

## ارزیابی شاخص‌های باربری زمین‌های سست به‌سازی شده با گروه ستون سنگی\*

«یادداشت پژوهشی»

سعید غفارپور جهرمی<sup>(۱)</sup> سعید قربان بیگی<sup>(۲)</sup> مجتبی یعقوبی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در مقاله حاضر به روش عددی اجزای محدود، تأثیر عوامل مختلف بر کارایی گروه ستون‌های سنگی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست زمین‌های سست به‌سازی شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تحقیق عوامل مختلفی چون نسبت سطح ستون سنگی، سختی مصالح و مشخصات مقاومتی و مکانیکی ستون سنگی و خاک در مقیاس گروه مورد بررسی قرار می‌گیرد تا میزان تأثیر این عوامل در طراحی و به‌سازی زمین‌های سست مشخص شود. در این مطالعه بیش از ۱۵۰ تحلیل عددی به‌روشنی اجزای محدود در حالات مختلف و با متغیرهای متفاوت برای خاک و ستون سنگی از نظر آرایش، مشخصات هندسی و فنی انجام گرفته است تا تأثیر این متغیرها قابل درک و بیان باشد. یکی از مهم‌ترین اهداف این مقاله بررسی اثرات گروه ستون سنگی و متغیرهای مختلف بر ظرفیت باربری زمین‌های سست به‌سازی شده می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از ستون‌های سنگی تأثیر قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست زمین‌های سست دارد. میزان این افزایش با زیاد شدن نسبت سطح ستون سنگی به خاک به دلیل افزایش برهم‌کنش ستون‌ها تشدید می‌گردد. افزایش ضریب الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی مصالح ستون و هم‌چنین ضریب پواسون خاک در اطراف ستون‌ها، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش ظرفیت باربری دارند درحالی‌که با افزایش نسبت پواسون ستون‌های سنگی، افزایش چندانی در ظرفیت باربری دیده نمی‌شود. هم‌چنین بالا بودن نسبت سطح جایگزینی (نسبت مساحت ستون‌ها به مساحت کل زمین) علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، سبب تشدید شیب تأثیر پارامترهای سختی و مقاومتی خاک و ستون بر افزایش ظرفیت باربری می‌گردد که این موضوع مؤید تأثیر گروه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** به‌سازی خاک، روش اجزای محدود، ستون‌های سنگی، الگوهای شکست، ظرفیت باربری.

### Evaluation of Distinct Factor Affecting the Bearing Capacity in Ground Improvement with Stone Column Group

S. Ghaffarpour Jahromi S. Ghorban Beygi M. Yaaghoobi

**Abstract** Increasing construction industry and the need to build structures on lands that do not have sufficient load-bearing capacity resulted in the development of soil improvement techniques to enhance site capability. The use of stone columns for the ground improvement for reasons such as environmental compatibility, cost effective, minimizing the liquefaction potential of the ground, settlement reduction, increase of the load-bearing capacity and significant reduction in the period of consolidation is considered as one of the most effective soft soil reinforcement methods. Stone columns can be designed to bear on the hard stratum or as a floating system where the toe is embedded in the soft layer. What in recent years were as the basis for designing of groups of stone columns were based on the theories developed for single stone columns ignoring the group interaction. Most of the existing design methods for stone columns adopt unit cell idealization which is not applicable to spread footing. To assess the influence of various parameters on the performance of a group of stone columns, in this paper which is based on the finite element method, the effect of hardness and resistance parameters affecting the load bearing capacity was discussed. More than 140 analyses of different parameters of soil and stone columns were carried out and were discussed in the form of graphs to compare the effects of these parameters. Results showed that using stone columns had a significant impact on increasing the bearing capacity of the soft grounds. The rate of growing enhances with increase of replacement ratio of stone columns into the soft soil due to group interaction. Increase of elasticity and internal friction angle of column materials as well as soil Poisson's ratio have a significant impact on increasing load-bearing capacity on the other hand when Poisson's ratio of stone columns increases any substantial change isn't see. In addition of bearing capacity increase, growth of replacement ratio enhances the impact of strength and stiffness parameters of soil and columns on bearing capacity increase which shows the influence of the group interaction. End bearing columns were observed as a factor influencing the increase of bearing capacity and intensifying the effect of stiffness and strength parameters on column bearing capacity.

**Keywords** Stone Columns, Bearing Capacity, Finite Element Method, Ground Improvement, Group Effect.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۲/۳۱ می‌باشد.

Email: saeed\_ghf@sru.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(۲) استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید بهشتی.

(۳) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

## مقدمه

این ستون‌ها در فواصل معین سبب ایجاد سیستمی مرکب با تراکم‌پذیری کمتر و مقاومت برشی بیشتر نسبت به خاک اولیه می‌شود. این سیستم در هنگام اعمال سربار به آن، به دلیل سختی بالایی که دارد بیشتر نیرو را متحمل می‌شود. البته سختی بالای ستون سنگی به دلیل دورگیری آن توسط خاک اطراف است. بار طراحی هر ستون سنگی مابین ۲۰ تا ۵۰ تن است. ستون سنگی کاربردهای زیادی دارد که از جمله آنها می‌توان به افزایش پایداری شیروانی‌های طبیعی و خاکریزهای دستی، افزایش ظرفیت باربری پی‌ها، کاهش نشست کل و تفاضلی پی‌ها، کاهش پتانسیل روانگرایی ماسه و تسریع در نشست تحکیمی اشاره کرد. ستون‌های سنگی برای شالوده‌سازه‌های مستقر بر بستر رس نرم تا رس سخت و ماسه لای دار سست با ریزدانه بیش از ۱۵ درصد کاربرد فراوانی دارند. اقتصادی‌ترین حالت استفاده از ستون سنگی وقتی است که لایه باربر در عمق ۶ تا ۱۰ متری قرار گرفته باشد. ستون سنگی به‌طور معمول میزان نشست را به ۳۰ تا ۵۰ درصد مقدار اولیه کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از ستون سنگی در خاک‌های دارای مقاومت زهکشی نشده کمتر از ۵۰ kPa تا ۱۰۰ kPa توصیه شده است. باید توجه داشت که در خاک‌های حساس و دارای لزه‌های خاک ارگانیک و نباتی، به دلیل تراکم‌پذیری بالایی که وجود دارد، ستون سنگی محصورشوندگی کمی پیدا می‌کند که می‌تواند منجر به تغییر مکان قائم زیاد گردد [2].

ستون‌های سنگی اولین بار در فرانسه توسط مورآو و همکاران [3] برای تقویت پی در صنایع نظامی به کار گرفته شد. آنها از ستون‌هایی با قطر ۲۰ cm و ارتفاع ۲ m استفاده کردند و کاهش نشست و افزایش قابل توجه ظرفیت باربری را مشاهده کردند. بعدها استورمن [3] تکنیک تراکم ارتعاشی را که شامل استفاده هم‌زمان از تزریق پرفشار آب و ویبره در خاک می‌باشد برای نصب ستون سنگی ارائه کرد. استفاده هم‌زمان از این دو این قابلیت را به دستگاه می‌دهد که با وزن خود به عمق مورد نظر نفوذ کند. این روش در دهه ۱۹۴۰ در آمریکا و آلمان

استفاده از ستون ماسه‌ای یا شنی که به‌طور عام ستون‌های سنگی نامیده می‌شوند، به‌منظور به‌سازی درجای خاک‌های ضعیف از دهه ۱۹۵۰ در اروپا و از دهه ۱۹۷۰ در آمریکا به‌صورت گسترده رواج پیدا کرده است. این روش به‌خصوص برای بهبود رفتار رس نرم و ماسه لای دار سست کاربرد دارد. در این روش بخشی از خاک نامرغوب با مصالح دانه‌ای متراکم‌شده جایگزین می‌شود. این ستون مصالح متراکم عموماً تا لایه مقاوم‌تر امتداد پیدا می‌کند. در بین روش‌های مختلف به‌سازی خاک، استفاده از ستون‌های سنگی به‌عنوان روشی ساده، سریع و اقتصادی در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده مورد توجه مهندسان ژئوتکنیک قرار گرفته است. این روش برای تحمل وزن سازه‌های دارای بار سبک تا متوسط مانند راه‌ها، خاکریزها، مخازن، انبارها، پل‌ها و ساختمان‌های مسکونی بسیار مناسب است. در اجرای ستون سنگی، عملیات حفاری یک گمانه‌ای به قطر ۳۰ cm تا ۴۵ cm به‌روش مرطوب (به‌وسیله جت آب) و یا به‌روش خشک (در خاک نیمه‌اشباع) انجام می‌گیرد. سپس این گمانه به ارتفاع ۳۰ cm تا ۱۲۰ cm با مصالح دانه‌ای پر و به‌وسیله لوله حفاری چندین مرتبه متراکم و به درون خاک اطراف رانده می‌شود و این فرایند تا پر شدن کامل گمانه ادامه می‌یابد. قطر مصالح دانه‌ای استفاده‌شده در ستون سنگی ۱۲ mm تا ۷۵ mm است. البته می‌توان از خرده آجر یا خرده بتن استفاده کرد. استفاده از سیمان در ستون سنگی سبب افزایش سرعت اجرا و تقویت ستون سنگی می‌شود. از این روش می‌توان در خاک‌های خیلی ضعیف و یا افزایش پایداری شیروانی بهره جست [۱].

برای اصلاح خاک در سطح وسیع از ستون‌های سنگی با فواصل مشخص استفاده می‌شود که به گروه ستون سنگی موسوم هستند. حداقل فاصله بین ستون‌های سنگی ۱/۵ m است اما به‌طور معمول از فاصله ۱/۸ m تا ۲/۷ m استفاده می‌شود. در این روش تقریباً ۱۵ تا ۳۵ درصد خاک سست با سنگدانه جایگزین می‌شود. وجود

بررسی کردند.

آندریو و پاپادوپولوس [8] تأثیر میزان بار، نسبت سطح، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت برشی زهکشی نشده بر تغییر مکان افقی یک ستون سنگی را در یک خاک چسبنده مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. ستون تحت بارگذاری گسترده از طریق یک پی صلب قرار گرفت و با استفاده از مفهوم «سلول واحد» مدل سازی شد. آنها با استفاده از یک تحلیل اجزای محدود به صورت تقارن محوری، درحالی که از مدل موهر-کولمب برای ستون و خاک استفاده می کردند، تأثیر متغیرهای مورد نظر را بر زمین به سازی شده بررسی کردند. کریش و همکارانش [9] با انجام یک تحلیل اجزای محدود بر روی دو پی که توسط ۲۵ ستون تقویت شده بودند، تأثیر افزایش طول ستون و مشخصات مکانیکی خاک را با نسبت های سطح جایگزینی مختلف، مورد بررسی قرار دادند. مایکل کلین و همکارانش [10] در رساله دکتری خود، ضمن طرح تفاوت بین گروه های کوچک و گروه های بزرگ ستون های سنگی، رفتار گروه های کوچک ستون سنگی در زیر پی های با مساحت کوچک را مورد بررسی قرار داد. وی اثر پارامترهای کلیدی طراحی مانند نسبت سطح، طول ستون، سختی، مقاومت و اثرات نصب بر عملکرد نشست و رفتار تغییر شکل گروه های کوچک ستون های سنگی را در مجموع با ۴۵ تحلیل عددی به صورت بعدی بررسی کرد. تحقیقات وی نشان داد که تعداد ستون، نسبت سطح و طول ستون بر مکانیزم انتقال بار برای گروه های کوچک ستون سنگی تأثیر زیادی دارد. هانا و همکاران [11] به بررسی میزان برهم کنش بین ستون ها در گروه ستون سنگی و تأثیر آن در نحوه شکست ستون سنگی پرداختند. آنها در مدل های عددی خود که به صورت کرنش مسطح در نرم افزار عددی به صورت دوبعدی انجام گردید، عوامل موثر بر نحوه تغییر شکل و شکست گروه ستون سنگی اجرا شده در یک خاک نرم و تحت یک پی گسترده را مورد بررسی

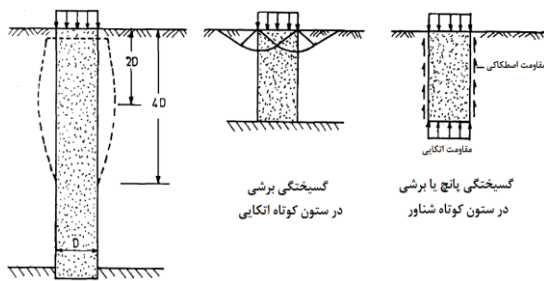
توسعه یافت، به گونه ای که در اواخر دهه ۱۹۵۰ عمق ستون سنگی تا ۲۰m افزایش یافت. تکنیک ستون سنگی از سال ۱۹۵۵ به طور گسترده در ژاپن مورد استفاده بوده است [3]. در حال حاضر از این روش به عنوان یکی از بهترین روش های به سازی زمین در سراسر جهان استفاده می گردد.

هم زمان با تحقیقات میدانی، بررسی های آزمایشگاهی و عددی نیز به منظور کاوش مکانیزم باربری زمین های مسلح با ستون سنگی توسعه یافته است. بالام [4] یک زمین مسلح شده با ستون های سنگی را با استفاده از روش اجزای محدود مدل سازی کرد که یک پی گسترده انعطاف پذیر را تحمل می کرد. وی برای مصالح ستون و خاک از معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده نمود. نتایج این بررسی نشان داد که نشست محاسبه شده با استفاده از تحلیل الاستیک فقط ۶٪ با تحلیل پلاستیک متفاوت است. وی مشاهده کرد وقتی نسبت سطح جایگزینی حدود ۲۵٪ است (نسبت مساحت ستون ها به مساحت کل زمین)، کاهش قابل توجهی در نشست دیده می شود. هم چنین مشخص شد که افزایش طول ستون و کاهش فاصله بین ستون ها باعث افزایش نشست خواهد شد.

بائی و همکارانش [5] به بررسی یک مدل آزمایشگاهی از گروه ستون های سنگی پرداختند و ضمن مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از مدل عددی اجزای محدود، هماهنگی بین نتایج را گزارش کردند. وهر و همکارانش [6] رفتار یک ستون تک و یک گروه از ستون های سنگی را با استفاده از تحلیل اجزای محدود در حالت کرنش مسطح مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۷ آنالیزهای تجربی و عددی بر ستون های سنگی به صورت تک و گروهی، توسط امبیلی و گندی [7] هدایت شد. آنها علاوه بر مقایسه نتایج بارگذاری بر ستون منفرد و گروهی، تأثیر پارامترهایی مانند نحوه بارگذاری، مقاومت برشی خاک اطراف و فاصله بین ستون ها را نیز

قرار دادند.

محل انبساط جانبی در فاصله چهار برابر قطر از بالای ستون مشاهده شده و طول محدوده انبساط جانبی ۲/۵ تا ۳ برابر قطر ستون گزارش شده است [13]. بر مبنای این مکانیزم در تغییر شکل، مفهوم سلول واحد برای پیش‌بینی ظرفیت باربری ستون‌های سنگی ارائه گردید که ظرفیت باربری تک‌تک ستون‌های موجود در گروه در نظر می‌گیرد. در تئوری سلول واحد هر ستون و خاک اطرافش به‌عنوان یک مجموعه مستقل در نظر گرفته می‌شود، لذا تغییر شکل جانبی و تنش برشی در مرزهای سلول صفر فرض می‌گردد [14].



گسیختگی ناشی از انبساط ذرات در ستون بلند شناور یا اتکایی

شکل ۱ روش‌های متداول گسیختگی ستون سنگی منفرد [12]

تغییر شکل انبساط جانبی در قسمت‌های بالایی ستون‌های بلند اتفاق می‌افتد در حالی که در قسمت‌های پایینی این ستون‌ها و هم‌چنین در ستون‌های کوتاه، کمتر با این‌گونه تغییر شکل مواجه می‌شویم. دلیل این امر نبود یا کمبود انتقال بار به کف در این شرایط می‌باشد [15]. وقوع این الگوی تغییر شکل در گروه ستون‌های سنگی تحت تأثیر برهم‌کنش بین ستون‌ها متفاوت است. در این ستون‌ها در اثر انحصار جانبی ناشی از ستون‌های مجاور، انبساط جانبی کمتر اتفاق می‌افتد و محل وقوع آن بسته به میزان انحصار جانبی وارد بر ستون در عمق‌های متفاوتی رخ می‌دهد، به‌گونه‌ای که در ستون‌های میانی گروه که بیشترین انحصار جانبی بر اثر نیروی برهم‌کنش بین ستون‌ها به آنها وارد می‌شود، انبساط جانبی در عمق بیشتری اتفاق می‌افتد ولی با نزدیک شدن به ستون‌های

سادگی اجرا، هزینه کم و عملکرد مناسب ستون سنگی باعث شده است استفاده از این روش به‌سازی خاک، رشد روزافزونی در کشورهای مختلف داشته باشد اما با وجود استفاده گسترده، تحقیقات در این زمینه به دلیل پیچیدگی در مدل‌سازی محیط‌های ترکیبی متشکل از خاک و ستون، پیشرفت مناسبی نداشته باشد؛ لذا روند طراحی ستون سنگی هم‌چنان بر مبنای روش‌ها و تئوری‌های تجربی بر اساس مفهوم «سلول واحد» است که اثر برهم‌کنش گروه را در نظر نمی‌گیرد و ظرفیت نهایی را برابر با مجموع بار ستون‌های تکی محاسبه می‌کند. بر اساس تئوری سلول واحد، ستون بر اثر انبساط جانبی دچار شکست می‌شوند، در حالی که در گروه، ستون‌ها بر اثر شکست کلی گروه و خاک اطراف گسیخته می‌شوند. هدف از این مقاله و تحقیق بررسی اثرات گروه و متغیرهای مختلف سختی و مقاومتی مؤثر بر ظرفیت باربری زمین‌های به‌سازی‌شده توسط گروه ستون‌های سنگی می‌باشد که کمتر مورد توجه محققان و آیین‌نامه‌های به‌سازی زمین‌های سست قرار گرفته است.

## الگوهای شکست در زمین‌های به‌سازی‌شده با

### ستون سنگی

شناخت و بررسی الگوها و نحوه شکست و هم‌چنین عوامل مؤثر بر رفتار تغییر شکلی زمین‌های مسلح‌شده با ستون سنگی به‌عنوان یک مبنای در تعیین و تخمین ظرفیت باربری و هم‌چنین راهکار افزایش ظرفیت باربری در این زمین‌ها حائز اهمیت می‌باشد. آنچه مسلم است شکست ستون‌های سنگی به‌صورت انبساط جانبی، شکست برشی (ستون، پانچ و کلی)، خمش و کمانش مشاهده شده است. تغییر شکل و شکست ستون‌ها در اثر انبساط جانبی اولین و رایج‌ترین نحوه شکست پیش‌بینی‌شده توسط محققان بوده است (شکل ۱). این روش در اولین تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده بر ستون سنگی منفرد به‌عنوان مکانیزم شکست ستون سنگی اعلام شد [12].

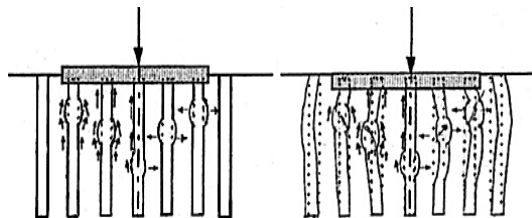
و جلوگیری از این نحوه شکست مستلزم شناخت دقیق رفتار زمین مسلح شده و پارامترهای تأثیرگذار بر چگونگی رخداد آن می باشد [17].

برش پانچ یا پانچینگ ستون سنگی زمانی رخ می دهد که طول ستون به منظور انتقال بار به عمق، زیاد نباشد. مشاهدات تجربی نشان می دهد که در ستون سنگی کوتاه یعنی با نسبت طول به قطر کمتر از ۶، تورم در سراسر طول رخ می دهد و ستون در خاک رس پانچ می شوند. این نحوه تغییر شکل بیشتر در ستون های نزدیک به هم یعنی با نسبت سطح جایگزینی بالا رخ می دهد. ستون های بلند به طور قابل توجهی در ناحیه بالا دچار تغییر شکل می شوند در حالی که بخش پایینی بدون تغییر می ماند. این موضوع نشان می دهد نبودن یا کم بودن انتقال بار به کف در ستون های بلند باعث عدم گسیختگی پانچ و وقوع سایر مدهای گسیختگی نظیر تورم یا برش می شود؛ لذا نسبت طول به قطر حدود ۶ به عنوان طول بحرانی ستون سنگی در طراحی فرض می گردد [18].

برش کلی نیز نوعی دیگر از مکانیزم شکست ستون سنگی می باشد که بررسی آن در خاک های نرم نشان می دهد که به دلیل برهم کنش ستون، گسیختگی به صورت مخروطی شکل و در قالب شکست برشی کلی رخ خواهد داد. در این حالت تغییر شکل ستون به شکل های مختلف (انبساط جانبی، پانچ، برش و خمش) مشاهده شده است اما شکست گروه ستون سنگی به صورت شکست برشی کلی می باشد. شکست خمشی در ستون سنگی زمانی رخ می دهد که ستون تحت بار جانبی قرار گیرد. این تغییر شکل بیشتر در ستون های کناری که تنها از یک سو تحت تأثیر نیروی جانبی ناشی از تورم سایر ستون ها می باشد، دیده می شود که می تواند باعث وقوع شکست در ستون های سنگی گردد [19-21].

شکست ناشی از کماتش در ستون های کناری یک گروه و زمانی که طول ستون از طول بحرانی کمتر است، محتمل می باشد. برای محاسبه طول بحرانی، محققان

کناری گروه، این عمق کاهش می یابد و محل انبساط جانبی به سطح زمین نزدیک تر می شود (شکل ۲).



شکل ۲ انبساط جانبی در گروه ستون سنگی قبل و بعد از شکست [15]

به طور کلی انبساط جانبی در گروه ستون سنگی به دلیل اثر برهم کنش بین ستون ها نمی تواند باعث شکست گردد و تنها در گروه ستون سنگی با نسبت سطح جایگزینی پایین، قابل طرح به عنوان الگوی شکست می باشد به طوری که با کاهش نسبت سطح جایگزینی، اثر برهم کنش گروه کاهش می یابد و برای نسبت های سطح جایگزینی خیلی کم، شکست ناشی از انبساط جانبی ممکن است اتفاق بیفتد [5]. محققان نسبت سطح جایگزینی ۱۰٪ را به عنوان محدوده تغییر نحوه و مدت شکست در گروه ستون سنگی مطرح می کنند و اذعان دارند شکست ناشی از انبساط جانبی برای ستون های یک گروه تنها وقتی نسبت سطح جایگزینی کمتر از ۱۰٪ است رخ می دهد [12]. برای کاهش انبساط جانبی ستون های سنگی نصب شده در خاک های خیلی نرم که نمی توانند انحصار لازم برای جلوگیری از این تغییر شکل را ایجاد کنند معمولاً از روکش ژئوسنسیتیک استفاده می شود. روکش کردن ستون های سنگی علاوه بر افزایش مقاومت و سختی، از فرورفتن دانه های درشت به خاک نرم اطراف نیز جلوگیری می کند [16].

شکست برشی به دلیل وقوع برش در ستون های سنگی و خاک های اطراف نیز یکی دیگر از مهم ترین عوامل شکست زمین های مسلح شده با گروه ستون سنگی می باشد. تعیین روش های مناسب برای افزایش مقاومت

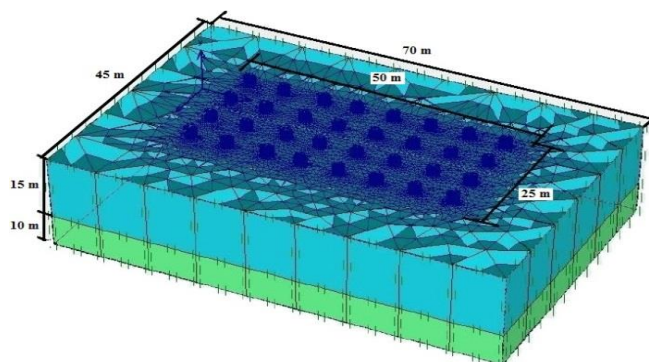
نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی مورد سنجش قرار گرفت. این نرم‌افزار برای تحلیل تغییرشکل‌ها در مهندسی ژئوتکنیک کاربرد فراوانی دارد، به‌خصوص در مسائلی که نیازمند یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی و وابسته به زمان باشد. از جمله قابلیت‌های این نرم‌افزار توانایی در تعریف مدل‌های مختلف رفتاری خاک می‌باشد (شکل ۳).

به‌منظور ارزیابی و صحت‌سنجی مدل، منحنی بار-جابجایی حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی راتو و همکارانش در شکل (۴) نشان داده شده‌است. این منحنی تقریب و همگرایی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی براساس مدل گسیختگی موهرکولمب برای خاک و ستون سنگی و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد به طوری که با دقت مناسبی بالاتر از ۹۵ درصد بر هم منطبق هستند.

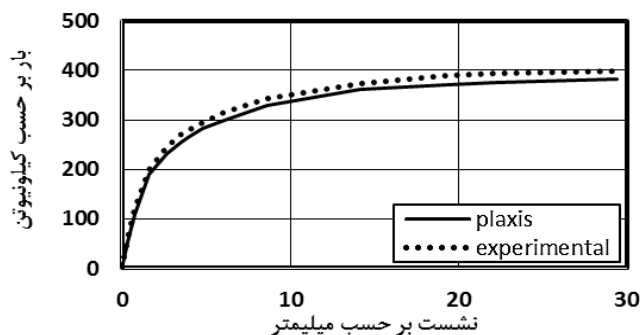
بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی مختلفی انجام دادند و همگی اذعان داشتند که دامنه کرنش در ستون به قطر پی وابسته است و با قطر ستون ارتباطی ندارد [22].

### صحت‌سنجی، اعتبارسنجی و دقت‌سنجی مدل‌سازی عددی

به‌منظور ارزیابی صحت و دقت و اعتبار نتایج تحلیل‌های عددی، از داده‌های تجربی تحقیقات راتو و همکارانش استفاده شد [20]. در مطالعه آنان که در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد، یک محفظه استوانه‌ای به قطر ۶۵۰mm و ارتفاع ۳۵۰mm از خاک رس پُر شد و یک ستون سنگی با قطر ۲۵mm و ارتفاع ۲۲۵mm در آن نصب گردید. بارگذاری روی ستون سنگی توسط یک صفحه مدور به قطر دو برابر قطر ستون سنگی اعمال گردید. با مدل‌سازی آزمایش فوق در نرم‌افزار Plaxis 3D،



شکل ۳ شماتیک مدل‌سازی ستون سنگی



شکل ۴ مقایسه منحنی بار-جابجایی مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی

## بررسی و ارزیابی تأثیر متغیرهای مختلف بر باربری گروه

یکی از اهداف این پژوهش، بررسی و مطالعه اثرات متغیرهای مختلف خاک چون مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون بر ظرفیت باربری آن است. با استناد به مطالعات محققان مختلف، ظرفیت باربری خاک مسلح شده با ستون سنگی برابر با بار متناظر با نشست معادل ۰/۱ قطر ستون سنگی تعریف می شود [3, 18, 19]. مشخصات مصالح مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) آمده است. همچنین دامنه و محدوده محدوده بررسی متغیرها در جدول (۲) آمده است.

مدل گسیختگی موهرکولمب یک مدل الاستوپلاستیک کامل از ساده ترین و پرکاربردترین مدل های مورد استفاده در تحلیل های ژئوتکنیکی می باشد. دلیل این امر تعداد متغیرهای کم بدون نیاز به آزمایش های پیچیده است. در مدل موهر از معیار گسیختگی موهر - کولمب به عنوان سطح تسلیم استفاده شده و قانون جریان در حالت برشی به صورت غیروابسته فرض می گردد. در استفاده از این مدل بایستی توجه کرد که از برخی جنبه های رفتاری اساسی خاک مانند وابسته بودن سختی به مسیر و تاریخچه تنش و کرنش در آن صرف نظر شده است.

جدول ۱ مشخصات مصالح خاک و ستون سنگی در این تحقیق

مشخصه	متغیر	واحد	رس	ستون سنگی
مدول الاستیسیته	E	kPa	۳۰۰۰	۶۰۰۰۰
ضریب پواسون	v	-	۰/۲۵	۰/۳
زاویه اصطکاک داخلی	$\phi$	درجه	۲۰	۴۰
چسبندگی	C	kPa	۵	۰
زاویه اتساع	$\psi$	درجه	۰	۱۰
وزن مخصوص	$\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	۱۶	۱۸
وزن مخصوص اشباع	$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	۱۸	۲۰

جدول ۲ دامنه تغییرات مشخصات مصالح خاک و ستون سنگی در این مطالعه عددی

مشخصه	متغیر	واحد	محدوده
زاویه اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی	$\phi_s$	درجه	۳۵ تا ۴۵
زاویه اصطکاک داخلی خاک رس	$\phi_c$	درجه	۱۵ تا ۲۵
مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی	$E_s$	kPa	۴۰۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰۰
مدول الاستیسیته خاک رس	$E_c$	kPa	۱۵۰۰ تا ۱۴۵۰۰
ضریب پواسون مصالح ستون سنگی	$v_s$	-	۰/۲ تا ۰/۴۵
ضریب پواسون خاک رس	$v_c$	-	۰/۱۵ تا ۰/۴۵
نسبت جایگزینی	$A_s$	درصد	۱۰٪ تا ۳۵٪

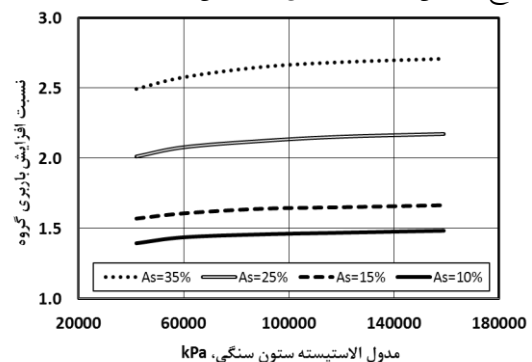
تأثیر قابل توجه ستون سنگی در افزایش ظرفیت باربری زمین‌های سست است. با افزایش «نسبت سطح جایگزینی» از ۱۰ درصد تا ۳۵ درصد، ظرفیت باربری به‌طور قابل توجهی تا حدود ۳ برابر بالا می‌رود. لازم به ذکر است افزایش نسبت سطح جایگزینی ( $A_s$ ) به بیش از ۳۵٪ به دلیل مشکلات اجرایی عملاً مقدور نمی‌باشد. نتایج در شکل (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که با افزایش مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی، نسبت افزایش باربری نیز فزونی می‌یابد به‌طوری‌که با افزایش نسبت سطح، این تغییرات شدیدتر می‌گردد که دلیل آن حضور بیشتر مصالح ستون سنگی در خاک مسلح شده می‌باشد زیرا پارامترهای مکانیکی مقاوم‌تری دارد. هم‌چنین نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش مدول الاستیسیته ستون سنگی، تأثیر این متغیر بر افزایش ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. هم‌چنین مقایسه شکل (۵) و (۶) نشان می‌دهد که تأثیر ستون سنگی اتکایی در افزایش ظرفیت باربری زمین به‌مراتب بیش از ستون سنگی شناور است به‌طوری‌که این تأثیر با افزایش نسبت جایگزینی تشدید می‌شود.

### تأثیر زاویه اصطکاک داخلی ستون سنگی بر ظرفیت باربری گروه

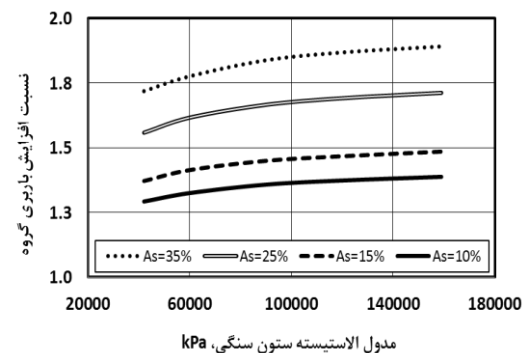
در ادامه این تحقیق به بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه‌های متراکم ستون سنگی بر ظرفیت باربری پرداخته می‌شود. نتایج این بررسی در نسبت‌های سطح جایگزینی مختلف، در شکل‌های (۷) و (۸) به تفکیک برای ستون سنگی شناور و اتکایی نشان داده شده‌است. نتایج حاصل از شکل (۷) و (۸) نشان می‌دهند که ظرفیت باربری با افزایش زاویه اصطکاک داخلی سنگدانه‌های ستون سنگی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که این سیر صعودی با افزایش نسبت جایگزینی، شدیدتر می‌شود. با تغییر زاویه اصطکاک داخلی در نسبت جایگزینی ۳۵ درصد شاهد افزایش ظرفیت باربری تا بیش از ۵۰ درصد هستیم. مقایسه شکل

### تأثیر مدول الاستیسیته و سختی ستون سنگی بر ظرفیت باربری گروه

نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش مدول الاستیسیته ستون سنگی، تقسیم بار بین ستون و خاک رس تغییر می‌کند و سهم بار ستون افزایش می‌یابد مشروط بر آن‌که دیگر متغیرها مطابق جدول (۱) ثابت باشند. از سوی دیگر برای تعیین میزان تأثیر این عامل بر میزان افزایش ظرفیت باربری زمین‌های مسلح‌شده با ستون سنگی در قیاس با زمین تسلیح‌نشده، از تعریف «نسبت افزایش باربری» استفاده می‌شود یعنی نسبت نیروی قابل تحمل توسط زمین مسلح‌شده به زمین غیرمسلح در نشست یکسان به‌عنوان نسبت افزایش باربری تعریف می‌شود. نتایج حاصل از این بررسی در شکل (۵) و (۶) آمده‌است.



شکل ۵ تأثیر مدول الاستیسیته ستون سنگی بر نسبت افزایش ظرفیت باربری در حالت اتکایی



شکل ۶ تأثیر مدول الاستیسیته ستون سنگی بر نسبت افزایش ظرفیت باربری در حالت شناور

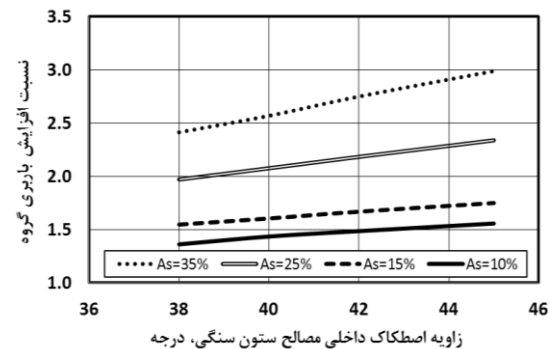
دقت در نتایج حاصل از این بررسی نشان‌دهنده



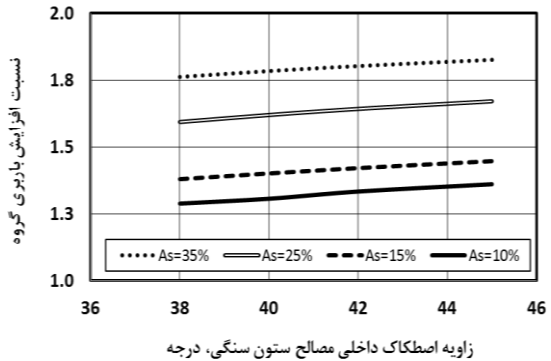
مصالح، تغییر شکل افقی تحت یک تغییر شکل قائم ثابت، افزایش می‌یابد و به عبارتی قابلیت فشرده‌گی مصالح کاهش می‌یابد. در این بررسی با نسبت سطح جایگزینی مختلف، ضرایب پواسون خاک و ستون سنگی به‌طور مجزا و مستقل تغییر داده شده که نتایج به‌دست‌آمده آن در شکل‌های (۹) تا (۱۲) نشان داده شده‌است.

همان‌گونه که از شکل (۹) تا (۱۲) قابل استنتاج است، این بررسی نشان می‌دهد که افزایش نسبت پواسون در مصالح ستون سنگی و خاک اطراف آن باعث افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. در این مسئله تأثیر قابلیت فشرده‌گی مصالح زیر پی در انتقال و تأثیر بارگذاری به ستون سنگی و مصالح جانبی توجیه می‌گردد. با افزایش نسبت پواسون، مصالح خاک و ستون غیر قابل تراکم‌تر می‌شوند و تمایل دارند نشست قائم ناشی از بارگذاری را به‌صورت تغییر مکان و تغییر شکل افقی به خاک اطراف خود و به دنبال آن به ستون سنگی مجاور منتقل کنند. این اتفاق باعث خواهد شد نیروی قائم ناشی از پی به‌صورت یک نیروی افقی و به شکل انبساط جانبی مصالح منتقل شود؛ لذا استهلاک و پخش نیروی قائم وارد بر پی می‌تواند تحت تأثیر محدودیت جانبی قرار گیرد به این معنی که افزایش ضریب پواسون خاک و ستون سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری می‌گردد. هم‌چنین نتایج این تحقیق به‌وضوح نشان می‌دهد که تأثیر ضریب پواسون ستون سنگی بر ظرفیت باربری بسیار بیشتر از ضریب پواسون خاک می‌باشد، به‌طوری‌که شیب تغییرات به‌شدت افزایش می‌یابد درحالی‌که نسبت پواسون خاک تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری ندارد. در ادامه بررسی نتایج حاصل از مقایسه شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) آشکار می‌شود که نسبت سطح جایگزینی ( $A_s$ ) و اتکایی بودن ستون سنگی، نیز همچنان در افزایش ظرفیت باربری بسیار مؤثر هستند.

(۷) و (۸) نشان می‌دهند که تأثیر شمع اتکایی در افزایش ظرفیت باربری بیش از شمع شناور است، هم‌چنین شیب منحنی در شمع شناور تغییر چندانی ندارد اما در شمع اتکایی بسیار بارز است. قابل مشاهده است که با افزایش سطح جایگزینی این تمایز بیشتر می‌شود. در مجموع باید گفت که دو عامل اتکایی بودن و نسبت سطح جایگزینی، تأثیر زاویه اصطکاک داخلی را تشدید می‌کند.



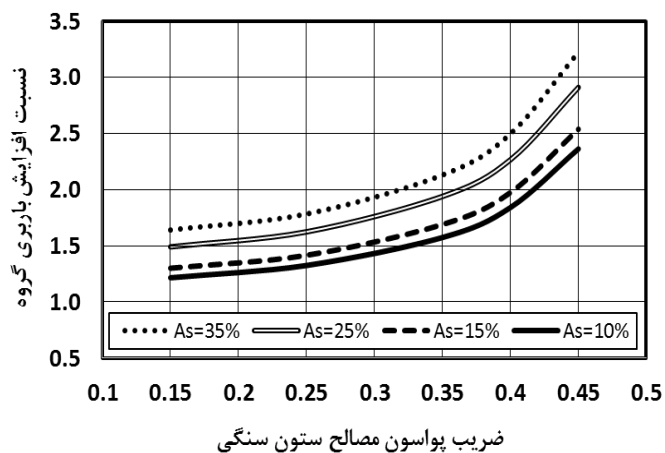
شکل ۷ تأثیر زاویه اصطکاک داخلی ستون سنگی بر افزایش باربری گروه در حالت اتکایی



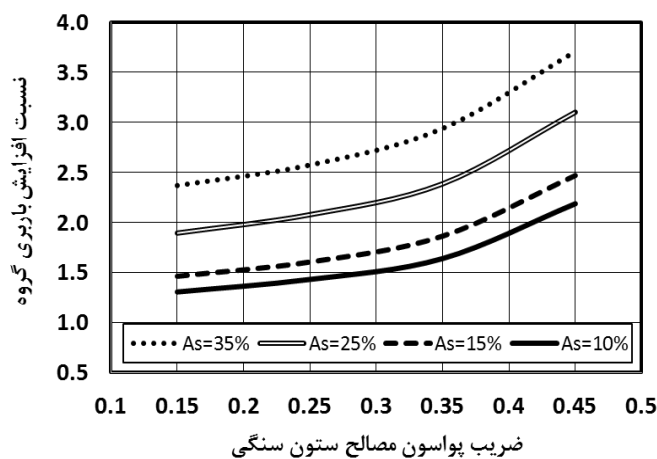
شکل ۸ تأثیر زاویه اصطکاک داخلی ستون سنگی بر افزایش باربری گروه در حالت شناور

### تأثیر نسبت پواسون ستون سنگی و خاک اطراف بر ظرفیت باربری گروه

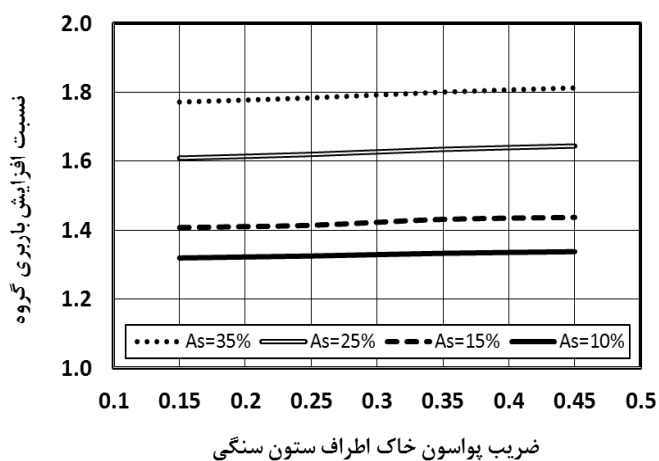
یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر ظرفیت باربری، ضریب پواسون مصالح ستون سنگی می‌باشد که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش نسبت پواسون در



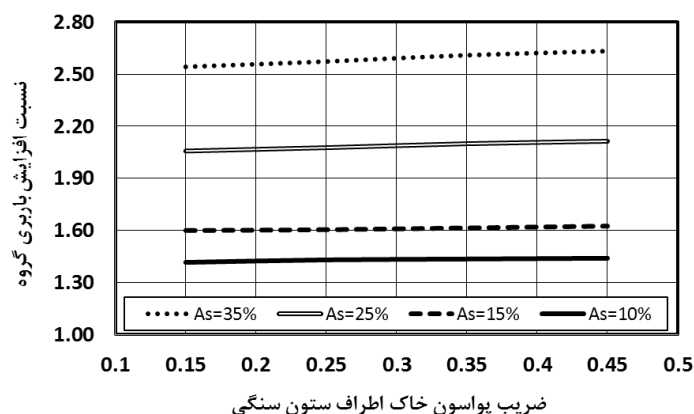
شکل ۹ تأثیر ضریب پواسون ستون سنگی بر نسبت افزایش باربری گروه در حالت شناور



شکل ۱۰ تأثیر ضریب پواسون ستون سنگی بر نسبت افزایش باربری گروه در حالت اتکایی



شکل ۱۱ تأثیر ضریب پواسون خاک اطراف ستون سنگی بر نسبت افزایش باربری گروه در حالت شناور



شکل ۱۲ تأثیر ضریب پواسون خاک اطراف ستون سنگی بر افزایش باربری گروه در حالت اتکایی

و وابستگی کمتری به زاویه اصطکاک داخلی خاک اطراف ستون دارد. هم‌چنین ظرفیت باربری در ستون اتکایی با افزایش ضریب پواسون خاک کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج این تحقیق کاهش تأثیر مدول الاستیسیته ستون سنگی بر افزایش ظرفیت باربری در مقادیر بالای این متغیر می‌باشد درحالی‌که عکس این مطلب در مورد ضریب پواسون خاک اطراف ستون سنگی اتفاق می‌افتد، به طوری‌که بیشتر تأثیر ضریب پواسون خاک بر افزایش ظرفیت باربری در مقادیر بالا رخ می‌دهد. هم‌چنین نتایج این بررسی نشان می‌دهد که افزایش نسبت سطح جایگزینی علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، میزان تأثیر عواملی چون سختی محوری و مشخصات مکانیکی مصالح ستون سنگی بر ظرفیت باربری را نیز افزایش می‌دهد. این مسئله در تأثیر ضریب اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی مشهود و بارزتر از تأثیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشد. رابطه ضریب اصطکاک داخلی با ضریب پواسون مصالح ستون سنگی بر ظرفیت باربری خطی است اما مدول الاستیسیته و ضریب پواسون خاک با ظرفیت باربری رابطه‌ای غیرخطی دارند.

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با روش عددی به ارزیابی تأثیر عوامل مختلف بر ظرفیت باربری زمین‌های به‌سازی شده با استفاده از ستون سنگی در زیر یک پی صلب و گسترده پرداخته شده‌است. تحلیل عددی با استفاده از آخرین نسخه نرم‌افزار Plaxis 3D به روش اجزای محدود انجام شده‌است. هم‌چنین رفتار طولانی مدت زمین به‌سازی شده در شرایط تحکیم‌یافته زهکشی شده با مدل رفتاری موهركولمب مورد بررسی قرار گرفته و حدود ۱۵۰ تحلیل مختلف از شرایط با متغیرهای مختلف مورد تحلیل قرار گرفته‌است که نتایج آن در قالب گراف و منحنی با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شده‌است.

نتایج این تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که عواملی چون میزان مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی مصالح ستون سنگی و هم‌چنین ضریب پواسون خاک اطراف ستون سنگی تأثیر قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری زمین‌های به‌سازی شده با این روش دارند ضمن این‌که تأثیر ضریب پواسون مصالح ستون سنگی بسیار کم و قابل اغماض است. هم‌چنین بررسی‌ها حاکی از این واقعیت است که اتکایی بودن ستون سنگی افزایش قابل توجهی بر ظرفیت باربری دارد، به طوری‌که این افزایش وابستگی بالایی به مدول الاستیسیته مصالح ستون سنگی

## سپاس‌گزاری

خوسرندی که در به ثمر رسیدن این پژوهش همکاری

از خانم دکتر زینت سلیمان‌پور و آقای مهندس مهدی شایانی داشتند تقدیر می‌گردد.

## مراجع

۱. قضاوی، محمود و نظری افشار، جواد، «طراحی و روش‌های اجرای ستون‌های سنگی»، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، (۱۳۸۸)
2. Guetifa Z., Bouassidaa M. and Debatsb J., "Improved Soft Clay Characteristics due to Stone Column Installation", *Computers and Geotechnics*, Vol. 34, No. 2, Pp. 104–111, (2007).
3. Etezad, M., "Geotechnical Performance of Group of Stone Columns", PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Canada (2007).
4. Balaam N. and Booker J. R., "Effect of Stone Column Yield on Settlement of Rigid Foundations in Stabilized Clay", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 9, No. 4, Pp. 331–351, (1985).
5. Bae, W., Bang, W. and Byung, C., "Behavior of Foundation System Improved with Stone Columns", *Proc., 12th Int. Offshore and Polar Engineering Conf., Int. Society of Offshore and Polar Engineers*, Cupertino, CA, (2002).
6. Wehr, W., "Stone Columns-single Columns and Group Behavior", *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, Malaysia, Pp. 329–340, (2004).
7. Ambily, A. P. and Gandhi, S. R., "Behavior of Stone Columns based on Experimental and FEM Analysis", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 4, ASCE, Pp. 405-415, (2007).
8. Andreou, P. and Papadopoulos, V., "Modelling Stone Columns in Soft Clay", *Proc. 6th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Graz, Pp. 777–780, (2006).
9. Kirsch, F., "Evaluation of Ground Improvement by Groups of Vibro Stone Columns Using Field Measurements and Numerical Analysis", *Proc. of the 2nd Int. Workshop on the Geotechnics of Soft Soils*, Glasgow, Pp. 241–248, (2008).
10. Micheal, K., "Numerical Modelling of Small Groups of Stone Columns", Ph.D. Thesis, National University of Ireland, Galway, (2012).
11. Hanna, A., Etezad, M. and Ayadat, T., "Mode of Failure of a Group of Stone Columns in Soft Soil", *International Journal of Geomechanics*, Vol. 13, Pp. 87-96, (2013).
12. Hughes, J. and Withers, N., "Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns", *Ground Eng.*, Vol. 7, No.3, Pp. 42-49, (1974).
13. Christoulas, S., "An Experimental Study on Model Stone Columns", *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 6, Pp. 12-22, (2000).

14. McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A. and Graham, J., "Modelling Vibrated Stone Columns in Soft Clay", Proc. Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, Vol. 157, No. 3, Pp. 137-149, (2004).
15. Hu, W., Wood, D. M. and Stewart, W., "Ground Improvement Using Stone Column Foundations: Result of Model Tests", *Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, CI-Premier, Singapore, Pp. 247-256, (1997).
16. Murugesan, S. and Rajagopal, K., "Geosynthetic-encased Stone Columns: Numerical Evaluation", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24, Pp. 349-358, (2006).
17. Wood, D., Hu, W. and Nash, D., "Group Effects in Stone Column Foundations: Model Tests", *Geotechnique*, Vol. 50, No. 6, Pp. 689-698, (2000).
18. Hu, W., "Physical Modeling of Group Behavior of Stone Column Foundations", Ph.D. dissertation, Univ. of Glasgow, U.K, (1995).
19. McCabe, B., McNeill, J. and Black, J., "Ground Improvement Using the Vibro-stone Column Technique", *Transactions of the Institution of Engineers of Ireland*, Galway, (2007).
20. Rao, N., Madhiyan, S. M. and Prasad, Y. V. S. N., "Influence of Bearing Area on the Behaviour of Stone Columns", *Indian Geotechnical Conf.*, Calcutta: Pp. 235-237, (1992).
21. Malarvizhi S. and Ilamparuthi K. "Modeling of Geogrid Encased Stone Column", ICCMS-05, IIT Guwahati, India. A. Author 1 and B. Author 2, "Title of the Conference Paper", *Proc. Int. Conf. on Power System Reliability*. Singapore, Pp. 100-105, (2005).
۲۲. ارجمند، محمدعلی و زمانی، مجید، «بررسی تأثیر ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی ساختمان‌های با ارتفاع متوسط»، کنفرانس ملی مهندسی عمران و محیط زیست، قزوین (۱۳۹۴).
23. Nima, R., Nalbantoglu, Z. and Araujo, G., "3D Analysis of Full Scale Stone Column Reinforced Soft Clay: Numerical Evaluation", *COBRAMSEG 2014, Goiânia*, Vol. 1, (2014).