

# مدل سازی آزمایشگاهی و عددی اصلاح خاک‌های ریزدانه نرم با

## استفاده از ستون‌های شفته آهکی متراکم

محمدرضا ملک پور<sup>۱</sup>، غلامرضا پوراابراهیم<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترای خاک و پی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

gh.r.poorebrahim@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۵

**چکیده-** یکی از روش‌های متداول و کارا برای اصلاح رفتار خاک‌های مساله‌دار، استفاده از ستون‌های سنگی است. این ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری این نوع خاک‌ها شده و نشست آنها را تحت بارهای وارده کاهش می‌دهند. ستون‌های سنگی ظرفیت باربری خود را به وسیله محصوریت ایجاد شده به وسیله خاک اطراف به دست می‌آورند. در خاک‌های ریزدانه بسیار نرم، فشار جانبی اعمالی به ستون کافی نبوده و ستون‌ها تحت بارهای اعمالی دچار کماتش جانبی می‌شود. یکی از روش‌های جلوگیری از کماتش جانبی ستون‌ها و ارتقاء عملکرد آنها در خاک‌های بسیار نرم، استفاده از ستون‌های سنگی صلب است. در این مقاله نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی که به منظور ارزیابی عملکرد ستون‌های سنگی صلب از نوع شفته آهک متراکم برای اصلاح رفتار خاک‌های ریزدانه نرم انجام شده است، ارائه می‌شود. در این پژوهش نمونه‌هایی در ابعاد بزرگ متشکل از خاک رس و ستون‌های شفته آهکی متراکم با استفاده از تئوری سلول واحد در آزمایشگاه ساخته شده و با بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. برای مدل‌سازی عددی نمونه‌ها، از نرم‌افزار اجزاء محدود V8.2 Plaxis استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ستون‌های شفته آهکی متراکم به میزان قابل توجهی موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست خاک‌های ریزدانه نرم می‌شود و با افزایش نسبت مساحت، تأثیر استفاده از این ستون‌ها در بهبود رفتار خاک، مشهودتر می‌شود. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که انطباق خوبی بین نتایج وجود داشته و میانگین اختلاف بین نتایج ۶٪ است.

**واژگان کلیدی:** خاک‌های نرم، ستون‌های سنگی، آهک، شدت بار، نشست.

### ۱- مقدمه

های اصلاح خاک است [۱]. استفاده از این ستون‌ها موجب افزایش ظرفیت باربری خاک‌های نرم و سست شده و نشست آنها را در اثر بارهای وارده کاهش می‌دهند [۲]. در خاک‌های رسی اشباع، این ستون‌ها به‌عنوان زهکش عمل کرده و باعث کاهش زمان تحکیم می‌شوند. وجود ستون-

یکی از روش‌های اصلاح خاک‌های ریزدانه نرم استفاده از ستون‌های سنگی است. این ستون‌ها به علت کارایی مناسب، ساخت آسان و در دسترس بودن مصالح مورد نیاز برای ساخت آنها با هزینه کم، یکی از متداول‌ترین روش-

از اعمال فشار همه‌جانبه کافی به‌ستون عاجز است، استفاده از ستون‌های سنگی در این نوع خاک‌ها، موجب لغزش دانه‌های ستون به داخل خاک اطراف شده و باعث گسیختگی ستون‌ها در اثر کمانش جانبی می‌شود [۱۳]. نتیجه مطالعات قبلی نشان داده است که ستون‌های با طول بزرگتر از ۴ برابر قطر خود، گذشته از آن‌که شناور باشند یا دارای تکیه‌گاه انتهایی، در اثر بارهای محوری وارده دچار کمانش می‌شوند [۱۴]. نتیجه آزمایش‌های انجام شده روی یک گروه ستون شامل ۵ ستون سنگی، نشان داده است که ستون میانی به گونه یکنواخت و متقارن کمانش نموده، ولی ستون‌های کناری در اثر کمانش به‌طرف بیرون دچار گسیختگی می‌شوند [۱۵].

طبق استاندارد آلمان، استفاده از ستون‌های سنگی عموماً به خاک‌های با مقاومت برشی زهکشی نشده‌ی بین ۱۵ kPa تا ۲۵ kPa محدود می‌شود [۱۶]. در خاک‌های با مقاومت برشی پایین‌تر، محدودیت جانبی ایجاد شده به وسیله‌ی خاک اطراف به‌منظور جلوگیری از کمانش جانبی ستون، تحت بارهای وارده، ناکافی بوده و در استفاده از ستون‌های سنگی در این نوع خاک‌ها، باید تمهیدات ویژه‌ای در نظر گرفته شود [۱۷].

یکی از روش‌های کارا و مفید برای افزایش مقاومت ستون‌های سنگی در برابر کمانش جانبی در خاک‌های نرم، استفاده از ستون‌های سنگی صلب<sup>۲</sup> است. در این روش، هنگام ساخت ستون، از مصالح چسباننده نظیر آهک، برای ایجاد چسبندگی بین دانه‌ها استفاده شده و ستون تحت بارهای اعمالی، بدون نیاز به محصوریت خاک اطراف، در برابر کمانش جانبی مقاومت می‌کند [۱۸].

یک مطالعه آزمایشگاهی به‌منظور بررسی اصلاح خاک-های ریزدانه نرم با استفاده از ستون‌های شفته آهکی به

های سنگی در خاک‌های سست ماسه‌ای، احتمال روانگرایی را در اثر وقوع زلزله کاهش می‌دهد [۳ و ۴]. مؤثر بودن کارایی این ستون‌ها در بهبود رفتار خاک‌های مساله‌دار، به وسیله‌ی پژوهشگران مختلفی ارزیابی و ثابت شده است [۵، ۶، ۷، ۸ و ۹].

در اصلاح خاک به‌روش ستون‌های سنگی، مصالح دانه-ای با مقاومت برشی بالا و قابلیت تراکم‌پذیری بسیار پایین جایگزین خاک‌های نرم و سست با مقاومت برشی پایین و قابلیت تراکم‌پذیری بالا شده و سهم قابل توجهی از بارهای اعمالی به وسیله‌ی فونداسیون، این ستون‌ها تحمل می‌شود. ستون‌های سنگی مقاومت و سختی خود را به‌وسیله محصوریت<sup>۱</sup> و محدودیت ایجاد شده به وسیله‌ی خاک اطراف به‌دست می‌آورند. بدین مفهوم که در اثر بارهای وارده، کرنش جانبی در ستون سنگی و خاک اطراف آن ایجاد شده و خاک اطراف تنش همه‌جانبه‌ی اضافی به ستون وارد می‌کند و مقاومت خاک اصلاح شده با استفاده از این ستون‌ها، از اندرکنش خاک و ستون تأمین می‌شود، که ناشی از کرنش شعاعی ستون و خاک اطراف آن است [۱۰].

به‌دلیل آن‌که میزان فشار محصور کننده‌ی جانبی، رفتار و مقاومت ستون‌سنگی را کنترل می‌کند، بهبود ظرفیت باربری به وسیله‌ی یک ستون سنگی، بستگی به فشار همه-جانبه‌ی ایجاد شده به وسیله‌ی خاک اطراف دارد. بنابراین تأثیر مسلح کردن خاک با ستون سنگی هم بستگی به ویژگیهای مصالح ستون سنگی و هم بستگی به ویژگیهای ژئوتکنیکی خاک اطراف دارد [۱۱ و ۱۲]. میزان اعمال فشار همه‌جانبه به وسیله‌ی خاک به ستون، به وسیله‌ی مقاومت برشی زهکشی نشده آن مشخص می‌شود. با توجه به آنکه خاک‌های ریزدانه بسیار نرم تا نرم و خاک‌های لایه‌ای که لایه‌های بالایی آن، دارای مقاومت برشی بسیار پایین است،

2- rigid stone columns

1- confinement

آنها شده است [۱].

در این مقاله، نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی انجام شده به منظور بررسی رفتار خاک‌های ریزدانه نرم اصلاح شده با استفاده از ستون‌های شفته‌آهکی متراکم، ارائه شده است. در این مطالعه، برای ساخت نمونه‌ها و به منظور شبیه‌سازی رفتار یک ستون داخلی در یک گروه ستون، از تئوری سلول واحد<sup>۳</sup> استفاده شده است. این تئوری اولین بار به وسیله‌ی پرایب پیشنهاد شده و به وسیله‌ی پژوهشگران زیادی استفاده شده است. در این تئوری، قطر خاک رس اطراف ستون منفرد، به وسیله‌ی فاصله بین ستون‌ها تعریف می‌شود [۹، ۲۰، ۲۱ و ۲۲]. نمونه‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود و به وسیله‌ی نرم‌افزار Plaxis V8.2 مدل‌سازی شده و نتایج مدل‌سازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است.

## ۲- برنامه‌ریزی آزمایشگاهی

در حالت کلی ۲ سری آزمایش برای این پژوهش انجام شده است. سری اول آزمایش‌ها به منظور تعیین روش ساخت ستون و میزان بهینه مصالح مصرفی برای ساخت آن، روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ cm و طول ۲۰ cm انجام شده است. سری دوم آزمایش‌ها روی نمونه‌های مرکب از ستون و خاک اطراف، به منظور بررسی تأثیر این ستون‌ها در اصلاح رفتار مقاومتی خاک‌های ریزدانه نرم انجام شده است. در تمامی نمونه‌های مرکب، قطر ستون ۱۰ cm و ارتفاع آن ۶۰ cm در نظر گرفته شده است. برای تعیین قطر نمونه مرکب از ستون و خاک اطراف، از تئوری سلول واحد با فرض آرایش مثلثی ستون‌ها استفاده شده است [۱۴]. نمونه‌ها در دو حالت حاوی ستون‌های شناور<sup>۴</sup> و یا ستون‌های دارای تکیه‌گاه انتهایی<sup>۵</sup> ساخته شده و پس از

وسیله‌ی ملک‌پور و توفیق انجام شده است. در این مطالعه نمونه‌هایی به قطر ۲۰ cm و ارتفاع ۸ cm متشکل از خاک رس و ستون‌های شفته‌آهکی به قطر و ارتفاع به ترتیب ۳/۵ و ۷ cm در آزمایشگاه ساخته شده‌اند. برای ساخت ستون شفته‌آهکی از آهک شکفته، ماسه خوب دانه‌بندی شده رس‌دار و آب (به میزان ۳۴٪ مجموع وزن آهک و خاک) استفاده شده و تأثیر پارامترهای مختلف نظیر درصد‌های مختلف آهک، درصد‌های متفاوت رس موجود در خاک استفاده شده برای ساخت ستون و همچنین زمان گیرش بر روی رفتار مقاومت نمونه‌ها بررسی شده است. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)<sup>۱</sup> در شرایط رطوبتی مختلف (حالت خشک، رطوبت طبیعی و حالت خیس<sup>۲</sup>) تحت آزمایش قرار قرار گرفته‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده برای نمونه‌های اصلاح شده با ستون‌های شفته‌آهکی و نمونه‌های اصلاح نشده نشان داد که ستون‌های شفته‌آهکی حاوی ۲۰٪ آهک و ۲۲٪ رس، مقاومت خاک‌های رسی را در وضعیت رطوبتی خشک، رطوبت طبیعی و خیس، به ترتیب ۵، ۶ و ۶ برابر افزایش می‌دهند [۱۹].

در این مطالعه، با توجه به تعداد زیاد متغیرها و گستردگی آزمایش‌ها (بیش از ۶۷۵ آزمایش)، ابعاد نمونه‌ها کوچک انتخاب شده و بارگذاری با استفاده از دستگاه CBR انجام شده است. کوچک بودن طول نمونه‌ها باعث شده است که تأثیر مقاومت جدار نمونه‌ها به درستی بر روی مقاومت کل مشخص نشده و همچنین ضخامت کم لایه خاک زیر ستون برای اتفاق افتادن برش کلی تحت بارگذاری کافی نباشد. اعلام نتایج به صورت عدد CBR نیز موجب مشخص نبودن رفتار بار - نشست نمونه‌ها تحت بارگذاری و همچنین مشخص نبودن ظرفیت باربری نهایی

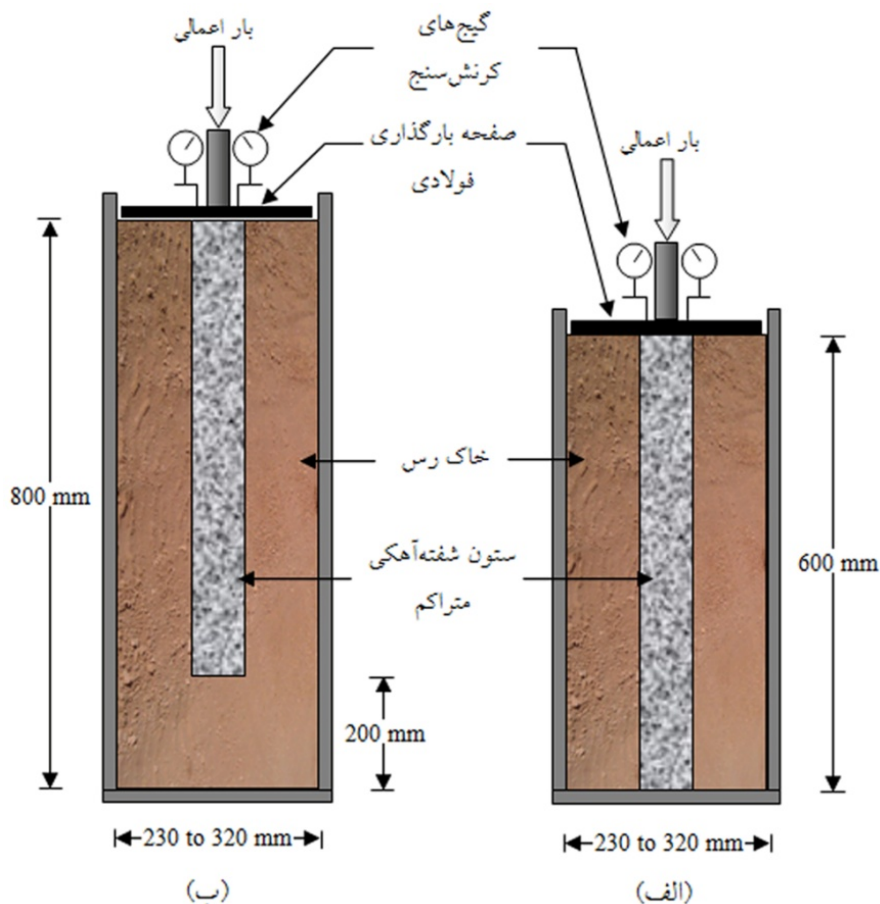
3- unit cell idealization  
4- floating columns  
5- end bearing columns

1- California Bearing Ratio  
2- soaked

برای بررسی تأثیر تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک اطراف روی رفتار مقاومتی زمین‌های اصلاح شده با ستون‌های شفته‌آهکی متراکم، در برخی نمونه‌ها، با تغییر رطوبت و تراکم خاک رس اطراف ستون، چسبندگی آن بین ۱۰ kPa تا ۴۰ kPa متغیر فرض شده است.

برای شبیه‌سازی رفتار واقعی زمین‌های تحت بارگذاری اصلاح شده با استفاده از این ستون‌ها، بار بر روی کل سطح نمونه با استفاده از صفحه‌ی فولادی به ضخامت ۲۰ mm و قطر ۱۰ mm کمتر از قطر نمونه، اعمال شده است. شکل شماتیک نمونه‌های آزمایشی در شکل (۱) و برنامه‌ریزی آزمایشگاهی و متغیرهای مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است.

ساخت، برای گیرش ستون، به مدت ۶۰ روز در آزمایشگاه و در دمای  $21^{\circ}\text{C}$  نگهداری شده‌اند. برای حفظ رطوبت خاک رس اطراف ستون، در زمان گیرش، از محافظ پلاستیکی برای نگهداری نمونه‌ها استفاده شده است. برای بررسی تأثیر فاصله ستون‌ها در میزان بهبود مقاومت خاک اصلاح شده، نمونه‌ها با نسبت مساحت ( $A_p$ ) (که به صورت نسبت سطح مقطع ستون به سطح مقطع کل نمونه تعریف می‌شود) ۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد ساخته شده و برای همین - منظور از قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۲۳، ۲۵ و ۳۲ سانتی - متر استفاده شده است. همان‌طور که در مقدمه گفته شد، مقاومت برشی خاک رس اطراف ستون تأثیر به‌سزایی بر رفتار خاک اصلاح شده با ستون‌های سنگی متداول دارد،



شکل (۱) شماتیک نمونه‌ها تحت بارگذاری: الف: ستون با تکیه‌گاه انتهایی، ب: ستون شناور

جدول (۱) برنامه‌ریزی آزمایشگاهی

تعداد آزمایش‌ها	چسبندگی خاک رس اطراف ستون (kPa)				شرایط ستون		نسبت مساحت (%)	شرح نمونه‌ها
	۴۰	۳۰	۱۷	۱۰	شناور	دارای تکیه‌گاه انتهایی		
۴	√	√	√	√	-	-	۱۰	نمونه‌های اصلاح نشده خاک
۴	√	√	√	√	-	-	۱۵	
۴	√	√	√	√	-	-	۲۰	
۸	√	√	√	√	√	√	۱۰	نمونه‌های اصلاح شده با ستون‌های شفته‌آهکی متراکم
۸	√	√	√	√	√	√	۱۵	
۸	√	√	√	√	√	√	۲۰	

آن، با هم ترکیب شده و پس از یکسان شدن کامل، در لایه‌های ۵۰ mm در داخل لوله با بیشینه وزن مخصوص خشک کوبیده شدند. در هر مرحله پس از کوبیدن خاک رس و ستون، لوله مورد استفاده برای ساخت ستون، بالا کشیده شد. بالا کشیدن ستون به‌آهستگی صورت گرفت تا کمترین دست‌خوردگی در خاک اطراف ایجاد شود. این فرایند تا ساخت کامل ستون و خاک اطراف تکرار شد.

#### ۴- روش آزمایش

بار به‌وسیله دستگاه بارگذاری وبه وسیله یک رینگ کالیبره شده<sup>۱</sup>، با سرعت ۰/۷ mm/min، با روش کرنش ثابت بر نمونه اعمال شده و رفتار شدت بار نشست نمونه‌ها، مطالعه شده است. به‌منظور اعمال نیرو بر کل سطح نمونه، از صفحه فولادی به‌ضخامت ۲۰ mm میلی‌متر و به قطر mm ۱۰ کمتر از قطر نمونه، استفاده شده و افزایش بار بر نمونه تا زمانی ادامه یافته است که نشست کل نمونه به mm ۱۵ برسد.

#### ۵- ویژگی‌های مصالح

در حالت کلی ۴ نوع مصالح برای این پژوهش استفاده شده

#### ۳- روش ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا خاک رس لازم برای ساخت یک نمونه، با استفاده از حجم مشخص قالب و وزن مخصوص مشخص، وزن شده و رطوبت اولیه آن مشخص شد. مقدار آب لازم برای رسیدن به رطوبت موردنظر به آن اضافه شد و پس از مخلوط شدن کامل، در داخل محافظ پلاستیکی به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد تا رطوبت آن یکسان شود. قبل از پر کردن خاک رس در داخل قالب، ورق‌های پلی‌اتیلنی به‌منظور جلوگیری از به‌وجود آمدن اصطکاک بین خاک و جداره‌های قالب در داخل قالب آزمایش قرار داده شد و سپس خاک رس در لایه‌های mm ۵۰ و با استفاده از وزن مخصوص طبیعی محل در داخل قالب کوبیده شد.

در نمونه‌های با ستون‌های شناور، ابتدا خاک رس به ارتفاع دو برابر قطر ستون (۲۰۰ mm) کوبیده شده و سپس لوله فلزی به‌ضخامت ۲ mm و قطر داخلی mm ۱۰۰ در مرکز آن قرار داده شده و ساخت ستون و خاک رس اطراف آن به‌طور هم‌زمان صورت گرفت. در نمونه‌های با ستون‌های دارای تکیه‌گاه انتهایی، لوله مورد استفاده برای ساخت ستون بر روی کف قالب قرار گرفت.

برای ساخت ستون، ابتدا مصالح مورد نیاز برای ساخت

1- proving ring

نمونه‌ها با شرایطی که در نمونه‌های مرکب استفاده می‌شود (از نظر وزن مخصوص، درصد رطوبت، شرایط بازسازی نمونه و سرعت بارگذاری) انجام شده و نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است.

برای تعیین مدول الاستیسیته (E) خاک رس، به دلیل شباهت شرایط نمونه‌ها با شرایط حاکم بر آزمایش تحکیم، از این آزمایش و از عکس ضریب تراکم‌پذیری حجمی در بازه تنش ۲۰۰ kPa تا ۴۰۰ kPa استفاده شده است. برای تعیین نسبت پواسون نیز از آزمایش سه‌محوری استفاده شده است. ماسه خوب‌دانه‌بندی شده رس‌دار برای ساخت ستون مورد استفاده قرار گرفته و منحنی دانه‌بندی آن در شکل شماره (۲) نمایش داده شده است. این خاک از منطقه اختیارآباد واقع در استان کرمان تهیه شده و پس از رد کردن از الک ۳/۸ in استفاده شده است.

آهک مورد استفاده برای ساخت ستون، آهک شکفته طبیعی بوده و ویژگی‌های شیمیایی آن در جدول (۴) آورده شده است. برای ساخت ستون، از آب مورد استفاده برای آشامیدن استفاده شده است که pH آب مصرفی برابر ۷/۰۳ و میزان کلر آن ۱/۷۰ ppm و سولفات آن برابر با ۱۱/۳۰ ppm است.

است: خاک رس، ماسه خوب‌دانه‌بندی شده رس‌دار، آهک و آب. خاک رس استفاده شده به‌عنوان خاک اطراف ستون، از محل یک پروژه عمرانی در کرمان تهیه شده است و طبق طبقه‌بندی خاک‌ها به‌روش متحد، در ردیف خاک‌های رس با پلاستیسیته پایین (CL) قرار می‌گیرد. این خاک از جمله خاک‌های مساله‌دار شهر کرمان محسوب شده و دارای قابلیت تراکم‌پذیری بالا است. ویژگی‌های این خاک در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲) ویژگی‌های خاک رس مورد استفاده

پارامتر	مقدار
چگالی ویژه	۲/۷۲
حد روانی (%)	۴۲/۰۰
حد خمیری (%)	۲۱/۵
شاخص تراکم‌پذیری (C <sub>c</sub> )	۰/۹۲
درصد سولفات (%)	۰/۲۳
درصد کلر (%)	۰/۹۶
pH	۷/۱۱

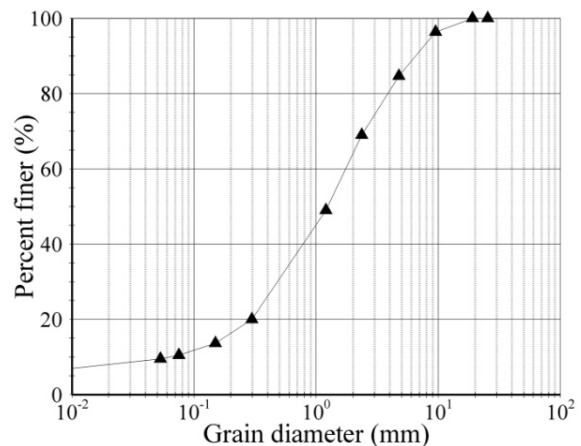
در برخی نمونه‌ها خاک رس با تراکم و درصد رطوبت-های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است و برای همین منظور از آزمایش برش مستقیم برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی این خاک در حالات مختلف استفاده شده است. آزمایش برش مستقیم بر روی

جدول (۳) ویژگی‌های استفاده شده برای مدل‌سازی مصالح

مصلح	مدل رفتاری	درصد رطوبت (%)	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول الاستیسیته (kPa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص خشک (kN/m <sup>3</sup> )
خاک رس	موهر- کلمب	۱۸/۵۰	۱۰	۶/۵۰	۱۲۰۰۰	۰/۴۲	۱۳/۷۰
		۱۳/۰۰	۱۷	۸/۰۰	۱۲۰۰۰	۰/۴۱	۱۴/۰۵
		۱۱/۵۰	۳۰	۹/۵۰	۱۲۰۰۰	۰/۳۹	۱۴/۳۰
		۹/۵۰	۴۰	۱۰/۵۰	۱۲۰۰۰	۰/۳۷	۱۴/۷۰
شفته آهک متراکم	الاستیک خطی	-	-	-	۲۰۰۰۰۰	۰/۲۱	۲۱/۲۰

گرفتن معیار موهر - کلمب<sup>۱</sup> برای خاک رس و معیار الاستیک خطی<sup>۲</sup> برای ستون شفته آهکی متراکم مدل شده‌اند. ویژگی‌های استفاده شده برای مدل‌سازی مصالح در جدول (۳) آورده شده است. با توجه به اینکه در مدل‌ها آزمایشگاهی ساخته شده، جداره‌های قائم بدون جا به جایی افقی بوده و تنها امکان جا به جایی قائم را دارند، در مدل‌سازی عددی نیز در مرزهای قائم، جا به جایی‌های افقی محدود شده‌اند. در مرز پایین مدل نمونه نیز از جا به جایی‌های افقی و قائم جلوگیری شده است. در نرم‌افزار Plaxis، برای مش‌بندی، المان‌های مثلثی ۶ و ۱۵ گرهی وجود دارد، که در این پژوهش از المان‌های ۱۵ گرهی استفاده شده است. کاربرد این المان‌ها موجب محاسبه دقیق تنش‌ها و بارهای گسیختگی شده و نتایج دقیق‌تری را نسبت به المان‌های ۶ گرهی ارائه می‌دهد [۲۳]. ارزیابی‌های اولیه مدل، به منظور تعیین تعداد المان‌های بهینه و اندازه آنها، نشان داد که تغییرات اندازه المان‌ها حداکثر ۰/۰۴٪ بر روی نتایج تأثیر دارد. به همین دلیل به منظور افزایش سرعت محاسبات، از المان‌های با اندازه متوسط برای مش‌بندی استفاده شده است.

برای مشخص کردن اندرکنش ستون شفته آهکی و خاک در فصل مشترک آنها، باید از المان سطح مشترک استفاده شد. در این نرم‌افزار، برای تعیین رفتار سطوح مشترک، از ضریب مقاومت سطح مشترک ( $R_{inter}$ ) استفاده می‌شود. این پارامتر مقاومت فصل مشترک مصالح را به صورت ضریبی از ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اطراف در نظر می‌گیرد [۲۳]. برای تعیین  $R_{inter}$  در این مقاله، نمونه‌هایی مکعبی مرکب از شفته آهک متراکم و خاک رس به ابعاد  $50 \times 50 \times 25$  mm با شرایط استفاده شده در مدل‌سازی آزمایشگاهی، ساخته شده و در دستگاه برش مستقیم در شرایط بارگذاری تند، تحت



شکل (۲) منحنی دانه‌بندی ماسه خوب دانه‌بندی شده رس دار استفاده شده برای ساخت ستون‌های شفته آهکی متراکم

جدول (۴) ویژگی‌های شیمیایی آهک شکفته استفاده شده برای

ساخت ستون‌ها

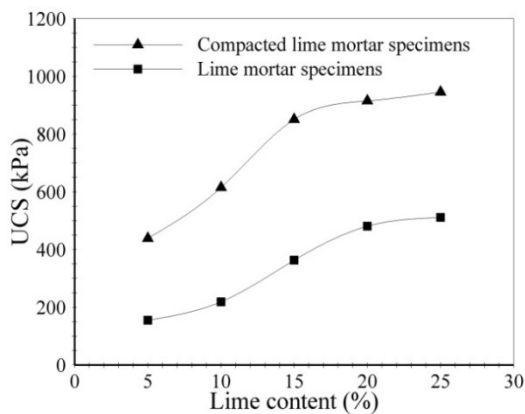
پارامتر شیمیایی	مقدار بر حسب درصد وزنی آهک (%)
اکسید کلسیم (CaO)	۷۳/۷۰
اکسید منیزیم (MgO)	۱/۶۲
اکسید سیلیسیم (SiO <sub>2</sub> )	۱/۱۵
اکسید آهن (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۰/۲۴
اکسید آلومینیم (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	۰/۱۱
اکسید گوگرد (SO <sub>3</sub> )	۰/۰۱۵
منگنز (Mn)	۰/۰۰۵
کلرید (Chloride as NaCl)	۰/۰۱۱
افت وزنی در اثر احتراق	۲۳/۱۵

## ۶- آنالیز اجزاء محدود

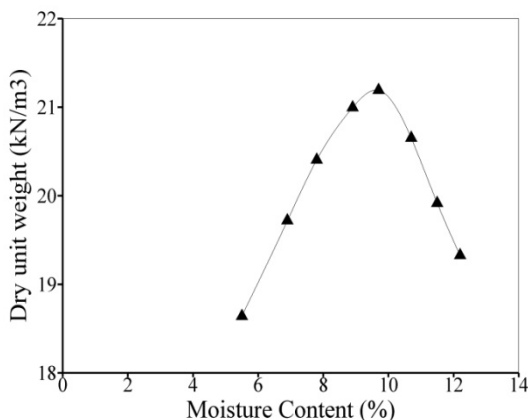
مدل‌سازی عددی نمونه‌ها به روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار Plaxis V8.2 انجام گرفته است. از این نرم‌افزار به دلیل محیط گرافیکی ساده، قابلیت مدل‌کردن تمامی مدل‌های رفتاری خاک و پدیده‌های ژئوتکنیکی و توانایی و دقت بالای آن در آنالیز پایداری و تحلیل تغییر شکل‌ها در مسائل مربوط به مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است. نمونه‌ها به روش تقارن محوری و با در نظر

1- Mohr- Coulomb  
2- linear elastic

مخصوص خشک ماکزیمم<sup>۱</sup> است. به همین منظور قبل از ساخت نمونه‌ها، برای هر حالت آزمایش تراکم اصلاح شده طبق استاندارد ASTM D 1557 انجام شده و رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم آن مشخص شد [۲۴]. با توجه به اینکه برای ساخت نمونه‌های اصلی، از شفته‌های متراکم با ۱۵٪ آهک و ۱۸٪ رس استفاده می‌شود، نتایج آزمایش تراکم برای این وضعیت در شکل (۴) آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود میزان رطوبت بهینه برابر ۹/۷۰٪ و وزن مخصوص خشک ماکزیمم برابر  $21/20 \text{ kN/m}^3$  است.



شکل (۳) مقایسه مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های شفته‌آهکی متراکم و دوغابی با تغییرات درصد آهک



شکل (۴) نتایج آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های شفته‌آهکی متراکم حاوی ۱۵٪ آهک و ۱۸٪ رس

آزمایش قرار گرفته‌اند. با تحلیل نتایج به دست آمده، ضریب  $R_{inter}$ ، ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است.

## ۷- نتایج و بحث

### ۷-۱- نتایج آزمایش‌های ابتدایی

ملک‌پور و توفیق برای ساخت ستون‌های شفته آهکی، از شفته به صورت دوغاب با رطوبت ۳۴٪ استفاده کرده بودند [۱۹]. تعدادی نمونه شفته‌آهکی در قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ cm و طول ۲۰ cm برای مقایسه رفتار مقاومتی نمونه‌های شفته‌آهکی به صورت دوغابی و به صورت تراکمی، ساخته شدند. برای ساخت این نمونه‌ها از ترکیب ماسه خوب دانه‌بندی شده رس‌دار (SW-SC) با درصدهای آهک ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵، استفاده شده و پس از ۲۸ روز زمان گیرش، تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش‌ها در شکل (۳) آورده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌های شفته‌آهک متراکم در مقایسه با نمونه‌های دوغابی، مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال این افزایش مقاومت برای نمونه‌های حاوی ۱۵٪ آهک، بیش از ۲ برابر است. همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، برخلاف نمونه‌های ساخته شده به صورت دوغابی، در نمونه‌های متراکم، اختلاف مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد آهک، کم و برابر با ۷٪ بوده و به همین دلیل برای ساخت ستون‌ها در نمونه‌های مرکب، از ۱۵٪ آهک استفاده شده است. برای واکنش بهتر آهک با مصالح مورد استفاده برای ساخت شفته‌آهک، نیاز به درصد بهینه رس می‌باشد. با توجه به مطالعات قبلی، دانه‌بندی خاک مورد استفاده برای ساخت ستون اصلاح شده و میزان رس آن به ۱۸٪ رسانده شده است [۱۹]. برای ساخت هرکدام از نمونه‌های شفته‌آهکی متراکم، نیاز به مشخص بودن رطوبت بهینه و وزن

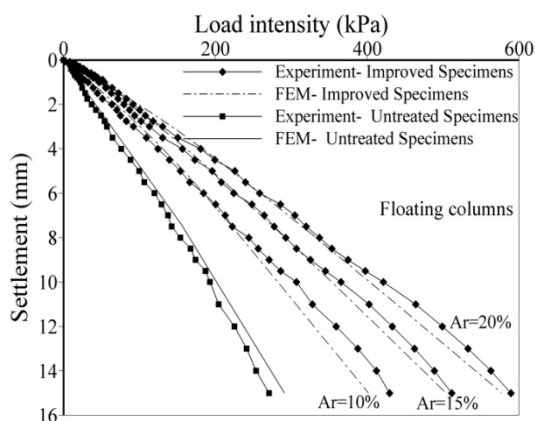
1- maximum



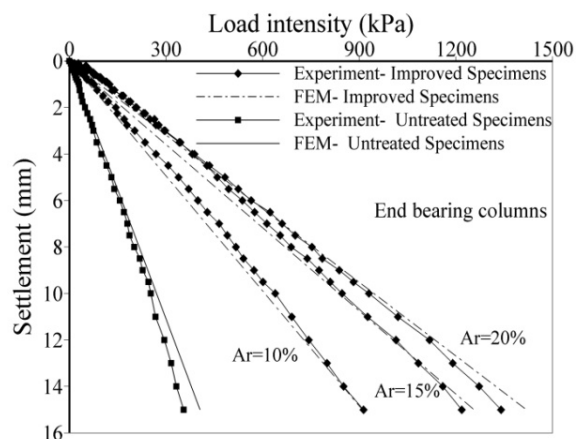
## ۷-۲- نتایج آزمایش‌های اصلی

نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های مرکب<sup>۱</sup> از ستون شفته‌آهکی متراکم و خاک رس اطراف آن، برای دو حالت ستون با تکیه‌گاه انتهایی و ستون شناور برای مقادیر مختلف نسبت مساحت در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده است. همان‌گونه که بیان شد، به‌منظور شبیه‌سازی رفتار ستون‌ها در عمل، بارگذاری بر روی کل نمونه صورت گرفته است. در حالتی که کل نمونه تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، به‌دلیل فشار جانبی دیواره‌های قالب آزمایش، گسیختگی در نمونه اتفاق نیفتاده و به‌همین دلیل، بار تا رسیدن نمونه‌ها به نشست ۱۵ mm، بر آنها اعمال شده است. نتایج حاصل از مدلسازی عددی نیز در شکل‌ها آورده شده است. تغییرات فاکتور بهبود سختی خاک  $(B)$ ، که به‌صورت نسبت سختی زمین اصلاح شده به سختی زمین نیافتاده تعریف می‌شود، با تغییرات نسبت مساحت، در شکل (۷) نمایش داده شده است.

خاک‌های ریزدانه نرم می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که برای نمونه‌های با نسبت مساحت ۱۰ درصد و ستون شناور، سختی زمین  $1/6$  برابر شده است، که این مقدار برای حالت ستون با تکیه‌گاه انتهایی بیش از  $2/5$  برابر است. افزایش مقاومت نمونه‌های اصلاح شده با ستون‌های شناور و نسبت‌های مساحت ۱۵ و ۲۰ درصد، به‌ترتیب  $1/9$  و  $2/15$  برابر است و این مقادیر برای ستون‌های با تکیه‌گاه انتهایی نیز برابر با  $3/4$  و  $3/75$  است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت مساحت، ظرفیت باربری زمین افزایش می‌یابد، ولی با افزایش نسبت مساحت به‌بیش از ۱۵٪، نرخ تغییرات مقاومت، کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، اختلاف ضرایب اصلاح سختی خاک در شرایط یکسان و برای نسبت‌های مساحت ۱۰ و ۱۵ درصد و ستون‌های با تکیه‌گاه انتهایی ۳۳٪ بوده و این اختلاف برای نسبت مساحت‌های ۱۵ و ۲۰ درصد، ۱۰٪ است. مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی آزمایشگاهی و مدلسازی عددی نشان می‌دهد که انطباق خوبی بین نتایج وجود داشته و بیشینه اختلاف بین آنها ۱۱٪ و به‌طور میانگین این اختلاف کمتر از ۶٪ است.



شکل (۶) رفتار شدت بار - نشست نمونه‌های مرکب حاوی ستون‌های شناور با تغییرات نسبت مساحت



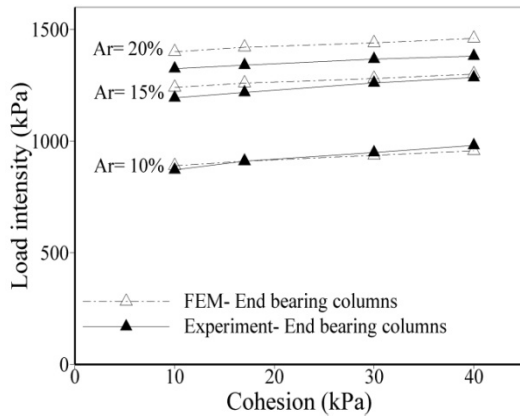
شکل (۵) رفتار شدت بار - نشست نمونه‌های مرکب حاوی ستون‌های با تکیه‌گاه انتهایی با تغییرات نسبت مساحت

همان‌گونه که شکل‌ها نشان می‌دهد، ستون‌های شفته‌آهکی متراکم موجب افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست

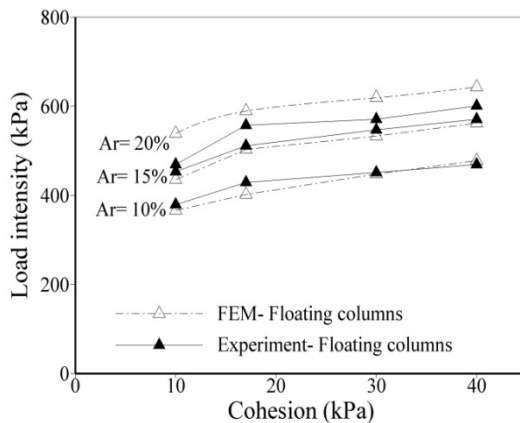
در پروژه‌های اجرایی، باید با در نظر گرفتن ظرفیت باربری

1- composite specimens  
2- stiffness improvement factor

نتایج بیشینه ۲٪ است. با افزایش نسبت مساحت، اختلاف بین دو مدل مشهودتر شده و برای نسبت‌های مساحت ۱۵ و ۲۰ درصد، بیشینه اختلاف به ترتیب برابر با ۴ و ۶ درصد است.



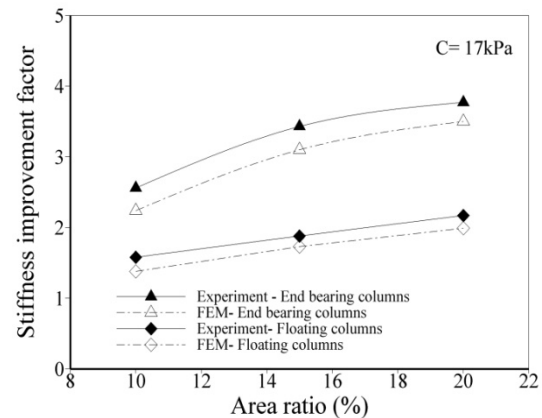
شکل (۸) مقادیر شدت بار با تغییرات چسبندگی خاک اطراف ستون برای نمونه‌های مرکب حاوی ستون‌های با تکیه‌گاه انتهایی



شکل (۹) مقادیر شدت بار با تغییرات چسبندگی خاک اطراف ستون برای نمونه‌های مرکب حاوی ستون‌های شناور

با مقایسه شکل (۸) و (۹) می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تغییرات چسبندگی خاک، بر روی رفتار مقاومتی نمونه‌های حاوی ستون‌های شفته‌آهکی شناور بیشتر از ستون‌های با تکیه‌گاه انتهایی تأثیر دارد. با افزایش چسبندگی و تراکم خاک رس، مقاومت نوک ستون‌های شناور بیشتر شده و در نتیجه ظرفیت باربری آنها افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج

مورد نیاز خاک، مقدار نشست مجاز فونداسیون، شرایط بارگذاری، ابعاد هندسی ستون و غیره، نسبت مساحت منطقی و بهینه را استفاده کرد. استفاده از ستون‌های سنگی متداول برای اصلاح خاک‌های نرم و سست، حداقل نسبت مساحت مورد نیاز، ۲۵٪ پیشنهاد شده است [۲۵].



شکل (۷) تغییرات فاکتور اصلاح سختی خاک در مقابل تغییرات نسبت مساحت

شکل‌های (۸) و (۹) مقادیر شدت بار را برای چسبندگی‌های متفاوت خاک اطراف ستون و نسبت‌های مساحت مختلف برای ۲ حالت ستون‌های با تکیه‌گاه انتهایی و ستون‌های شناور نشان می‌دهد. با توجه به رفتار خطی نمونه‌ها تحت بارگذاری، نمودارها به صورت تغییرات مقادیر شدت بار (متناظر با نشست ۱۵ mm) با افزایش چسبندگی نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۸) دیده می‌شود، در نمونه‌های حاوی ستون‌های با تکیه‌گاه انتهایی، تأثیر تغییرات چسبندگی خاک اطراف بر روی ظرفیت باربری نمونه بسیار کم بوده و با افزایش چسبندگی خاک از ۱۰ kPa تا ۴۰ kPa، برای نسبت‌های مساحت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، شدت بار به ترتیب فقط ۱۱، ۷ و ۴ درصد افزایش یافته است. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که در نسبت مساحت ۱۰ درصد، نتایج بسیار نزدیک به هم بوده و اختلاف بین

ستون‌ها برای اصلاح رفتار خاک‌های ریزدانه بسیار نرم است. برای نسبت‌های مساحت ۱۵ و ۲۰ درصد نیز رفتار مشابهی دیده شده است.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج یک مدلسازی آزمایشگاهی و عددی انجام شده روی بررسی رفتار زمین‌های ریزدانه نرم اصلاح شده با استفاده از ستون‌های شفته‌آهکی متراکم ارائه شد. نمونه‌های آزمایشگاهی در ابعاد بزرگ و با استفاده از تئوری سلول واحد ساخته شده و با ارزیابی تاثیر پارامترهای متعدد تحت بارگذاری قرار گرفتند. مدلسازی عددی نمونه‌ها نیز به روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS V8.2 صورت گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده و بحث‌های ارائه شده، موارد زیر را می‌توان نتیجه‌گیری کرد:

۱. آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های شفته‌آهکی نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته شده به روش تراکمی تقریباً ۲ برابر مقاومت نمونه‌های شفته‌آهکی دوغابی است. به همین دلیل برای ساخت ستون‌های استفاده شده در نمونه‌های مرکب، از روش تراکمی استفاده شد.

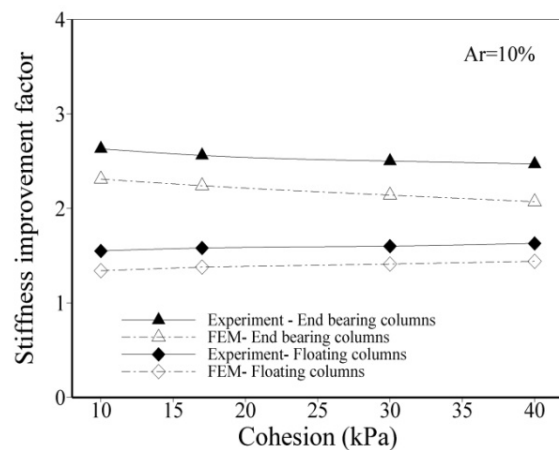
۲. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ستون‌های شفته‌آهکی شناور با نسبت‌های مساحت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، مقاومت زمین‌های نرم را به ترتیب ۶۰٪، ۹۰٪ و ۱۱۵٪ افزایش می‌دهند. این مقادیر برای ستون‌های دارای تکیه‌گاه انتهایی به ترتیب برابر با ۱۵۰٪، ۲۴۰٪ و ۲۷۵٪ است.

۳. بررسی تاثیر تغییرات چسبندگی خاک اطراف ستون روی مقاومت نمونه‌های مرکب اصلاح شده با ستون‌های شناور، نشان داد که مقادیر  $\beta$  با افزایش چسبندگی خاک، حدود ۵٪ افزایش می‌یابند. برای نمونه‌های حاوی

نشان می‌دهد که مقادیر شدت بار با تغییرات چسبندگی خاک، بین ۵٪ تا ۱۱٪ برای نسبت‌های مساحت مختلف تغییر می‌کند.

همان‌گونه که گفته شد در ستون‌های سنگی معمولی، تغییرات ظرفیت باربری ستون‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای متأثر از مقاومت برشی خاک اطراف بوده و در خاک‌های بسیار نرم، ستون در بارهای بسیار کم و در اثر کمانش جانبی دچار گسیختگی می‌شود [۸].

شکل (۱۰) مقادیر  $\beta$  را با تغییرات چسبندگی خاک برای نسبت مساحت ۱۰ درصد نمایش می‌دهد.



شکل (۱۰) تغییرات فاکتور اصلاح سختی خاک در مقابل چسبندگی خاک اطراف ستون برای نسبت مساحت ۱۰ درصد

همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، مقادیر  $\beta$  با افزایش میزان چسبندگی خاک، تغییرات اندکی داشته و نمودارها به صورت خطی با شیب بسیار کم است. در نمونه‌های حاوی ستون‌های شناور، با افزایش چسبندگی خاک از ۱۰ تا ۴۰ kPa، فاکتور سختی خاک ۵٪ افزایش یافته است، که دلیل آن تاثیر مثبت چسبندگی خاک بر روی مقاومت نوک ستون‌ها است. برای نمونه‌های دارای ستون‌های با تکیه‌گاه انتهایی، با افزایش چسبندگی، مقدار  $\beta$  حدوداً ۶٪ کاهش یافته است، که این امر نشان‌گر مناسب بودن این

- [9] Ambily, A. P., and Gandhi, S. R.; "Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis"; *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, Vol. 133, No. 4, pp. 405- 415, 2007.
- [10] DiMaggio, J. A.; " Stone columns for highway construction"; Technical Report No. FHWA-DP-46-1, U.S. Department of Transport, Federal Highway Administration, 1978.
- [11] Wu, C. S., and Hong, Y. S.; "The behavior of a laminated reinforced granular column"; *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 26, pp. 302-316, 2008.
- [12] Wu, C. S., Hong, Y. S., and Lin, S. C.; "Axial stress-strain relation of encapsulated granular column" ; *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, pp. 226-240, 2009.
- [13] Kempfert, H. G., and Gebreselassie B.; "Excavations and Foundations in Soft Soils"; Springer Press, Berlin, 2006.
- [14] Indian Standard (IS); "Indian standard code of practice for design and construction for ground improvement guideline"; Part 1: Stone columns, IS 15284, New Dehli, India, 2003.
- [15] McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A., and Graham, J.; "Modeling vibrated stone columns on soft clay"; *Geotechnical Engineering Journal*, Vol. 157, No. 3, pp. 137- 149, 2004.
- [16] FGSV (Forschungsgesellschaft f. Straßen- und Verkehrswesen); "Merkblatt für die Untergrundverbesserung durch Tiefenrüttler"; Klön, 1979.
- [17] Gniel, J., and Bouazza, A.; "Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns"; *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 27, No. 3, pp. 167-175, 2009.
- [18] Kempfert, H. G.; "Ground improvement methods with special emphasis on column-type techniques"; *In: Proceedings of International Workshop on Geotechnics of Soft Soils- theory and practice*, pp. 101-112, 2003.
- [19] Malekpoor, M. R., and Toufigh, M. M.; "Laboratory study of soft soil improvement using lime mortar-(well graded) soil columns"; *Geotechnical Testing Journal (ASTM)*, Vo. 16, No. 3, pp. 1-11, 2010.
- [20] Pribe, H. J.; "The design of vibro replacement"; *Ground Engineering*, Vol. 28, No. 12, pp. 31- 37, 1995.
- [21] Groughnour, R. R. ; "Settlement of vertically loaded stone columns in soft ground"; *Proceeding of the eighth European Conference on Soil Mechanics, and Foundation Engineering*, Helsinki, Finland, pp. 235-240, 1983.

ستون‌های با تکیه‌گاه انتهایی، با افزایش چسبندگی خاک از ۱۰ kPa تا ۴۰ kPa، فاکتور  $\beta$ ، ۶٪ کاهش می‌یابد.

۴. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی، نشان داد که انطباق خوبی بین نتایج وجود داشته و میانگین اختلاف بین نتایج ۶٪ است.

## ۹- مراجع

- [۱] مهرابی داودآبادی، م.، و توفیق، م. م.؛ "استفاده از آنالیز ابعادی به‌منظور تبدیل نتایج آزمایشگاهی ستون سنگی به ابعاد واقعی"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ۱۳۸۹، صفحات ۸، ۳۹ و ۴۰.
- [2] Engelhardt, K., Flynn, W. A., and Bayuk, A. A.; "Vibro- replacement method to strengthen cohesive soils in situ"; *ASCE National Structure Engineering Meeting*, Cincinnati, 1974.
- [3] Shahu, J. T., Hayashi, S., and Madhav, M. R.; "Analysis of soft ground reinforced by non-homogeneous granular pile- mat system"; *Lowland Technology International Journal*, Vol. 2, No. 2, pp. 71-82, 2000.
- [4] Mitchell, J. K., and Huber, T. R.; "Performance of a stone column foundation" ; *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, Vol. 111, No. 2, pp. 205- 223, 1985.
- [5] Han, J., and Ye, S. L.; "Performance of stone column reinforced foundations - a case study"; *Journal of Geotechnical Investigation and Surveying*, No. 5, 1990 (in Chinese).
- [6] Han, J., and Ye, S. L. ; "Measured stresses and pore water pressures in the stone column reinforced foundation under a building loading" ; *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 15, No. 5, 1993 (in Chinese).
- [7] Kamon, M.; "Recent developments of soil improvement"; *Proceedings of International Symposium on Soil Improvement and Pile Foundation*, Nanjing, China, Vol. I, pp. 1-16, 1992.
- [8] Hu, W.; "Physical modeling of group behavior of stone column foundations"; Ph.D. Thesis, University of Glasgow, Glasgow, Scotland, 1995.

- [24] ASTM D1557; "Test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort"; *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [25] Wood, D. M., Hu, W., and Nash D. F. T.; "Group effects in stone column foundations: model tests"; *Geotechnique*, Vol. 50, No. 6, pp. 689- 698, 2000.
- [22] Shivashankar, R. D., Dheerendra M. R., Sitaram N., and Rajathkumar, V. ; "Experimental studies on behavior of stone columns in layered soils"; *Geotechnical Geological Engineering*, Vol. 29, pp. 749- 757, 2011.
- [23] Brinkgreve, R. B. J., " Plaxis user's manual- version 8.2", Delft University of Technology and PLAXIS b.v., The Netherlands, ISBN 905895088, 2002.

# Experimental and Numerical Modeling of Soft Soil Improvement using Compacted Lime Mortar Columns

M.R. Malekpoor<sup>1</sup>, Gh.R. Poorebrahimi<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, University of Kerman, Kerman, Iran

2- Assistant Prof., Department of Civil Engineering, University of Kerman, Kerman, Iran

gh.r.poorebrahim@yahoo.com

## Abstract:

Construction of roads, railways and other engineering structures over soft soils usually involves consideration of excessive settlements, deformations, and stability problems. To avoid or reduce such problems, several ground improvement techniques are available including the use of column type elements. Stone columns represent the most known column-type techniques for improving soft soils. It is well established that the stone columns derive their load carrying capacity from the lateral confining pressure provided by surrounding soil. Since intermediate layers consisting of organic or very soft to soft soils can not provide proper lateral support to the stone columns, the external lateral support can be replaced in these columns by an internal bond between the stones. This can be done by applying binders such as lime during the installation of the stone/gravel columns, which bind the gravels together and form a solid column. An alternative method is suggested in the present study to improve the performance of stone columns in soft soils by using compacted lime mortar columns. Laboratory tests are carried out on large scale composite specimens composing of compacted lime mortar columns and soft clay surrounding it. Experiments were carried out on the both end bearing and floating columns with dimensions of 100 mm diameter, and 600 mm height. The columns were surrounded by soft soil in cylindrical tanks of 600 and 800 mm height, and a diameter varying from 230 to 320 mm to represent the required unit cell area of soft soil around each column assuming triangular pattern of installation of columns. In the field, the entire of the column treated ground will be subjected to loading from the superstructure. The same was simulated in the laboratory by loading the entire area of the specimen to study the stiffness of improved ground with regard to the influence of different parameters such as: area ratio (as the ratio of the area of the column ( $A_s$ ) to the total area within the unit cell ( $A$ )), and shear strength of the clay. Finite element analyses have also been performed with the software package PLAXIS V 8.2 using 15-noded triangular elements. Tests results show that compacted lime mortar columns exhibit a stiffer and stronger response compared to conventional stone columns installed in soft soils. These columns improve the load carrying capacity and decrease the settlement of soft soils. The performance of these columns is significantly enhanced by increasing the area ratio. However, when the area ratio exceeds 15%, the rate of increment of the load carrying capacity is negligible. When the entire area of the composite specimens is loaded, because of the confining effect of the boundary of the unit cell, failure does not take place even for settlement as high as 15 mm. Comparison of numerical and experimental data shows a good agreement between the results.

**Keywords:** soft soils, stone columns, lime, load intensity, settlement.