



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Analysis of Mechanical Behavior of Stone Columns with Radial Encasement and Layered Polymeric Reinforcement in Saturated Soils

Seyyed Hasan Moaddab¹, Mahdi Sadeghzadeh Tabrizi² *

1-Civil Engineer, Tabriz Metropolitan Municipality, Tabriz

2* - Mechatronics, Tabriz Metropolitan Municipality, Tabriz

Received: 23 January 2026; Revised: 09 February 2026; Accepted: 26 February 2026; Published: 22 June 2026

Abstract

Stone columns reinforced with polymeric layers are an effective method to improve bearing capacity and reduce settlement of saturated soils in irrigation and drainage structures. This study aims to investigate the three-dimensional mechanical behavior of stone columns with radial encasement and layered polymeric reinforcement under local loading and stress distribution in saturated soils. Finite element modeling was employed to evaluate the influence of column modulus, polymeric encasement strength, and soil density. The results indicate that radial encasement combined with layered polymeric reinforcement increases the bearing capacity and reduces settlement of the columns. Moreover, the radial-layered arrangement of polymeric encasement plays a significant role in uniform stress distribution around the columns. These findings provide practical guidance for the optimal design of reinforced stone columns in irrigation and drainage projects and have notable implications for improving the performance of earth structures.

Keywords: Stone column, Polymeric reinforcement, Radial encasement, Settlement, Saturated soil

Cite this article as Moaddab, S. H. and Sadeghzadeh Tabrizi, M. (2026). Analysis of Mechanical Behavior of Stone Columns with Radial Encasement and Layered Polymeric Reinforcement in Saturated Soils. (e241856). Civil and Project, 8(4), e241856 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.577314.1435>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: mahdi_sadeghzadeh_tabrizi@yahoo.com



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

ارزیابی اثر محصورشدگی شعاعی و تقویت پلیمری بر رفتار باربری و نشست ستون‌های سنگی در خاک‌های اشباع

سید حسن مودب^۱، مهدی صادقزاده تبریزی^{۲*}

۱- کارشناس مهندسی عمران، شهرداری کلانشهر تبریز، ایران
۲* - کارشناس ارشد مکاترونیک، شهرداری کلانشهر تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۰۳ بهمن ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۲۰ بهمن ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۰۷ اسفند ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ تیر ۱۴۰۵

چکیده

ستون‌های سنگی با تقویت پلیمری یکی از روش‌های مؤثر و متداول برای بهبود ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک‌های اشباع در سازه‌های آبیاری و زهکشی هستند. هدف این مطالعه، تحلیل سه‌بعدی رفتار مکانیکی ستون‌های سنگی با محصورشدگی شعاعی و تقویت لایه‌ای پلیمری تحت بارگذاری‌های محلی و توزیع تنش در خاک‌های اشباع می‌باشد. برای این منظور، مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انجام شد و تأثیر پارامترهایی مانند مدول الاستیسیته ستون، مقاومت غلاف پلیمری، چگالی خاک و هندسه ستون‌ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که محصورشدگی شعاعی همراه با تقویت لایه‌ای، ظرفیت باربری ستون‌ها را به‌طور قابل توجهی افزایش داده و نشست آن‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین، آرایش شعاعی-لایه‌ای غلاف‌های پلیمری باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در اطراف ستون شده و از تمرکز تنش در نقاط بحرانی جلوگیری می‌کند. این یافته‌ها، راهنمایی ارزشمند برای طراحی بهینه ستون‌های سنگی تقویت‌شده در پروژه‌های آبیاری و زهکشی ارائه می‌دهند و اثر عملی قابل توجهی در بهبود پایداری و عملکرد سازه‌های خاکی دارند. مطالعه حاضر همچنین به درک بهتر تعامل بین ستون، غلاف پلیمری و خاک اشباع کمک می‌کند و می‌تواند در توسعه روش‌های جدید تقویت خاک کاربرد داشته باشد.

کلمات کلیدی: ستون سنگی، تقویت پلیمری، محصورشدگی شعاعی، نشست، خاک اشباع

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mahdi_sadeghzadeh_tabrizi@yahoo.com

۱- مقدمه

بهسازی خاک‌های نرم همواره یکی از چالش‌های اساسی در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود؛ زیرا ظرفیت باربری پایین، نشست‌های قابل‌ملاحظه و پتانسیل روانگرایی می‌تواند عملکرد و ایمنی سازه‌ها را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهد. در این میان، ستون‌های سنگی به‌عنوان یکی از روش‌های متداول، کارآمد و اقتصادی بهسازی زمین، از دهه ۱۹۷۰ میلادی به‌طور گسترده در پروژه‌های عمرانی به کار گرفته شده‌اند (Hughes & Withers, ۱۹۷۴). عملکرد این ستون‌ها مبتنی بر افزایش سختی توده خاک، تسریع فرآیند تحکیم و بهبود توزیع تنش در بسترهای نرم است. مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی نشان داده‌اند که اندرکنش خاک-ستون نقش تعیین‌کننده‌ای در نرخ تحکیم و الگوی تغییرشکل سیستم دارد (Castro et al., ۲۰۱۳). در همین راستا، ارائه روش‌های تحلیلی ساده‌شده برای پیش‌بینی نرخ تحکیم پی‌های تقویت‌شده، چارچوب مناسبی برای طراحی اولیه فراهم ساخته است (Han & Ye, ۲۰۰۱). افزون بر این، کارایی ستون‌های سنگی در کاهش پتانسیل روانگرایی و کنترل تغییرشکل‌های ناشی از آن نیز مورد تأیید قرار گرفته است (Adalier & Elgamel, ۲۰۰۴). با وجود مزایای مذکور، در خاک‌های بسیار نرم، گسترش جانبی ستون (پدیده برآمدگی جانبی یا bulging) می‌تواند کارایی سیستم را محدود سازد. در این شرایط، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها برای محصورسازی ستون‌های سنگی به‌عنوان راهکاری مؤثر مطرح شده است. نتایج آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس نشان داده است که محصورسازی ژئوتکستایلی موجب افزایش سختی جانبی و کاهش تغییرشکل ستون می‌شود (Palmeira et al., ۲۰۲۰). همچنین استفاده از ژئوگرید و سایر پوشش‌های ژئوسنتتیکی تأثیر قابل‌توجهی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست داشته است (Gniel & Bouazza, ۲۰۰۹). مطالعات تحلیلی اخیر نیز مدل‌های ساده‌ای برای پیش‌بینی عملکرد ستون‌های محصورشده ارائه کرده‌اند (Rahman et al., ۲۰۲۶). در مقیاس سامانه‌ای، بررسی پایداری خاکریزهای احداث‌شده بر بسترهای تقویت‌شده با ستون سنگی نشان می‌دهد که ترکیب ستون‌ها با لایه‌های ژئوسنتتیکی افقی می‌تواند موجب بهبود توزیع تنش و افزایش پایداری کلی سیستم شود (Zheng et al., ۲۰۲۰). علاوه بر این، تقویت داخلی ستون‌ها و استفاده از آرایش‌های ترکیبی، افزایش چشمگیری در ظرفیت باربری ایجاد می‌کند (Ayadat et al., ۲۰۰۸). با وجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته، بخش عمده مطالعات پیشین عمدتاً بر محصورسازی قائم ستون‌ها متمرکز بوده و بررسی همزمان اثر تقویت قائم و افقی در قالب یک چارچوب عددی جامع کمتر مورد توجه قرار گرفته است. افزون بر این، تحلیل رفتار غیرخطی خاک و اندرکنش سه‌بعدی خاک-ستون-ژئوسنتتیک مستلزم بهره‌گیری از روش‌های عددی پیشرفته، به‌ویژه روش المان محدود است؛ رویکردی که در منابع مرجع بهسازی زمین نیز بر اهمیت آن تأکید شده است (Nicholson, ۲۰۱۵; Kirsch & Kirsch, ۲۰۱۷).

۲- پیشینه پژوهش

استفاده از ستون‌های سنگی به‌عنوان یکی از روش‌های متداول بهسازی خاک‌های نرم، سابقه‌ای چند دهه‌ای در مهندسی ژئوتکنیک دارد. نخستین مطالعات نظام‌مند نشان دادند که افزودن ستون‌های دانه‌ای به خاک‌های رسی نرم می‌تواند موجب افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست و بهبود سختی توده خاک شود (Hughes & Withers, ۱۹۷۴). در ادامه، توسعه روش‌های اجرایی نظیر تکنیک‌های ویبره عمیق، کاربرد این روش را در پروژه‌های وسیع عمرانی گسترش داد (Sondermann & Wehr, ۲۰۱۲). در حوزه رفتار تحکیم و تغییرشکل، مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی متعددی انجام شده است. نتایج تحقیقات نشان داد که اندرکنش خاک-ستون و نسبت سختی ستون به خاک، تأثیر مستقیمی بر نرخ تحکیم و توزیع تنش دارند (Castro et al., ۲۰۱۳). همچنین ارائه روابط تحلیلی ساده‌شده برای برآورد نرخ تحکیم و ضریب تمرکز تنش، گام مهمی در توسعه روش‌های طراحی اولیه محسوب می‌شود (Han & Ye, ۲۰۰۱). علاوه بر این، دستورالعمل‌های طراحی و گزارش‌های فنی موجود، چارچوب اجرایی و پارامترهای تجربی مورد استفاده در پروژه‌های عملی را ارائه کرده‌اند (Barksdale & Bachus, ۱۹۸۳).

با افزایش کاربرد ستون‌های سنگی در مناطق مستعد روانگرایی، پژوهش‌ها به بررسی نقش این ستون‌ها در کاهش تغییرشکل‌های ناشی از روانگرایی نیز پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که ستون‌های سنگی از طریق افزایش تراکم نسبی و فراهم‌سازی مسیرهای زهکشی، می‌توانند شدت تغییر مکان‌های جانبی و نشست‌های ناشی از روانگرایی را کاهش دهند (Adalier & Elgamel, ۲۰۰۴).

۲۰۰۴). با این حال، در خاک‌های بسیار نرم، گسترش جانبی ستون‌ها به‌عنوان یکی از مکانیزم‌های اصلی گسیختگی شناسایی شده است که می‌تواند کارایی سیستم بهسازی را محدود کند. در پاسخ به این محدودیت، مفهوم محصورسازی ستون‌های سنگی با ژئوسنتتیک‌ها مطرح شد. آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس نشان داده‌اند که استفاده از پوشش ژئوتکستایلی موجب افزایش مقاومت جانبی، کاهش تغییرشکل شعاعی و بهبود ظرفیت باربری ستون‌ها می‌شود (Palmeira et al., ۲۰۲۰). مطالعات عددی و آزمایشگاهی دیگر نیز تأثیر مثبت ژئوگرید یا ژئوتکستایل در بهبود رفتار ستون‌های سنگی در خاک‌های نرم را تأیید کرده‌اند (Gniel & Bouazza, ۲۰۰۹). همچنین مدل‌های تحلیلی ساده‌شده‌ای برای پیش‌بینی عملکرد ستون‌های محصورشده توسعه یافته‌اند که امکان برآورد ظرفیت باربری و نشست را فراهم می‌کنند (Rahman et al., ۲۰۲۶). در مقیاس سامانه‌ای، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب ستون‌های سنگی با لایه‌های ژئوسنتتیکی افقی در بستر خاکریزها، موجب بهبود توزیع تنش و افزایش پایداری کلی سیستم می‌شود (Zheng et al., ۲۰۲۰). همچنین بررسی رفتار ستون‌های تقویت‌شده در خاک‌های لایه‌ای نشان می‌دهد که نوع آرایش تقویت و ویژگی‌های مکانیکی ژئوسنتتیک نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی دارند (Gowri Prasad, ۲۰۱۷). افزون بر این، مطالعاتی درباره تقویت داخلی ستون‌ها و آرایش‌های ترکیبی انجام شده که افزایش قابل‌توجهی در ظرفیت باربری و کاهش نشست را گزارش کرده‌اند (Ayadat et al., ۲۰۰۸). با وجود پیشرفت‌های یادشده، مرور ادبیات نشان می‌دهد که بخش عمده تحقیقات بر یکی از دو جنبه تقویت قائم (محصورسازی جانبی) یا تقویت افقی متمرکز بوده و بررسی همزمان این دو مؤلفه در قالب یک مدل عددی جامع کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات پیشین مبتنی بر مدل‌های تحلیلی ساده یا آزمایش‌های محدود آزمایشگاهی بوده و تحلیل رفتار غیرخطی خاک و اندرکنش کامل خاک-ستون-ژئوسنتتیک با استفاده از روش‌های عددی پیشرفته به‌صورت نظام‌مند بررسی نشده است (Nicholson, ۲۰۱۵; Kirsch & Kirsch, ۲۰۱۷). بنابراین، خلأ پژوهشی موجود در ادبیات علمی، ضرورت انجام مطالعه‌ای جامع مبتنی بر روش المان محدود را برای تحلیل همزمان اثر تقویت قائم و افقی در ستون‌های سنگی برجسته می‌سازد؛ موضوعی که می‌تواند به توسعه چارچوب‌های طراحی دقیق‌تر در پروژه‌های بهسازی خاک‌های نرم منجر شود.

۳- بیان مسئله

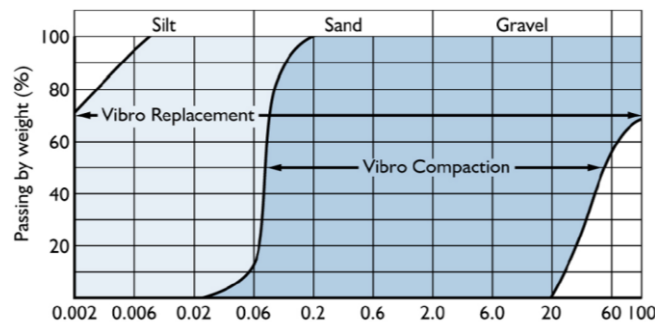
خاک‌های نرم ریزدانه به دلیل مقاومت برشی پایین، تراکم‌پذیری زیاد و نفوذپذیری کم، همواره چالشی جدی در طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شوند. احداث سازه‌ها، خاکریزها و پی‌های سطحی بر روی این خاک‌ها معمولاً با نشست‌های زیاد، نشست نامتقارن و کاهش پایداری همراه است. استفاده از ستون‌های سنگی به‌عنوان یکی از روش‌های متداول بهسازی، با هدف افزایش ظرفیت باربری، تسریع تحکیم و کاهش نشست توسعه یافته است. با این حال، عملکرد ستون‌های سنگی معمولی در خاک‌های بسیار نرم به دلیل گسترش جانبی و تمرکز تنش محدود می‌شود و در برخی شرایط، ظرفیت باربری مورد انتظار تأمین نمی‌گردد.

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که محصورسازی ستون‌های سنگی با ژئوسنتتیک‌ها می‌تواند مقاومت جانبی ستون را افزایش داده و تغییرشکل شعاعی را کنترل کند. همچنین استفاده از لایه‌های ژئوسنتتیکی افقی در سیستم‌های خاکریز تقویت‌شده، موجب بهبود توزیع تنش و افزایش پایداری کلی سامانه می‌شود. با وجود این، اغلب مطالعات پیشین هر یک از این روش‌های تقویت را به‌صورت مجزا بررسی کرده‌اند و تحلیل همزمان تأثیر تقویت قائم (محصورسازی ژئوتکستایلی ستون) و تقویت افقی (لایه‌های ژئوسنتتیکی بین ستون‌ها یا در بستر خاکریز) در یک چارچوب عددی یکپارچه کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

از سوی دیگر، بسیاری از روش‌های طراحی موجود مبتنی بر روابط تحلیلی ساده‌شده هستند که قادر به مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک، اندرکنش سه‌بعدی خاک-ستون-ژئوسنتتیک و تغییرات پارامتری پیچیده نمی‌باشند. این محدودیت می‌تواند منجر به برآوردهای محافظه‌کارانه یا غیرواقعی از ظرفیت باربری و میزان نشست گردد. بنابراین، نیاز به یک چارچوب تحلیلی پیشرفته که بتواند رفتار واقعی سیستم بهسازی ترکیبی را تحت شرایط بارگذاری مختلف شبیه‌سازی کند، کاملاً محسوس است. چنین توسعه‌ی فنی در ساخت ستون‌های سنگی باعث شد طیف وسیعی از خاک‌های طبیعی ضعیف توسط این روش قابل بهسازی باشند (شکل ۱).

بر این اساس، مسئله اصلی پژوهش حاضر عبارت است از: چگونه می‌توان با استفاده از روش المان محدود، رفتار ستون‌های سنگی تقویت‌شده با ژئوتکستایل‌های قائم و افقی را به صورت همزمان و غیرخطی مدل‌سازی کرده و تأثیر پارامترهای کلیدی بر ظرفیت باربری، توزیع تنش و الگوی نشست را به صورت کمی ارزیابی نمود؟

پاسخ به این مسئله می‌تواند منجر به درک دقیق‌تر مکانیسم اندرکنش اجزای سیستم بهسازی، بهینه‌سازی آرایش تقویت و ارائه مبنایی علمی برای بهبود دستورالعمل‌های طراحی در پروژه‌های واقع بر خاک‌های نرم گردد.



شکل ۱ خاک‌های قابل بهسازی با تکنیک‌های تراکم ارتعاشی و جایگزینی ارتعاشی

۴- روش‌شناسی پژوهش

به منظور تحلیل رفتار ستون‌های سنگی تقویت‌شده با ژئوتکستایل‌های قائم و افقی، در این پژوهش از رویکرد عددی مبتنی بر روش المان محدود استفاده شده است. چارچوب کلی تحقیق شامل مراحل مدل‌سازی، صحت‌سنجی، تحلیل پارامتری و ارزیابی نتایج می‌باشد که به صورت نظام‌مند طراحی شده است.

۴-۱- تدوین مدل مفهومی و فرضیات پایه

در گام نخست، یک مدل مفهومی از سیستم بهسازی شامل خاک نرم، ستون سنگی، ژئوتکستایل قائم (محصورکننده ستون) و لایه ژئوتکستایل افقی تعریف گردید. فرضیات اصلی شامل:

رفتار غیرخطی برای خاک نرم،

رفتار الاستیک-اصطکاکی برای مصالح سنگی،

رفتار کششی خطی برای ژئوتکستایل،

تماس کامل یا اندرکنش اصطکاکی بین اجزاء، در نظر گرفته شد.

۴-۲- مدل‌سازی عددی با روش المان محدود

مدل عددی در محیط دوبعدی محورمتقارن (برای تک‌ستون) و در صورت نیاز سه‌بعدی (برای آرایش گروهی) توسعه داده شد.

الف) مدل رفتاری مصالح

خاک نرم با مدل رفتاری الاستوپلاستیک مناسب (مانند موهر-کولمب اصلاح‌شده) شبیه‌سازی شد.

ستون سنگی با مدل اصطکاکی-الاستیک با پارامترهای مقاومت برشی بالا تعریف گردید.

ژئوتکستایل قائم و افقی به صورت المان غشایی با سختی کششی مشخص مدل شد.

(ب) شرایط مرزی و بارگذاری

قیود جابجایی افقی در مرزهای جانبی و قیود کامل در مرز پایینی اعمال گردید.

بارگذاری به صورت تدریجی و شبه‌استاتیکی تا رسیدن به گسیختگی یا نشست مجاز ادامه یافت.

(ج) شبکه‌بندی تحلیل حساسیت نسبت به اندازه المان انجام شد تا از همگرایی و دقت نتایج اطمینان حاصل گردد.

۴-۳- صحت‌سنجی مدل عددی

برای اطمینان از قابلیت اعتماد مدل، نتایج عددی با داده‌های منتشرشده آزمایشگاهی و تحلیلی در مطالعات پیشین مقایسه گردید. تطابق مناسب در الگوی نشست، ضریب تمرکز تنش و ظرفیت باربری، اعتبار مدل توسعه‌یافته را تأیید نمود.

۴-۴- برنامه تحلیل پارامتری

به منظور بررسی اثر عوامل مؤثر، تحلیل پارامتری نظام‌مند بر اساس متغیرهای زیر انجام شد:

سختی کششی ژئوتکستایل قائم

سختی کششی ژئوتکستایل افقی

نسبت طول به قطر ستون (L/D)

نسبت سختی ستون به خاک

فاصله یا آرایش ستون‌ها (در مدل گروهی)

هر پارامتر در بازه‌ای مهندسی و واقع‌بینانه تغییر داده شد تا تأثیر آن بر پاسخ سیستم ارزیابی گردد.

۴-۵- شاخص‌های ارزیابی عملکرد

عملکرد سیستم بهسازی بر اساس شاخص‌های زیر بررسی شد:

ظرفیت باربری نهایی

میزان و الگوی نشست

توزیع تنش قائم در خاک و ستون

ضریب تمرکز تنش

میزان کاهش گسترش جانبی ستون

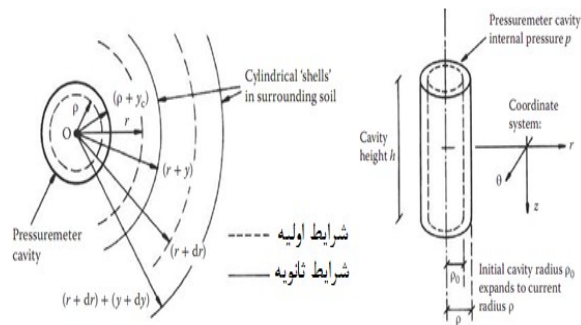
۵- مبناى نظری و مفاهیم تحلیلی

در تحلیل رفتار ستون‌های سنگی، استفاده از مفهوم «سلول واحد» به عنوان یک مدل ایده‌آل‌شده از ستون و خاک اطراف، روشی مؤثر برای ساده‌سازی محاسبات است. این مدل با فرض تقارن، بارگذاری یکنواخت و مصالح همگن، امکان تعمیم

رفتار یک ستون به کل شبکه را فراهم می‌سازد. همچنین، نسبت مساحت جایگزینی و نسبت تمرکز تنش به عنوان شاخص‌های کلیدی در ارزیابی عملکرد ستون‌های سنگی در بهسازی زمین مطرح هستند که به ترتیب بیانگر میزان جایگزینی خاک با مصالح سنگی و توزیع تنش بین ستون و خاک اطراف می‌باشند. این مفاهیم نقش مهمی در طراحی و تحلیل فنی سیستم‌های مسلح‌شده با ستون سنگی دارند.

۵-۱- تئوری انبساط حفره‌ای استوانه‌ای

در اوایل تئوری انبساط حفره‌ای برای آزمایش‌های درجای خاک مانند تفسیر آزمون پرسیمتر استفاده شده است. پس از آن برای پوشش بیشتر مسائل ژئوتکنیکی نظیر فونداسیون‌های شمعی، تونل زنی و کاوش‌های زیرزمینی برای تحلیل رابطه بین فشار انبساط حفره‌ای و جابه‌جایی، با توجه به رفتار تنش-کرنش خاک توسعه داده شده است. جابجایی خاک در طول روند اجرای ستون سنگی یک مسئله‌ی انبساط جانبی حفره‌ای است. تغییرات حاصل در خاک اطراف ستون سنگی ناشی از روند اجرای ستون سنگی معمولاً در طراحی در نظر گرفته نمی‌شود. با این حال فرآیند اجرا، ویژگی‌های خاک را در اطراف ستون سنگی تغییر داده و فشار افقی روی ستون و سختی خاک اطراف ستون را نیز افزایش می‌دهد. این به معنی آن است که ظرفیت زمین بهسازی شده افزایش می‌یابد. اگر فشار داخلی روی دیواره‌ی حفره اعمال شود دیواره به همان شکلی که در شکل ۲ نشان داده شده انبساط می‌یابد.



(ب)

(الف)

شکل ۲ (الف) هندسه‌ی ایده‌آل از تغییر شکل در آزمون پرسیمتری (ب) مقطع عرضی نشان دهنده جابجایی شعاعی پوسته‌های استوانه‌ای خاک در شعاع‌های مختلف اولیه

فرض کنید یک پوسته استوانه‌ای کلی در فاصله شعاعی r به مقدار y گسترش می‌یابد و همچنین پوسته استوانه‌ای دیگری در فاصله شعاعی $r + dr$ با مقدار $y + dy$ گسترش می‌یابد. کرنش شعاعی و کرنش مماسی توسط روابط ۱-۱ و ۱-۲ محاسبه می‌شوند:

$$(1-1)$$

$$\Delta \varepsilon_r = -\frac{(dr + dy) - dy}{(r + dr) - r} = -\frac{dy}{dr}$$

$$(2-1)$$

$$\Delta \varepsilon_\theta = -\frac{2\pi(r + y) - 2\pi r}{2\pi r} = -\frac{y}{r}$$

با فرض اینکه خاک می‌تواند به عنوان یک ماده‌ی الاستیک خطی، همگن و مطابق با قوانین هوک ایده‌آل سازی شود، تنش کل اصلی و کرنش افزایشی شعاعی و بارهای اصلی در جهت‌های شعاعی (r) ، مماسی (θ) و عمودی (z) به شرح زیر است:

$$\Delta\sigma_r = \lambda(\Delta\varepsilon_r + \Delta\varepsilon_\theta + \Delta\varepsilon_z) + 2G\Delta\varepsilon_r \quad (3-1)$$

$$\Delta\sigma_\theta = \lambda(\Delta\varepsilon_r + \Delta\varepsilon_\theta + \Delta\varepsilon_z) + 2G\Delta\varepsilon_\theta \quad (4-1)$$

$$\Delta\sigma_z = \lambda(\Delta\varepsilon_r + \Delta\varepsilon_\theta + \Delta\varepsilon_z) + 2G\Delta\varepsilon_z \quad (5-1)$$

که در معادلات فوق $\lambda = \frac{\nu E}{(1-2\nu)(1+\nu)}$ ؛ $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ می‌باشند. با در نظر گرفتن تعادل المان نشان داده شده، برای معادلات تعادل شعاعی خواهیم داشت:

(6-1)

$$[(\sigma_r + \delta\sigma_r)(r + \delta r)\delta\theta] = [\sigma_r r \delta\theta] + [(2\sigma_\theta \delta r) \sin(\delta\theta/2)]$$

با توجه به اینکه $\delta\theta$ خیلی کوچک است لذا $\sin(\delta\theta/2) = \delta\theta/2$ و همچنین با نادیده گرفتن حاصلضرب کمیت‌های خیلی کوچک (نظیر $\delta\sigma_r \cdot \delta r$) خواهیم داشت:

(7-1)

$$\sigma_r \delta r + r \delta\sigma_r = \sigma_\theta \delta r$$

(8-1)

$$\frac{\sigma_r}{r} + \frac{\delta\sigma_r}{\delta r} = \frac{\sigma_\theta}{r} \text{ (if } \delta r \text{ and } \delta\sigma_r \rightarrow 0) \Rightarrow$$

(9-1)

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r}$$

با فرض شرایط کرنش مسطح ($\Delta\varepsilon_z = 0$) و ترکیب معادلات تنش-کرنش 6-1، 7-1 و 8-1 خواهیم داشت:

(10-1)

$$\frac{d\Delta\sigma_r}{dr} = \frac{\Delta\sigma_\theta - \Delta\sigma_r}{r} = \frac{d}{dr} [\lambda(\Delta\varepsilon_r + \Delta\varepsilon_\theta + \Delta\varepsilon_z) + 2G\Delta\varepsilon_r] = \frac{1}{r} [2G\Delta\varepsilon_\theta - 2G\Delta\varepsilon_r]$$

(11-1)

$$\frac{d}{dr} [\lambda + 2G] \Delta\varepsilon_r + \lambda \Delta\varepsilon_\theta = \frac{1}{r} [2G\Delta\varepsilon_\theta - 2G\Delta\varepsilon_r]$$

(12-1)

$$\frac{d}{dr} \left[(\lambda + 2G) \left(-\frac{dy}{dr} \right) + \lambda \Delta \varepsilon_{\theta} \left(-\frac{y}{r} \right) \right] = \frac{1}{r} \left[2G \left(-\frac{y}{r} \right) - 2G \left(-\frac{dy}{dr} \right) \right] \quad (13-1)$$

$$-(\lambda + 2G) \frac{d^2 y}{dr^2} - \lambda \frac{1}{r} \frac{dy}{dr} + \lambda \frac{y}{r^2} = -2G \left(\frac{y}{r^2} \right) + 2G \frac{1}{r} \frac{dy}{dr} \quad (14-1)$$

$$-(\lambda + 2G) \frac{d^2 y}{dr^2} - (\lambda + 2G) \frac{1}{r} \frac{dy}{dr} + (\lambda + 2G) \frac{y}{r^2} = 0 \quad (15-1)$$

$$\frac{d^2 y}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dy}{dr} - \frac{y}{r^2} = 0$$

پاوری در سال ۲۰۰۴ بیان می‌نماید که معادله ۱۲-۱ معادله دیفرانسیل با یک متغیر y (تغییر شعاعی) است. راه حل عمومی آن با جایگزینی رابطه ۱۶-۱ به دست می‌آید

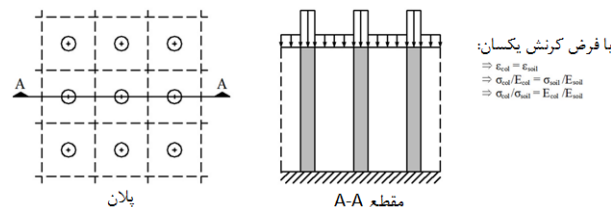
(۱۶-۱)

$$y = \frac{A}{r} + Br$$

که A و B ضرایبی هستند که به شرایط مرزی بستگی دارند. با افزایش فاصله شعاعی از حفره مقدار y به صفر نزدیک می‌شود، $B = 0$ و $y = (A/r)$.

۵-۲- نسبت تمرکز تنش

ستون‌های سنگی را می‌توان در شبکه‌های بزرگ برای تحمل بارهای سطح وسیع یا در گروه‌های کوچک در زیر پایه پی‌های تکی یا نواری قرار داد. اگر مقادیر کرنش در زیر فونداسیون برابر فرض شود (تغییر شکل یکنواخت) می‌توان از تعادل نشان داد که بخش بزرگی از بار اعمال شده توسط ستون‌های سنگی تحمل می‌شود بنابراین تمرکز تنش در ستون‌های سنگی ایجاد می‌شود. این تمرکز تنش باعث کاهش تنش‌های عمودی در خاک اطراف می‌گردد (شکل ۳).



شکل ۳ توسعه نسبت تمرکز تنش در ستون‌های سنگی سخت‌تر

توزیع تنش عمودی در سلول واحد با نسبت تمرکز تنش (n) بیان می‌شود. نسبت تمرکز تنش به صورت تنش موجود در ستون سنگی (σ_s) به تنش موجود در خاک اطراف (σ_c) تعریف می‌شود. مقدار تمرکز تنش بستگی به سختی نسبی ستون سنگی و خاک اطراف آن دارد. نسبت تمرکز تنش را می‌توان با استفاده از تئوری الاستیک با فرض جابجایی عمودی یکسان برای ستون سنگی و خاک اطراف آن محاسبه کرد.

(۱-۲)

$$\sigma = \sigma_s . A_s + \sigma_c (1 - A_s)$$

(۲-۲)

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{[1 + (n-1)a_s]} = \mu_c \sigma$$

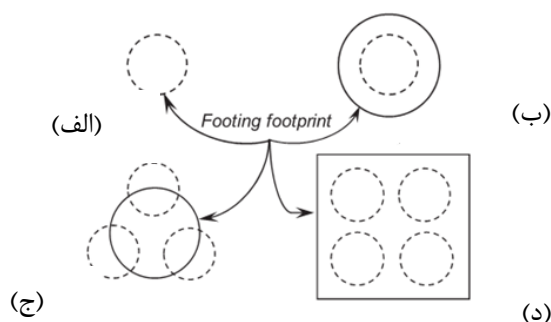
(۳-۲)

$$\sigma_s = \frac{n.\sigma}{[1 + (n-1)a_s]} = \mu_s \sigma$$

که μ_s و μ_c به ترتیب نسبت تنش در خاک رسی اطراف و ستون سنگی نسبت به متوسط تنش (σ) که در بالای منطقه مورد نظر موجود است می‌باشند. آبوشی و همکاران در سال ۱۹۷۹ مقدار n را بین ۱/۶ تا ۱۱/۵ گزارش کرده‌اند. آزمون‌های درجای انجام شده توسط بارکس‌دیل و باچوس نشان می‌دهد که نسبت تمرکز تنش معمولاً از مقدار ۲/۵ تا ۵ متغیر می‌باشد

۳-۴- ظرفیت باربری نهایی

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است ترکیب فونداسیون‌های قرار گرفته بر روی زمین‌های مسلح شده با ستون سنگی می‌تواند به طور کلی به چهار دسته تقسیم شود



شکل ۴ ترکیب ستون‌های سنگی واقع در زیر فونداسیون

(الف) ستون سنگی تکی (قطر یکسان برای فونداسیون و ستون سنگی) (ب) ستون سنگی تکی میانی

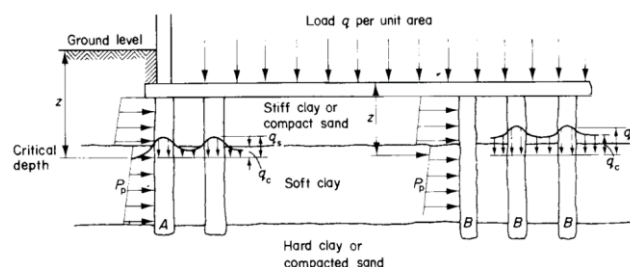
(ج) ستون سنگی گروهی میانی (د) ستون سنگی گروهی

تحقیقات قبلی در مورد ظرفیت باربری ستون‌های سنگی عمدتاً بر اساس مکانیسم گسیختگی ستون سنگی تکی متمرکز شده است (شکل ۴ الف). ظرفیت باربری فونداسیون واقع بر روی ستون‌های سنگی به مکانیسم گسیختگی ستون بستگی دارد. بیشتر روش‌های طراحی در چهار دهه‌ی گذشته تجربی یا نیمه تجربی بوده و بر مبنای رویکردهایی است که در بخش‌های بعد مورد بحث قرار می‌گیرد.

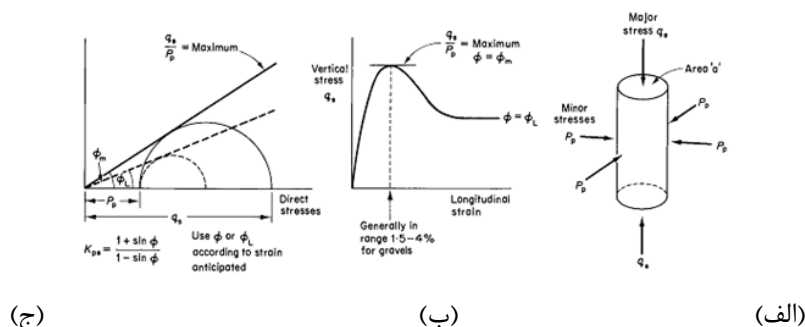
۶- روش تحقیق

۶-۱- روش گرینوود

گرینوود یکی از اولین کسانی بود که روش طراحی برای ستون‌های سنگی را با در نظر گرفتن شرایط آزمون سه محوری در سال ۱۹۷۰ ارائه کرد. ایده‌ی این تکنیک این است که بار وارد شده از طریق فونداسیون نواری قرار گرفته بر روی ستون‌های سنگی تمایل دارد در ستون‌های سنگی (به علت سختی بیشتر) متمرکز شود. ستون به صورت جانبی انبساط می‌یابد و تنش جانبی به خاک رسی اطراف وارد کرده و خاک رسی اطراف با فشار مقاوم در مقابل این انبساط مقاومت می‌کند. بنابراین یک سیستم تنش سه محوری درون ستون وجود دارد.



شکل ۵ نحوه توزیع تنش در ستون‌های سنگی و ایجاد فشار مقاوم



شکل ۶ تخمین ظرفیت باربری ستون سنگی

(الف) محدوده‌ی بحرانی ستون سنگی تحت تنش سه محوری (ب) تنش- کرنش طولی برای محدوده‌ی

بحرانی (ج) دایره موهر در محدوده‌ی بحرانی

تحت شرایط سه محوری با فشار مقاوم برابر در تمام اطراف ستون حداکثر ظرفیت باربری ستون سنگی زمانی که نسبت تنش‌های اصلی نیز حداکثر است (بستگی به زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح ستون دارد) افزایش می‌یابد. اگر تنش میانگین بر روی خاک رس و ستون سنگی در عمق بحرانی به ترتیب برابر q_c و q_s باشد فشار مقاوم در محدوده‌ی بحرانی که ستون‌ها در آن ضعیف‌تر هستند برای ستون‌های محیطی یا ستون‌های قرار گرفته در زیر فونداسیون باریک با رابطه ۲-۲۱ و برای ستون‌های قرار گرفته در مرکز فونداسیون عریض با رابطه ۲-۲۲ بیان می‌شود:

(۲۱-۲)

$$P_p = \gamma \cdot z \cdot K_{pc} + 2c_u \cdot \sqrt{K_{pc}}$$

$$P_p = (\gamma \cdot z + x \cdot q) \cdot K_{pc} + 2c_u \cdot \sqrt{K_{pc}}, \quad q_c = x \cdot q \quad (22-2)$$

که γ وزن مخصوص خاک رسی اطراف، z عمق کلی خمره‌ای شدن ستون، K_{pc} ضریب فشار مقاوم خاک، c_u مقاومت برشی زهکشی نشده و x عمق بحرانی است که خمره‌ای شدن و گسیختگی برشی به صورت همزمان اتفاق می‌افتد. طول بحرانی در حدود ۲ برابر قطر ستون دانه‌ای توسط گرین‌وود گزارش شده است [۲۱]. با این حال در مطالعه‌ی هیوز و ویدرز طول بحرانی ۴ برابر قطر ستون در حالت گسیختگی به صورت خمره‌ای شدن در خاک رسی پیشنهاد گردیده است. به طور کلی اثر سربار اضافی q در فشار محدود کننده، بسیار بزرگ‌تر از مقاومت خاک اطراف و تراکم آن است. در نتیجه ظرفیت باربری شمع دانه‌ای تا زمان گسیختگی برشی موضعی یا گسیختگی باربری نهایی (هر کدام که زودتر رخ می‌دهد) افزایش می‌یابد. بنابراین ظرفیت باربری افزایش یافته ستون سنگی به علت فشار سربار اضافی q ، طبق رابطه ۲-۲۳ بیان می‌شود:

(۲۳-۲)

$$q_s = K_{ps} \cdot P_p = K_{ps} (\gamma \cdot z \cdot K_{pc} + 2c_u \cdot \sqrt{K_{pc}} + x \cdot q \cdot K_{pc}), K_{ps} = \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s}$$

۲-۶- روش هیوز و ویدرز

یک رویکرد جالب بر اساس شباهت بین رفتار یک ستون سنگی در زمان خمره‌ای شدن و آزمون پرسیومتر توسط هیوز و ویدرز در سال ۱۹۷۴ ارائه شده است. همچنین تئوری الاستو-پلاستیک که توسط گیسون و اندرسون در سال ۱۹۶۱ پیشنهاد شده است را برای تفسیر نتایج آزمون پرسیومتر با استفاده از انبساط حفره‌ای استوانه‌ای گسترش دادند. آنها برای محاسبه تنش نهایی جانبی رابطه ۲-۲۷ را ارائه کرده‌اند:

(۲۷-۲)

$$\sigma_{rl} = \sigma_{r0} + c_u \left[1 + \log_e \frac{E}{2C(1+\nu)} \right]$$

که σ_{r0} تنش کل جانبی، E مدول الاستیسیته و c_u مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی خاک می‌باشند. آن‌ها بیان می‌نمایند رابطه ۲-۲۷ می‌تواند با رابطه ۲-۲۸ تقریب زده شود.

$$\sigma_{rl} = \sigma_{r0} + 4c_u - U \quad (28-2)$$

$$\sigma_{rl} = \sigma_{r0} + 4c_u$$

که U فشار آب حفره‌ای می‌باشد. بنابراین بار نهایی ستون‌های سنگی (خمره‌ای شدن) می‌تواند با رابطه ۲-۲۹ بیان شود:

(۲۹-۲)

$$\sigma_v = k_p \cdot (\sigma_{r0} + 4c_u - U) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} (\sigma_{r0} + 4c_u - U)$$

اگر چه گسیختگی خمره‌ای حالت غالب تغییر شکل در ستون‌های سنگی گروهی نیست، گرین‌وود و کیریش بیان می‌کنند که با توجه به ساده بودن روابط، این روابط می‌تواند در مورد ستون‌های سنگی گروهی نیز مورد استفاده قرار گیرد

۳-۶- روش ماده‌ها و ویتکار

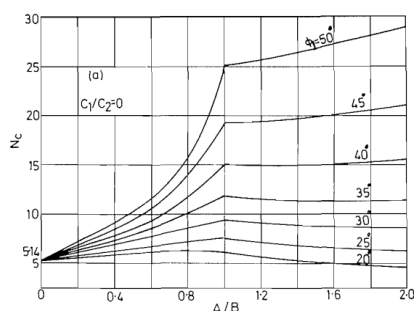
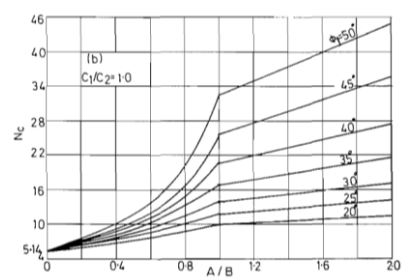
ماده‌ها و ویتکار در سال ۱۹۷۸ روابط کرنش مسطح برای شمع‌های دانه‌ای را به عنوان یک ترانسه دانه‌ای نشان دادند و مکانیسم گسیختگی را ارائه کردند. معادله‌ی میزان کار انجام یافته خارجی ناشی از بارگذاری، وزن خاک و اضافه بار خاک با انرژی داخلی به وجود آمده در منطقه پلاستیک تغییر شکل یافته که همان معیار جاری شدن کولمب است تشکیل می‌شود. مکانیسم شکست کلی برشی همراه با معیار کولمب برای جاری شدن خاک در نظر گرفته شده است. شکل ۲-۱۵ مکانیسم گسیختگی فرضی برای سیستم خاک با ترانسه‌ی دانه‌ای به عرض A و عرض بار نواری B برای $A/B \leq 1$ و $A/B \geq 1$ را نشان می‌دهد.

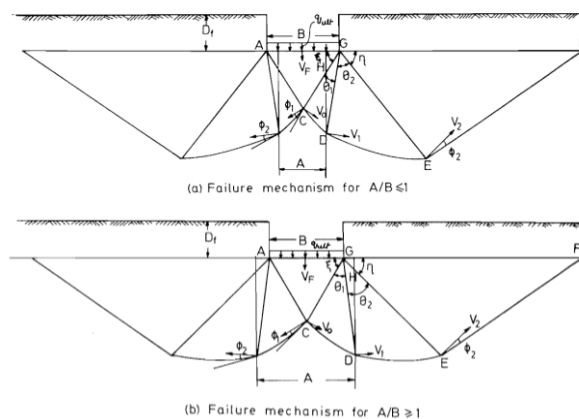
با توجه به معادله‌ی کار انجام شده توسط بار خارجی q به انرژی پراکنده شده توسط چسبندگی و کار انجام شده با توجه به وزن خاک و اضافه بار خاک رابطه‌ی ۲-۳۵ ارائه شده است:

$$q_{ult} = c_2 N_c + \gamma_2 (B/2) N_\gamma + D_f \gamma_2 N_q \quad (2-35)$$

$$\text{Where : } N_c = (c_1 / c_2) N_{c1} + N_{c2}, N_\gamma = (\gamma_1 / \gamma_2) N_{\gamma1} + N_{\gamma2} \quad (2-36)$$

که N_{c1} ، N_{c2} ، $N_{\gamma1}$ ، $N_{\gamma2}$ و N_q ضرایب بدون بعد ظرفیت باربری هستند که بستگی به خصوصیات مصالح ترانسه و خاک و همچنین نسبت A/B دارند که در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده‌اند. c_1 و c_2 چسبندگی مصالح خاک و ترانسه γ_1 و γ_2 وزن مخصوص مصالح خاک و ترانسه و D_f عمق استقرار فونداسیون است. رابطه ۲-۳۵ شبیه رابطه ترازقی برای ظرفیت باربری خاک‌های همگن است.

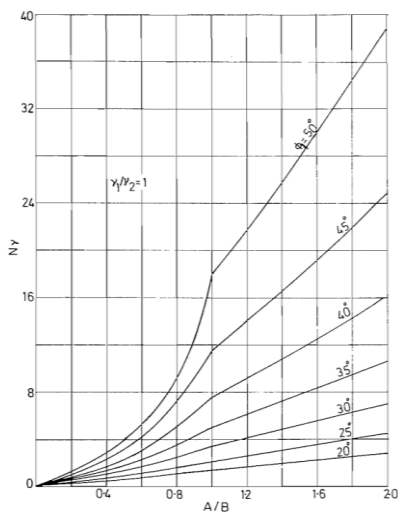




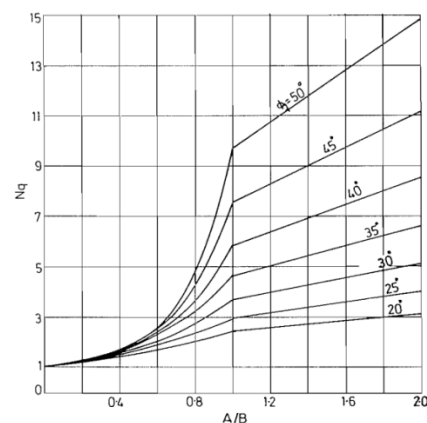
شکل ۷ مکانیسم گسیختگی برشی کلی

-۲

-۱



-۵



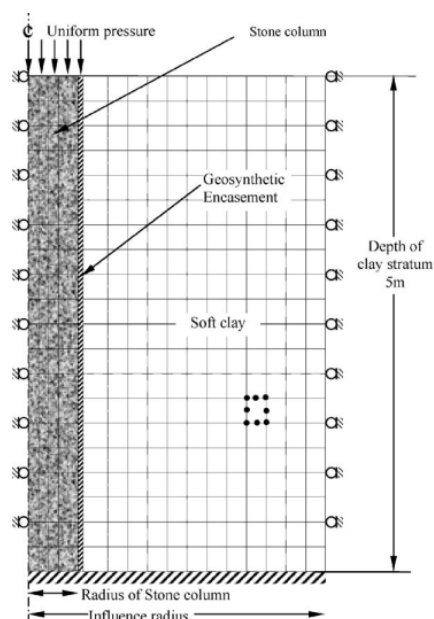
-۳

-۴

شکل ۸ مقادیر N_γ و N_q ، N_c

۴-۶- روش مورگسان و راجاگوپال

مورگسان و راجاگوپال در سال ۲۰۰۶ یک مطالعه پارامتری با روش اجزاء محدود در خصوص بررسی تأثیر پوشش ژئوسنتتیک در افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی انجام دادند. یک مدل سیلندری با یک محور تقارن گذرنده از مرکز ستون سنگی جهت آنالیز اجزاء محدود با استفاده از نرم‌افزار ژئوم در نظر گرفته شد و همچنین شبکه‌ی اجزاء محدود به صورت ۸ نقطه‌ای مدل شد (شکل ۹). ستون‌های سنگی و خاک نرم با استفاده از مدل‌های غیر خطی هایپربولیک و پوشش ژئوسنتتیک به عنوان مصالح الاستیک خطی مدلسازی شدند. در این آنالیز تأثیر روش اجرای ستون سنگی در خاک بر افزایش و تراوش فشار آب حفره‌ای نادیده گرفته شده است. آنها نتیجه گرفتند که تنش‌های جانبی در ستون‌های دارای پوشش ژئوسنتتیک، بیشتر از ستون‌های بدون پوشش است. همچنین ظرفیت باربری ستون سنگی وابسته به مقاومت زهکشی نشده‌ی خاک اطراف آن می‌باشد [۵۵].



شکل ۹ مدل هندسی و مش بندی استفاده شده در مدلسازی عددی

اجرای ستون‌های سنگی یکی از روش‌های بهسازی خاک به منظور افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست‌های نسبی و کلی خاک زیر فونداسیون سازه‌ها می‌باشد. این روش بهسازی یکی از پرکاربردترین روش‌های بهسازی خاک است چرا که با هزینه‌ی اجرایی نسبتاً کم به راحتی اجرا شده و از نظر کارایی نیز مؤثر می‌باشد. علت کاربرد ستون‌های سنگی زیاد بودن مقاومت برشی مصالح و تأمین قید جانبی به وسیله خاک اطراف ستون است.

ستون‌های سنگی تکی دارای مکانیسم‌های گسیختگی خمره‌ای شدن، گسیختگی کلی برشی و لغزش هستند. طول بحرانی در حدود $4D$ الی $7D$ برای ستون‌های سنگی تکی بیان شده است که در طول‌های بیشتر از این مقادیر افزایش ظرفیت باربری برای ستون مشاهده نگردیده است. وقوع هر یک از رفتارهای تغییرشکلی ذکر شده به خواص هندسی ستون‌ها و فونداسیون نظیر فاصله‌ی ستون‌ها، طول ستون‌ها، موقعیت قرارگیری در زیر فونداسیون و قطر فونداسیون بستگی دارد. طول بحرانی برای ستون‌های سنگی گروهی بستگی به فاصله ستون‌ها و قطر فونداسیون دارد و به طور معمول از طول $1/5D$ تا $6D$ پیشنهاد شده است.

اکثر روش‌های طراحی برای ظرفیت باربری نهایی و عملکرد نشست ستون‌های سنگی بر اساس مفهوم سلول واحد و تئوری انبساط حفره‌ای استوانه‌ای است. مفهوم سلول واحد این است که شبکه‌ای نامحدود از ستون‌های سنگی که بارگذاری سطح عریضی را تحمل می‌کنند فرض می‌شود که در این شبکه‌ی نامحدود رفتار همه‌ی ستون‌ها یکسان است (به دلیل تقارن) و آنالیزها به تحلیل یک ستون و خاک اطراف آن ساده می‌شود. در نتیجه مفهوم سلول واحد فقط برای ستون‌های سنگی داخلی در گروه‌های بزرگ قابل استفاده است. تنش‌ها و کرنش‌هایی که در خاک اطراف ستون به وجود می‌آیند نیز می‌توانند با استفاده از تئوری انبساط حفره‌ای استوانه‌ای تعیین شوند. روش‌های تجربی و تحلیلی که در بخش‌های قبلی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی ستون ارائه شده نشان می‌دهد که ظرفیت باربری نهایی ستون‌های سنگی به شدت وابسته به مقاومت غیرفعال خاک اطراف است به خصوص در قسمت‌های بالایی ستون (در نزدیکی سطح زمین) که خمره‌ای شدن ستون‌های سنگی نیز در این قسمت‌ها اتفاق می‌افتد. بررسی عملکرد نشست ستون‌های سنگی از مطالعات درجا و آزمایشگاهی در بخش‌های قبلی ارائه شد. تأثیر طول ستون، نسبت مساحت جایگزین و آرایش ستون‌ها بر عملکرد نشست ستون‌های سنگی بسیار مهم است و می‌تواند به منظور دستیابی به عملکرد مشخصی از استقرار صورت گیرد. در خاک‌های با مقاومت برشی کمتر از ۱۵ کیلو پاسکال به دلیل کم بودن محصوریت جانبی خاک اطراف معمولاً از ستون‌های سنگی مسلح شده استفاده می‌شود. برخی از مطالعات پیشین مربوط به ستون سنگی معمولی و ستون سنگی مسلح شده با مسلح کننده‌های مختلف انجام شده است در این فصل بیان گردید. در مطالعات انجام شده در مورد ادبیات فنی موضوع ستون‌های سنگی با انواع مختلفی از ژئوسنتتیک‌ها مسلح شده‌اند. تحقیقات

زیادی در ارتباط با مسلح کننده‌های ژئوتکستایلی وجود دارد و اثرات استفاده از ژئوتکستایل افقی نیز در برخی از پژوهش‌ها وجود دارد. این مطالعه قصد دارد استفاده از ژئوتکستایل‌های قائم و افقی همزمان (مضاعف) را بررسی نماید.

۷- توضیح مدل‌سازی، آزمایش‌ها یا نرم‌افزارهای به کار رفته

برای شبیه‌سازی رفتار خاک و سازه‌های ژئوتکنیکی، از نرم‌افزار اجزاء محدود پلکسیس استفاده شد. این نرم‌افزار به دلیل قابلیت‌های گسترده در مدل‌سازی غیرخطی خاک و تعامل خاک-سازه، یکی از ابزارهای استاندارد در مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود و امکان تحلیل دقیق سدها، خاکریزها، دیوارهای حائل، شمع‌ها و ژئوتکستایل‌ها را فراهم می‌آورد.

۷-۱- مدل‌سازی هندسی و مش‌بندی

فرآیند مدل‌سازی با ایجاد مدل هندسی دوبعدی آغاز شد که شامل لایه‌های خاک، سازه‌های جانبی و محدوده‌های مرزی بود. مدل هندسی با استفاده از نقاط، خطوط و گروه‌های هندسی تعریف شد و گروه‌ها به عنوان فضای محصورشده بین خطوط عمل کرده و امکان اختصاص مصالح و شرایط مرزی به هر بخش را فراهم می‌آورد. پس از ایجاد هندسه، مدل به صورت اتوماتیک مش‌بندی شد و المان‌های شش‌گرمی و پانزده‌گرمی برای تحلیل دقیق‌تر استفاده گردید. المان‌های پانزده‌گرمی برای بررسی‌های حساس خاک‌های رمبنده و المان‌های شش‌گرمی به عنوان المان پیش‌فرض برای تحلیل‌های دوبعدی انتخاب شدند. اندازه المان‌ها بر اساس پارامتر «Le» قابل تنظیم بوده و امکان انتخاب از پنج سطح مختلف از «خیلی درشت» تا «خیلی ریز» وجود داشت.

۷-۲- مشخصات مصالح و رفتار خاک

مدل‌سازی مصالح در پلکسیس شامل تعیین خواص مکانیکی خاک و مصالح سازه‌ای مانند مدول یانگ، نسبت پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع بود. خاک‌ها بر اساس شرایط زهکش، غیرزهکش یا غیرمتخلخل دسته‌بندی شدند. خاک‌های زهکش برای خاک‌های خشک و با نفوذپذیری بالا مانند شن و ماسه کاربرد دارند، در حالی که خاک‌های غیرزهکش برای شبیه‌سازی اثر فشار آب حفره‌ای اضافی در خاک‌های رسی مورد استفاده قرار گرفتند. مصالح غیرمتخلخل برای مدل‌سازی بتن و سنگ یا سایر مصالح سازه‌ای با نفوذپذیری ناچیز به کار رفتند.

۷-۳- مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه

برای شبیه‌سازی دقیق تعامل خاک و سازه‌ها، از المان‌های فصل مشترک، انکرها، تیرها و ژئوتکستایل‌ها استفاده شد. فصل مشترک‌ها امکان انتقال تنش و جابجایی بین خاک و سازه را فراهم می‌کردند، در حالی که انکرها گره‌به‌گره و گیردار برای شبیه‌سازی مهارهای موضعی و پیش‌تنیدگی استفاده شدند. تیرها برای مدل‌سازی دیوارها و سازه‌های بلند و باریک با صلبیت خمشی و سختی نرمال قابل توجه به کار رفتند و ژئوتکستایل‌ها برای مدل‌سازی خاک مسلح با مقاومت کششی تعریف شدند.

۷-۴- شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی شامل تکیه‌گاه‌های استاندارد، تغییرمکان‌های پیش‌بینی‌شده و بارهای نقطه‌ای یا خطی بود. تکیه‌گاه‌ها جابجایی‌ها و دوران‌های مدل را محدود کرده و بارگذاری‌ها به صورت نیروهای متمرکز یا توزیع‌شده در امتداد مدل اعمال شدند. تغییرمکان‌های پیش‌بینی‌شده برای شبیه‌سازی شرایط خاص مانند نشست یا جابجایی‌های تحمیلی به مدل افزوده شدند.

۷-۵- شرایط اولیه و تحلیل تحکیم

برای خاک‌های اشباع، فشار آب حفره‌ای اولیه و فشار اضافی ناشی از بارگذاری غیرزهکش تعریف شد. تحلیل تحکیم برای بررسی توزیع و انتشار فشار آب حفره‌ای اضافی در طول زمان استفاده شد و به ویژه برای خاک‌های رسی اشباع کاربرد

داشت. محاسبات جریان آب زیرزمینی در تحلیل تحکیم با در نظر گرفتن شرایط مرزی و نفوذپذیری لایه‌ها انجام شد و امکان تعیین موقعیت سطح آزاد آب و مسیر نشت فراهم گردید.

۷-۶- تحلیل پلاستیک و کاهش زاویه اصطکاک داخلی

محاسبات پلاستیک برای بررسی تغییر شکل‌های الاستیک-پلاستیک خاک انجام شد. در این تحلیل، ماتریس سختی بر اساس هندسه اولیه بدون تغییر شکل ایجاد شد. برای شرایط بحرانی یا شبیه‌سازی اثرات بارگذاری‌های غیرمنتظره، کاهش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک اعمال شد. این کاهش به نرم‌افزار امکان می‌دهد رفتار خاک تحت بارگذاری بیشینه و شرایط نزدیک به گسیختگی را پیش‌بینی کند و برای طراحی ایمن سازه‌های ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرد.

۷-۷- تحلیل مش به هنگام شده

برای بررسی تغییر شکل‌های بزرگ و اثرات غیرخطی شدید، تحلیل مش به هنگام شده اجرا شد. در این روش، ماتریس سختی بر اساس هندسه تغییر شکل یافته به‌روزرسانی می‌شود و امکان پیش‌بینی دقیق رفتار خاک در شرایط تغییر شکل قابل توجه فراهم می‌گردد.

تحلیل‌های انجام‌شده با نرم‌افزار پلکسیس نشان داد که رفتار خاک تحت بارگذاری‌های وارده غیرخطی بوده و پاسخ سیستم خاک-سازه به طور قابل توجهی به مشخصات مصالح، نوع رفتار خاک (زهکش، غیرزهکش یا غیرمتخلخل) و شرایط مرزی وابسته است.

- در خاک‌های رسی اشباع، فشار آب حفره‌ای اضافی به‌طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت برشی خاک را کاهش داده و زمان تحکیم تأثیر مهمی بر تغییر شکل‌ها دارد.
- استفاده از المان‌های فصل مشترک و انکرها امکان مدل‌سازی دقیق اندرکنش خاک و سازه را فراهم نمود، به طوری که نقاط بحرانی تنش و نواحی با تغییر شکل بیشینه شناسایی شدند.
- تحلیل مش به هنگام شده نشان داد که در شرایط تغییر شکل بزرگ، توزیع تنش‌ها و نشست‌ها به صورت غیرخطی و موضعی تغییر می‌یابد و بدون به‌روزرسانی ماتریس سختی، تخمین تغییر شکل‌ها به شدت دست کم گرفته می‌شد.
- کاهش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک، رفتار نزدیک به گسیختگی را شبیه‌سازی کرد و امکان پیش‌بینی ایمنی سازه و نقاط بحرانی را فراهم ساخت.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که نرم‌افزار پلکسیس ابزار موثری برای تحلیل دقیق رفتار خاک و تعامل آن با سازه‌های ژئوتکنیکی است و می‌تواند در طراحی و پیش‌بینی عملکرد سازه‌های خاکی، دیوارهای حائل و سازه‌های زیرسطحی به‌طور قابل اعتماد مورد استفاده قرار گیرد.

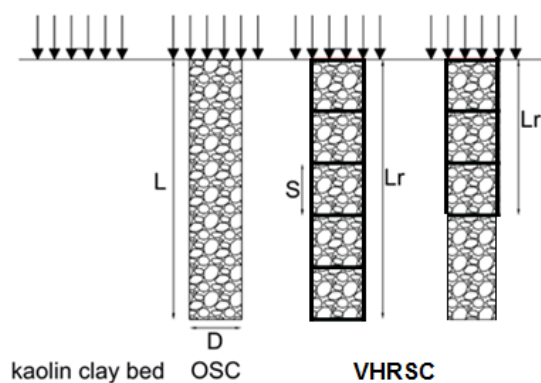
جدول ۱: خلاصه تحلیلی قابلیت‌ها و کاربردهای نرم‌افزار پلکسیس در مدل‌سازی ژئوتکنیکی

بخش نرم‌افزار	کاربرد اصلی
مدل‌های کرنش	انتخاب مدل مناسب بر اساس هندسه و بارگذاری
المان‌ها	مدلسازی رفتار خاک و سازه
فصل مشترک‌ها	اتصال خاک و سازه
انکرها	مهار نقاط خاص
تیرها و ژئوتکستایل‌ها	مدل‌سازی دیوارها، صفحات و خاک مسلح
بارگذاری و شرایط مرزی	شبیه‌سازی بارهای واقعی پروژه
رفتار مصالح و خاک	تحلیل تنش، فشار حفره‌ای و نشست
مش‌بندی	دقت محاسبات المان محدود
تحلیل‌ها	شبیه‌سازی رفتار خاک و سازه

۸- تفسیر علمی و کاربردی نتایج

۸-۱- ستون‌های سنگی تکی مسلح‌شده با ژئوتکستایل عمودی و افقی

۱۱ مدل عددی بر روی ستون‌های سنگی شناور با قطر ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۴۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر ($L/D=5$) برای مطالعه اثر فاصله افقی بین دیسک‌ها و طول عمودی مسلح‌شده‌ی ستون بر میزان ظرفیت باربری ستون‌های سنگی انجام شده‌اند. برای این منظور ستون‌های سنگی با ژئوتکستایل عمودی و دیسک‌هایی از جنس ژئوتکستایل به قطر معادل با قطر ستون با فواصل دیسک‌های مختلف مسلح‌شده‌اند. شکل ۱۰ نحوه‌ی آرایش ستون‌های سنگی و جدول ۲ نیز برنامه مدل‌های عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ نحوه آرایش ستون‌های سنگی مسلح شده

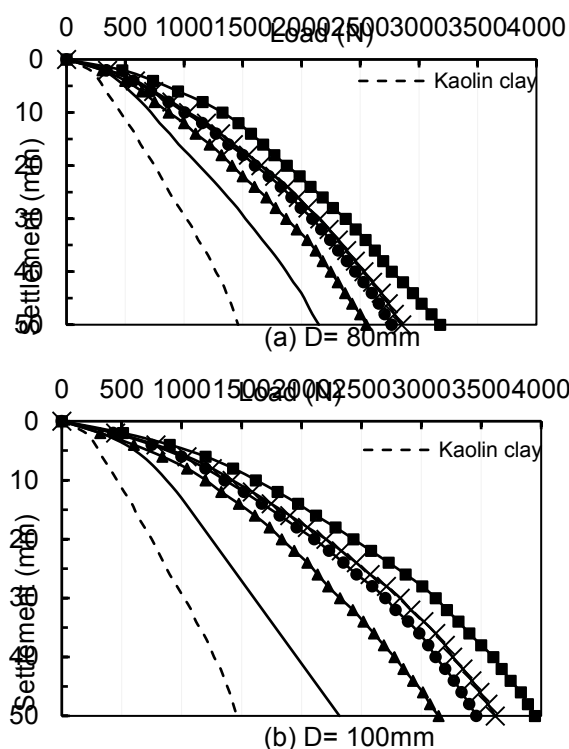
جدول ۲: مدلسازی انجام شده برای دیسک‌های افقی

تعداد آزمون‌ها	نوع آزمایش	قطر ستون سنگی D (mm)		مسلح کننده افقی فاصله‌ی مسلح کننده‌های افقی S (mm)	مسلح کننده عمودی طول L_r
		۱۰۰	۸۰		
۱	clay bed	-	-	-	-
۲	OSC	✓	✓	-	-
۸	VHRSC1	-	✓	۸۰	۴۰۰
	VHRSC2	-	✓	۸۰	۲۴۰
	VHRSC3	-	✓	۴۰	۴۰۰
	VHRSC4	-	✓	۴۰	۲۰۰
	VHRSC5	✓	-	۱۰۰	۵۰۰
	VHRSC6	✓	-	۱۰۰	۳۰۰
	VHRSC7	✓	-	۵۰	۵۰۰
	VHRSC8	✓	-	۵۰	۲۵۰

VHRSC: ستون‌های مسلح شده با دیسک‌های افقی و ژئوتکستایل عمودی

۲-۸- رفتار بار-نشست

رفتار بار-نشست برای بستر رس کائولین، بستر رس کائولین مسلح شده با ستون های سنگی معمولی و ستون های سنگی مسلح شده با ژئوتکستایل های عمودی و افقی با قطر ها و طول های مختلف در شکل ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان می دهند در تمامی حالات با مسلح کردن بستر رس کائولین با ستون های سنگی معمولی و ستون های سنگی مسلح شده با ژئوتکستایل، ظرفیت باربری افزایش پیدا کرده است. همچنین با مسلح کردن بستر رس کائولین با ستون های سنگی معمولی به قطر ۸۰ و ۱۰۰ میلی متر مقدار بار تحمل شده در نشست ۵۰ میلی متر به ترتیب به میزان ۴۷/۱٪ و ۵۸/۶٪ بهبود یافته است.



شکل ۱۱ رفتار بار-نشست برای بستر رس کائولین و ستون های سنگی معمولی و ستون های سنگی مسلح شده با لایه های ژئوتکستایل به صورت مضاعف

۸-۳- تأثیر قطر ستون سنگی

مقایسه ی نتایج نشان می دهد با افزایش قطر ستون سنگی از ۸۰ به ۱۰۰ میلی متر ظرفیت باربری به میزان ۸٪ بهبود می یابد. با افزایش قطر ستون سنگی ظرفیت باربری افزایش یافته است و در ستون های سنگی مسلح شده با ژئوتکستایل های عمودی تأثیر مسلح کننده ها با افزایش قطر، کمتر می شود. دلیل این عملکرد، ایجاد محصوریت جانبی اضافی بیشتر توسط مسلح کننده ها در حالت قطر های کوچک تر است.

۸-۴- تأثیر طول مسلح کننده

افزایش طول مسلح شده در حالت مضاعف از نصف طول ستون سنگی به کل طول ستون سنگی برای قطر های ۸۰ و ۱۰۰ میلی متر به ترتیب باعث افزایش ظرفیت باربری به ترتیب به میزان ۱۴/۸٪ و ۱۴/۱٪ می شود؛ بنابراین مشاهده می شود که

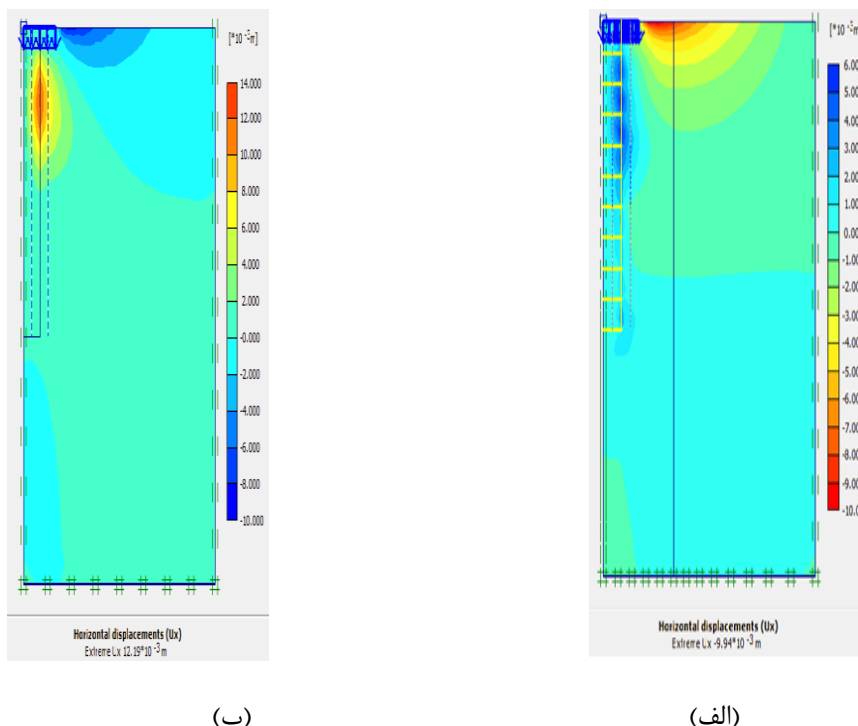
ستون‌های سنگی مسلح‌شده در تمام طول خود ($Lr = L$) به دلیل ایجاد محصوریت بیشتر توسط مسلح‌کننده‌ها عملکرد بهتری نسبت به ستون‌های سنگی مسلح‌شده در نصف طول خود ($Lr = 0.5L$) دارند.

۸-۵- تأثیر فاصله لایه‌های افقی ژئوتکستایل

مقایسه نتایج بین VHRSC1 و VHRSC3 نشان می‌دهد که ظرفیت باربری ۱۴/۸٪ افزایش یافته است. این مقدار برای VHRSC5 و VHRSC7 برابر با ۱۴/۱٪ است. نتایج نشان می‌دهند ستون‌های سنگی مسلح‌شده با تعداد ۱۱ لایه ژئوتکستایل با فواصل $D/2$ عملکرد بهتری نسبت به ستون‌های سنگی مسلح‌شده با تعداد ۶ لایه با فواصل D دارند. زمانی که ستون‌های سنگی با فواصل D مسلح می‌شوند به دلیل اصطکاک کمتر بین لایه‌های ژئوتکستایل و دانه‌های شکسته لغزش اتفاق می‌افتد. با کاهش فاصله لایه‌ها به $D/2$ افزایش ظرفیت باربری بیشتری اتفاق می‌افتد. این افزایش ظرفیت باربری به دلیل محصوریت مصالح سنگی شکسته‌ی ستون سنگی بین لایه‌های افقی مسلح‌کننده‌ها است که با بسیج تنش برشی بین لایه‌های ژئوتکستایل و مصالح سنگی شکسته باعث ایجاد محصوریت اضافی می‌شود. مسلح کردن ستون سنگی با تعداد ۱۱ لایه با فواصل $D/2$ باعث ایجاد ستون‌های کوچکی بین لایه‌های افقی ژئوتکستایل شده و به همین دلیل خمره‌ای شدن این ستون‌ها کاهش یافته و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد.

۸-۶- بررسی خمره‌ای شدن ستون‌های سنگی

در شکل ۱۲ کانتور مقدار جابجایی افقی در ستون سنگی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر که در طول کل ستون سنگی با دیسک‌های افقی با فواصل D مسلح شده است نشان داده شده است که همانطور که مشاهده می‌شود خمره‌ای شدن محدود شده و بین لایه‌های مسلح‌کننده ایجاد شده است.



شکل ۱۲ کانتور مقدار جابجایی افقی (الف) در ستون سنگی معمولی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر

(ب) ستون سنگی مسلح شده مضاعف با دیسک‌های افقی در طول کل ستون با فواصل $D/2$

تحلیل عددی نشان داد که مسلح‌سازی ستون‌های سنگی با ژئوتکستایل‌های عمودی و دیسک‌های افقی، ظرفیت باربری را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. افزایش قطر و طول مسلح‌کننده و کاهش فاصله لایه‌های افقی باعث بهبود محصوریت مصالح و کاهش خمره‌ای شدن ستون‌ها می‌شود. بنابراین، طراحی بهینه آرایش ستون و ژئوتکستایل‌ها نقش کلیدی در ارتقای عملکرد و پایداری ستون‌های سنگی در بسترهای نرم دارد.

۹- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیک در بهبود عملکرد ستون‌های سنگی در خاک‌های نرم می‌باشد. تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی بیانگر آن است که:

استفاده از ژئوتکستایل به عنوان مسلح‌کننده در ستون‌های سنگی معمولی موجب افزایش ظرفیت باربری می‌شود. این افزایش ناشی از ایجاد محصوریت جانبی در مصالح ستون و کاهش پدیده خمره‌ای شدن است که به‌طور معمول منجر به گسیختگی جانبی ستون می‌شود. محصوریت ایجادشده توسط ژئوتکستایل موجب افزایش مقاومت برشی مصالح ستون و بهبود رفتار مکانیکی آن تحت بارگذاری می‌گردد.

افزایش طول ژئوتکستایل از حالت نیمه (پوشش جزئی ستون) به حالت کامل (پوشش تمام طول ستون) منجر به افزایش ظرفیت باربری در حدود ۱۴ درصد شده است. این افزایش نشان‌دهنده نقش مؤثر پوشش کامل در کنترل تغییرشکل‌های جانبی و توزیع یکنواخت‌تر تنش در ستون می‌باشد.

افزایش قطر ستون‌های سنگی از ۸۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر نیز باعث افزایش حدود ۸ درصدی در ظرفیت باربری شده است. این افزایش به دلیل افزایش سطح مقطع ستون و در نتیجه افزایش توان تحمل بارهای وارده است.

در ستون‌های مضاعف، پدیده خمره‌ای شدن به‌طور مؤثری محدود شده و تمرکز تغییرشکل‌ها بین لایه‌های افقی ژئوتکستایل مشاهده شده است. این رفتار نشان‌دهنده نقش لایه‌های افقی در کنترل گسیختگی موضعی و توزیع بهتر تنش در ارتفاع ستون می‌باشد.

بیشترین بهبود در ظرفیت باربری زمانی حاصل شده است که لایه‌های افقی ژئوتکستایل با فواصل کم در ارتفاع ستون قرار گرفته و ژئوتکستایل قائم به‌صورت پیوسته در تمام طول ستون استفاده شده است. این ترکیب موجب افزایش محصوریت، کاهش تغییرشکل‌های جانبی، و بهبود عملکرد کلی ستون سنگی در برابر بارگذاری می‌شود.

در مجموع، نتایج این مطالعه تأکید می‌کند که طراحی بهینه سیستم مسلح‌کننده در ستون‌های سنگی می‌تواند نقش کلیدی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست در خاک‌های نرم ایفا کند.

منابع

- [1] J. Castro, A. Cimentada, A. Costa, J. Canizal, and C. Sagaseta, "Consolidation and deformation around stone columns: Comparison of theoretical and laboratory results," *Computers and Geotechnics*, vol. 49, pp. 326–337, 2013. doi: 10.1016/j.compgeo.2012.11.006.
- [2] A. Adalier and A. Elgamal, "Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns," *Engineering Geology*, vol. 72, no. 3–4, pp. 275–291, 2004. doi: 10.1016/j.enggeo.2003.10.001.
- [3] J. Han and S. L. Ye, "Simplified method for consolidation rate of stone column reinforced foundation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, no. 7, pp. 597–603, 2001. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(597).

- [4] J. M. O. Hughes and N. J. Withers, "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns," *Ground Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 42–49, 1974.
- [5] E. M. Palmeira, G. L. S. Araujo, and N. R. Alkhorshid, "Large scale tests on geotextile encased stone columns," in *Proc. GeoAmericas*, Rio de Janeiro, Brazil, 2020.
- [6] N. Rahman, M. Rokonzaman, and A. Rahman, "Performance analysis of geotextile encased stone columns using a simplified analytical approach," *Scientific Reports*, vol. 16, Art. no. 4610, 2026. doi: 10.1038/s41598-025-34737-2.
- [7] J. R. Gniel and A. Bouazza, "Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 27, no. 3, pp. 167–175, 2009. doi: 10.1016/j.geotexmem.2008.11.001.
- [8] C. Zheng, X. Yu, H. Zhou, S. Wang, J. Zhao, and X. He, "Stability analysis of stone column supported and geosynthetic reinforced embankments on soft ground," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 48, no. 3, pp. 349–356, 2020. doi: 10.1016/j.geotexmem.2019.12.006.
- [9] S. S. Gowri Prasad, C. Vasavi, and K. Praveen Sai, "Behaviour of stone column in layered soils using geotextile reinforcement," *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 8, no. 8, pp. 453–462, 2017.
- [10] T. Ayadat, A. M. Hanna, and A. Hamitouche, "Soil improvement by internally reinforced stone columns," *Proceedings of the ICE – Ground Improvement*, vol. 161, no. 2, pp. 55–63, 2008. doi: 10.1680/grim.2008.161.2.55.
- [11] J. Han, *Principles and Practice of Ground Improvement*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2015.
- [12] P. G. Nicholson, *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [13] K. Kirsch and F. Kirsch, *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [14] W. Sondermann and W. Wehr, "Deep vibro techniques," in *Ground Improvement*, 3rd ed., K. Kirsch and A. Bell, Eds. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2012, pp. 17–55.
- [15] R. D. Barksdale and R. C. Bachus, *Design and Construction of Stone Columns*, Report No. FHWA/RD-83/026, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, 1983.
- [16] T. Foda, A. Abdelkader, and H. M. Ibrahim, "A review of soil stabilization using stone columns technique," *Delta University Scientific Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 39–50, 2023. doi: 10.21608/dusj.2023.291006