۲ |
| | | ۴/۴od | ۰/۰۰۰۶۶۵ | ۰/۰۰۰۳۰۹ | ۰/۰۲۰۱۹ | ۰/۹۴۲ | ۰/۹۴۲ |
| | | ۸ | ۰/۰۰۰۵۰۱ | ۰/۰۰۰۳۰۹ | ۰/۰۲۰۳۱ | ۰/۹۴۱ | ۰/۹۴۱ |
| | TPS | full | ۰/۰۰۰۹ | ۰/۰۰۰۳۱۵ | ۰/۰۲۱۴۴ | ۰/۹۳۷ | ۰/۹۳۵ |
| | | ۴ | ۰/۰۰۱۰۸۸ | ۰/۰۰۰۳۲۲ | ۰/۰۲۱۴۵ | ۰/۹۳۷ | ۰/۹۳۴ |
| | | ۴/۴od | ۰/۰۰۱۱۹۴ | ۰/۰۰۰۳۲۵ | ۰/۰۲۱۶۲ | ۰/۹۳۶ | ۰/۹۳۳ |
| | | ۸ | ۰/۰۰۱۳۲۶ | ۰/۰۰۰۳۲۶ | ۰/۰۲۱۶۵ | ۰/۹۳۶ | ۰/۹۳۳ |

جدول ۵- نتایج روش چندجمله‌ای محلی

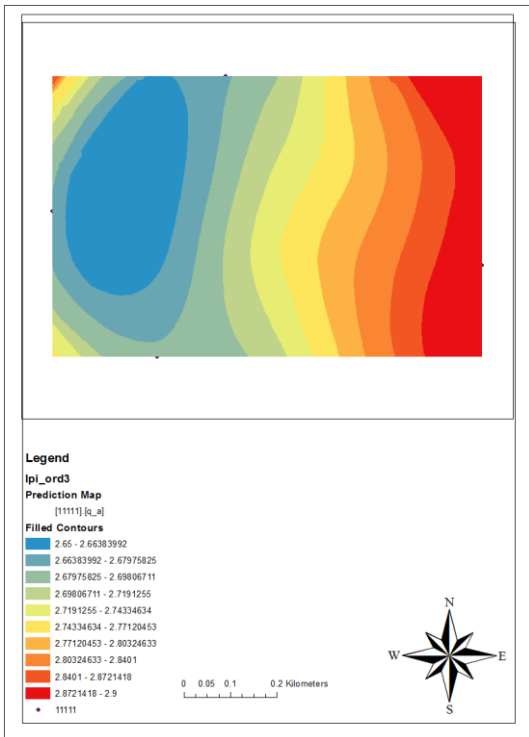
| روش درونیابی | Order | MBE | MAE | NRMSE | R ² | NASH |
|--------------|-------|---------|---------|--------|----------------|-------|
| LPI | ۱ | ۰/۰۰۲۴۵ | ۰/۰۰۰۳۱ | ۰/۰۲۰۹ | ۰/۹۳۸ | ۰/۹۳۸ |
| | ۲ | ۰/۰۰۱۴۳ | ۰/۰۰۰۳۲ | ۰/۰۲۱۴ | ۰/۹۳۵ | ۰/۹۳۵ |
| | ۳ | ۰/۰۰۰۱۳ | ۰/۰۰۰۳۲ | ۰/۰۲۱۷ | ۰/۹۳۳ | ۰/۹۳۳ |



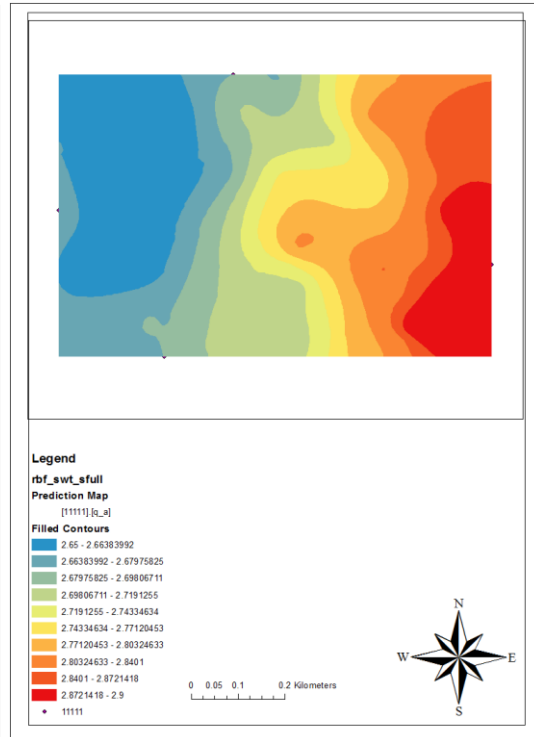
شکل ۴: روش GPI به با توان ۲



شکل ۳: روش IDW با توان ۳ با سکتور Full



شکل ۶: روش LPI, Order=3



شکل ۵: روش RBF, مدل SWT با سکتور Full

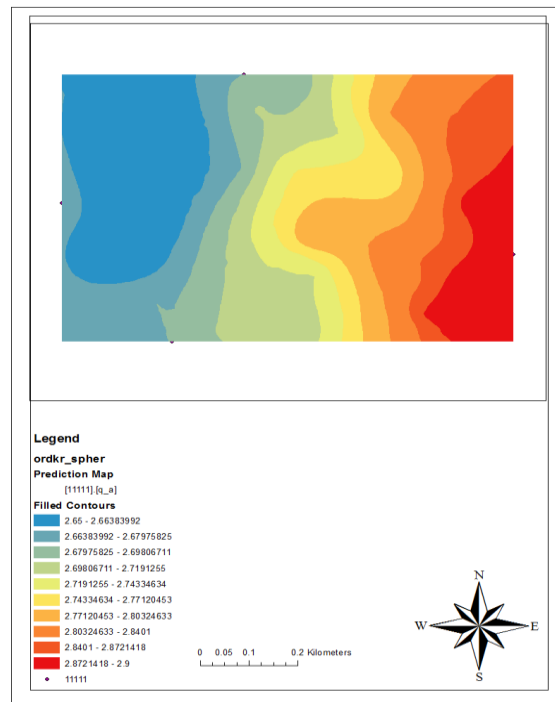
- روش کریجینگ

در روش کریجینگ سه روش اصلی معمولی، ساده و جهانی با چهار واریوگرام کروی، دایره‌ای، گوسی و نمایی نیز مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از برآزش واریوگرام‌ها بر داده‌های مورد استفاده در (جدول ۶) ذکر شده است. با توجه به (جدول ۶) و با توجه به معیارهای ارزیابی ذکر شده، در کریجینگ معمولی و جهانی واریوگرام کروی با نتایج یکسان بهترین تخمین را داشتند و در کریجینگ ساده، واریوگرام دایره‌ای بهترین نتیجه را داشته که در (شکل ۷) پهنه‌بندی مربوط به این مدل‌ها نشان داده شده است. از بین این سه مدل انتخاب شده، روش کریجینگ معمولی با واریوگرام کروی به‌خاطر بالاترین ضریب همبستگی و کم‌ترین خطا برای مرحله اعتبارسنجی انتخاب شد و (شکل ۷) نقشه پهنه‌بندی مربوط به این مدل را نشان داده است.

جدول ۶- نتایج روش کریجینگ

| row | kiriging | model | MBE | MAE | NRMSE | R ² | NASH |
|-----|-----------|-------------|-----------|----------|-------|----------------|-------|
| ۱ | ordinary | Circular | ۰/۰۰۰۵۶ | ۰/۰۰۰۲۹ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۴۴ |
| ۲ | ordinary | Spherical | ۰/۰۰۰۵۴ | ۰/۰۰۰۲۹ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۴۴ |
| ۳ | ordinary | Exponential | ۰/۰۰۰۵۰ | ۰/۰۰۰۲۹ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۴۴ |
| ۴ | ordinary | Gaussian | -۰/۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰۳ | ۰/۰۲۱ | ۰/۹۳۸ | ۰/۹۳۷ |
| ۱ | simple | Circular | ۰/۰۰۱۵۵ | ۰/۰۰۰۰۳ | ۰/۰۲۰ | ۰/۹۴ | ۰/۹۳۹ |
| ۲ | simple | Spherical | ۰/۰۰۱۶۵ | ۰/۰۰۰۰۳ | ۰/۰۲۰ | ۰/۹۳۹ | ۰/۹۳۸ |
| ۳ | simple | Exponential | ۰/۰۰۲۵۱ | ۰/۰۰۰۰۳۴ | ۰/۰۲۲ | ۰/۹۳۶ | ۰/۹۲۸ |
| ۴ | simple | Gaussian | -۰/۰۰۰۰۴۹ | ۰/۰۰۰۰۲۹ | ۰/۰۲۱ | ۰/۹۳۲ | ۰/۹۳۲ |
| ۱ | universal | Circular | ۰/۰۰۰۵۶ | ۰/۰۰۰۲۹ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۴۴ |
| ۲ | universal | Spherical | ۰/۰۰۰۵۴ | ۰/۰۰۰۲۹ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۴۴ |
| ۳ | universal | Exponential | ۰/۰۰۰۵۰ | ۰/۰۰۰۲۹ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۴۴ |
| ۴ | universal | Gaussian | -۰/۰۰۰۰۶ | ۰/۰۰۰۰۳ | ۰/۰۲۱ | ۰/۹۳۸ | ۰/۹۳۷ |

نتایج مدل‌های منتخب هریک از روش‌های درون‌یابی مطابق (جدول ۷) خلاصه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که از بین روش‌های به کار گرفته شده، روش کریجینگ معمولی با مدل کروی با بالاترین ضریب همبستگی و کم‌ترین خطا بهترین نتایج را ارائه نموده است. روش تابع پایه شعاعی با اختلاف اندکی در اولویت بعدی قرار دارد. البته این اعتبارسنجی به طریقی بود که یک نقطه حذف و با استفاده از سایر نقاط یک مقدار برای آن تعیین می‌شود.



شکل ۷: روش کریجینگ معمولی با مدل کروی

جدول ۷- نتایج اعتبار سنجی به روش تک به تک نمونه‌ها

| روش درون‌یابی | Power/Order/Model | Sector | MBE | MAE | NRMSE | R ² | NASH | |
|---------------|-------------------|-----------|---------|--------|--------|----------------|-------|-------|
| IDW | Power =3 | full | ۰/۰۰۱۴ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۲۲ | ۰/۹۲۹ | ۰/۹۲۸ | |
| GPI | Order | ۲ | -۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۲۲ | ۰/۹۲۷ | ۰/۹۲۷ | |
| RBF | SWT | full | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۴۳ | ۰/۹۴۳ | |
| LPI | Order | ۳ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۲۱ | ۰/۹۳۳ | ۰/۹۳۳ | |
| Kriging | Ordinary | Spherical | none | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۴۴ |

چنانچه اعتبارسنجی به طریقی دیگر انجام گیرد و ۲۰ درصد نمونه‌ها یعنی حدود ۱۰ نمونه از کل نمونه‌ها برای اعتبارسنجی انتخاب و به صورت یک‌جا حذف و سپس با استفاده از سایر داده‌ها مقداری برای آن‌ها تخمین زده شود. نتایج اعتبارسنجی با این طریق مطابق (جدول ۸) خواهد بود. البته این ۱۰ نمونه به نحوی انتخاب شده‌اند که توزیع مناسبی نسبت به پراکندگی کل نقاط داشته باشند ولی در حالت کلی این نحوه انتخاب به صورت سلیقه‌ای بوده و با تغییر این انتخاب‌ها ممکن است نتایج متفاوتی حاصل شود. نتایج (جدول ۸) نشان می‌دهد که این اعتبارسنجی هم تفاوت آن‌چنانی با روش قبلی نداشته و باز هم روش کریجینگ معمولی با مدل کروی بهترین روش برای تخمین مقاومت مجاز خاک می‌باشد.

جدول ۸- نتایج اعتبارسنجی با ۲۰ درصد نمونه‌ها

| روش درون‌یابی | Power/Order/Model | | Sector | MBE | MAE | NRMSE | R ² | NASH |
|---------------|-------------------|-----------|--------|--------|--------|-------|----------------|-------|
| IDW | Power | ۳ | full | ۰/۰۰۱۲ | ۰/۰۱۷۴ | ۰/۰۲۰ | ۰/۹۲۹ | ۰/۹۲۸ |
| GPI | Order | | ۲ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۱۷۷ | ۰/۰۲۰ | ۰/۹۳۱ | ۰/۹۲۱ |
| RBF | SWT | | full | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۱۵۴ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۴۳ | ۰/۹۴۲ |
| LPI | Order | | ۳ | ۰/۰۰۱۸ | ۰/۰۱۶۹ | ۰/۰۱۹ | ۰/۹۲۸ | ۰/۹۲۷ |
| Kriging | Ordinary | Spherical | none | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۱۵۰ | ۰/۰۱۸ | ۰/۹۴۳ | ۰/۹۴۳ |

نتیجه‌گیری

در این تحقیق پهنه‌بندی مقاومت مجاز خاک در شهرک پرواز با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی مورد مطالعه قرار گرفت. جمع‌بندی نتایج به‌دست آمده از تحلیل روش‌های مختلف زمین‌آماری نشان داد که روش کریجینگ معمولی با مدل کروی با بالاترین ضریب همبستگی و کم‌ترین خطا به‌عنوان بهترین روش درون‌یابی برای تخمین مقاومت مجاز خاک می‌باشد. نقشه‌های پهنه‌بندی مدل کروی نشان می‌دهد که سمت غرب شهرک پرواز دارای مقاومت مجاز بیش‌تری نسبت به قسمت شرقی می‌باشد. نتایج روش تابع شعاعی نیز با اختلاف بسیار ناچیز در حد نتایج روش کریجینگ معمولی است. البته با توجه به این‌که در این شهرک ضریب تغییرات مقاومت مجاز خاک گمانه‌ها کم است، اختلاف در نتایج روش‌های درون‌یابی چندان احساس نمی‌شود. با نگاهی به پیشینه تحقیق مشاهده می‌شود که اکثر محققان تنها از روش کریجینگ برای پهنه‌بندی استفاده می‌کنند. در این تحقیق تمامی روش‌های درون‌یابی مورد آزمون قرار گرفتند و با این وجود، روش کریجینگ به‌عنوان روش برتر معرفی گردید ولی این موضوع، دلیل قانع‌کننده‌ای برای رد قابلیت سایر روش‌ها نمی‌تواند باشد و با پراکندگی، نحوه توزیع و ضریب تغییرات داده‌ها ممکن است سایر روش‌ها قابلیت بهتری نسبت به کریجینگ از خود نشان دهند.

References

- Braja M. D., (1941), "Principles of foundation engineering", PWS-KENT publishing Company, BOSTON.
- Delbari, M., Afrasiab, P., Salari, M., (2013), "Mapping water salinity and sodicity using selected geostatistical methods, case study: Kerman Plain", *Journal management system*, 6 (16): 11-24. [In Persian].
- Desbarats, A. J., Longan, C. E., Hinton, M. J., Harpe, D. R., (2001), "On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model", *Journal of Hydrology*, 255: 25-38.
- Eivazi, M., Mosaedi, A., (2012), "An investigation on spatial pattern of annual precipitation in golestan province by using deterministic and geostatistics models", *Journal of Water and Soil*, 26 (1): 53-64. [In Persian].
- Ejlali, R., Jodeiri, M., Safapour, A., (2014), "Zoning of ground resistance using geostatistical model (case study: parvaz municipality in Tabriz)", 1st national conference on soil mechanics and foundation engineering, 2014/12/3-4, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.
- Goovaerts, P., (2000), "Geostatistical Approach for Incorporating Elevation into Spatial Interpolation of Rainfall", *Journal of Hydrology*, 228 (1-2): 113-129.
- Hoshmand, A., Salari, A., (2010), "Assessment of interpolation methods in estimation of hydraulic conductivity of soil in GIS", 2st National Conference on water. 2010/3/11, Islamic Azad University Behbahan, Behbahan, Iran.
- Hossein Alizadeh, M., Ayoubi, Sh., Ownagh, M., (2008), "Comparison of Geostatistic, Conventional and Morgan-Finney methods for soil erodibility prediction (Case study: Mehr watershed of Sabzevar, Iran)", *Journal of Agric. Sci, Natur. Resour*, 15 (1): 131-141.
- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M., (1989), "An introduction to applied geostatistics", Oxford University Press, New York, 561 pp.,
- Johnston, K., Jay, M., Hoef, V., Krivoruchko, K., Lucas, N., (2001), "Using geostatistical analyst", ESRI Publishing, New York, USA.
- Mohammadi, S., Salajegheh, A., Mahdavi, M., Bagheri, R., (2012), "An investigation on spatial and temporal variations of groundwater level in Kerman plain using suitable geostatistical method (During a 10-year period)", *Journal of rangeland and desert research*, 19 (1): 60-71. [In Persian].
- Nakhbafi, A., Ejlali, R., (2012), "Estimation of allow resistance of soil under the foundation using geostatistical (case study: municipality of Tabriz 2nd district)", 1st national conference on civil engineering and sustainable development. 2012/02/22, Islamic Azad university, Zibakener Branch, Rasht, Iran. [In Persian].
- Nekoamal, M., Mirabbasi, R., (2017), "Assessment of interpolation methods in estimation of groundwater level (case study: sarkhon plain)", *Journal of hydrogeology*, online publish. [In Persian].
- Nourani, V., Talebbeydokhti, N., Abedini, M.J., Rakhshandehroo, G. R., (2005), "Suspended sediment load estimation using geostatistics case study: Talkherood River, Tabriz", *Journal of water resource research*, 1 (2): 42-50. [In Persian].
- Rouhani, Sh., Hall, T. J., (1988b), "Geostatistical schemes for ground water sampling", *Journal of Hydrology*, 103: 85-102. [In Persian].
- Theodossiou, N., Latinopoulos, P., (2006), "Evaluation and optimization of groundwater observation networks using the kriging methodology", *J. Environ. Model. and Software*, 21 (7): 991-1000.

- Vafakhah, M., Mohseni Saravi, M., Mahdavi, M., Alavipanah, S.K., (2008), "Application of geostatistical analysis in snow depth and density in orazan watershed", *Journal of watershed management science*, 2 (4): 49-56. [In Persian].
- Vijay, K., Remadevi, H., (2006), "Kriging of groundwater level", *Journal of spatial Hydrology*, 1: 81-92.
- Zabihi, A., Solaimani, K., Shabani, M., Abravsh, S., (2011), "An investigation of annual rainfall spatial distribution using geostatistical methods (a case study: Qom Province)", *Journal of physical geography research quarterly*, 78: 110-112. [In Persian].