دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی علمی فضای جغرافیایی

سال نوزدهم، شماره‌ی ۶۷
پاییز ۱۳۹۸، صفحات ۱۱۲-۹۹

*رسول جانی[۱]
مجید حضرتی[۲]

بررسی تاثیر خوشه‌بندی در بهبود پهنه‌بندی مقاومت خاک در مناطق نزدیک گسل

تاریخ دریافت: ۱۳۹٦/۰۲/۱٤ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۱۱

چکیده

مطالعات ژئوتکنیکی با حداقل آزمایشات صحرائی می‌تواند جلوی بسیاری از مشکلات ناشی از حفاری مثل هزینه‌های کلان و انفجار لوله‌های گاز و ... را بگیرد. اخیرا روش‌های درون‌یابی با کاربردهای مختلف توسعه یافتند. با استفاده از روش‌های درون‌یابی فضایی می‌توان برخی پارامترهای ژئوتکنیکی را بدون انجام آزمایشات با تقریب تخمین زد. در اغلب تحقیقات در زمینه درون‌یابی از داده‌های استفاده می‌شود که ضریب تغییرات پایینی دارند؛ از این‌رو در مطالعه حاضر سعی شده است قدرت پهنه‌بندی روش‌های درون‌یابی برای داده‌های با ضریب تغییرات نسبتاً بالا مثل مقاومت مجاز خاک در نزدیکی گسل مورد آزمون قرار گیرد و تاثیر روش خوشه‌بندی در بهبود پهنه‌بندی ارزیابی شود. برای این منظور؛ روش‌های مختلف درون‌یابی مثل کریجینگ، عکس فاصله وزنی، توابع پایه شعاعی، چند جمله‌ای محلی برای پهنه‌بندی مقاومت مجاز خاک مورد آزمون قرار گرفتند و در ادامه روش تحلیل خوشه‌ای با تکنیک فاصله اقلیدسی با حداقل واریانس برای بهبود پهنه‌بندی استفاده شده است. شهرک ارم تبریز به‌دلیل نزدیکی به گسل اصلی تبریز وناهمگنی داده‌های ژئوتکنیکی به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. داده‌های مورد استفاده مربوط به مقاومت مجاز خاک ٤٠ حلقه گمانه در شهرک ارم شهر تبریز می‌باشد. پهنه‌بندی بار اول بدون خوشه‌بندی و بار دیگر با خوشه‌بندی کل منطقه به سه منطقه صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد روش خوشه‌بندی توانسته نتایج پهنه‌بندی را بهبود بخشیده و مقدار تخمین را حداقل ۲ درصد افزایش و ریشه میانگین مربعات خطا را حداقل ۵ درصد کاهش دهد. در بین روش‌های درون‌یابی، روش‌های چند جمله‌ای محلی قابلیت بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است.

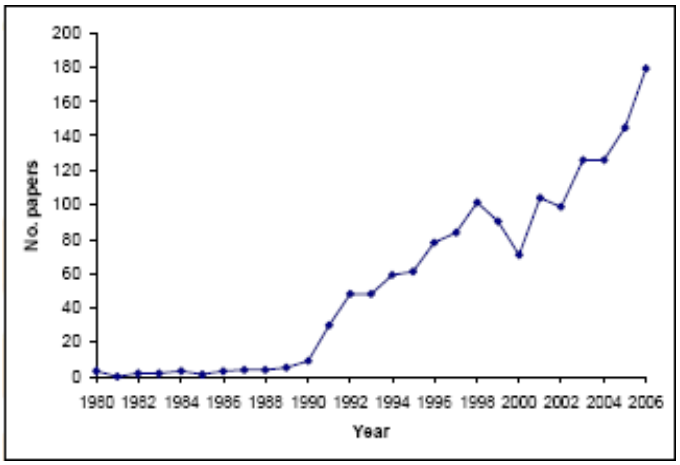
کلید واژه‌ها: چند جمله ای محلی، خوشه بندی، درون یابی فضایی، شهرک ارم، مقاومت مجاز خاک.

*۱- گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول). E-mail: Jani@iaut.ac.ir
۲- گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

مقدمه

آنالیز درون‌یابی‌فضایی به مفهوم بررسی پدیده‌های متغیر در زمان و مکان است و به‌طور کلی از طریق آنالیز می‌توان به راحتی یک نقشه یا سطح پیوسته‌ای از نقاط نمونه برداری شده را ایجاد نمود. همچنین آنالیزهای زمین‌آماری می‌توانند برای مدل‌سازی‌های مکانی در کاربردهای مختلف سیستم‌های اطلاعات مکانی نیز به‌کار برده شوند؛ به‌عبارت دیگر، این نوع آنالیز کاربردهای زیادی برای دید مدیریتی دارند به‌طوری که می‌توانند با معلوم بودن یک متغیر برای تعدادی نقاط در یک ناحیه یک دید کلی برای کل ناحیه داشته باشند. در حقیقت یک روش بهینه سازی محسوب می‌شود، بطوری که بدون هزینه و زمان می‌توانند برای نقاط مجهول ناحیه نیز مقدار همان متغیر را تخمین بزنند. این روش در بخش زمین شناسی و مطالعات ژئوتکنیکی بیش‌تر نمود پیدا کرده است، به‌طوری که طی مطالعه‌ای سطح مطالعات از سال (۱۹۸۰) تا (۲۰۰۶) مطابق شکل (۱) می‌باشد.



شکل ۱: تعداد مقالات منتشر شده در رابطه با زمین‌آمار و خاک (Zhou et al., 2007)

Figure 1: Number of papers published about geostatistic and soil (Zhou et al., 2007)

در آنالیز درون‌یابی فضایی مطالعه بیش‌تر روی متغیرهای است که در آن‌ها ضریب تغییرات ناچیز باشد؛ اما مشکل آنالیز درون‌یابی فضایی زمانی ظاهر می‌شود که اندازه و مقدار متغیر نقاط معلوم باهم تفاوتی زیادی داشته باشند مثل متغیرهای ژئوتکنیکی برای مناطقی که دارای تنوع خاک زیادی است. در این موارد تکنیک‌های آماری همچون روش خوشه‌بندی می‌تواند تا حدودی ضریب تغییرات داده‌ها را کاهش دهد. خوشه‌بندی به نحوی انجام می‌شود که هر گروه از خوشه‌ها دارای خاصیت مشترکی بیش‌تری باهم داشته باشند. خوشه‌بندی یکی از شاخه‌های یادگیری بدون نظارت می‌باشد و فرآیند خودکاری است که در طی آن، نمونه‌ها به دسته‌هایی که اعضای آن از لحاظ ویژگی‌های آماری و یا حتی فاصله مشابه یکدیگر می‌باشند؛ تقسیم می‌شوند که به این دسته‌ها، خوشه گفته می‌شود. برای مشابه بودن می‌توان معیارهای مختلفی همچون فاصله، حداقل واریانس و ... را در نظر گرفت. در زیر به تعدادی از تحقیقات با تکنیک درون‌یابی فضایی یا تحلیل خوشه‌ای در زمینه خاک اشاره می‌شود. Noorian et al (2014) به مطالعه پراکنش آلودگی

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

خاک به عناصر سنگین با استفاده از زمین‌آمار و خوشه‌بندی فازی در منطقه دیزج آباد استان زنجان پرداختند نتایج حاکی از قابلیت کریجینگ معمولی را نشان می‌دهد. Piri sahragard Piri (2016) تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک مراتع شهرستان خاش در هر دو لایه سطحی و عمقی را با استفاده از روش کریجینگ در نرم‌افزار GS^+ بررسی نموده و نتایج نشان داد که برای بیش‌تر خصوصیات خاک در هر دو لایه دارای مدل کروی و نمایی هستند. Faiz et al (2009) میزان آلودگی خاک در امتداد بزرگراه پررفت‌وآمد اسلام آباد پاکستان را بر اساس مطالعات زمین‌آماری مورد سنجش قرار دادند و نتیجه گرفتند که آلودگی خاک در اطراف این بزرگراه برای عناصر بیان شده از حد تعادل بالاتر است. Jani (2018) روش‌های مختلف درون‌یابی فضایی در پهنه‌بندی مقاومت خاک شهرک پرواز به‌کار گرفته و نتایج نشان داده است که 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. Yao et al (2013) چهار روش درون‌یابی فضایی را برای تخمین رطوبت خاک در حوضه‌های پیچیده را مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده است که روش کریجینگ هیبریدی با رگرسیون خطی برای حوضه پیچیده مناسب‌تر است. Nikpey et al (2017) پهنه‌بندی خصوصیات خاک گلستان را با استفاده از روش‌های درون‌یابی فضایی انجام دادند و نتایج نشان داد که روش کریجینگ و کوکریجینگ بهترین تخمین را ارایه می‌دهند. در این تحقیق به قابلیت خوشه‌بندی در بهبود پهنه‌بندی مقاومت مجاز خاک پرداخته می‌شود تا روش خوشه‌بندی علاوه بر ناحیه‌بندی منطقه مطابق تحقیقات سایر محققان به بالا بردن دقت پهنه‌بندی نیز کمک کند.

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 آزمایش‌های مختلف، مقدار پارامترهای مربوط به خصوصیات خاک تعیین می‌گردد. 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). مقاومت مجاز خاک با توجه به ابعاد فونداسیون می‌تواند اعداد متفاوتی به‌دست آید؛ از این‌رو در این تحقیق تنها پی‌های نواری که عرض به عمق پی برابر یک باشد در نظر گرفته شده است. گزارشات مطالعات ژئوتکنیکی مربوط به محدوده شهرک ارم 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 زمین‌آمار استفاده شده است که در زیر به روش کار آن‌ها پرداخته می‌شود.

فاصله معکوس وزنی[3] (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

3- Inverse Distance Weight

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

محلی است و با افزایش فاصله، از تاثیر آن کاسته می‌شود. بدین ترتیب نقاط نزدیک‌تر دارای وزن بیش‌تری هستند (Isaak and Srevastava, 1989). در این روش مقدار مقدار مجهول Z از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{z_i}{d_i^m}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^m}} \quad (۱)$$

که در آن m توان فاصله و d فاصله نقطه i ام تا نقطه مجهول z و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

روش چند جمله‌ای محلی[4] (LPI) : این روش نیز از تابع چندجمله‌ای جهت درون‌یابی استفاده می‌کند و در این روش تعداد زیادی چندجمله‌ای بر داده‌های محدود در یک همسایگی معین برازش داده می‌شود (Eivazi and Mosaedi, 2012: 65-78).

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 عمدتا یادگیری از نوع بدون نظارت است. 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]: در کریجینگ، تجزیه‌وتحلیل ساختار تغییرات مکانی متغیرها با استفاده از واریوگرام صورت می‌گیرد. واریوگرام، تغییرات فاصله‌ای یا ساختار تغییرپذیری یک متغیر خاص را نشان می‌دهد. محاسبه واریوگرام به‌صورت رابطه (۲) خواهد بود.

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

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 مشاهده‌ای متغیر x در موقعیت i و $z(xi + h)$ مقدار مشاهده‌ای متغیر در فاصله h از x_i است. برای اجرای روش‌های درون‌یابی بیان شده از نرم‌افزار Surfer استفاده شده است. در ضمن برای خوشه‌بندی داده‌ها از Matlab استفاده شده است که در زیر به به‌طور مختصر روش خوشه‌بندی توضیح داده می‌شود.

– تحلیل خوشه‌بندی: روش آماری تحلیل خوشه‌ای یک عنوان کلی برای گروهی از روش‌های ریاضی است که برای پیدا کردن شباهت بین افراد در یک مجموعه به‌کار می‌رود. خوشه با مفهوم شباهت درونی و انزوای بیرونی تعریف

4- Local polynomial Interpolation
5- Radial Basis Functions
6- Kriging

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

می‌شود. در تحلیل خوشه‌ای معمولاً P صفت بر روی N ماده اندازه‌گیری، سپس یک ماتریس N*P از داده‌های خام به ماتریس شباهت‌ها یا فاصله‌ها، تبدیل شده و با استفاده از یکی از روش‌های طبقه‌بندی، مواد را بر پایه شباهت بین آن‌ها گروه‌بندی می‌کنند. هدف از تحلیل خوشه‌ای اولاً پیدا کردن دسته‌های واقعی افراد و ثانیاً کاهش تعداد داده‌هاست.
برای اندازه‌گیری صفات بین داده‌ها از ضریب شباهت استفاده می‌شود برای محاسبه ضریب شباهت روش‌های مختلفی مانند ضریب متوسط فاصله‌ی اقلیدسی، ضریب تفاوت شکل، ضریب کسینوس و ... وجود دارند. روش به‌کار گرفته شده در این تحقیق، روش متوسط فاصله اقلیدسی است (Guler et al., 2002). از مزایای این ضریب آن است که اگر ماتریس داده دارای مقادیر از دست رفته‌ای باشد باز هم می‌توان از آن استفاده کرد. این ضریب e_{jk} از رابطه (۳) به‌دست می‌آید.

$$e_{jk} = \sum_{i=1}^{2} (X_{ij} - X_{ik})^2 \qquad \text{رابطه (۳)}$$

X_{ij} مقدار صفت i ام برای فرد j ام است.

برای خوشه‌بندی و قراردادن نمونه‌ها در گروه‌های جداگانه روش‌های مختلفی وجود دارد مانند روش‌های خوشه‌بندی همبستگی منفرد، همبستگی کامل، روش حداقل واریانس وارد و... که در اینجا از روش حداقل واریانس وارد استفاده می‌شود در این روش در هر مرحله از تحلیل، ترکیب هر جفت از نمونه‌ها ممکن است مورد توجه قرار گرفته و هر دو دسته‌ای که ادغام آن‌ها سبب افزایش اندازه‌ی واریانس به اندازه کم‌تر شود. در یک دسته قرار می‌گیرند؛ و این موضوع در مراحل بعدی گروه‌بندی نیز رعایت می‌گردد.

منطقه مورد مطالعه

شهرک ارم در منطقه ۱۰ شهرستان تبریز از جنوب و جنوب‌شرق به دشت تبریز و از شمال به حوضه اصلی آجی‌چای ختم می‌شود. از نظر زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی غالبا از سنگ‌های رسوبی دوران دوم تا رسوبات سست و جوان عهد حاضر (از قدیم به جدید) و همچنین از ریخت‌شناسی و مورفولوژی متفاوتی برخوردار است. از جمله ساختارهای موجود در منطقه می‌توان به سطوح گسل (اصلی و فرعی) چین‌خوردگی‌ها، گنبدهای نمکی در مقیاس کوچک، کراس بدینگ دگر شیب‌ها و ... اشاره نمود که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان، سیستم گسل اصلی شمال تبریز را نام برد. گسل فعال تبریز به همراه ۱۹ گسل فرعی، موجب ایجاد دیاپیرهای نمکی با چین‌خوردگی‌های ملایم در منطقه شده است (Zare et al., 2013). نزدیکی به گسل شهرک مورد مطالعه باعث شده است تا مقاومت مجاز خاک این منطقه ضریب تغییرات بالایی داشته باشد. در شکل (۲) موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به موقعیت قرارگیری گمانه‌ها مطابق شکل (۳) می‌باشد.

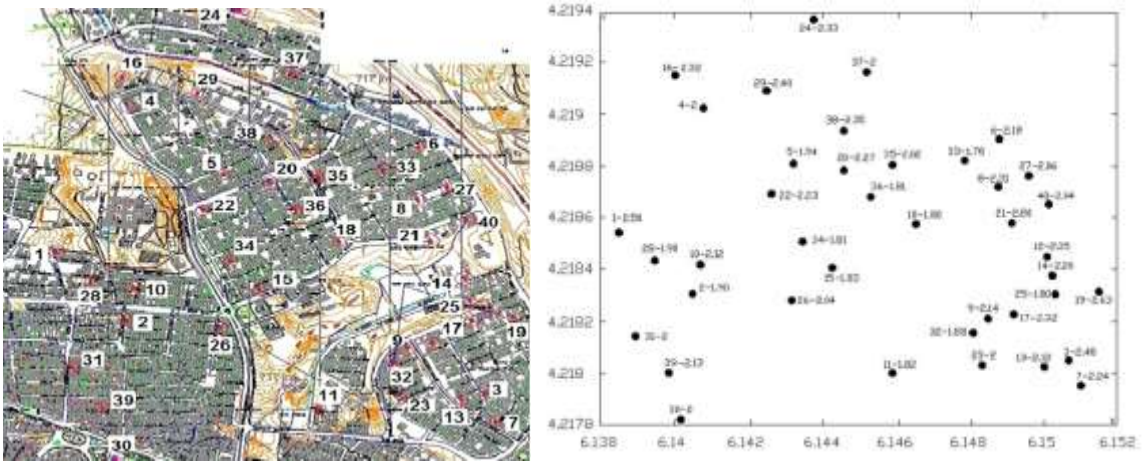
در این تحقیق از نتایج مطالعات ژئوتکنیک گمانه‌های احداث ساختمانی‌های مسکونی با پی‌های نواری استفاده شده است. با توجه به ارتباط ابعاد پی با مقاومت مجاز خاک لازم بود برای یک اندازه پی‌ها داده‌ها تهیه شود. از این‌رو تعداد ۴۰ گمانه با پی نواری با ابعاد ۱*۱ استفاده شده است.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]



شکل ۲: محدوده شهرک ارم در شهر تبریز، استان آذربایجان‌شرقی

Figure 2: Location of the studied area, (East Azarbaijan,Tabriz)



شکل ۳: وضعیت قرارگیری نقاط نمونه‌برداری شده در شهرک ارم

Figure 3: Location of sample points in the Eram town

مشخصات آماری مقاومت مجاز خاک داده‌های مورد استفاده شده مطابق جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱- آمار توصیفی داده‌های مقاومت مجاز خاک شهرک ارم

Table 1- Statistical Characteries data of the Eram town permissible soil resistance

شهرک	تعداد گمانه	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی
ارم	٤٠	۱/۷۸	۲/۵	۲/۰۹	۰/۲۰۵	۰/۱	۰/۱۸

یافته‌ها و بحث

در این تحقیق، ابتدا پهنه‌بندی مقاومت مجاز خاک برای کل شهرک ارم به‌صورت یکجا با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی انجام و دقت هر یک از روش‌ها برآورد می‌شود. در ادامه با استفاده از روش خوشه‌بندی، داده‌ها یا به عبارتی منطقه به سه قسمت تقسیم می‌گردد و برای هر سه منطقه به‌صورت مجزا پهنه‌بندی صورت می‌گیرد و دقت روش‌های

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

درون‌یابی نسبت به حالت اول ارزیابی می‌شود. هدف از این تحقیق اولاً بررسی تاثیر خوشه‌بندی در بهبود دقت پهنه‌بندی و ثانیاً یافتن بهترین روش درون‌یابی در داده‌های با ضریب تغییرات بالا می‌باشد. برای ارزیابی نتایج، ٦ نقطه از ٤٠ نقطه به‌عنوان نمونه‌های تست انتخاب شده‌اند. در انتخاب این نقاط سعی شده است که توزیع مناسبی نسبت به کل منطقه داشته و برای هر خوشه حداقل دو نمونه تست وجود داشته باشد. برای مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی نمونه‌های تست از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) استفاده شده است. نتایج تحلیل هر یک از روش‌های مختلف درون‌یابی به شرح زیر است.

روش فاصله وزنی معکوس (IDW): اعتبارسنجی شش نقطه در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج اعتبارسنجی به ازای توان فاصله ۰/۲۵ تا ۲ آمده است و مشاهده می‌شود به‌ترتیب توان‌های ۰/۲۵ بهترین نتایج را نشان می‌دهند و با افزایش توان مقدار خطا بیش‌تر می‌شود. در شکل (٤) نتایج پهنه‌بندی مربوط به توان ۰/۲۵ با نسبت تخمین ۹۰/٥٤ درصد نمایش داده شده است. روش چندجمله‌ای محلی (LPI): این روش نیز همانند IDW با توان‌های ۰/۲۵ الی ۲ بررسی شد. بیش‌ترین همبستگی مربوط به توان ۰/۲۵ بود و کم‌ترین آن مربوط به توان ۲ بود (جدول ۳). در این روش نیز مدل با توان ۰/۲۵ برای مرحله اعتبارسنجی انتخاب گردید در این توان نسبت تخمین ۹۲/۳ درصد به‌دست آمده است. شکل (٥) پهنه‌بندی خام این روش می‌باشد. روش تابع شعاعی (RBF): نتایج درون‌یابی این روش در جدول (٤) و شکل (٦) نشان داده شده است. نسبت تخمین برابر ۸۷/۱ درصد به‌دست می‌آید و مقادیر شاخص آماری برابر RMSE=۰/۳۳۷۱ و MAE=۰/۲۹۲۳ می‌باشد. روش کریجینگ (kriging): در جدول (٥) نتایج بررسی روش‌های مختلف کریجینگ آمده است. نتایج نشان می‌دهد نسبت تخمین ۸۸ درصد بوده و مقادیر شاخص آماری برابر RMSE= ۰/۳۰۳۰ و MAE=۰/۲٦٤۲ می‌باشد.

جدول ۲- نتایج روش فاصله وزنی معکوس

Table 2- Results of IDW method

ردیف	نقطه	Q_a واقعی	روش فاصله وزنی معکوس			
			توان ۰/۲۵	توان ۰/٥	توان ۱	توان ۲
۱	۸	۲/۳۱	۲/۰۹٥۱	۲/۰۹۰۸	۲/۰۸۰۸	۲/۰٦۲٦
۲	۲۰	۲/۲۷	۲/۰۸۱۳	۲/۰۷۱۱	۲/۰٤۷٥	۱/۹۹۹۹
۳	۱۷	۲/۳۲	۲/۰۸٦۲	۲/۰۸۲۱	۲/۰٦٥۳	۱/۹۹۸
٤	۱۲	۲/۳٥	۲/۰۸۸۳	۲/۰۸۳۹	۲/۰٦۳۲	۲/۰۷۱۱
٥	۱۰	۲/۱۲	۱/۹٥۲۱	۱/۹٥۱	۱/۹۳۹	۱/۹٦۲۱
٦	۳۹	۲/۱۳	۱/۹٥٥٥	۱/۹٥۸٦	۱/۹٤۳	۱/۹۳۲۱
RMSE			۰/۲۲۹٦	۰/۲۳۳٦	۰/۲٥۱۷	۰/۲۷٥٥
MAE			۰/۲۰٦۹	۰/۲۱۰٤	۰/۲۲٦۸	۰/۲٤٥۷

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

جدول ۳- نتایج روش چندجمله‌ای محلی

Table 3- Results of LPI method

ردیف	نقطه	Q_a واقعی	روش چند جمله ای محلی			
			توان ۰/۲۵	توان ۰/۵	توان ۱	توان ۲
۱	۸	۲/۳۱	۲/۱۳۳۸	۲/۱۱۰۵	۲/۰۸۲۹	۲/۰۶۲۲
۲	۲۰	۲/۲۷	۲/۰۸٤٤	۲/۰۷۱۸	۲/۰٤۸۷	۲/۰۱٤۹
۳	۱۷	۲/۳۲	۲/۱٤۳۷	۲/۱۳۸۱	۲/۱۳٦۲	۲/۱۱۳۸
٤	۱۲	۲/۳۵	۲/۱۵۱۷	۲/۰۹۷۵	۲/۰۹۰۲	۲/۰۷۵
۵	۱۰	۲/۱۲	۱/۹۷۲۳	۱/۹٦٦۳	۱/۹٦۱۵	۱/۹۵۲۱
٦	۳۹	۲/۱۳	۱/۹۸۵٦	۱/۹٤۱۲	۱/۹٤۰۳	۱/۹۳۲۱
RMSE			۰/۱۸۸۹	۰/۲۱٦۸	۰/۲۲۹۳	۰/۲٤۹۷
MAE			۰/۱۷۱٤	۰/۱۹۵۷	۰/۲۰٦۷	۰/۲۲٤۹

جدول ٤- نتایج روش توابع پایه شعاعی

Table 4- Results of RBF method

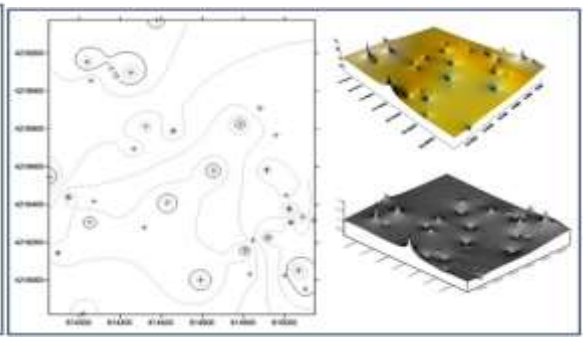
روش درون‌یابی	روش تابع شعاعی پایه					
نقطه	۸	۱۰	۱۲	۱۷	۲۰	۳۹
q_a	۲/۳۱	۲/۱۲	۲/۳۵	۲/۳۲	۲/۲۷	۲/۱۳
RBF	۱/۹٦۳٦	۱/۹٦۲٦	۱/۸۷۸۲	۲/۰٤۳۳	۱/۹۰۷۳	۱/۹۹۱۲

جدول ۵- نتایج روش کریجینگ

Table 5- Results of Kriging method

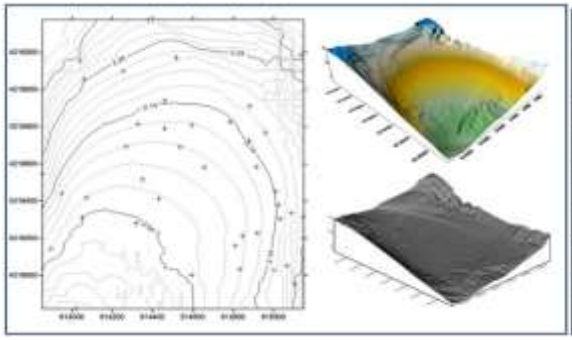
روش درون‌یابی	روش کریجینگ					
نقطه	۸	۱۰	۱۲	۱۷	۲۰	۳۹
q_a	۲/۳۱	۲/۱۲	۲/۳۵	۲/۳۲	۲/۲۷	۲/۱۳
کریجینگ	۲/۰٦۲۲	۱/۹۵٦۹	۱/۹۸۱	۱/۹۸۵۲	۱/۹٤٦۷	۱/۹۸۲۷

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]



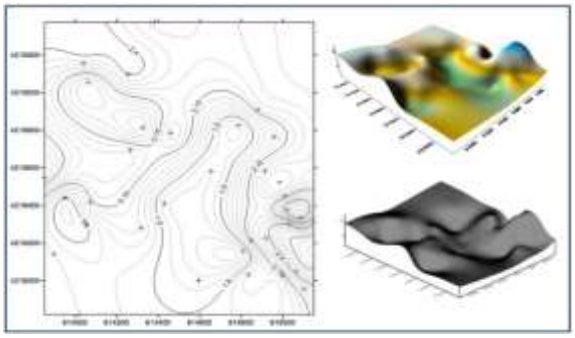
شکل ٤: پهنه‌بندی با روش فاصله وزنی معکوس با توان ۰/۲۵

Figure 4: Zoning by using IDW method with power= o.25



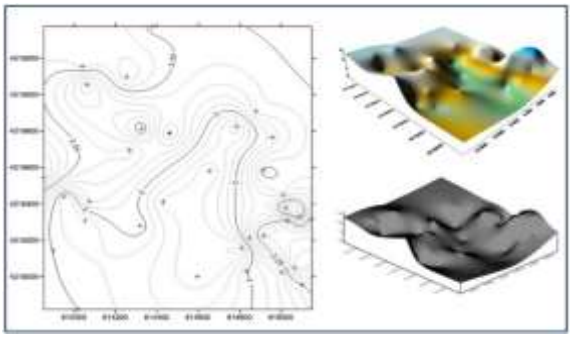
شکل ۵: پهنه‌بندی به روش چند جمله‌ای محلی

Figure 5: Zoning by using LPI method



شکل ٦: پهنه‌بندی به روش توابع پایه شعاعی

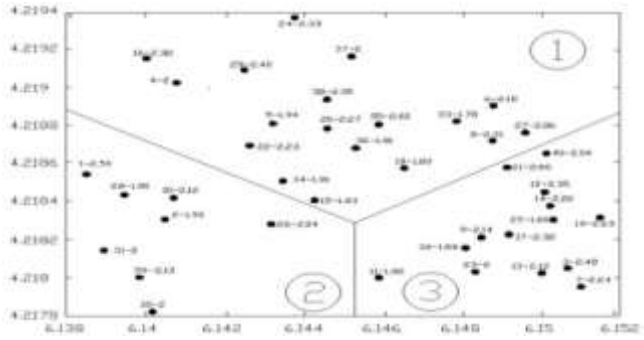
Figure 6: Zoning by using RBF method



شکل ۷: پهنه‌بندی به روش کریجینگ

Figure 7: Zoning by using Kriging method

خوشه‌بندی داده‌ها: داده‌های کل شهرک ارم با پیاده‌سازی خوشه‌بندی در متلب به سه قسمت تقسیم شده است. شکل (۸) خوشه‌بندی نقاط را نمایش می‌دهد. شش نمونه تست به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که از هر خوشه حداقل دو نمونه تست وجود داشته باشد. در این مرحله، پهنه‌بندی به‌صورت مجزا برای هر خوشه صورت می‌گیرد و با مقایسه مقادیر واقعی و محاسباتی نمونه‌های تست، دقت روش‌های درون‌یابی و تاثیر خوشه‌بندی ارزیابی خواهد شد.



شکل ۸: خوشه‌بندی نقاط توسط نرم‌افزار متلب

Figure 8: Clustering points by using Matlab software

روش فاصله وزنی معکوس (IDW): در جدول (٦) نتایج اعتبارسنجی به ازای توان فاصله ۰/۲۵ تا ۲ آمده است. با افزایش توان میزان خطا افزایش می‌یابد. توان ۰/۲۵ بهترین تخمین را دارد. درصد تخمین در توان فوق برابر ۹۲/۷ درصد می‌باشد. در شکل (۹) نقشه‌های پهنه‌بندی به روش فاصله وزنی معکوس با داده‌های اولیه، آورده شده است.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

روش چند جمله‌ای محلی (LPI): این روش نیز همانند IDW با توان‌های ۰/۵ الی ۲ بررسی شد. بیش‌ترین همبستگی مربوط به توان ۰/۲۵ بود (جدول ۷)؛ بنابراین مدل با توان ۰/۲۵ برای مرحله اعتبارسنجی انتخاب گردید. شکل (۱۰) پهنه‌بندی خام این روش می‌باشد نسبت تخمین برابر ۹٤/٦ درصد می‌باشد.

روش تابع شعاعی پایه (RBF): نتایج درون‌یابی این روش در جدول (۸) و شکل (۱۱) نشان داده شده است. نسبت تخمین برابر ۸۵/۱ درصد می‌باشد. مقادیر شاخص آماری به‌ترتیب برابر RMSE=۰/۸۸۲۵ و MAE= ۰/۳۳۸۱ می‌باشد.

روش کریجینگ (Kriging): در جدول (۹) نتایج روش‌های مختلف کریجینگ آمده است. نسبت تخمین برابر ۸۸ درصد است. نتایج ضعیفی از نظر همبستگی بین داده‌های واقعی و محاسباتی دیده می‌شود (RMSE=۰/۷۰٤۲ و MAE=۰/۲۷۳۵).

جدول ٦- نتایج روش فاصله وزنی معکوس

Table 6- Results of IDW method

ردیف	نقطه	Q_a واقعی	روش فاصله وزنی معکوس			
			توان ۰/۲۵	توان ۰/۵	توان ۱	توان ۲
۱	۸	۲/۳۱	۲/۱۱٦۳	۲/۰۳٦۸	۲/۰۱۷	۲/۰۰۱۸
۲	۲۰	۲/۲۷	۲/۰۸۵۹	۲/۰۷۱۱	۲/۰٤۷۵	۱/۹۹۹۹
۳	۱۷	۲/۳۲	۲/۱۰۱۱	۲/۰۹۱۲	۲/۰۸٤۱	۲/۰۷۲۵
٤	۱۲	۲/۳۵	۲/۰۹۹٦	۲/۰۷۵۱	۲/۰٦۲۲	۲/۰۵۵۵
۵	۱۰	۲/۱۲	۲/۰۵۸۳	۲/۰٤۷۵	۲/۰۲۱۹	۱/۹٦۹۹
٦	۳۹	۲/۱۳	۲/۰۵۵۹	۲/۰٤٦۷	۲/۰۳۰۸	۲/۰۰۹۸
RMSE			۰/۱۷۸۵	۰/۲۰۵۸	۰/۲۲۱	۰/۲٤۲۵
MAE			۰/۱٦۳۸	۰/۱۸۸٦	۰/۲۰٦۰	۰/۲۳۱۷

جدول ۷- نتایج روش چند جمله‌ای محلی

Table 7- Results of LPI method

ردیف	نقطه	Q_a واقعی	روش چند جمله‌ای محلی			
			توان ۰/۲۵	توان ۰/۵	توان ۱	توان ۲
۱	۸	۲/۳۱	۲/۱۷۲۱	۱/۹۵۳۷	۱/۹٦۰۳	۱/۹۷۳٤
۲	۲۰	۲/۲۷	۲/۱۲۵۲	۲/۰۷۱۸	۲/۰٤۸٦	۲/۰۱٤۸
۳	۱۷	۲/۳۲	۲/۱۷٤۵	۲/۰۹۸۹	۲/۰۸۱۲	۲/۰۷۵٦
٤	۱۲	۲/۳۵	۲/۱۸۲۱	۲/۰۷۱۳	۲/۰۵٤۳	۲/۰۳۱۱
۵	۱۰	۲/۱۲	۲/۰۵۹۹	۲/۰٦	۲/۰۲٤۷	۱/۹۸۱٤
٦	۳۹	۲/۱۳	۲/۰٦۱٦	۲/۰٤۱	۲/۰۲۸۵	۲/۰۱٦
RMSE			۰/۱۲۷۵	۰/۲۲۵۲	۰/۲۳٦۳	۰/۲٤۹۰
MAE			۰/۱۲۰۷	۰/۲۰۰۵	۰/۲۱۷۰	۰/۲۳٤٦

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

جدول ۸- نتایج روش توابع پایه شعاعی

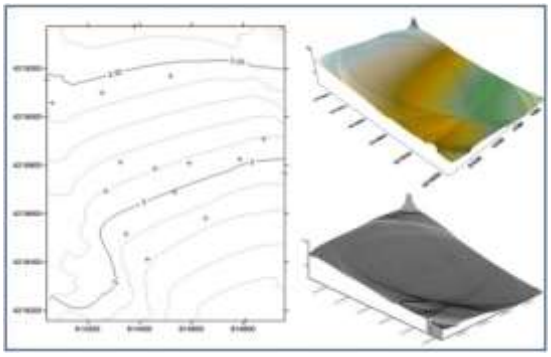
Table 8: Results of RBF method

روش درون‌یابی	روش تابع شعاعی پایه					
نقطه	۸	۱۰	۱۲	۱۷	۲۰	۳۹
q_a	۲/۳۱	۲/۱۲	۲/۳۵	۲/۳۲	۲/۲۷	۲/۱۳
RBF	۱/۸۹۶۱	۱/۹۶۲۹	۱/۹۵۶۵	۱/۷۷۰۵	۱/۸۹۸۱	۱/۹۸۷

جدول ۹- نتایج روش‌های مختلف کریجینگ

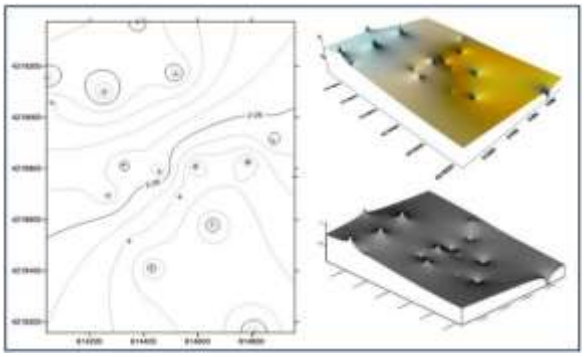
Table 9: Result of Kriging method

روش درون‌یابی	روش کریجینگ					
نقطه	۸	۱۰	۱۲	۱۷	۲۰	۳۹
q_a	۲/۳۱	۲/۱۲	۲/۳۵	۲/۳۲	۲/۲۷	۲/۱۳
kriging	۱/۹۲۳۱	۱/۹۵۶۷	۲/۰۲۱۲	۲/۰۳۱۱	۱/۹۴۳۶	۱/۹۸۳۲



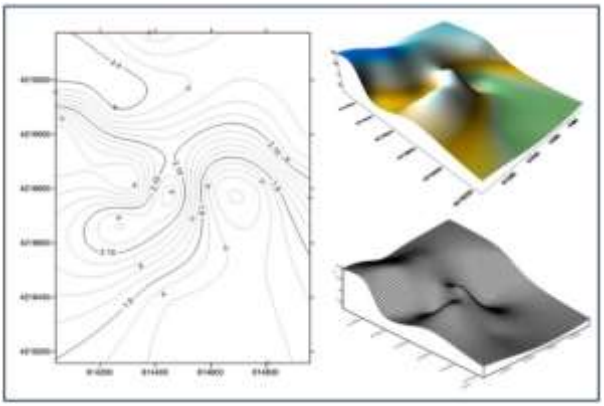
شکل ۹: پهنه‌بندی در حالت خوشه‌بندی با روش فاصله وزنی معکوس

Figure 9: Zoning with cluster using IDW method



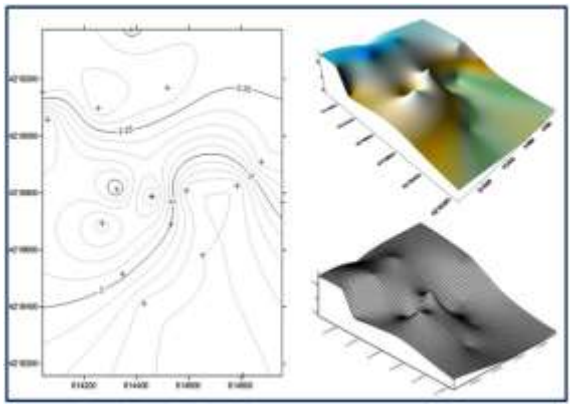
شکل ۱۰: پهنه‌بندی در حالت خوشه‌بندی با روش چندجمله‌ای محلی

Figure 10: Zoning with cluster using LPI method



شکل ۱۱: پهنه‌بندی در حالت خوشه‌بندی به روش تابع شعاعی پایه

Figure 11: Zoning with cluster using IDW method



شکل ۱۲: پهنه‌بندی در حالت خوشه‌بندی با روش کریجینگ معمولی

Figure 12: Zoning with cluster using Kriging method

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

نتایج مدل‌های منتخب هر یک از روش‌های درون‌یابی در دو حالت (با خوشه‌بندی و بدون خوشه‌بندی) مطابق جدول (۱۰) خلاصه شده است. در مقایسه انواع روش‌های درون‌یابی با توان‌های مختلف، روش چندجمله‌ای محلی با توان ۰/۲۵ بهترین تخمین با کم‌ترین خطا را دو حالت نشان می‌دهد. در مقایسه با نتایج سایر محققان در موارد مختلف من‌الجمله پهنه‌بندی مقاومت مجاز خاک شهرک پرواز (Ejlali et al., 2014) به نظر می‌رسد در مواردی که ضریب تغییرات داده‌ها کم باشد، روش‌های درون‌یابی کریجینگ و تابع شعاعی عملکرد بهتری دارند چون نقاط مجاور هر نقطه مجهول شباهت زیادی به نقطه مجهول دارد؛ ولی در مواردی مثل شهرک ارم که ضریب تغییرات نسبتا بالایی به خاطر نزدیکی به گسل دارند روش‌های کریجینگ و تابع شعاعی نمی‌توانند پهنه‌بندی خوبی با دقت قابل قبول ارایه نمایند و حتی مشاهده می‌شود که روش فاصله وزنی معکوس و چند جمله‌ای محلی با توان ۰/۲۵ بهترین نتایج را دارند؛ به عبارت دیگر، برای پهنه‌بندی بهتر در یک نقطه مجهول، آن نقطه تمایل دارد با نقاط دورتر ارتباط بیش‌تری داشته باشد تا نقاط نزدیک‌تر، چون نقاط نزدیک همخوانی چندانی با نقطه مجهول ندارند.

برای بیان بهتر این مطلب می‌توان شکل‌های پهنه‌بندی را با هم مقایسه کرد. در پهنه‌بندی‌های کریجینگ یا تابع شعاعی مشاهده می‌شود که شکل بسیار آشفته‌ای از تورفتگی‌ها و برآمدگی‌ها وجود دارد که در کنار هم به‌وجود آمده‌اند و نمی‌توان گفت که یک نقطه (تورفتگی) به نقطه مجاورش (برآمدگی) شبیه است در حالی که در پهنه‌بندی چندجمله‌ای محلی یک سطح هموار برای کل منطقه برازش داده شده است که داده‌ی هر نقطه به نقطه مجاورش بسیار نزدیک است. وقتی ضریب تغییرات داده‌ها کم است تغییرات ناگهانی در کنار هم وجود ندارد و یک سطح هموار وجود دارد. در این مواقع هر روش درون‌یابی که بتواند با داده‌های مجاور همبستگی بهتری ایجاد کند قوی‌تر است ولی در داده‌های با پراکندگی بالا، هر روش درون‌یابی که بتواند در بین پراکندگی این داده‌ها یک سطح هموار بین آن‌ها برازش دهد و بیش‌ترین همبستگی با کل داده‌های پراکنده را داشته باشد مقبول‌تر خواهد بود. برازش یک سطح هموار بین یک سری داده با نوشتن یک معادله چندجمله‌ای امکان‌پذیر خواهد بود. پایه روش درون‌یابی چندجمله‌ای محلی بر همین اساس است.

از طرف دیگر؛ اگر بتوان داده‌ها را به‌گونه‌ای به چند خوشه تقسیم کرد که داده‌های هر خوشه از نظر واریانسی و فاصله تفاوت کمی با هم داشته باشند، در آن صورت واریانس هر خوشه خیلی کم‌تر از واریانس کل داده‌ها خواهد بود. بدین‌ترتیب برازش یک سطح هموار برای هر خوشه بسیار دقیق‌تر از برازش سطح هموار به کل داده‌ها خواهد بود. از این‌رو چنانچه در جدول (۱۰) دیده می‌شود در حالت دوم یعنی به‌کارگیری روش خوشه‌بندی، درصد تخمین نسبت به حالت اول افزایش و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) کم‌تر شود؛ به عبارت دیگر، خوشه‌بندی داده‌ها باعث شده است که خطا در روش چندجمله‌ای محلی حدود ۵ درصد کم‌تر شود. در ضمن افزایش تعداد خوشه‌ها باعث بهبود دقت پهنه‌بندی نخواهد شد و باید به‌طور مناسب انتخاب شوند؛ بنابراین در مناطقی با ظرفیت باربری‌های متنوع مثل مناطق نزدیک گسل، درون‌یابی به تنهایی نمی‌تواند دقت قابل قبولی را داشته باشد و روش خوشه‌بندی ابزار خوبی برای بهبود دقت محسوب می‌شود.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

جدول ۱۰- نتایج اعتبارسنجی نمونه‌های تست

Table 10- Results validation for samples tests

حالت دوم: پهنه‌بندی بعد از خوشه‌بندی				حالت اول: پهنه‌بندی قبل از خوشه‌بندی						
Kriging	RBF	LPI	IDW	Kriging	RBF	LPI	IDW	Q_a واقعی	نقطه	ردیف
۱/۹۲۳۱	۱/۸۹۶۱	۲/۱۷۲۱	۲/۱۱۶۳	۲/۰۶۲۲	۱/۹۶۳۶	۲/۱۳۳۸	۲/۰۹۵۱	۲/۳۱	۸	۱
۱/۹۴۳۶	۱/۸۹۸۱	۲/۱۲۵۲	۲/۰۸۵۹	۱/۹۴۶۷	۱/۹۰۷۳	۲/۰۸۴۴	۲/۰۸۱۳	۲/۲۷	۲۰	۲
۲/۰۳۱۱	۱/۷۷۰۵	۲/۱۷۴۵	۲/۱۰۱۱	۱/۹۸۵۲	۲/۰۴۳۳	۲/۱۴۳۷	۲/۰۸۶۲	۲/۳۲	۱۷	۳
۲/۰۲۱۲	۱/۹۵۶۵	۲/۱۸۲۱	۲/۰۹۹۶	۱/۹۸۱	۱/۸۷۸۲	۲/۱۵۱۷	۲/۰۸۸۳	۲/۳۵	۱۲	٤
۱/۹۵۶۷	۱/۹۶۲۹	۲/۰۵۹۹	۲/۰۵۸۳	۱/۹۵۶۹	۱/۹۶۲۶	۱/۹۷۲۳	۱/۹۵۲۱	۲/۱۲	۱۰	۵
۱/۹۸۳۲	۱/۹۸۷	۲/۰۶۱۶	۲/۰۵۵۹	۱/۹۸۲۷	۱/۹۹۱۲	۱/۹۸۵۶	۱/۹۵۵۵	۲/۱۳	۳۹	٦
۸۸	۸۵/۱	۹٤/٦	۹۲/۷	۸۸	۸۷/۱	۹۲/۳	۹۰/٥٤	درصد تخمین		
۷۰٤۲	۰/۸۸۲۵	۰/۱۲۷۵	۰/۱۷۸۵	۰/۳۰۳۰	۰/۳۳۷۱	۰/۱۸۸۹	۰/۲۲۹٦	RMSE		
۰/۲۷۳۵	۰/۳۳۸۱	۰/۱۲۰۷	۰/۱٦۳۸	۰/۲٦٤۲	۰/۲۹۲۳	۰/۱۷۱٤	۰/۲۰٦۹	MAE		

نتیجه‌گیری

در اکثر تحقیقات به عمل آمده در زمینه استفاده از روش‌های درون‌یابی در پهنه‌بندی متغیرهای مختلف معمولاً از داده و متغیرها استفاده می‌شود که پراکندگی و ضریب تغییرات بالایی نداشته باشند از این‌رو در مقاله حاضر با بررسی مقاومت مجاز خاک در نزدیکی گسل سعی شد با داده‌های با ضریب تغییرات بالاتر برخورد شود تا کارایی روش‌های درون‌یابی بیش‌تر ارزیابی شود و برای بالا بردن کارایی روش‌های درون‌یابی، روش خوشه‌بندی مورد آزمون قرار گرفت. نتایج حاکی از این است که در داده‌های با ضریب تغییرات بالا، روش چندجمله‌ای محلی و فاصله وزنی معکوس عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش‌های کریجینگ و تابع شعاعی پایه از خود نشان می‌دهد در حالی که با بررسی تحقیقات پیشین روش کریجینگ و تابع شعاعی به‌عنوان روش پهنه‌بندی انتخاب می‌شوند. همچنین خوشه‌بندی توانست دقت پهنه‌بندی را افزایش و خطای آن را حداقل ۵ درصد در این مطالعه موردی کاهش دهد.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]

References

- Braja, M. D., (1941), "***Principles of foundation engineering***", pws-kent publishing Company: Boston.
- Ejlali, R., Jodeiri, M., Safapour, A., (2014), "Zoning of ground resistance using geostatiscal model (case study: parvaz minicity in Tabriz)", 1st naional conference on soil mechanics and foundation engineering, 3-4 December 2014, Shahid Rajaei Teacher Training University,Tehran, Iran. [In Persian].
- Piri Sahragard, H., Piri, J., (2016), "Analysis of spatial structure of some soil properties using geostatistical methods (case study: west rangelands of Taftan- khash)", ***Journal of Rangeland***, 10 (2): 224-236.
- Jani, R., (2018), "Preference assessment of spatial interpolation methods on soil resistance zoning (Case study: parvaz town)", ***Journal of Geographical Space***, 18 (61): 125-140. [In Persian].
- Zare, M., Nabi, A., (2013), "Geomorphologic specifications of northern Tabriz fault", ***Journal of Scientific Research Quarterly of Geographical Data*** (Sepeher), 22 (85): 68-74. [In Persian].
- 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].
- Noorian, M., Delavar, M. A., Shekari, P., Abdolahi, S., (2014), "Study of distribution of soil pollution by heavy metals with geostatiscal and fuzzy clustering in Dizajabad area, Zanjan province", ***Journal of Water and Soil Conversation***, 21 (1): 125-143. [In Persian].
- Faiz, Y., Tufail, M., Tayyeb Javed, M., Chudhry, M. M., Siddique, N., (2009)," Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along Islamabad expressway, Pakistan. Microchem", ***Microchemical Journal***, 92: 186-192.
- Guler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E.,Turner, A. K., (2002), "Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data", ***Hydrogeology journal***, 10: 455-474.
- Isaak, E. H., Srevastava, R. M., (1989), "***An introduction to applied geostatistics***", Oxford University Press: New York.
- Nikpey, M., Sadegikia, M., Nategi, M. B., (2017), "Comparison of spatial interpolation methods for mapping the qualitative properties of soil", ***Advances in Agricultural Science Journal***, 5 (3): 1-15.
- Yao, X., Fu, B., Lu, Y., Sun, F., Wang, S., Liu, M., (2013), "Comparsion of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment", ***Journal of Plos***, 8 (1): 54-60. [On line]: https://doi.org/10.1371.
- Zhou, F., Guo, H. C., Ho, Y. S., Wu, C. Z., (2007), "Scientometric analysis of geostatistics using multivariate method", ***Scientometric Journal***, 73: 265-279.

[Downloaded from geographical-space.iau-ahar.ac.ir on 2026-10-31]