



هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل  
۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ماه ۱۳۹۳



## ارزیابی تأثیر ستون‌های ماسه آهکی در مشخصه‌های مکانیکی خاک‌های رسی نرم با استفاده از آزمایش سه‌محوری استاتیکی

مهدی اثنی‌عشری<sup>۱</sup>، مهدی زارعی<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

Esna\_ashari@basu.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

Mehdi\_z\_ir90@yahoo.com

### خلاصه

ستون‌های سنگی به عنوان گزینه‌ای جهت اصلاح ظرفیت باربری خاک‌های رسی و ماسه‌ای سست و کاهش نشست در سازه‌های احداث شده بر این خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی به دست آمده از رفتار نمونه‌های مسلح شده با ستون ماسه‌ای و ماسه آهکی در دستگاه سه‌محوری با قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول ۲۰ سانتی‌متر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. هدف از آزمایش‌های به عمل آمده بررسی تغییرات قطر، طول ستون‌ها و همچنین اثر میزان تراکم در اصلاح خصوصیات مهندسی خاک سست رسی بوده است. در این پژوهش دو سری نمونه ساخته شده است. سری اول، نمونه‌های مسلح شده با ستون ماسه‌ای با قطر ۳/۲ سانتی‌متر و طول‌های متغیر ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و سری دوم نمونه‌های مسلح شده با ستون‌های ماسه آهکی با قطرهای متغیر ۳/۲ و ۲/۵ سانتی‌متر با همان طول‌ها می‌باشد. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقاومت دربارگذاری محوری و سختی نمونه‌های مسلح شده در مقایسه با خاک رسی غیر مسلح افزایش یافته است. این افزایش تابع طول ستون‌ها است. به طوری که با افزایش طول ستون‌ها تا حدود پنج برابر قطر، تنش انحرافی تغییری نمی‌کند. از دیگر نتایج این پژوهش نیز می‌توان به افزایش اندک مقاومت در نمونه‌ها اشاره نمود که حاصل افزایش قطر ستون‌های ماسه آهکی بوده است.

**کلمات کلیدی:** ستون‌های ماسه‌ای، خاک رس نرم، اصلاح خاک.

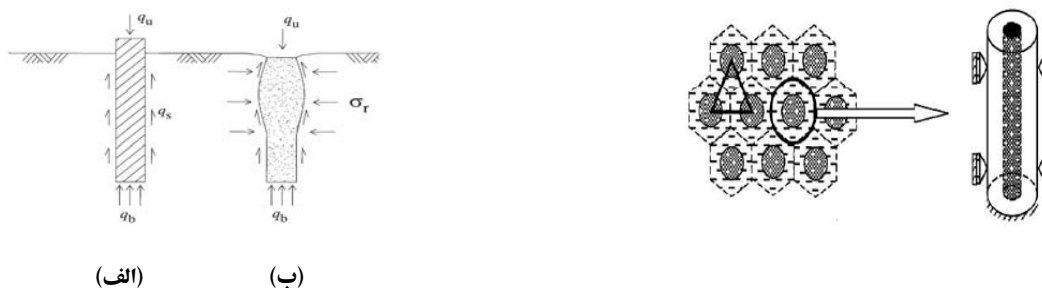
## مقدمه

رشد زیرساخت‌ها در مناطق شهری و کلان‌شهرها منجر به افزایش چشمگیر ارزش زمین و فقدان مکان‌های مناسب برای توسعه شده است. این عوامل موجب می‌شود که صنعت ساختمان‌سازی به دنبال زمین‌های ارزان برای احداث ساختمان باشد، در نتیجه ساختمان بر خلاف تمایل قبلی و به سبب اندیشه اقتصادی برای توسعه بر روی زمین‌های سست اجرا می‌گردد. این گونه زمین‌ها اغلب به سبب مقاومت کم، دارای خصوصیت‌های ژئوتکنیکی نامناسبی هستند. تاکنون تکنیک‌های متعددی جهت اصلاح خاک‌ها در پروژه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. یک روش مقرون به صرفه و دارای سهولت اجرا، ستون‌های ماسه‌ای می‌باشد. ایده استفاده از ستون‌های ماسه‌ای، اولین بار در اوایل دهه ۱۹۶۰ در کشورهای اروپایی مطرح شد و با استفاده مکرر و موفقیت‌آمیز بودن آن، این روش توسعه پیدا کرده و در کشورهای دیگر به عنوان یک روش اصلاح خاک مورد استفاده واقع شد.

ستون‌های سنگی، ستون‌های قائمی هستند که از مصالح متراکم و خرد شده‌ای همانند شن و یا ماسه تشکیل شده‌اند. آن‌ها در مکان‌هایی در زیر سازه‌های سبک همانند ساختمان‌های کوچک و انبارهای صنعتی که بر روی خاک‌های رسی با  $C_u$  کمتر از ۱۵ کیلو پاسکال بنا شده‌اند، مناسب هستند [۳]. نصب و اجرای ستون‌های سنگی در خاک‌های رسی نرم بسیار متداول و قابل استفاده است، چرا که موجب افزایش ظرفیت باربری، کاهش نشست، کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای در بارگذاری، خصوصاً بارگذاری زلزله می‌شود. درجه بهبود آن به فاکتورهای متعددی از قبیل مقاومت برشی زهکشی نشده، زاویه اصطکاک داخلی خاک و همچنین مشخصات هندسی ستون‌های سنگی بستگی دارد. مشخصه‌های هندسی شامل قطر ستون، فواصل ستون‌ها، نسبت درجه نفوذ ستون به خاک و نسبت مساحت ستون سنگی به سطح خاک می‌باشد [۲]. اثر بهبود و اصلاح خاک را می‌توان با استفاده همزمان ستون‌های سنگی و ژئوتکتایل افزایش داد؛ چراکه این کار باعث یک حمایت جانبی ستون شده و هر قدر میزان سختی ژئوتکتایل بیشتر باشد مقاومت آن هم بیشتر خواهد بود و لذا این سیستم ترکیبی خاک رس، ستون سنگی و ژئوتکتایل قادر به تحمل بار بیشتری خواهد بود و رفتاری تقریباً شبیه به فونداسیون‌های شمعی پیدا می‌کند. ستون‌های سنگی را می‌توان با ژئوگرید مسلح کرد، خصوصاً زمانی که با خاک سستی مواجه شده که  $C_u$  آن کمتر از ۲۰ کیلو پاسکال باشد [۴].

ستون‌های سنگی ظاهراً شبیه به فونداسیون‌های شمعی هستند، اما همانطور که در شکل (۱) آمده است، می‌توان اذعان داشت که فونداسیون‌های شمعی در خاک‌های سست، با عبور از لایه‌های نامناسب بر روی خاک مناسب قرار می‌گیرند و بارهای قابل توجهی را انتقال می‌دهند اما ستون‌های سنگی در خاک‌ها موجب افزایش ظرفیت باربری خاک اطراف می‌شوند، لذا به محض اعمال بار به سرعت تغییر شکل جانبی داده که این عمل موجب اعمال یک فشار جانبی به خاک سست می‌شود. این اعمال فشار در خاک‌های اشباع موجب شروع پدیده تحکیم در خاک رس می‌شود. این عمل تا جایی ادامه خواهد یافت که تعادلی بین ستون‌های سنگی و خاک اطراف صورت پذیرد. نتیجه نهایی آن افزایش مقاومت خاک و افزایش ظرفیت باربری خواهد بود. علاوه بر آن ستون‌های سنگی بر خلاف فونداسیون‌های شمعی، موجب کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای در زمان بارگذاری از طریق زهکش می‌شوند. در مورد گسیختگی ستون‌های سنگی باید اشاره کرد که شکم‌دادگی ستون منجر به گسیختگی آن می‌شود. معمولاً این اثر در قسمت فوقانی ستون (بین دو تا چهار برابر قطر ستون) اتفاق می‌افتد [۵]. این عامل موجب گسیختگی برشی مصالح ستون و یا عامل نفوذ ستون به خاک زیرین (پانچ شدن) خود می‌شود که معمولاً پدیده پانچ-شدگی در ستون‌های کوتاه رخ می‌دهد [۱].

بررسی رفتار ستون‌های سنگی اولین بار در سال ۱۹۷۴ انجام شد. آزمون‌های آزمایشگاهی نیز نشان دادند که ستون سنگی منفرد بر اثر شکم‌دادگی در بخش فوقانی آن گسیخته خواهند شد. بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی تک ستون سنگی، این نتیجه حاصل شد که هر ستون سنگی در گروه ستون سنگی، نیز می‌تواند مستقل از ستون‌های مجاور خود تغییر شکل داده و گسیخته شود، به بیان دیگر در این روش اثر ستون‌ها بر یکدیگر در نظر گرفته نمی‌شود [۵]. این مسئله همان مفهوم روش سلول واحد می‌باشد که در سالیان طولانی مبنای تحلیل و طراحی ستون‌های سنگی بوده است. مطالعه‌های مختلف آزمایشگاهی و عددی نشان دادند که تحلیل و طراحی ستون‌های سنگی بدون در نظر گرفتن اثر ستون‌های مجاور بر هم صحیح نمی‌باشند. بیشتر مطالعه‌های صورت گرفته و تحقیق‌های انجام شده بر روی ستون‌های سنگی، توسط Hughes and Withers, Muir wood et al. و Malarvizh and Ilamparuthi و Mckelvey et al انجام گرفته است. از بین پژوهشگران می‌توان به Hughes et al در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد که برای اولین بار اثر ستون‌های سنگی را در آزمایش سه محوری مورد ارزیابی قرار دادند. از انواع دیگر ستون‌های خاکی می‌توان ستون‌های ماسه آهکی را نام برد که تاکنون تحقیقات زیادی بر روی این دسته از ستون‌ها صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش از ستون‌های ماسه آهکی جهت مسلح کردن خاک رس استفاده شده است.



شکل ۲- مفهوم سلول واحد

شکل ۱- الف) فونداسیون‌های شمعی  
ب) ستون‌های سنگی (Hughes and withers 1974)

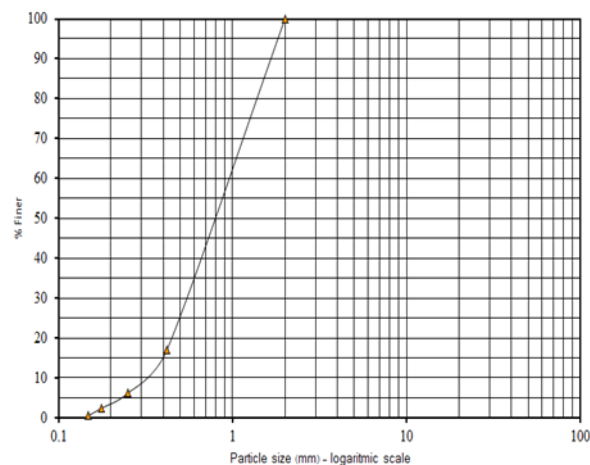
### مصالح

در این بخش ابتدا به مشخصات مصالح در آزمایش سه‌محوری اشاره می‌گردد، سپس نتایج آزمایش‌های مقدماتی که بر اساس استانداردهای ASTM بر روی این مصالح انجام گرفته ارائه خواهد شد. مصالح مصرفی در این پژوهش شامل خاک رس، خاک ماسه‌ای و آهک می‌باشد. خاک رس مورد استفاده در این پژوهش از شهرستان لالچین واقع در استان همدان تهیه شد و این خاک بر اساس طبقه‌بندی متحد خاک‌ها، CL نامگذاری شده که مشخصه‌های آن در جدول (۱) آمده است. خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش که برای ساخت ستون‌های مسلح کننده استفاده شده بود بر اساس طبقه‌بندی متحد خاک‌ها، SP نامگذاری شده است. مشخصات ماسه مورد نظر در جدول (۱) و همچنین دانه بندی آن در شکل (۳) آمده است.

جدول ۱- مشخصات خاک مورد آزمایش

	مشخصات خاک رس	مشخصات خاک ماسه‌ای
LL	۳۵	-
PL	۱۸	-
PI	۱۷	-
G <sub>s</sub>	۲/۷	۲/۶۸

شکل ۳- دانه‌بندی خاک ماسه‌ای



## نمونه‌سازی

چنانچه گفته شد در این پژوهش از دو سری نمونه استفاده شده، که سری اول نمونه‌های غیر مسلح رسی و سری دوم نمونه‌های مسلح شده با ستون‌های ماسه‌ای و ماسه آهکی می‌باشند.

### ۱- نمونه‌های رسی غیر مسلح

برای ساخت نمونه‌های رسی غیر مسلح ابتدا خاک مورد نظر را از الک ۲۰۰ عبور می‌دهیم. سپس توسط یک آبپاش سطح نمونه را مرطوب کرده و نمونه را با آب مخلوط می‌کنیم. برای این کار رطوبتی در حدود ۱۰ درصد در چند مرحله به خاک اضافه می‌شود. سپس آن را مخلوط نموده تا نمونه همگنی بدست آید. پس از اینکه خاک با آب به خوبی مخلوط شده، نمونه با  $Y_h=1/4$  با استفاده از یک قالب پلاستیکی ساخته می‌شود. این قالب را پس از قرار دادن غشاء و اورینگ‌هایی که جهت آب بندی نمونه استفاده شده با دو بست فلزی بر روی پایه محکم نموده و سپس نمونه خاک رس در ۱۰ لایه ۲ سانتی متری تراکم و آماده می‌گردد.

### ۲- نمونه رسی مسلح شده با ستون ماسه‌ای

در این پژوهش جهت ساخت ستون‌های ماسه‌ای، در وسط نمونه رسی از یک لوله PVC با قطر لازم استفاده گردیده است. بدین منظور ابتدا لوله را در محل خود قرار داده و سپس خاک اطراف آن ریخته و متراکم می‌کنیم و در ادامه با بالا آوردن تدریجی لوله، ساخت ستون ماسه‌ای کامل می‌گردد. برای این کار پس از قرار دادن غشاء، اورینگ و قالب در محل خود لوله‌ای به قطر  $3/2$  سانتی متر در وسط قالب قرار داده و خاک رس را در اطراف لوله پلاستیکی می‌سازیم. بعد از اتمام این عمل نوبت به ساخت ستون‌های ماسه‌ای می‌رسد. جهت ساخت ستون‌های ماسه‌ای، ۱۰ درصد خاک رس که در ادامه مطالب علت آن گفته خواهد شد، با آن مخلوط و مقداری آب در حدود ۱۰ درصد به آرامی به آن اضافه می‌کنیم تا مخلوط همگنی بدست آید. در حین ساخت لوله پلاستیکی را به آرامی بالا کشیده و خاک ماسه‌ای را جایگزین می‌کنیم. ضمناً باید اشاره کرد با توجه به اینکه یک‌سری آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های مسلح شده با ستون ماسه آهکی انجام شده و برای انجام واکنش-های شیمیایی آهک مصرفی در ستون‌های ماسه آهکی، درصدی خاک رس به اجزاء تشکیل دهنده ستون ماسه آهکی اضافه شده است و با توجه به اینکه مقایسه‌ای قرار است بین ستون‌های ماسه‌ای و ماسه آهکی صورت پذیرد، بنابراین در این پژوهش به مصالح ستون ماسه‌ای نیز ۱۰ درصد خاک رس اضافه شده است تا به لحاظ اجزاء تشکیل دهنده یکسان باشند.

### ۳- نمونه رسی مسلح شده با ستون ماسه آهکی

همانطور که گفته شد از ستون‌ها به عنوان اجزاء مسلح کننده استفاده می‌کنیم. یکی از این اجزاء، ستون‌های ماسه آهکی هستند که این ستون‌ها در دو قطر متفاوت و با طول‌های مشابهی همانند ستون‌های ماسه‌ای ساخته می‌شوند. برای ساخت ستون‌های ماسه آهکی تمامی مراحل صورت گرفته در ساخت ستون‌های ماسه‌ای را انجام می‌گردد. با این تفاوت که ستون‌های ماسه آهکی علاوه بر خاک ماسه‌ای و رسی، حاوی ۵ درصد (وزنی) آهک نیز هستند که به اجزای تشکیل دهنده مصالح ستون اضافه می‌گردد. شایان ذکر است به منظور بررسی تاثیر افزودن آهک، در این نمونه‌ها از ستون‌های ماسه-ای با تراکم نسبتاً کم ( $Y_h=1/65$ ) استفاده شده است تا از تفاضل تاثیر تراکم بالا در افزایش مقاومت آن‌ها جلوگیری گردد. تغییر قطر در ستون‌های ماسه آهکی با توجه به اندازه قطرهای اشاره شده در بخش‌های قبل، لوله پلاستیکی مناسبی مطابق اندازه قطر آن استفاده شده است. همچنین در ساخت این نوع ستون، لوله را به آرامی به طور کامل بیرون می‌کشیم و مصالح را از بالا در چند مرحله ریخته و به آرامی متراکم می‌کنیم. بعد از اتمام نمونه‌سازی به انجام آزمایش می‌پردازیم. همانطور که اشاره شد نمونه‌های رسی غیر مسلح و رسی مسلح شده با ستون ماسه‌ای بلافاصله بعد از نمونه‌سازی مورد آزمایش قرار گرفتند، اما نمونه‌های رسی مسلح شده با ستون ماسه آهکی سه روز پس از نمونه‌سازی برای گیرش اولیه و انجام واکنش‌های شیمیایی، مورد آزمایش قرار می‌گیرند.

نمونه‌های رسی غیر مسلح و مسلح شده با ستون ماسه‌ای روی پایه دستگاه سه محوری ولی نمونه‌های رسی مسلح شده با ستون ماسه آهکی در قالبی جدا از پایه ساخته شدند. بعد از اتمام نمونه‌سازی و مستقر کردن آن در دستگاه سه محوری، با اعمال مکش ۱۰ کیلو پاسکال به نمونه، قالب‌ها را باز می‌کنیم و سپس محفظه یا سل سه محوری را روی آن قرار می‌دهیم و آن را با آب پُر می‌کنیم. سپس فشار ۲۰ کیلو پاسکال را به نمونه وارد و سریعاً مکش را قطع می‌کنیم. بعد از این مرحله نوبت به عبور آب جهت اشباع‌سازی نمونه می‌رسد. برای این کار آب هواگیری شده از پایین نمونه وارد و با

حرکت به سمت بالا از آن خارج می‌گردد. این مرحله برای نمونه‌های رسی غیر مسلح زمانی در حدود ۱۲ ساعت و برای نمونه‌های مسلح شده با ستون ماسه‌ای و ماسه آهکی حدود ۴ ساعت به طول انجامید.

بعد از عبور آب، پس فشار (Back pressure) را اعمال می‌کنیم. افزایش آن با افزایش فشار همه‌جانبه همراه است که همان اختلاف اشاره شده در بخش قبل، بین آن‌ها باید باقی بماند. سپس با بستن شیرهای زهکشی، به طوری که هیچ تغییری در فشار داخل نمونه حادث نگردد، فشار محدودکننده را در سه مرحله اضافه می‌کنیم که در مجموع این افزایش ۵۰ کیلو پاسکال می‌باشد. بعد با استفاده از رابطه زیر مقدار B اسکمپتون را بدست می‌آوریم:

$$B = \frac{u}{\Delta\sigma_3}$$

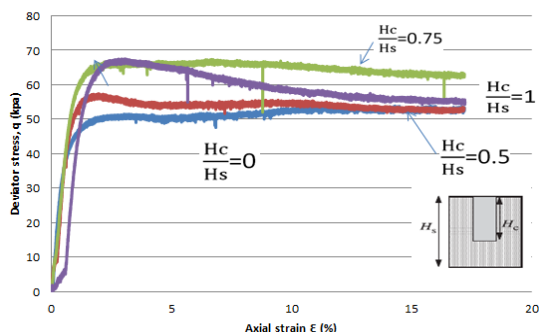
در این پژوهش تمامی نمونه‌ها تحت تنش محدودکننده ۱۰۰ کیلو پاسکال قرار گرفته‌اند و با توجه به اینکه هدف، انجام آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته-زهکشی نشده است، بایستی اضافه فشار آب حفرهای تولید شده در اثر تنش محدودکننده مذکور مستهلک شود. بدین منظور، در حالی که شیرهای زهکشی پایین و بالای نمونه باز است، فشار محدودکننده افزایش و آب خروجی از نمونه درون بورت‌ها انتقال داده می‌شوند. بعد از پایان تحکیم، نمونه برای بارگذاری آماده است. در این پژوهش نرخ بارگذاری ۰/۰۲ میلی‌متر در دقیقه انتخاب شده است و به نمونه‌ها اجازه داده شده که تا کرنش ۱۸ درصد (۳۶ میلی‌متر) پیش بروند.

### تجزیه و تحلیل نتایج

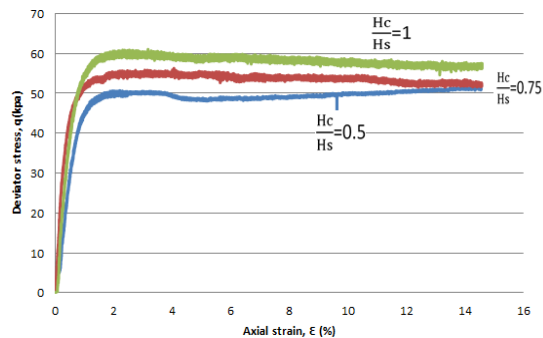
تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها بر اساس سلول واحد که توسط Balaam در سال ۱۹۷۷ توصیه شد، انجام گرفته است. منظور از سلول واحد، همانطور که در بخش‌های قبلی بدان اشاره شد، ستون ماسه‌ای و خاک اطراف را به عنوان یک المان منفرد با توزیع تنش-کرنش یکنواخت در نظر می‌گیرند. چنانچه گفته شد آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی در این پژوهش در شرایط تحکیم‌یافته-زهکشی نشده انجام شده است. نرخ جابجایی (همان نرخ بارگذاری) در این پژوهش ۰/۰۲ میلی‌متر در دقیقه انتخاب شده است و به نمونه‌ها در حدود ۱۸ درصد (۳۶ میلی‌متر نشست)، اجازه کرنش داده شده است. در شکل (۴) رفتار تنش و کرنش خاک رس غیر مسلح و مسلح شده با ستون ماسه‌ای و ماسه آهکی بر حسب قطرها و طول‌های مختلف ملاحظه می‌گردد. در این پژوهش به جهت نامگذاری و مشخصات آزمایش‌ها از دو نمایه که در جدول (۲) آمده است استفاده شده است.

جدول ۲ - نمایه بکار رفته در جهت نامگذاری آزمایش‌ها

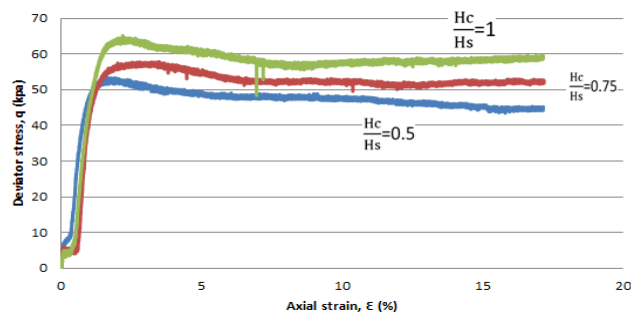
H <sub>C</sub>	ارتفاع ستون مسلح‌کننده
H <sub>S</sub>	ارتفاع نمونه خاک رس که همواره ۲۰ سانتی‌متر است



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- الف) رفتار تنش- کرنش ستون‌های ماسه‌ای به قطر ۳/۲ سانتی متر با نسبت طول‌های متفاوت ب) رفتار تنش- کرنش ستون‌های ماسه‌ای به قطر ۲/۵ سانتی متر با نسبت طول‌های متفاوت ج) رفتار تنش- کرنش ستون‌های ماسه‌ای به قطر ۳/۲ سانتی متر با نسبت طول‌های متفاوت

شکل (۴- الف) نشان می‌دهد که گسیختگی در نمونه رسی غیر مسلح، در تنش انحرافی ۵۰ کیلو پاسکال رخ داده است و با مسلح کردن نمونه‌ها با ستون ماسه‌ای کامل این مقدار به ۶۸ کیلو پاسکال افزایش یافته است که این افزایش در حدود ۳۶ درصد می‌باشد. علاوه بر آن می‌توان به افزایش تنش انحرافی در نمونه‌های مسلح شده با ستون ماسه‌ای با طول‌های ۱۵ و ۱۰ سانتی متر اشاره کرد که به ترتیب، افزایشی در حدود ۱۴ و ۳۶ درصد است. نکته قابل توجه در ستون ماسه‌ای با طول ۱۵ سانتی متری می‌باشد که تفاوتی با نمونه مسلح شده توسط ستون ماسه‌ای با طول ۲۰ سانتی متر نمی‌کند. در نمونه‌های مسلح شده با ستون ماسه‌ای به قطر ۲/۵ سانتی متر که نتایج آن در شکل (۴- ب) آمده است، می‌توان ادعان داشت که در نمونه‌های مسلح شده با طول ۱۰ سانتی متر تقریباً هیچ‌گونه تغییر رفتاری نسبت به خاک رسی غیر مسلح رخ نداده است و در مورد ستون ماسه‌ای به قطر ۱۵ سانتی متری نیز می‌توان اشاره کرد که یک افزایش ۱۴ درصدی رخ داده است.

نمونه‌های مسلح شده با ستون‌های ماسه‌ای، زمانی که با ستون‌هایی به طول ۲۰ و ۱۵ سانتی متری مسلح می‌شوند تنش انحرافی به ترتیب افزایش ۲۸ و ۱۴ درصدی را خواهد داشت. رفتار نمونه‌های مسلح شده با ستون‌های ماسه‌ای به قطر ۱۰ سانتی متر و قطرهای متفاوت (۲/۵ و ۳/۲ سانتی متر) یکسان بوده و همانطور که اشاره شد، تقریباً هیچ‌گونه تغییر رفتاری نسبت به خاک رسی غیر مسلح ندارند. در مقایسه نتایج بدست آمده از تغییرات تنش انحرافی در نمونه‌های مسلح شده با ستون ماسه‌ای و ماسه‌ای با قطرهای مختلف، طول یکسان و اختلاف در انرژی کوبش، متوجه رفتار تقریباً یکسان آن‌ها می‌شویم. این نتیجه بیانگر آن است که با اضافه کردن آهک می‌توان انرژی کوبش را کاهش داد و نتیجه یکسانی با نمونه مسلح شده توسط ستون ماسه‌ای با انرژی کوبش بیشتر بدست آورد.

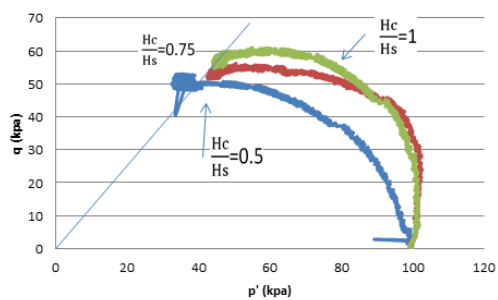
### مقایسه مدول الاستیسیته

در شکل (۴) همانطور که گفته شد، نتایج آزمایش سه‌محوری در تنش هم‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال بر روی نمونه‌های مسلح شده با ستون‌های ماسه‌ای و ماسه‌ای نشان داده شده است. یکی دیگر از پارامترهایی مهمی که می‌توان از روی این شکل‌ها بدست می‌آید مدول الاستیسیته است، چراکه با این پارامتر می‌توان مقدار نشست و تغییر شکل را تخمین زد. در این پژوهش به منظور اثر بخشی ستون‌های مسلح کننده مقایسه‌ای بین آن‌ها صورت گرفته است.

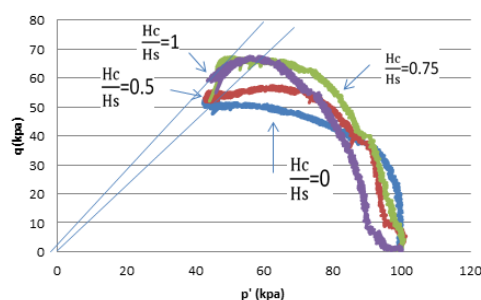
شکل (۴) نشان می‌دهد که با مسلح کردن نمونه‌ها توسط ستون ماسه‌ای و ماسه‌ای مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد و این افزایش در ستون‌ها با طول ۲۰ سانتی متر مشهود است به طوری که در ستون‌های ماسه‌ای به قطر ۲/۵ و ۳/۲ سانتی متر، به ترتیب افزایش ۲۰ و ۳۰ درصدی در مدول الاستیسیته مشاهده می‌شود. در ستون‌های ماسه‌ای به قطر ۱۵ سانتی متر افزایشی ۹ درصدی را می‌توان اشاره کرد و همچنین در ستون‌های ماسه‌ای نیز زمانی که طول ستون ۱۰ و ۱۵ سانتی متر است به ترتیب افزایش ۱۲ و ۳۰ درصدی در مدول الاستیسیته مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه این است که همانطور که در بخش قبل (مقایسه تنش انحرافی) ذکر شد، ستون‌های ماسه‌ای به قطر ۱۰ سانتی متر و قطرهای متفاوت هیچ‌گونه تأثیری روی تنش انحرافی نداشتند و همچنین این بی‌اثر بودن این ستون‌ها در مدول الاستیسیته روشن است.

### مسیر تنش

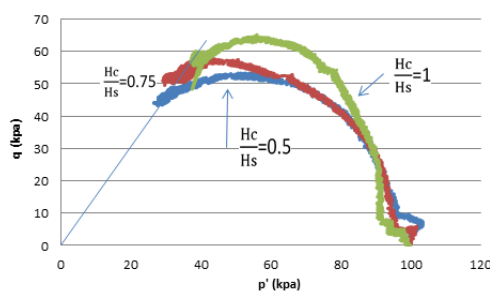
در شکل (۵) مسیر تنش آزمایش سه محوری در حالت زهکشی نشده نشان داده شده است. شکل (۵-الف) نشان می‌دهد که با مسلح کردن خاک توسط ستون‌های ماسه‌ای مقدار  $M$  (شیب نمودار یا  $q/p'$ ) ۲۰ درصد افزایش یافته است که به تبع آن زاویه اصطکاک داخلی موثر بحرانی  $(\Phi_{cr}^1)$  ۱۸ درصد افزایش یافته است. شکل (۵-ب) نشان می‌دهد که نمونه‌های مسلح شده با ستون‌های ماسه آهکی با قطر  $2/5$  سانتی‌متر در هیچ یک از حالات (تغییر طول ستون) مقدار  $M$  افزایش نیافته است و همچنین شکل (۵-ج) رفتار تنش نمونه‌های مسلح شده با ستون ماسه آهکی را نشان می‌دهد که در مقایسه با نمونه غیر مسلح رسی،  $M$ ، ۲۴ درصد و همچنین زاویه اصطکاک داخلی موثر بحرانی ۲۲ درصد افزایش یافته است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵-الف) مسیر تنش ستون‌های ماسه‌ای به قطر  $3/2$  سانتی‌متر با نسبت طول‌های متفاوت (ب) مسیر تنش ستون‌های ماسه آهکی به قطر  $2/5$  سانتی‌متر با نسبت طول‌های متفاوت (ج) مسیر تنش ستون‌های ماسه آهکی به قطر  $3/2$  سانتی‌متر با نسبت طول‌های متفاوت

### نتیجه‌گیری

در این قسمت نتایج پژوهش صورت گرفته بر روی نمونه‌های رسی غیر مسلح و مسلح شده با ستون ماسه‌ای و ماسه آهکی با طول و قطرهای متفاوت که در دستگاه سه محوری تحت شرایط زهکشی نشده مورد آزمایش قرار گرفته‌اند ارائه خواهد شد.

نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

- ستون‌های ماسه‌ای با طول‌های ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر موجب افزایش ۳۶ درصدی تنش انحرافی شده‌اند.
- با افزایش طول ستون ماسه‌ای بیش از ۵ برابر قطر، تنش انحرافی افزایش نمی‌یابد و تغییری در آن حادث نمی‌گردد.
- در نمونه‌های مسلح شده با ستون ماسه آهکی که در دو قطر متفاوت مورد آزمایش قرار گرفته بودند، مقدار افزایش تنش انحرافی با افزایش قطر همراه بوده اما محسوس نمی‌باشد.
- ستون‌های ماسه آهکی با طول ۲۰ سانتی‌متر، تنش انحرافی را در مقایسه با نمونه رسی غیر مسلح تقریباً ۳۰ درصد افزایش داده‌اند.
- ستون‌های ماسه آهکی با کوبش ملایم نتایج یکسانی با ستون‌های ماسه‌ای با کوبش متوسط دارند.
- با اضافه کردن آهک می‌توان انرژی کوبش را کم کرد یا به عبارتی آهک می‌تواند جایگزین کوبش شود.

- با مسلح کردن نمونه‌ها توسط ستون ماسه‌ای مدول الاستیسیته تا ۳۰ درصد افزایش یافته است.
- نمونه‌های ماسه آهکی با طول ۱۰ سانتی‌متر تأثیری بر روی مدول الاستیسیته ندارند.
- در ستون‌های ماسه‌ای مقدار M، ۲۰ درصد افزایش و همچنین زاویه اصطکاک داخلی موثر بحرانی ۱۸ درصد افزایش یافته است.
- ستون‌های ماسه آهکی به قطر ۲/۵ سانتی‌متر مسیر تنش را تحت تأثیر قرار نداده‌اند.
- ستون‌های ماسه آهکی موجب افزایش ۲۴ درصدی M و ۲۲ درصدی زاویه اصطکاک داخلی موثر بحرانی شده‌اند.

## منابع

- [۱] تبرساز، س. و سروش، ع. (۱۳۸۹)، "تحلیل عددی رفتار زمین مسلح شده با گروه ستون سنگی"، مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس، دوره دهم، شماره دوم، ۲۸-۳۷.
- [2] Sivakumar, V., McKelvey, D., Graham, J., and Hughus, D. (2004), "Triaxial tests on model sand columns in clay," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, April, pp. 299-312.
- [3] Kitazume, M. (2004), "The sand compaction pile method", A. A. Balkema Publisher, a member of Taylor and Francis Group Plc, pp. 1-10.
- [4] McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A., and Graham J. (2004) "Modeling vibrated stone columns in soft clay". *Proceedings of the Institute of Civil Engineers Geotechnical Engineering*. Vol. 157, Issue GE3. pp. 137-149.
- [5] Murugesan, S. and Rajagopal, K. (2006) "Geosynthetic-encased stone columns: Numerical evaluation". *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 24, July, pp. 349-358.



