

## The Experimental and Numerical Studies of Encased Stone Column Individually, in Group and Nucleated on Improvement of Loose Sandy Soil

Alireza Negahdar<sup>1</sup>, Nader Fathololoumi<sup>2\*</sup>

1- Associate Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- PhD Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

### ABSTRACT

The stone columns, as a method of soil improvement, significantly reduce soil settlement due to incoming loads and increase soil load-bearing capacity. Adding geotextile as a stone column encasement has a considerable impact on this relationship. In this study, the amount of loose sandy soil settlement was investigated by numerical modelling of stone columns with the Plaxis 3D Foundation software, and the results were validated by using laboratory modelling,. For this purpose, a single stone column was modelled in two modes of rainfall density and compacted states and continuously the group mode in the soil was investigated. Also, the effect of adding geotextile encasement to the inner part of stone column investigated as a central core. So, a 6 centimetre diameter of central core that surrounded with geotextile encasement has considered inside of a 10 centimetre diameter of stone column in both rainfall density and compacted state. The results of experimental and numerical modelling were well-matched with each other. Also, it was clear that the increasing of stone column number and compaction can enhance soil bearing capacity, considerably. The adding of central core has had considerable effect on soil bearing capacity, too. This is due to the increase of all-round stress in the interior of the stone columns. The results showed that the stone column with a diameter of 10 cm increased the bearing capacity compared to unreinforced soil by 36%, while in the stone column with central core in rainfall density and compacted states, this amount is 43% and 54%, respectively. Also by evaluation of appearance deformations in stone columns after loading showed that increasing the density and adding geotextile encasement to the central core has a considerable effect on the created deformations and prevention of local ruptures and the process of deformation becomes more favorable.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 27 April 2022

**Revise Date:** 29 June 2022

**Accept Date:** 10 August 2022

### Keywords:

Stone column  
Experimental and Numerical  
Modeling  
Geotextile Encasement  
Nuclear Stone Column  
Deformation

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.337866.2789>

\*Corresponding author: Alireza Negahdar  
Email address: Negahdar@uma.ac.ir

## بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر استفاده از ستون سنگی مسلح به صورت منفرد، گروهی و هسته دار در بهسازی خاک ماسه بادی

علیرضا نگهدار<sup>\*</sup>، نادر فتح العلومی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه عمران-ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

ستون های سنگی به عنوان یک روش بهسازی خاک، نشست خاک در اثر بارهای وارده را تا میزان قابل توجهی کاهش داده و ظرفیت باربری خاک را افزایش می دهد. افزودن غلاف ژئوتکستایل نیز تاثیر به سزایی در این رابطه دارد. در این مطالعه با مدلسازی عددی ستون های سنگی به کمک نرم افزار *Plaxis 3D Foundation*، میزان نشست خاک ماسه ای سست بررسی شده و با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی، نتایج حاصله صحت سنجی شدند. به این منظور ستون سنگی منفرد در دو حالت بارش ماسه و متراکم مدلسازی شده و در ادامه جانمایی گروهی در داخل خاک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تاثیر افزودن غلاف ژئوتکستایل در داخل ستون سنگی، به عنوان هسته ای مرکزی نیز بررسی شده است. به این منظور در مدل آزمایشگاهی، یک هسته ای مرکزی به قطر ۶ سانتیمتر محصور شده با غلاف ژئوتکستایل، داخل ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتیمتر در دو حالت بارش ماسه و متراکم ایجاد شد. نتایج به دست آمده از مدلسازی آزمایشگاهی و عددی هم خوانی مناسبی نشان دادند. همچنین مشخص شد، افزایش تعداد و تراکم ستون ها می تواند ظرفیت باربری را افزایش دهد. افزودن هسته ای مرکزی نیز تاثیر زیادی بر افزایش ظرفیت باربری داشت. این امر به علت افزایش تنش همه جانبه وارده در قسمت های داخلی ستون سنگی است. نتایج نشان داد ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتیمتر ظرفیت باربری را نسبت به خاک غیرمسلح ۳۶ درصد افزایش داد، در حالی که در ستون سنگی هسته دار با بارش ماسه و متراکم این مقدار به ترتیب ۴۳ و ۵۴ درصد می باشد. با ارزیابی تغییر شکل های ظاهری در ستون های سنگی پس از بارگذاری مشخص شد، افزایش تراکم و افزودن غلاف ژئوتکستایل به هسته ای مرکزی، بر روی تغییر شکل های ایجاد شده و جلوگیری از گسیختگی های موضعی ستون سنگی تاثیر قابل ملاحظه ای داشته و روند تغییر شکلها مطلوب تر می گردد.

کلمات کلیدی: ستون سنگی، مدلسازی آزمایشگاهی و عددی، غلاف ژئوتکستایل، ستون سنگی هسته دار، تغییر شکل

| شناخته مقاله:   |            | شناسه دیجیتال:     |               |            |                                |
|-----------------|------------|--------------------|---------------|------------|--------------------------------|
| دریافت          | بازنگری    | پذیرش              | انتشار آنلاین | چاپ        | doi:                           |
| ۱۴۰۱/۰۲/۰۷      | ۱۴۰۱/۰۴/۰۸ | ۱۴۰۱/۰۵/۱۹         | ۱۴۰۱/۰۵/۱۹    | ۱۴۰۲/۰۳/۳۱ | 10.22065/jsce.2022.337866.2789 |
| *نویسنده مسئول: |            | علیرضا نگهدار      |               |            |                                |
| پست الکترونیکی: |            | Negahdar@uma.ac.ir |               |            |                                |

## ۱- مقدمه

ستون سنگی<sup>۱</sup> روشی است جهت اصلاح خاک بستر، با هدف بالا بردن ظرفیت باربری و کاهش نشست. از بین روش‌های مختلف موجود جهت بهبود خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل خاک، با توجه به محدودیت زمان و با تمرکز بر تکنولوژی روز، ستون‌های سنگی می‌تواند بر مشکلات ساخت و ساز فائق آمده، نشست زمین تحت بارگذاری را کاهش، و با توجه به توانایی زهکشی بالا، سرعت فرآیند تحکیم خاک زیر پی را افزایش دهد [۱-۵]. استفاده از یک ستون سنگی معمولی (OSC<sup>۲</sup>) روشی دوستدار محیط زیست برای بهسازی خاک است، زیرا هیچ مصالح سیمانی در این روش مورد نیاز نمی‌باشد [۶]. استفاده از ستون‌های سنگدانه‌ای ساختاری ایجاد می‌کند که از خاک ضعیف موجود در محل سخت‌تر است و ظرفیت باربری خود را از تنش محصور کننده‌ی ایجاد شده توسط خاک اطراف به دست می‌آورد. در مجموع، با داشتن توانایی بالا در زهکشی توسط سنگدانه‌ها، استفاده از ستون‌های سنگی توجه زیادی را به سمت خود جلب کرده‌است. می‌توان چنین استنباط کرد که این تکنولوژی، پتانسیل روانگرایی در خاک‌های ضعیف را نیز کاهش می‌دهد [۸ و ۷، ۳].

کارایی ستون سنگی مربوط به فشار محصور کننده‌ی خاک اطراف آن است. این فشار ممکن است در خاک بسیار نرم کافی نباشد و این احتمال وجود دارد که گسیختگی در قسمت بالایی ستون سنگی که تاثیر آن کم‌تر است، رخ دهد [۹]. گرین‌وود<sup>۳</sup> (۱۹۹۱) با توجه به نتایج مطالعات خود، نتیجه‌گیری کرده‌است که ستون‌های سنگی برخلاف شمع با خاک اندرکنش بهتری دارند. سختی ستون سنگی بستگی به میزان تنش دارد و مقدار آن ۲ الی ۲۰ برابر بیش‌تر از خاک است [۱۰]. مزیت ستون سنگی از این جهت است که خاک سست، با مصالحی فشرده و مقاوم‌تر جایگزین می‌شود. بعلاوه ستون‌های سنگی نفوذپذیری بالایی دارند و با عملکرد خود به عنوان یک زهکش قائم به بهبود رفتار پی کمک شایانی می‌کنند [۱۱]. در طول سی سال اخیر، محققان مختلفی تلاش کرده‌اند رفتار ستون‌های سنگی منفرد و گروهی را تحلیل کنند. برای رسیدن به این هدف، سه روش استفاده شده است که عبارتند از مدلسازی آزمایشگاهی، آزمایش در ابعاد واقعی و روش‌های تحلیل عددی. برخی محققان علاقه‌ی خود به فعالیت‌های آزمایشگاهی را با مطالعه‌ی پارامترهای مختلف و براساس شرایط متفاوت به کار گرفته‌اند [۱۲]. در اجرای پروژه‌های بهسازی به این شیوه، استفاده از یک پتوی ماسه‌ای<sup>۴</sup> و فشرده به ضخامت ۵۰-۱۰۰ میلیمتر روی خاک و در محل قرارگیری ستون، مرسوم می‌باشد. همزمان با اینکه این لایه، زهکشی سطحی ایجاد می‌کند، در توزیع و انتقال تنش توده‌ی خاک به ستون سنگی نیز نقش دارد. این لایه‌ی متراکم را می‌توان با یک لایه‌ی ژئوسنتتیک (اغلب ژئوگرید) مسلح کرد که باعث افزایش ظرفیت باربری به علت سختی کششی بالا و همچنین قفل و بست قابل توجه با مصالح دانه‌ای می‌شود. بعلاوه تنش انتقالی به خاک نرم را کاهش می‌دهد و باعث کاهش تغییر شکل کلی در خاک می‌شود [۱۴ و ۱۳]. در ستون سنگی ساده (غیرمسلح)، تکیه‌گاه افقی از سمت خاک نرم باید معادل با تنش افقی داخل ستون سنگی باشد. در ستون‌های سنگی غلاف‌دار، به علت وجود یک تکیه‌گاه شعاعی از طرف غلاف ژئوسنتتیک، نیروی تکیه‌گاه خاک اطراف می‌تواند کم‌تر باشد. مسلح‌سازی ستون‌های سنگی با استفاده از ژئوسنتتیک‌ها به عنوان یک روش بهسازی از دهه‌ی ۱۹۹۰ مورد توجه بسیار قرار گرفت [۱۵]. مطالعات متعدد دیگری نیز در جهت بررسی کاربردهای ستون سنگی در شرایط مختلف انجام شده و نتایج نشان داده است این روش می‌تواند به عنوان روشی مناسب جهت بهسازی خاک در شرایط مختلف به کار رود [۱۶-۱۹ و ۵].

ستون‌های سنگی قائم به صورت عددی نیز توسط برخی محققان بررسی شده‌اند [۲۰-۲۳]. تقویت خاک نرم زیر خاکریزها با استفاده از ستون سنگی توسط برخی محققان مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه‌ی نهاب و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۶)، ابتدا به پارامترها و شرایط خاک پس از اجرای ستون سنگی پرداخته شده و در ادامه، مدل المان محدود سه بعدی برای بررسی عملکرد گروهی از ستون‌های سنگی اجرا شده است. با استفاده از نرم‌افزار سه بعدی Plaxis، مدلسازی‌های مربوط به بهسازی با ستون سنگی انجام شد [۱۱]. در مطالعه‌ی فہیم و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۸)، طراحی ساختمان‌های بلند و بررسی میزان نشست آن‌ها در پی‌های با شرایط مختلف بررسی شده است. نتایج

<sup>1</sup> Stone column<sup>2</sup> Ordinary Stone Column<sup>3</sup> Greenwood<sup>4</sup> sandpad<sup>5</sup> Nehab et al.<sup>6</sup> Fahim et al.

نشان داد که با به کارگیری ستون‌های سنگی به عنوان مسلح‌کننده، نشست کل به میزان ۷۵٪ کاهش یافت [۲۴]. ویب‌هوشا و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۲۰) تحلیل یک مدل سه‌بعدی عددی را برای بررسی تأثیرات ستون سنگی دارای غلاف ژئوسنتتیک بر روی خاک رس و تحت بارگذاری خاکریز انجام دادند. نتایج نشان داد که استفاده از غلاف ژئوسنتتیک برای ستون سنگی باعث کاهش قابل توجه نشست خواهد شد. بعلاوه مقایسه‌ی ژئوسنتتیک‌های مختلف ثابت کرد رابطه‌ی نزدیکی بین مقاومت کششی ژئوسنتتیک و ظرفیت باربری ستون سنگی وجود دارد [۲۵]. در مطالعه‌ی زو و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۲۱)، چهار مدل فیزیکی، با و بدون غلاف اجرا و سپس مدلسازی دوبعدی ستون‌های سنگی انجام شد. مطالعه بر روی خاک رس ماسه‌دار بدانه‌بندی شده و ستون‌های سنگی از جنس شن بدانه‌بندی شده انجام و نتایج نشان داده است که ستون‌های سنگی ظرفیت باربری را حداقل دوبرابر کرده و نشست را کاهش داده‌اند [۱۵].

در مطالعه‌ی حاضر، تلاش شده‌است، مسلح‌سازی خاک با ستون‌های سنگی قرار گرفته داخل غلاف ژئوتکستایل بررسی شود. به این منظور ابتدا ستون‌های سنگی در نرم افزار Plaxis 3D Foundation تحت شرایطی که در ادامه بیان خواهد شد، مدلسازی شدند و سپس با کمک مدلسازی آزمایشگاهی نتایج به دست آمده از روش عددی صحت سنجی شد. ستون‌های سنگی منفرد به قطرهای ۶ و ۱۰ سانتی‌متر و همچنین ستون‌های سنگی گروهی چهارتایی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از بارگذاری خاک غیرمسلح مقایسه شد. علاوه بر این، ستون‌های سنگی هسته‌دار در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفتند که به عنوان یک ایده نو که قابلیت اجرایی دارد، جهت افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. منظور از ستون سنگی هسته‌دار، ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد که داخل آن یک غلاف استوانه‌ای از جنس ژئوتکستایل به قطر ۶ سانتی‌متر قرار گرفته و داخل این غلاف نیز با مصالح ستون سنگی پر شده است. در واقع این ستون سنگی علاوه بر غشای خارجی، در قسمت داخلی نیز با غلاف ژئوتکستایل مسلح شده است. قسمت هسته‌ی ستون سنگی در دو حالت در نظر گرفته شد. در حالت اول مصالح هسته مرکزی همانند بقیه‌ی قسمت‌ها به صورت بارانی پر شده و در حالت دیگر، مصالح هسته‌ی مرکزی متراکم می‌باشند. بعلاوه، ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر نیز به صورت متراکم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از حالت‌های ذکر شده با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که افزایش قطر و تعداد ستون سنگی، افزودن هسته‌ی مرکزی مسلح به ژئوتکستایل و همچنین متراکم کردن مصالح ستون سنگی باعث افزایش ظرفیت باربری و تغییر در نحوه‌ی تغییرشکل و گسیختگی آن می‌شود. افزودن هسته‌ی مرکزی مسلح به غلاف ژئوتکستایل، به عنوان عاملی جهت افزایش تنش محصور کننده عمل می‌کند و این موضوع ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. همچنین تراکم ستون سنگی نیز به علت افزایش تماس سنگدانه‌ها باعث می‌شود نیروها بهتر میان اجزای ستون سنگی توزیع شوند و به این ترتیب مقاومت ستون سنگی افزایش یافته و نیز عملکرد ستون سنگی در برابر بارهای وارده و نحوه تغییر شکل و گسیختگی آن نسبت به حالت تراکم عادی بهبود یابد. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از بررسی عددی و آزمایشگاهی نیز مشخص کرد که نتایج به دست آمده هم‌خوانی مطلوبی با یکدیگر دارند.

## ۲- مشخصات مصالح

این مطالعه جهت بررسی میزان نشست خاک ماسه‌بادی با دانه‌بندی ضعیف ( $SP^9$ )، که به عنوان خاک بستر انتخاب شده است، انجام شد. برای مدلسازی ستون سنگی از شن درشت‌دانه یکنواخت ( $GP^{10}$ ) و جهت مسلح‌سازی ستون‌های سنگی، غلاف ژئوتکستایل که ستون سنگی را احاطه می‌کند، به کار گرفته شد. جهت انتقال بار از پی به ستون سنگی و خاک بستر، یک پد ماسه‌ای تشکیل شده از ماسه‌ی خوب دانه‌بندی شده ( $SW^{11}$ ) به کار گرفته شد. این پد ماسه‌ای با قراردادن صفحات ژئوگرید در داخل آن مسلح شده است. مشخصات خاک و سنگدانه‌های استفاده شده در این مطالعه با توجه به استانداردهای ASTM D3080-98 و ASTM D422-63 و آزمایشات مربوط به دانه‌بندی و برش مستقیم انجام و مشخصات مصالح استفاده شده شناسایی شد [۲۶ و ۲۷]. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های به کار رفته در شکل ۱ و همچنین مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. جدول ۲ نیز مشخصات ژئوسنتتیک مورد

<sup>7</sup> Vibhoosha et al.

<sup>8</sup> Xu et al.

<sup>9</sup> Poorly graded Sand

<sup>10</sup> Poorly graded Gravel

<sup>11</sup> Well graded Sand

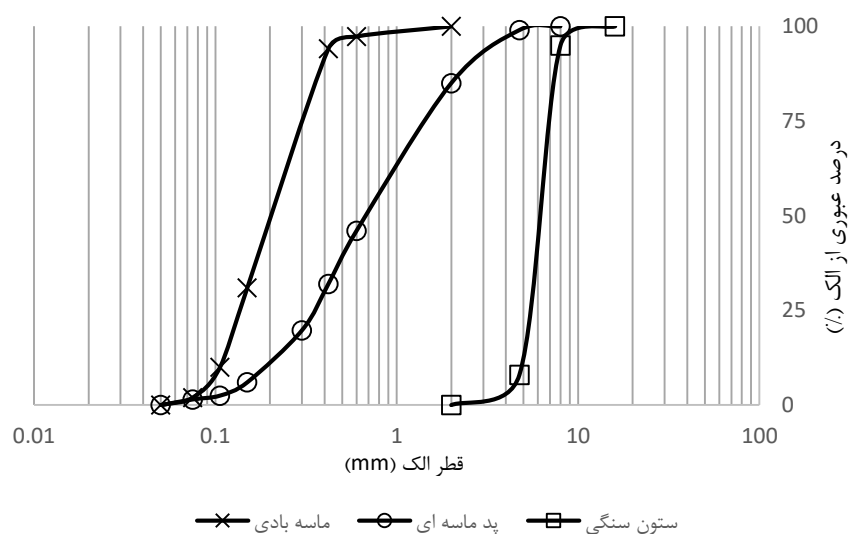
استفاده، که شامل غلاف ژئوتکستایل اطراف ستون سنگی و ژئوگریدهای به کار رفته در پد ماسه‌ای است را نشان می‌دهد. مشخصات ژئوسنتتیک‌ها براساس آیین‌نامه‌های ASTM D4632 و ASTM D4833 می‌باشد [۲۸ و ۲۹].

جدول ۱: مشخصات فیزیکی مصالح و سنگدانه‌های استفاده شده

| مصالح                              | ماسه بادی | پد ماسه‌ای | ستون سنگی | پی فولادی      |
|------------------------------------|-----------|------------|-----------|----------------|
| مدول الاستیسیته (Mpa)              | ۱۰        | ۲۰         | ۴۱        | $۱.۵ \times ۲$ |
| ضریب پواسون                        | ۰/۳       | ۰/۳        | ۰/۲۵      | ۰/۲            |
| وزن واحد حجم ( $\text{kN/m}^3$ )   | ۱۲/۵      | ۱۵/۲       | ۱۵/۸      | ۷۸/۵           |
| زاویه اصطکاک داخلی خاک، $\phi$ (°) | ۳۰        | ۳۸         | ۴۵        | -              |

جدول ۲: مشخصات ژئوسنتتیک مورد استفاده

| نوع ژئوسنتتیک                                        | مقاومت کششی طولی ( $\text{KN/m}$ ) | مقاومت کششی عرضی ( $\text{KN/m}$ ) | وزن واحد سطح ( $\text{g/m}^2$ ) |
|------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| ژئوتکستایل استفاده شده به عنوان غلاف ستون سنگی       | ۵/۶۸۲                              | ۶/۴۵۳                              | ۱۴۵                             |
| ژئوگرید استفاده شده به عنوان مسلح کننده بستر ماسه‌ای | ۸۰                                 | ۸۰                                 | ۳۸۰                             |

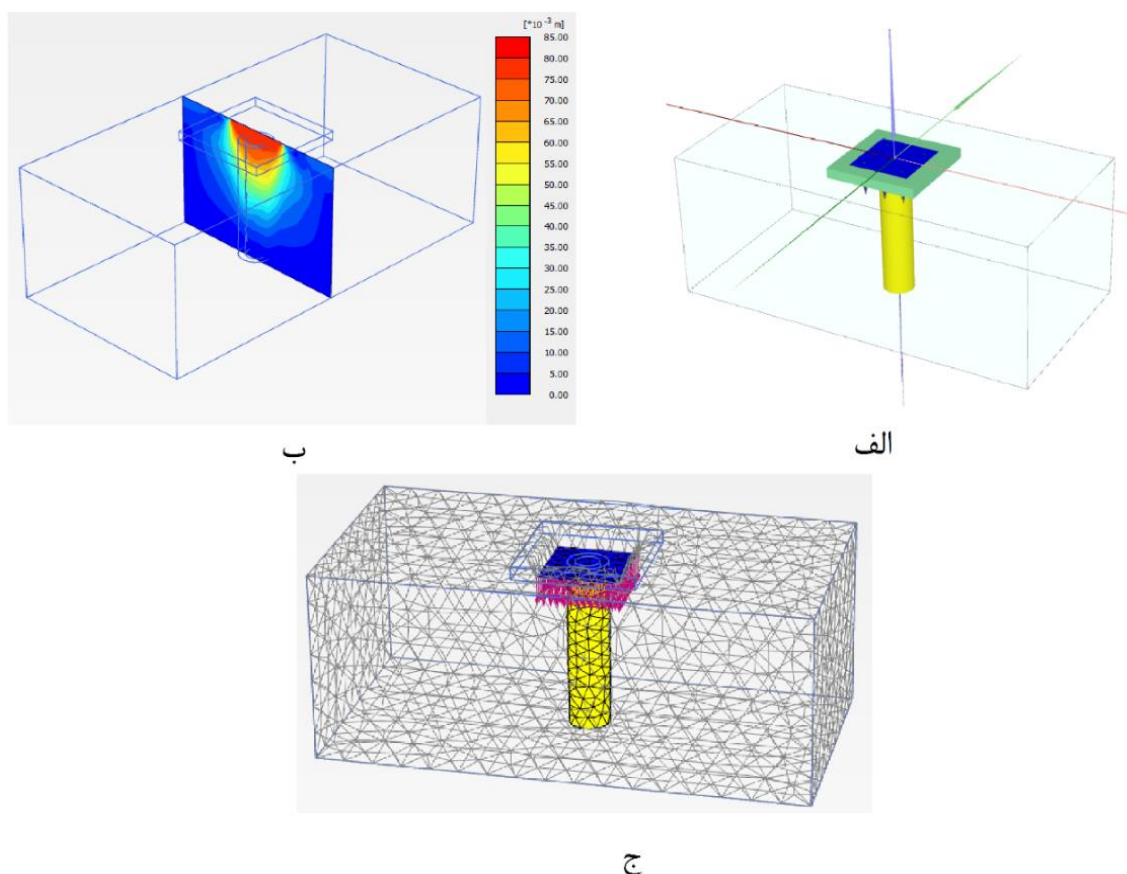


شکل ۱: نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های استفاده شده در ستون سنگی، پد ماسه‌ای و ماسه بادی

### ۳- مدل‌سازی عددی

نرم‌افزار Plaxis 3D Foundation ابزاری مناسب جهت مدل‌سازی سازه‌های ژئوتکنیکی به روش المان محدود و مطالعه و تجزیه تحلیل تغییرشکل‌های پیچیده رخ داده در خاک و پی می‌باشد و توانایی بالایی در انجام تحلیل‌های پیچیده دارد. کلیه مدل‌های آزمایشگاهی، منفرد و گروهی و همچنین ستون‌های هسته‌دار در این نرم‌افزار مدل‌سازی شدند. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی به‌ازای تمامی مدل‌های ایجاد شده و به‌ازای مشخصات مصالحی که در جدول ۱ و ۲ ارائه شدند، با یکدیگر مقایسه شد.

جهت اجرای این مدل در نرم افزار ذکر شده، در ابتدا خاک بستر مدلسازی شد. سپس پد ماسه‌ای و ستون سنگی و همچنین پی فولادی و بار اعمال شده بر روی آن مشخص شدند. معیار گسیختگی انتخاب شده برای مصالح مورد نظر معیار موهر کولمب می‌باشد [۳۰]. اعمال بار به پی در این مطالعه به صورت وارد شدن تغییر شکل به پی می‌باشد. شکل ۲ مدل اجرا شده در نرم افزار Plaxis را نشان می‌دهد. نمونه‌ای از مش بندی اجرا شده توسط نرم افزار بر روی این مدل، جهت تحلیل المان محدود و دیاگرام تغییر شکل‌های ایجاد شده در مدل در این شکل ارائه شده است.

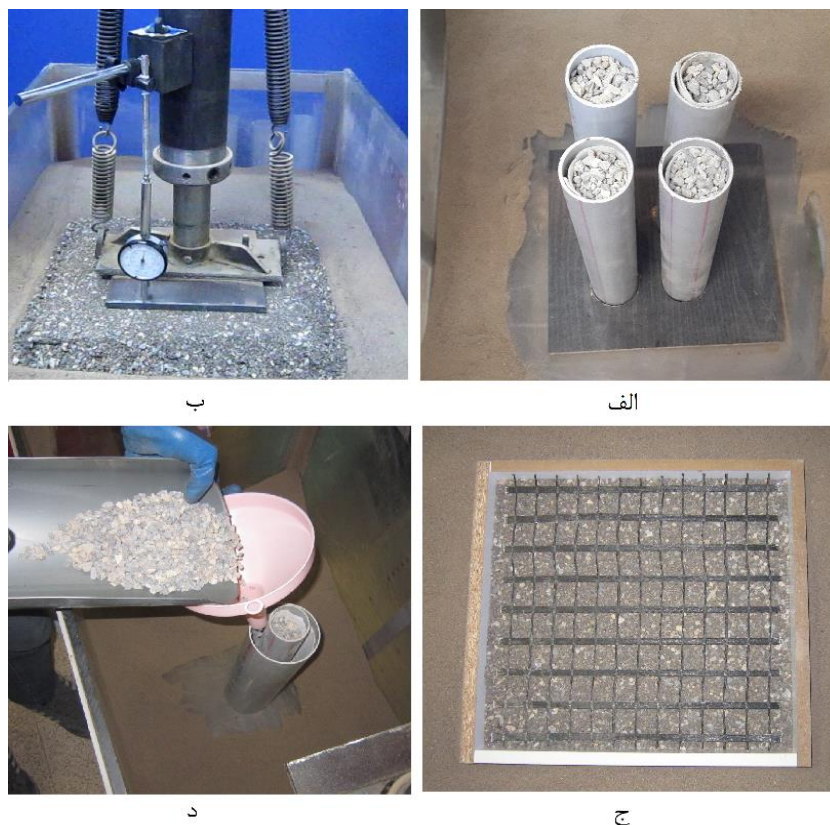


کل ۲: نمونه‌ای از مدل ساخته شده از ستون سنگی در نرم افزار Plaxis: (الف) مدل رسم شده از ستون سنگی منفرد به همراه پد ماسه‌ای و پی فولادی قرار گرفته بر روی آن، (ب) تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک و محل قرارگیری ستون سنگی پس از بارگذاری، (ج) مش بندی ستون سنگی هسته دار

### ۳- مدلسازی آزمایشگاهی

جهت بررسی رفتار ستون‌های سنگی تحت بارگذاری در خاک ماسه بادی، ابتدا مدلسازی آزمایشگاهی انجام شد. به این منظور از مخزنی فلزی به طول، عرض و ارتفاع ۱۰۰، ۶۰ و ۶۰ سانتی متر استفاده شد. ابتدا محل اجرای ستون سنگی در داخل مخزن مشخص و لوله‌های توخالی به ابعاد مورد نظر همراه با غلاف ژئوتکستایل در دیواره‌ی داخلی، در محل ستون‌های سنگی قرار داده شد و داخل لوله با سنگدانه‌های مربوط به ستون سنگی پر شد. سپس داخل مخزن با خاک ماسه بادی به طور کامل پر شده و لوله‌های نگه دارنده ستون سنگی خارج شد. جهت رعایت و لحاظ کردن بحث آنالیز ابعادی، برای پر کردن مخزن از روش بارانی استفاده شد. به این معنا که خاک با استفاده از یک قیف و به آرامی و از ارتفاع حدود ۳۵ سانتیمتری به داخل مخزن ریخته می‌شود [۱۲]. جهت اعمال بار به صورت گسترده و یکنواخت روی خاک بستر، یک لایه پد ماسه‌ای مربعی مسلح به ژئوگرید به ضخامت ۳ و ابعاد ۳۷ در ۳۷ سانتی متر روی محل ستون سنگی

و زیر پی فولادی قرار گرفت. بار از طریق پی فولادی مربعی به ابعاد ۲۰ سانتیمتر و ضخامت ۱ سانتی متر، از طریق سیستم بارگذاری که توسط اهرم مخصوص با گامهای یکسان که در بدنه مخزن تعبیه شده، به مجموعه اعمال و مقدار نیرو و تغییر مکان با استفاده از گیج‌های مربوطه که در محل‌های مخصوص تعبیه و جانمایی شده اند، اندازه‌گیری شد. پس از اتمام آزمایش و گسیختگی ستون‌های سنگی، خاک بستر از داخل مخزن تخلیه و تغییر شکل‌های ستون‌های سنگی و پدیده‌ی شکم‌دادگی<sup>۱۲</sup> مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳ تصاویری از نحوه پر شدن مخزن آزمایش، جانمایی ستون‌های سنگی گروهی و هسته دار و نیز پد ماسه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۳: الف) نحوه جانمایی ستون‌های چهارتایی داخل مخزن، ب) اعمال بار به مجموعه ستون سنگی و پد ماسه‌ای از طریق پی فولادی و گیج اندازه‌گیری تغییر شکل، ج) نحوه‌ی ساخت پد ماسه‌ای مسلح به ژئوگرید، د) جانمایی ستون سنگی هسته‌دار (ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی متر و هسته مرکزی به قطر ۶ سانتی متر)

در مدلسازی آزمایشگاهی، ابتدا یک مخزن پر از خاک ماسه بادی، بدون مسلح‌سازی با ستون سنگی بارگذاری و نتایج مربوط به تغییر مکان در اثر اعمال نیرو ثبت شد. در راستای مدلسازی ستون‌های سنگی منفرد در آزمایشگاه، دو مدل از ستون‌های سنگی دورپیچ شده با ژئوتکستایل به ترتیب به قطرهای ۶ و ۱۰ سانتی متر داخل مخزن حاوی ماسه بادی ساخته شد. جهت ساخت ستون سنگی منفرد به قطر ۱۰ سانتی متر، در حالت متراکم، پس از ریختن سنگدانه‌های شنی داخل غلاف، با استفاده از یک میله با تراکم نسبی ۱۵ درصد، متراکم شد. جهت مدلسازی ستون‌های سنگی چهارتایی به قطر ۶ سانتی متر، ابتدا محل قرارگیری دقیق ستون‌ها مشخص و سپس ستون‌ها جانمایی شدند. فاصله مرکز به مرکز ستون‌های سنگی ۱۱ سانتی متر در نظر گرفته شد. همچنین برای ساخت ستون‌های سنگی هسته‌دار، پس از جانمایی غلاف ژئوتکستایل مربوط به ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی متر، یک لوله به قطر ۶ سانتی متر در مرکز لوله‌ی ۱۰ سانتی-متری قرار گرفت و غلاف ژئوتکستایل داخل آن جانمایی شد. پس از پر کردن هسته‌ی مرکزی در دو حالت بارانی و متراکم، که درصد تراکم

<sup>12</sup> Bulging

آن به میزان ۱۰ درصد بود، قسمت‌های دیگر ستون سنگی به روش بارانی پر شد. پس از مدلسازی کامل مخزن آزمایش بارگذاری بر روی ستون‌ها انجام و میزان نشست مربوط به بار اعمال شده بر روی مجموعه ثبت شد.

در ادامه نتایج به دست آمده از مدلسازی‌های عددی و آزمایش‌های انجام شده، مربوط به تغییر شکل در اثر اعمال بار به‌ازای مدل‌های مختلف اجرا شده در نرم‌افزار و در مقایسه با نتایج به دست آمده از مدل‌های آزمایشگاهی ارائه شده است.

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- ارزیابی نشست خاک

مطالعات متعددی جهت بررسی تاثیر ستون سنگی بر روی ظرفیت باربری خاک انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد ستون سنگی مسلح به ژئوتکستایل می‌تواند ظرفیت باربری خاک‌های سست را افزایش دهد. بهسازی خاک به این روش می‌تواند نشست خاک را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. مطالعات عددی و آزمایشگاهی نشان داده اند که ابعاد و شرایط به‌کارگیری ستون‌های سنگی تاثیر زیادی بر افزایش مقاومت خاک زیر پی دارد [۲۰ و ۱۶-۱۴ و ۴]. مطالعه‌ی حاجی عزیزی و نصیری (۲۰۲۰) به منظور بررسی میزان نشست شیب خاک ماسه‌ای و به صورت سه‌بعدی با کمک نرم‌افزار FLAC 3D انجام شده و نشان داده است که ستون سنگی مسلح به ژئوگرید در شیب ماسه‌ای، پایداری آن را نسبت به ستون سنگی معمولی بهبود می‌بخشد. در این پژوهش پنج اندازه متفاوت قطر ستون از ۲۰ الی ۵۰ سانتیمتر به کار گرفته شده و مشخص شده است افزایش قطر ستون سنگی مسلح به ژئوگرید می‌تواند به بهبود رفتار خاک کمک کند. اما این افزایش تا محدوده‌ی مشخصی از قطر ستون تاثیرگذار است. همچنین مشخص شده است که نحوه‌ی آرایش ستون‌ها و قرار دادن مسلح‌کننده‌ها در ستون‌ها تحت آرایش‌های مختلف نیز بر روی عملکرد ستون تاثیرگذار است [۳۱]. همچنین بررسی‌های نشان داده‌اند ستون سنگی می‌تواند کمک شایانی جهت بهبود ظرفیت باربری ماسه سست داشته باشد. آزمایشات عددی و آزمایشگاهی نشان داده است این افزایش با افزایش تعداد ستون‌های سنگی می‌تواند تا ۲/۷۵ برابر نیز رخ دهد. افزایش قطر ستون‌ها نیز باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود [۱۲].

مطالعه‌ی حاضر تلاش می‌کند تاثیر افزودن ستون سنگی به خاک سست و ضعیف قرار گرفته زیر پی را مورد بررسی قرار دهد. به این منظور، ستون‌های سنگی منفرد به قطر ۶ و ۱۰ سانتی‌متر، با روش بارش ماسه، ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر به صورت متراکم، ستون‌های سنگی چهارتایی با روش بارش ماسه و ستون‌های سنگی هسته‌دار با هسته با روش بارش ماسه و متراکم در آزمایشگاه مدلسازی شدند. این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 3D Foundation که نرم‌افزاری بر پایه‌ی المان محدود می‌باشد نیز مدلسازی و نتایج به دست آمده از مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شد. بررسی کلی نمودارها نشان‌دهنده این امر می‌باشد که افزودن ستون سنگی می‌تواند ظرفیت باربری خاک را به میزان قابل توجهی افزایش دهد و همچنین از وقوع تغییر شکل‌های بیش از حد در خاک‌های سست جلوگیری کند. مقایسه‌ی کلی نتایج به دست آمده از مدلسازی‌های عددی و آزمایشگاهی و همخوانی بسیار مناسب آن‌ها بیانگر دقت قابل قبول مطالعات آزمایشگاهی و نیز دقت بالای این نرم‌افزار در مدلسازی و پیش‌بینی تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک مسلح به ستون سنگی است. نمودارهای ارائه شده در شکل ۴ نتایج به دست آمده از مدلسازی‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

نمودار شکل الف-۴ مقایسه بین نتایج به دست آمده از مدل‌های مربوط به خاک غیرمسلح، خاک مسلح به ستون سنگی به قطر ۶ سانتی‌متر (با روش بارش ماسه)، ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر (با روش بارش ماسه) و چهار ستون سنگی به قطر ۶ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. ستون‌های سنگی چهارتایی با فاصله مرکز به مرکز ۱۱ سانتی‌متر و به صورت آرایش مربعی، چنانچه در شکل الف-۳ نشان داده شد، قرار گرفته‌اند. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد ظرفیت باربری خاک مسلح به ستون سنگی به قطر ۶ سانتی‌متر به میزان ۱۷ درصد، خاک مسلح به ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر ۳۷ درصد و خاک مسلح به ستون‌های سنگی چهارتایی به قطر ۶ سانتی‌متر ۶۰ درصد بالاتر از خاک غیر مسلح بوده است. این امر بیان می‌کند افزایش قطر ستون سنگی مسلح به ژئوتکستایل عملکرد بهتری ارائه می‌دهد.

همچنین نشان می‌دهد افزایش تعداد ستون‌های سنگی می‌تواند نتیجه‌ای بهتر نسبت به افزایش قطر ستون سنگی داشته باشد. بنابراین انتخاب ابعاد و تعداد ستون‌های سنگی مورد نیاز بسته به شرایط مختلف بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد.

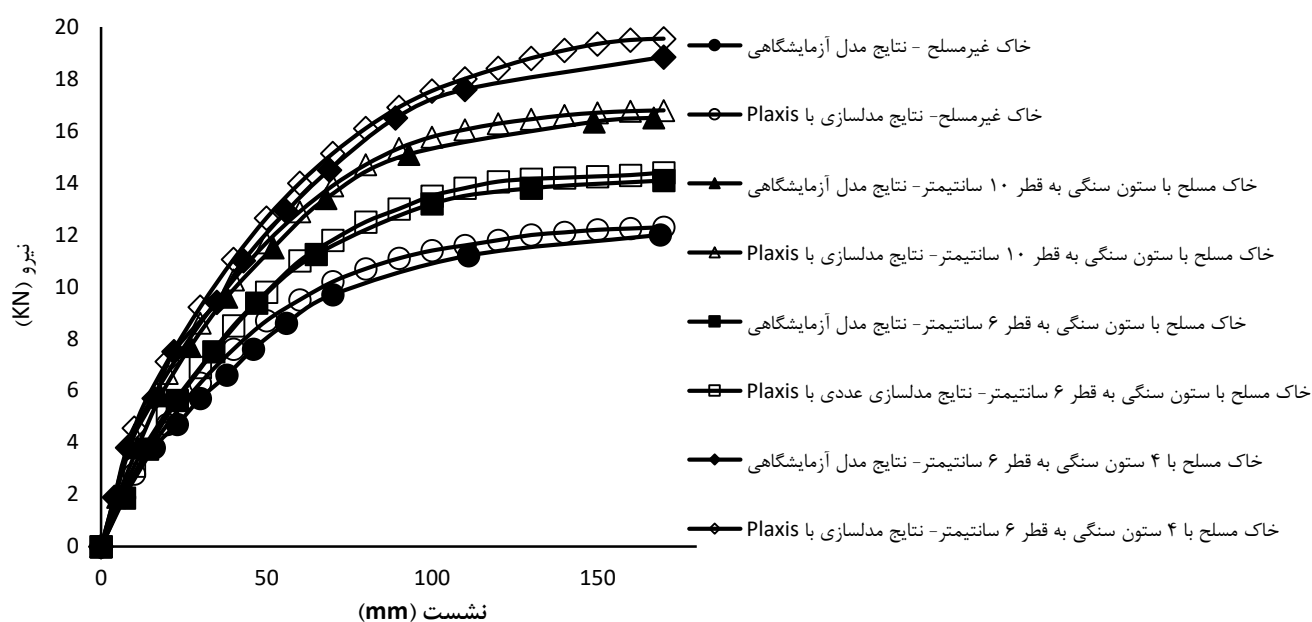
نمودارهای شکل ب-۴ نیز عملکرد ستون‌های سنگی را تحت شرایط مختلف دیگری مورد ارزیابی قرار می‌دهند. در این قسمت ستون سنگی منفرد به قطر ۱۰ سانتی‌متر تحت شرایط مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و تاثیر شرایط مختلف جهت تقویت این ستون بررسی شده است. شرایط ذکر شده عبارتند از متراکم کردن مصالح ستون سنگی، قراردادن هسته‌ی مرکزی مسلح به ژئوتکستایل با روش بارش ماسه و قرار دادن هسته مرکزی مسلح به ژئوتکستایل و با سنگدانه‌های متراکم. نتایج به دست آمده نشان داده است که افزایش تراکم ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر ظرفیت باربری آن را نسبت به حالت بارش ماسه به میزان ۶ درصد افزایش می‌دهد. افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی در اثر افزایش تراکم می‌تواند به علت فشردگی ذرات ستون سنگی و افزایش توانایی آن در تحمل بار قائم - باشد.

برای ساخت ستون سنگی هسته‌دار، در قسمت مرکزی ستون سنگی مسلح به ژئوتکستایل به قطر ۱۰ سانتی‌متر، یک هسته مرکزی به قطر ۶ سانتی‌متر قرار دارد. هسته‌ی مرکزی به تنهایی مسلح به ژئوتکستایل می‌باشد و در دو حالت بارش ماسه و متراکم مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ب-۴ می‌توان گفت ستون سنگی هسته‌دار مقاومت بالایی نسبت به ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر از خود نشان داده است. این افزایش ظرفیت در مورد هسته با روش بارش ماسه ۶ درصد و در مورد هسته متراکم به میزان ۱۳ درصد می‌باشد. می‌توان گفت همانطور که ژئوتکستایل در اطراف ستون سنگی به عنوان یک عامل تقویت کننده عمل می‌کند، به عنوان غلاف هسته‌ی مرکزی نیز عاملی موثر بوده و باعث افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی و جلوگیری از تغییر شکل‌های بیش از حد در ستون سنگی و افزایش توانایی تحمل و انتقال بار در این ستون‌ها شده است. افزایش تراکم هسته‌ی مرکزی نیز تاثیری مشابه افزایش تراکم مصالح ستون سنگی ده سانتی‌متری (فاقد هسته مرکزی) داشته است و باعث شده ستون با هسته‌ی متراکم ظرفیت باربری بالاتری نسبت به ستون با هسته‌ی مرکزی با تراکم بالایی ارائه کند.

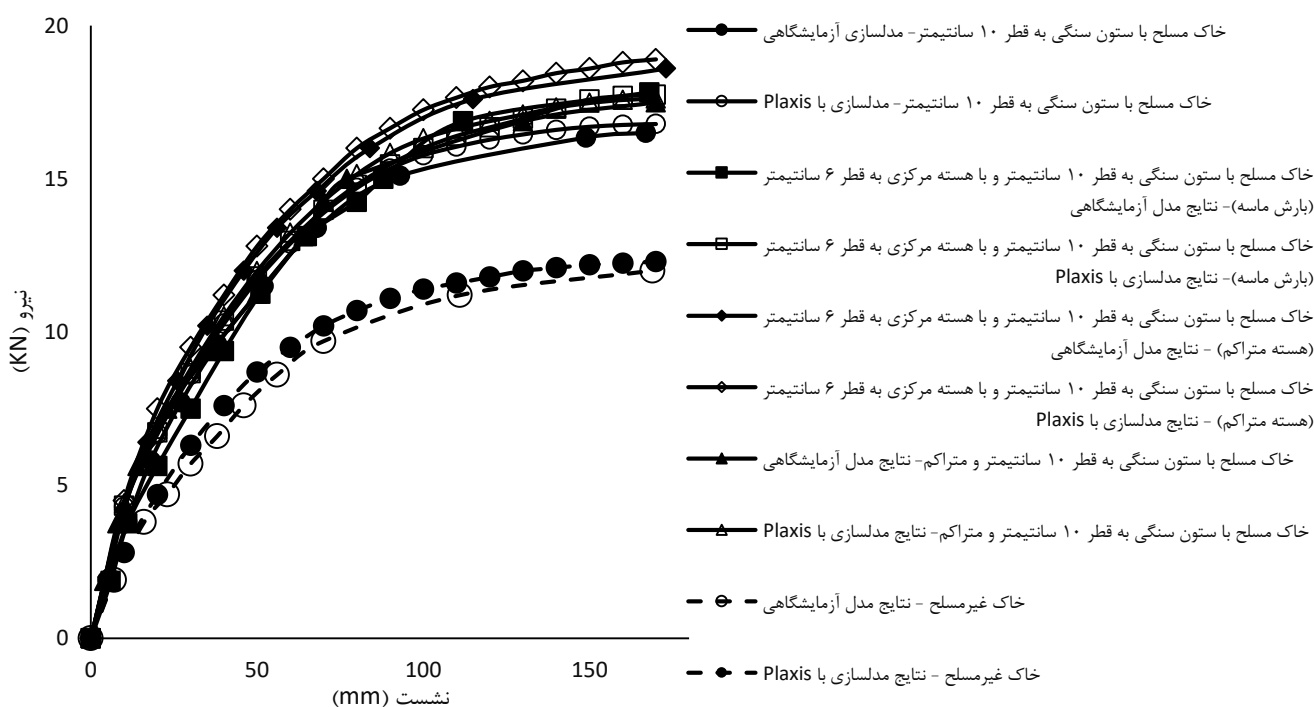
در مقایسه بین ستون سنگی با هسته مرکزی غیرمتراکم و ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر و متراکم، می‌توان به این نتیجه رسید که افزودن ژئوتکستایل به هسته مرکزی می‌تواند تاثیری به اندازه‌ی تراکم کل ستون سنگی داشته باشد. با توجه به این تاثیر یکسان، می‌توان چنین اظهار نظر کرد که بسته به شرایط می‌توان از هر دو روش برای افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی استفاده کرد. البته این امر نیازمند مطالعات دقیق تر و بررسی شرایط مختلف از قبیل میزان تراکم و قطر بهینه هسته‌ی مرکزی می‌باشد.

در مقایسه نتایج بین نمودارهای الف و ب نیز می‌توان گفت افزودن ستون سنگی متراکم و ستون هسته‌دار به هسته مرکزی با روش بارش ماسه و هر دو به قطر ۱۰ سانتی‌متر، ظرفیت باربری خاک را تا ۴۵ درصد افزایش داده است. همچنین ستون سنگی با هسته مرکزی متراکم افزایش ۵۴ درصدی ظرفیت باربری را نسبت به خاک غیرمسلح نشان می‌دهد.

نتایج کلی حاصل از مقایسه‌ی روش‌های مسلح‌سازی بررسی شده در این مطالعه با خاک غیرمسلح در جدول ۳ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که بالا بردن اندازه‌ی قطر ستون سنگی، استفاده از ستون سنگی گروهی و تقویت بیش‌تر ستون سنگی با غلاف ژئوسنتتیک، با روش‌هایی مانند افزودن یک غلاف ژئوتکستایل به هسته‌ی مرکزی ستون می‌تواند کمک شایانی به بهبود خاک مورد نظر نماید و همچنین نشان می‌دهد هر کدام از روش‌ها تا چه میزان توانایی کاهش نشست خاک و بهبود ظرفیت باربری خاک ماسه بادی سست را دارند. بسته به شرایط و نیازهای پروژه می‌توان هر یک از این روش‌ها جهت تقویت خاک مورد نظر به کار برد.



الف



ب

شکل ۴: نمودارهای نتایج بارگذاری خاک در دو حالت مدلسازی آزمایشگاهی و عددی: الف) مقایسه نتایج حاصل از بارگذاری خاک غیرمسلح، مسلح به ستون سنگی منفرد به قطر ۶ و ۱۰ سانتیمتر و خاک مسلح با چهار ستون سنگی به قطر ۶ سانتیمتر و ب) مقایسه نتایج حاصل از بارگذاری خاک غیرمسلح، خاک مسلح با ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتیمتر با تراکم بارش ماسه و متراکم، و مسلح به هسته مرکزی به قطر ۶ سانتیمتر با تراکم بارش ماسه و متراکم

جدول ۳: مقایسه مقادیر افزایش ظرفیت باربری خاک در اثر مسلح سازی با ستون سنگی تحت شرایط مختلف

| نوع مسلح سازی                                                   | درصد افزایش ظرفیت باربری نسبت به خاک غیرمسلح |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| تک ستون سنگی به قطر ۶ سانتی متر                                 | ۱۷                                           |
| تک ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی متر (بارش ماسه)                    | ۳۶                                           |
| تک ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی متر (متراکم)                       | ۴۳                                           |
| چهار ستون سنگی به قطر ۶ سانتی متر                               | ۶۰                                           |
| تک ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی متر، با هسته مرکزی با بارش ماسه ای | ۴۳                                           |
| تک ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی متر، با هسته مرکزی متراکم          | ۵۴                                           |

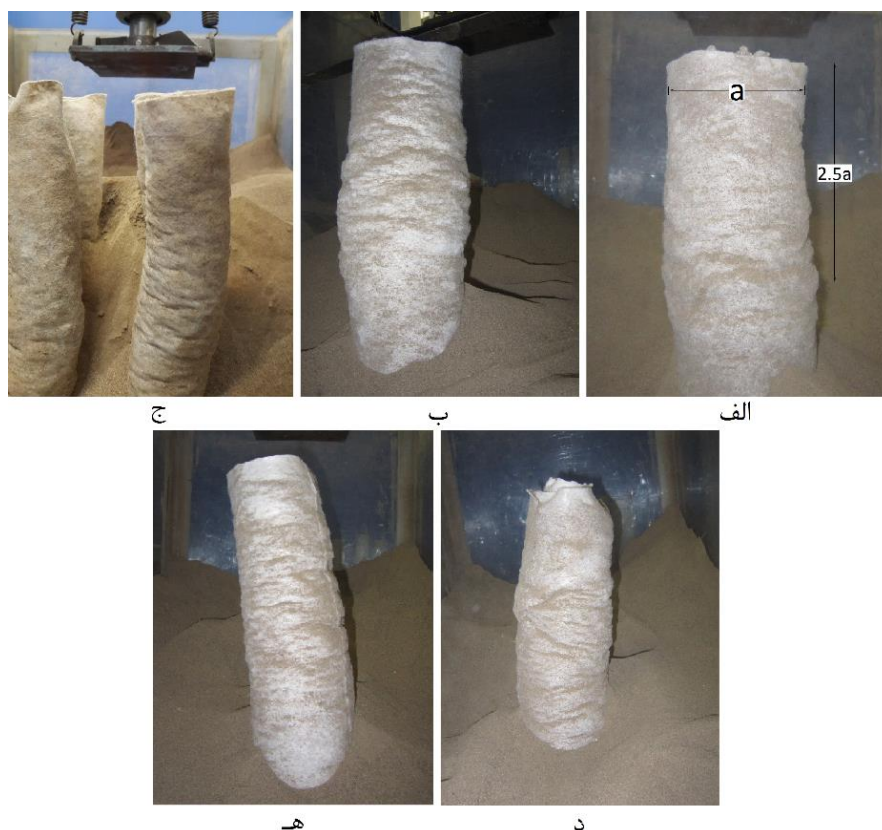
این نتایج مربوط به مقایسه‌ی کمی نتایج به دست آمده از بارگذاری بوده است. در ادامه نتایج مقایسه کیفی تغییر شکل های ایجاد شده در ستون سنگی حین گسیختگی بیان و نحوه‌ی گسیختگی ستون سنگی تحت شرایط مختلف ذکر شده بررسی خواهد شد.

## ۲-۵- ارزیابی تغییر شکل ستون

مطالعاتی که بر روی عملکرد و رفتار ستون سنگی انجام شده، نشان می‌دهد که گسیختگی ستون سنگی در اغلب موارد به صورت شکم‌دادگی می‌باشد و این پدیده معمولاً در نزدیکی سطح خاک و در عمق حدود ۲ الی ۴ برابر قطر ستون، که تنش همه‌جانبه در آن کم‌تر از اعماق پایین‌تر است رخ می‌دهد [۳۲-۳۵ و ۹]. بررسی‌ها نشان داده است که افزودن غلاف ژئوسنتتیک به ستون سنگی، به علت حفظ ساختار ستون و افزایش تنش همه‌جانبه مقاوم، به میزان قابل توجهی مانع از بروز پدیده‌ی شکم‌دادگی در ستون و در حین گسیختگی می‌شود. همچنین مشخص شده است با وجود آنکه شکم‌دادگی در ستون‌های دارای غلاف در عمق حدود دو برابر قطر از بالای ستون سنگی رخ می‌دهد، اما افزودن غلاف می‌تواند مقاومت ستون سنگی را به میزان قابل توجهی رخ دهد [۳۶ و ۳۷]. تصاویر ارائه شده در شکل ۵ تغییر شکل‌های به وجود آمده در ستون سنگی را پس از گسیختگی در اثر بارگذاری نشان می‌دهد.

نتایج ارائه شده در شکل ۵ نشان می‌دهد گسیختگی و تغییر شکل حداکثر چنانچه بیان شد، در عمق ۲ الی ۴ برابر قطر ستون سنگی رخ داده است. این موضوع را می‌توان در شکل الف-۵ مشاهده کرد. این شکل نشان دهنده‌ی گسیختگی ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی متر با بارش ماسه ای می‌باشد. شکل ب-۵ نشان دهنده‌ی تغییر شکل ایجاد شده در ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی متر به صورت متراکم است. بررسی اندازه و نحوه‌ی گسیختگی این ستون در مقایسه با حالت بارش ماسه مشخص می‌کند که تغییر شکل به صورت شکم‌دادگی در تمام جهات و در نسبت عمق به قطر بالاتری نسبت به حالت بارش ماسه رخ داده است. همچنین گسیختگی در یک محل متمرکز نیست و ناحیه‌ی بزرگ‌تری دچار تغییر شکل شده‌اند. می‌توان چنین استدلال کرد که در سنگدانه‌های متراکم، به دلیل ارتباط بیش‌تر سنگدانه‌ها، بار به صورت بهتری توزیع پیدا کرده و علاوه بر افزایش ظرفیت باربری ستون سنگی، سنگدانه‌ها و حجم بیش‌تری را در پدیده‌ی گسیختگی درگیر کرده است. شکل ج-۵ تصویری از ستون سنگی چهارتایی به قطر ۶ سانتی متر و با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱۱ سانتی متر، را نشان می‌دهد. بررسی تغییر شکل‌های ایجاد شده در این ستون‌ها در مقایسه با ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی متر نشان می‌دهد تغییر شکل در این ستون‌ها به صورت تغییر شکل به سمت خارج از مجموعه‌ی چهارتایی است. با توجه به وجود یک فضای محصور شده در میان چهار ستون می‌توان گفت تغییر شکل‌های ایجاد شده توسط هر چهار ستون در این فضا باعث فشردگی بیش از حد این ناحیه شده و تغییر شکل‌های بیش‌تر به سمتی رخ می‌دهند که تنش محصور کننده در آن پایین‌تر است. بنابراین شکم‌دادگی ستون‌های سنگی به سمت ناحیه‌ای در خلاف جهت این ناحیه‌ی محصور شده می‌باشد. شکل د-۵ و ه-۵ ستون سنگی هسته‌دار به ترتیب با هسته‌ی ایجاد شده با روش بارش ماسه و متراکم را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی تغییر شکل‌های این دو ستون با ستون‌های منفرد و حتی ستون‌های چهارتایی نشان دهنده‌ی این امر می‌باشد که افزودن ژئوتکستایل به عنوان غلاف هسته‌ی مرکزی، علاوه بر افزایش ظرفیت باربری، بر نحوه‌ی گسیختگی نیز تاثیر به سزایی دارد. وجود ژئوتکستایل باعث شده است ضعف خاک جهت تامین تنش محصور کننده‌ی اطراف ستون سنگی در نواحی خاص و خصوصاً نزدیک سطح خاک تا حد قابل توجه برطرف شود. به همین دلیل در این ستون‌ها شکم‌دادگی و گسیختگی مانند سایر ستون‌های

سنگی مشاهده نمی‌شود و تغییر شکل جانبی در اکثر قسمت‌های ستون سنگی مشابه است. خصوصاً در مورد ستون سنگی با هسته‌ی متراکم، این موضوع صادق‌تر است و چنین برداشت می‌شود که تراکم این ناحیه باعث توزیع یکنواخت تنش در طول ستون سنگی و تغییر شکل‌هایی یکنواخت‌تر از امتداد طول شده است. در واقع می‌توان گفت گسیختگی در این ستون‌ها به صورت گسیختگی کلی رخ داده است.



شکل ۵: تغییر شکل‌های ایجاد شده در ستون‌های سنگی مختلف پس از بارگذاری: الف) ستون سنگی منفرد به قطر ۱۰ سانتی‌متر با بارش ماسه ای ، ب) ستون سنگی منفرد به قطر ۱۰ سانتی‌متر، متراکم، ج) ستون سنگی چهارتایی به قطر ۶ سانتی‌متر و با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱۱ سانتی‌متر، د) ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر با هسته‌ی مرکزی به قطر ۶ سانتی‌متر و با بارش ماسه ای و مسلح به غلاف ژئوتکستایل، ه) ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر با هسته‌ی مرکزی به قطر ۶ سانتی‌متر، متراکم و مسلح به غلاف ژئوتکستایل

نتایج حاصل از این مطالعات نشان داده است افزودن ستون سنگی می‌تواند ظرفیت باربری خاک را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. در حالت کلی، نتایج به دست آمده در ادامه به طور خلاصه بیان می‌شود:

۱- افزودن ستون سنگی منفرد به قطر ۶ و ۱۰ سانتی‌متر به روش بارش ماسه ای ، ظرفیت باربری خاک را تا ۱۷ و ۳۶ درصد افزایش داده است. همچنین افزودن ستون سنگی متراکم به قطر ۱۰ سانتی‌متر می‌تواند ظرفیت باربری را تا ۴۳ درصد افزایش دهد. این امر نشان می‌دهد که افزایش تراکم ستون سنگی به میزان کم، می‌تواند تاثیر قابل توجه بر ظرفیت برابری آن داشته باشد. این افزایش ظرفیت باربری به دلیل افزایش اندرکنش داخلی بین ذرات و تماس آن‌ها با یکدیگر است. همچنین در مورد تغییر شکل‌های ایجاد شده در ستون سنگی حین گسیختگی می‌توان چنین گفت که افزایش تراکم باعث شده است شکم‌دادگی در ستون در تمام جهات و در ناحیه‌ای بزرگ‌تر رخ دهد. در حالی که در ستون سنگی با روش بارش ماسه این پدیده اغلب در قسمت‌هایی کوچک و به یک سمت رخ داده است.

۲- ستون‌های سنگی چهارتایی به شعاع ۶ سانتی‌متر و فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱۱ سانتی‌متر ظرفیت باربری خاک را تا ۶۰ درصد افزایش داده است. همچنین مشخص شد که تغییر شکل ایجاد شده در ستون‌های سنگی پس از بارگذاری بیش‌تر به صورت یک کمانش و تغییر شکل به سمت خارج از مجموعه‌ی چهارتایی ستون سنگی می‌باشد. این امر می‌تواند به دلیل فشردگی ایجاد شده در قسمت داخلی در اثر تغییر شکل هر چهار ستون سنگی باشد.

۳- ستون‌های سنگی به قطر ده سانتی‌متر با هسته‌ی مرکزی مسلح و به قطر ۶ سانتی‌متر، در دو حالت هسته‌ی مرکزی با حالت بارش ماسه ای و متراکم، ظرفیت باربری خاک را به میزان ۴۳ و ۵۴ درصد افزایش داده‌اند. با توجه به اینکه ستون سنگی منفرد ساده با حالت بارش ماسه ای و متراکم ظرفیت باربری را ۳۶ و ۴۳ درصد افزایش دادند، می‌توان چند نتیجه‌گیری داشت. اول اینکه افزودن صرفاً یک غلاف ژئوتکستایل به داخل ستون سنگی باعث می‌شود بدون افزودن تعداد و ابعاد ظرفیت باربری ۷ درصد افزایش یابد. افزودن غلاف ژئوتکستایل به ستون سنگی و افزایش تراکم ستون سنگی نیز تاثیر مشابهی بر ظرفیت باربری ستون داشتند. بنابراین بسته به شرایط مختلف می‌توان جهت تقویت ستون هر یک از این روش‌ها را مورد بررسی قرار داد. ستون سنگی با هسته‌ی مرکزی متراکم و مسلح به غلاف ژئوتکستایل که ترکیبی از هر دو حالت تقویتی ذکر شده‌اند، ظرفیت باربری را نسبت به هر دو روش به میزان ۱۱ درصد افزایش داد. که این خود تاییدی بر تاثیر هر دو حالت است. در رابطه با تغییر شکل‌های ایجاد شده در ستون‌های سنگی غلاف‌دار نیز می‌توان چنین اظهار نظر کرد که افزودن یک غلاف ژئوتکستایل به داخل ستون باعث شده است که کم بودن تنش محصورکننده‌ی اطراف ستون سنگی تا حد زیادی جبران شود و وقوع پدیده‌ی شکم‌دادگی در یک نقطه خاص تقریباً حذف شود. در این ستون‌ها تغییر شکل جانبی در اکثر قسمت‌های طول ستون سنگی تقریباً یکسان است و گسیختگی بیش‌تر به صورت گسیختگی کلی رخ می‌دهد. همچنین با مقایسه‌ی نتایج مربوط به ستون ۱۰ سانتی‌متری متراکم و ستون هسته‌دار با ستون‌های چهارتایی می‌توان گفت افزایش ظرفیت در ستون‌های چهارتایی نسبت به سه گروه دیگر، بسیار زیاد نیست. با توجه به بالا بودن حجم کار و مصالح مورد نیاز در ستون چهارتایی، می‌توان گفت استفاده از ستون‌های متراکم و هسته‌دار بسته به شرایط مورد نیاز می‌تواند نسبت به ستون‌های چندتایی اقتصادی‌تر باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی حاضر به بررسی تاثیر ستون سنگی دارای غلاف ژئوتکستایل بر روی ظرفیت باربری خاک، به عنوان مسلح‌کننده‌ی خاک می‌پردازد. در این بررسی ستون‌های سنگی منفرد به قطر ۶ و ۱۰ سانتی‌متر با روش بارش ماسه ای، ستون سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر به صورت متراکم، ستون سنگی چهارتایی به قطر ۶ سانتی‌متر با آرایش مربعی و ستون‌های سنگی به قطر ۱۰ سانتی‌متر و با هسته‌ی مرکزی به قطر ۶ سانتی‌متر و مسلح به غلاف ژئوتکستایل در دو حالت بارش ماسه و متراکم به دو روش مدلسازی آزمایشگاهی و عددی با نرم‌افزار Plaxis 3D Foundation مطالعه شدند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد نرم‌افزار Plaxis قادر است با دقت بالایی رفتار ستون‌های سنگی را در خاک پیش‌بینی نماید. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش قطر ستون سنگی می‌تواند ظرفیت باربری را افزایش دهد. این میزان افزایش را می‌توان به روش‌های مختلفی بهبود داد. از جمله متراکم کردن ستون سنگی، استفاده از هسته‌ی مرکزی مسلح به غلاف ژئوتکستایل و یا متراکم کردن هسته‌ی مرکزی. بسته به شرایط و بهسازی مورد نیاز می‌توان از این روش‌ها به عنوان یک روش بهسازی خاک و تقویت ستون‌های سنگی استفاده کرد.

با توجه به بررسی تغییر شکل‌های رخ داده در ستون‌های سنگی حین بارگذاری، می‌توان گفت تغییر شکل‌های رخ داده در ستون در حالات مختلف ستون سنگی نیز با یکدیگر تفاوت قابل توجهی دارند. استفاده از غلاف ژئوتکستایل به عنوان هسته مرکزی و همچنین متراکم کردن ستون سنگی باعث شده برخلاف ستون‌های تکی و چندتایی، گسیختگی در این ستون‌ها به صورت گسیختگی موضعی رخ ندهد و تغییر شکل در تمام قسمت‌های ستون مشاهده شود.

## مراجع

- [1] Al-Bared, M. A. M. and Marto, A. (2017). A review on the geotechnical and engineering characteristics of marine clay and the modern methods of improvements. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 13(4), 825-831.
- [2] Mohapatra, S. R. and Rajagopal, K. (2017). Undrained stability analysis of embankments supported on geosynthetic encased granular columns. *Geosynthetics International*, 24(5), 465-479. <https://doi.org/10.1680/jgein.17.00015>
- [3] Almeida, M. Riccio, M. Hosseinpour, I. and Alexiew D. (2018). *Geosynthetic encased columns for soft soil improvement*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- [4] Lima, B. T. Almeida, M. S. and Hosseinpour, I. (2019). Field measured and simulated performance of a stone columns-strengthened soft clay deposit. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 1-10. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1653506>.
- [5] Xue, J. Liu, Z. and Chen, J. (2019). Triaxial compressive behaviour of geotextile encased stone columns. *Computers and Geotechnics*, 108, 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.010>
- [6] Zhou, Y. Kong G. Zheng, J. Wen, L. Yang, Q. (2021). Analytical solutions for geosynthetic-encased stone column-supported embankments with emphasis on nonlinear behaviours of columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5), 1107-1116.
- [7] Han, J. (2015a). *Principles and practice of ground improvement*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- [8] Samanta, M. and Bhowmik, R. (2019) 3D numerical analysis of piled raft foundation in stone column improved soft soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(5), 474-483. <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1368139>
- [9] Hughes, J. M. and Withers, N. J. (1974). Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns. *Ground Engineering*, 7(3), 42-49.
- [10] Greenwood, D. A. (1991). Load tests on stone columns Deep Foundations and Improvements, Design, Construction and Testing. *ASTM 1089*, 148-171. DOI:10.1520/stp1089-eb
- [11] Nehab, N. Baba, K. Quadif L. and Bahi, L. (2016). THREE-DIMENSIONAL MODELING OF A GROUP OF STONE COLUMNS IN "BOUREGREG VALLEY" SOFT GROUND. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(24), 14537-14544.
- [12] Jamshidi Chenari, R. Karimpour Fard, M. Jamshidi Chenari, M. and Shamsi Sosahab, J. (2017). Physical and Numerical Modeling of Stone Column Behavior. *International Journal of Civil Engineering*, 17. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0223-6>
- [13] Han, J. (2015b). Recent research and development of ground column technologies. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 168(4), 246-264. <https://doi.org/10.1680/grim.13.00016>
- [14] Hosseinpour, I. Soriano, C. and Almeida, M. S. (2019). A comparative study for the performance of encased granular columns. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.12.002>
- [15] Xu, F. Moayed, H. Foong, L. k. Moghadam, M. J. and Zanganeh, M. (2021). Laboratory and numerical analysis of geogrid encased stone columns. *Measurement*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108369>
- [16] Ghorbani, A. Hosseinpour, I. and Shormage, M. (2020). Deformation and Stability Analysis of Embankment over Stone Column-Strengthened Soft Ground. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25, 404-416. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0349-y>
- [17] Ghazavi, M. and Nazari Afshar, J. (2013). Bearing capacity of geosynthetic encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*, 38, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.04.003>
- [18] Sharma, R.K. (2019). A numerical study of granular pile anchors subjected to uplift forces in expansive soils using PLAXIS3D. *Indian Geotechnical Journal*, 49(3), 304-313. <https://doi.org/10.1007/s40098-018-0333-3>
- [19] Mehrannia, N. Nazariafshar, J. and Kalantary, F. (2018). Experimental investigation on the bearing capacity of stone columns with granular blankets. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1), 209-222. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0317-6>
- [20] Hajiazizi, M. Nemati, E. Nasiri, M. Bavali, M. and Sharifipour, M. (2020). Optimal location of stone column for stabilization of sand slope: An experimental and 3D numerical investigation. *International Journal of Science & Technology*, 27(1), 105-116. <https://dx.doi.org/10.24200/sci.2018.20331>
- [21] Vekili, M. Aytekin, M. Ikizler, S. and Calik, U. (2012). Experimental and numerical investigation of slope stabilization by stone columns. *Natural Hazards*, 64, 797-820. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0272-8>
- [22] Zheng, G. Yu, X. Zhou, H. Wang, S. Zhao, J. He, X. and Yang, X. (2020). Stability analysis of stone column-supported and geosynthetic-reinforced embankments on soft ground. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(3), 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.12.006>
- [23] Hong, Y.S. Wu, C.-S. Kou, C.-M. and Chang, C.-H. (2017). A numerical analysis of a fully penetrated encased granular column. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(5), 391-405. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.05.002>

- [24] Fahmi, K. S. Fattah, M. Y. and Pustovgar, A. (2018). Design and Improvement of foundation soil for high-rise construction. *International Science Conference SPbWOSCE-2017 "Business Technologies for Sustainable Urban Development"*.
- [25] Vibhoosha, M. P. Bhasi, A. and Nayak, S. (2020). Effect of Geosynthetic Stiffness on the Behaviour of Encased Stone Columns Installed in Lithomargic Clay. *Advances in Computer Methods and Geomechanics*, 55, 197-207. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-0886-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-15-0886-8_16)
- [26] ASTM D 3080-98, (1999). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained conditions*, United States: Annual Book of ASTM Standards.
- [27] ASTM D 422-63, (2003). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. In: *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 04.(08), 10-17.
- [28] ASTM D4632, (2015). *Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles*. West Conshohocken: ASTM International.
- [29] ASTM D4833, (2020). *Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembranes and Related Products*, West Conshohocken: ASTM International.
- [30] Gerrard, C. M. Pande, G. N. and Schweiger, H. F. (1984). Modelling behaviour of soft clays reinforced with stone columns, Paris.
- [31] Hajiazizi, M. Nasiri, M. (2020). 3D Numerical Stability Investigation of Sand Slope Reinforced Using Geogrid Encased Stone Column. *AMIRKABIR Journal of Civil Engineering*, 52(3), 531-550. <https://dx.doi.org/10.22060/ceej.2018.14678.5718>
- [32] Muir Wood, D. Hut W. and Nash, D. F. T. (2000). Group effects in stone column foundations: model tests. *Géotechnique*, 50(6), 689-698. <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.6.689>
- [33] Hanna, A. M. Eteazad M. and Ayadat, T. (2013). Mode of failure of a group of stone columns in soft soil. *International Journal of Geomechanics*, 13(1), 87-96. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000175](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000175)
- [34] Christoulas, S. T. Bouckovalas, G. and Giannaros, C. H. (2000). An experimental study on model stone columns. *Soil and Foundation*, 40(6), 11-22. [https://doi.org/10.3208/sandf.40.6\\_11](https://doi.org/10.3208/sandf.40.6_11)
- [35] Das, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering*, 7th ed., Stamford: Cengage Learning.
- [36] Madhav, M. R. and Van Impe, W. F. (1994). LOAD TRANSFER THROUGH A GRAVEL BED ON STONE COLUMN REINFORCED SOIL. *Geotechnical Engineering*, 25.
- [37] Tan, X. and Zhao, M. (2018). Deformation and Failure Behavior of the Isolated Single Stone Column with and Without Geosynthetic Encasement. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Asia Urban GeoEngineering*.