

اثر ترکیب ستون سنگی و شمع بر نشست و ارزیابی عوامل مؤثر بر ظرفیت باربری

علی پورکیانی^۱، محمدمحسن توفیق^۲، وحید توفیق^۳*

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، Alipourkiani@eng.uk.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، toufigh@uk.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران،

vahiddavis@gmail.com

چکیده

بهسازی خاک‌های سست و مسئله‌دار با استفاده از ستون‌های سنگی یکی از روش‌های رایج به ویژه برای کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری است. با این حال، در بارگذاری‌های سنگین یا خاک‌های بسیار نرم، ستون‌های سنگی به تنهایی ممکن است کارایی لازم را نداشته باشند. از طرفی، شمع‌ها ظرفیت باربری بالایی دارند اما فاقد قابلیت زهکشی بوده و در معرض خطر روانگرایی هستند. این پژوهش با هدف بررسی عددی عملکرد سیستم ترکیبی شمع و ستون سنگی به عنوان راهکاری بهینه برای رفع معایب هر یک از این دو روش به تنهایی، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS 3D انجام شده است. در مدل پی 10×10 m و بر روی خاک رسی نرم مدل‌سازی و نتایج سیستم ترکیبی با حالت‌های بدون بهسازی، بهسازی با ستون سنگی تنها و بهسازی با شمع تنها مقایسه گردید. همچنین، تاثیر پارامترهایی نظیر قطر، طول و فاصله ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری آن‌ها به صورت پارامتریک بررسی شد. نتایج نشان داد سیستم ترکیبی باعث کاهش قابل توجه نشست (تا حدود ۶۹٪ در پی گسترده) و افزایش ظرفیت باربری (تا حدود ۹۴٪ در پی گسترده) نسبت به حالت بدون بهسازی می‌شود. آرایش بهینه برای پی گسترده شامل نسبت ۲ به ۱ (ستون سنگی به شمع) است که بیشترین کاهش نشست را به همراه داشت، ترکیبی با تعداد بیشتر ستون سنگی. بررسی پارامتریک نیز نشان داد که قطر ستون سنگی، تاثیرگذارترین عامل بر افزایش ظرفیت باربری متناظر با نشست ۵۰ mm آن است.

کلمات کلیدی:

ستون سنگی، شمع، نشست، ظرفیت باربری، بهسازی ترکیبی بستر

۱- مقدمه

امروزه با افزایش نیاز به ساخت‌وساز و محدودیت زمین‌های مناسب، بهسازی خاک‌های سست و مسئله‌دار به یکی از چالش‌های اصلی مهندسی ژئوتکنیک تبدیل شده است. روش‌های مختلفی برای بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌ها مانند مقاومت برشی و ظرفیت باربری و کاهش نشست‌پذیری ارائه شده است. استفاده از المان‌های ستونی یکی از این راهکارهاست. ستون‌های سنگی، که از افزودن مصالح دانه‌ای متراکم به زمین تشکیل می‌شوند، از دهه ۱۹۵۰ میلادی به طور گسترده در اروپا و سپس در سایر نقاط جهان برای

بهسازی خاک‌های نرم به کار گرفته شده‌اند. این ستون‌ها علاوه بر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست، به دلیل نفوذپذیری بالا، سرعت تحکیم را افزایش داده و پتانسیل روانگرایی را کاهش می‌دهند آمبیلی و گاندی [۶] از سوی دیگر، شمع‌ها (Piles)، به‌ویژه شمع‌های بتنی، به‌عنوان المان‌های باربر قوی شناخته می‌شوند که بار سازه را به لایه‌های مقاوم‌تر عمیق منتقل می‌کنند. مطالعات متعددی بر روی عملکرد ستون‌های سنگی و شمع‌ها به‌صورت جداگانه انجام شده است هاگس و وایترس [۷] و [۸]، آمبیلی و گاندی [۶]، پرایب [۹] و بارکسدل و باجز [۱۶] پایدارسازی خاک رس نرم با استفاده از تکنیک ستون سنگی و با تمرکز بر مصالح پایدار می‌پردازد. مشکل اصلی خاک‌های رس نرم، تراکم‌پذیری بالا و ظرفیت باربری پایین آن‌هاست که می‌تواند منجر به مشکلاتی برای سازه‌های احداثی شود. تکنیک ستون سنگی به‌عنوان یک راه‌حل مؤثر برای بهبود این خصوصیات، کاهش احتمال روانگرایی و تسریع تحکیم شناخته شده است فودا^۱ و همکاران [۲]. بسیاری از محققان عملکرد ستون‌های سنگی زیر رادیه را بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش ضخامت رادیه، قطر ستون‌های سنگی و زاویه مقاومت برشی سنگ و کاهش فاصله در ستون‌های سنگی می‌تواند نشست و ظرفیت باربری را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. آنها همچنین استنباط کردند که طول ستون‌های سنگی تأثیر جزئی بر عملکرد سیستم‌های پی آنها دارد احمد و همکاران [۱] عنوان مثال، قضوی و افشار [۱۱]، افشار و قضوی [۱۲]، ناصیر و همکاران [۵]، نهاب و همکاران [۱۳] و سکتون و همکاران [۱۴] به طور مشابه، بسیاری از محققان سیستم‌های پی رادیه شمع‌کوبی شده را مطالعه کرده‌اند. ولی مطالعات سارویا و سلانکی [۴] برای ستون‌های سنگی محصور شده شناور انجام داده که در این زمینه که در محیط‌های ریزدانه و خاک نرم اتفاق افتاده تایید عملکرد ژئوسنتتیک‌ها به خوبی در دو شرایط حضور و عدم حضور آنها در حالت ستون‌های سنگی شناور زیر فونداسیون بررسی گردید و مسئله جدیدی تحت عنوان صلبیت انتهایی ستون سنگی در جهت داشتن بازدهی بالا مطرح شد که در صورت وجود یک ستون سنگی شناور می‌بایست انتهای آن به صورت گیردار مدل شود. علی‌رغم مزایای ستون‌های سنگی، این روش در خاک‌های بسیار نرم (با مقاومت زهکشی نشده کمتر از ۱۵ kPa) به دلیل عدم تامین محصورشدگی جانبی کافی، دچار کمانش جانبی (Bulging) شده و کارایی خود را از دست می‌دهند کیخسرو و همکاران [۱۹]. همچنین در بارهای سنگین، ظرفیت باربری آن‌ها ممکن است کافی نباشد. شمع‌ها نیز با وجود ظرفیت باربری بالا، فاقد قابلیت زهکشی هستند و در خاک‌های مستعد روانگرایی، مقاومت خود را حین زلزله از دست می‌دهند. در سال‌های اخیر، تمرکز پژوهش‌ها بر روی سیستم‌های بهسازی ترکیبی به منظور غلبه بر محدودیت‌های تک المانه افزایش یافته است. به طوری که ژانگ و همکاران [۲۱] در مطالعات خود تأکید کردند که ترکیب المان‌های صلب (شمع) و انعطاف‌پذیر (ستون سنگی)، یک سیستم انتقال بار بهینه در خاک‌های رسی ایجاد می‌کند که بالاتر از ظرفیت هر یک از این المان‌ها به تنهایی است. بنابراین، نیاز به روشی که بتواند مزایای هر دو سیستم را ترکیب کرده و معایب آن‌ها را پوشش دهد، احساس می‌شود، تحقیقات در زمینه سیستم ترکیبی شمع و ستون سنگی به صورت خیلی محدود انجام شده. نکته قابل توجه این است که تحقیقات بسیار محدودی در زمینه استفاده همزمان از ستون‌های سنگی و شمع‌ها به عنوان یک سیستم پی مرکب (Composite) در زیر پی‌های گسترده در خاک‌های تراکم‌پذیر انجام شده است منوجیت و بومیک [۱۵]. عملکرد چنین سیستم ترکیبی‌ای را در خاک‌های نرم بررسی کردند و دریافتند که تغییر در پارامترهایی مانند طول، فاصله، زاویه مقاومت برشی مصالح ستون، نسبت جایگزینی سطح، قطر عناصر و ضخامت پی، بر نحوه توزیع بار بین ستون‌ها و شمع‌ها تأثیر می‌گذارد. آنها همچنین بر لزوم انجام مطالعات پارامتریک دقیق برای بهینه‌سازی پیکربندی و طراحی بهینه از منظر مهندسی این سیستم در خاک‌های نرم تأکید کردند احمد و همکاران [۱]. در این تحقیق، برای غلبه بر محدودیت‌های ذکر شده، استفاده از یک سیستم فونداسیون ترکیبی شامل شمع و ستون سنگی به‌صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته است.

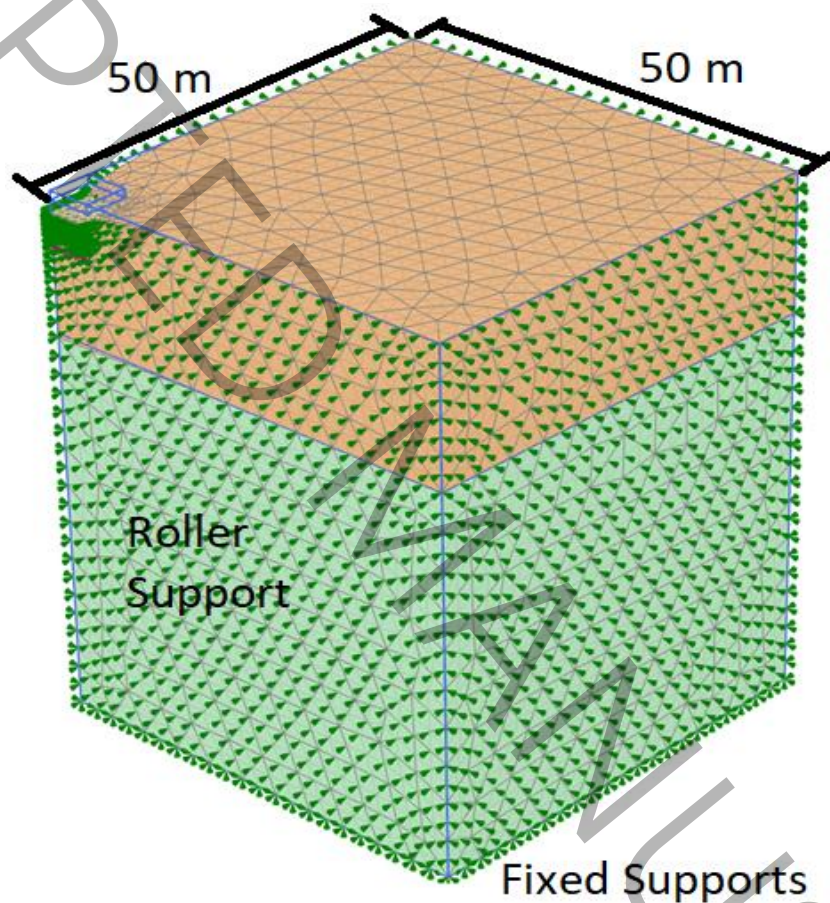
ایده اصلی این است که ستون‌های سنگی نشست را کنترل کرده و زهکشی را بهبود بخشند، در حالی که شمع‌ها ظرفیت باربری لازم را تامین کنند. این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS 3D به ارزیابی عملکرد این سیستم ترکیبی پرداخته است. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی عددی کارایی سیستم ترکیبی شمع-ستون سنگی در کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری پی گسترده بر روی خاک رس نرم، مقایسه عملکرد سیستم ترکیبی با سیستم‌های بهسازی شده فقط با شمع یا فقط با ستون سنگی و حالت بهسازی نشده، تعیین آرایش بهینه (نسبت تعداد شمع به ستون سنگی) برای سیستم ترکیبی در پی گسترده، بررسی پارامتریک تأثیر قطر، طول و فاصله ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری آن‌ها، بررسی دقیق عملکرد ژئوتکنیکی سیستم پی ترکیبی (ستون سنگی و شمع) زیر پی گسترده صلب در خاک تراکم‌پذیر است. سازوکار گسیختگی این سیستم تحت بارگذاری یکنواخت و تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین، تلاش می‌شود تا پیکربندی‌های بهینه از نظر ظرفیت باربری شناسایی شده و یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی این سیستم ارائه و اعتبارسنجی گردد. نوآوری اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی سیستم ترکیبی "شمع و ستون سنگی" به عنوان یک راهکار دوگانه جهت غلبه بر نقاط ضعف هر یک از این روش‌ها به تنهایی است. در حالی که شمع‌ها صلبیت بالایی ایجاد می‌کنند و ستون‌های سنگی نقش موثری در تسریع تحکیم و زهکشی دارند، اندرکنش همزمان این دو المان در خاک‌های بسیار سست به ندرت مورد بررسی عددی دقیق قرار گرفته است. در این تحقیق، با تمرکز بر توزیع بار بین المان‌های صلب و انعطاف‌پذیر، آرایش بهینه جهت دستیابی به کمترین نشست و بیشترین کارایی فنی ارائه شده است که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری در پروژه‌های بهسازی زمین قرار گیرد.

۲- مدل‌سازی عددی

اعتقاد بر این است که سیستم‌های پی ترکیبی (یعنی ستون‌های سنگی ترکیب شده با شمع‌ها زیر رادیه صلب) جذاب‌ترین راه‌حل برای بهینه‌سازی هزینه و عملکرد پی‌ها در خاک‌های نرم هستند. برای بررسی عملکرد ژئوتکنیکی این موارد، مدل‌سازی و تحلیل عددی با استفاده از Plaxis 3D، یک برنامه نرم‌افزاری سه‌بعدی اجزای محدود، انجام شد احمد و همکاران [۱]. هندسه مدل سه‌بعدی بر اساس آزمایش‌هایی برای جلوگیری از محصورشدگی تنش افقی و قائم انتخاب شد. اندازه کلی مدل سه‌بعدی $100 \times 100 \times 60$ m بود. برای شرایط مرزی مدل سه‌بعدی، یک تکیه‌گاه ثابت در پایین در نظر گرفته شد و فرض شد که تکیه‌گاه‌های غلتکی در مرزهای قائم قرار دارند، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. یک بار توزیع شده یکنواخت از رادیه صلب 10×10 m بر روی سطح اعمال شد (شکل ۱). در این پژوهش، چیدمان المان‌های بهسازی (شمع و ستون سنگی) به صورت الگوی مربعی انتخاب شده است. این نوع چیدمان به دلیل ایجاد تقارن کامل در توزیع بار و پوشش یکنواخت ناحیه زیر پی، به عنوان یکی از رایج‌ترین الگوهای اجرایی در پروژه‌های ژئوتکنیکی شناخته می‌شود. انتخاب این الگو در مدل عددی، علاوه بر ساده‌سازی محاسبات و امکان استفاده از صفحات تقارن جهت بهینه‌سازی زمان حل، باعث می‌شود تا اندرکنش بین المان‌ها و خاک پیرامون به صورت همگن در تمام جهات مدل‌سازی شود. همچنین ابعاد محیط خاک (100×100 m) به گونه‌ای در نظر گرفته شده که مرزهای مدل در فاصله ۱۰ برابر عرض پی (10B) قرار گیرند تا حباب تنش بدون تداخل با مرزها، به طور طبیعی مستهلک گردد. اندازه مش نقش مهمی در هر مدل‌سازی اجزای محدود ایفا می‌کند. استفاده از مش ریز می‌تواند نتایجی بسیار نزدیک به رفتار واقعی مدل ارائه دهد، اما

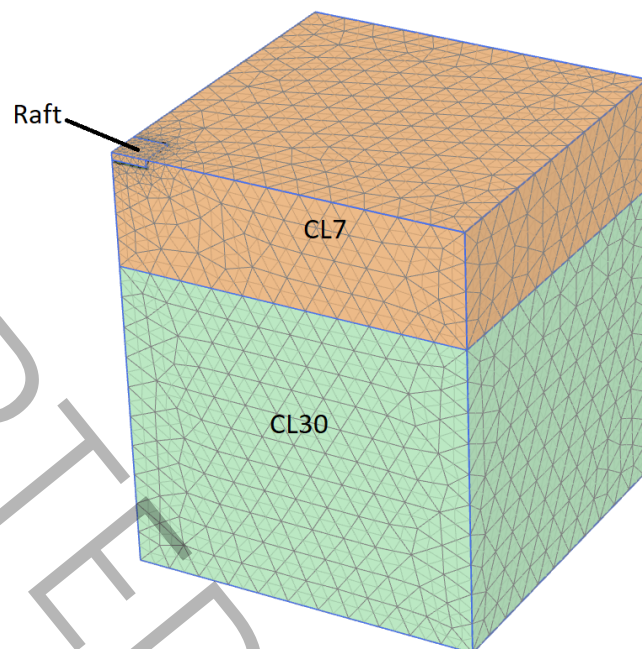
می‌تواند زمان بیشتری برای تحلیل مصرف کند و بالعکس. در مطالعه حاضر، جهت مدل‌سازی دقیق اندرکنش بین المان‌های صلب (شمع و پی) و محیط خاک، از المان‌های فصل مشترک (Interface) استفاده شده است. ضریب کاهش مقاومت فصل مشترک (Rinter) برابر با 0.67 در نظر گرفته شد و برای ستون سنگی ۱ در نظر گرفته شده است به علت انتقال کامل تنش برشی بین ستون سنگی و خاک نرم. این مقدار بر اساس توصیه‌های فنی نرم‌افزار PLAXIS برای شمع‌های بتنی در خاک‌های رسی انتخاب شده و نشان‌دهنده این است که مقاومت برشی در سطح تماس خاک و سازه، حدود 67 درصد مقاومت برشی خاک پیرامونی است. جهت اطمینان از استقلال نتایج از ابعاد شبکه‌بندی، تحلیل حساسیت مش بر روی مدل انجام گرفت. سه نوع شبکه‌بندی در سطوح متوسط (Medium)، ریز (Fine) و بسیار ریز (Very Fine) بررسی شد. با توجه به اینکه اختلاف نتایج نشست در حالت Very Fine کمتر از 2 درصد بود، جهت بهینه‌سازی زمان محاسبات، شبکه‌بندی Fine برای تحلیل‌ها انتخاب گردید. همچنین ابعاد مدل (10×10 m) به گونه‌ای انتخاب شده است که مرزهای جانبی در فاصله‌ای بیش از 5 برابر قطر پی قرار گیرند؛ این امر موجب می‌گردد تا اثرات مرزی بر توزیع تنش و کرنش در زیر پی خنثی شده و نتایج از دقت کافی برخوردار باشند، شبکه‌بندی با المان‌های 15 گرهی و با اندازه متوسط انجام گرفت و مراحل تحلیل شامل فاز اولیه (تنش‌های درجا)، حفاری، نصب المان‌های بهسازی، نصب پی و اعمال بارگذاری (به صورت نشست کنترل شده 5 cm یا بارگذاری تا گسیختگی) بود، انتخاب مدل رفتاری و خواص مصالح نقش کلیدی در دقت شبیه‌سازی دارد. Plaxis 3D. مدل‌های رفتاری متنوعی برای المان‌های مختلف ژئوتکنیکی ارائه می‌دهد. در این پژوهش، برای مدل‌سازی تمام لایه‌های خاک برای مدل‌سازی رفتار خاک رس نرم و مصالح ستون سنگی از مدل رفتاری موهر-کولمب (Mohr-Coulomb) استفاده شد. این مدل یک مدل الاستوپلاستیک رایج است که پارامترهای اصلی مقاومت برشی خاک، چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و سختی مدول یانگ (E) و ضریب پواسون (v) را در نظر می‌گیرد. انتخاب این مدل به دلیل سادگی نسبی، در دسترس بودن پارامترهای ورودی آن از آزمایش‌های متداول خاک، و توانایی قابل قبول آن در شبیه‌سازی رفتار حدی (گسیختگی) خاک‌های رسی و مصالح دانه‌ای در بسیاری از مسائل عملی ژئوتکنیک، صورت گرفت (PLAXIS 3D Material Models Manual). اگرچه مدل‌های پیشرفته‌تری مانند مدل خاک سخت‌شونده (Hardening Soil) وجود دارند که رفتار غیرخطی تنش-کرنش قبل از گسیختگی را بهتر مدل می‌کنند، اما با توجه به اهداف این تحقیق که عمدتاً بر روی ظرفیت باربری نهایی و مقایسه کلی رفتار سیستم‌ها متمرکز بود، مدل موهر-کولمب کافی و مناسب تشخیص داده شد. برای شمع و پی بتنی از مدل الاستیک خطی (Linear Elastic) استفاده گردید. با توجه به لزوم بررسی رفتار کوتاه‌مدت خاک رس در زمان بارگذاری، از رویکرد Undrained A در نرم‌افزار PLAXIS 3D استفاده شده است. این رویکرد اجازه می‌دهد تا با استفاده از پارامترهای مقاومت مؤثر (c' و ϕ')، فشار آب حفره‌ای مازاد (Excess Pore Water Pressure) به دقت محاسبه شده و تغییرات مقاومت برشی خاک در طول فرآیند بارگذاری مدل‌سازی گردد. شمع‌ها با استفاده از گزینه شمع مدفون، که به عنوان یک مدل المان تیری عمل می‌کند، مدل‌سازی شدند. شمع‌های مدفون را می‌توان در خاک در هر جهت دلخواه مدل‌سازی کرد که با المان‌های خاک با استفاده از المان‌های فصل مشترک ویژه مقاومت پوستی و مقاومت نوک متصل شده و اندرکنش دارد. با توجه به تقارن کامل هندسه شالوده، آرایش المان‌های بهسازی و همچنین اعمال بارگذاری قائم و یکنواخت، جهت کاهش حجم محاسبات و بهینه‌سازی زمان حل، تنها یک‌چهارم از کل مدل شبیه‌سازی گردید. برای این منظور، در صفحات تقارن از تکیه‌گاه‌های غلتکی (تقیید در راستای عمود بر صفحه) استفاده شده است تا رفتار مدل یک چهارم کاملاً منطبق بر مدل کامل باشد. پارامترهای مورد نیاز برای مدل شمع مدفون همان پارامترهای مورد نیاز برای المان‌های تیر الاستیک خطی هستند. شایان ذکر است که مدل الاستیک-کاملاً پلاستیک موهر-

کولمب در مطالعه حاضر به کار گرفته شد زیرا برای حالت تعادل حدی، که هنگام توسعه مدل تحلیلی اتخاذ می‌شود، مناسب است. علاوه بر این، چندین تحلیل عددی گزارش شده در ادبیات که از مدل موهر-کولمب استفاده کرده‌اند، با مدل سازی فیزیکی یا داده‌های تجربی تطابق خوبی داشته‌اند احمد و همکاران [۱]. به عنوان مثال، سمگانی و نادری [۱۰] و اتزاد و همکاران [۱۷]. ویژگی‌های مصالح اجزای مختلف سیستم پی (یعنی خاک نرم، ستون‌های سنگی، شمع‌ها و رادیه صلب) مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ خلاصه شده است اجزای مختلف مدل مورد مطالعه در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند.



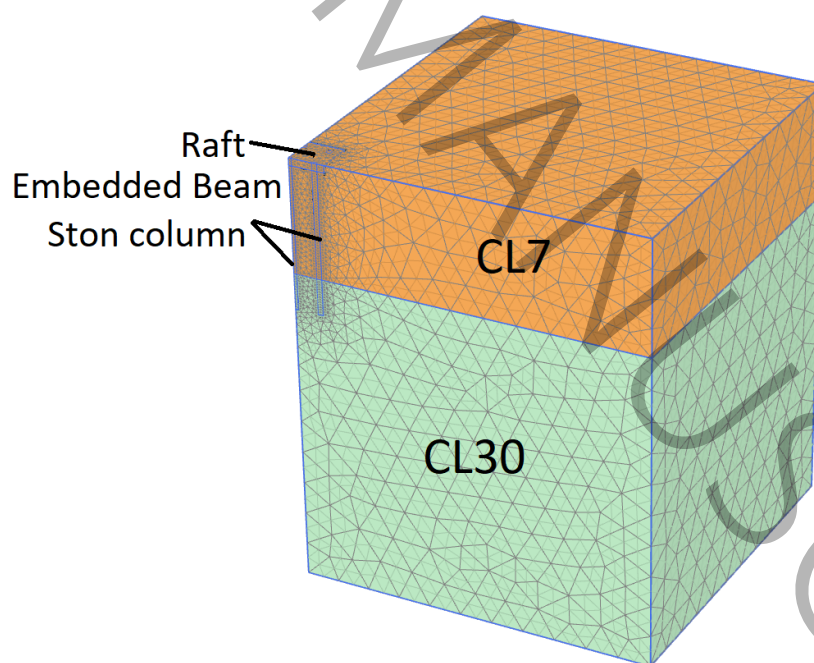
شکل ۱. مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار PLAXIS 3D با شرایط مرزی

Fig. 1. Plaxis 3D model with boundary conditions



شکل ۲. شبکه‌بندی کلی مدل

Fig. 2. Model's overall meshing



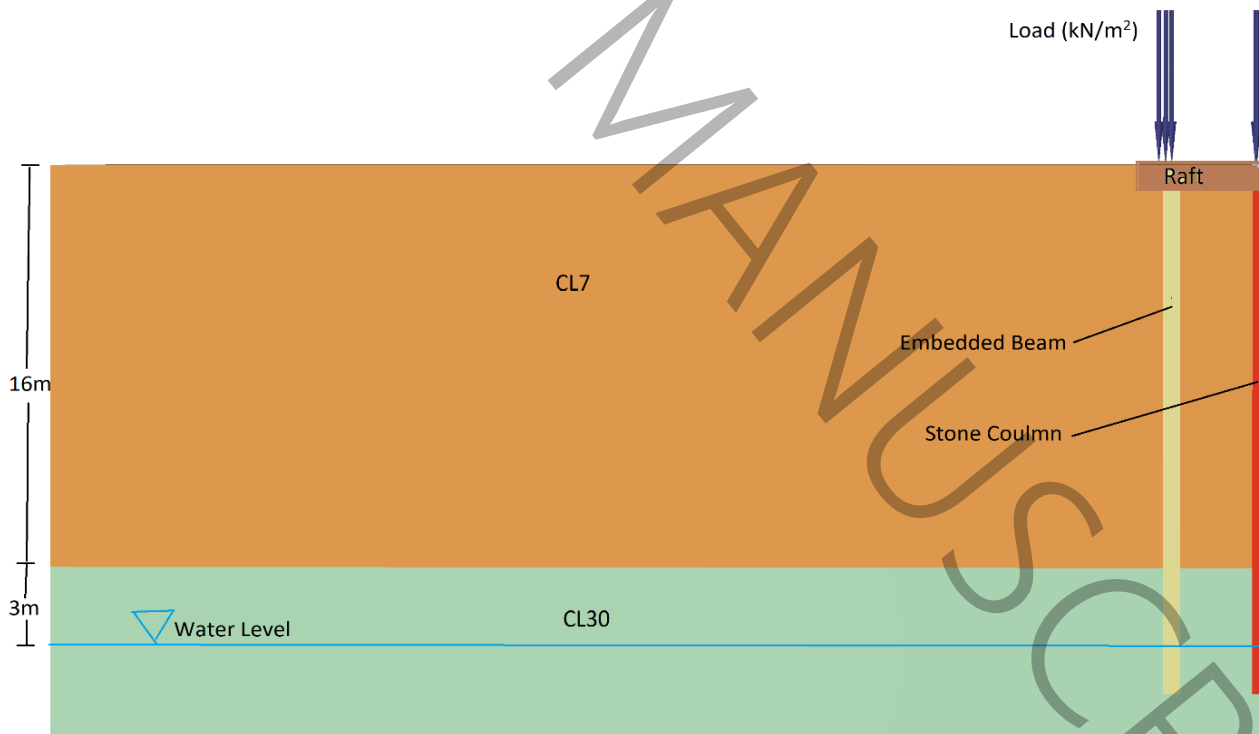
شکل ۳. شبکه‌بندی دقیق مدل

Fig. 3. Model's refined meshing

جدول ۱. خواص مصالح ستون سنگی، شمع و پی صلب

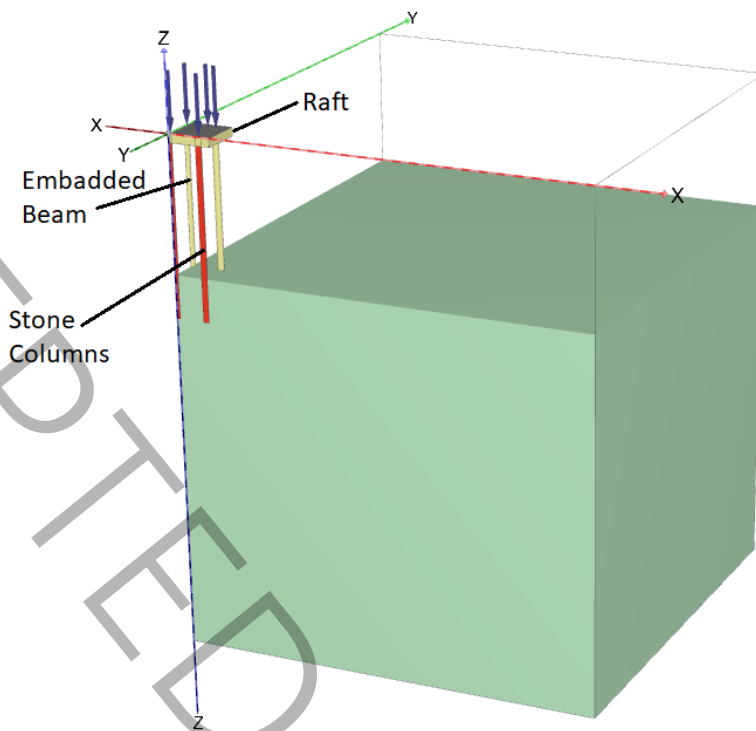
Table 1. Material properties for the stone column, piles, and rigid raft

پایه	شمع	ستون سنگی	CL30	CL7	واحد	نماد	پارامتر
-	-	۱۶	۱۵/۵۶	۱۳/۳۶	kN/m3	γ	وزن مخصوص
۲۳/۵×۱۰ ^۳	۲۳/۵×۱۰ ^۳	۵۵	۵/۵	۲/۱۵	MPa	Es	مدول یانگ
-	-	Drained	Undrained	Undrained	-	D_T	نوع زهکشی
۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۳	۰/۳۳	۰/۳۳	-	v'	ضریب پواسون
-	-	۴۳	۲۷	۲۷	درجه	ϕ'	زاویه اصطکاک موثر
-	-	۲۳	۳۰	۷	kN/m2	c'	چسبندگی موثر
-	۰/۷	۰/۵, ۰/۷, ۰/۹	-	-	m	D	قطر
-	۲۰	۱۰, ۱۵, ۲۰	-	-	m	L	طول
-	۳/۶۵	۳/۱۵, ۳/۶۵, ۴/۱۵	-	-	m	d	فاصله



شکل ۴. اجزای مختلف مدل در نماهای دوبعدی

Fig. 4. Different components of the model (in 2D)

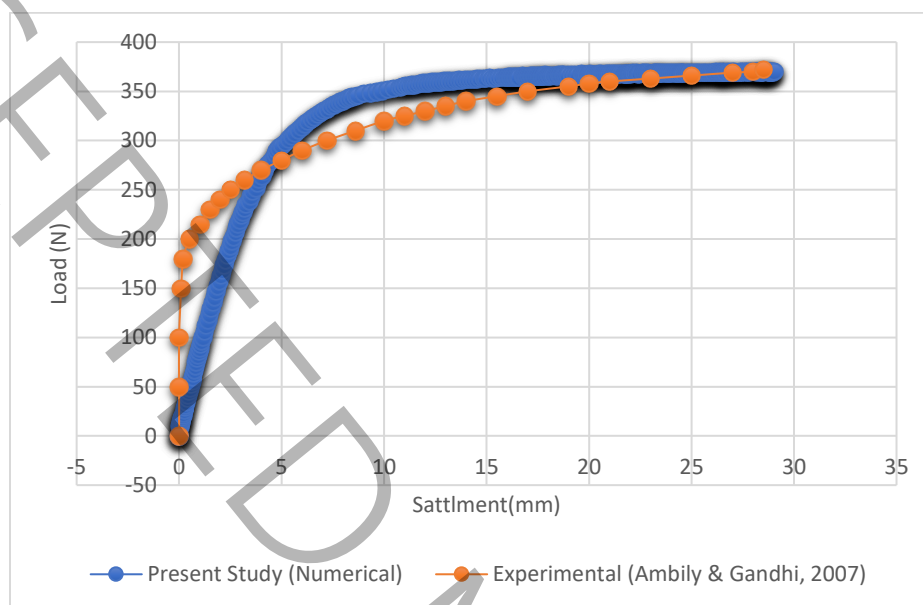


شکل ۵. اجزای مختلف مدل در نماهای سه بعدی

Fig. 5. Different components of the model (in 3D)

در این پژوهش از نرم افزار اجزای محدود PLAXIS 3D برای مدل سازی و تحلیل رفتار سیستم خاک-فونداسیون-بهسازی استفاده شد. این نرم افزار به دلیل قابلیت های پیشرفته در مدل سازی مسائل پیچیده ژئوتکنیکی، از جمله اندرکنش خاک و سازه، رفتار غیرخطی خاک، شرایط مرزی مختلف، و تحلیل های سه بعدی که برای درک دقیق تر توزیع تنش و تغییر شکل در اطراف المان های بهسازی ضروری است، انتخاب گردید. PLAXIS 3D امکان مدل سازی دقیق هندسه ستون های سنگی و سمع ها، پی، لایه های خاک و همچنین تعریف مراحل ساخت و بارگذاری واقعی (مانند حفاری، نصب المان ها، اعمال بار) را فراهم می کند. خروجی های گرافیکی و عددی قدرتمند این نرم افزار امکان تحلیل جامع نتایج را می دهد. جهت صحت سنجی مدل عددی، از نتایج آزمایشگاهی و عددی آمبیلی و گاندهی [۶] استفاده شد. مدل سازی منطبق بر شرایط تک ستون سنگی در خاک رس نرم با مشخصات هندسی ستونی به قطر ۱۰۰ mm و ارتفاع ۴۵۰ mm انجام گردید. شرایط مرزی و پارامترهای مصالح (شامل مدول الاستیسیته و مقاومت برشی زهکشی نشده) دقیقاً مطابق با مقادیر گزارش شده در مقاله مذکور تنظیم شد. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، منحنی بار-نشست حاصل از شبیه سازی فعلی تطابق بسیار بالایی با نتایج آزمایشگاهی مرجع دارد. بیشینه اختلاف در ظرفیت باربری نهایی کمتر از ۴/۲٪ است که نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش بینی رفتار سیستم می باشد، برای این صحت سنجی، مقاومت برشی زهکشی نشده خاک رس مطابق با داده مقاله آمبیلی و گاندهی [۶] ۷ kPa فرض شده است. همانطور که قبلاً بحث شد، مطالعات بسیار کمی عملکرد سیستم پی ترکیبی را در خاک های نرم بررسی کرده اند. احمد و همکاران [۱] تأیید اعتبار مدل ها برای ستون های سنگی به

تنهایی و برای رادیه شمع کوبی شده نشان می‌دهد که منطقی است باور بر این است که مدل حاضر در صورت اعمال بر روی یک سیستم پی ترکیبی، اعتبار خواهد داشت.



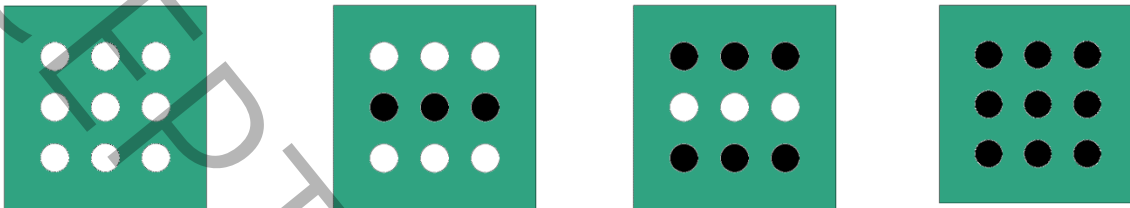
شکل ۶. مقایسه نمودار بار-نشست آزمایش آمبیلی و گاندهی با نتایج این تحقیق

Fig. 6. Comparison of the load-settlement curve from the experiment by Ambily and Gandhi with the curve obtained from this research

۳- راستی آزمایی

در فونداسیون، گسترده 10×10 m بر روی لایه‌های خاک رس نرم (CL7) و (CL30) مدل‌سازی شدند (مشخصات مصالح در جدول ۱) مدل‌سازی به صورت سه بعدی و با بهره‌گیری از تقارن، یک چهارم مدل ترسیم شد. برای حالت‌های بهسازی شده، شمع‌ها و ستون‌های سنگی با مشخصات هندسی معین قطر 0.7 m و طول 20 m برای پی 10×10 m در آرایش‌های مختلف زیر پی مدل شدند. خاک نرم بهسازی شده فقط با ستون‌های سنگی با نتیجه احمد و همکاران [۱] مقایسه شد که مشخص شد می‌توان به نتایج استناد کرد.

● شمع : ○ ستون سنگی :

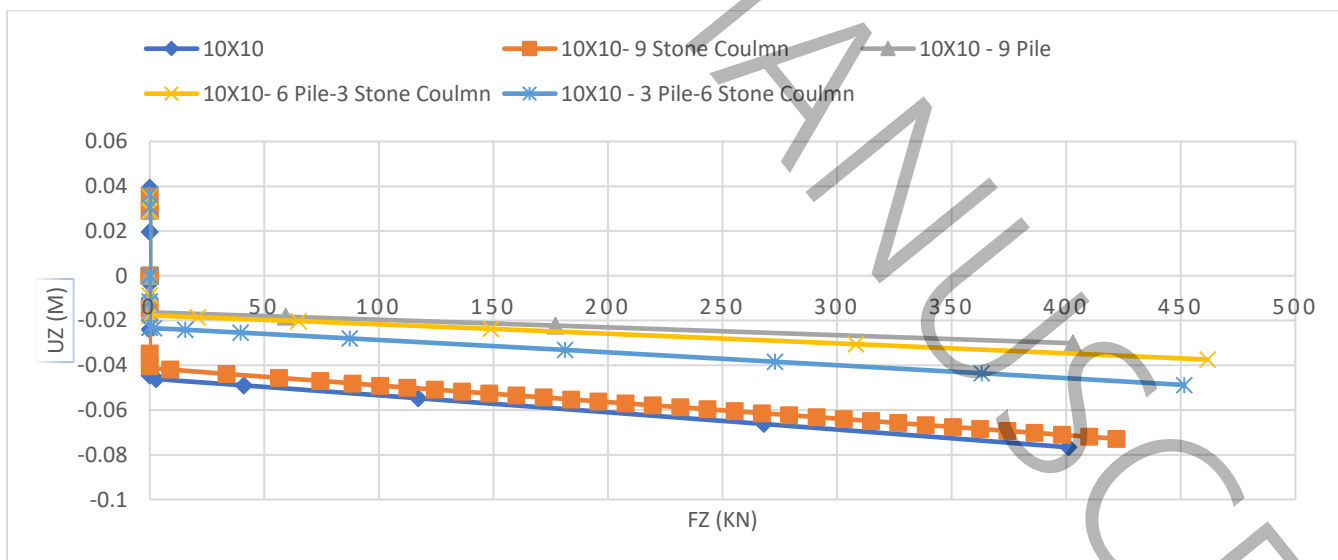


شکل ۷. بهسازی با شمع و ستون سنگی به تنهایی و ترکیب شمع و ستون سنگی در پی‌های 10×10 در چهار حالت مختلف

Fig. 7. Improvement with piles and stone columns alone and combined in 10×10 m foundations in four different arrangements

آرایش‌های ترکیبی شامل نسبت‌های مختلف شمع به ستون سنگی بودند (مثلاً ۶ شمع و ۳ ستون، ۳ شمع و ۶ ستون برای پی 10×10).

نتایج اصلی به صورت نمودارهای بار-نشست برای تمامی حالت‌های مدل شده استخراج گردید

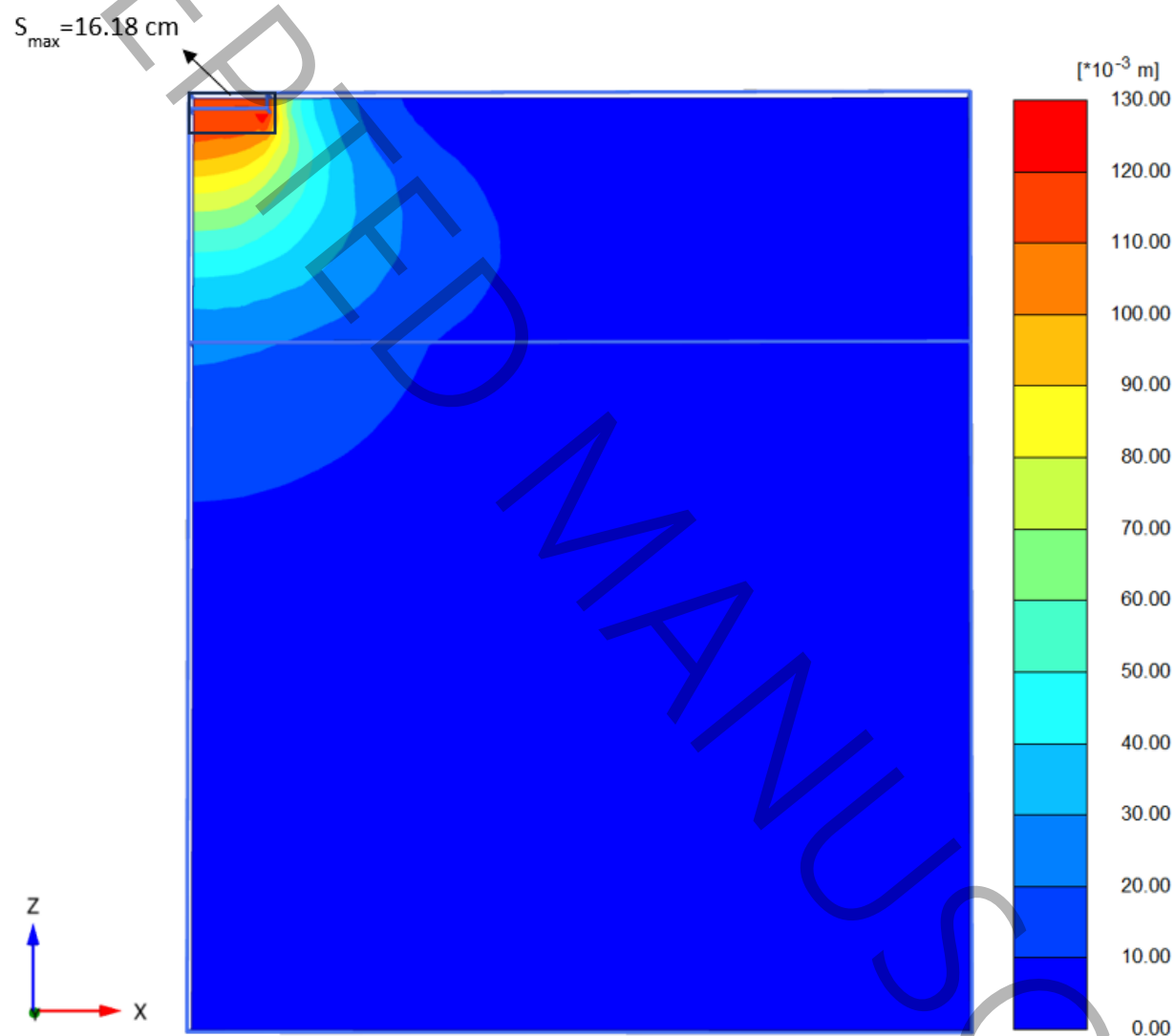


شکل ۸. نمودار بار نشست فونداسیون در حالت های تقویت نشده و تقویت شده شمع، ستون سنگی و ترکیبی

Fig. 8. Load-settlement curve of the foundation in unreinforced and reinforced states with piles, stone columns, and combined

در این مدل، فونداسیون ابتدا بدون وارد کردن هیچ نیرویی تحت وزن خود مقداری نشست انجام داده است. تعداد بیش‌تر ستون سنگی اثر مطلوب تری در کاهش نشست دارد و از طرفی وجود شمع برای دستیابی به ظرفیت باربری بیش‌تر ضروری است از این رو در اینجا حالتی که نسبت تعداد ستون سنگی به شمع ۲ به ۱ است می‌تواند به عنوان حالت بهینه استفاده شود. در این حالت نسبت به حالت بدون تقویت ۹۴٪ افزایش در ظرفیت باربری و ۶۹٪ کاهش در نشست را دارد.

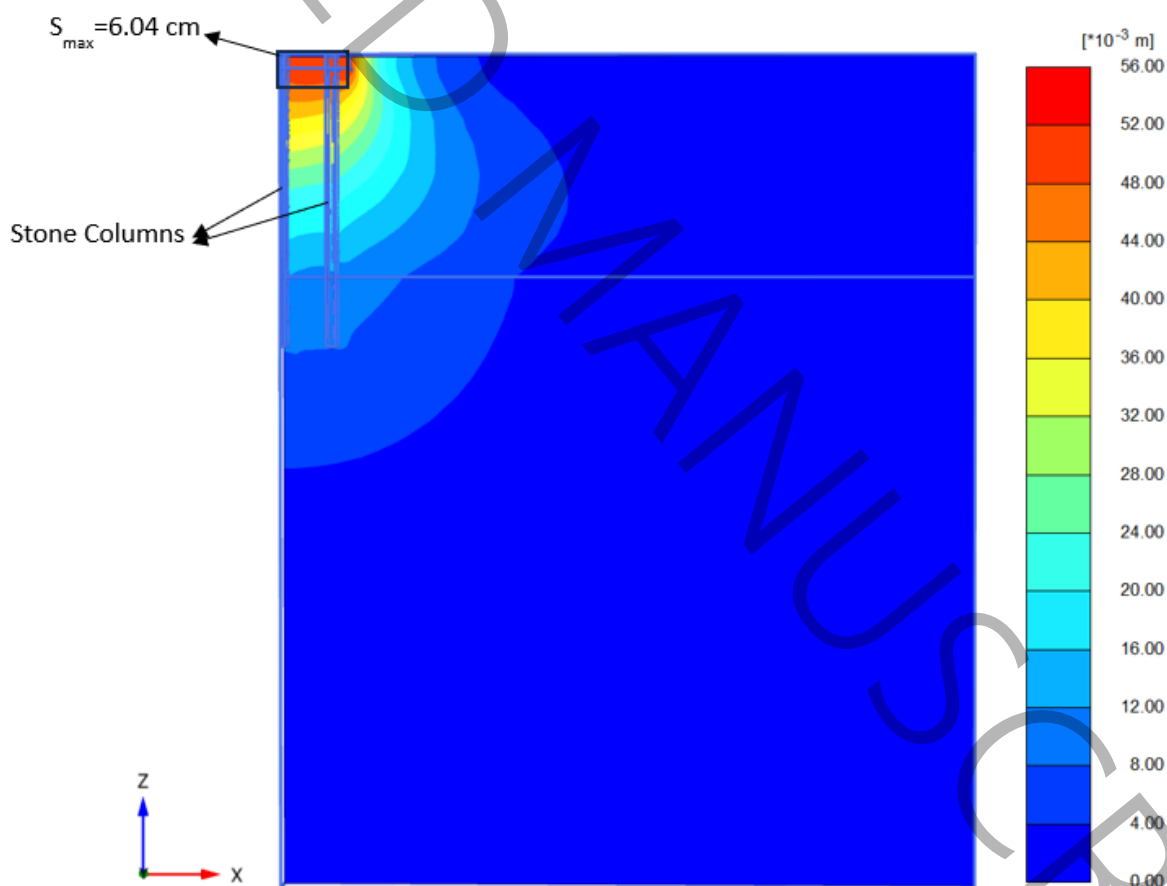
ظرفیت باربری در نشست مجاز (۵ سانتی‌متر) و ظرفیت باربری نهایی (در صورت وقوع گسیختگی) تعیین و مقایسه شد. همچنین کانتورهای تغییر شکل و تنش برای درک بهتر سازوکار رفتار سیستم بررسی شد.



شکل ۹. خروجی گرافیکی نرم افزار فونداسیون ۱۰×۱۰ بدون تقویت

Fig. 9. Graphical output of the software for a 10x10m foundation without improvement

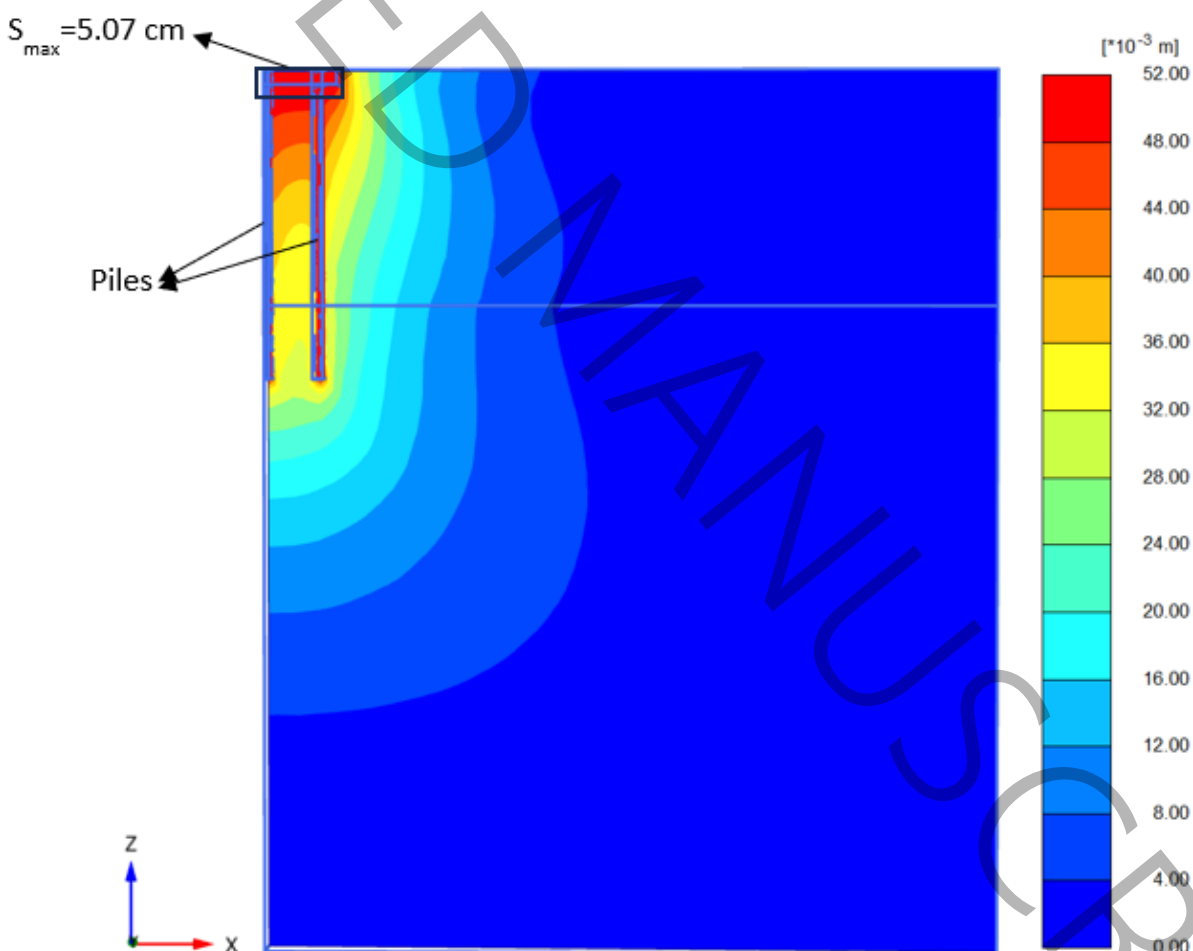
این تصویر نشان می‌دهد که خاک طبیعی (بدون ستون سنگی یا شمع) تحت بارگذاری چگونه رفتار می‌کند. این بزرگی جابجایی در هر نقطه از مدل است. برای یک پی که تحت بار قائم قرار می‌گیرد، در گوشه بالا سمت چپ پی (فونداسیون) 10×10 می‌باشد که بار روی آن اعمال شده است، هرچه از رنگ قرمز به سمت آبی تیره برویم جابجایی کاهش پیدا می‌کند و رنگ قرمز، نارنجی و زرد دقیقاً زیر پی و در عمق کم متمرکز شده‌اند و یک "حاباب" یا "پیاز" تغییر شکل را تشکیل می‌دهند، رنگ‌های سبز، آبی، روشن نشان‌دهنده جابجایی‌های متوسط هستند که با فاصله گرفتن از پی، کاهش می‌یابند. رنگ آبی تیره نشان‌دهنده کمترین جابجایی یا جابجایی نزدیک به صفر است. این بخش‌ها از خاک، دور از تأثیر مستقیم بارگذاری پی هستند. الگوی کلی الگوی جابجایی، یک الگوی کلاسیک برای نشست خاک زیر یک پی سطحی است. حداکثر نشست در زیر پی رخ می‌دهد و با افزایش عمق و فاصله افقی از پی، مقدار آن کاهش می‌یابد. مقدار بیشینه جابجایی کل $16/18$ cm است. عمق تأثیر حباب جابجایی نشان می‌دهد که بار پی تا چه عمقی در خاک تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. این می‌تواند در تعیین طول مؤثر المان‌های بهسازی (ستون سنگی یا شمع) راهنما باشد. اگر طول المان‌ها از این عمق تأثیر کمتر باشد، ممکن است نتوانند به طور کامل از پتانسیل خود برای کاهش نشست استفاده کنند.



شکل ۱۰. خروجی گرافیکی نرم افزار فونداسیون 10×10 با ۹ ستون سنگی تقویت شده

Fig. 10. Graphical output of the software for a 10×10 foundation reinforced with 9 stone columns

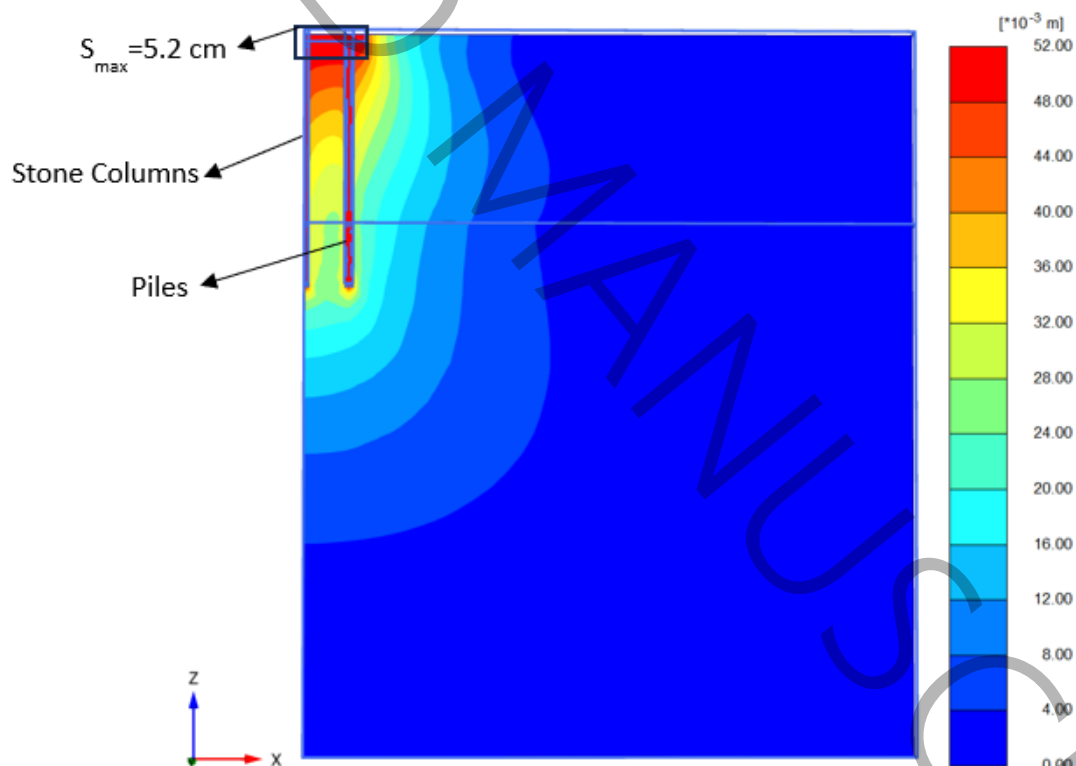
مهم‌ترین تفاوت با تصویر قبلی وجود المان‌های عمودی در زیر پی است. این المان‌ها به ستون‌های سنگی هستند که با آرایش ۳×۳ قرار داده شده‌اند که در مجموع ۹ ستون سنگی می‌باشد (طبق شکل ۷) الگوی کلی توزیع رنگ‌ها مشابه تصویر قبلی است: رنگ‌های قرمز، نارنجی، زرد نشان‌دهنده بیشترین جابجایی‌ها در زیر پی هستند و با دور شدن از پی، به رنگ آبی تغییر می‌کنند. حباب جابجایی (settlement bulb) نسبت به تصویر قبلی (خاک خالی) جمع و جورتر شده و عمق نفوذ آن کمتر است. این نشان می‌دهد که ستون‌های سنگی توانسته‌اند بار را بهتر توزیع کرده و از گسترش بیش از حد جابجایی‌ها در عمق و در جهت افقی جلوگیری کنند. همچنین، جابجایی در خود ستون‌های سنگی نیز دیده می‌شود که نشان‌دهنده مشارکت آن‌ها در تحمل بار و تغییر شکل است. مقدار بیشینه جابجایی کل ۶/۰۴ cm کاهش نشست وجود ۹ ستون سنگی باعث کاهش بسیار قابل توجهی در نشست بیشینه شده است. توزیع جابجایی همانطور که اشاره شد، حباب جابجایی جمع و جورتر شده است. این یعنی ستون‌های سنگی باعث شده‌اند که خاک زیر پی به صورت یک مجموعه مرکب (خاک + ستون) با سختی بیشتر عمل کند و بار را به لایه‌های عمیق‌تر و مقاوم‌تر منتقل کند یا تنش‌ها را در سطح وسیع‌تری پخش نماید، که منجر به کاهش نشست کلی می‌شود.



شکل ۱۱. خروجی گرافیکی نرم افزار فونداسیون ۱۰×۱۰ با ۹ شمع تقویت شده

Fig. 11. Graphical output of the software for a 10x10m foundation reinforced with 9 piles

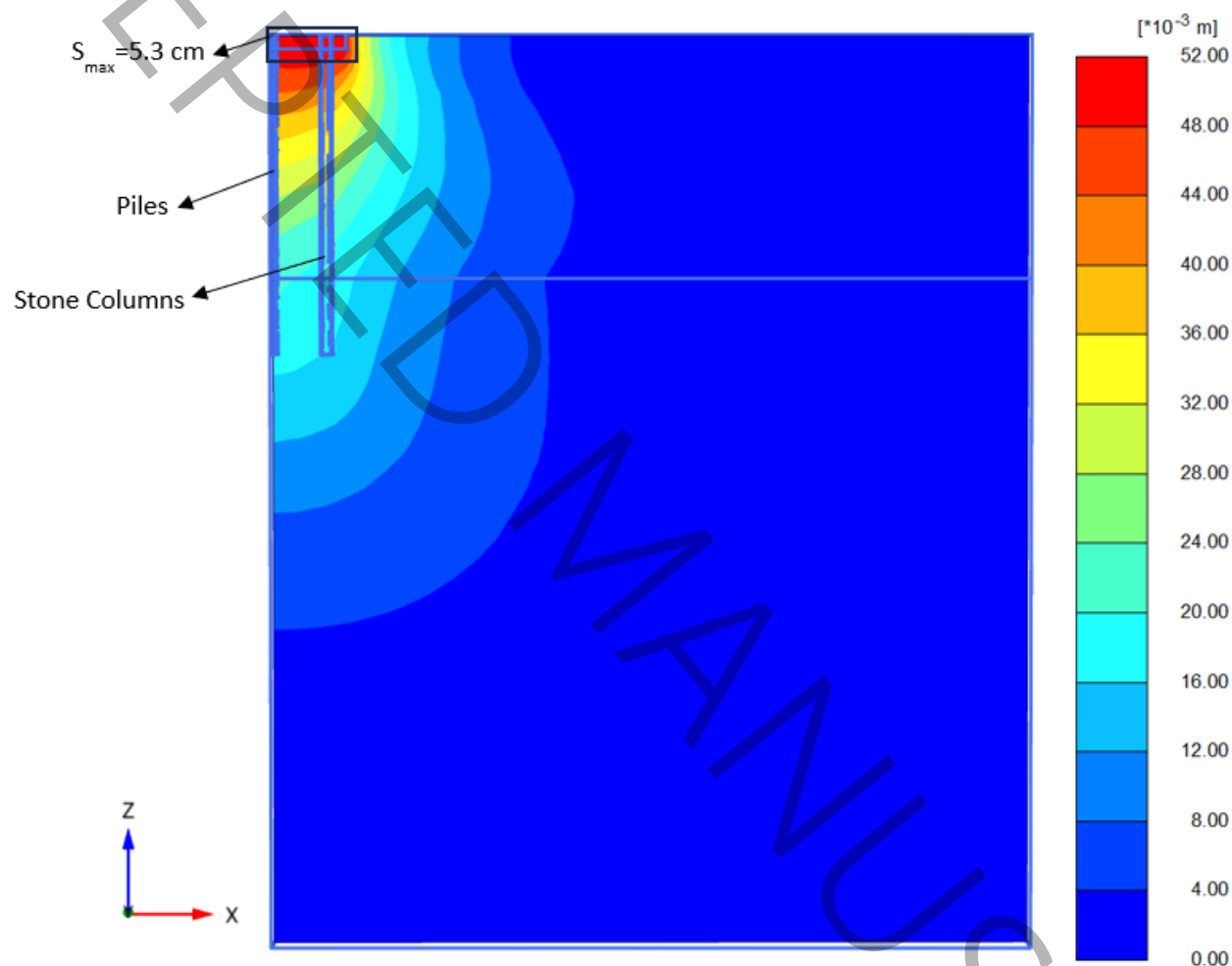
همانند تصویر شکل ۱۰، المان‌های عمودی در زیر پی دیده می‌شوند که این بار نشان‌دهنده شمع‌ها هستند، الگوی کلی توزیع رنگ‌ها مشابه دو تصویر قبلی است: بیشترین جابجایی رنگ‌های قرمز، نارنجی، زرد در زیر پی و در امتداد شمع‌ها متمرکز شده و با فاصله گرفتن، کاهش می‌یابد. ناحیه با جابجایی زیاد (رنگ‌های قرمز و نارنجی) بیشتر در امتداد خود شمع‌ها متمرکز شده و حباب نشست کلی کمی فشرده‌تر یا عمیق‌تر از حالت ستون سنگی باشد. این می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که شمع‌ها (به دلیل سختی بیشتر) بار را به لایه‌های عمیق‌تر و مقاوم‌تری منتقل می‌کنند. مقدار بیشینه جابجایی کل 5.07 cm ، شمع‌ها که اصولاً از بتن ساخته می‌شوند سختی بالایی دارند و در نشست قائم و جابه‌جایی افقی بیشتر از ستون سنگی اثرگذارند. این تصویر به صورت کمی این برتری شمع‌ها در کاهش نشست (در این حالت) را نشان می‌دهد. شمع‌ها به دلیل سختی ذاتی بالاتر (معمولاً بتنی) و توانایی انتقال بار به لایه‌های عمیق‌تر و مقاوم‌تر از طریق مقاومت نوک و اصطکاک جداره، اغلب می‌توانند نشست‌ها را به طور مؤثرتری نسبت به ستون‌های سنگی (که بیشتر باعث بهبود مشخصات توده خاک می‌شوند) کنترل کنند، به خصوص اگر لایه‌های سست عمیق باشند. تمرکز بیشتر جابجایی در امتداد شمع‌ها نیز می‌تواند تایید این حالت باشد. در مجموع این تصویر نشان می‌دهد که استفاده از ۹ شمع (با مدل سازی اندرکنش شمع-خاک) منجر به کاهش نشست حتی بیشتری نسبت به ۹ ستون سنگی شده است (در مقابل 5.07 cm در مقابل 6.4 cm). هر دو روش بهسازی توانسته‌اند نشست را به میزان قابل قبولی کاهش دهند.



شکل ۱۲. خروجی گرافیکی نرم افزار فونداسیون 10×10 با ۶ شمع و ۳ ستون سنگی تقویت شده

Fig. 12. Graphical output of the software for a 10x10m foundation reinforced with 6 piles and 3 stone columns

این مدل مربوط به پی 10×10 m به همراه یک سیستم ترکیبی شامل ۶ عدد شمع و ۳ عدد ستون سنگی است. المان‌های عمودی زیر پی قابل مشاهده هستند که ترکیبی از شمع‌ها و ستون‌های سنگی هستند ۶ شمع و ۳ ستون سنگی در مدل وجود دارند. رنگ قرمز، نارنجی و زرد در زیر پی نشان‌دهنده بیشترین نشست است، رنگ آبی تیر نشان‌دهنده جابجایی قائم کمتر (نزدیک به صفر) است، الگوی کلی، یک "پایز نشست" در زیر پی را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه جابجایی کل $5/2$ cm



شکل ۱۳. خروجی گرافیکی نرم افزار فونداسیون 10×10 با ۳ شمع و ۶ ستون سنگی تقویت شده

Fig. 13. Graphical output of the software for a 10×10 m foundation reinforced with 3 piles and 6 stone columns

المان‌های عمودی زیر پی (ترکیبی از ۳ شمع و ۶ ستون سنگی) قابل مشاهده هستند. بیشترین جابجایی (رنگ قرمز) در زیر پی و در امتداد المان‌های بهسازی متمرکز شده و با فاصله گرفتن، کاهش می‌یابد. حباب نشست به خوبی کنترل شده است. مقدار بیشینه جابجایی کل $5/3$ cm این ترکیب (۳ شمع + ۶ ستون سنگی) منجر به نشست $5/3$ cm شده است.

این مقدار به طور قابل توجهی کمتر از نشست خاک خالی (۱۶/۱۸ cm) است. این مقدار کمتر از نشست حالت ۹ ستون سنگی به تنهایی (۶/۰۴ cm) است. این مقدار بسیار نزدیک و کمی بیشتر از نشست حالت ۹ شمع به تنهایی (۵/۰۷ cm) است. (تفاوت حدود ۰/۲۲ cm یا ۲/۲ mm). این ترکیب (۳ شمع + ۶ ستون سنگی) عملکرد بسیار خوبی در کاهش نشست از خود نشان داده است و تقریباً به اندازه استفاده از ۹ شمع به تنهایی مؤثر بوده است. در اینجا ۶ ستون سنگی (که به کاهش نشست کمک می‌کنند) و ۳ شمع (که به ظرفیت باربری و همچنین کاهش نشست به دلیل سختی بالا کمک می‌کنند) داریم. نتیجه (نشست ۵/۳ cm) نشان می‌دهد که این ترکیب، تعادل خوبی بین این دو المان ایجاد کرده است.

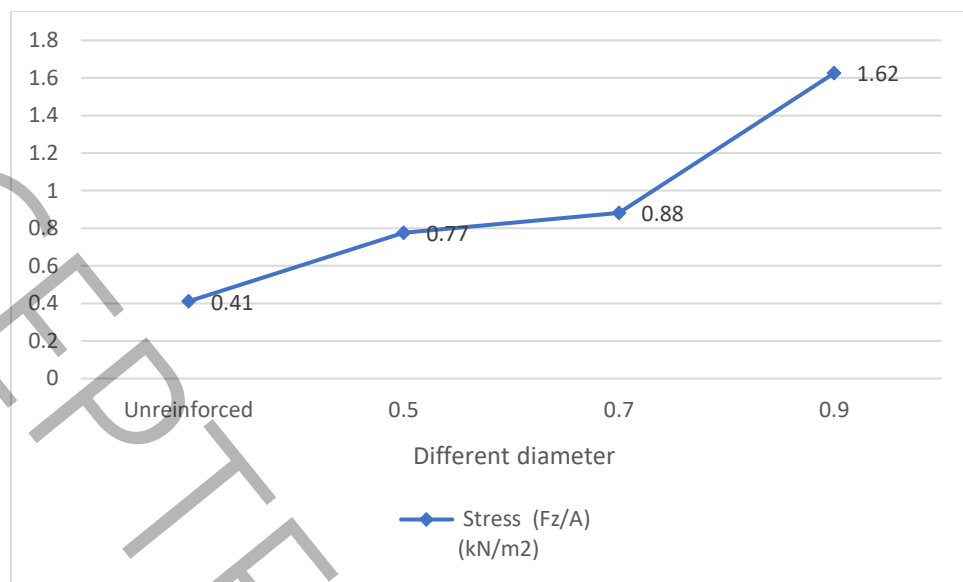
با توجه به اینکه شمع‌ها معمولاً گران‌تر از ستون‌های سنگی هستند، این ترکیب (۶ شمع + ۳ ستون سنگی) که عملکردی تقریباً معادل ۹ شمع دارد، می‌تواند یک گزینه بسیار بهینه از نظر بهینه‌سازی طراحی باشد. با جایگزینی ۶ عدد از شمع‌ها (در مقایسه با حالت ۹ شمع) با ۶ ستون سنگی، به نتیجه مشابهی در کنترل نشست دست یابد. این تصویر یک نتیجه بسیار امیدوارکننده و مهم را برای سیستم ترکیبی نشان می‌دهد. ترکیب ۳ شمع و ۶ ستون سنگی توانسته است نشست را به طور قابل ملاحظه‌ای (تا ۵/۳ cm) کاهش دهد، که عملکردی بسیار نزدیک به استفاده از ۹ شمع به تنهایی دارد و از ۹ ستون سنگی به تنهایی بهتر است. این نتیجه می‌تواند یک "آرایش بهینه" یا حداقل بسیار نزدیک به بهینه باشد که هم از نظر فنی (کنترل نشست) و هم از نظر کارایی فنی مطلوب است.

برای مطالعه پارامتریک، تاثیر تغییر قطر (۵۰، ۷۰، ۹۰ cm)، فاصله (۳/۱۵ m، ۳/۶۵، ۴/۱۵) و طول (۱۰ m، ۱۵، ۲۰) ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری به صورت جداگانه بررسی و نتایج در قالب نمودار و جدول ارائه شد.

جدول ۲. مقایسه نیروی اعمالی و تنش در رادیه با قطرهای مختلف ستون سنگی در نشست ۵۰ mm

Table 2. Force and Stress Values for Different Diameters (at $S=50mm$)

شرایط (بر اساس قطر، D) (متر)	نیروی اعمالی (Fz) (کیلو نیوتن)	فشار متوسط تماس (P) (کیلو نیوتن بر متر مربع)
بدون مسلح سازی	۴۱/۱	۰/۴۱۱
۰/۵	۷۷/۶۵	۰/۷۷۶۵
۰/۷	۸۸/۲	۰/۸۸۲
۰/۹	۱۶۲/۵	۱/۶۲۵



شکل ۱۴. مقایسه ظرفیت باربری رادیه در حالت بدون تقویت و قطرهای متفاوت ستون سنگی

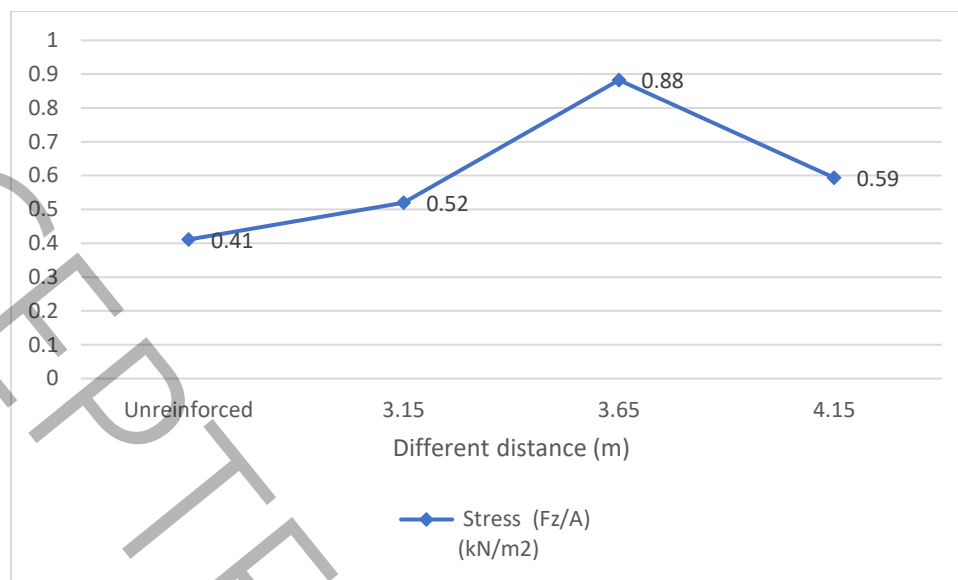
Fig. 14. Comparison of bearing capacity of stone columns in the unreinforced state and with different diameters

در مقایسه انجام شده در می‌یابیم که با افزایش قطر، ظرفیت باربری نیز افزایش میابد و حتی متوان گفت افزایش قطر از ۷۰ cm به ۹۰ cm ظرفیت باربری را تا ۲ برابر افزایش داده است.

جدول ۳. مقایسه نیروی اعمالی و تنش با فاصله‌های مختلف بین ستون‌ها در نشست ۵۰ mm

Table 3. Force and Stress Values for Different Distances (at $S=50mm$)

شرایط (بر اساس فاصله)	نیروی اعمالی (Fz)	فشار متوسط تماس (P)
(متر)	(کیلو نیوتن)	(کیلو نیوتن بر متر مربع)
بدون مسلح سازی	۴۱/۱	۰/۴۱۱
۳/۱۵	۵۲	۰/۵۲
۳/۶۵	۸۸/۲۵	۰/۸۸۲۵
۴/۱۵	۵۹/۳۷	۰/۵۹۳۷



شکل ۱۵. مقایسه ظرفیت باربری رادیه در حالت بدون تقویت و فاصله‌های متفاوت ستون سنگی

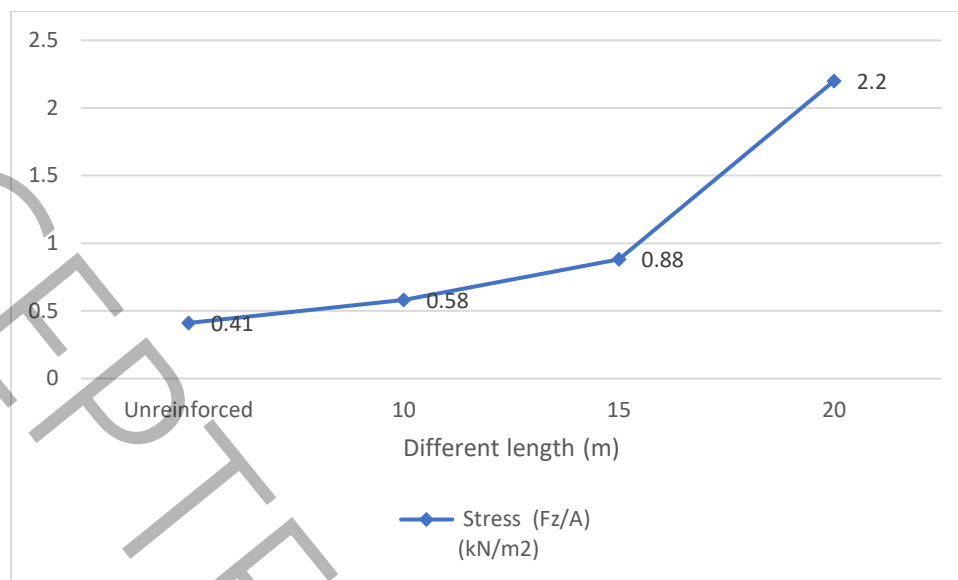
Fig. 15. Comparison of bearing capacity of stone columns in the unreinforced state and with different spacings

در مقایسه انجام شده در رابطه با فاصله ستون سنگی از یکدیگر می‌توان دریافت که نه خیلی بهم نزدیک باشند نه خیلی از یکدیگر فاصله داشته باشند و احتمالاً علت نزدیکی زیاد و کاهش ظرفیت باربری به علت تداخل حباب تنش است و هرچه از یکدیگر دور شوند گویی که دیگر حالت گروهی خارج شده و هر کدام به صورت تکی عمل میکنند، بهترین فاصله حدوداً ۵ برابر قطر ستون سنگی تخمین زده شد.

جدول ۴. مقایسه نیروی اعمالی و تنش در رادیه با طول‌های مختلف ستون سنگی در نشست ۵۰ mm

Table 4. Force and Pressure/Stress Values for Different Lengths (at $S=50\text{mm}$)

شرایط (بر اساس طول، L) (متر)	نیروی اعمالی (Fz) (کیلو نیوتن)	فشار متوسط تماس (P) (کیلو نیوتن بر مترمربع)
بدون مسلح سازی	۴۱/۱	۰/۴۱۱
۱۰	۵۸/۲۲	۰/۵۸۲۲
۱۵	۸۸/۲۴	۰/۸۸۲۴
۲۰	۲۲۰	۲/۲



شکل ۱۶. مقایسه ظرفیت باربری رادیه در حالت بدون تقویت و طول‌های متفاوت ستون‌های سنگی

Fig. 16. Comparison of bearing capacity of stone columns in the unreinforced state and with different lengths

با توجه به مقایسه انجام شده در طول ستون سنگی و همچنین ثابت ماندن بقسه پارامترها (قطر، فاصله و ...) دریافتیم که با افزایش طول ستون سنگی ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد اما از یک جا به بعد ثلث میماند که به آن طول بحرانی گفته میشود که حدوداً ۲۰ برابر قطر ستون سنگی می‌باشد.

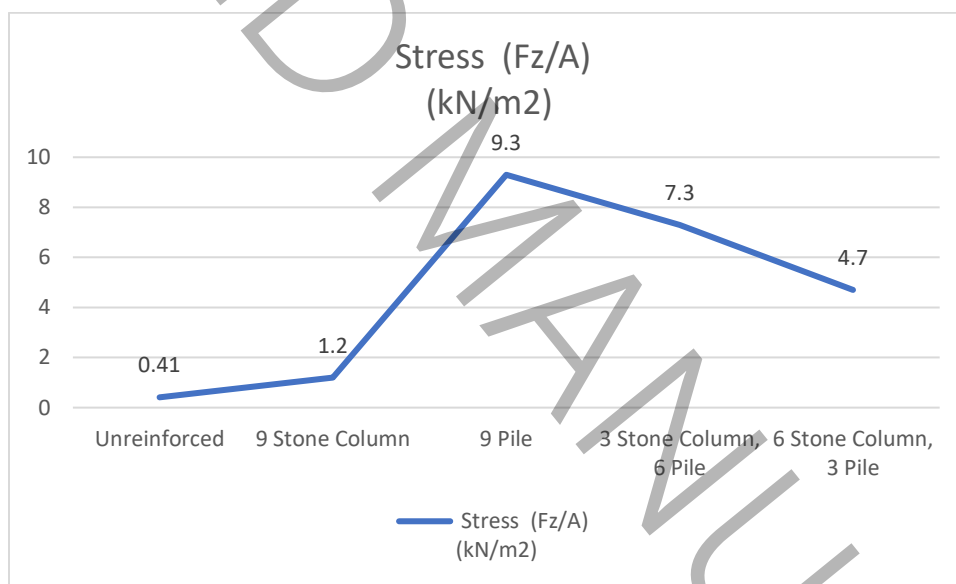
۴- تحلیل نتایج

با توجه به نرم بودن لایه‌های رسی در مدل حاضر، نشست عامل تعیین‌کننده در طراحی پی محسوب می‌شود. لذا در این پژوهش، مطابق با استانداردهای طراحی شالوده‌ها در خاک‌های نرم، ظرفیت باربری بر اساس معیار نشست محدود شده و معادل با نشست ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تمامی نتایج گزارش شده در جداول و نمودارها بر اساس این معیار استخراج گردیده‌اند. نتایج به‌وضوح نشان داد که هر دو روش بهسازی با شمع و ستون سنگی به‌تنهایی باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست نسبت به حالت بهسازی نشده می‌شوند. با این حال، سیستم ترکیبی شمع و ستون سنگی عملکرد بهتری از خود نشان داد. در پی گسترده ۱۰×۱۰م، ترکیب ۶ ستون سنگی و ۳ شمع (نسبت ستون سنگی به شمع ۲ به ۱)، ضمن کاهش نشست به حدود ۳/۵۱ cm (۶۷٪)، کاهش نسبت به حالت بدون تقویت در بار مشابه، ظرفیت باربری را حدود ۹۴٪ افزایش داد.

جدول ۵. شاخص‌های عملکرد در آرایش‌های مختلف بهسازی خاک در نشست ۵۰ mm

Table 5. Performance Metrics of Different Ground Improvement Configurations under Loading
(at $S=50\text{mm}$)

آرایش بهسازی خاک	نیروی اعمالی (F_z) (کیلو نیوتن)	فشار متوسط تماس (P) (کیلو نیوتن بر مترمربع)	نشست (متر)
بدون مسلح سازی	۴۱/۱	۰/۴۱۱	۰/۰۵
۹ ستون سنگی	۱۲۲/۴	۱/۲	۰/۰۵
۹ شمع	۹۲۶/۳	۹/۳	۰/۰۵
۳ ستون سنگی، ۶ شمع	۷۳۲	۷/۳	۰/۰۵
۶ ستون سنگی، ۳ شمع	۴۷۰/۵	۴/۷	۰/۰۵



شکل ۱۷. مقایسه ظرفیت باربری در حالت‌های متفاوت در فونداسیون ۱۰×۱۰

Fig. 17. Comparison of bearing capacity in different configurations for a 10x10m foundation

یافته‌های این تحقیق با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد. به عنوان مثال، شارما و کومار [۱۸] نیز در مدل سازی فونداسیون مربعی ۹/۶m، افزایش قابل توجه ظرفیت باربری (حدود ۶۲٪) با استفاده از ۹ شمع را گزارش کردند که با افزایش حدود ۸۲٪ در این تحقیق) برای ۹ شمع زیر پی ۱۰×۱۰ قابل مقایسه است. نتایج مطالعه پارامتریک نیز که نشان داد قطر ستون سنگی بیشترین تاثیر را بر ظرفیت باربری دارد و پس از آن فاصله و طول قرار می گیرند، با یافته‌های عمومی در ادبیات فنی مانند آمبیلی و گاندهی [۶] که روی ستون منفرد کار کردند و همچنین نتایج شارما و کومار [۱۸] که افزایش قطر را موثرتر یافتند، و همچنین افزایش L/D از ۴ به ۵ باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری شد، اما افزایش بیشتر به ۶ تاثیر محدودی داشت آبیید و همکاران [۳] مطابقت دارد.

افزایش تعداد و قطر باعث کاهش جابجایی جانبی خاک و افزایش سختی کلی سیستم می‌شود. عسگری و همکاران [۲۰]. افزایش چشمگیر ظرفیت باربری مشاهده شده در این تحقیق، با یافته‌های حسین و ایسلام [۲۲] همخوانی دارد. آن‌ها نشان دادند که در سیستم‌های ترکیبی، علاوه بر سختی خود المان‌ها، ایجاد تنش محصورکنندگی توسط ستون‌های سنگی باعث بسیج مقاومت برشی زهکشی‌نشده در خاک رس پیرامونی می‌شود که نتیجه آن، جهش ناگهانی در پایداری کل سیستم استاین تحقیق نشان داد که سیستم ترکیبی شمع-ستون سنگی می‌تواند یک راهکار مهندسی کارآمد و بالقوه بهینه برای بهسازی خاک‌های نرم باشد. این سیستم با ترکیب مزایای هر دو روش (کنترل نشست و زهکشی توسط ستون سنگی، ظرفیت باربری بالا توسط شمع) عملکرد کلی فونداسیون را بهبود می‌بخشد. تعیین آرایش بهینه برای پی‌های با صلبیت مختلف می‌تواند به مهندسان در طراحی بهینه‌تر کمک کند. نتایج این پژوهش می‌تواند مستقیماً در طراحی فونداسیون سازه‌هایی مانند ساختمان‌های متوسط، مخازن، یا خاکریزها بر روی زمین‌های با خاک رس نرم استفاده شود. با استفاده از نمودارهای بار-نشست و ظرفیت باربری ارائه شده، مهندسان می‌توانند نیازهای پروژه (کنترل نشست یا تامین ظرفیت باربری)، آرایش بهینه شمع و ستون سنگی را انتخاب کنند. همچنین، نتایج مطالعه پارامتریک راهنمایی برای انتخاب ابعاد و فواصل بهینه ستون‌های سنگی فراهم می‌کند.

5- نتیجه‌گیری

این پژوهش به بررسی عددی عملکرد سیستم ترکیبی شمع و ستون سنگی برای بهسازی خاک رس نرم با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D پرداخت. نتایج اصلی به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱. ترکیب ستون‌های سنگی و شمع‌ها در یک سیستم پی، ظرفیت باربری سیستم با معیار نشست مجاز را بهبود می‌بخشد، پی خاک را به یک زمین مرکب ارتقا یافته جدید تغییر می‌دهد و قطعاً هزینه کار ژئوتکنیکی را کاهش می‌دهد.
۲. سیستم ترکیبی شمع و ستون سنگی به‌طور قابل توجهی نشست را کاهش و ظرفیت باربری را نسبت به حالت بدون بهسازی و همچنین حالت‌های بهسازی شده تنها با شمع یا ستون سنگی (در برخی آرایش‌ها) افزایش می‌دهد.
۳. نتایج نشان داد که استفاده از سیستم ترکیبی منجر به کاهش چشمگیر نشست از مقدار بحرانی $16/18 \text{ cm}$ (حالت بدون بهسازی) به محدوده ایمن 5 cm شده است. این به معنای بهبود حدود 69% در عملکرد پی است که از منظر آیین‌نامه‌ای، سیستم را از وضعیت غیرایمن به محدوده مجاز سرویس‌دهی منتقل می‌کند.
۴. بررسی آرایش‌های مختلف نشان داد که نسبت ۲ به ۱ (ستون سنگی به شمع) به دلیل ایجاد شبکه زهکشی متراکم‌تر و بهبود صلبیت زیر پی، به عنوان آرایش بهینه از نظر کنترل نشست شناخته می‌شود.
۵. سیستم ترکیبی نه تنها نشست را به 5 cm محدود کرد، بلکه ظرفیت باربری نهایی پی را از 41 kPa به 47 kPa افزایش داد. این یافته ثابت می‌کند که استفاده از شمع‌های صلب در قلب گروه‌های ستون سنگی، باعث ایجاد یک هسته سخت می‌شود و ظرفیت باربری پی را بیش از ۱۱ برابر افزایش داد.

۶. نتایج این پژوهش در راستای مطالعات وانگ و همکاران [۲۳] نشان داد که بهینه‌سازی چیدمان المان‌ها در یک الگوی مربعی، نه تنها نشست کل را مهار می‌کند، بلکه با ایجاد هم‌پوشانی در حباب تنش، از تمرکز تنش در نقاط حساس پی جلوگیری می‌نماید. این رویکرد، پایداری بلندمدت پی‌های گسترده را در برابر بارهای سنگین تضمین می‌کند.
۷. در بین پارامترهای هندسی ستون سنگی، قطر بیشترین تاثیر را بر افزایش ظرفیت باربری دارد. افزایش قطر از ۷۰ cm به ۹۰ cm ظرفیت باربری را تقریباً دو برابر کرد، در حالی که افزایش طول از ۱۵ m به ۲۰ m تاثیر کمتری داشت. فاصله بهینه ستون‌ها نیز حدود ۵ برابر قطر آن‌ها به‌دست آمد.
۸. ظرفیت باربری نهایی سیستم پی ترکیبی با افزایش تعداد شمع‌ها در سیستم افزایش می‌یابد.
۹. مدل‌سازی عددی با PLAXIS 3D ابزار قدرتمندی برای تحلیل و مقایسه سیستم‌های مختلف بهسازی خاک و بهینه‌سازی طراحی آن‌ها می‌باشد.

REFERENCES

- [1] D. Ahmed, S.N.L.bt Taib, T. Ayadat, A. Hasan, Geotechnical performance of combined stone columns and piles capped with reinforced concrete raft foundation in soft clay soil, *Acta Geodyn. Geomater.*, 19(4) (2022) 319-341.
- [2] T. Foda, H.M. Ibrahim, A. Abdelkader, K. Abu el-Hassan, Innovative Approaches to Soft Clay Stabilization: Utilizing Sustainable Materials for the Stone Column Technique, *Geotech. Geol. Eng.*, 42(9) (2024) 5143-5167.
- [3] M.S. Abid, D. Rathod, S.K. Vanapalli, Bearing Capacity of Annulus Stone Column Double-Encapsulated with Geotextiles, *Int. J. Geomech.*, 23(2) (2023) 04022281.
- [4] H.K. Sarvaiya, C.H. Solanki, A Study on Effects of Geosynthetic Encasement on Floating Stone Column, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, 8(1) (2017) 891-899.
- [5] S. Naseer, M.S. Faiz, S. Iqbal, S.M. Jamil, Laboratory and numerical based analysis of floating sand columns in clayey soil, *International Journal of Geo-Engineering*, 10(1) (2019) 10-11.

[6] A.P. Ambily, Sh.R. Gandhi, Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(4) (2007) 405-41.

[7] J.M.O. Hughes, N.J. Withers, Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns, *Ground Eng.*, 7(3) (1974) 42-49.

[8] J.M.O. Hughes, N.J. Withers, D.A. Greenwood, A field trial of reinforcing effect of stone column in soil, *Proc., Ground Treatment by Deep Compaction*, Institution of Civil Engineers, London, (1976) 32-44.

[9] H.J. Priebe, The design of vibro replacement, *Ground Eng.*, 28(12) (1995) 31-37.

[10] A.Y. Samangani, R. Naderi, Numerical and large-scale laboratory study of rock column groups in sandy soil behavior improvement, *Adv. Civ. Eng.*, 2022 (2022) 9259093.

[11] M. Ghazavi, J.N. Afshar, Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns, *Geotext. Geomembr.*, 10(2) (2013) 47-53.

[12] J. Nazari Afshar, M. Ghazavi, A simple analytical method for calculation of bearing capacity of stone-column, *Int. J. Civ. Eng.*, 12(1) (2014) 15-25.

[13] N. Nehab, K. Baba, L. Ouadif, L. Bahi, Numerical simulations of ground improvement using stone columns in "Bouregreg Valley", in: M. Bouassida, M. Meguid (Eds.), *GeoMEast 2017: Ground Improvement and Earth Structures, Sustainable Civil Infrastructures*, Springer, (2018).

[14] B.G. Sexton, B.A. McCabe, J. Castro, Appraising stone column settlement prediction methods using finite element analyses, *Acta Geotech.*, 9(6) (2014) 993-1011.

[15] S. Manojit, R. Bhowmik, 3D numerical analysis of piled raft foundation in stone column improved soft soil, *Int. J. Geotech. Eng.*, 13(5) (2017) 498-506.

[16] R.D. Barksdale, R.C. Bachus, Design and construction of stone columns, *National Technical Information Service*, Springfield, Virginia, vol. 1 (1983).

[17] M. Etehad, A.M. Hanna, T. Ayadat, Bearing capacity of group of stone columns in soft soil, *Int. J. Geomech.*, 15(2) (2015) 04014043.

[18] S. Sharma, S. Kumar, Behaviour of Raft Foundation Supported by Stone Columns and Combination with Rigid Piles in Soft Clay Soils: 3D Numerical Study, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(9) (2021) 1670-1677.

[19] L. Keykhosropour, A. Soroush, S.M.R. Emam, Study of the effect of encased stone columns on the improvement of soft soils using numerical analysis, *Proceedings of the 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan, Iran, (2011) in Persian.*

[20] A. Asgari, F. Ranjbar, H. Akbarzadeh Bengar, Using pile group to mitigate lateral spreading in uniform and stratified liquefiable sand strata: three-dimensional numerical simulation, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(7) (2021) 675–678.

[21] L. Zhang, et al., Advancements in Hybrid Foundation Systems: Combining Rigid Piles and Stone Columns for Extreme Settlement Control in Soft Deposits, *Geotext. Geomembr.*, 53(1) (2025) 112-128.

[22] M.S. Hossain, T. Islam, Numerical Performance of Composite Foundations under High-Rise Structures: A Study on Load-Sharing Mechanisms, *Comput. Geotech.*, 165 (2024) 105-122.

[23] J. Wang, et al., Optimization of Square-Patterned Pile-Raft Systems in Ultra-Soft Clay: Experimental and FEA Insights, *Acta Geotech.*, 18(4) (2023) 455-472.