

بررسی تأثیر استفاده از ترانسه‌های اصلاح‌شده بر ظرفیت باربری خاک و اثر ابعاد آن

امید توسلی^{*۱}

محمد رضا شیخ الملوکی^۲

چکیده

در این مقاله، به بررسی تأثیر استفاده از ترانسه‌های اصلاح‌شده بر ظرفیت باربری خاک و اثر ابعاد آن با استفاده از تحلیل عددی به کمک نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS پرداخته است. در ابتدا صحت عملکرد و اعتبارسنجی نرم‌افزار در مقایسه نتایج با تحقیقات گذشته انجام گردیده و پس از حصول اطمینان از تطابق نتایج، اثر تأثیرات ترانسه بهسازی شده بررسی شده است. با تحلیل‌های انجام‌شده بر روی ظرفیت باربری شالوده‌های مستقر بر ترانسه اصلاح‌شده، استنتاج می‌گردد که ظرفیت باربری خاک به کمک ایجاد ترانسه با خصوصیات مقاومتی بالاتر در زیر پی افزایش یافته و خاک مقاومت بیشتری از خود نشان داده و با افزایش نسبت عرض ترانسه معادل سه برابر عرض پی، مقدار آن افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر ارتفاع ترانسه، می‌توان هزینه‌های اجرایی را با تعیین عمق حفاری بهینه کاهش داد. تغییرات هندسه و شکل پی مستقر بر ترانسه بهسازی شده و همچنین مشخصات خاک ترانسه نیز تأثیر بسزایی بر روی ظرفیت باربری آن داشته، به طوری که می‌توان با انتخاب مناسب آن‌ها به ظرفیت باربری بهینه دست یافت.

واژه‌های کلیدی:

بهسازی خاک، ترانسه اصلاح‌شده، بار-نشست، هندسه پی، روش اجزاء محدود

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول) (Email :o.tavasoli@iauet.ac.ir)

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

مقدمه

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های بسیاری در مورد استفاده از ترانسه اصلاح‌شده^{۱۳} انجام شده است. حافظ و ابراهیم^{۱۴} در سال ۲۰۱۴ با بررسی ظرفیت باربری شالوده ساخته‌شده بر روی خاک رس نرم، نشان دادند که ظرفیت باربری پی‌های ساخته‌شده روی این نوع از خاک، می‌تواند توسط لایه‌های تراکم یافته ماسه و شن بهبود پیدا کنند. ایشان با استفاده از تحلیل عددی و نتایج آزمایش بارگذاری صفحه، نتیجه گرفتند که ظرفیت باربری نهایی به‌طور مستقیم متناسب با زاویه اصطکاک داخلی خاک دانه‌ای است. تحقیقات انجام‌شده توسط قضاوی و همکاران در سال ۱۳۸۷ نشان می‌دهد که استفاده از ترانسه‌های اصلاح‌شده با خصوصیات مقاومتری بیشتر در مکان‌هایی که خاک مقاومت کمتری دارد، می‌تواند گزینه مناسبی در جهت افزایش ظرفیت باربری باشد. ایشان با استفاده از روش آنالیز حدی مرز بالا^{۱۵} و در نظر گرفتن توده‌های لغزش زیر پی و بهینه‌سازی آن، روابطی جهت تعیین ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر روی ترانسه‌های اصلاح‌شده ارائه داده و استنتاج نمودند که ایجاد ترانسه‌های اصلاح‌شده تأثیر فراوانی در افزایش ظرفیت باربری پی داشته و با افزایش زاویه اصطکاک داخلی ترانسه اصلاح‌شده، ظرفیت باربری بیشتر می‌شود. قضاوی و نامداری در سال ۱۳۹۲ نشان دادند که یکی از روش‌های تثبیت خاک‌های سست، استفاده از ترانسه دانه‌ای است. در پژوهش آزمایشگاهی آن‌ها، پی نواری با استفاده از یک مدل فیزیکی، بر روی ترانسه دانه‌ای در شرایط معمولی و مسلح شده با ژئوگرید^{۱۶} در حالت بارگذاری سیکلی قرار گرفته و سپس بارگذاری و باربرداری انجام شده است. در این آزمایش‌ها اثر عمق قرارگیری و تعداد لایه‌های ژئوگرید و همچنین مقادیر بهینه آن‌ها تحت بارگذاری سیکلی تعیین گردیده و نتیجه گرفتند که با افزایش تعداد سیکل بارگذاری بدون استفاده از ژئوگرید، نشست افزایش پیدا کرده و در صورت به‌کارگیری ژئوگرید و افزایش تعداد لایه‌های آن، نشست و فاصله بهینه قرارگیری لایه‌ها کاهش می‌یابد. در شدت بارهای سیکلی کمتر، تسلیح چندان تأثیرگذار نیست و در

خاک به‌عنوان تکیه‌گاه اصلی سازه‌ها، همواره در طراحی و ساخت آن‌ها مورد توجه بوده است. اندیشه بهبود بخشیدن به خصوصیات مقاومتی خاک جهت به‌کارگیری گسترده‌تر آن به‌عنوان مصالح اصلی احداث بناهای گوناگون، سابقه‌ای بسیار طولانی دارد. در صورتی که شرایط ژئوتکنیکی زمین برای ساخت انواع پی‌های متعارف از نظر پایداری و نشست پذیری مناسب نباشد، ضروری است تمهیداتی برای بهسازی آن لحاظ شود (ترزاقی^۱، ۱۹۴۳)، (فرگاسزی و لاوتن^۲، ۱۹۸۴) و (ورما و چار^۳، ۱۹۸۶).

بدون شک یکی از ابتدایی و مهم‌ترین اصول در اجرای طرح‌های عمرانی، داشتن زمینی با ظرفیت باربری قابل قبول می‌باشد و روش‌های بسیار زیادی برای بهبود خصوصیات مقاومتی زمین وجود دارد که با توجه به فاکتورهای اقتصادی، مشکلات انجام پروژه، امکانات موجود، محدودیت‌های موقعیتی و مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرند ((محمود و عبدالرَبو^۴، ۱۹۸۹) و (پاترا و همکاران^۵، ۲۰۰۵)).

برداشت مصالح نامناسب زیر پی و جایگزینی آن با مصالح مقاوم‌تر، یکی از روش‌های بهسازی خاک^۶ بوده و هنگامی عملی و میسر است که دارای ضخامت کم بوده و منابع قرضه مصالح، در فاصله‌ای معقول نسبت به محل پروژه قرار داشته باشد و در مقایسه اقتصادی با سایر گزینه‌ها، در شرایط بهینه‌تری قرار گیرد. در زمینه محاسبات توان باربری خاک^۷ و نشست^۸ پی، مطالعات بسیاری توسط پژوهشگران انجام شده و همچنین آزمایش‌های آزمایشگاهی و روش‌های عددی و تحلیلی مختلفی برای محاسبه ظرفیت باربری ارائه گردیده که می‌توان به تحقیقات و پژوهش‌های (یاماموتو و کاسودا^۹، ۲۰۰۱)، (چاکرابورتی و کومار^{۱۰}، ۲۰۱۴)، (چن و ابوفرسخ^{۱۱}، ۲۰۱۵) و (مرلوس و رومو^{۱۲}، ۲۰۰۶) اشاره نمود.

^۱. Terzaghi

^۲. Fragaszy and Lawton

^۳. Verma and Char

^۴. Mahmoud and Abdrabbo

^۵. Patra et al.

^۶. Soil improvement

^۷. Bearing capacity

^۸. Settlement

^۹. Yamamoto and Kusuda

^{۱۰}. Chakraborty and Kumar

^{۱۱}. Chenn and Abu-Farsakh

^{۱۲}. Merlos and Romo

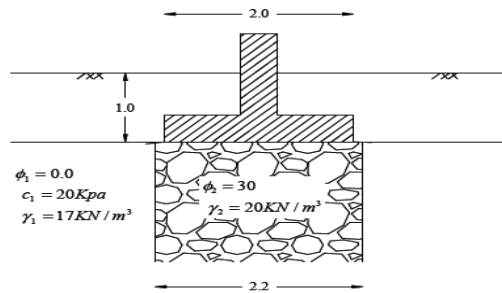
^{۱۳}. Modified trench

^{۱۴}. Hafez and Ibrahim

^{۱۵}. Upper bound limit analysis

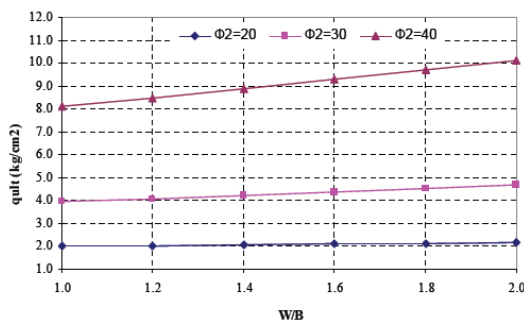
^{۱۶}. Geogrid

باربری از ترانشه‌های اصلاح‌شده با عرض ۲/۲ متر در زیر پی استفاده شده و نمودار تغییرات ظرفیت باربری پی نواری به ازای نسبت‌های مختلف عرض ترانشه به عرض پی (W/B) بر اساس تغییرات زاویه اصطکاک داخلی مصالح ترانشه اصلاح‌شده زیر آن، در شکل (۲) آورده شده است.



شکل (۱): مشخصات پی نواری و ترانشه اصلاح‌شده زیر آن

آن‌ها نتیجه گرفتند که ظرفیت باربری پی نواری با افزایش زاویه اصطکاک داخلی ترانشه اصلاح‌شده، بیشتر شده و هرچه مقدار این افزایش بیشتر باشد، مقادیر ظرفیت باربری افزایش بیشتری خواهند داشت.



شکل (۲): ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر ترانشه اصلاحی به ازای W/B مختلف

سیستم شالوده-خاک-ترانشه با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی ABAQUS، مدل‌سازی گردیده و ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر آن، تحلیل و صحت‌سنجی شده است. مراحل کار بدین‌صورت است که پس از تعریف هندسه و شکل مسئله و تخصیص پارامترهای اولیه و مدل رفتاری مصالح، مسیر تنش بر اساس تغییرات نشست زیر پی تعیین و نتایج تحلیل‌ها استخراج گردیده است. هندسه مدل موردنظر، یک محیط سه‌بعدی خاک به طول و عرض بیست متر معادل ده برابر عرض پی و ارتفاعی معادل پنج برابر عرض پی در نظر گرفته شده و پارامترهای دو نوع خاک، یکی برای ترانشه و دیگری برای خاک طبیعی،

صورت استفاده از تعداد و عمق مناسب لایه‌ها، نشست‌ها کاهش قابل‌قبولی خواهند داشت. میرمحمدحسینی و همکاران در سال ۱۳۹۳ به‌منظور مطالعه ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای مسلح شده با ژئوسل^۱، از مدل فیزیکی پی نواری واقع بر خاک مسلح با مقیاس کاهش‌یافته استفاده نمودند، که در آن ژئوسل‌ها با ابعاد هندسی مختلف و در موقعیت مشخصی از نمونه‌های ماسه متراکم قرار گرفتند. در هر آزمایش، بر روی مدل پی، بارگذاری را تا لحظه گسیختگی ادامه داده و منحنی بار-نشست آن را ثبت نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ژئوسل و نیز افزایش تعداد چشمه‌ها در واحد سطح، ظرفیت باربری خاک افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش عرض ژئوسل تا پنج برابر عرض صفحه بارگذاری نیز در افزایش ظرفیت باربری مؤثر بوده و پس‌از آن تأثیر زیادی ندارد.

در این مقاله، به بررسی و مطالعه سه‌بعدی تأثیر مشخصات هندسی مکانیکی ترانشه به‌سازی شده بر ظرفیت باربری پی مستقر بر روی آن و همچنین اثر شکل و هندسه پی با در نظر گرفتن شرایط واقعی مسئله، به کمک مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS بر پایه روش اجزاء محدود^۲ پرداخته شده است.

مدل‌سازی سه‌بعدی و اعتبار سنجی ظرفیت باربری

پی مستقر بر ترانشه اصلاح‌شده با روش اجزاء

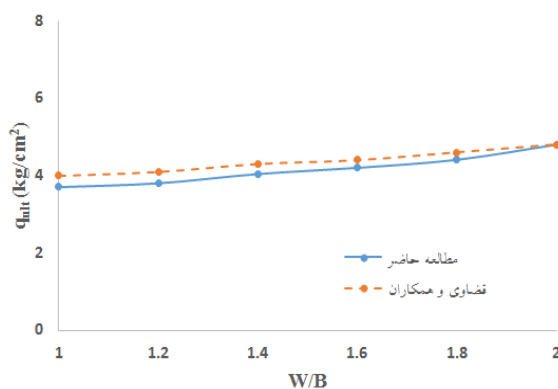
محدود

استفاده از ترانشه‌های اصلاح‌شده در مناطقی که خاک دارای خصوصیات مقاومتی پایین است، توسط قضاوی و همکاران در سال ۱۳۸۷ با استفاده از روش آنالیز حدی مرز بالا بررسی گردیده و روابطی را برای تعیین ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر روی ترانشه‌های اصلاح‌شده ارائه نمودند. ایشان با در نظر گرفتن توده‌های لغزش زیر پی و بهینه‌سازی آن‌ها، نشان دادند که ایجاد ترانشه‌های اصلاح‌شده تأثیر فراوانی در افزایش ظرفیت باربری پی نواری دارد. تحقیقات آن‌ها برای پی نواری به عرض دو متر انجام گردیده که مطابق شکل (۱)، جهت افزایش ظرفیت

^۱. Geocell

^۲. Finite elements method

ثبت‌شده است. تحلیل‌ها برای نسبت‌های مختلف نسبت عرض ترانسه به عرض پی انجام‌شده و تنش‌ها و ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر ترانسه اصلاح‌شده، محاسبه گردیده که نتایج آن‌ها در شکل (۴) نشان داده‌شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش نسبت عرض ترانسه به عرض پی، ظرفیت باربری خاک افزایش‌یافته و با مقایسه نتایج حاصل از مطالعه حاضر و قضاوی و همکاران در سال ۱۳۸۷، مشاهده می‌گردد که همپوشانی و تطابق قابل‌قبولی بین نتایج تحلیلی و عددی بدست آمده و نیز می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد نرم‌افزار صحیح و برای بررسی رفتار سیستم پی-خاک-ترانسه مناسب است.



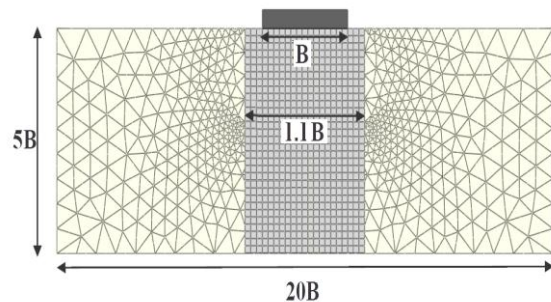
شکل (۴): مقایسه ظرفیت باربری پی نواری مستقر بر ترانسه اصلاح‌شده به ازای تغییرات W/B

بررسی ظرفیت باربری پی مستقر بر ترانسه

اصلاح‌شده برای نسبت‌های مختلف W/B

پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی سیستم پی-خاک-ترانسه با نرم‌افزار ABAQUS، تحلیل‌های متعددی بر روی پی واقع بر ترانسه بهسازی شده انجام گردید. دسته اول تحلیل‌ها بر اساس تغییرات عرض ترانسه بوده که در این حالت مطابق شکل (۵)، تغییرات نسبت عرض ترانسه به عرض پی (W/B) به ازای مقادیر کوچکتر و مساوی یک و همچنین بزرگتر از یک لحاظ شده و تأثیر آن بر روی ظرفیت باربری پی مربعی با استخراج نمودار بار-نشست مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفته است. مدل‌سازی سه‌بعدی سیستم شالوده-خاک-ترانسه و المان‌بندی آن نیز در شکل (۶) دیده می‌شود. زمانی که پی بر روی توده خاک بهسازی نشده واقع می‌شود، ظرفیت باربری از همه حالت‌ها کمتر است، زیرا در این حالت خاک این ناحیه، دارای خصوصیات

مطابق با جدول (۱) به هر یک از مصالح اختصاص داده‌شده که مدل گسیختگی موهر-کولمب با رفتار ارتجاعی-خمیری کامل برای خاک فرض گردیده است. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، مش‌بندی با استفاده از المان نوع C3D8 به تعداد ۱۶۸۲۰ المان بوده که سعی گردید در محدوده تمرکز تنش در زیر شالوده از المان‌های ریزتری استفاده شود.

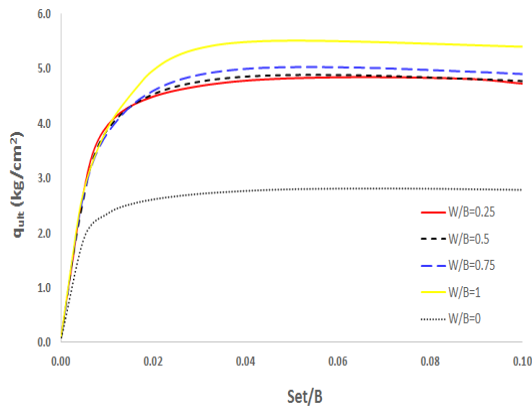


شکل (۳): هندسه و المان‌بندی شالوده مستقر بر ترانسه اصلاح‌شده در ABAQUS

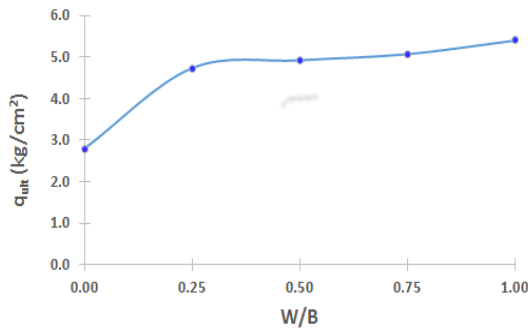
جدول (۱): مشخصات مصالح خاکی استفاده‌شده در این پژوهش

خاک	E (kg/cm ²)	g (kg/cm ³)	n	C (kg/cm ²)	f (°)
محیط طبیعی	۲×۱۰ ^۶	۱۷۰۰	۰/۳۵	۲۰۰۰۰	۱۰
ترانسه	۱۸۲×۱۰ ^۶	۲۰۰۰	۰/۳۰	۰	۳۰

اعمال شرایط مرزی نیز به این صورت است که جابجایی در جهت Y در راستای محور Xها و تغییر مکان در جهت X در راستای محور Yها و همچنین تغییر مکان در جهت X و Y در راستای محور Zها، محدود شده و برای سطح تحتانی خاک نیز از مرزهای صلب استفاده گردیده است. باید در نظر داشت که انتخاب نوع المان تأثیر بسیار زیادی در دقت و همگرایی جواب‌ها خواهد داشت. سپس بار استاتیکی بر روی پی وارد شده و تا هنگام رسیدن میزان نشست به‌اندازه ۱۰ درصد عرض پی، مقدار آن افزایش پیدا کرده و هنگامی که نشست به این مقدار رسید، بارگذاری متوقف شده و بر اساس آن، ظرفیت باربری در نقطه وسط پی نواری قرائت گردیده است. با توجه به اینکه پی به‌صورت صلب در نظر گرفته‌شده و نقاط روی آن دارای جابجایی نسبی نمی‌باشند، لذا نتایج برای نقطه وسط پی



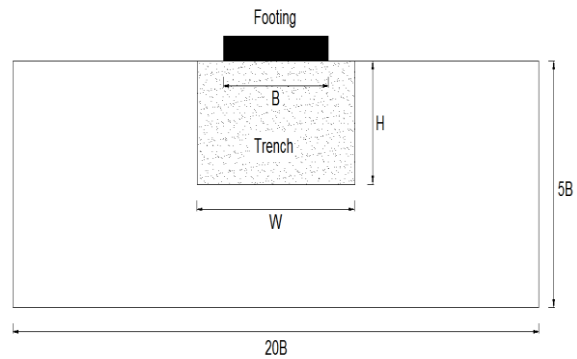
شکل (۷): مقایسه نمودار بار-نشست پی به ازای نسبت‌های مختلف $W/B < 1$



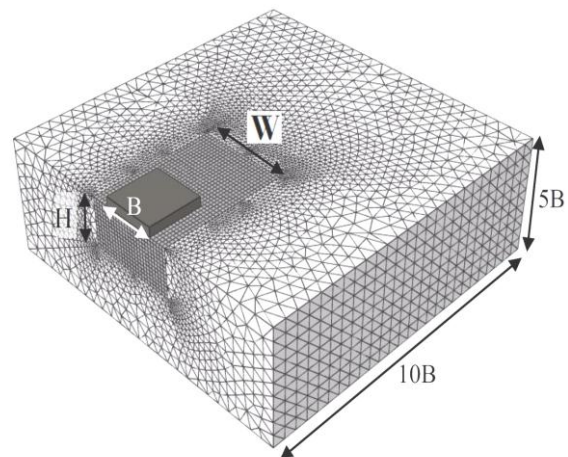
شکل (۸): نمودار تغییرات ظرفیت باربری پی مستقر بر ترانشه به ازای تغییرات $W/B < 1$

در ادامه، تأثیر افزایش عرض ترانشه بر روی ظرفیت باربری پی برای مقادیر بیشتر از عرض پی ($W/B > 1$) نیز بررسی گردیده و نمودار تغییرات بار-نشست و ظرفیت باربری نهایی در شکل‌های (۹) و (۱۰) آورده شده است. در این حالت نیز مشاهده می‌شود که تأثیر افزایش عرض ترانشه بر روی ظرفیت باربری پی قابل ملاحظه بوده و تغییرات ظرفیت باربری، مقادیر بزرگتری را نسبت به حالت عدم وجود ترانشه به خود اختصاص داده است. علت این مسئله با توجه به بهسازی خاک زیر پی، تأثیر پارامترهای خاک اصلاح شده به‌ویژه بیشتر شدن زاویه اصطکاک داخلی خاک بوده و موجب غالب شدن پارامترهای خاک ترانشه در ظرفیت باربری پی است. همان‌طور که توسط میرمحمدحسینی و همکاران در سال ۱۳۹۳ نیز گزارش دادند، نکته حائز اهمیت این است که افزایش ظرفیت باربری تا نسبتی از W/B معادل سه، افزایش یافته و سپس

مقاومتی کمتری نسبت به حالت‌های دیگر بوده و خصوصیات مقاومتی خاک شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک، در افزودن یا کاستن ظرفیت باربری آن نقش دارند.



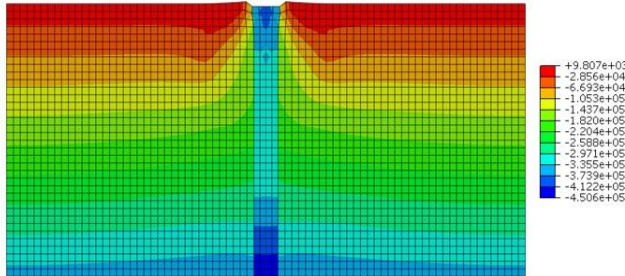
شکل (۵): نمای کلی هندسه شالوده مستقر بر ترانشه بهسازی شده



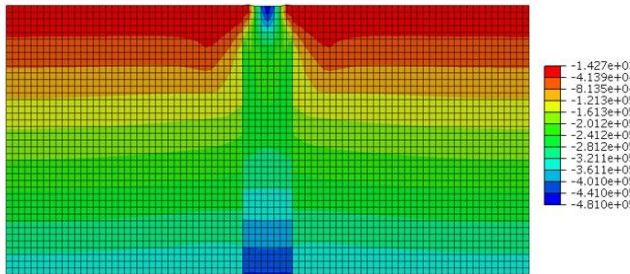
شکل (۶): مدل‌سازی سه‌بعدی سیستم بهسازی خاک با ترانشه درشت‌دانه و شالوده مستقر بر آن

نمودار تغییرات ظرفیت باربری پی در نسبت‌های مختلف عرض ترانشه به عرض پی و در حالت بدون ترانشه در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت W/B ، با توجه به اینکه مشخصات خاک ترانشه نسبت به خاک محیط مقادیر بیشتری دارد، ظرفیت باربری، به مقدار زیادی افزایش پیدا کرده و به ازای $W/B=1$ ، بیشترین مقدار برای ظرفیت باربری بدست می‌آید.

است. ناحیه خاک طبیعی نیز عمدتاً به صورت مقاوم عمل کرده و در نسبت‌های بزرگتر W/B ، بخش عمده‌ای از گوه گسیختگی زیر پی در ترانسه اصلاح‌شده تشکیل گردیده و توزیع تنش در این ناحیه قرار می‌گیرد.



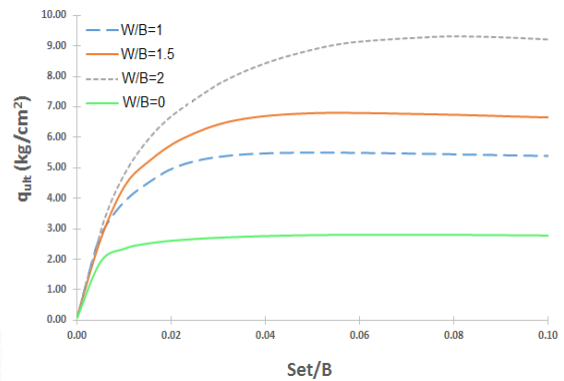
شکل (۱۱): نمودار توزیع تنش در خاک به ازای $W/B = 1$



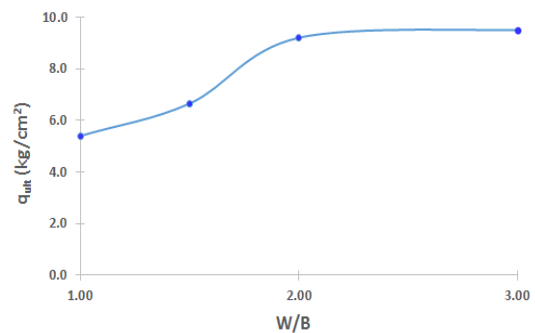
شکل (۱۲): نمودار توزیع تنش در خاک به ازای $W/B = 2$

در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵)، مکانیسم گسیختگی و گستره نقاط خمیری خاک به ازای نسبت‌های W/B برابر ۰/۵، ۱ و ۲ نمایش داده شده است. هنگامی که شالوده بر روی خاک در حالت بدون ترانسه و با ترانسه قرار می‌گیرد، از زمان شروع بارگذاری به دلیل افزایش تنش، خاک به سمت گسیختگی متمایل می‌شوند و بسته به میزان تنش وارده و پارامترهای مقاومتی، نقاط حالات مختلفی را تجربه می‌نمایند. هر چه نسبت عرض پی به عرض ترانسه بیشتر می‌شود، توزیع گوه گسیختگی زیر پی در محدوده ترانسه درشت‌دانه قرار گرفته و باعث افزایش گستره دامنه نقاط خمیری در خاک می‌گردد. علت این مسئله تأثیر مستقیم پارامترهای مقاومتی خاک ترانسه بهسازی شده در میزان باربری و گسیختگی خاک زیر آن است.

کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش عرض ترانسه، خاک زیر پی به طور کامل از جنس مصالح ترانسه گردیده و پارامترهای مقاومتی آن در ظرفیت باربری تأثیرگذار می‌باشند. لذا بهسازی خاک با روش ترانسه اصلاح‌شده تا نسبت W/B بین ۲ تا ۳، دارای بهینه‌ترین حالت ممکن بوده و موجب افزایش ظرفیت باربری می‌شود.



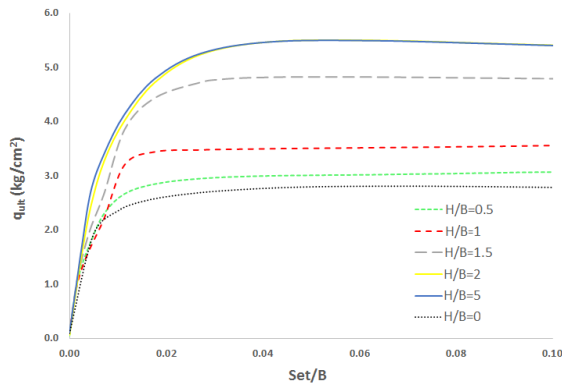
شکل (۹): مقایسه نمودار بار-نشست پی به ازای نسبت‌های مختلف $W/B > 1$



شکل (۱۰): نمودار تغییرات ظرفیت باربری پی مستقر بر ترانسه به ازای تغییرات $W/B > 1$

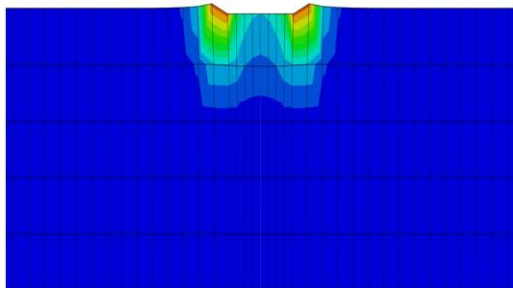
در این قسمت به بررسی توزیع تنش، مکانیسم گسیختگی و گسترش نقاط خمیری در خاک پرداخته شده است. برای این منظور، فرآیند تغییرات میزان بار متناسب با نشست شالوده مستقر بر ترانسه‌های با نسبت عرضی مختلف، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و توزیع تنش در زیر پی مستقر بر ترانسه‌های به نسبت عرضی ۱ و ۲ در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، تنش در ترانسه در حالتی که عرض نسبی برابر یک بوده، از نسبت ۲ بیشتر است. این بدان معنا است که ناحیه محرک گوه گسیختگی زیر پی، در محدوده ترانسه درشت‌دانه قرار گرفته و تمرکز تنش در این مناطق بیشتر

ثابت باقی می‌ماند. با توجه به اینکه عمق حوزه تأثیر تنش دو برابر عرض پی است، در اینجا نیز مشاهده می‌شود که این افزایش تا نسبت H/B برابر ۲ ادامه یافته و بعد از آن تقریباً بی‌تأثیر است، یعنی با افزایش نسبت H/B بیشتر از ۲، با توجه به اینکه خاک طبیعی محیط مانند تکیه‌گاه جانبی برای ترانشه بهسازی شده عمل نموده و توزیع تنش وارده از پی که در دو محیط اعمال می‌گردد، دیگر تغییری در ظرفیت باربری پی ایجاد نمی‌نماید. این موضوع می‌تواند محدودیت عمق ترانشه را مشخص نموده و باعث می‌گردد که ترانشه به‌اندازه ارتفاع کل خاک اجرانشده و در نتیجه در هزینه‌های اجرایی آن تأثیرگذار خواهد بود.

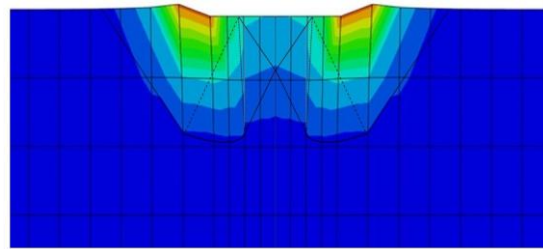


شکل (۱۶): نمودار بار-نشست پی به ازای نسبت‌های مختلف H/B

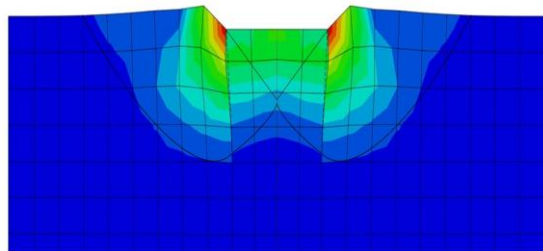
تغییرات کرنش‌های ایجادشده در اثر گسیختگی خاک زیر پی نیز به ازای نسبت‌های H/B معادل صفر، $0/5$ و 2 در شکل‌های (۱۷) الی (۱۹) ارائه شده است.



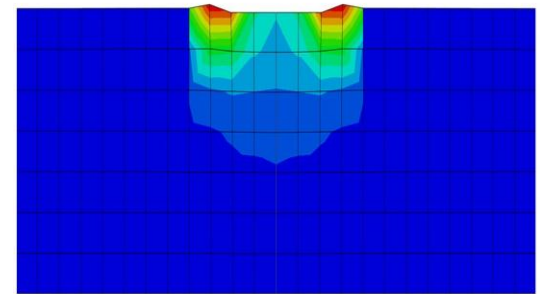
شکل (۱۷): مکانیسم گسیختگی و گستره نقاط خمیری در خاک به ازای $H/B = 0$



شکل (۱۳): مکانیسم گسیختگی و گستره نقاط خمیری در خاک به ازای $W/B = 0.5$



شکل (۱۴): مکانیسم گسیختگی و گستره نقاط خمیری در خاک به ازای $W/B = 1$



شکل (۱۵): مکانیسم گسیختگی و گستره نقاط خمیری در خاک به ازای $W/B = 2$

مطالعه پارامترهای مؤثر بر رفتار بار-نشست پی مستقر بر ترانشه بهسازی شده

تأثیر ارتفاع ترانشه اصلاح‌شده

به‌منظور اجرای ترانشه اصلاح‌شده در بهینه‌ترین حالت و برای کاستن هزینه‌های مربوط به حفاری و خاک‌برداری، لازم است که میزان عمق ترانشه و ارتفاع بهینه آن بررسی شود. در این قسمت، بررسی عددی بر روی تأثیر ارتفاع ترانشه بر روی ظرفیت باربری پی مستقر بر آن مطابق شکل (۵) انجام‌گرفته است. همان‌طور که نتایج در شکل (۱۶) نشان داده، با افزایش ارتفاع ترانشه، ظرفیت باربری بیشتر شده و مقدار آن تا یک ارتفاع مشخصی معادل دو برابر عرض پی تغییر پیدا کرده و بعد از آن تا کف سنگ بستر

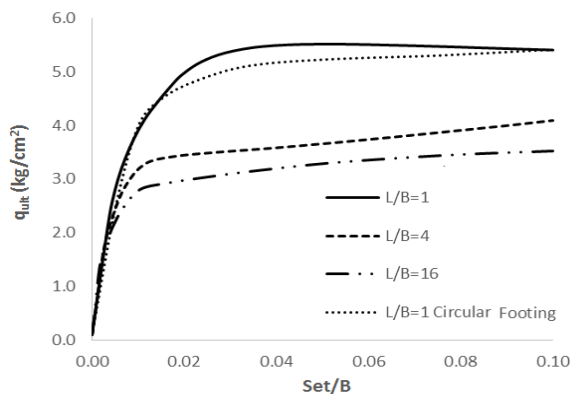
است و در تحلیل‌های عددی نیز همین روند و مقدار تغییرات با درصدی اختلاف به بدست آمده است.

جدول (۲): مقادیر ظرفیت باربری محاسبه‌شده برای شکل‌های

مختلف پی به روش مایرهوف و تحلیل عددی برحسب
(kg/cm²)

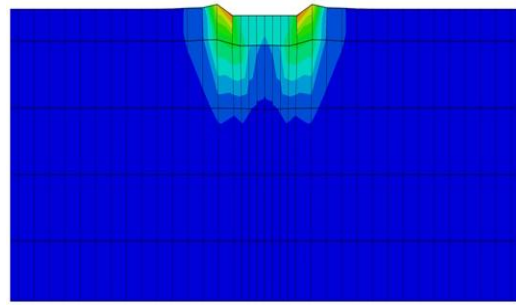
شکل پی	مربعی	مستطیلی	نواری	دایره‌ای
رابطه مایرهوف	۳/۴	۳/۱	۳/۰۲	۳/۳
تحلیل عددی	۲/۷۸	۲/۳۹	۲/۳۲	۲/۷۹

تحلیل ظرفیت باربری شکل‌های مختلف پی در حالتی که بر روی ترانسه اصلاح‌شده با خاک درشت‌دانه با نسبت W/B برابر یک قرار گرفته‌اند، انجام شده است. همان‌طور که در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری نهایی برای پی مربعی مقدار بیشتری بدست آمده و پی مستطیلی شکل دارای ظرفیت باربری نهایی کمتری نسبت به پی مربعی بوده و همچنین این مقدار با افزایش نسبت طول به عرض پی، کمتر شده و در پی‌های نواری به کمینه مقدار خود می‌رسد. مقدار ظرفیت باربری برای پی‌های دایره‌ای نیز تقریباً با پی مربعی یکسان می‌باشند.

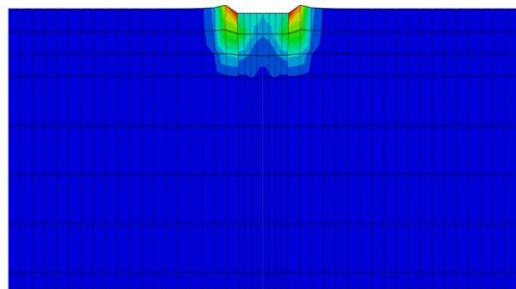


شکل (۲۰): نمودار تغییرات تأثیر شکل پی مستقر بر ترانسه اصلاح‌شده بر روی رفتار بار-نشست آن‌ها

در ادامه، میزان تغییرات نرخ کرنش خاک در اثر استقرار انواع شالوده‌های با هندسه مختلف بر روی ترانسه‌های هم‌سطح به ترتیب مطابق شکل‌های (۲۱-الف) الی (۲۱-د) مورد بررسی قرار گرفته است. دامنه تغییرات کرنش خاک در شالوده مربعی در بازه صفر تا ۰/۳۱ قرار دارد و برای شالوده



شکل (۱۸): مکانیسم گسیختگی و گستره نقاط خمیری در خاکبه ازای $H/B = 0.5$

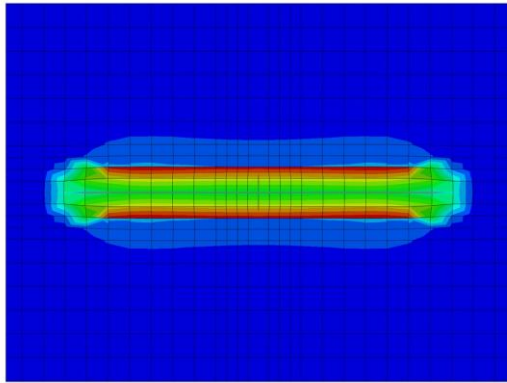


شکل (۱۹): مکانیسم گسیختگی و گستره نقاط خمیری در خاکبه ازای $H/B = 2$

تأثیر شکل و ابعاد شالوده

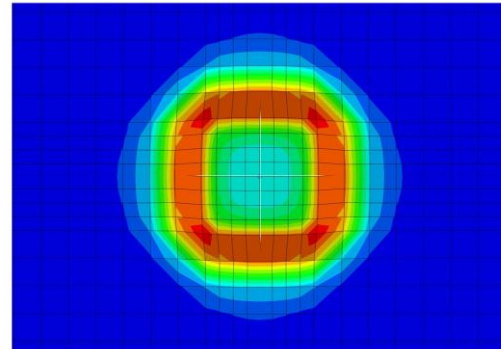
در این بخش، جهت مطالعه تأثیر شکل و ابعاد شالوده مستقر بر ترانسه اصلاح‌شده بر روی رفتار بار-نشست آن‌ها، به بررسی پی‌هایی از قبیل مربعی، مستطیلی، نواری و دایره‌ای پراخته شده است که بدین منظور مساحت تمامی پی‌ها بایستی یکسان در نظر گرفته شود. مشخصات هندسی، شرایط مرزی و مشخصات مقاومتی خاک مطابق آنچه در بخش قبل توضیح داده شد، لحاظ گردیده است. انجام تحلیل‌ها برای شکل و هندسه‌های مختلف پی از قبیل مربعی ($L/B=1$)، مستطیلی ($L/B=2$)، نواری ($L/B=10$) و دایره‌ای در نظر گرفته شده و به‌منظور بررسی دقیق‌تر و کنترل نتایج حاصل از تحلیل‌ها، ابتدا ظرفیت باربری شکل‌های مختلف پی در حالتی که بر روی خاک طبیعی قرار داشته و ترانسه‌ای وجود ندارد، به کمک رابطه ظرفیت باربری مایرهوف نیز محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردیده که نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است. در بررسی مقادیر ظرفیت باربری نهایی از طریق فرمول مایرهوف، پی مربعی و دایره‌ای به یک مقدار تقریباً یکسان برای ظرفیت باربری همگرا شده و پی‌های مستطیلی و نواری به مراتب ظرفیت باربری کمتری از خود نشان داده

نواری این محدوده بین صفر تا ۰/۱۶ است. علت این مسئله، افزایش تمرکز تنش در زیر پی‌های مربعی به دلیل بیشتر بودن عرض آن است و موجب گسیختگی بیشتر خاک زیر پی گردیده و در نتیجه نقاط بیشتری در زیر پی به گسیختگی رسیده و در حالت خمیری قرار گرفته است.

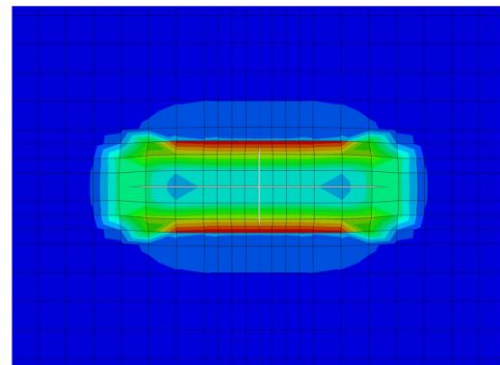


(د) پی نواری

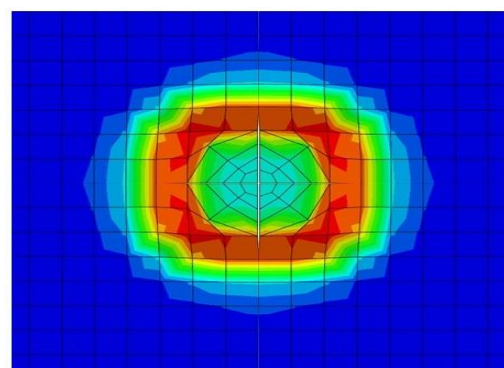
شکل (۲۱): نرخ تغییرات کرنش خاک تحت تأثیر انواع مختلف پی مستقر بر ترانشه اصلاح شده



(الف) پی مربعی



(ب) پی مستطیلی



(ج) پی دایره‌ای

تأثیر مشخصات مقاومتی مصالح ترانشه

خاک مورد استفاده در ترانشه می‌تواند خصوصیات مقاومتی مختلفی داشته باشد. بسته به اینکه این خاک ریزدانه یا درشت‌دانه باشد، مقاومت‌های مختلفی از خود نشان خواهد داد. همان‌طور که اشاره گردید، خاک مورد استفاده در ترانشه از نوع درشت‌دانه بوده و برای ترانشه از طریق مدل‌سازی، خصوصیات مقاومتی مختلفی قابل تعریف است. در این قسمت با تخصیص ویژگی‌های مقاومتی مختلف به خاک ترانشه و محیط تمامی حالات در نظر گرفته شده در قبل، مورد بررسی قرار داده شده است. برای بررسی دقیق‌تر و مقایسه بین انواع مختلف مصالح خاکی قابل استفاده جهت بهسازی ترانشه، تغییرات ظرفیت باربری پی مربعی واقع بر ترانشه در چندین حالت مختلف پارامترهای مقاومتی خاک مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شده است.

جدول (۳): مشخصات انواع خاک مورد استفاده در ترانشه اصلاح شده

خاک	n	E (kg/cm ²)	C (kPa)	φ°
A	۰/۳۵	۲×۱۰ ^۶	۲۰	۱۰
B	۰/۳۵	۱۸۲×۱۰ ^۶	۰	۳۰
C	۰/۳۵	۱۸۲×۱۰ ^۶	۲۰	۳۰
D	۰/۳۵	۱۸۲×۱۰ ^۶	۲۰	۲۰

بر پایه روش اجزاء محدود پرداخته شده است. ابتدا صحت عملکرد و اعتبارسنجی نرم‌افزار با مقایسه نتایج با تحقیقات گذشته انجام گردیده و بعد از حصول اطمینان از اعتبار و تطابق نتایج، اثر ابعاد ترانسه بهسازی شده و اثر شکل انواع شالوده از قبیل پی مربعی، مستطیلی، نواری و دایره‌ای ارزیابی گردید. با بررسی‌های انجام‌شده بر روی ظرفیت باربری پی‌های مستقر بر ترانسه اصلاح‌شده، استنتاج می‌گردد که:

۱- به‌طورکلی با بهسازی خاک به کمک ایجاد ترانسه با خصوصیات مقاومتی بالاتر در زیر پی، ظرفیت باربری خاک افزایش یافته و خاک مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد و با افزایش نسبت عرض ترانسه به عرض پی، مقدار آن مجدد بیشتر می‌شود.

۲- با افزایش ارتفاع ترانسه اصلاح‌شده، ظرفیت باربری نیز بیشتر گردیده و این افزایش ارتفاع تا عمق معینی مؤثر است. لذا با طراحی ارتفاع بهینه ترانسه اصلاح‌شده و تعیین عمق بهینه حفاری، می‌توان هزینه‌های اجرایی را نیز کاهش داد.

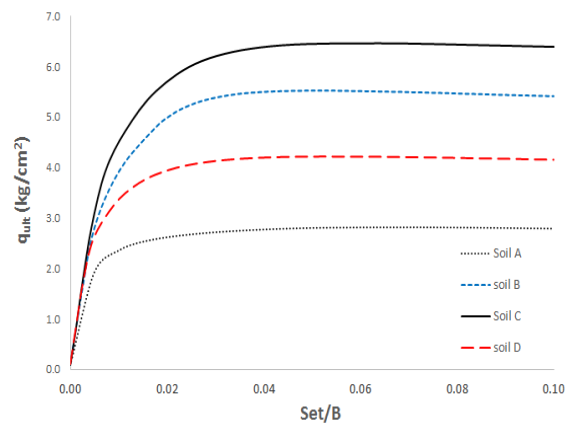
۳- نتایج نشان می‌دهد که تغییرات هندسه و شکل پی مستقر بر ترانسه بهسازی شده و همچنین مشخصات مقاومتی خاک ترانسه، تأثیر مهمی روی ظرفیت باربری آن دارد، به‌طوری‌که در شالوده‌های با مساحت یکسان، هر چه نسبت طول به عرض پی افزایش می‌یابد، از ظرفیت باربری پی کاسته می‌شود. همچنین افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مصالح ترانسه، موجب افزایش ظرفیت باربری می‌گردد.

۴- هر چه نسبت عرض پی به عرض ترانسه بیشتر شود، توزیع گوه گسیختگی زیر پی در محدوده ترانسه درشت‌دانه قرارگرفته و باعث افزایش گستره دامنه نقاط خمیری در خاک گردیده است.

مراجع

- 1- Chakraborty, M. and Kumar, J. (2014). Bearing capacity of circular foundations reinforced with geogrid sheets, *Soils and Foundations*, 54(4), 820-832.
- 2- Chenn, Q. and Abu-Farsakh, M. (2015). Ultimate bearing capacity analysis of strip footing on reinforced soil foundation, *Soils and Foundations*, 55(1), 74-85.
- 3- Fragazy, R. J. and Lawton, E. (1984). Bearing capacity of reinforced sand subgrades. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110(10), 1500-1507.

همان‌طور که در شکل (۲۲) مشاهده می‌شود، خاک A به‌تنهایی ظرفیت باربری قابل‌توجهی از خود نشان نمی‌دهد، ولی هنگامی که همین خاک در کنار ترانسه اصلاح‌شده با خصوصیات مقاومتی متفاوت اجرا شود، ظرفیت باربری اختلاف چشمگیری در مقایسه با حالت بدون ترانسه پیدا نموده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مصالح ترانسه، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. چسبندگی خاک، عامل تأثیرگذاری در افزایش ظرفیت باربری خاک است، اما وجود این پارامتر به‌تنهایی تأثیر چندانی ندارد. برای مثال در خاک C هنگامی که چسبندگی ثابت بوده، تأثیر تغییر زاویه اصطکاک داخلی بر افزایش ظرفیت باربری، کاملاً مشهود است و در خاک B که چسبندگی نسبت به حالت قبلی کمتر شده، این اثر مقداری کاهش پیدا کرده است. حال در خاک D که چسبندگی ثابت و زاویه اصطکاک داخلی نسبت به خاک C کاهش یافته است، نتیجه می‌گردد که با کاهش زاویه اصطکاک داخلی، ظرفیت باربری به مقدار قابل‌توجهی کاهش پیدا می‌کند و هنگامی که این دو مقدار برای کل خاک ثابت باشد، کمترین میزان ظرفیت باربری بدست آمده است.



شکل (۲۲): نمودار تأثیر تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک ترانسه بر ظرفیت باربری پی مستقر بر آن

نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی عددی تأثیر استفاده از ترانسه‌های اصلاح‌شده با مصالح درشت‌دانه بر رفتار بار-نشست انواع شالوده‌های مستقر بر آن، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS

- 4- Hafez, K, M. and Ibrahim, I. (2014). Bearing capacity of circular footing resting on granular soil overlying soft clay, Housing and Building National Research Center.
- 5- Mahmoud, M. A. and Abdrabbo, F. M. (1989). Bearing capacity tests on strip footing resting on reinforced sand subgrades. Canadian geotechnical journal, 26(1), 154-159.
- 6- Merlos, J. and Romo, N, P. (2006). Fluctuant bearing capacity of shallow foundations during earthquakes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26,103-114.
- 7- Patra, C. R. Das, B. M. and Atalar, C. (2005). Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid reinforced sand. Geotextiles and Geomembranes, 23(5), 454-462.
- 8- Terzaghi, K. (1943). "Theoretical Soil Mechanics", Wiley, New York.
- 9- Verma, B. P. and Char, A. N. R. (1986). Bearing capacity tests on reinforced sand subgrades. Journal of geotechnical engineering, 112(7), 701-706.
- 10- Yamamoto, k. and Kusuda, k. (2001). Failure mechanisms and bearing capacities of reinforced foundations, Geotextiles and Geomembranes, 19(3), 127-162.

۱۱- قضاوی، م. عسگری، ف؛ و افضلی راد، م. ۱۳۸۷، بررسی ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های مستقر بر ترانشه اصلاح‌شده، سومین کنفرانس ملی بهسازی و مقاوم سازی ایران، مرکز ملی مقاوم‌سازی ایران، دانشگاه تبریز، تبریز.

۱۲- قضاوی، م؛ و نامداری، م. ۱۳۹۲، بررسی نشست پی‌های نواری با استفاده از ترانشه دانه‌ای مسلح به ژئوگرید در حالت بارگذاری سیکلی، اولین همایش بین المللی و چهارمین همایش ملی عمران شهری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج.

۱۳- میرمحمدحسینی، س. م. محمدی، م. م. ر؛ و کارگر، م. ۱۳۹۳، بررسی آزمایشگاهی تأثیر ابعاد هندسی ژئوسل بر رفتار بار- نشست پی نواری واقع بر خاک ماسه‌ای مسلح شده با ژئوسل، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشگاه شهید رجایی، دانشکده عمران دانشگاه شهید رجایی، تهران.