



پهنه‌بندی ژئوتکنیکی خاک شهر اهواز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

علی نوروزی محمدی^۱، نوید خیاط^{۱*}، احد نظریور^۲

۱- گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲

کلمات کلیدی:

پهنه بندی خاک
زاویه اصطکاک داخلی
چسبندگی خاک
سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)
خاک اهواز

خلاصه: پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی ژئوتکنیکی خاک شهر اهواز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد. با جمع آوری اطلاعات ژئوتکنیکی حاصل از ۳۳۰ گمانه حفاری شده تا عمق ۲۰ متری و با بکارگیری نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) پارامترهای ژئوتکنیک خاک در شهر اهواز پهنه‌بندی گردید. عوامل تاثیرگذار بر ظرفیت باربری خاک شامل چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص خاک جهت پهنه‌بندی انتخاب شدند. نقشه درون‌یابی پهنه‌بندی شده زاویه اصطکاک داخلی در شهر اهواز نشان داد که با افزایش عمق خاک، زاویه اصطکاک داخلی افزایش داشته است. با افزایش عمق، زاویه اصطکاک داخلی افزایش داشته است، بطوری که در عمق ۱۰ متر، در اغلب گمانه‌های حفر شده در مناطق مذکور، میزان زاویه اصطکاک داخلی به ۴۱ درجه افزایش داشته است. بطوریکه در در محدوده شمال شرق اهواز بیشترین میزان زاویه اصطکاک داخلی وجود ثبت شد. نتایج حاصل از نقشه پهنه‌بندی چسبندگی بر اساس گمانه‌های حفر شده نشان داد که ارتباط آماری بین این مولفه ژئوتکنیکی و افزایش عمق وجود ندارد. همچنین بررسی وزن مخصوص خاک بر اساس گمانه‌های حفر شده و نقشه درون‌یابی پهنه‌بندی شده در تحقیق حاضر نشان داد که با افزایش عمق خاک، میانگین وزن مخصوص افزایش معنی‌داری داشته است و از ۱/۶ درصد در عمق ۲ متر به ۴۷/۹ درصد در عمق ۱۰ متری رسیده است. بطور کلی این مولفه‌ها به ویژه وزن مخصوص، با تعیین ظرفیت باربری خاک مرتبط بوده می‌توان از آنها برای امکان‌سنجی انتخاب بهترین گزینه مکانی جهت احداث پروژه‌های خاص بهره‌گیری نمود.

۱- مقدمه

که در برنامه‌ریزی، اکتشاف طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سازه‌های مهندسی و پروژه‌های عمرانی و معدنی به کار رفته و ایمنی و کارایی موثر آن‌ها را تضمین می‌کنند [۴]. این اطلاعات دامنه گسترده‌ای از داده‌ها را، در زمینه‌های مکانیک خاک، مکانیک سنگ، منابع آب، لرزه‌خیزی، مهندسی عمران و زمین‌شناسی مهندسی و زیست محیطی، شامل می‌شوند [۵ و ۶]. داده‌های ژئوتکنیکی هر پروژه عمرانی یا معدنی در طی مراحل چند و توسط روش‌های مختلف اکتشاف سطحی و زیرسطحی، تولید می‌شوند [۲۸]. این داده‌ها ممکن است به صورت خام بوده و یا داده‌هایی باشند که مورد تغییر و تفسیر قرار گرفته‌اند [۷]. نقشه‌های پهنه‌بندی ژئوتکنیکی از فاکتورهای مهم و ضروری جهت تحقق توسعه پایدار شهری به‌شمار می‌آید [۲۹]. کاهش خسارات در پروژه‌های عمرانی و اتفاقاتی نظیر فرونشست‌های زمین و غیره نیازمند تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی ژئوتکنیکی دقیق است [۸]. نقشه‌های پهنه‌بندی ژئوتکنیکی با فراهم کردن اطلاعات تفصیلی از مشخصات فیزیکی و مکانیکی بستر، علاوه بر اینکه نوعی پیش‌آگاهی در خصوص شرایط

یکی از بخش‌های کلیدی در پروژه‌های مهندسی عمران، مطالعات ژئوتکنیک می‌باشد. این مطالعات، تاثیرات اقتصادی و کیفی در سازه‌ها و افزایش ایمنی ساکنین را در مراحل ساخت و بهره‌برداری به همراه خواهند داشت [۱]. سیستم‌های اطلاعات مکانی که بستری برای شبیه‌سازی دنیای واقعی است به کمک توابع تحلیلی خود قادر به ذخیره‌سازی، مدیریت، به هنگام‌سازی، پردازش، تجزیه و تحلیل‌های پیچیده مکانی و غیرمکانی مدل‌سازی، پیش‌بینی و نمایش می‌باشد [۲]. دامنه استفاده از داده‌های ژئوتکنیکی با گسترش سیستم‌های اطلاعات مکانی، به طور عمده‌ای در رشته‌های دیگر، از جمله زیرساخت‌های شهری، زیست محیطی و تجزیه و تحلیل پتانسیل خطر و توسعه پایدار در حال رشد می‌باشد [۳].

داده‌های ژئوتکنیکی^۱، آن دسته از اطلاعات مربوط به زمین هستند

1 Geotechnical data

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Navid.khayat@gmail.com



تعیین مختصات UTM گمانه‌ها، پایگاه داده تشکیل شد و در فاز سوم با استفاده از قابلیت‌های GIS، امکان پهنه‌بندی ژئوتکنیکی منطقه فراهم گردید. پهنه‌بندی حاصل نشان داد بیشترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی در غرب و در مناطق محدودی در شرق منطقه دیده می‌شود. همچنین وزن مخصوص خاک بر خلاف زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به مراتب دارای نوسان کمتری می‌باشد و در مناطق شمالی، دارای مقادیر بیشتری هستند.

رزم‌یار^۴ و Eslami^[۱۳] به پهنه‌بندی ژئوتکنیکی منطقه شرق و غرب تهران پرداختند. از آنجا که با توجه به افزایش جمعیت در تهران در مناطق خاص نیاز به شناسایی بهتر ویژگی‌های خاک برای ساخت‌وساز امن‌تر بوده، در این مطالعه، در این مناطق، پهنه‌بندی انجام شده است. داده‌های به دست آمده از گمانه‌های ژئوتکنیکی حفاری شده توسط شرکت‌های مختلف در منطقه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. عمق حفاری گمانه‌ها بین ۱۵ تا ۳۶ متر قرار دارد. نتایج نشان می‌دهد که نوع خاک در این مناطق درشت‌دانه است و زاویه اصطکاک داخلی خاک بین ۳۰ تا ۳۷ درجه است. خاک درشت‌دانه این منطقه در رده خاک متوسط و متراکم قرار دارد.

بطور کلی امروزه مطالعات ژئوتکنیکی جزء جدائی‌ناپذیر در هر پروژه عمرانی می‌باشد، از آنجایی که داشتن اطاعات کافی در مورد اعماق مختلف خاک بدون انجام مطالعه مکانیک خاک امکان پذیر نمی‌باشد و انجام طراحی صحیح سازه‌ها مستلزم اعمال مقادیر مناسب ظرفیت باربری خاک می‌باشد این کار جزء با اطلاعات ژئوتکنیکی که از گمانه‌های حفر شده به دست می‌آید، مقدور نمی‌باشد [۱۴ و ۱۵]. با توجه به اینکه حفر گمانه و انجام مطالعات لازم برای یک پروژه کوچک از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد و اغلب کارفرمایان از انجام این قسمت از پروژه امتناع می‌ورزند، با توجه به دسترسی نرم افزارهای مبتنی بر سیستم اطاعات جغرافیایی (GIS) از اطاعات گمانه‌های حفر شده و بکارگیری این اطاعات و قابلیت‌های نرم افزارهای نوشته شده GIS از قبیل ArcGIS می‌توان پارامترهای ژئوتکنیکی موجود در سطح شهر اهواز را پهنه‌بندی نمود و بدین ترتیب برای هر منطقه با توجه به پهنه‌بندی صورت گرفته، پارامترهای مناسب ژئوتکنیکی را تخمین مناسبی زد و در اختیار مهندسین طراح گذاشت [۱۶]. لذا در این تحقیق با حفر ۳۳۰ گمانه و نمونه‌گیری از خاک و انجام آزمایش‌های مناسب تقریب قابل قبولی از پارامترهای مختلف نقاط مختلف شهر اهواز ارائه می‌شود. در این پژوهش سعی شده است با مختصات دار

پهنه‌های مختلف منطقه ارائه خواهد کرد، می‌تواند دورنمایی از نقاط مستعد برای اجرای پروژه‌های عمرانی خاص نیز ارائه کند [۳۰]. در واقع می‌توان به کمک این نقشه‌ها، شرایط انواع ساخت و سازهای شهری در نقاط مختلف را بررسی و با توجه به شرایط لایه‌های خاک، بهترین شکل توسعه شهری را در پیش گرفت [۹]. در فاز مطالعات اولیه از طراحی یک پروژه عمرانی، اطاعات دقیقی از جنس و مقاومت خاک، شیب، توپوگرافی، سطح آب زیرزمینی، محل احداث و ... مورد نیاز می‌باشد و بهره‌گیری از سیستم اطاعات مکانی در جمع‌آوری این اطاعات و نهایتاً تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای مقاومتی جهت استفاده همزمان از داده‌های مختلف، مانند مطالعات مکانیک خاک، توپوگرافی و ... باعث کاهش هزینه انجام مطالعات می‌شود [۳۱]. مطالعات متفاوتی تاکنون در خصوص روش‌های پهنه‌بندی، نوع نقشه‌های پهنه‌بندی، روش‌های درونیابی در مهندسی ژئوتکنیک و زمین‌شناسی و بهترین روش برای درونیابی در موضوعات مختلف انجام شده که در ادامه به چند مورد از آنها اشاره می‌شود.

۲- پیشینه مطالعاتی

احمد^۱ و همکاران [۱۰] با استفاده از GIS پارامترهای خاک شهر Pe-shawar پاکستان را پهنه‌بندی نمودند. این تحقیق به‌طور کلی با هدف تهیه نقشه‌هایی قابل استفاده در ارزیابی ژئوتکنیکی پروژه‌های ساختمانی در مناطق شهری Peshawar انجام شده است. اطاعات ژئوتکنیکی خاک منطقه، از آزمایشگاه‌های مهندسی مربوط به خاک و راهسازی و دانشگاه‌های فنی مهندسی شهر Peshawar جمع‌آوری شد [۱۰].

شرما^۲ و شافی [۱۱] با استفاده از GIS به ارزیابی خاک شهر گواهاتی پرداختند. با استفاده از اطاعات ژئوتکنیکی خاک زیرسطحی این شهر یک بانک اطلاعاتی تهیه شد و پارامترهای عدد نفوذ استاندارد، سرعت موج برشی و سطح آب زیرزمینی شهر در قالب نقشه‌های مبتنی بر GIS برای ارزیابی مقدماتی خاک پهنه‌بندی شد.

متقی^۳ و Alesheikh [۱۲] به پهنه‌بندی ژئوتکنیکی شهر مهاباد با استفاده از GIS پرداخت. در این پژوهش از گزارشات ژئوتکنیک ۵۰ گمانه مربوط به منازل مسکونی حفاری شده در سطح شهر و از روش معکوس فاصله (IDW) استفاده شده است. برای اجرای تحقیق، در فاز اول داده‌های مورد نیاز از گزارشات ژئوتکنیک گردآوری گردید. در فاز دوم با

1 Ahmad
2 Sharma
3 Mottaqi

ژئوتکنیک کشور و گزارشات خط لوله شهر اهواز و اطلاعات ساختمان تلمبه خانه و فاضلاب شهری اهواز و پروژه‌های ساختمانی استفاده شده است.

روش‌های درون‌یابی برای ارائه بهترین پردازش منطقه‌ای با توجه به توزیع نرمال داده‌های خام استفاده می‌شود [۱۷]. کلیه داده‌های خام در صورت داشتن چولگی بایستی با استفاده از توابع تحلیلی تبدیل به نرمال شوند. ابزار هیستوگرام در توابع توزیعی یک متغیره برای هر خصوصیت جهت برآزش نرمال بودن داده‌ها به کار برده می‌شود [۱۸]. این نمودار می‌تواند نقاط پرت را در یک توزیع احتمالاتی نشان دهد و با انتخاب و حذف آن توزیع بهتری را برای پهنه‌بندی در اختیار کاربر قرار دهد [۱۹]. در این پژوهش از روش درون‌یابی برای پهنه‌بندی چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص خاک استفاده گردید. برای این امر ابتدا در یک محدوده مشخص، باید داده‌ها در محیط نرم‌افزار Microsoft Excel به صورت دو ستون X و Y به عنوان مختصات وارد شوند. بدین منظور در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10 داده‌های تنظیم شده از محیط Excel فراخوان می‌گردد و ضمن شناخته شدن فرمت داده‌ها در این محیط، مخصوصاً در این مرحله UTM^۱ نقاط و فرمت اعداد X و Y که مهمترین قسمت ورودی داده‌ها به محیط GIS می‌باشند، باید برای نرم‌افزار شناخته شود. داده‌های گمانه ژئوتکنیکی، آزمون‌های آزمایشگاهی و آزمون‌های برجا، به ترتیب متداول‌ترین داده‌های ژئوتکنیکی مورد استفاده در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشند. بر اساس انتخاب روش درون‌یابی وزن‌دهی با استفاده از فاصله معکوس (IDW)^۲، با توجه به تحلیل‌های قید شده، برای اطمینان از نقشه‌های پهنه‌بندی شده، در پنج نقطه از محدوده شهر اهواز که نمونه‌برداری نشده، عملیات حفاری و آزمایشات صحرائی صورت گرفته و مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک، عدد چسبندگی و وزن مخصوص خاک در عمق ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متری برداشت و محاسبه شد. این اعداد با مقادیر تعیین شده حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی مقایسه شده است. نتایج حاکی از دقت و صحت نقشه‌های ایجاد شده در اثر درون‌یابی IDW می‌باشد. در این پژوهش، با جمع‌آوری اطلاعات ژئوتکنیکی حاصل از ۳۳۰ گمانه حفاری شده تا عمق ۱۰ متری و با بکارگیری نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) پارامترهای ژئوتکنیک خاک در شهر اهواز پهنه‌بندی گردید (شکل ۱). در شکل ۲ موقعیت گمانه‌های حفر شده بصورت سه بعدی نشان داده شده است.

کردن مکان مطالعات ژئوتکنیک سازه‌های مسکونی و ایجاد پایگاه داده مناسب، با بهره‌گیری از قابلیت‌های سیستم‌های اطلاعات مکانی، تجسم کلی از وضعیت ژئوتکنیک منطقه، با تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی در مقیاس بزرگ ارائه گردد. بنابراین با توجه به استراتژیک بودن شهر اهواز از لحاظ تأسیسات‌های نظامی و صنعتی و وجود مخازن نفتی و گازی عظیم، همچنین ماسه‌ای بودن و تراز سطح آب زیر زمینی بالا باعث گردیده مطالعه دقیق‌تری به لحاظ استعداد ژئوتکنیک خاک انجام گردد.

۳- منطقه مورد مطالعه

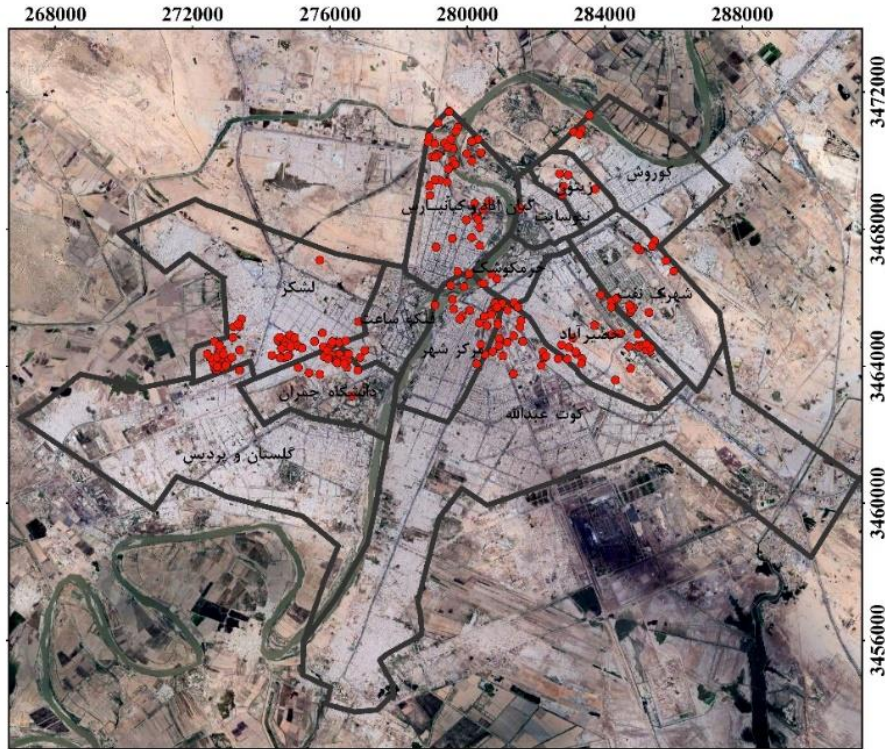
شهر اهواز مرکز استان خوزستان و شهرستان اهواز با ارتفاع متوسط ۱۲ متر از سطح دریا واقع شده است. اهواز در موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۶۵ دقیقه طول شرقی، در بخش جلگه‌ای خوزستان واقع شده است. شهر اهواز با مساحت ۱۸۶۵۰ هکتار، به عنوان یکی از شهرهای وسیع ایران (پنجمین شهر بزرگ ایران)، محسوب می‌شود. شهر اهواز در حدود ۲۴ متر پایین‌تر از سطح آب‌های آزاد اقیانوسها قرار گرفته است. اهواز در جنوب غرب جلگه خوزستان، دارای لایه‌های خاکی متنوعی از ریزدانه‌ها با نفوذپذیری پایین تا مصالح ماسه‌ای است. اغلب رسوبات این شهر را خاکهای رسی و یا لای‌دار و گاه لایه‌هایی از ماسه‌های ریزدانه با نفوذپذیری پایین تا مصالح ماسه‌ای است. ماسه‌ها از فرسایش فیزیکی سنگ مادر به وجود می‌آیند، در حالی که رسها و لایها حاصل از تخریب شیمیایی هستند و لذا خصوصیات آنها با سنگ مادر متفاوت است. به طور کلی از نظر تقسیم‌بندی زمین‌شناسی، شهر اهواز بر روی نهشته‌های کواترنری دشت خوزستان واقع شده است. مطابق نقشه‌های زمین‌شناسی شهر اهواز، رسوبات تشکیل‌دهنده آن از انواع نهشته‌های آواری و آبرفتی می‌باشد.

۴- موارد و روش‌ها

گام نخست در فرآیند پهنه‌بندی، به دست آوردن اطلاعات مکانی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. به این منظور، بایستی نقشه شهری و اطلاعات مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده، به صورت دقیق در دسترس باشد تا بتوان با استفاده از کلیه اطلاعات ذکر شده تقریب خوبی از پارامترهای مورد نیاز ژئوتکنیکی محل مورد نظر داشت. در گام بعدی اطلاعات لازم برای پهنه‌بندی، در نقشه تهیه شده وارد گردید. برای این منظور، از اطلاعات برداشت شده در سالهای اخیر استفاده شد. در این تحقیق با جمع‌آوری داده‌ها از شرکتهای دولتی و خصوصی و اطلاعات نظام مهندسی ساختمان و همچنین بانک مطالعات

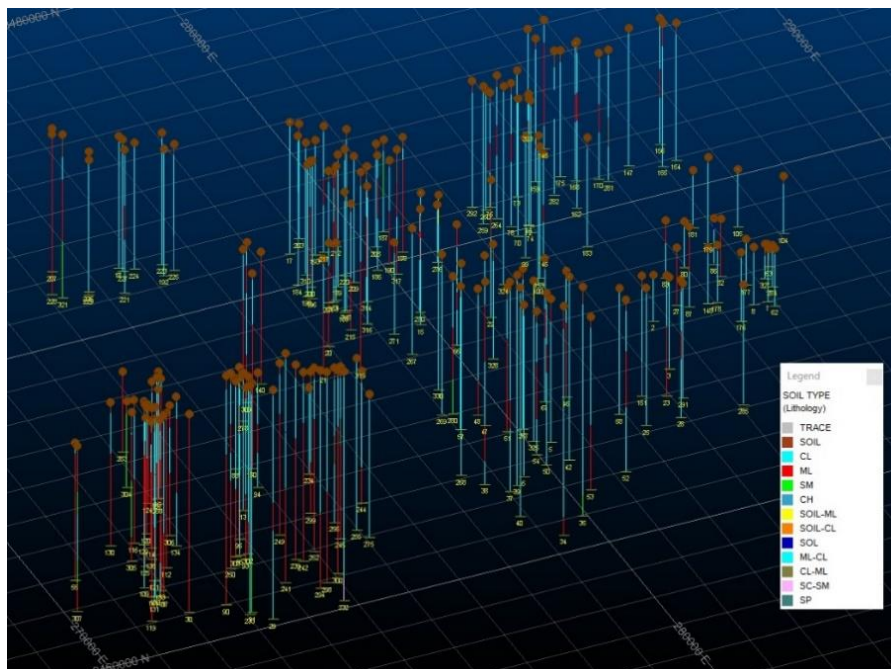
1 Universal Transverse Mercator

2 Inverse distance weighting



شکل ۱. موقعیت گمانه‌های زده شده در سطح شهر اهواز

Fig. 1. The location of boreholes drilled in Ahvaz city.



شکل ۲. موقعیت سه بعدی گمانه‌ها

Fig. 2. Three-dimensional position of boreholes.

جدول ۱. درصد مساحت گروه - مشخصه زاویه اصطکاک داخلی (θ).

Table 1. Percentage of area of the group - Characteristic angle of internal friction (θ).

مشخصات	گروه	عمق ۲ متر	عمق ۴ متر	عمق ۶ متر	عمق ۸ متر	عمق ۱۰ متر
ماسه خیلی شل	کمتر از ۲۸	۱۸/۷	۱۷/۳	۱۶/۲	۱۳/۶	۱۱/۲
ماسه شل	۲۸-۳۰	۳۳/۷	۳۲/۶	۳۰/۴	۲۸/۴	۲۵/۹
ماسه متوسط	۳۰-۳۶	۱۹/۳	۲۰/۷	۲۰/۳	۲۱	۲۱/۵
ماسه متراکم	۳۶-۴۱	۲۶/۵	۲۶/۷	۲۸/۸	۲۹/۲	۳۰/۲
ماسه خیلی متراکم	بیش از ۴۱	۱/۸	۲/۷	۴/۳	۷/۸	۱۱/۲

۴-۱- روش وزن دهی فاصله معکوس (IDW)

در این روش مقادیر نقاط مجهول از طریق میانگین گیری مقادیر نقاط معلوم در نزدیکی تخمین زده می شود. هر کدام از نقاط در محاسبه دارای وزنی می باشند، به طوری که هر چه فاصله نقطه معلوم به نقطه مجهول کمتر باشد، ارزش وزنی آن نیز بیشتر است و هر چه این فاصله بیشتر شود، اثربخشی نقطه معلوم در تخمین نقطه مجهول و محاسبه میانگین نیز کاهش می یابد، پس فواصل نزدیکتر وزن بالاتری می گیرند. این وزن ها توسط توان وزن دهی کنترل می شوند، به طوری که توان های بزرگتر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد تخمین را کاهش می دهند و توان های کوچکتر وزنها را به طول یکنواختتری بین نقاط همسایه توزیع می کنند. توان عکس فاصله توسط کاربر قابل انتخاب است و هر چه بیشتر باشد، تصاویر و شکل های شبکه بندی حالتی نرم، غیرخشن و غیرتیز خواهند داشت. این توان اگر از مرتبه یک باشد، شبکه حالت تیز و اگر از مرتبه ۲ باشد، شبکه حالتی متوسط دارد و اگر از مرتبه ۳ یا ۴ باشد شبکه به حالتی نرم است. هر چه مقادیر بیشتری برای توان عکس فاصله انتخاب شود، نقاط دورتر تأثیر بسیار کمتری بر روی مقدار عددی گره شبکه خواهند داشت. درون یابی بر اساس رابطه (۱) محاسبه می شود. در این رابطه که در آن $Z(S_i)$ مقدار اندازه گیری شده در موقعیت i th است و λ_i وزن مقدار اندازه گیری شده در موقعیت i th است. S موقعیت پیش بینی و N تعداد نقاط اندازه گیری شده یا معلوم می باشد. λ_i تابعی از فاصله بین آنها می باشد یا به عبارتی هر چه فاصله کمتر است، تأثیر نقطه مجهول بیشتر است لذا معکوس فواصل بین آنها به عنوان وزن در مدل به کار می رود.

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (1)$$

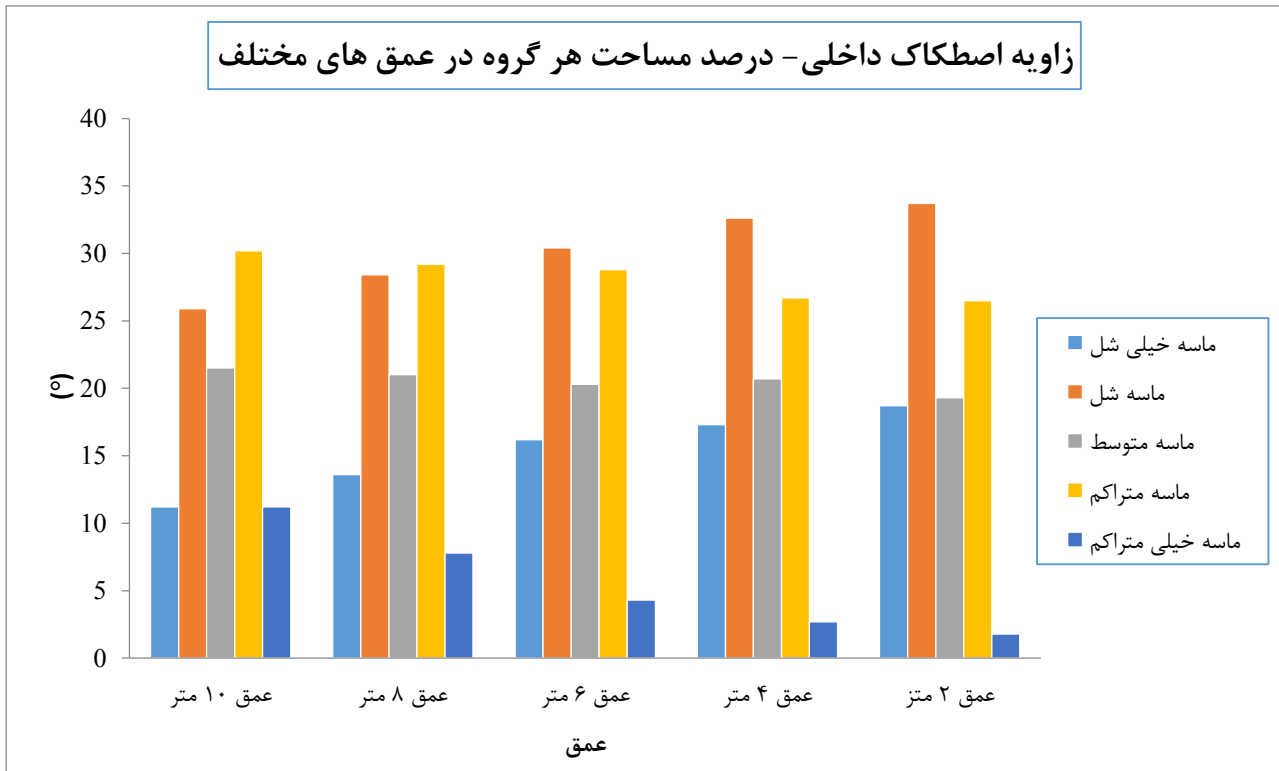
۵- نتایج و بحث

۵-۱- پهنه بندی زاویه اصطکاک داخلی خاک

زاویه اصطکاک داخلی (θ) خاک نیز مانند سایر پارامترهای ژئوتکنیکی نقش اساسی و مهمی را در طراحی ها و تصمیم گیری های ژئوتکنیکی ایفا می کند [۸]. این پارامتر با آزمایش های آزمایشگاهی و درجا قابل اندازه گیری است که در صورت محاسبه درجا و با توجه به اهمیت گفته شده اعداد دقیق تری بدست می آید [۲۰]. بطور کلی با افزایش تراکم خاک، زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می یابد. همچنین با افزایش تنش عمودی خاک، زاویه اصطکاک داخلی افزایش می یابد [۲۱]. نتایج تحقیق حاضر نیز نشان داد که با افزایش عمق خاک، زاویه اصطکاک داخلی افزایش داشته است (شکل ۳). بطور کلی در عمق دو متر فقط ۱۸/۷ درصد و در عمق ۱۰ متر ۱۱/۲ درصد از خاکها دارای زاویه اصطکاک کمتر از ۲۸ درجه (θ) می باشند و با افزایش عمق نیز بر مقدار آن افزوده شده است (جدول ۱). این رابطه به صورت خطی برقرار می باشد. بنابراین برای توصیف این خاکها، می توان آن ها را در دسته خاک های متوسط و نسبتاً متراکم قرار داد. نقشه های درون یابی زاویه اصطکاک داخلی خاک در عمق های مختلف در شکل ۴ ارائه شده است.

۵-۲- پهنه بندی چسبندگی خاک

در واقع چسبندگی خاک (kPa/cm^2) یک ویژگی ذاتی آن می باشد که وابسته به اصطکاک بین دانه های خاک نمی باشد [۲۲]. نتایج تحقیق نشان داد سطح چسبندگی خاک در اغلب گمانه ها در سطح کم و متوسط است. هر چند با افزایش عمق خاک، سطح چسبندگی اندکی افزایش نشان می دهد، اما این افزایش از لحاظ آماری معنی دار نمی باشد (جدول ۲). بیشترین



شکل ۳. میانگین مقادیر زاویه اصطکاک داخلی (θ) در اعماق مختلف گمانه‌ها.

Fig. 3. The average values of internal friction angle (θ) in different depths of boreholes.

۴۷/۹ درصد در عمق ۱۰ متری رسیده است (جدول ۳). نقشه‌های درون‌یابی وزن مخصوص خاک در عمق‌های مختلف در شکل ۸ ارائه شده است.

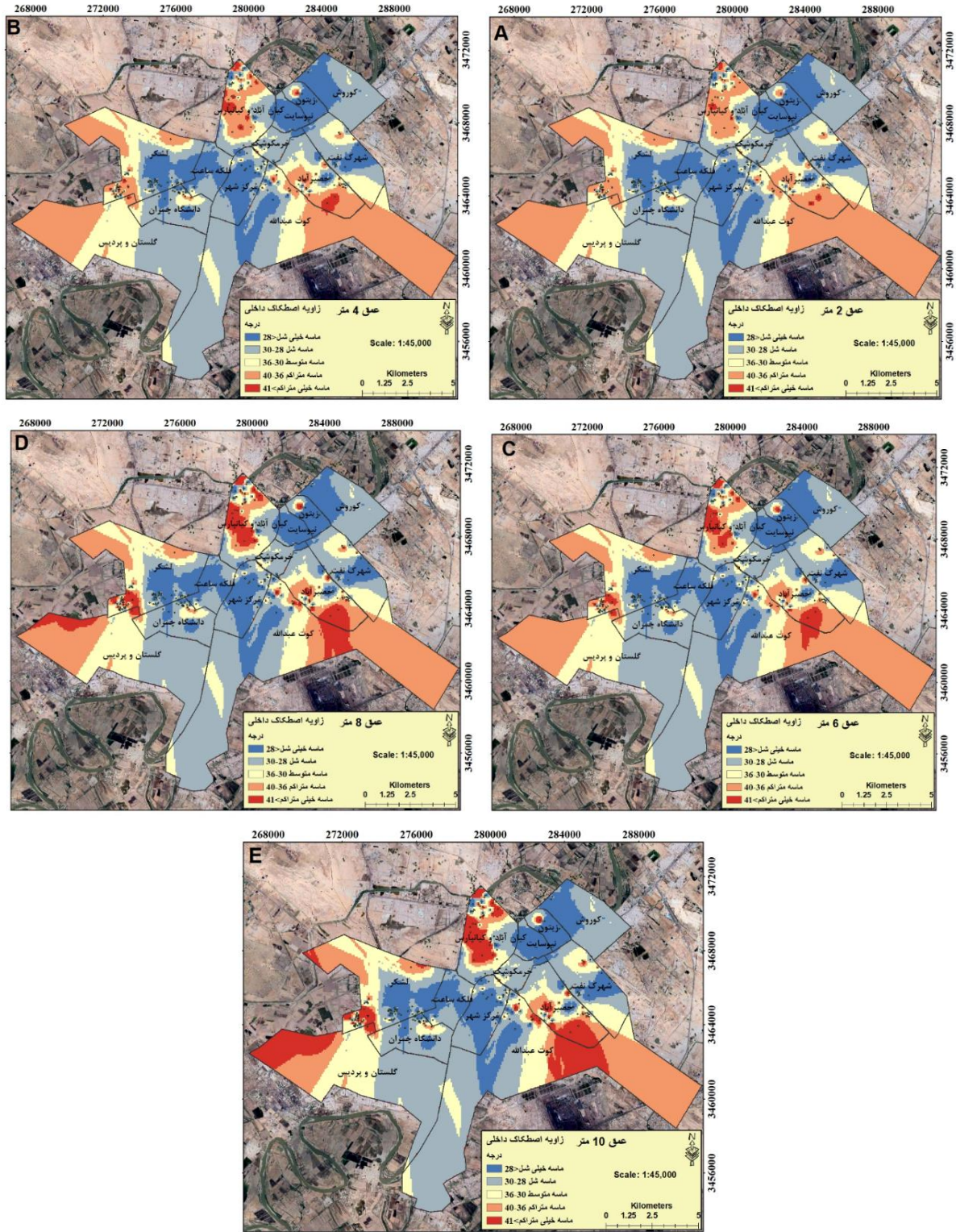
۶- نتیجه‌گیری

وجود وابستگی مکانی بین ویژگی‌های مورد بررسی خاک در مراتع مورد مطالعه از نتایج اصلی پژوهش حاضر می‌باشد. زمین آمار ابزار ارزشمندی در تعیین وابستگی مکانی است و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در کنار زمین آمار برای تهیه نقشه‌های پارامترهای ژئوتکنیکی خاک نقش مهمی دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش بهینه و مناسب جهت برآورد و تخمین داده‌های ژئوتکنیکی خاک روش درون‌یابی Kriging است که متغیرهای زیادی در آن موثر است. ناهمگن بودن منطقه از لحاظ متغیرها، وسعت محدوده مورد مطالعه، فواصل نمونه‌ها و تعداد نمونه‌ها می‌تواند در کیفیت نقشه‌های پهنه‌بندی ژئوتکنیکی خاک موثر واقع شود. در این تحقیق پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی شهر اهواز با استفاده از

میانگین سطح چسبندگی خاک در عمق ۱۰ متری و کمترین آن در عمق ۲ متری مشاهده شده است (شکل ۵). نقشه‌های درون‌یابی چسبندگی خاک در عمق‌های مختلف در شکل ۶ ارائه شده است.

۵-۳- پهنه‌بندی وزن مخصوص خاک

وزن مخصوص (kG/cm^2) حقیقی خاک عبارت است از وزن مخصوص جزء جامد خاک به عبارت دیگر وزن مخصوص ظاهری وزن مخصوص همه فازهای خاک یعنی فاز جامد، مایع و گاز را مشخص می‌نماید وزن مخصوص حقیقی فقط وزن ذرات جامد خاک در واحد حجم مشخص می‌گردد [۸ و ۲۴]. معمولاً وزن مخصوص حقیقی خاک‌ها به طور متوسط در حدود ۲/۶ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد که در مقایسه با وزن مخصوص ظاهری عدد بیشتری می‌باشد چون شامل فازهای مایع و گاز نمی‌شود [۲۵ و ۲۶]. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش عمق خاک، میانگین وزن مخصوص افزایش معنی‌داری داشته است و از ۱/۶ درصد در عمق ۲ متر به



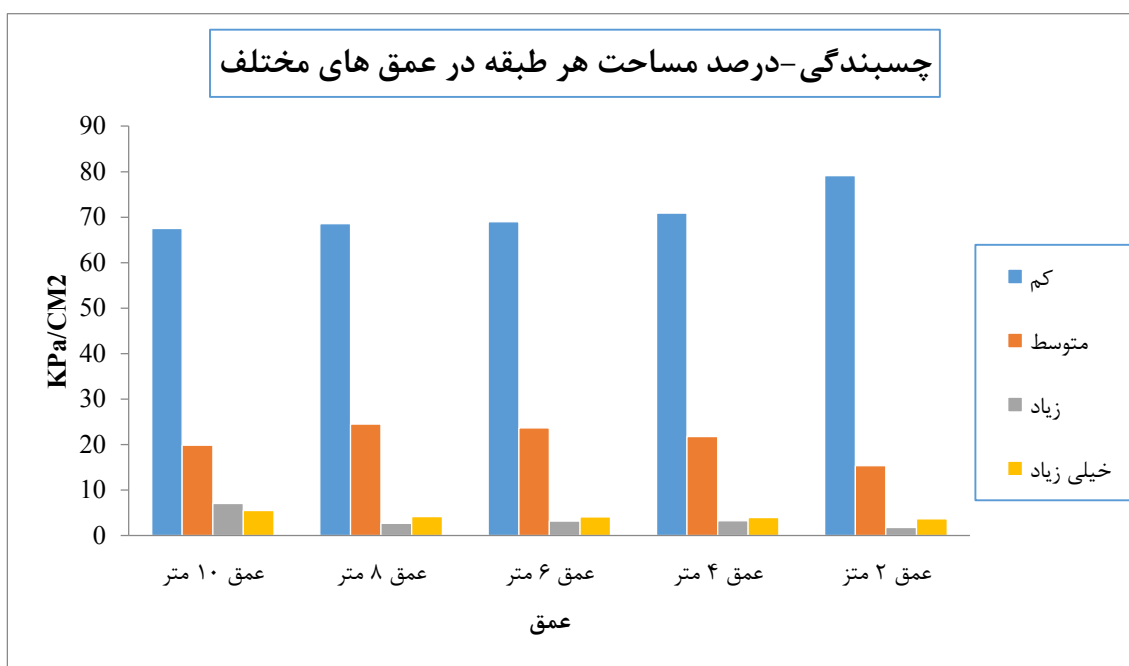
شکل ۴. نقشه درونیابی زاویه اصطکاک داخلی گمانه ها (Ø).
 (A) عمق ۲ متر، (B) عمق ۴ متر، (C) عمق ۶ متر، (D) عمق ۸ متر، (E) عمق ۱۰ متر.

Fig. 4. Interpolation map of internal friction angle of boreholes (Ø). A) 2 meters deep, B) 4 meters deep, C) 6 meters deep, D) 8 meters deep, E) 10 meters deep.

جدول ۲. درصد مساحت گروه - مشخصه چسبندگی خاک (kPa/cm^۲).

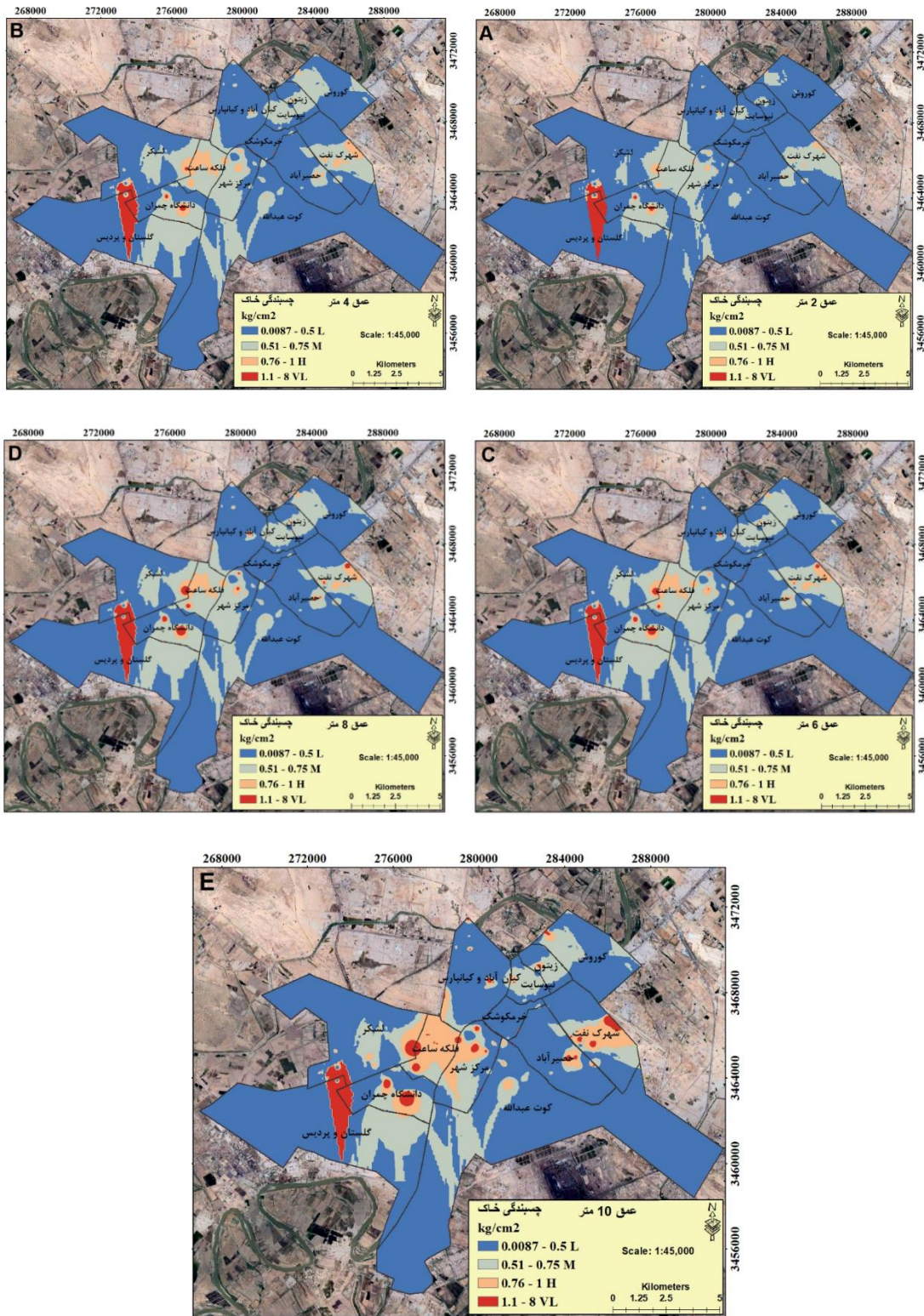
Table 2. Area percentage of the group - characteristics of soil adhesion (kPa/cm²).

مشخصات	گروه	عمق ۲ متر	عمق ۴ متر	عمق ۶ متر	عمق ۸ متر	عمق ۱۰ متر
کم	۰-۵	۷۹/۱	۷۰/۹	۶۹	۶۸/۶	۶۷/۵
متوسط	۰/۷۵-۰/۵۱	۱۵/۴	۲۱/۸	۲۳/۷	۲۴/۵	۱۹/۹
زیاد	۱-۰/۷۶	۱/۸	۳/۳	۳/۲	۲/۷	۷/۱
بسیار زیاد	۱≥	۳/۷	۴	۴/۱	۴/۲	۵/۵



شکل ۵. میانگین مقادیر چسبندگی خاک (kPa/m^۲) در اعماق مختلف گمانه‌ها.

Fig. 5. Average values of soil adhesion (kPa/m²) in different depths of boreholes.



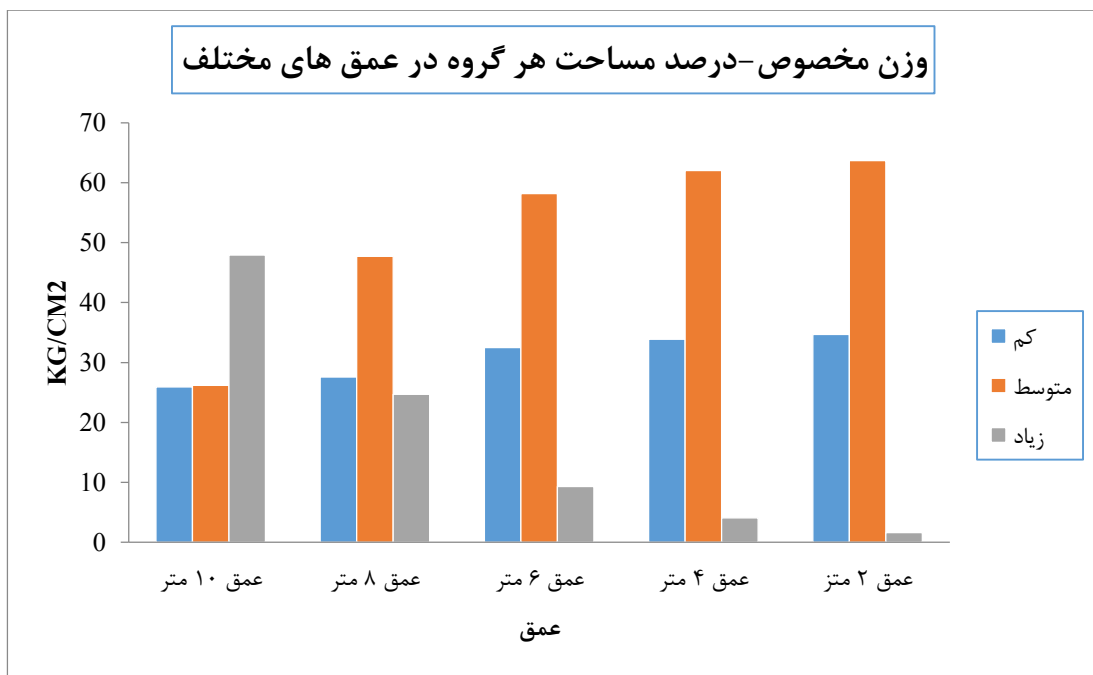
شکل ۶. نقشه درونیابی چسبندگی خاک (kg/m^2). A) عمق ۲ متر، B) عمق ۴ متر، C) عمق ۶ متر، D) عمق ۸ متر، E) عمق ۱۰ متر.

Fig. 6. Interpolation map of soil adhesion (kg/m^2). A) 2 meters deep, B) 4 meters deep, C) 6 meters deep, D) 8 meters deep, E) 10 meters deep.

جدول ۳. درصد مساحت گروه - مشخصه وزن مخصوص خاک (kG/cm^2).

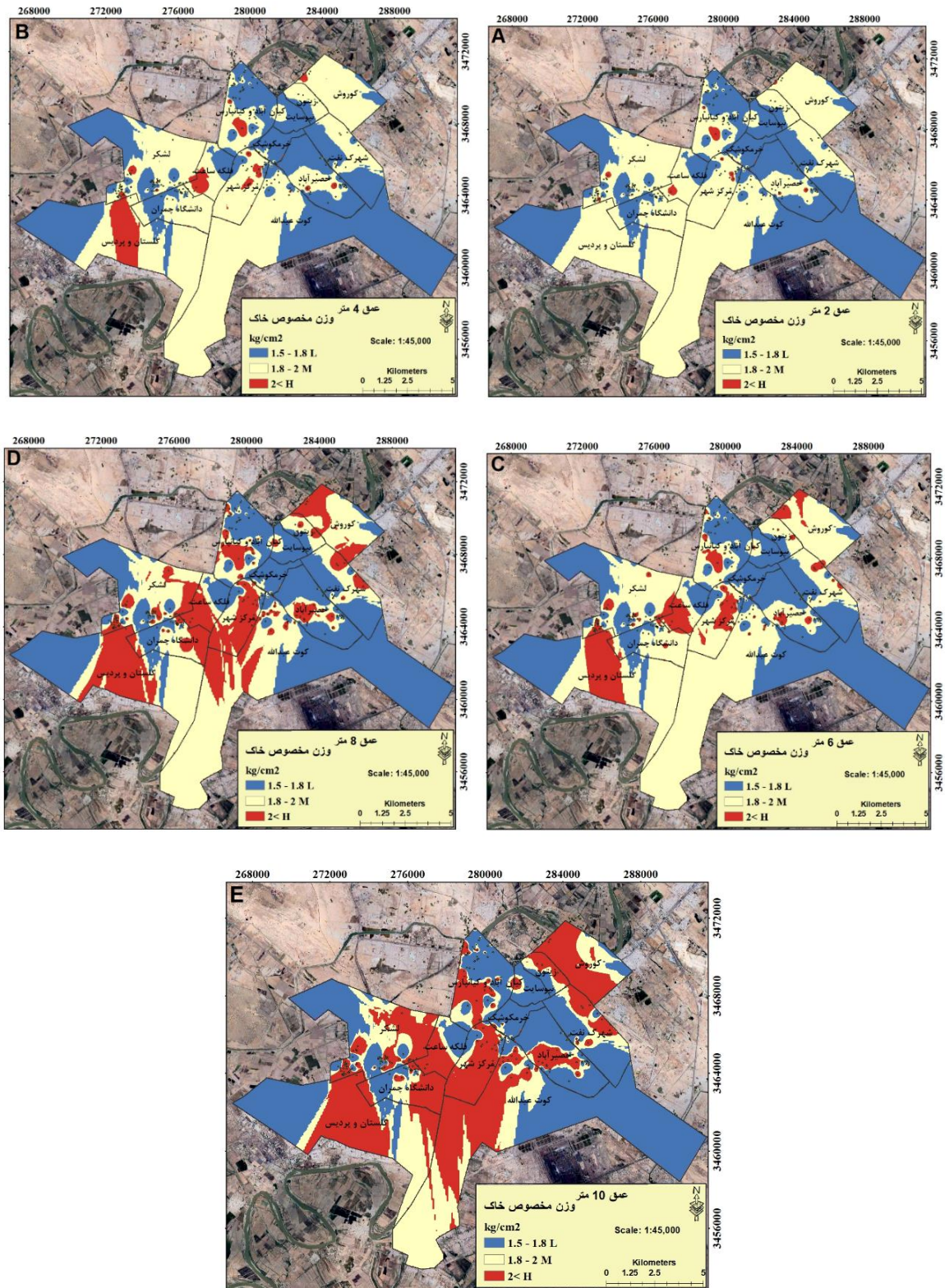
Table 3. Area percentage of the group - characteristics of soil specific gravity (kG/cm^2).

مشخصات	گروه	عمق ۲ متر	عمق ۴ متر	عمق ۶ متر	عمق ۸ متر	عمق ۱۰ متر
کم	۱/۸-۱/۵	۳۴/۷	۳۳/۹	۳۲/۵	۲۷/۶	۲۵/۹
متوسط	۲-۱/۸۱	۶۳/۷	۶۲	۵۸/۲	۴۷/۷	۲۶/۲
زیاد	>۲	۱/۶	۴/۱	۹/۳	۲۴/۷	۴۷/۹



شکل ۷. میانگین مقادیر وزن مخصوص خاک (kG/m^2) در اعماق مختلف گمانه‌ها.

Fig. 7. Average values of soil specific gravity (kG/m^2) at different depths of boreholes.



شکل ۸. نقشه درونیابی وزن مخصوص خاک (kg/cm^2). A) عمق ۲ متر، B) عمق ۴ متر، C) عمق ۶ متر، D) عمق ۸ متر، E) عمق ۱۰ متر.

Fig. 8. Interpolation map of specific weight (kg/cm^2) of soil. A) 2 meters deep, B) 4 meters deep, C) 6 meters deep, D) 8 meters deep, E) 10 meters deep.

بر داده‌ها در تابع مفصل اشاره کرد که در تکنیک‌های زمین‌آماری امکان برآزش تابع توزیع حاشیه‌ای بر داده‌ها ممکن نیست. از دلایل دیگر می‌توان به توانایی بیان همبستگی بین داده‌ها در فواصل مختلف و عدم حساسیت تابع مفصل به داده‌های پرت نسبت به تکنیک‌های مرسوم زمین‌آماری را برشمرد. با توجه به ماهیت چولگی داده‌های خاک در طبیعت و همچنین ضرورت آنالیز و تفسیر دقیق‌تر داده‌های واقعی خاک بدون تغییر آن‌ها کاربرد وسیعی در تخمین ویژگی‌های خاک داشته باشد.

هر یک از پارامترهای محاسبه شده که با استفاده از آن می‌توان لایه‌های هم‌تراز آنها را مورد ارزیابی قرار داد. با ارزیابی و پهنه بندی کیفی نتایج حاصل از آزمایشها می‌توان دید کلیتری نسبت به منطقه بدست آورد. در این شرایط می‌توان نواحی پرجمعیت و ساختمانهای چندین طبقه را در مقابل فضاهایی که برای پارک، جاده، فروشگاهها و غیره قابل کاربریست، با پیش‌بینی خطرات بالقوه زمین‌شناسی دسته‌بندی و برنامه‌ریزی کلان شهری نمود.

بطور کلی این مولفه‌ها به ویژه وزن مخصوص (kG/cm^2)، با تعیین ظرفیت باربری خاک مرتبط بوده می‌توان از آنها برای امکان‌سنجی انتخاب بهترین گزینه مکانی جهت احداث پروژه‌های خاص بهره‌گیری نمود. در تحقیقات مختلفی به تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی مناطق شهری پرداخته شده است که از جمله آنها می‌توان به مطالعه جاودانیان و همکاران [۲۶] و حافظی و همکاران [۲۷] اشاره نمود. در شهر اهواز نیز مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته است. حافظی و همکاران [۲۷] خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر متروی اهواز را با تاکید بر روانگرایی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نیز نشان داد که خاک محدوده شهری اهواز در محدوده خاک‌های کم تراکم و تراکم متوسط قرار دارد. در آخر توصیه می‌شود روش‌های زمین‌آماری استفاده شده در این مطالعه در خاک‌های مناطق دیگر کشور مورد استفاده و بررسی قرار گیرد تا امکان مقایسه و ارزیابی بیشتر آن‌ها فراهم گردد.

منابع

- [1] Khan, M S., Jaemin, P., Jongwon, Seo. Geotechnical property modeling and construction safety zoning based on GIS and BIM integration. Applied Sciences 11(9) (2021) 4004.
- [2] Chumaidiyah, E., Dewantoro, D., Kamil, A. Design of a Participatory Web-Based Geographic Information System for Determining Industrial Zones. Applied Computational Intelligence and Soft Computing (2021).

اطلاعات استخراج شده از ۳۳۰ گمانه حفر شده در شهر نقشه‌های پارامترهای مقاومتی شهر اهواز ارائه شده است. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده نتایج زیر حاصل می‌گردد:

- روش IDW بهترین کارایی را در درونیابی نقشه‌ها و پهنه‌بندی شاخص‌های ژئوتکنیکی خاک‌های شهر اهواز نشان داد. دقت مدل بر اساس توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، جنس خاک و فاصله گمانه‌ها در سطح بسیار بالا (بیش از ۹۸ درصد) بود.

- نتایج محاسبات تنش، وجود رابطه افزایش خطی بین مقادیر آن در اعماق مختلف خاک را نشان داد.

- نقشه درونیابی پهنه‌بندی شده زاویه اصطکاک داخلی (\emptyset) در شهر اهواز نشان داد که با افزایش عمق خاک، زاویه اصطکاک داخلی افزایش داشته است. بیشترین میزان زاویه اصطکاک داخلی در عمق ۲ متر در شمال شرق اهواز (محدوده کیانپارس) به میزان بیش از ۴۱ درجه ثبت شد. مقادیر آن در مناطق جنوب شرق (کوت عبدالله) و غرب اهواز (گلستان و پردیس) و نیز شمال آن (لشگر) در سطوح ۳۰ تا ۴۰ درجه بوده است. با افزایش عمق، زاویه اصطکاک داخلی افزایش داشته است، بطوری که در عمق ۱۰ متر، در اغلب گمانه‌های حفر شده در مناطق مذکور، میزان زاویه اصطکاک داخلی به بیش از ۴۱ درجه (\emptyset) افزایش داشته است.

- نتایج حاصل از نقشه پهنه‌بندی چسبندگی (kPa/cm^2) بر اساس گمانه‌های حفر شده نشان داد که ارتباط آماری بین این مولفه ژئوتکنیکی و افزایش عمق وجود ندارد. سطوح چسبندگی (kPa/cm^2) در خاک نقاط مختلف شهر اهواز متفاوت بود و بین سطوح ۰/۰۸ تا ۰/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع متفاوت بود. بیشترین مقادیر آن در غرب اهواز در منطقه گلستان به میزان ۲ تا ۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع ثبت گردیده است.

- بررسی وزن مخصوص خاک (kG/cm^2) بر اساس گمانه‌های حفر شده و نقشه درونیابی پهنه‌بندی شده در تحقیق حاضر نشان داد که با افزایش عمق خاک، میانگین وزن مخصوص (kG/cm^2) افزایش معنی‌داری داشته است و از ۱/۶ درصد در عمق ۲ متر به ۴۷/۹ درصد در عمق ۱۰ متری رسیده است. بیشترین مقادیر آن در مناطق مرکزی، غرب، شرق و جنوب شهر اهواز بوده است لذا این مناطق جز آن دسته از مناطقی بودند که بیشترین میزان ساخت و ساز در آن‌ها رخ داده لذا بهترین خاک ممکن را برای ساخت‌وساز و پروژه‌های عمرانی این مناطق دارند.

نتایج این پژوهش نشان داد تابع IDW نسبت به سایر تکنیک‌های زمین‌آماری، عملکرد بهتری در برآورد ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد. از مهمترین دلایل این برتری می‌توان به توانایی برآزش تابع توزیع حاشیه‌ای

- System in Mahabad Geotechnical Zoning Maps, Miaad University National Conference on Civil Engineering, Architecture, Shahid Beheshti University, (2017), Tehran, Iran.
- [13] Razmyar, A., and Eslami, A. Geotechnical characterization of soils in the eastern and western areas of Tehran. *Engineering, Technology & Applied Science Research* 7(4) (2017) 1802-1810.
- [14] Asakereh, A., and Mosaffa, M. Zoning of Soil Resistance Parameters Using Geographic Information System (GIS) (Case Study of Bandar Abbas city). *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(2) (2020).
- [15] Kim, H., Sun, C., Lee, M., Cho, H. Multivariate geotechnical zonation of seismic site effects with clustering-blended model for a city area, South Korea. *Engineering Geology* 294, 2021, 106365.
- [16] Aldahwi, S. H. A., Alnedawi, A., Alabdullah, S. F. Redistribution of Al-Adhamiyah land use by assessment of the geotechnical properties using GIS technique. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(10) (2018) 3369-3380.
- [17] Rehman, A., Song, J., Haq, F., Ahamad, M. I., Sajid, M., Zahid, Z. Geo-physical hazards microzonation and suitable site selection through multicriteria analysis using geographical information system. *Applied Geography*, 135 (2021) 102550.
- [18] Paramarthalingam, R., and Sanjeevi, S. Mapping landslide prone areas in Ooty region, south India using remote sensing, Geographic Information System and geotechnical data. *Asian Journal of Geoinformatics*, 17(2) (2018).
- [19] Al-Ani, H., Eslami-Andargoli, L., Oh, E., Chai, G. Categorising geotechnical properties of surfers paradise soil using geographic information system (GIS). *GEOMATE Journal*, 5(10) (2013) 690-695.
- [20] Player, R. S. V. Geographic information system (GIS) use in geotechnical engineering. In *GeoCongress 2006: Geotechnical engineering in the information technology age*, (2006) 1-6
- [21] Afarid, S., and Hajiani Boushehrian, A. Deep [3] Vickers, N. Animal communication: when i'm calling you, will you answer too? *Current biology* 27(14) (2017) 713-715.
- [4] Moubarak, A., Arnous, M., El-Rayes., A. Integrated geoenvironmental and geotechnical risk assessment of east Port Said region, Egypt for regional development. *Geotechnical and Geological Engineering* 39(2) (2021) 1497-1520.
- [5] Khan, F., Das, B., Mishra, S., Awasthy, M. A review on the feasibility and application of geospatial techniques in geotechnical engineering field. *Materials Today: Proceedings* 49 (2022) 311-319.
- [6] Pourbalighy, M., Rezayan, S., Rafaty, M., Hejazi., R. Evaluation of Groundwater Vulnerability of aquifers in Aisin plain by DRASTIC and GODS models and GIS. *Journal of RS and GIS for Natural Resources* 12(4) (2022) 14-17.
- [7] Bopche, L., and Rege, P. Landslide Susceptibility Mapping: An Integrated Approach using Geographic Information Value, Remote Sensing, and Weight of Evidence Method. *Geotechnical and Geological Engineering* (2022) 1-13.
- [8] El Boumeshouli, S. M., Lahrach, A., Chaouni, A. A., Deffontaines, A. Geotechnical Study of Urban Soil and Subsoil of Fez City (N. Morocco) and Natural Risk Mapping Using Geographic Information System (GIS). In *Engineering Geology for Society and Territory 5* (2015) 763-768. Springer, Cham.
- [9] Gaafar, H., Dakhly, A., Elhakim, A. Digital Transformation Solution for Identification of Geotechnical Parameters Using Statistical Data Analysis. *ERJ. Engineering Research Journal* 45(1) (2022) 89-99.
- [10] Ahmad, M, Iqbal, Q., Khan, F. A. Profiling and zoning of geotechnical sub-soil data using geographic information system. *Science International* 25(3) (2013) 15-20.
- [11] Sharma, B., and Rahman, S. K. Use of GIS based maps for preliminary assessment of subsoil of Guwahati city. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 4(05) (2016),106.
- [12] S. Mottaqi, A. Alesheikh, Using GIS Spatial Information

- [27] Hafizi M., Nasser Q. Geotechnical zoning and evaluation of authorized bearing capacity of Mashhad. Fifth Iranian Conference on Engineering Geology and Environment, 2007 (in Perisan)
- [28] Naboureh, R., Rezaei Farei, A., Feizizadeh, B. The Investigation of Groundwater Reducing and Geotechnical Parameters of Soil Impacts on Land-Subsidence by GIS (Case Study: Tabriz City). Journal of Civil and Environmental Engineering, 52.1(106) (2022) 185-201. (in Perisan)
- [29] Behboudi, M., Zad, A., Yazdi, M., Tohidi, A. Effect of recycled glass powder on dispersivity potential and geotechnical parameters of dispersive soils. Journal of Civil and Environmental Engineering, (2023). (in Perisan)
- [30] NAEIMI, M., & Darvish, M. The need to pay attention to the geotechnical properties of soil in the development of urban areas to reduce flood damage and environmental sustainability. Iran Nature, 6(6) (2022) 41-48. (in Perisan)
- [31] Jafary Shalkoohy, A., Eshghi, P., Torabi Khodashahri, H., & Pourdada, A. Laboratory Evaluation of polypropylene fibers and nano-SiO₂ on geotechnical properties of clayey soils. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 14(4) (2022) 23-37. (in Perisan)
- Excavation Hazard Assessment Zoning in District 1 in Shiraz Municipality Using Geographic Information System (GIS). Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques, 10(1) (2020) 15-26.
- [22] Arnous, M. O. Geotechnical site investigations for possible urban extensions at Suez City, Egypt using GIS. Arabian Journal of Geosciences, 6(5) (2013) 1349-1369.
- [23] Saberelizei, N., Karimpour-Fard, M., Effati, M. The zoning of soil strength parameters in Rasht using Geographical Information System (GIS). Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(8) (2021) 9-9.
- [24] Nejad, M. M., Momeni, M. S., Manahiloh, K. N., Shear wave velocity and soil type microzonation using neural networks and geographic information system. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 104 (2018) 54-63.
- [25] Sk, M. M., Ali, S. A., Ahmad, A. Optimal sanitary landfill site selection for solid waste disposal in Durgapur city using geographic information system and multi-criteria evaluation technique. KN-Journal of Cartography and Geographic Information, 70(4) (2020) 163-180.
- [26] Javadanian H., Haddad A., Mirnejad A. Seismic geotechnical zoning of Semnan city based on the results of geophysical experiments, (2019) (in Perisan)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Nourozi Mohammadi, N. Khayat, A. Nazarpour, Geotechnical zoning of Ahvaz soil using Geographic Information System (GIS), Amirkabir J. Civil Eng., 55(12) (2024) 2473-2486.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21406.7709

