

## بررسی ظرفیت باربری مجاز نهشته‌های منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر و بندر امام برای پی‌های سطحی

عبداله نادری\*<sup>۱</sup>، اکبر چشمی<sup>۲</sup>

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲

### چکیده

یکی از موضوعات مهندسی ژئوتکنیک ظرفیت باربری خاک می‌باشد که خود تابعی از خواص مهندسی نهشته‌های زیرسطحی و مشخصات پی است. در تحقیق حاضر از نتایج ۷۸ گمانه اکتشافی حفر شده در منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر و بندر امام برای تولید نقشه‌های زمین شناسی مهندسی با هدف تعیین ظرفیت باربری خاک آن منطقه استفاده شده است. نتایج بدست آمده از گمانه‌ها نشان می‌دهد، جنس رسوبات منطقه عمدتاً رس و به مقدار کمتری شامل رس سیلتی و ماسه سیلتی است. بعد از مشخص شدن طبقه بندی خاک، پارامترهای مهندسی آنها بر اساس نتایج آزمایشگاهی تعیین و سپس با استفاده از فرمول هنسِن و در نظر گرفتن میزان نشست مجاز پی، ظرفیت باربری مجاز برای پی منفرد به ابعاد (۱×۱)، (۲×۲) متر با عمق مدفون واحد، پی نواری با عمق مدفون واحد و در نهایت پی گسترده به ابعاد ۱۰×۲۰ متر با عمق مدفون یک و دو متر محاسبه شد. با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نقشه‌های ظرفیت باربری مجاز منطقه مورد مطالعه تولید گردیده و نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد ظرفیت باربری مجاز خاک در این منطقه بین ۰/۴۰ تا ۰/۹۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر بوده و نواحی شمالی نسبت به دیگر مناطق ظرفیت باربری بالاتری دارند.

کلید واژه‌ها: ظرفیت باربری، Arc GIS، پی سطحی، منطقه اقتصادی ماهشهر و بندر امام

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه تهران و کارشناس ارشد مکانیک خاک آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، استان خوزستان

abdolla.naderi@ut.ac.ir

۲. دانشیار گروه زمین شناسی مهندسی و تکتونیک، دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران، تهران

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

تولید نقشه‌های زمین شناسی با کاربردهای خاص یکی از جنبه‌های کاربردی علم زمین‌شناسی مهندسی است که در برنامه‌های توسعه شهری و ارزیابی‌های اولیه برای جانمایی سازه‌ها در مناطق شهری قابل استفاده است. غیومیان و همکاران (۱۳۸۳) در بررسی‌های انجام شده دریافتند که همه ساله تعداد زیادی گمانه در نقاط مختلف شهرهای بزرگ حفر و آزمایشات متعددی جهت تعیین ویژگی‌های ژئوتکنیکی لایه‌های زمین صورت می‌گیرد. با توجه به عدم ساماندهی و مدیریت این داده‌ها، از نتایج بدست آمده تنها برای پروژه مورد نظر استفاده می‌شود. در حالیکه با افزایش داده‌های ژئوتکنیکی در یک منطقه و درون‌یابی آنها امکان تولید نقشه‌های زمین شناسی مهندسی با کاربری‌های خاص وجود دارد. محمدی و همکاران (Mohammadi, et al., 2020) ضمن تاکید بر مزایای نقشه‌های زمین شناسی مهندسی با کاربری خاص در برنامه‌ریزی‌های توسعه شهری براساس داده‌های ۳۸۴ گمانه اکتشافی و ۲۳ چاهک دستی در شهر اصفهان، هفت محدوده با خصوصیات زمین شناسی مهندسی متفاوت تشخیص داده و براساس آنها به این نتیجه رسیدند محدوده تقریبی گسترش زیر سطحی شن و ماسه رودخانه‌ها در گذشته، در محلهایی غیر از مسیر فعلی رودخانه بوده است و ویژگیهای ژئوتکنیکی رسوبات درشت دانه نسبت به عمق تغییر معناداری ندارد. عساکره و مصفا (۱۳۹۹) براساس اطلاعات ژئوتکنیک حاصل از ۲۴۱ گمانه حفر شده در شهر بندرعباس و بکارگیری از نرم افزار Arc GIS پارامترهای ژئوتکنیکی در محدوده شهر را پهنه‌بندی نموده و به این نتیجه رسیدند که بیش از ۸۵ درصد منطقه مورد مطالعه دارای لایه‌های خاک درشت دانه از نوع ماسه لای‌دار با تراکم متوسط و متراکم می‌باشد. صمدیان و فاخر (۱۳۹۸) با جمع‌آوری داده‌های ۲۱۱ گمانه حفر شده در سطح شهر سنندج و انجام تعدادی آزمایشهای تکمیلی علاوه بر ارائه یکسری نقشه طبقه‌بندی زمین شناسی-ژئوتکنیکی، یکسری معیار زمین شناسی برای تشخیص واحدهای مختلف در محل پروژه را ارائه دادند. کیم و همکاران (Kim, et al., 2020) نسبت به ارائه یک

مدل فضایی از مصالح زیرسطحی براساس داده‌های نقطه‌ای بدست آمده از گمانه‌ها، برای منطقه‌ای در جنوب مرکزی کشور کره جنوبی اقدام نمودند.

المموری و همکاران (Al-Mamoori, et al., 2020) براساس ۴۶۴ گمانه حفر شده در شهر نجف، مصالح زیرسطحی این شهر را با استفاده از نرم افزار ArcGIS از نظر دانه‌بندی پهنه‌بندی نمودند. عمق بررسی آنها حداکثر تا ۲۶ متر بود و دریافتند که از عمق ۱۶ تا ۲۶ متری ۴۰ درصد به میزان ذرات درشت دانه خاک افزوده می‌شود.

با توجه به اهمیت و کاربرد فراوان ظرفیت باربری در مهندسی ژئوتکنیک تحقیقات زیادی در خصوص تولید نقشه‌های تعیین ظرفیت باربری صورت گرفته است. آندریامونجیسوا و همکاران (Andriamamonjisoa, et al., 2019) براساس داده‌های ژئومرفولوژیکی و نتایج ژئوتکنیکی ۲۲۱ گمانه حفر شده، شهر آنتاناناریوو (Antananarivo) پایتخت ماداگاسکار را از لحاظ ظرفیت باربری و کاربری اراضی پهنه‌بندی کردند. پالاسیو و همکاران (Palacios, et al., 2014) براساس داده‌های ژئوتکنیکی موجود در شهر گرانادا (Granada) اسپانیا نقشه ظرفیت باربری رسوبات آبرفتی هولوسن در این شهر را ترسیم نموده و بیان داشتند رسوبات جنوب شرقی نسبت به دیگر نواحی دارای ظرفیت باربری مجاز بیشتری است. الدفائی و همکاران (Aldefae, et al., 2020) براساس داده‌های حاصل از ۱۶۴ گمانه حفر شده در استان واسط عراق منطقه را براساس ظرفیت باربری و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی پهنه‌بندی نموده و بر این اساس نقشه‌هایی تولید کردند. المالکی و همکاران (Al-Maliki, et al., 2018) جهت تهیه نقشه‌های ظرفیت باربری در شهر نجف و کوفه از داده‌های حاصل از حفاری استفاده کرده و شهر را براساس ظرفیت باربری به مناطق مختلف تقسیم کرده و ظرفیت باربری مصالح را بین ۵ تا ۲۰ تن بر متر مربع پیشنهاد دادند. رضایی و عیوضی (۱۳۸۷) براساس داده‌های ۵۱ گمانه اکتشافی حفر شده در جنوب شرق و شرق تهران، این ناحیه را از نظر ظرفیت باربری و میزان نشست به ۶ پهنه تقسیم‌بندی کردند.

بر اساس این نقشه نهشته‌های کواترنر به دلیل اینکه پی اغلب ساختمان‌های منطقه مورد بررسی را تشکیل می‌دهند، از اهمیت ویژه‌ای در مطالعه حاضر برخوردار است. به‌طور کلی نهشته‌های دوره کواترنر در منطقه از جنس رسوبات رسی، سیلتی، ماسه و رسوبات تبخیری دریایی است و بخش غالب نهشته‌های کواترنر دشت خوزستان دارای منشأ خشکی هستند. بخشی از این نهشته‌ها حاصل فعالیت بادهای غالب منطقه بوده که منجر به تشکیل رسوبات بادرفتی با شکل تپه‌های ماسه بادی گردیده و بخش دیگر حاصل فعالیت‌های رودخانه‌های جاری در دشت و متأثر از فرایندهای رسوب‌گذاری ناشی از جریان‌های آبی هستند. نهشته‌های آبرفتی در قسمت‌های شمالی خوزستان دانه‌درشت بوده و بسوی جنوب و محدوده ساحلی خلیج فارس رسوبات دانه‌ریز شده و به‌اندازه رس و سیلت تبدیل می‌شوند. گنبد‌های نمکی، رخساره‌های گچی (سازندهایی مثل میشان و گچساران)، رخساره مارنی، رخساره ماسه‌سنگی و کنگلومرایی از جمله رخساره‌های موجود در حوضه آبریز رودخانه‌های مهم وارد شده به دشت است که منشأ رسوبات آبرفتی دشت را تشکیل می‌دهند (مرادی هرسینی، ۱۳۸۵).

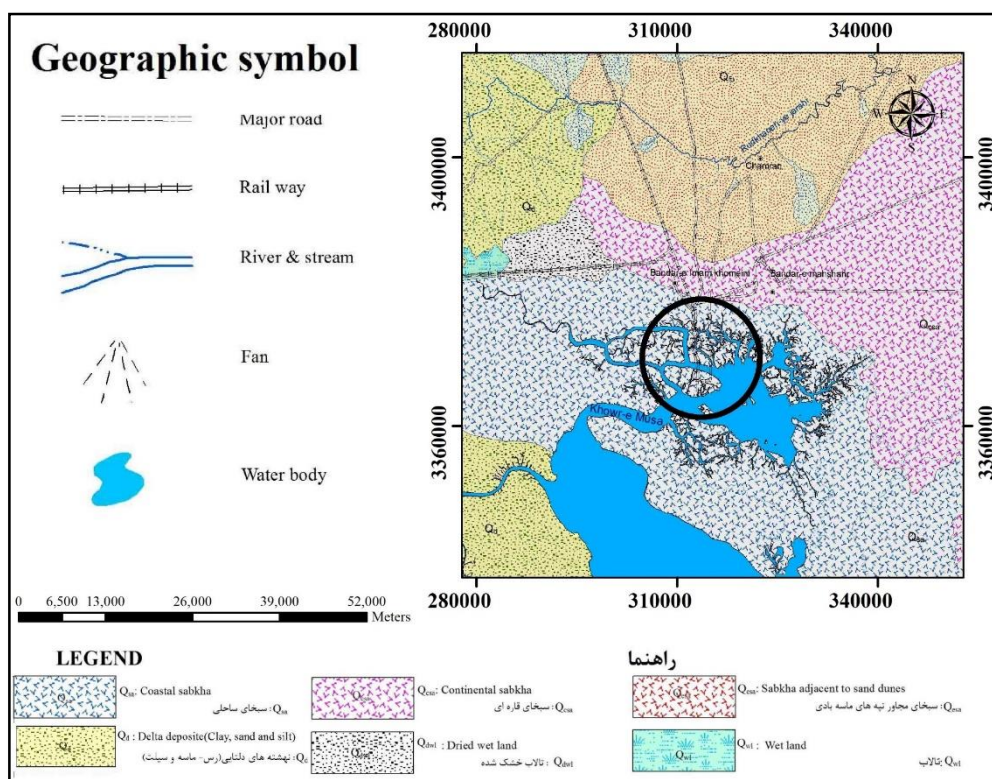
همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده محدوده بندر ماهشهر در بخش انتهایی خلیج فارس و در مصب رودخانه جراحی قرار دارد و شاخه‌های رودخانه در ناحیه مصب تشکیل دلتاهای متعددی را می‌دهند. این رودخانه که از ارتفاعات سرچشمه می‌گیرد در این محل منشعب شده و شروع به رسوب‌گذاری ذرات دانه‌ریز اعم از رس و لای می‌کند. از طرفی بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی موجود، منطقه شامل رسوبات دوران چهارم زمین‌شناسی است.

در تحقیقات ذکر شده پس از تعیین ویژگی‌های مهندسی مصالح و عمق آب زیرزمینی برای تعیین ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی از معیارهای گسیختگی ارائه‌شده توسط ترزاقی (Terzaghi, 1925)، مایهوف (Meyerhof, 1956) و هسن (Hansen, 1970) و دیگران استفاده شده است.

بر این اساس در تحقیق حاضر نتایج ۱۵۸ گمانه حفر شده در منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر و بندر امام جمع‌آوری و پس از ارزیابی نتایج و پراکندگی آنها، داده‌های ۷۸ گمانه حفر شده که هم از لحاظ پراکندگی و هم نتایج، اطلاعات کاملتری را داشتند انتخاب شده و برای هر کدام از گمانه‌ها بوسیله نرم افزار محاسبات پی تحت اکسل ظرفیت باربری بر اساس گسیختگی برشی و نشست مجاز، برای پی‌های متداول در منطقه محاسبه شده است. سپس از نتایج حاصل از محاسبات پی با نرم افزار ArcGis نقشه‌های ظرفیت باربری مجاز تولید شده و در نهایت نقشه‌های تولید شده بوسیله محاسبات پی حاصل از گمانه‌های جدید صحت‌سنجی گردیده و نتایج آن ارائه شده است.

## ۲. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب استان خوزستان در طول  $30^{\circ} 25' 24''$  عرض شرقی و  $49^{\circ} 01' 50''$  و  $49^{\circ} 07' 04''$  شمالی با وسعتی حدود ۴۴۰۰ هکتار در شهرستان ماهشهر قرار دارد. این شهرستان با مساحت ۷۳۰۴ کیلومترمربع در شمال خورموسی قرار گرفته و با شهرستان‌های اهواز، امیدیه، هندیجان و شادگان هم‌جوار است. در شکل (۱) بخشی از نقشه زمین‌شناسی استان خوزستان ارائه شده است که در آن محدوده منطقه مورد مطالعه با کادر تیره مشخص شده است.



شکل ۱. محدوده منطقه مورد مطالعه که با کادر تیره نشان داده شده است. (برگرفته از نقشه زمین شناسی استان خوزستان، ۱۳۹۷)

با تکنیک درون‌یابی با استفاده از نرم افزار ArcGIS نقشه‌های عمق آب زیرزمینی و نوع خاک تولید شده و سپس بوسیله داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی براساس فرمول هنسن (Hansen, 1970) و میزان نشست مجاز پی، ظرفیت باربری مجاز جهت پی‌های منفرد با ابعاد ۱×۱ متر و ۲×۲ متر، با عمق مدفون یک متر، پی‌های عرض یک متر و عمق مدفون یک متر و همچنین پی‌گسترده به ابعاد ۱۰×۲۰ متر با عمق مدفون یک و ۲ متر محاسبه و با استفاده از نرم افزار ArcGIS نقشه‌های ظرفیت باربری مجاز تولید گردیده است. مزیت‌های کاربرد فرمول هنسن (Hansen, 1970) عبارتند از تاثیر عمق، مقدار میل بار اعمال شده، شیب خاکریز و شیب کف پی در محاسبات انجام شده می‌باشد و ابعاد پی‌های انتخاب شده برای تولید نقشه‌ها، براساس ابعاد پی‌های متداول در منطقه انتخاب شده و شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) نمونه پی‌های اجرا شده در منطقه مورد مطالعه را نشان داده است

قبل از احداث واحدهای پتروشیمی، قسمتی از منطقه در محدوده جزر و مدی آب دریا قرار داشته و در موقع مد به زیرآب می‌رفته است. در نتیجه با توجه به مدل‌های دلتایی موجود، این منطقه توسط رسوب‌گذاری مخلوطی از فرایندهای سازنده (رودخانه‌ای) و مخرب (جزر و مدی) به وجود آمده است. وجود دو رخساره رسوبی، فاصله منطقه رسوب‌گذاری از مصب رودخانه و عملکرد جزر و مد باعث گردیده که به لحاظ گستره عرضی و عمقی تفاوت‌هایی در لایه‌ها به وجود آید، هرچند که روند تغییرات نوعی پیوستگی در لایه‌های موجود را نشان می‌دهد. در ادامه این تحقیق نقشه تغییرات سطحی و عمقی رسوبات بصورت نقشه ارائه شده است.

### ۳. مواد و روش‌ها

برای بررسی و شناسایی نهشته‌های منطقه براساس پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مورد نیاز جهت تعیین ظرفیت باربری مجاز



شکل ۲. پی منفرد اجرا شده در پتروشیمی کارون طرح HY CO



شکل ۳. پی گسترده اجرا شده در پتروشیمی کارون طرح HY CO

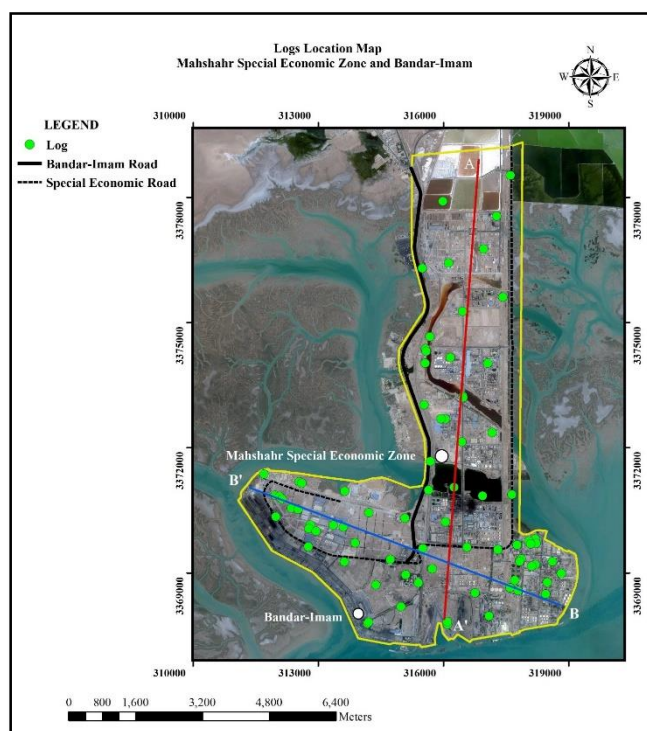


شکل ۴. پی نواری اجرا شده در پتروشیمی مارون طرح تولید پروپیلن



عبارتند از: عمق آب زیرزمینی، وزن مخصوص طبیعی، چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی و علاوه بر این، از نتایج دیگری چون ضریب تراکم پذیری حجمی، ضریب پواسان و مدول الاستیسیته استفاده شده که در ادامه به شرح هر کدام از آنها پرداخته شده است.

برای انجام تحقیق حاضر از نتایج ۷۸ گمانه اکتشافی که در منطقه مورد مطالعه حفر شده بود استفاده گردیده است. در شکل (۵) پراکندگی گمانه‌های حفر شده و محدوده منطقه مورد مطالعه با کادر زرد رنگ نشان داده شده است. داده‌های استفاده شده از نتایج گمانه‌های حفاری شده و آزمایشهای برجا و آزمایشگاهی که به عنوان ورودیهای تحقیق حاضر هستند



شکل ۵. موقعیت گمانه‌ها و نیم رخ A-A' و B-B' در منطقه مورد مطالعه

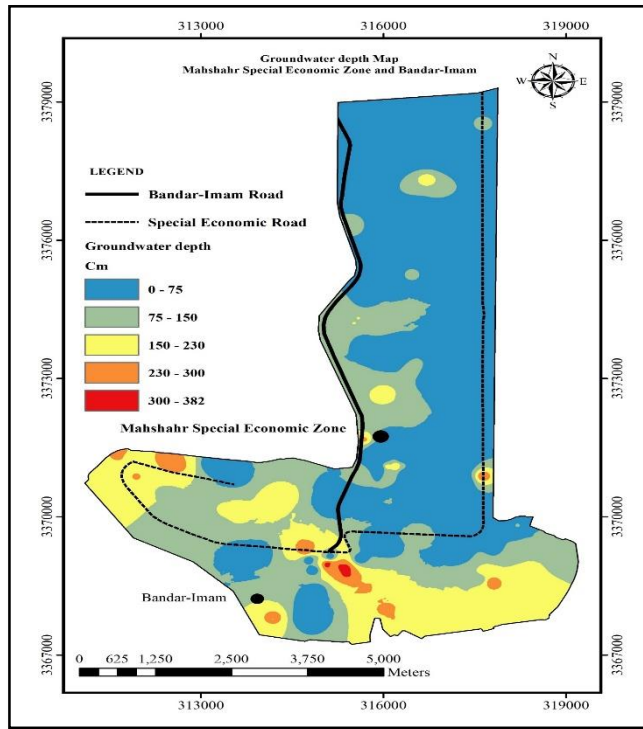
### ۱.۳. عمق آب زیرزمینی

است. در شکل (۶) نقشه عمق آب زیرزمینی ارائه شده و بر اساس نقشه تولید شده عمق آب در بیشتر قسمت‌ها کمتر از ۱۵۰ سانتیمتر بوده و تنها در نواحی محدود که عمدتاً در قسمت جنوب منطقه قرار گرفته، عمق آب تا ۳۸۲ سانتیمتر هم اندازه گیری شده است. علت کم بودن عمق آب در نواحی شمالی وجود خورهای متعدد در این منطقه است که جزیره جنوبی (بندرامام فعلی) را از مناطق خشکی جدا کرده و عملیات استحصال زمین در مناطق شمالی انجام شده است. در شکل (۷) عمق آب زیرزمینی در کادر زرد رنگ به خوبی قابل مشاهده است و دلالت بر بالا بودن تراز آب زیرزمینی منطقه دارد.

عمق آب در گمانه‌های اکتشافی حفر شده در منطقه استخراج شده و با توجه به موقعیت گمانه‌ها و عمق آب با استفاده از نرم افزار Arc GIS با تکنیک درون‌یابی (IWD) نقشه عمق آب زیرزمینی منطقه تهیه شده است. در این پژوهش برای ارزیابی و انتخاب روش درون‌یابی معیار میانگین خطای انحراف (ME) و ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شده که نتایج آن در جدول شماره (۱) نشان داده شده و همانطور که مشاهده می‌شود روش درون‌یابی (IWD) دارای ریشه دوم میانگین خطا (RMSE) کمتری نسبت به روشهای کریجینگ ساده و معمولی است. بنابراین در این پژوهش جهت تهیه نقشه‌ها از روش درون‌یابی (IWD) استفاده شده

جدول (۱). ارزیابی و صحت سنجی روشهای درون یابی

No	INTREPOLATION METOD	ME	RMSE
1	IWD	-0.019	0.139
2	ORDINERY KRICHING	-0.018	0.148
3	SIMPLE KRICHING	-0.018	0.149



شکل ۶. نقشه عمق آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

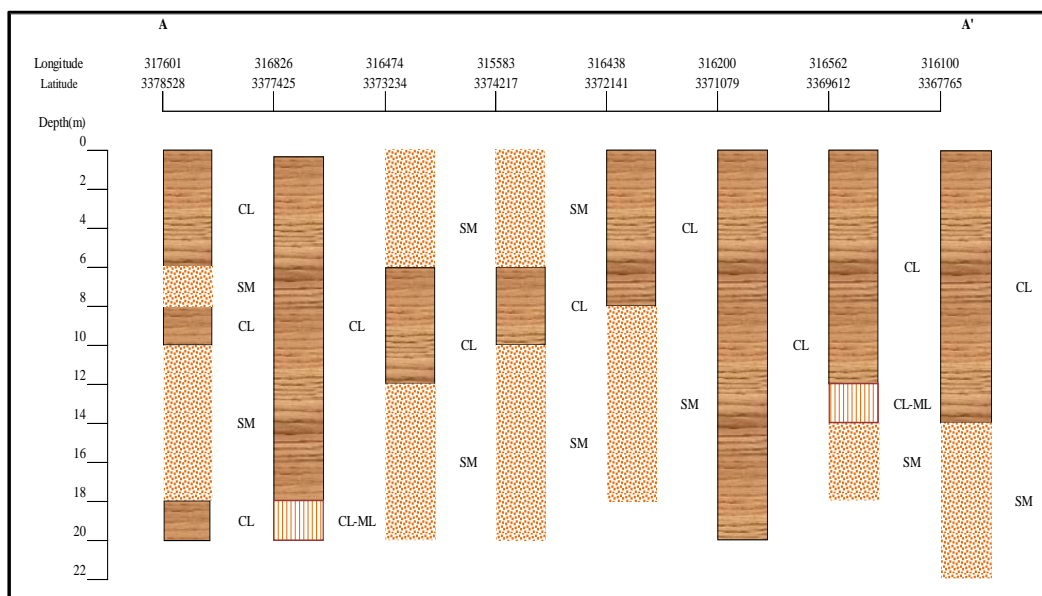


شکل ۷. عمق آب زیرزمینی و نوع خاک محل طرح توسعه پتروشیمی کارون پروژه HYCO در منطقه مورد مطالعه

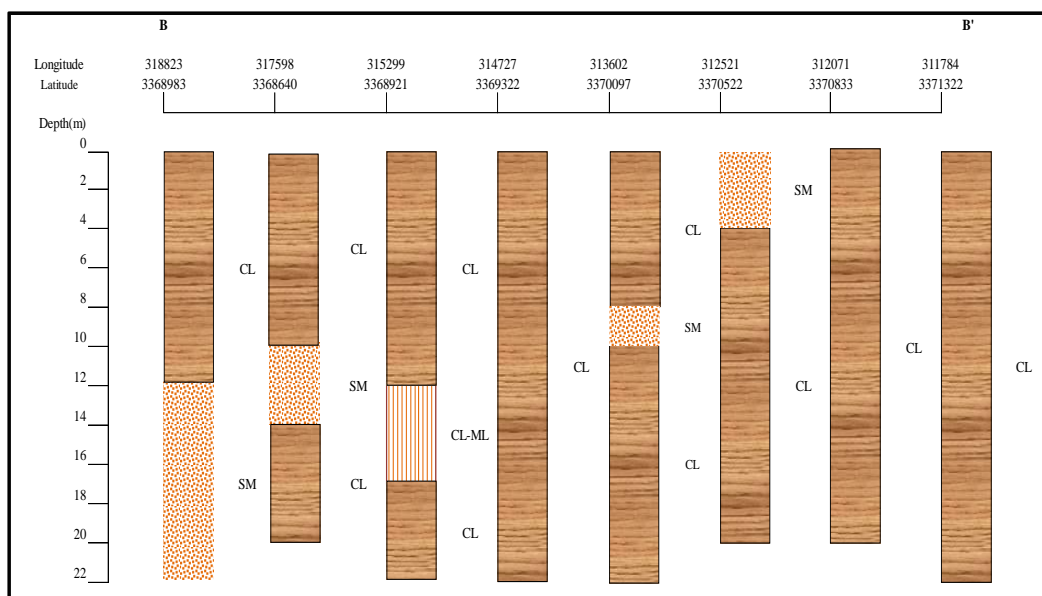
۲.۳. نوع خاک

A-A' و B-B' دو نیمرخ رسم شده و این نیمرخ‌ها در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه شده است.

برای شناسایی گسترش نوع مصالح در سطح و عمق منطقه مورد مطالعه همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده در دو امتداد



شکل ۸. تعدادی از گمانه‌های مقطع A-A' در منطقه مورد مطالعه

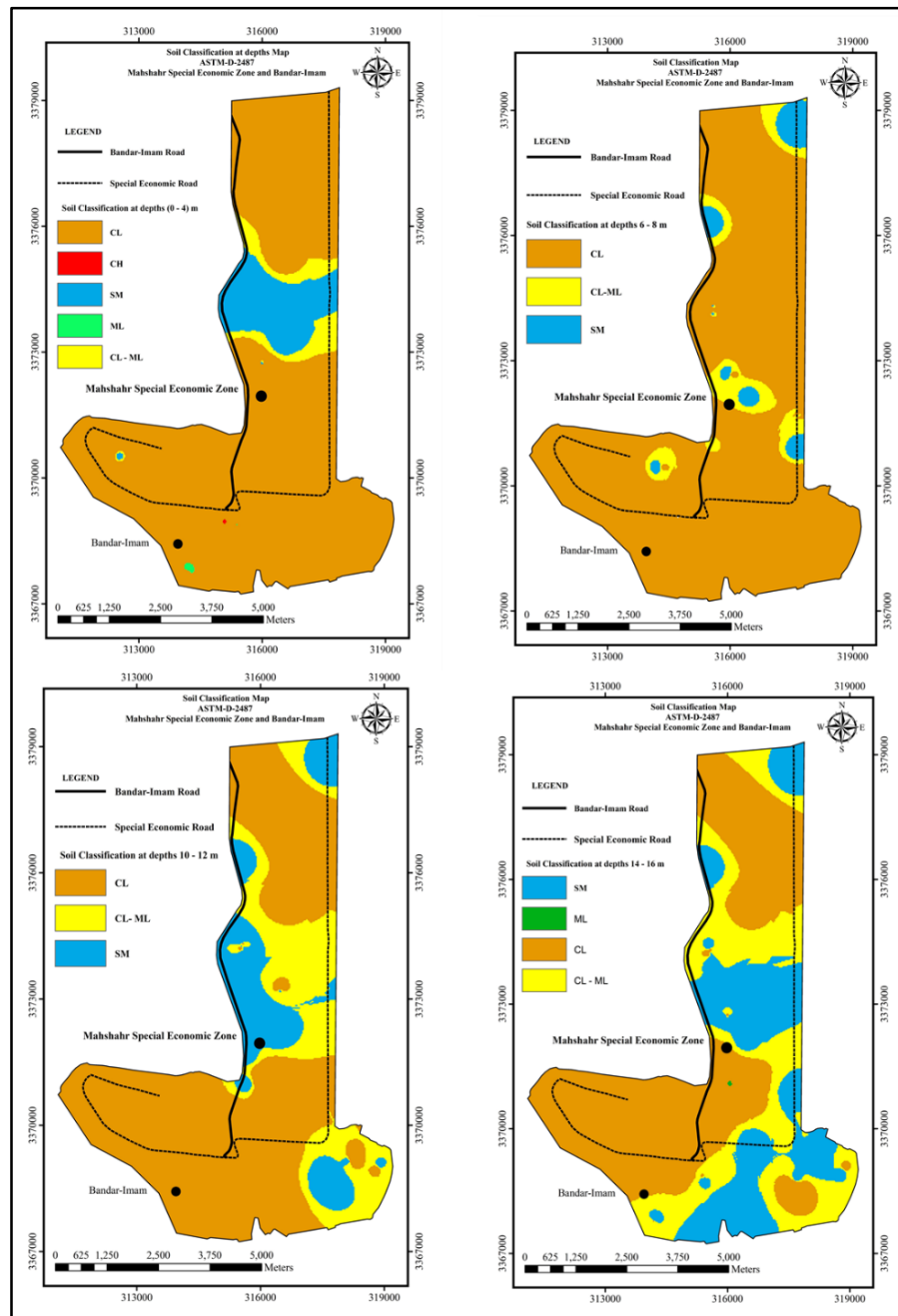


شکل ۹. تعدادی از گمانه‌های مقطع B-B' در منطقه مورد مطالعه

ترازهای پایین از مقدار رسوبات رسی کاسته و در عوض میزان رسوبات ماسه‌ای افزایش پیدا کرده است. علاوه بر موارد ذکر شده در شکل (۷) وضعیت ظاهری نوع خاک در منطقه مورد مطالعه را می‌توان مشاهده نمود که عمدتاً از رسوبات رسی تشکیل شده است.

علاوه بر آن با توجه به نتایج آزمایشهای شناسایی در عمقهای مختلف توزیع عمقی مصالح زیرسطحی در ترازهای مختلف در شکل (۱۰) ارائه شده و بر این اساس عمده رسوبات منطقه مورد مطالعه مصالح رسی (CL) است و مصالح دیگری چون ماسه سیلتی (SM)، سیلت (ML) و رس سیلتی (CL-ML) به مقدار کم در منطقه وجود دارد. همچنین مشاهده شده که در





شکل ۱۰. نقشه‌های تولید شده نوع خاک در ترازهای مختلف منطقه مورد مطالعه

گردآوری شده و بیشترین، کمترین و مد (نما) این داده‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. بررسی این داده‌ها نشان می‌دهد که ماکزیمم وزن مخصوص در جهت عمق افزایش پیدا کرده و همچنین با توجه به مد(نما)، داده‌ها در جهت عمق فراوانی مصالح با وزن مخصوص بیشتر نیز افزایش پیدا کرده است.

### ۳.۳. وزن مخصوص طبیعی

از عوامل مؤثر دیگر در تعیین ظرفیت باربری خاک، وزن مخصوص طبیعی خاک محل است و وزن مخصوص خاک در بررسی‌های زیرسطحی در زمان انجام آزمایش‌های تحکیم و سه محوری محاسبه شده است. بنابراین نتایج وزن مخصوص طبیعی بدست آمده از گمانه‌های حفاری جهت محاسبات پی

جدول ۲. بیشترین، کمترین و مد(نما) وزن مخصوص طبیعی در منطقه مورد مطالعه

No	Depth(M)	Wet Dencity(g/cm <sup>3</sup> )MAX	Wet Dencity(g/cm <sup>3</sup> )MIN	Wet Dencity(g/cm <sup>3</sup> )MODE
1	0 - 4	2.09	1.80	1.93
2	4 - 8	2.10	1.79	1.93
3	8 - 12	2.12	1.77	1.94
4	12 - 16	2.13	1.79	1.99

زهکشی نشده (UU) جمع‌آوری گردیده و ماکزیمم، مینیمم و مد (نما) این نتایج در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که چسبندگی خاک با افزایش عمق کاهش پیدا نموده و میزان فراوانی داده‌های با چسبندگی کمتر افزایش پیدا کرده است.

## ۴.۳. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

با توجه به نوع خاک منطقه که در شکل (۱۰) نشان داده شده و عمق آب زیرزمینی و اشباع بودن رسوبات که قبلاً شرح داده شد می‌توان دریافت عامل اصلی در تعیین ظرفیت باربری کوتاه مدت منطقه چسبندگی (c) خاک است. بنابراین این داده‌ها از نتایج آزمایشات سه محوری به روش تحکیم نیافته

جدول ۳. مقادیر بیشترین، کمترین و مد(نما) چسبندگی مصالح در منطقه مورد مطالعه

No	Depth(M)	C.UU(Kg/cm <sup>2</sup> )MAX	C.UU(Kg/cm <sup>2</sup> )MIN	C.UU(Kg/cm <sup>2</sup> )MOD
1	0 - 4	0.45	0.15	0.33
2	4 - 8	0.42	0.13	0.13
3	8 - 12	0.37	0.12	0.12
4	12 - 16	0.34	0.10	0.12

بر میزان زاویه اصطکاک موثر ( $\phi'$ ) افزوده شده و در عوض مقدار چسبندگی موثر ( $c'$ ) خاک کاهش پیدا می‌کند و همچنین با توجه به مد (نما) داده‌ها مقدار فراوانی مصالح با زاویه اصطکاک داخلی بالاتر، با افزایش عمق بیشتر شده و موارد ذکر شده با نقشه‌های مصالح ارائه شده در شکل (۱۰) مطابقت نسبی دارد.

عامل دیگری که برای تعیین ظرفیت باربری دراز مدت در منطقه مورد مطالعه استفاده شده پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی موثر ( $\phi'$ ) خاک و چسبندگی موثر ( $c'$ ) خاک است که از نتایج آزمایشهای برش به روش کند موجود استخراج شده و نتایج بیشترین، کمترین و مد (نما) این داده‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است. بررسی این نتایج نشان داده که با افزایش عمق

جدول ۴. مقادیر بیشترین، کمترین و مد(نما) چسبندگی مصالح در منطقه مورد مطالعه

No	Depth(M)	$\phi'$ .SH (Degree) MAX	$\phi'$ .SH (Degree) MIN	$\phi'$ .SH (Degree) MOD	c'.SH (Kg/cm <sup>2</sup> ) MAX	c'.SH (Kg/cm <sup>2</sup> ) MIN	c'.SH (Kg/cm <sup>2</sup> ) MOD
1	0 - 4	31	12	21	0.24	0.03	0.05
2	4 - 8	31	11	23	0.18	0.04	0.16
3	8 - 12	32	21	24	0.17	0.02	0.17
4	12 - 16	33	23	26	0.15	0.02	0.17

۵.۳. ضریب تراکم پذیری حجمی ( $M_v$ )

برای تعیین میزان ظرفیت باربری با توجه به مقدار نشست مجاز سازه نیاز به پارامتر دیگری چون ضریب تراکم پذیری حجمی ( $M_v$ ) است که این داده‌ها از گزارشات ژئوتکنیک آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک (۱۳۷۰-۱۳۹۸) موجود استخراج شده و در جدول (۵) مقادیر بیشترین، کمترین و

مد(نما) نتایج تعیین ضریب تراکم پذیری حجمی ( $M_v$ ) محاسبه شده در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده، با بررسی جدول (۵) مشاهده می‌شود که مقدار ضریب تراکم پذیری حجمی با افزایش عمق کاهش پیدا می‌کند که خود دلیل بر کاهش مقدار رسوبات رسی و افزایش مصالح ماسه‌ای است.

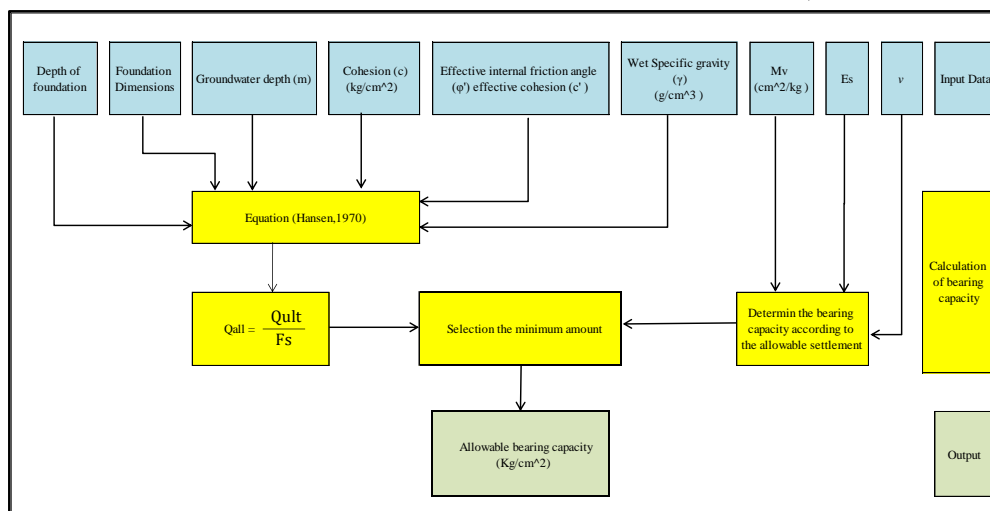
جدول ۵. تغییرات مقدار  $M_v$  در منطقه مورد مطالعه

No	Depth(M)	$M_v(\text{cm}^2/\text{kg})\text{MAX}$	$M_v(\text{cm}^2/\text{kg})\text{MIN}$	$M_v(\text{cm}^2/\text{kg})$
1	0 – 4	0.0471	0.021	0.032
2	4 – 8	0.0416	0.011	0.028
3	8 – 12	0.0405	0.009	0.018
4	12 - 16	0.0398	0.007	0.012

۶.۳. مدول الاستیسیته ( $E_s$ ) و ضریب پواسان ( $\nu$ )

دو پارامتر دیگر که در محاسبات نشست پی مورد استفاده قرار می‌گیرد مدول الاستیسیته و ضریب پواسان است که داده‌های بدست آمده از آزمایشات نشان داده که مدول الاستیسیته در منطقه مورد مطالعه بین ۳۰۰ و ۹۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر بوده و بیشترین فراوانی مقدار ۱۴۰ کیلوگرم بر سانتیمتر است و همچنین ضریب پواسان هم بین ۰/۴۲ و ۰/۳۰ متغیر

بوده و بیشترین فراوانی ضریب پواسان در منطقه مربوط ۰/۴۰ است. بررسی نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده نشان داده که مقادیر فوق وابستگی زیادی به نوع و عمق قرارگیری مصالح در منطقه مورد مطالعه دارد. روش استفاده شده در تحقیق حاضر بعد از تولید ورودیهای ذکر شده، براساس نمودار جریان‌ی نشان داده شده در شکل (۱۱) است.



شکل ۱۱. فلوچارت تعیین ظرفیت باربری مجاز

با توجه به ورودیهای ذکر شده در بخش قبل، برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سطحی (مربعی، مستطیلی و نواری)

#### رابطه ۱.

$$q_{ult} = C N_c S_c d_c i_c g_c b_c + \gamma D_f N_q S_q d_q i_q g_q b_q + 1/2 \gamma B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma$$

$q_{ult}$ . ظرفیت باربری نهائی پی  
 $C$ . چسبندگی خاک  
 $\gamma$ . وزن واحد حجم موثر خاک  
 $D_f$ . عمق موثر مدفون پی  
 $B$ . عرض پی  
 $N_c, N_q, N_\gamma$ . ضرایب ظرفیت باربری پی  
 $S_c, S_q, S_\gamma$ . ضرایب شکل پی  
 $d_c, d_q, d_\gamma$ . ضرایب عمق  
 $i_c, i_q, i_\gamma$ . ضرایب میل بار  
 $b_c, b_q, b_\gamma$ . ضرایب پاشنه  
 $g_c, g_q, g_\gamma$ . ضرایب شیب خاکریز طرفین شالوده

(۲) و (۳) محاسبه شده و ظرفیت باربری مجاز براساس نشست طبق رابطه (۴) تعیین شده است.

$$S_i = \frac{Bq}{E_s} (1 - \nu^2) I_w \quad \text{رابطه ۲.}$$

$S_i$ . نشست آنی  
 $B$ . عرض پی  
 $q$ . تنش موثر زیر شالوده  
 $E_s$ . مدول الاستیسیته  
 $I_w$ . ضریب تاثیر بدون بعد که به نسبت طول به عرض شالوده بستگی دارد  
 $\nu$ . ضریب پواسان

در ادامه با توجه به عدم قطعیت‌هایی که به دلیل وجود تفاوت در خواص مصالح در عمق و سطح و پارامترهای متعدد موثر دیگر وجود دارد، مقادیر دقیق تنش‌ها قابل محاسبه نیست. همچنین اعضای یک سیستم ممکن است به طور موقت تحت بارهایی بیش از مقادیر مفروض قرار گیرند که در طراحی پی اغلب سازه‌ها مورد توجه قرار نگرفته و امکان ازدیاد تنش‌های ثانویه باعث تخمین‌های کمتر از واقعیت در مورد میزان و نوع بارهایی که قرار است پی سازه تحمل نماید، در نظر گرفته شود. بنابراین تمرکز تنش و شرایط محیطی غیر قابل پیش‌بینی همگی باعث در نظر گرفتن ضریب اطمینان در محاسبات ظرفیت باربری پی می‌شود. استفاده از ضریب اطمینان برای پی‌های منفرد ۲-۳ و برای پی‌های گسترده ۲/۵-۱/۷ مناسب است. (Bowles, J. E, 2001) در این پژوهش از ضریب اطمینان ۳ جهت محاسبات ظرفیت باربری استفاده شده است. ظرفیت باربری پی در حالت دراز مدت و کوتاه مدت محاسبه شده و ظرفیت باربری بحرانی به عنوان ظرفیت باربری حاصل از گسیختگی برشی انتخاب گردیده است. مقدار نشست مجاز برای پی‌های منفرد و نواری در حالت نشست یکنواخت ۲۵ میلیمتر، پی‌های گسترده روی رسوبات ماسه‌ای ۵۰ میلیمتر و رسوبات رسی ۱۰۰ میلیمتر توصیه می‌شود. Bowles, J. E, (2001) در ادامه نشست آنی و نشست تحکیمی طبق روابط

$$S_c = M_v \cdot H \cdot \Delta \sigma' \quad \text{رابطه ۳.}$$

$S_c$ . نشست تحکیمی  
 $M_v$ . ضریب تراکم پذیری حجمی  
 $H$ . ضخامت لایه  
 $\Delta \sigma'$ . تنش مجاز

$$S = S_i + S_c \quad \text{رابطه ۴.}$$

$S$ . نشست  
 $S_i$ . نشست آنی  
 $S_c$ . نشست تحکیمی

طبق فلوجارت شکل (۱۱) بوسیله نرم افزار محاسبه ظرفیت باربری مجاز تحت Excel، ظرفیت باربری مجاز بر مبنای فرمول هنسن (Hansen, 1970) و ظرفیت باربری مجاز براساس مقدار نشست مجاز جهت هر نقطه محل محاسبه شده و کمترین مقدار به عنوان ظرفیت باربری مجاز در آن نقطه انتخاب شده است.

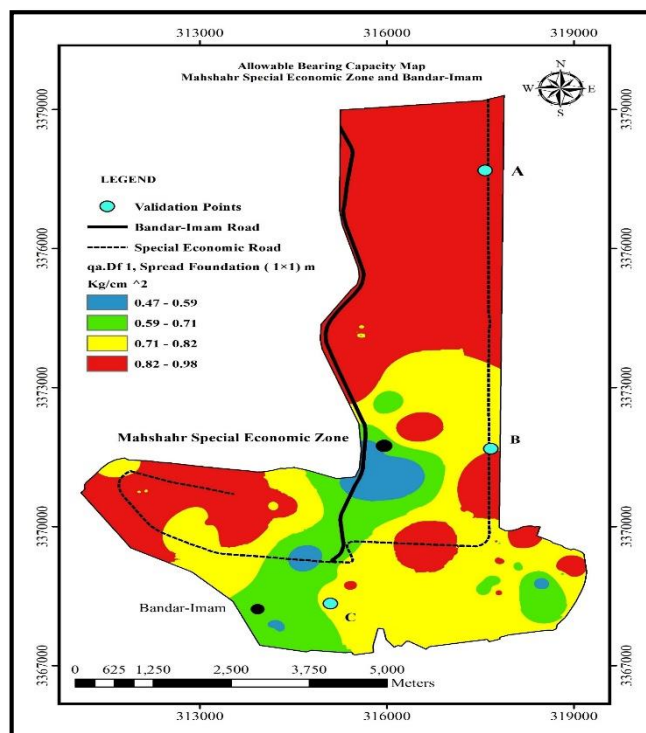
بعد از مشخص کردن ظرفیت باربری‌ها در هر نقطه و با توجه به مشخص بودن مختصات محل گمانه‌های اکتشافی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS اقدام به ترسیم نقشه‌های ظرفیت باربری مجاز شده است.

#### ۴. تجزیه و تحلیل نتایج

هدف مقاله حاضر تولید نقشه‌های زمین شناسی مهندسی با کاربری ظرفیت باربری مجاز بر مبنای گسیختگی برشی و مقدار نشست مجاز در منطقه مورد مطالعه بوده و با توجه به مطالب قبلی ورودیهای تولید نقشه‌ها مشخص و مدل‌سازی تحلیل و محاسبه ظرفیت باربری نیز بیان شده است. در این بخش به ارائه نتایج تحقیق یعنی نقشه‌های تولید شده برای پی‌های با ابعاد و عمق مدفون متفاوت با تاکید بر فراوانی کاربرد آنها در منطقه مذکور پرداخته شده است.

#### ۱.۴. نقشه پی‌های منفرد

نقشه ظرفیت باربری مجاز پی منفرد با ابعاد ۱×۱ با عمق مدفون (D<sub>f</sub>) یک متری در شکل (۱۲) نشان داده شده است. نقشه تولید شده نشان می‌دهد ظرفیت باربری در نواحی شمالی منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر و بندر امام از دیگر مناطق بیشتر است. ظرفیت باربری مجاز پی منفرد با ابعاد ۱×۱ با عمق مدفون (D<sub>f</sub>) یک متری بین ۰/۴۷ تا ۰/۹۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر می‌باشد.



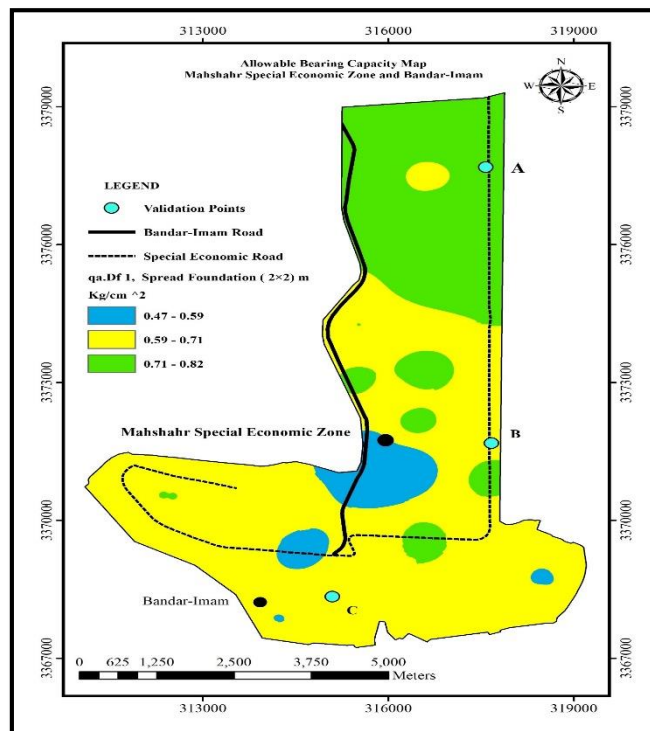
شکل ۱۲. نقشه ظرفیت باربری مجاز پی منفرد با ابعاد ۱×۱ با عمق مدفون (D<sub>f</sub>) یک متری

نقشه ظرفیت باربری مجاز پی منفرد با ابعاد ۲×۲ با عمق مدفون (D<sub>f</sub>) یک متری در شکل (۱۳) ارائه شده است. بر این اساس ظرفیت باربری در نواحی شمالی منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر و بندر امام از دیگر مناطق بیشتر است و ظرفیت باربری مجاز پی منفرد با ابعاد ۲×۲ با عمق مدفون (D<sub>f</sub>) یک متری بین ۰/۴۷ تا ۰/۸۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر است.

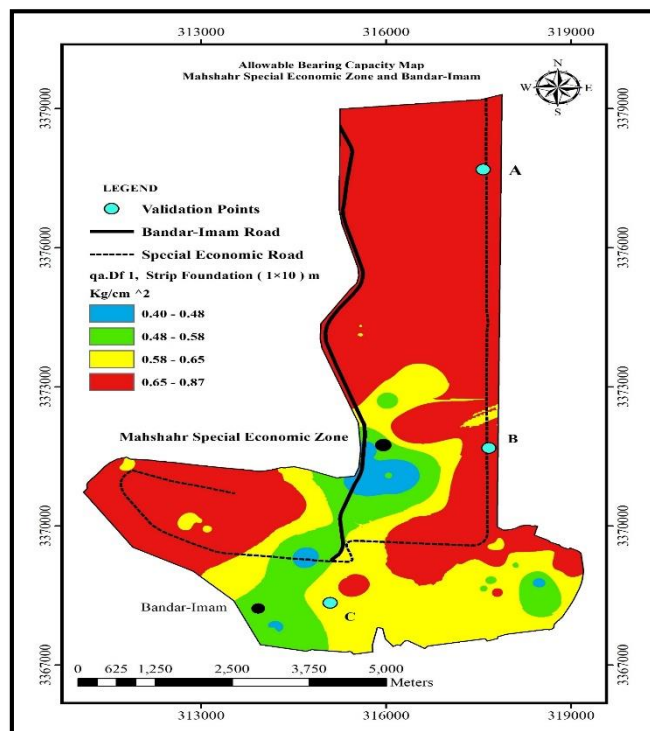
#### ۲.۴. نقشه پی نواری

شکل (۱۴) نقشه ظرفیت باربری برای پی نواری با عرض پی یک متر و عمق مدفون (D<sub>f</sub>) یک متری را نشان داده و با بررسی نقشه مذکور مشاهده شده ظرفیت باربری همانند نقشه‌های قبلی در نواحی شمالی منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر و بندر امام از دیگر مناطق بیشتر است. در ضمن ظرفیت باربری مجاز جهت پی نواری با عرض پی یک متر و عمق مدفون (D<sub>f</sub>) یک متری بین ۰/۴۰ تا ۰/۸۷ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر است.





شکل ۱۳. نقشه ظرفیت باربری مجاز پی منفرد با ابعاد ۲×۲ با عمق مدفون ( $D_f$ ) یک متری

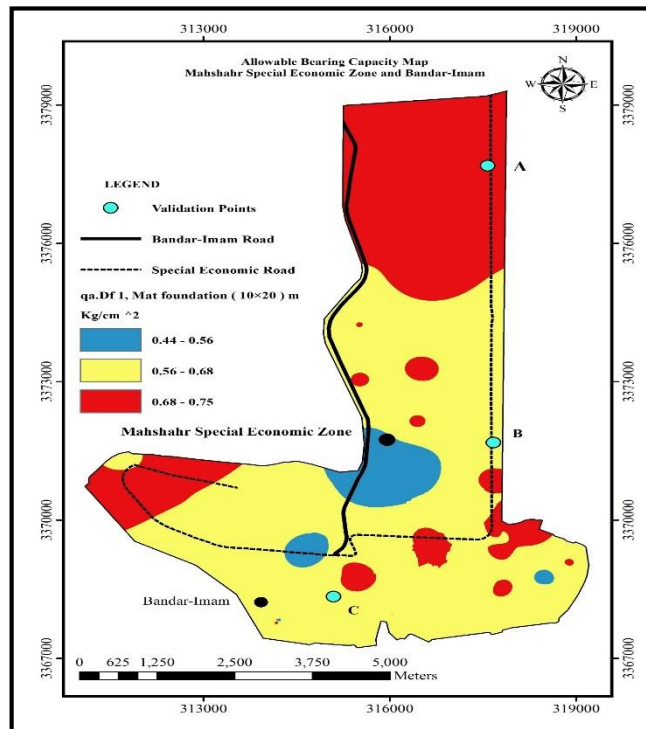


شکل ۱۴. نقشه ظرفیت باربری مجاز پی نواری با عرض یک متری و عمق مدفون ( $D_f$ ) یک متر

۳.۴. نقشه‌های پی گسترده

شکل (۱۵) نقشه ظرفیت باربری برای پی گسترده با ابعاد  $10 \times 20$  متری با عمق مدفون ( $D_f$ ) یک متر را نشان داده است. ظرفیت باربری در منطقه مورد مطالعه برای پی گسترده با ابعاد

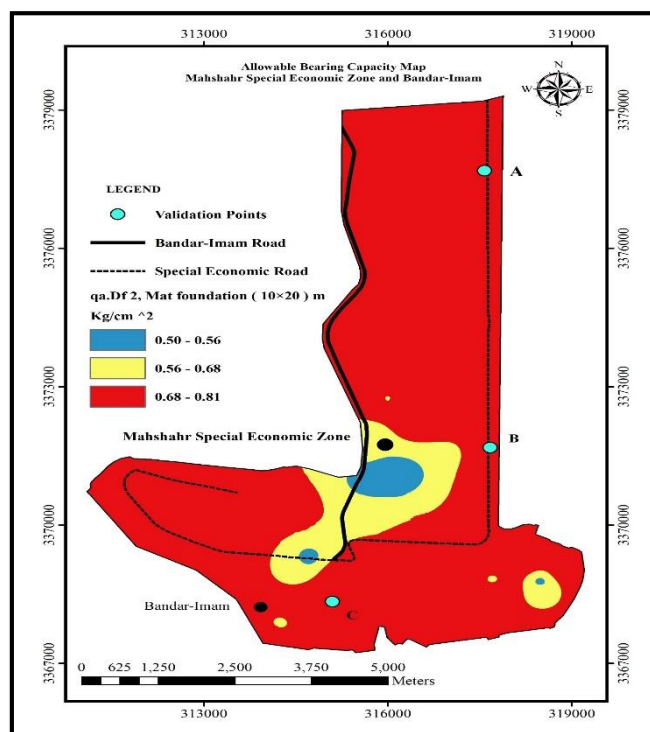
$10 \times 20$  متری با عمق مدفون ( $D_f$ ) واحد بین  $0.46$  تا  $0.75$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر است و مانند دیگر نقشه‌های تولید شده ظرفیت باربری در نواحی شمالی منطقه از دیگر نواحی بیشتر است.



شکل ۱۵. نقشه ظرفیت باربری مجاز پی گسترده با ابعاد  $(20 \times 10)$  با عمق مدفون ( $D_f$ ) یک متری

شکل (۱۶) نقشه ظرفیت باربری برای پی گسترده با ابعاد  $10 \times 20$  متری با عمق مدفون ( $D_f$ ) دو متری را نشان داده است. و ظرفیت باربری در منطقه مورد مطالعه برای پی گسترده با ابعاد  $10 \times 20$  متری با عمق مدفون ( $D_f$ ) دو متری بین  $0.50$  تا  $0.81$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر است. با مقایسه شکل

های (۱۵) و (۱۶) مشاهده می‌گردد با افزایش عمق مدفون ( $D_f$ ) پی گسترده میزان ظرفیت باربری مجاز در منطقه مورد مطالعه افزایش پیدا کرده و ظرفیت باربری منطقه اقتصادی ماهشهر و بندر امام بجز نواحی مرکزی بطور عمده بین  $0.68$  تا  $0.81$  کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است.



شکل ۱۶. نقشه ظرفیت باربری مجاز پی گسترده با ابعاد (۱۰×۲۰) با عمق مدفون (D<sub>f</sub>) دو متری

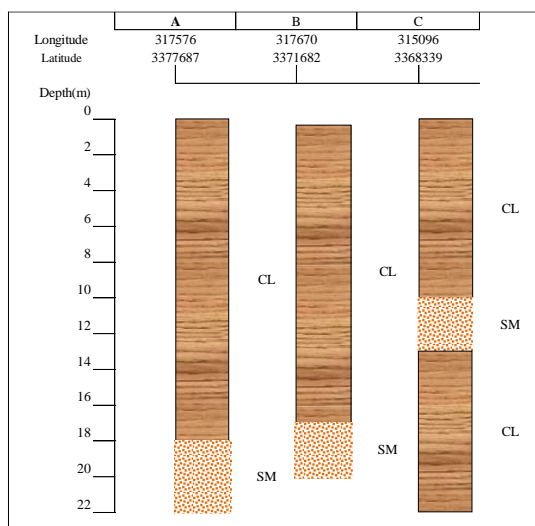
### ۵. بحث

با توجه به موقعیت قرارگیری هر کدام از گمانه‌های اعتبار سنجی روی نقشه‌ها بازه ظرفیت باربری مجاز آن نقطه آورده شده و در کنار آن مقدار ظرفیت باربری حاصل از گمانه کنترلی درج شده است. در صورتی که مقدار ظرفیت باربری مجاز گمانه اعتبارسنجی در بازه مقدار ظرفیت باربری محاسبه شده در محل قرارگیری گمانه اعتبارسنجی در هر کدام از نقشه‌ها قرار گیرد، مقدار درصد خطا صفر در نظر گرفته شده است و در صورتیکه نتایج ظرفیت باربری مجاز اعتبار سنجی خارج از بازه مجاز با توجه به محل قرارگیری گمانه قرار گرفت، میزان اختلاف با نزدیکترین عدد بازه مذکور بر میانگین بازه تقسیم شد و مقدار حاصل به عنوان درصد خطا معرفی شده است.

به منظور اعتبار سنجی نقشه‌های تولید شده از اطلاعات ۳ گمانه اکتشافی جدید که در تولید نقشه‌ها از آنها استفاده نشده بود، استفاده شد. موقعیت این گمانه‌ها در شکل‌های (۱۲) تا (۱۶) با علائم A, B, C روی نقشه‌های ظرفیت باربری مجاز نشان داده شده است. لوگ این گمانه‌های کنترلی در شکل (۱۷) نشان داده شده و بخش عمده‌ای از این گمانه‌ها نیز از نهشته‌های رسی (CL) تشکیل شده و در ترازهای پایین مقدار رسوبات ماسه‌ای افزایش پیدا کرده است. جدول (۶) داده‌های گمانه‌های اعتبار سنجی را نمایش داده و براساس این داده‌ها نتایج محاسبات ظرفیت باربری گمانه‌های اعتبارسنجی در مقایسه با ظرفیت باربری مجاز محاسبه شده برای منطقه مورد مطالعه در جدول (۷) ارائه شده است. همانطور که در جدول (۷) نشان داده شده

جدول ۶. داده‌های اولیه پارامترهای مهندسی برای محاسبات ظرفیت باربری لوگهای اعتبارسنجی

Log	E <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	ν	Wet Density (g/cm <sup>3</sup> )	Effective Friction Angel (φ')	Effective Cohesion (c') (kg/cm <sup>2</sup> )	Cohesion (c) (kg/cm <sup>2</sup> )	W-L (Cm)
A	110	0.4	1.97	25	0.1	0.4	70
B	120	0.35	1.95	28	0.06	0.31	90
C	100	0.4	1.95	24	0.15	0.28	170



شکل ۱۷. لوگ گمانه های اعتبارسنجی نتایج پهنه بندی

جدول ۷. نتایج محاسبات ظرفیت باربری گمانه‌های اعتبارسنجی (کنترل)

Log		A	B	C	
Spread Foundation $D_f(1)$	$(1 \times 1)$ m	Map results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.82 – 0.98	0.82 – 0.98	0.71 – 0.82
		Validation results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.87	0.94	0.81
		Error percentage (%)	0	0	0
	$(2 \times 2)$ m	Map results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.71 – 0.82	0.59 – 0.71	0.59 – 0.71
		Validation results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.67	0.71	0.68
		Error percentage (%)	5	0	0
Strip Foundation	$D_f(1)$	Map results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.65 – 0.87	0.65 – 0.87	0.58 – 0.65
		Validation results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.74	0.77	0.67
		Error percentage (%)	0	0	3
Mat Foundation $(10 \times 20)$ m	$D_f(1)$	Map results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.56 – 0.75	0.56 – 0.68	0.56 – 0.68
		Validation results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.76	0.70	0.68
		Error percentage (%)	2	3	0
	$D_f(2)$	Map results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.68 – 0.81	0.68 – 0.81	0.68 – 0.81
		Validation results ( $\text{kg/cm}^2$ )	0.81	0.81	0.81
		Error percentage (%)	0	0	0

رسوبات ماسه‌ای افزوده شده است. عمق آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بین صفر تا ۳۸۲ سانتیمتر متغیر است و بطور عمده عمق آب زیرزمینی منطقه کمتر از ۱۵۰ سانتیمتر است در نهایت بر اساس ظرفیت باربری مجاز با عنایت به گسیختگی برشی و نشست مجاز، ظرفیت باربری پی‌های مختلف بین ۰/۴۰ تا ۰/۹۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع متغیر است و ظرفیت باربری در نواحی شمالی از دیگر نواحی بیشتر است. در صورتی که کل منطقه مورد مطالعه بطور کلی از لحاظ ظرفیت باربری بررسی شود، میتوان ظرفیت باربری مجاز جهت منطقه مورد مطالعه را بین ۰/۴۰ تا ۰/۶۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع پیشنهاد داد. با توجه به پایین بودن ظرفیت باربری مجاز در منطقه مورد مطالعه جهت احداث سازه‌های مهم، بخصوص مخازن بزرگ نفت و گاز به بهسازی خاک در محل احداث سازه نیاز است.

#### ۷. تقدیر و تشکر

در پایان از آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهر سازی به خاطر در اختیار قرار دادن گزارش‌های ژئوتکنیک سپاسگزاری می‌گردد.

بررسی‌ها نشان داده که در نواحی جنوب شرقی و غرب که تراکم و پراکندگی گمانه‌ها بسیار مناسب است، نتایج کنترلی با نقشه‌ها مطابقت خوبی دارند و در نواحی شمالی موقعیت گمانه A با توجه به تراکم پایین گمانه‌های حفاری میزان خطا تا ۵ درصد محاسبه شده است. یکی از مزایای تولید نقشه به روش درون یابی با نرم افزار ArcGIS این حقیقت است که با حفر گمانه‌های جدید و در نتیجه تولید داده‌های بیشتر در منطقه می‌توان نقشه‌ها را ارتقاء داده و میزان خطای نتایج را به حداقل رسانید.

#### ۶. نتیجه‌گیری

تولید نقشه زمین‌شناسی با کاربردهای خاص گامی در جهت کاربردی کردن ویژگی‌های مهندسی مصالح است. در این راستا با توجه به داده‌های اکتشافی موجود در منطقه ویژه اقتصادی ماهشهر و بندر امام با بررسی‌های صورت گرفته مشخص می‌شود که رسوبات منطقه تا عمق ۱۶ متری عمدتاً رس و به مقدار کمتر رس سیلتی و ماسه سیلتی است و همچنین با افزایش عمق از میزان رسوبات رسی کاسته و بر مقدار

#### منابع

- ازدردی، ع.، عیبات، ا.، جودکی، م.، ۱۳۹۷. نقشه زمین شناسی ۱:۵۰۰۰۰۰ استان خوزستان. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- رضایی، ف.، عیوضی، م.، ۱۳۸۸. مطالعه ظرفیت باربری و میزان نشست زمینهای خاور و جنوب خاور تهران، مجله علوم زمین، دوره ۱۹، شماره ۷۳، پاییز، ۷۱ - ۷۸.
- شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک.، ۱۳۷۰-۱۳۹۸. گزارشات ژئوتکنیک انجام شده در منطقه ماهشهر.
- صمدیان، ب.، فاخر، ع.، ۱۳۹۸. ارائه اطلاعات زمین شناسی و ژئوتکنیکی برای ساختگاه شهر سنندج، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد ۱۳، شماره یک، بهار، ۹۵ - ۱۲۲.
- عساکره، ع.، مصفا، م.، ۱۳۹۹. پهنه بندی پارامترهای مقاومتی خاک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS مطالعه موردی شهر بندرعباس، نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۷، شماره ویژه ۲، تابستان، ۴-۲۲.
- غیومیان، ج.، فاطمی عقدا، س. م.، ملکی، م.، خامسی، م.، ۱۳۸۳. تشکیل بانک اطلاعات ژئوتکنیکی و کاربرد آن در تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی مهندسی تهران بزرگ، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، شاهرود، ۹ ص.
- مرادی هرسینی، ک.، ۱۳۸۳. بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی نهشته‌های محیط‌های رسوبی عهد حاضر در جنوب دشت خوزستان، رساله دکترای زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.



- Al-defae, A. H., Mohammed, J., Saleem, H.D., 2020. Digital maps of mechanical geotechnical parameters using GIS, *Cogent Engineering*, 7:1.
- Al-Maliki, L. A. J., Al-Mamoori, S. K., El-Tawel, K., Hussain, H. M., Al-Ansari, N., Al-Ali, M. J., 2018. Bearing Capacity Map for An-Najaf and Kufa Cities Using GIS. *Engineering*, 10, 262-269.
- Al-Mamoori, S. K., Jasem-Al-Maliki, L. A., Al-Sulttani, A. H., 2020. Horizontal and Vertical Geotechnical Variations of Soils According to USCS Classification for the City of An-Najaf, Iraq Using GIS. *Geotech Geol Eng* 38, 1919–1938.
- Andriamamonjisoa, S. N., Hubert-Ferrari, Auré., 2019. Combining geology, geomorphology and geotechnical data for a safer urban extension: Application to the Antananarivo capital city (Madagascar), *Journal of African Earth Sciences*.
- Bowles, J. E., 2001. *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition, McGraw-Hill, New York.
- Hansen, J. B., 1970. A revised extended formula for bearing capacity, *Danish Geotechnical Institute Bulletin*, No. 28, Copenhagen.
- Kim, M., Kim, H. S., Chung, C.K. A., 2020. Three-Dimensional Geotechnical Spatial Modeling Method for Borehole Dataset Using Optimization of Geostatistical Approaches. *KSCE J Civ Eng* 24, 778–793.
- Meyerhof, G.G., 1956. Penetration tests and bearing capacity of cohesion less soils”, *Proceedings ASCE*, Vol. 82, No. SM1, Paper 866, pp. 1-19.
- Mohammadi, M., FatemiAghda, S. M., Talkhablou, M., Cheshomi, A., 2020. Introducing a Comprehensive Geological and Geotechnical Classification for Urban Planning and Design, A Case Study in Isfahan (Iran). *Geotech Geol Eng* 38(2).
- Terzaghi, K., Peck, R. B., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*”, 2nd edn, John Wiley and Sons, New York.
- Valverde-Palacios, I., Valverde-Espinosa, I., Irigaray, C., Chacoń, J., 2014. Geotechnical map of Holocene alluvial soil deposits in the metropolitan area of Granada (Spain): a GIS approach”, *Bull Eng Geol Environ*.