Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

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 دریافت: ۱۳۹٤/۲/٤ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/٤/۲۹

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.

۱- عضو هیات علمی گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. E-mail: jani@iaut.ac.ir

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

مقدمه

در بررسی‌های آمار کلاسیک، اجزایی یا نمونه‌های که از کل جامعه به‌منظور 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. به‌عبارت دیگر، نتایج به‌دست 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 به‌دست 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 ارایه 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 ارایه می‌دهد. Hossein Alizadeh et al (2008) مقایسه‌ای بین روش‌های زمین‌آمار و مورگان-فینی برای برآورد فرسایش خاک در حوضه آبخیز مهر سبزوار 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 به‌دست 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 کریچینگ 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

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

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

Desbarets 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 می‌شود در اغلب تحقیقات تنها از روش کریجینگ برای پهنه‌بندی استفاده می‌شود. از این‌رو در این تحقیق سعی شده است توانایی سایر روش‌های درون‌یابی فضایی در پهنه‌بندی مقاومت مجاز خاک نیز ارزیابی شود.

مواد و روش‌ها

برای تعیین مقاومت مجاز خاک ابتدا گمانه‌زنی انجام شده و نمونه خاک در اعماق مختلف خاک برداشته می‌شود و سپس با انجام آزمایش های مختلف، مقدار پارامترهای مربوط به خصوصیات خاک تعیین می گردد. از روی پارامترهای به‌دست آمده، ظرفیت باربری خاک از لحاظ گسیختگی برشی و نشست محاسبه و با اعمال ضریب اطمینان لازم با هم مقایسه می‌شوند؛ هر کدام کوچک‌تر باشد به‌عنوان مقاومت مجاز خاک انتخاب خواهد شد (Braja, 1941). در این تحقیق گزارش‌های مطالعات ژئوتکنیکی مربوط به محدوده شهرک پرواز که به شهرداری و سازمان نظام مهندسی ارائه شده است جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفته است. برای پهنه‌بندی مقاومت مجاز خاک در منطقه نیز از روش‌های مختلف درون‌یابی استفاده شده است که در زیر به روش کار آن‌ها پرداخته می‌شود.

فاصله معکوس وزنی[۲] (IDW): روش فاصله معکوس وزنی با وزن‌دهی به داده‌های اطراف نقطه مورد برآورد، کمیت مجهول را به‌دست آورده و درون‌یابی را انجام می‌دهد؛ بنابراین هر نقطه اندازه‌گیری شده (مشاهده‌ای) دارای یک اثر محلی است و با افزایش فاصله، از تاثیر آن کاسته می‌شود. بدین‌ترتیب نقاط نزدیک‌تر دارای وزن بیش‌تری هستند (Issak and Srivastava,1989). در این روش مقدار وزن λ_i از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

2- Inverse Distance Weight

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

رابطه (۱)

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\pi}}{\sum_{i=1}^{n} D_i^{-\pi^i}}$$

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

روش چندجمله‌ای جهانی[3] (GPI): این روش با استفاده از تابع ریاضی، یک رویه هموار را بر نقاط نمونه‌برداری شده برازش می‌دهد. این روند به‌تدریج تغییر می‌کند و الگوی تغییرات داده‌ها را ضبط می‌کند و یک سطح هموار را به داده‌های نقطه‌ای اعمال می‌کند. 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 می‌شود (Johnston et al, 2001).

روش چندجمله‌ای محلی[4] (LPI) : این روش نیز همانند روش GPI از تابع چندجمله‌ای جهت درون‌یابی استفاده می‌کند و تنها تفاوت آن‌ها در این است که در این روش تعداد زیادی چندجمله‌ای بر داده‌های محدود در یک همسایگی معین برازش داده می‌شود (Eivazi and Mosaedi,2012:55).

توابع پایه شعاعی[5] (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 می‌باشند. این شبکه‌ها تقریباً به‌طور کلی از سه لایه شامل ورودی، مخفی و خروجی تشکیل شده‌اند. توابع پایه شعاعی منظم به‌عنوان تابع تحریک نورون‌های لایه مخفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. عموماً آموزش شبکه RBF به دو بخش تقسیم می‌شود. 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 می‌شود 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 می‌شود.

- کریجینگ[6]

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 می‌گیرد و در مرحله دوم زمین‌آمار با استفاده از روش‌های کریجینگ نسبت به برآورد و پیش‌بینی نقاط مجهول مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر خلاف روش‌های آمار کلاسیک، روش‌های زمین‌آمار ضمن در نظر گرفتن موقعیت مکانی نقاط و ارتباط بین آن‌ها از کارایی بیش‌تری برای تجزیه‌وتحلیل برخوردار می‌باشند. 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

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

متغیر مکانی Z به‌عنوان یک عدد تصادفی با یک توزیع احتمالاتی مشخص در نقطه‌ای دلخواه از منطقه مورد مطالعه است. در زمین‌آمار، تجزیه‌وتحلیل ساختار تغییرات مکانی متغیرها با استفاده از واریوگرام صورت می‌گیرد. واریوگرام، تغییرات فاصله‌ای یا ساختار تغییرپذیری یک متغیر خاص را نشان داده و از ابزارهای اساسی زمین‌آمار جهت بررسی تغییرات مکانی بارش سالانه می‌باشد. محاسبه واریوگرام به‌صورت رابطه (۲) خواهد بود.

$$\square(h) = \frac{1}{2n(h)}\sum_{i=1}^{n}[z(xi) - z(xi+h)]^2$$ رابطه (۲)

که در آن، $\gamma(h)$: مقدار نیم تغییرنما 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 مشاهده‌های متغیر x در موقعیت I و $z(x_{i+h})$ مقدار مشاهده‌ای متغیر در فاصله h از x_i است. به مقدار نیم تغیرنما به ازای h=0، اثر قطعه‌ای (C_0) گفته می‌شود. با افزایش h، مقدار نیم تغییرنما تا فاصله معینی اضافه می‌شود و پس از آن به حد ثابتی می‌رسد که به آن حد آستانه (C_0+C) می‌گویند. به فاصله بین نمونه‌ها که از آن به بعد مقادیر متغیر در نقاط مجاور تأثیر چندانی بر یکدیگر ندارند، دامنه یا شعاع تأثیر (A_0) گفته می‌شود. نیم تغییرنما که در بالا به آن اشاره شد؛ متداول‌ترین ابزاری است که همبستگی مکانی را در زمین‌آمار بررسی می‌کند. نیم تغییرنما میزان عدم تشابه را بین مقادیر یک ویژگی هنگامی که فاصله بین نمونه‌ها افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. در عمل برای محاسبه نیم‌تغییرنمای تجربی از رابطه (۲) استفاده می‌شود (Issak and Srivastava, 1989). آنالیز همبستگی مکانی بر اساس ساختار واریوگرام‌ها که وجود وابستگی مکانی را در بین متغیرهای بارندگی تعیین می‌کنند، صورت می‌گیرد. واریوگرام‌ها برای تعیین همبستگی و دامنه وابستگی مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کریجینگ، تکنیک درون‌یابی خطی است که بهترین برآورد خطی نااریب را برای متغیرهای مکانی فراهم می‌کند و مطابق رابطه (۳) می‌باشد (Goovaerts,1997).

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

که در آن $Z^*(x_0)$ مقدار تخمین زده شده متغیر Z در نقطه‌ای به مختصات X_0، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر Z در نقطه‌ای به مختصات x_i و λ_i وزن نسبت داده شده به متغیر Z در نقطه x_i و n تعداد مشاهدات می‌باشد (Delbari, 2013).

کریجینگ معمولی[۷] (OK): این روش یکی از روش‌های کریجینگ است که نسبت به دیگر روش‌های کریجینگ بیش‌تر استفاده می‌شود. در این روش مقادیر نقطه مجهول از مقادیر معلوم نقاط اطراف و از یک مدل واریوگرام به‌دست می‌آید.

7- Ordinary Kriging

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

کریجینگ ساده[8] (SK): در این نوع از کریجینگ میانگین داده‌ها معلوم و مستقل از مختصات فرض می‌شود در این روش دقت نسبت به کریجینگ معمولی کم‌تر بوده اما نتایج این روش هموارتر می‌باشد.

کریجینگ جهانی[9] (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 به‌همین 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.

رابطه (٤)

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

رابطه (٥)

$$MBE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(z^*(x_i) - z(x_i)\right)$$

رابطه (٦)

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

$z^*(x_i)$: 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

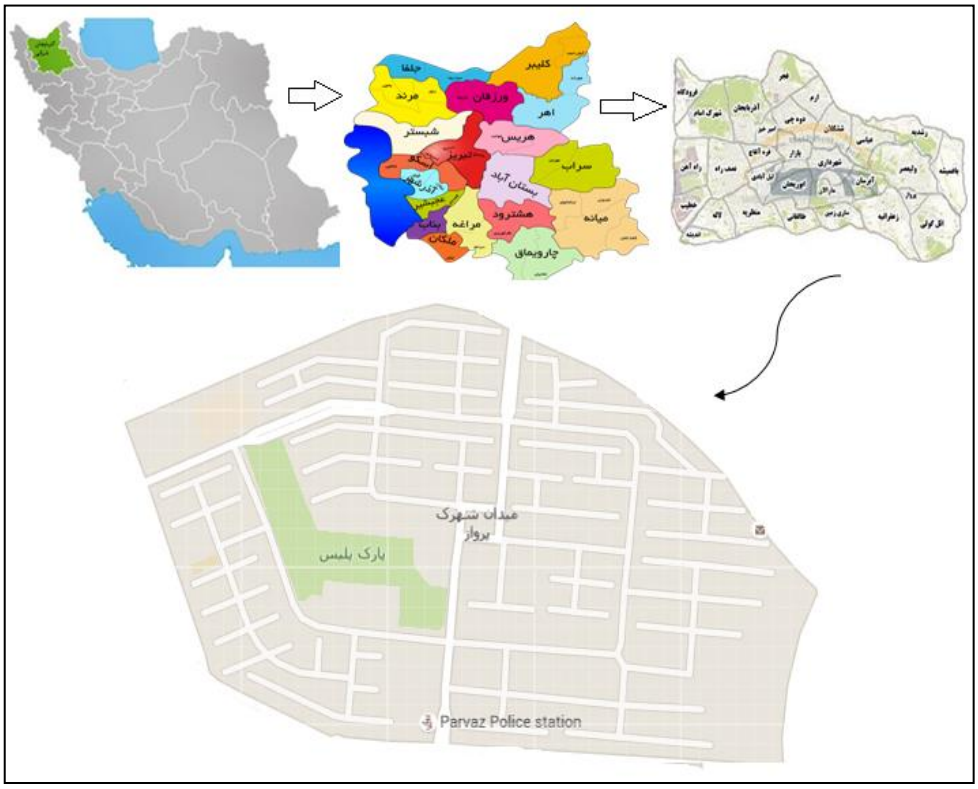
8- Simple kriging
9- Universal kriging

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

نزدیک‌تر باشد ایده‌آل‌تر است و همچنین هرچه مقادیر شاخص‌های MAE،RMSE و MBE به صفر نزدیک‌تر باشد مدل از دقت برآورد بیش‌تر و خطای کم‌تری 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 شمال‌شرق و شرق محتمل راندگی طبقات رسوبی نئوژن بر روی خود می‌باشد. ساختار اصلی در محدوده مورد مطالعه را تناوبی از ماسه‌سنگ هوازده و شن و ماسه همراه با قلوه‌سنگ می‌باشد. این ساختار دارای شکستگی حاصل از فعالیت‌های تکتونیکی می‌باشد. به‌طور عمده ماسه‌سنگ هوازده به همراه شن و ماسه متراکم بستر اصلی منطقه را تشکیل می‌دهد. در (شکل ۱ و ۲) به‌ترتیب موقعیت منطقه و گمانه‌های مورد مطالعه و در (جدول ۱) ویژگی داده‌های آماری نشان داده شده است.



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

جدول ۱- آمار توصیفی داده‌های مقاومت مجاز خاک

تعداد گمانه		میانگین		انحراف معیار	چولگی	ضریب تغییرات
۵۱		۲/۷۵		۰/۰۸۵	۰/٤	۰/۰۳

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

شکل ۲: وضعیت قرارگیری نقاط نمونه‌برداری شده در شهرک پرواز

یافته‌ها و بحث

نتایج روش‌های مختلف درون‌یابی از جمله IDW با توان ۱ الی ۳ و سکتورهای مختلف (کل، ٤ و ٤ با ٤٥ درجه و ۸)، GPI درون‌یابی چندجمله‌ای جهانی با توان‌های ۱ الی ۳، RBF با بخش‌های عملکردی اسپلاین کششی[10](SWT)، اسپلاین منظم کامل[11](CRS) و اسپلاین صفحه نازک[12] (TPS) به همراه سکتورهای چهارگانه و در آخر هم درون‌یابی چندجمله‌ای محلی (LPI) با توان‌های ۱ الی ۳ که به‌منظور 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 ارایه 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 هریک از توان‌ها

10- Spline with Tension
11- Completely Regularized Spline
12- Thin Plate spline

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

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

جدول ۲- نتایج روش فاصله وزنی معکوس

روش درون‌یابی	Power	Sector	MBE	MAE	NRMSE	R^2	NASH
IDW	۱	full	۰/۰۰۲۰۰	۰/۰۰۰۳۹۸	۰/۰۲۵۷۳	۰/۹۱۶	۰/۹۰۶
		٤	۰/۰۰۰۳۵۷	۰/۰۰۰٤۹۵	۰/۰۳۰۰۳	۰/۹۲۹	۰/۸۷۲
		٤/٤٥ d	۰/۰۰۲۰۵۲	۰/۰۰۰٤۹٤	۰/۰۲۹۹۰	۰/۹۲۳	۰/۸۷۳
		۸	۰/۰۰۰٤۷	۰/۰۰۰٦٤٦	۰/۰۳۷۸٤	۰/۹۲۲	۰/۷۹۷
	۲	full	۰/۰۰۱۸۰۹	۰/۰۰۰۳٦٤	۰/۰۲۳۰۷	۰/۹۲۸	۰/۹۲٤
		٤	۰/۰۰۱٦۷۱	۰/۰۰۰۳۷۹	۰/۰۲۳۸۲	۰/۹۳۲	۰/۹۱۹
		٤/٤٥ d	۰/۰۰۲۱۷۵	۰/۰۰۰۳۷۸	۰/۰۲٤۰۱	۰/۹۳۰	۰/۹۱۸
		۸	۰/۰۰۲۰٦۹	۰/۰۰۰٤۱٤	۰/۰۲٦۰۰	۰/۹۲۷	۰/۹۰٤
	۳	full	۰/۰۰۱۳۹٦	۰/۰۰۰۳٤۳	۰/۰۲۲۵۰	۰/۹۲۹	۰/۹۲۸
		٤	۰/۰۰۱٤۸۸	۰/۰۰۰۳٤۷	۰/۰۲۲۵٤	۰/۹۳۰	۰/۹۲۸
		٤/٤٥ d	۰/۰۰۱۵۷٤	۰/۰۰۰۳٤۸	۰/۰۲۲٦٦	۰/۹۲۹	۰/۹۲۷
		۸	۰/۰۰۲۰٦۹	۰/۰۰۰٤۱٤	۰/۰۲٦۰۰	۰/۹۲۷	۰/۹۰٤

روش چندجمله‌ای جهانی (GPI)

در این روش با توجه به (جدول ۳) توان‌های 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 ضعیف‌ترین نتیجه مربوط به توان ۱ است؛ بنابراین توان دو روش چندجمله‌ای جهانی برای اعتبارسنجی نهایی انتخاب می‌شود. در (شکل ٤) پهنه‌بندی مربوط به این مدل نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج روش چندجمله‌ای جهانی

روش درون‌یابی	Order	MBE	MAE	NRMSE	R^2	NASH
GPI	۱	-۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰٤۳۹	۰/۰۲۹٦٦	۰/۸۷۵	۰/۸۷۵
	۲	-۰/۰۰۰۱٦	۰/۰۰۰۳۵۳	۰/۰۲۲٦۲	۰/۹۲۷	۰/۹۲۷
	۳	-۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰۳۵۲	۰/۰۲۲۹٤	۰/۹۲۵	۰/۹۲۵

- روش توابع پایه شعاعی (RBF)

نتایج درون‌یابی روش تابع پایه شعاعی در سه مدل و چهار سکتور مختلف بررسی شده است. می‌توان گفت در بین سکتورها، سکتور کامل نسبتاً قوی‌تر عمل نموده و از بین مدل‌ها، مدل‌های SWT و CRS نتایج مشابهی با اختلاف

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

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 ٦) پهنه‌بندی توان ۲ روش چندجمله‌ای محلی می‌باشد.

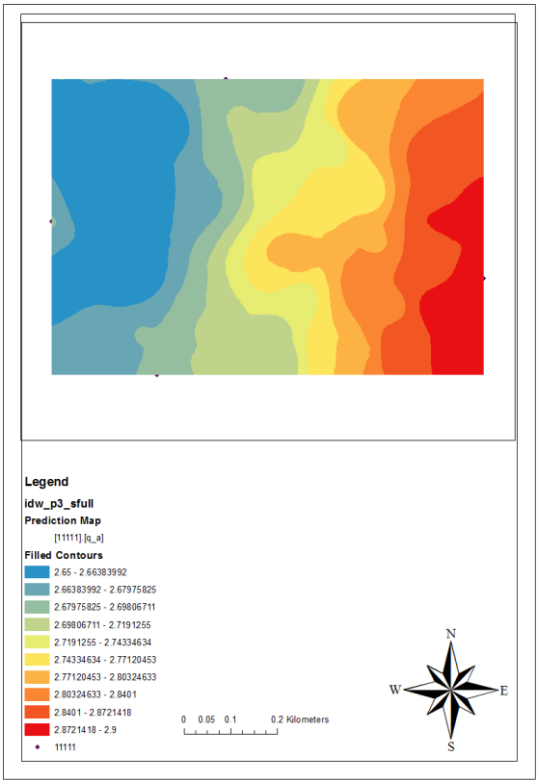
جدول ٤- نتایج روش توابع پایه شعاعی

روش درون‌یابی	Model	Sector	MBE	MAE	NRMSE	R^2	NASH
RBF	CRS	full	۰/۰۰۰٦٥۹	۰/۰۰۰۲۹۹	۰/۰۱۹۹۲	۰/۹٤٤	۰/۹٤۳
		٤	۰/۰۰۰٥۱۲	۰/۰۰۰۳۰۹	۰/۰۲۰٤۹	۰/۹٤۱	۰/۹٤۰
		٤/٤٥d	۰/۰۰۰۷٤۲	۰/۰۰۰۳۱۱	۰/۰۲۰٤۷	۰/۹٤۱	۰/۹٤۰
		۸	۰/۰۰۰٥۱۸	۰/۰۰۰۳۱۲	۰/۰۲۰۷۷	۰/۹٤۰	۰/۹۳۹
	SWT	full	۰/۰۰۰٥۲۹	۰/۰۰۰۳۰۲	۰/۰۱۹۹٤	۰/۹٤۳	۰/۹٤۳
		٤	۰/۰۰۰٥۲۱	۰/۰۰۰۳۰۷	۰/۰۲۰۱۷	۰/۹٤۲	۰/۹٤۲
		٤/٤٥d	۰/۰۰۰٦٦٥	۰/۰۰۰۳۰۹	۰/۰۲۰۱۹	۰/۹٤۲	۰/۹٤۲
		۸	۰/۰۰۰٥۰۱	۰/۰۰۰۳۰۹	۰/۰۲۰۳۱	۰/۹٤۱	۰/۹٤۱
	TPS	full	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۳۱٥	۰/۰۲۱٤٤	۰/۹۳۷	۰/۹۳٥
		٤	۰/۰۰۱۰۸۸	۰/۰۰۰۳۲۲	۰/۰۲۱٤٥	۰/۹۳۷	۰/۹۳٤
		٤/٤٥d	۰/۰۰۱۱۹٤	۰/۰۰۰۳۲٥	۰/۰۲۱٦۲	۰/۹۳٦	۰/۹۳۳
		۸	۰/۰۰۱۳۲٦	۰/۰۰۰۳۲٦	۰/۰۲۱٦٥	۰/۹۳٦	۰/۹۳۳

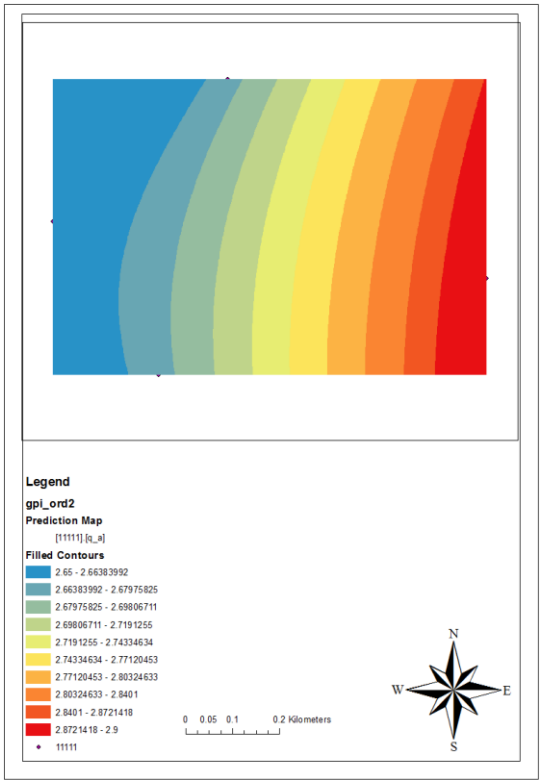
جدول ٥- نتایج روش چندجمله‌ای محلی

روش درون‌یابی	Order	MBE	MAE	NRMSE	R^2	NASH
LPI	۱	۰/۰۰۲٤٥	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۲۰۹	۰/۹۳۸	۰/۹۳۸
	۲	۰/۰۰۱٤۳	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۲۱٤	۰/۹۳٥	۰/۹۳٥
	۳	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۲۱۷	۰/۹۳۳	۰/۹۳۳

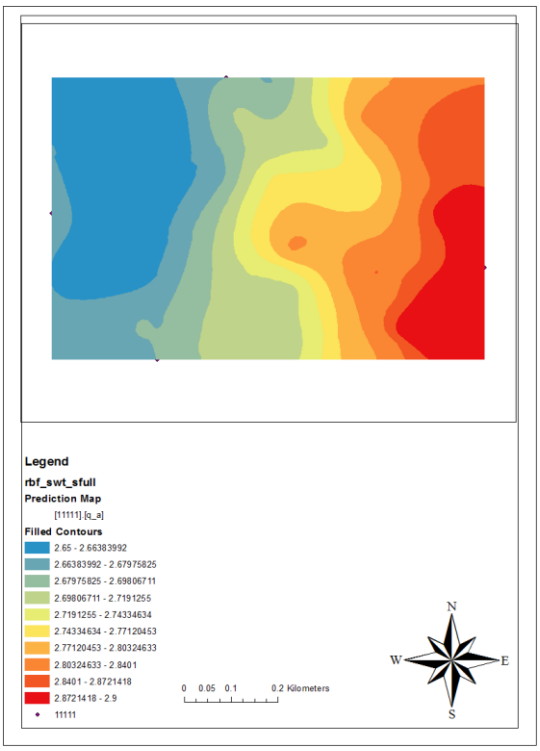
Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025



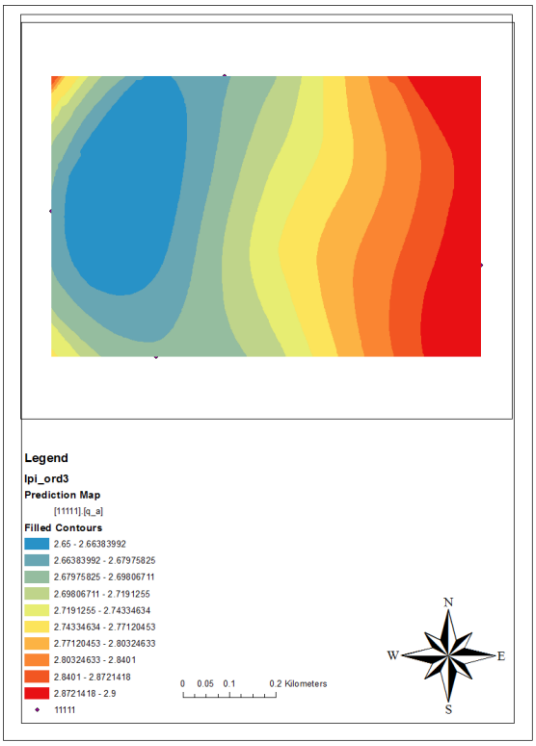
شکل ۳: روش IDW با توان ۳ با سکتور Full



شکل ٤: روش GPI به با توان ۲



شکل ٥: روش RBF، مدل SWT با سکتور Full



شکل ٦: روش LPI، Order = 3

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

- روش کریجینگ

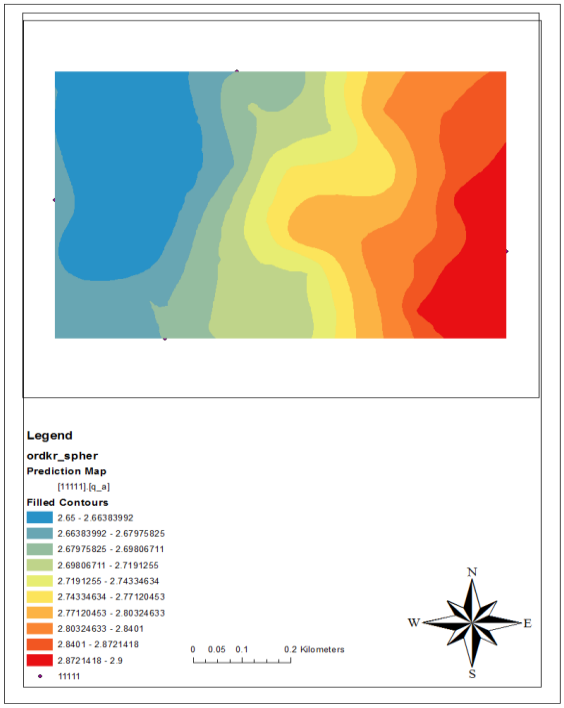
در روش کریجینگ سه روش اصلی معمولی، ساده و جهانی با چهار واریوگرام کروی، دایره‌ای، گوسی و نمایی نیز مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از برازش واریوگرام‌ها بر داده‌های مورد استفاده در (جدول ٦) ذکر شده است. با توجه به (جدول ٦) و با توجه به معیارهای ارزیابی ذکر شده، در کریجینگ معمولی و جهانی واریوگرام 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 اعتبار سنجی انتخاب شد و (شکل ۷) نقشه پهنه‌بندی مربوط به این مدل را نشان داده است.

جدول ٦- نتایج روش کریچینگ

row	kiriging	model	MBE	MAE	NRMSE	R^2	NASH
۱	ordinary	Circular	۰/۰۰۰۵٦	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۱۹	۰/۹٤٥	۰/۹٤٤
۲	ordinary	Spherical	۰/۰۰۰۵٤	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۱۹	۰/۹٤٥	۰/۹٤٤
۳	ordinary	Exponential	۰/۰۰۰۵۰	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۱۹	۰/۹٤٥	۰/۹٤٤
٤	ordinary	Gaussian	-۰/۰۰۰٦	۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۱	۰/۹۳۸	۰/۹۳۷
۱	simple	Circular	۰/۰۰۱۵۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۰	۰/۹٤	۰/۹۳۹
۲	simple	Spherical	۰/۰۰۱٦۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۰	۰/۹۳۹	۰/۹۳۸
۳	simple	Exponential	۰/۰۰۲۵۱	۰/۰۰۰۳٤	۰/۰۲۲	۰/۹۳٦	۰/۹۲۸
٤	simple	Gaussian	-۰/۰۰۰٤۹	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۲۱	۰/۹۳۲	۰/۹۳۲
۱	universal	Circular	۰/۰۰۰۵٦	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۱۹	۰/۹٤٥	۰/۹٤٤
۲	universal	Spherical	۰/۰۰۰۵٤	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۱۹	۰/۹٤٥	۰/۹٤٤
۳	universal	Exponential	۰/۰۰۰۵۰	۰/۰۰۰۲۹	۰/۰۱۹	۰/۹٤٥	۰/۹٤٤
٤	universal	Gaussian	-۰/۰۰۰٦	۰/۰۰۰۳	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 به‌کار گرفته شده، روش کریجینگ معمولی با مدل کروی با بالاترین ضریب همبستگی و کم‌ترین خطا بهترین نتایج را ارایه 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.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025



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	۰/۰۰۱٤	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	۰/۹٤۳	۰/۹٤۳
LPI	Order		۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۲۱	۰/۹۳۳	۰/۹۳۳
Kriging	Ordinary	Spherical	none	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۹	۰/۹٤۵	۰/۹٤٤

چنانچه اعتبارسنجی به طریقی دیگر انجام گیرد و ۲۰ درصد نمونه‌ها یعنی حدود ۱۰ نمونه از کل نمونه‌ها برای اعتبارسنجی انتخاب و به‌صورت 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 به‌صورت 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.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

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	۰/۰۱۷٤	۰/۰۲۰	۰/۹۲۹	۰/۹۲۸
GPI	Order		۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۷۷	۰/۰۲۰	۰/۹۳۱	۰/۹۲۱
RBF	SWT		full	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱٥٤	۰/۰۱۹	۰/۹٤۳	۰/۹٤۲
LPI	Order		۳	۰/۰۰۱۸	۰/۰۱٦۹	۰/۰۱۹	۰/۹۲۸	۰/۹۲۷
Kriging	Ordinary	Spherical	none	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱٥۰	۰/۰۱۸	۰/۹٤۳	۰/۹٤۳

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 قانع کننده‌ای 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.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

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 geostatiscal model (case study: parvaz minicity 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 ivestigation 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 geostatiscal (case study: municipality of Tabriz 2nd district)", 1st national conference on civil engineering and sustainable development. 2012/02/22,Islamic Azad university, Zibakenar 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.

Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir at 14:57 IRDT on Thursday August 28th 2025

- 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].