



University Of Qom



Development of a Laboratory-Scale Deep Soil Mixing Device for Assessing the Influential Factors on Strength of DSM Columns

Mahdi Safdari Seh Gonbad¹, Mahmood Reza Abdi²

1. Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: m.safdari@email.kntu.ac.ir
2. Corresponding author, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: abdi@kntu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 01 Mar 2025
Revised 20 Apr 2025
Accepted 09 May 2025
Published 13 May 2025

Keywords:
Ground Improvement,
Deep Soil Mixing,
DSM Device,
DSM Column,
Compressive Strength.

ABSTRACT

The wide range of applications of deep soil mixing has attracted the attention of many researchers to this ground improvement method. Although large-scale field tests are known as the most reliable method for investigating the strength characteristics of DSM columns, the high cost and time-consuming nature of these tests are challenging. To overcome these issues, some researchers have utilized laboratory-scale deep soil mixing devices. However, limited information is available on the design and construction of these apparatuses. Enhancing knowledge in the design and manufacture of this equipment will eliminate the weaknesses of previous devices, increase the capabilities of future apparatuses, optimize construction time and cost, expand studies related to the deep soil mixing method, and ultimately raise awareness of this ground improvement technique. Therefore, this study first fully describes the development of a laboratory-scale deep soil mixing device. Then, the compressive strength of two groups of small-scale DSM columns, both constructed using the developed device and having the same dimensions and installation method, was investigated. The first group had identical cement content and water/cement ratio, while these factors varied in the second group. The low strength variability and good mixing quality of the first group confirmed the performance and accuracy of the developed device for constructing DSM columns. Strength evaluation of the second group showed that by reducing the water/cement ratio and increasing the cement content, the compressive strength of the columns increased.

Cite this article: Safdari Seh Gonbad M, Abdi MR. Development of a Laboratory-Scale Deep Soil Mixing Device for Assessing the Influential Factors on Strength of DSM Columns. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 145-166. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.12467.1606>



Introduction

The increasing demand for civil projects has compelled geotechnical engineers to utilize unsuitable soils and address their consequences. A solution that has emerged in the last few decades is ground improvement, which encompasses several techniques. Among these techniques, the deep soil mixing method (DSM) has gained widespread acceptance and is used globally, particularly in Iran, due to its simultaneous response to both elastic and consolidation settlements, its reduction of liquefaction potential, and its ease of implementation by a variety of contractors. Therefore, understanding the behavior of DSM columns is both important and necessary. Although field experiments are the most effective method for investigating and understanding the behavior of columns, they are infrequently conducted due to their high costs and time-consuming nature. To address this limitation, some researchers have developed and utilized laboratory-scale DSM setups. A review of the literature indicates that the evaluation of DSM column behavior using these devices has been well-received, and many studies have been conducted with them. However, limited information is still available regarding this equipment. Consequently, this study presents the development of a DSM setup. To investigate its accuracy and capability in installing DSM columns, as well as to examine key factors affecting the strength of these columns, the compressive strength of two groups of small-scale DSM columns—both constructed in saturated sand beds using the developed device and having the same dimensions and installation method—was assessed. The first group had identical cement content and water/cement ratio, while these factors varied in the second group.

Materials and Methods

In the present study, uniform-grained sand with the physical characteristics presented in Table 1 was used to prepare the soil beds. Additionally, Portland cement Type 2 was utilized to create the slurry and install

the columns. It should be noted that for the first group of columns, the cement content and water/cement were equal to 500 kg/m³ and 2.5, respectively, while for the second group, these values varied, ranging from 300 to 500 kg/m³ and from 2.5 to 3.5, respectively.

Table 1. physical properties of sand

Property	Value
Maximum Dry Density (g/cm ³)	1.6
Minimum Dry Density (g/cm ³)	1.35
Coefficient of Uniformity	1.66
Coefficient of Curvature	0.94
Friction Angle (°)	27
Specific Gravity	2.62
Permeability (m/s)	4.5×10 ⁻⁵
USCS Classification	SP

To prepare the saturated sand beds, specific weights of dry sand and water were first mixed together to facilitate the preparation. Subsequently, the required amount of wet sand for each 10 cm layer was weighed, transferred into the box, and spread evenly. The spread sand was then lightly tamped using a hammer to ensure that its relative density did not increase significantly and remained at 30%. Water was then slowly added to the soil near the walls of the box so that the water level was slightly above the sand surface. These steps were repeated eight more times until the sand level inside the box reached a height of 90 cm.

All DSM columns (groups 1 and 2) were installed in a square arrangement with horizontal center-to-center distances of 250 mm from each other. For all columns, the mixing tool penetrated the soil bed at a constant speed of 1 cm/s while simultaneously injecting cement slurry. After reaching a depth of 60 cm, the mixing tool rotated for 10 seconds. Finally, the mixing tool moved upward at a constant speed of 0.33 cm/s and exited the bed. It should be noted that the length and diameter of the columns in both groups were 60 cm and 10 cm, respectively.

After the columns had rested in the beds for one week, the sand around them was gently excavated and removed from the box. The columns were then taken out and wrapped in plastic before being cured in a laboratory environment for three weeks. After curing was completed, two samples with a height-to-

diameter ratio of 2 were taken from each column. The samples were then capped and subjected to a compressive test according to ASTM D2166 standard.

Results and Discussion

Fig. 1 presents the compressive strength histogram of samples taken from the first group of DSM columns. The results indicate that the compressive strength of the samples ranged from 0.7 to 1.2 MPa, with an average of 1.28 MPa. This range and average align with the strengths obtained in field projects, confirming the effective performance of the developed device in the construction of DSM columns. Additionally, the data reveal that the coefficient of variation for the compressive strength of the samples was 22%, which is consistent with the coefficient of variation obtained in field projects. This finding further indicates the reliable performance and high accuracy of the device in the installation of DSM columns.

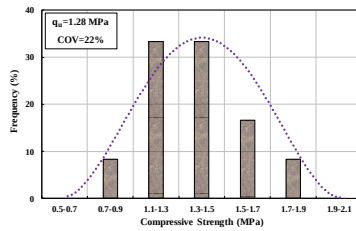


Fig. 1. Histograms of compressive strength for samples obtained from the first group of DSM columns.

Fig. 2 illustrates examples of cross-sections of DSM columns from the first group. It is evident that the cement gel has effectively filled the spaces between the sand particles, and proper bridging has successfully connected the sand particles to one another. This observation underscores the success of the mixing process and the effective functioning of the developed device.



Fig. 2. Cross-sectional examples of DSM columns from the first group.

Fig. 3 depicts the variations in the average compressive strength of DSM columns from the second group in relation to

cement content and water/cement factors. The results demonstrate that the compressive strength of the columns is influenced by the cement content. For instance, increasing the cement content from 300 to 500 kg/m³ resulted in an increase in the average compressive strength of the columns by 39% to 55%. Furthermore, it is observed that the compressive strength of DSM columns is also affected by the water/cement factor. Specifically, increasing the water/cement factor from 2.5 to 3.5 led to a decrease in the average compressive strength of the columns by 55% to 61%.

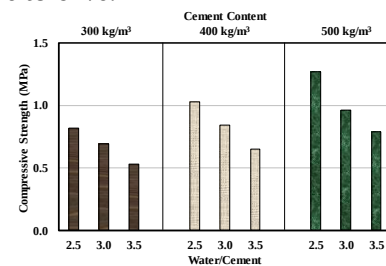


Fig. 3. variations in average compressive strength of DSM columns from the second group as a function of cement content and water/cement factors.

Contributions

A summary of the most important results obtained in this research is as follows:

1) The similarity in the range, average, and coefficient of variation of the compressive strength of DSM columns with the values obtained from field projects, along with the high mixing quality of these columns, indicates the high accuracy and effective performance of the developed device in the construction of DSM columns.

2) The compressive strength of the columns is inversely and directly related to the water/cement and cement content factors, respectively.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization, development, and preparation of this manuscript.

توسعه یک دستگاه اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی برای ارزیابی عوامل مؤثر بر مقاومت ستون‌های دی.اس.ام

مهدی صفدری سه‌گنبد^۱، محمودرضا عبدی^۲

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: m.safdari@email.kntu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. رایانامه: abdi@kntu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۳

کلیدواژه‌ها:

بهسازی زمین،
اختلاط عمیق خاک،
دستگاه دی.اس.ام،
ستون دی.اس.ام،
مقاومت فشاری.

کاربردهای فراوان روش اختلاط عمیق خاک، توجه بسیاری از محققان را به این شیوه بهسازی زمین جلب نموده است. اگرچه آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس میدانی به عنوان معتبرترین و قابل اعتمادترین روش بررسی خصوصیت‌های مقاومتی ستون‌های دی.اس.ام شناخته می‌شوند، ولی هزینه زیاد و زمان‌بر بودن این آزمایش‌ها چالش‌برانگیز است. به منظور غلبه بر این مشکلات، برخی از پژوهشگران دستگاه‌های اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی را در پژوهش‌های خود به کار گرفته‌اند. با این حال، اطلاعات محدودی در خصوص ساخت این دستگاه‌ها در دسترس است. ارتقای دانش طراحی و ساخت این دستگاه‌ها موجب رفع کاستی دستگاه‌های قبلی، افزایش توانمندی دستگاه‌های آینده، بهینه‌سازی زمان و هزینه ساخت، گسترش پژوهش‌های مرتبط با شیوه اختلاط عمیق خاک و در نهایت افزایش آگاهی در خصوص این روش بهسازی زمین می‌شود. بر این اساس، در مطالعه حاضر، ابتدا توسعه یک دستگاه اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی به طور کامل تشریح و سپس مقاومت فشاری دو گروه ستون دی.اس.ام با ابعاد و روش نصب یکسان که توسط دستگاه توسعه داده شده احداث گردیده بودند، مورد بررسی قرار گرفته است. دسته اول ستون‌ها عیار و نسبت آب به سیمان یکسانی داشتند، ولی در گروه دوم این عوامل متفاوت بودند. تغییرپذیری پایین مقاومت و کیفیت خوب اختلاط گروه اول مؤید عملکرد خوب و دقت بالای دستگاه توسعه داده شده در اجرای ستون‌های دی.اس.ام بود. نتایج ارزیابی مقاومت نمونه‌های اخذ شده از دسته دوم نشان داد که با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش عیار سیمان، مقاومت فشاری ستون‌ها افزایش یافته است.

استناد: صفدری سه‌گنبد مهدی، عبدی محمودرضا. توسعه یک دستگاه اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی برای ارزیابی عوامل مؤثر بر مقاومت ستون‌های دی.اس.ام. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۴؛ ۱(۱۱): ۱۴۵-۱۶۶.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.12467.1606>

۱- مقدمه

کوچک مقیاس احداث شده توسط آنها نمی‌توانند به طور دقیق معرف و نماینده‌ی رفتار ستون‌های بزرگ مقیاس میدانی باشند، ولی استفاده از این تجهیزات دانش و بینش ارزشمندی در خصوص تأثیر عوامل مختلف بر کیفیت اختلاط و مقاومت ستون‌های دی.اس.ام را ارائه می‌کند. در ادامه دستگاه‌های اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده توسط سایر پژوهشگران مرور شده‌اند.

أطباء^۱ و ایوانز^۲ (۱۹۹۹) اولین محققینی بودند که یک دستگاه اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی را توسعه دادند [۳۶]. این دستگاه ساده و متشکل از سه سیستم جابجایی قائم، حرکت دورانی و تزریق دوغاب بود. به دلیل عدم تعبیه سیستم جابجایی افقی، در این دستگاه جهت مدل‌سازی بستر خاک از یک تانکر کوچک استفاده شده بود که در زیر ابزار اختلاط قرار می‌گرفت. این دستگاه چندین ایراد فنی داشت. نخست آن که به دلیل نیاز به نصب تعداد زیادی ستون دی.اس.ام کوچک مقیاس در زمان محدود، می‌بایست پس از نصب هر ستون، تانکر خاک تعویض می‌شد. حال آن که تعویض آن، ارتعاشات و لرزش‌هایی به ستون تازه نصب شده وارد نموده و موجب آسیب دیدن و کاهش مقاومت آن می‌شد. به عبارت دیگر ستون‌های نصب شده توسط این دستگاه، قبل از گیرش مناسب، تحت تنش قرار می‌گرفتند. دوم عدم طراحی سیستم‌های جابجایی افقی و محفظه‌ی خاک بود که انجام مدل‌سازی‌های فیزیکی را نیز غیرممکن می‌ساخت. سوم نیز آن بود که جابجایی قائم در این دستگاه با نیروی دست انجام می‌شد، که این امر مطمئناً موجب عدم کنترل مناسب سرعت نفوذ و خروج ابزار اختلاط و بروز خطاهای انسانی می‌شد. چیتامبیرا^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۱ به منظور بررسی رفتار مقاومتی ستون‌های دی.اس.ام اجراء شده در نوعی خاک ماسه‌ای، یک دستگاه مقیاس

افزایش تقاضا برای احداث پروژه‌های عمرانی در کنار کمبود و گرانی زمین، مهندسین عمران را ناگزیر به استفاده از زمین‌های مسئله‌دار و مقابله با عواقب آن نموده است [۱ و ۲]. در این راستا، ابتداء مهندسین شمع‌ها و ریزشمع‌ها را به عنوان راهکار مورد استفاده قرار می‌دادند که موجب غیر اقتصادی شدن پروژه‌ها می‌گردید [۳ و ۴]. راه حل دیگری که در چند دهه‌ی اخیر معرفی شده است، بهسازی خاک نام دارد که شامل تکنیک‌هایی نظیر تثبیت بیولوژیکی و شیمیایی [۵-۷]، تسلیح خاک [۸-۱۱]، تراکم دینامیکی [۱۲ و ۱۳]، تراکم ارتعاشی [۱۴ و ۱۵]، ستون سنگی [۱۶ و ۱۷]، جت گروتینگ [۱۸ و ۱۹] و اختلاط عمیق خاک [۲۰ و ۲۱] می‌باشد. از میان این تکنیک‌ها، روش اختلاط عمیق خاک به دلیل مقابله‌ی همزمان با نشست‌های آبی و تحکیمی، ظرفیت باربری پایین و پتانسیل روانگرایی، و همچنین سهولت اجرا و تعدد پیمانکاران، در سراسر جهان و به خصوص ایران مورد استقبال و استفاده قرار گرفته است [۲۲-۳۰]. بستر بهسازی شده با تکنیک اختلاط عمیق خاک، یک سیستم مرکب، متشکل از ستون‌های دی.اس.ام و خاک رسی نرم و یا ماسه‌ای سست تثبیت نشده‌ی پیرامون آنها است. به همین خاطر شناخت رفتار این ستون‌ها جهت عملکرد ایمن سازه‌ی فوقانی بسیار مهم است [۲۶]. معتبرترین و قابل اعتمادترین شیوه‌ی بررسی و شناخت رفتار ستون‌های دی.اس.ام، آزمایش‌های بزرگ مقیاس میدانی می‌باشند، ولی به دلیل هزینه‌ی بالا و زمان‌بر بودنشان، کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳۱-۳۵]. جهت پوشش این ضعف و همچنین انجام مدل‌سازی‌های فیزیکی، برخی از محققین دستگاه‌های اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی را توسعه و در تحقیقاتشان به کار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که دستگاه‌های اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی گرچه محدودیت‌هایی نظیر ابعاد کاهش یافته‌ی ستون‌ها را دارند (اثر مقیاس) و ستون‌های

1- Al-Tabbaa

2- Evans

3- Chitambira

ارزیابی شوری خاک بر مقاومت این ستون‌ها به کارگیری شد [۴۱-۴۴]. دستگاه توسعه داده شده گرچه به مراتب ارتقاء یافته‌تر از دستگاه‌های قبلی بود و از پنج سیستم جابجایی قائم، جابجایی افقی، حرکت دورانی، تزریق دوغاب و محفظه‌ی خاک بهره می‌برد، ولی ضعف‌هایی نیز داشت. نخست آن که در این دستگاه، سیستم تزریق دوغاب به صورت ثقلی بود و جهت جلوگیری از مسدود شدن نازل‌های تزریق در حین نفوذ ابزار اختلاط به بستر خاک، باد به وسیله‌ی کمپرسور به درون شفت اختلاط تزریق می‌شد. دوم آن که سیستم جابجایی قائم این دستگاه که از یک الکتروموتور بهره می‌برد فاقد قابلیت تنظیم سرعت نفوذ و خروج ابزار اختلاط بود و به همین خاطر این دستگاه قادر به بررسی برخی از عوامل اجرایی تاثیرگذار بر رفتار مقاومتی ستون‌های دی.اس.ام نبود. به منظور مطالعه‌ی رفتار مقاومتی یک نوع خاک رسی بهسازی شده، فريخا^{۱۰} و همکاران یک دستگاه مقیاس آزمایشگاهی را طراحی کردند [۴۵]. دستگاه فوق‌الذکر تنها متشکل از سیستم‌های جابجایی قائم، حرکت دورانی و تزریق دوغاب بود، به همین خاطر مشابه با دستگاه طراحی شده آلطباء و ایوانز (۱۹۹۹) بود ولی جابجایی قائم آن توسط یک موتور هیدرولیکی تأمین می‌شد. بر این اساس این دستگاه نیز همان ضعف‌های دستگاه‌های قبلی را داشت ولی سرعت جابجایی قائم ابزار اختلاط در آن بسیار کنترل شده‌تر با قابلیت تنظیم سرعت بود. ساکر^{۱۱} و همکاران به منظور مدل‌سازی فیزیکی فونداسیون‌های قرار گرفته بر روی بستر بهسازی شده با تکنیک اختلاط عمیق خاک، یک دستگاه مقیاس آزمایشگاهی را در سال ۲۰۱۹ ساختند [۴۶]. ضعف اصلی این دستگاه بهره‌گیری از نیروی دست در سیستم جابجایی قائم آن بود، به همین خاطر سرعت نفوذ و خروج ابزار اختلاط آن خطاهای

آزمایشگاهی را طراحی نمودند [۳۷]. دستگاه فوق‌الذکر فقط از سه سیستم جابجایی قائم، حرکت دورانی و تزریق دوغاب بهره می‌برد، به همین خاطر دقیقاً همان نقاط ضعف دستگاه آلطباء و ایوانز^۴ (۱۹۹۹) را داشت. در سال ۲۰۰۴، هرناندز-مارتینز^۵ و آلطباء در مطالعات خود به منظور بررسی رفتار مقاومتی یک نوع خاک پیت بهبود یافته، از یک دستگاه اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی استفاده کردند که بسیار مشابه دستگاه آلطباء و ایوانز (۱۹۹۹) بود [۳۸]. به همین خاطر این دستگاه نیز فاقد سیستم‌های جابجایی افقی و محفظه‌ی خاک بود و سیستم جابجایی قائم آن از نیروی دست بهره می‌برد. کاستلباوم^۶ و همکاران (۲۰۱۱) جهت بررسی پارامترهای فیزیکی ستون‌های دی.اس.ام، یک دستگاه را توسعه دادند [۳۹]. این دستگاه فاقد سیستم‌های جابجایی افقی و محفظه‌ی خاک بود، ولی مزیت آن نسبت به دستگاه‌های قبلی دستی نبودن سیستم جابجایی قائم آن بود. یی^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۳ برای بررسی رفتار مقاومتی یک نوع ماسه‌ی بهسازی شده به روش اختلاط عمیق خاک، یک دستگاه مقیاس آزمایشگاهی را طراحی کردند [۴۰]. از ضعف‌های این دستگاه می‌توان به عدم تعبیه سیستم‌های جابجایی افقی و محفظه‌ی خاک اشاره نمود. اسماعیلی^۸ و همکاران (۲۰۱۴) جهت ارزیابی بازدهی بهسازی بستر ماسه‌ای با استفاده از تکنیک اختلاط عمیق خاک، یک دستگاه مقیاس آزمایشگاهی را توسعه دادند که بعدها نیز توسط اسماعیلی و خواجه‌ای^۹ (۲۰۱۶) و اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۲۱) جهت مدل‌سازی فیزیکی خاکریزهای راه‌آهن قرار گرفته بر روی بستر بهسازی شده، مطالعه‌ی تأثیر افزودنی میکروسیلیکا بر رفتار مقاومتی ستون‌های دی.اس.ام کوچک مقیاس و

^۴- Evans

^۵- Hernandez-Martinez

^۶- Castelbaum

^۷- Yi

^۸- Esmaeili

^۹- Khajehei

^{۱۰}- Frikha

^{۱۱}- Sakr

انسانی فراوانی داشت. دهقان خلیلی^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۰) به منظور مدل‌سازی فیزیکی تأثیر الگوهای نصب ستون‌های دی.اس.ام بر کاهش پتانسیل روانگرایی بسترهای ماسه‌ای، از یک دستگاه اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی استفاده کردند [۴۷]. این دستگاه با توجه به تعبیه‌ی سیستم‌های جابجایی افقی و محفظه‌ی خاک قادر بود تعداد زیادی ستون دی.اس.ام کوچک‌مقیاس را در هر بستر خاک با الگوهای متنوع احداث نماید. از نقاط ضعف این دستگاه می‌توان به دستی بودن سیستم جابجایی قائم و همچنین ثقلی بودن سیستم تزریق آن اشاره نمود که به ترتیب موجب بروز خطای انسانی در کنترل سرعت جابجایی قائم ابزار اختلاط و مسدود شدن نازل‌های تزریق هنگام نفوذ ابزار اختلاط می‌شد.

ساکر و همکاران (۲۰۲۲) به منظور مدل‌سازی فیزیکی فونداسیون‌های قرار گرفته بر روی بستر رسی بهسازی شده با تکنیک اختلاط عمیق خاک، یک دستگاه مقیاس آزمایشگاهی را توسعه دادند [۴۸]. این دستگاه گرچه دارای سیستم‌های جابجایی افقی، جابجایی قائم، حرکت دورانی، تزریق دوغاب و محفظه‌ی خاک بود ولی ضعف‌هایی نیز داشت. نخست آن که سیستم جابجایی افقی آن فقط قادر بود ابزار اختلاط را در یک جهت افقی جابجاء نماید. دوم آن که برای جابجایی در جهت افقی دیگر، تانکر خاک می‌بایست به صورت دستی جابجاء می‌شد که این کار موجب دست‌خوردگی و تغییر دانسیته‌ی خاک داخل آن، و همچنین آسیب دیدن ستون دی.اس.ام تازه نصب شده می‌شد. در سال ۲۰۲۲، اونور^{۱۳} و همکاران به منظور بررسی برخی از عوامل تأثیرگذار بر خصوصیت‌های مقاومتی ستون‌های دی.اس.ام، یک دستگاه مقیاس آزمایشگاهی را طراحی کردند [۴۹]. گرچه در سیستم جابجایی قائم این دستگاه، از موتور

الکتریکی استفاده شده بود که منجر به جابجایی قائم با سرعت کنترل‌شده و قابل تنظیم می‌شد، ولی مانند بسیاری از دستگاه‌های قبلی فاقد سیستم‌های جابجایی افقی و محفظه‌ی خاک بود. به همین خاطر این دستگاه نیز قادر به مدل‌سازی‌های فیزیکی نبوده و برای نصب ستون بعدی می‌بایست تانکر خاک آن جابجاء می‌شد. کائو^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۳) به منظور بررسی کارایی مواد خودترمیم‌کننده‌ی افزوده شده به ستون‌های دی.اس.ام، یک دستگاه مقیاس آزمایشگاهی را ساختند [۵۰]. این دستگاه نیز مانند بسیاری از دستگاه‌های قبلی فاقد سیستم‌های جابجایی افقی و محفظه‌ی خاک بود و سیستم جابجایی قائم آن که از الکتروموتور بهره می‌جست قابلیت تنظیم سرعت نفوذ و خروج شفت اختلاط را نداشت. در سال ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴، حماد^{۱۵} و همکاران به منظور بررسی تأثیر شوری خاک بر مقاومت ستون‌های دی.اس.ام و همچنین مدل‌سازی فونداسیون‌های مستقر بر بستر شور بهسازی شده به روش اختلاط عمیق خاک، از یک دستگاه مقیاس آزمایشگاهی استفاده نمودند [۵۱] و [۵۲]. از ضعف‌های اصلی دستگاه فوق‌الذکر می‌توان به ابعاد نامتناسب سیستم‌های جابجایی قائم و افقی آن اشاره نمود که کارکرد آن را دشوار می‌نمود. ینگینار^{۱۶} و اولگون^{۱۷} (۲۰۲۳ و ۲۰۲۴) برای بررسی رفتار مقاومتی نوعی رس بهسازی شده، یک دستگاه اختلاط عمیق مقیاس آزمایشگاهی را توسعه دادند [۵۳ و ۵۴]. گرچه مزیت این دستگاه بهره‌گیری از سیستم جابجایی قائم دارای موتور الکتریکی با قابلیت تنظیم سرعت جابجایی قائم بود، ولی سیستم جابجایی افقی در آن تعبیه نشده بود. ساراید^{۱۸} و مایپاتی^{۱۹} به منظور بررسی رفتار مقاومتی یک نوع رس متورم‌شونده و یک نوع ماسه که با تکنیک اختلاط عمیق

14- Cao

15- Hammad

16- Yenginar

17- Olgun

18- Saride

19- Mypati

12- Dehghan Khalili

13- Onur

۲- دستگاه اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی

مرور ادبیات فنی ارائه شده در بخش مقدمه نشان داد که دستگاه‌های اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی برای آن که بهینه‌ترین راندمان و بالاترین دقت را در اجرای ستون‌های دی.اس.ام کوچک مقیاس داشته باشند، می‌بایست از هر پنج سیستم جابجایی قائم، جابجایی افقی، حرکت دورانی، تزریق دوغاب و محفظه‌ی خاک بهره بگیرند. به همین خاطر، تمام این پنج سیستم در طراحی و ساخت دستگاه این پژوهش مد نظر قرار گرفتند. در ادامه سیستم‌های پنج‌گانه‌ی دستگاه، همراه با اجزای اصلی آنها تشریح گردیده است. در شکل ۱ تصویر واقعی دستگاه توسعه داده شده و در شکل‌های ۲ و ۳ نماهای جانبی آن به صورت شماتیک ارائه شده است. به منظور فهم بهتر مطالب، در این شکل‌ها و همچنین داخل متن، تمامی اجزای دستگاه شماره‌گذاری شده‌اند. لازم به ذکر است که دستگاه توسعه داده شده قادر به احداث ستون‌های دی.اس.ام کوچک مقیاس با قطرهای ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و با طول‌های تا ۸۰ سانتی‌متر می‌باشد.

۲-۱- سیستم جابجایی قائم

وظیفه‌ی سیستم جابجایی قائم، جابجاء نمودن سیستم حرکت دورانی در راستای قائم (محور Z) در هر دو جهت رو به بالا و پایین است تا ابزار اختلاط بتواند به بستر خاک نفوذ نموده و از آن خارج گردد. مطابق شکل‌های ۱، ۲ و ۳، مولفه‌های اصلی این سیستم که عبارتند از: (۱) دکل، (۲) صفحه‌ی نشیمن‌گاه، (۳) قاب اتصال، (۴) ریل دنده‌شانه‌ای، (۵) چرخ‌دنده، (۶) الکتروموتور، (۷) جعبه‌دنده، (۸) اینورتر، و (۹) یاتاقان.

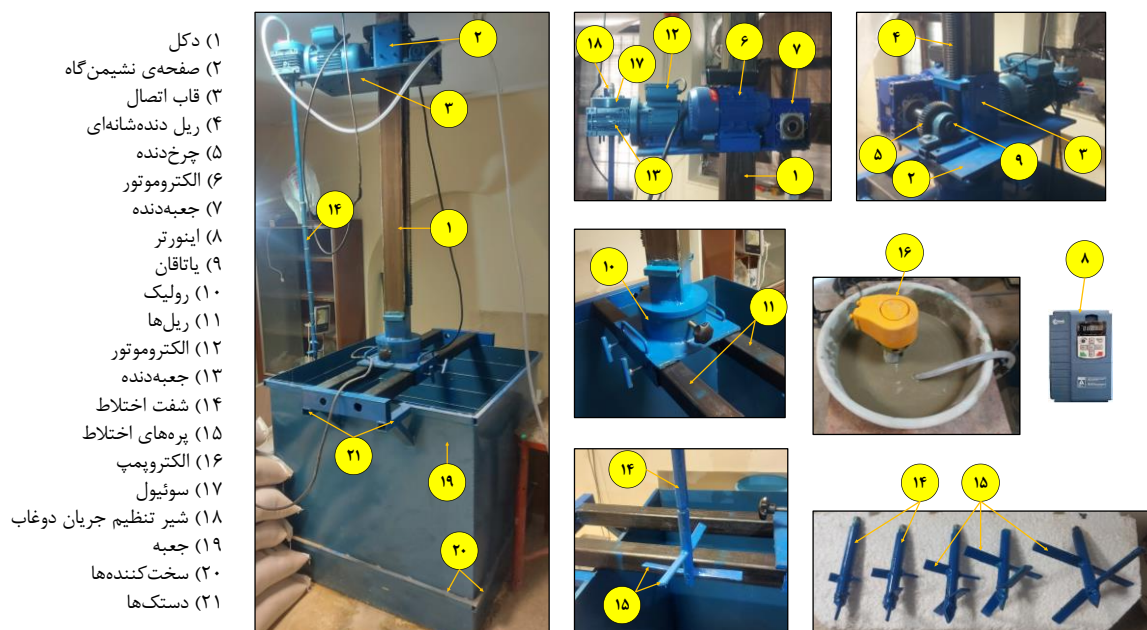
(۱) دکل: فریم یا بدنه‌ی اصلی سیستم جابجایی قائم است که سایر اجزای این سیستم و کل اجزای سیستم حرکت دورانی، به طور مستقیم و یا غیر مستقیم به آن

خاک بهسازی شده بودند، یک دستگاه مقیاس آزمایشگاهی را طراحی کردند [۵۵ و ۵۶]. این دستگاه فاقد سیستم‌های جابجایی افقی و محفظه‌ی خاک بود و جابجایی قائم آن نیز به صورت دستی انجام می‌شد.

مرور ادبیات فنی ارائه شده نشان داد که ارزیابی خصوصیت‌های مقاومتی ستون‌های دی.اس.ام با استفاده از دستگاه‌های اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی مورد استقبال قرار گرفته و تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از این دستگاه‌ها انجام گشته است. هر یک از دستگاه معرفی شده مزایا و معایب خاص خودشان را داشتند و تلاشی در راستای توسعه‌ی هر چه بهتر این دستگاه‌ها بوده‌اند. با این حال، هنوز اطلاعات محدودی در خصوص ساخت این دستگاه‌ها در دسترس می‌باشد. تقویت دانش طراحی و ساخت این دستگاه‌ها موجب رفع کاستی دستگاه‌های قبلی، افزایش توانمندی دستگاه‌های آینده، بهینه‌سازی زمان و هزینه‌ی ساخت، گسترش مطالعات مرتبط با این روش بهسازی زمین و در نهایت افزایش آگاهی در خصوص شیوه‌ی اختلاط عمیق خاک می‌شود. از این رو، در پژوهش حاضر، ابتدا توسعه‌ی یک دستگاه اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی بیان، و سیستم‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن تشریح شده است تا سایر پژوهشگران با شناخت و آگاهی بیشتر، این دستگاه‌ها را توسعه داده و یا دستگاه‌های قبلی خود را به روزرسانی نمایند. سپس در این مطالعه به منظور بررسی دقت و توانمندی دستگاه توسعه داده شده در احداث ستون‌های دی.اس.ام و همچنین ارزیابی تأثیر عیار سیمان و نسبت آب به سیمان بر مقاومت ستون‌ها، دو گروه ستون با ابعاد و روش ساخت یکسان، اجراء گردید. دسته‌ی اول ستون‌ها عیار و نسبت آب به سیمان یکسانی داشتند تا امکان بررسی تغییرپذیری مقاومت آنها میسر باشد، و گروه دوم عیار و نسبت آب به سیمان متفاوتی داشتند تا اثرگذاری این دو عامل بر مقاومت ستون‌های دی.اس.ام واکاوی گردد.

متصل شده‌اند و خود نیز بر روی سیستم جابجایی افقی قرار گرفته است. از آنجایی که وظیفه‌ی دکل ایجاد بستری به منظور جابجایی قائم (محور Z) سیستم حرکت

دورانی است، خود به صورت قائم در این سیستم قرار گرفته است. دکل از بریدن پروفیل قوطی از جنس فولاد S235 تهیه شده است.



شکل ۱- دستگاه اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی توسعه داده شده.

۲) صفحه‌ی نشیمن‌گاه: بستری است که کل اجزای سیستم حرکت دورانی و برخی از اجزای سیستم جابجایی قائم روی آن قرار گرفته‌اند و خود از طریق قاب اتصال به دکل متصل شده است. صفحه‌ی نشیمن‌گاه، صفحه‌های مستطیل شکل از جنس فولاد S235 است.

۳) قاب اتصال: این قاب وظیفه‌ی متصل نمودن دکل و صفحه‌ی نشیمن‌گاه را بر عهده دارد. اتصال صفحه‌ی نشیمن‌گاه و دکل به قاب اتصال به ترتیب به صورت مستقیم و غیر مستقیم در نظر گرفته شد. به همین خاطر، صفحه‌ی نشیمن‌گاه و قاب اتصال به صورت صلب به یکدیگر متصل شدند، ولی اتصال بین قاب اتصال و دکل به صورت اصطکاکی طراحی شد. علت اتصال اصطکاکی دکل و قاب اتصال، ایجاد درجه‌ی آزادی حرکت در راستای قائم (محور Z) بود تا این سیستم قابلیت جابجایی صفحه‌ی نشیمن‌گاه در راستای قائم را داشته باشد. قاب اتصال بکار رفته شده پروفیل قوطی از جنس فولاد S235 است.

۴) ریل دنده‌شانه‌ای: ریل دنده‌شانه‌ای با درگیر نمودن دندانه‌های خود با دندانه‌های چرخ‌دنده، حرکت دورانی چرخ‌دنده را به حرکت خطی در راستای محور Z تبدیل می‌کند. ریل دنده‌شانه‌ای بکارگیری شده از جنس فولاد C45-DIN 782 با مدول برابر با ۲ می‌باشد.

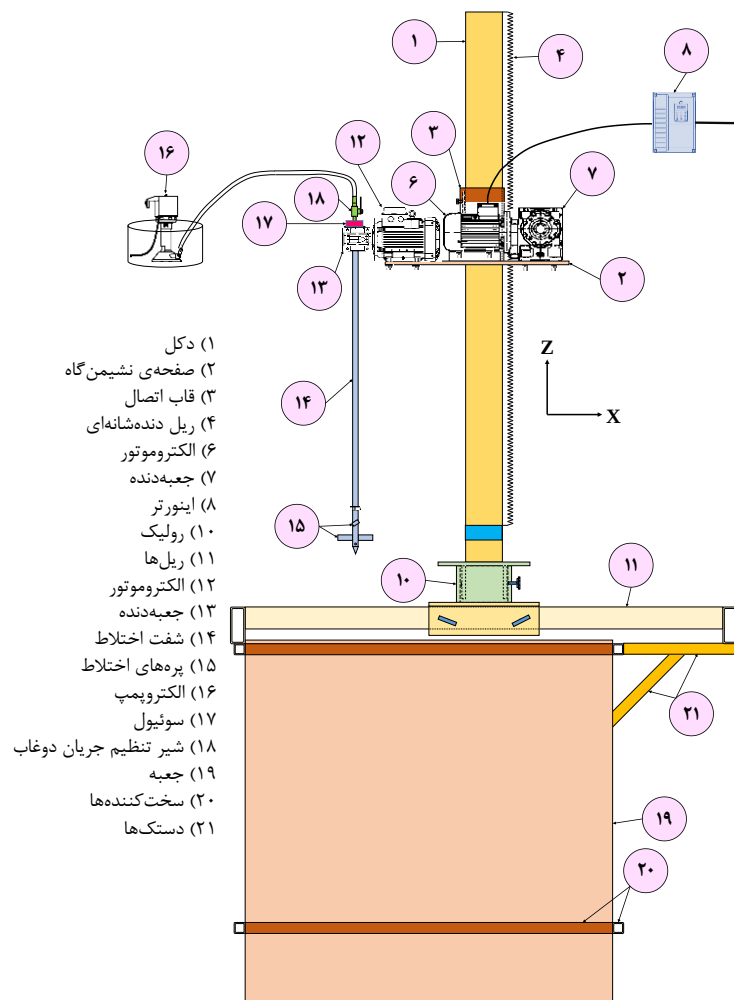
۵) چرخ‌دنده: چرخ‌دنده گشتاور خروجی از جعبه‌دنده را به ریل دنده‌شانه‌ای منتقل می‌نماید. چرخ‌دنده‌ی استفاده شده از جنس فولاد C45-DIN 782 با مدول برابر با ۲ است.

۶) الکتروموتور: الکتروموتور سیستم جابجایی قائم وظیفه‌ی تأمین گشتاور لازم جهت دوران چرخ‌دنده به منظور ایجاد جابجایی در راستای قائم در جهات رو به بالا و پایین (محور Z) را بر عهده دارد. این الکتروموتور، سه‌فاز با مدل 63-4B و اندازه‌ی فریم ۶۳ می‌باشد که توسط کارخانه‌ی الکتروژن تولید و دارای ویژگی‌های فنی مانند سرعت در بار نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه، قدرت خروجی ۰/۱۸ کیلووات، ولتاژ نامی 220Δ/380Y، جریان نامی 1.2Δ/0.67Y و گشتاور نامی ۱/۲۷ نیوتن متر است.

که توسط کارخانه‌ی سهند دور گیربکس تولید و با نام تجاری W50 در بازار عرضه می‌شود.

(۸) اینورتر: اینورتر با تغییر فرکانس و پلاریته‌ی ورودی به الکتروموتور، تغییر جهت و سرعت گشتاور خروجی الکتروموتور را کنترل می‌نماید. به عبارت دیگر، اینورتر جهت و سرعت جابجایی‌های قائم را تنظیم می‌نماید. اینورتر استفاده شده از نوع تک‌فاز ۵۰ هرتز سری DSI تولیدی شرکت پنتاکس با مشخصات توان خروجی موتور ۰/۴ کیلووات، ولتاژ نامی ۲۲۰ ولت، جریان نامی ورودی ۶ آمپر و جریان نامی خروجی ۲/۵ آمپر است.

(۷) جعبه‌دنده: در این سیستم، جعبه‌دنده وظایف افزایش و تغییر جهت محور گشتاور خروجی الکتروموتور را عهده‌دار است. علت الزام تغییر محور گشتاور توسط جعبه‌دنده آن است که محور خروجی الکتروموتور و چرخ‌دنده ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر اختلاف دارند. نیاز به افزایش گشتاور خروجی الکتروموتور نیز به این دلیل است ابزار اختلاط توان لازم جهت نفوذ به بستر خاک، اختلاط خاک-دوغاب و خروج از آن را دارا بوده و عملکرد آن مختل نگردد. این جعبه‌دنده از نوع حلزونی کتابی نیم فلنج B14 با نسبت تبدیل سرعت دورانی ۶۰ به ۱ است



شکل ۲- نمای جانبی اول دستگاه.

جابجایی قائم به گونه‌ای انتخاب شدند که سرعت جابجایی ابزار اختلاط دستگاه توسعه داده شده در جهات رو به بالا و پایین قابل تنظیم بوده و در محدوده‌ی مذکور قرار گیرد.

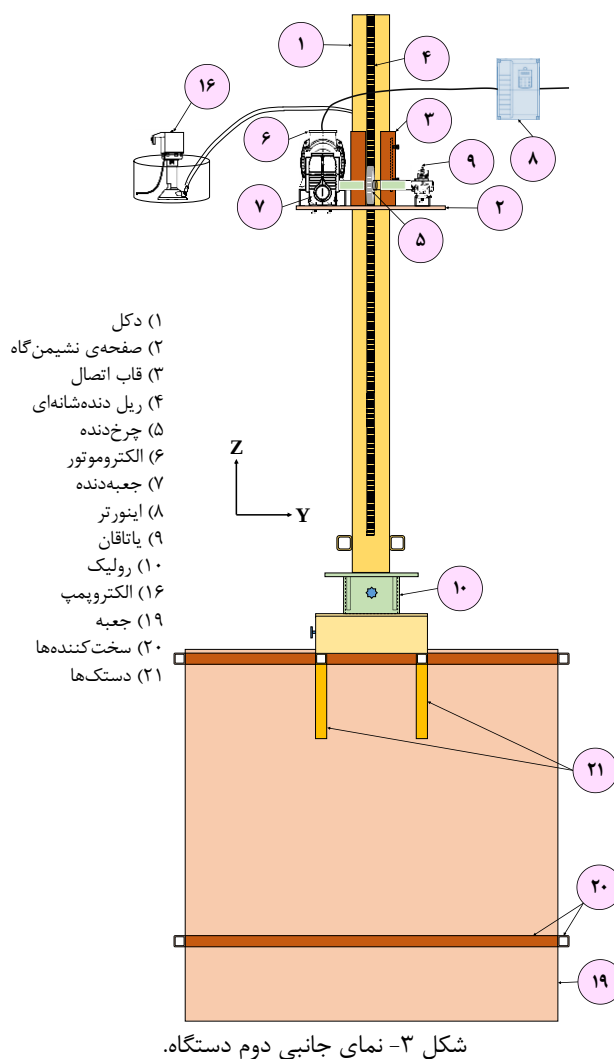
با توجه به آن که در اکثر تجهیزات اختلاط عمیق خاک میدانی بزرگ‌مقیاس، سرعت جابجایی قائم ابزار اختلاط به طور معمول ۰/۱ تا ۲ متر بر دقیقه است [۲۲-۲۷]، مشخصات فنی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سیستم

ستون‌های دی.اس.ام در راستاهای افقی (محورهای X و Y) است تا شرایطی را ایجاد نماید که ابزار اختلاط بتواند به نقاط دلخواه از سطح بستر خاک نفوذ نموده و از آن خارج شود. همان گونه که در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است، اجزای اصلی این سیستم رولیک (۱۰) و ریل‌ها (۱۱) می‌باشند.

۹) یاتاقان: یاتاقان موظف به مهار و ثابت نمودن چرخ‌دنده است تا مانع از جابجایی چرخ‌دنده و سقوط صفحه‌ی نشیمن‌گاه شود. یاتاقان هوزینگ مورد استفاده از نوع UCP 205 است.

۲-۲- سیستم جابجایی افقی

سیستم جابجایی افقی موظف به جابجاء نمودن سیستم‌های جابجایی قائم و حرکت دورانی، پیش از نصب



شکل ۳- نمای جانبی دوم دستگاه.

۱۱) ریل‌ها: ریل‌ها قطعات متحرک دیگر سیستم جابجایی افقی هستند که در زیر رولیک نصب شده و آن را در راستای افقی محور X جابجاء می‌نمایند. به عبارت دیگر، ریل‌ها و رولیک مکمل یکدیگر بوده و با کمک هم جابجایی‌های افقی لازم را تأمین می‌کنند. ریل‌ها از پروفیل قوطی مربعی از جنس فولاد S235 تهیه شده‌اند.

۱۰) رولیک: رولیک به دکل اجازه‌ی چرخش حول راستای قائم (محور Z) را می‌دهد و این گونه بخشی از جابجایی افقی در صفحه‌ی $X-Y$ را تأمین می‌نماید. رولیک از لوله‌ی مانسپیمان فولادی A106 Gr B رده‌ی ۸۰ تهیه شده است.

۲-۳- سیستم حرکت دورانی

این سیستم با ایجاد حرکت دورانی، ابزار اختلاط را می‌چرخاند تا شفت اختلاط و پره‌های اختلاط متصل به آن را به ترتیب قادر به نفوذ به بستر خاک و اختلاط مکانیکی خاک-دوغاب سازد. همان گونه که در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است، مولفه‌های اصلی این سیستم عبارتند از الکتروموتور (۱۲)، جعبه‌دنده (۱۳)، شفت اختلاط (۱۴) و پره‌های اختلاط (۱۵).

(۱۲) الکتروموتور: در این سیستم، الکتروموتور وظیفه‌ی تأمین گشتاور لازم جهت دوران ابزار اختلاط را بر عهده دارد تا شفت اختلاط و پره‌های متصل به آن بتوانند به ترتیب به بستر خاک نفوذ و خروج نموده و اختلاط مکانیکی خاک-دوغاب را انجام دهند. الکتروموتور از نوع تک‌فاز با مدل موتور 63-4B و اندازه‌ی فریم ۶۳ بوده که توسط کارخانه‌ی الکتروژن تولید و دارای ویژگی‌های فنی مانند سرعت در بار نامی ۱۳۸۰ دور بر دقیقه، قدرت خروجی ۰/۱۸ کیلووات، ولتاژ نامی ۲۲۰ ولت، جریان نامی ۱/۴۶ و گشتاور نامی ۱/۲۵ نیوتن متر است.

(۱۳) جعبه‌دنده: جعبه‌دنده‌ی سیستم حرکت دورانی موظف به کاهش سرعت دوران و تغییر محور خروجی الکتروموتور است. علت تغییر محور گشتاور توسط این جعبه‌دنده آن است که محور گشتاور خروجی الکتروموتور و شفت اختلاط ۹۰ درجه با هم اختلاف دارند. علت الزام کاهش سرعت دوران خروجی الکتروموتور نیز کاهش سرعت چرخش ابزار اختلاط است تا هم از پرتاب شدن خاک به اطراف ممانعت گردد و هم پره‌های اختلاط زمان کافی جهت هم‌زدن مکانیکی خاک-دوغاب را داشته باشند. این جعبه‌دنده از نوع حلزونی کتابی نیم فلنج B14 با نسبت تبدیل سرعت دورانی ۳۶ به ۱ بوده که توسط کارخانه‌ی سهند دور تولید و با نام تجاری W40 در بازار عرضه می‌شود.

با توجه به آن که سرعت چرخش ابزار اختلاط تجهیزات بزرگ‌مقیاس اختلاط عمیق خاک به طور معمول ۲۰ تا ۶۰ دور بر دقیقه است [۲۲-۲۷]، مشخصات فنی الکتروموتور و جعبه‌دنده‌ی این سیستم به گونه‌ای انتخاب گردیدند که سرعت چرخش ثابت ۳۸ دور بر دقیقه‌ی شفت اختلاط را تضمین نمایند.

(۱۴) شفت اختلاط: شفت اختلاط میله‌ای است توخالی که قسمت فوقانی آن به جعبه‌دنده و سوئیچول^{۲۰} و قسمت تحتانی آن به پره‌های اختلاط متصل است. وظیفه‌ی اصلی شفت اختلاط، نفوذ و خروج به بستر خاک است تا پره‌های اختلاط متصل به آن هم زدن مکانیکی خاک-دوغاب را انجام دهند. علت توخالی بودن شفت به جهت عبور دوغاب از داخل آن است. شفت اختلاط استفاده شده لوله‌ی مانسیمان فولادی A106 Gr B رده‌ی ۸۰ است.

با توجه به آن که برای این ستاپ قابلیت تغییر قطر ابزار اختلاط به منظور نصب ستون‌های دی.اس.ام با قطرهای متفاوت در نظر گرفته شده بود، شفت اختلاط به صورت دو تکه ساخته شد (شکل ۱). قطعه‌ی فوقانی آن که به جعبه‌دنده منتهی می‌شد ثابت طراحی گردید، ولی قطعه‌ی تحتانی آن که پره‌های اختلاط به آن متصل بودند قابل تعویض در نظر گرفته شد (شکل ۱).

روش‌های اجرای ستون‌های دی.اس.ام بر اساس شیوه‌ی تزریق دوغاب به دو دسته‌ی تزریق نفوذی و خروجی طبقه‌بندی می‌شود [۲۶، ۵۷ و ۵۸]. در روش‌های تزریق نفوذی و خروجی، دوغاب به ترتیب حین نفوذ و خروج ابزار اختلاط تزریق می‌گردد. با توجه به آن که شیوه‌ی تزریق نفوذی در پروژه‌های میدانی متداول‌تر و اجرای آن ساده‌تر است، برای این دستگاه نیز این شیوه مد نظر قرار گرفت. به همین خاطر، نازل‌های خروج دوغاب در پایین‌ترین بخش قطعه‌ی قابل تعویض شفت اختلاط،

20- Swivel

در زیر پره‌های اختلاط تحتانی تعبیه شدند. همچنین جهت نفوذ بهتر ابزار اختلاط و کاهش فشار وارده از سوی خاک، نوک شفت اختلاط به شکل مثلثی نوک‌تیز ساخته شد (شکل ۱).

۱۵) پره‌های اختلاط: این پره‌ها که به بخش پایینی قطعه‌ی قابل تعویض شفت اختلاط متصل شده‌اند (شکل ۱)، وظیفه‌ی هم زدن و اختلاط مکانیکی خاک-دوغاب را بر عهده دارند. با توجه به آن که شفت اختلاط تجهیزات میدانی متداول در اغلب اوقات دارای دو تا شش پره می‌باشد [۲۲-۲۷]، قطعه‌ی قابل تعویض شفت دستگاه به چهار پره‌ی اختلاط مجهز شد (شکل ۱). طول چهار پره‌ی متصل به هر قطعه‌ی قابل تعویض شفت اختلاط نیز به گونه‌ای در نظر گرفته شد که ابزار اختلاط بتواند ستون‌هایی به قطرهای ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر را احداث نماید. زاویه‌ی پره‌ها نسبت به سطح افقی در تجهیزات میدانی نیز به طور معمول ۱۰ تا ۴۵ درجه می‌باشد، به همین خاطر در این دستگاه نیز این زاویه ۳۳/۷ درجه انتخاب شد. پره‌های اختلاط از ورق‌های فولادی از جنس فولاد S235 تهیه شده‌اند.

۲-۴- سیستم تزریق دوغاب

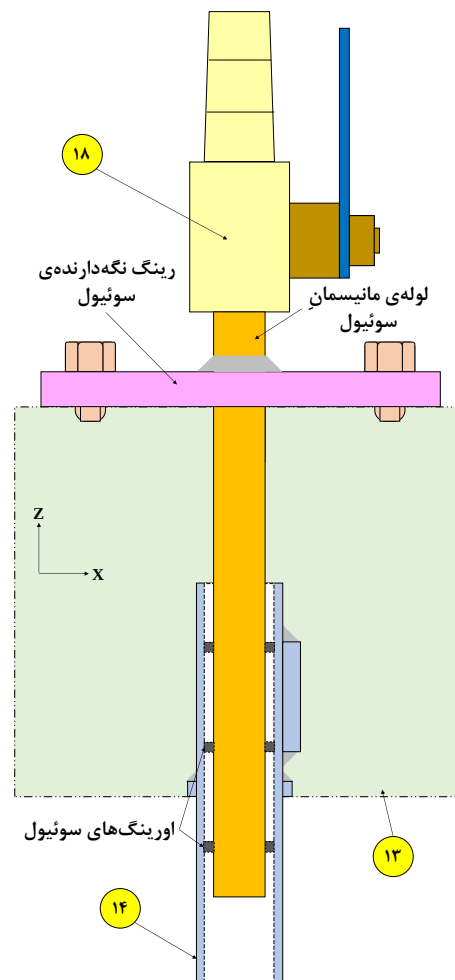
این سیستم وظیفه انتقال دوغاب به نازل‌های تزریق تعبیه شده بر روی قطعه‌ی قابل تعویض شفت اختلاط را بر عهده دارد. با توجه به شکل‌های ۱، ۲ و ۳، مشاهده می‌گردد که مولفه‌های اصلی این سیستم الکتروپمپ (۱۶)، سوئیول (۱۷) و شیر تنظیم جریان دوغاب (۱۸) می‌باشند.

۱۶) الکتروپمپ: الکتروپمپ پمپاژ با نرخ جریان ثابت دوغاب را عهده‌دار است. الکتروپمپ استفاده شده دارای پنج پره بوده و مدل آن البرز می‌باشد که توسط کارخانه‌ی الکتروژن تولید می‌شود (شکل ۱). الکتروپمپ، تک فاز با توان خروجی ۰/۴۵ کیلووات، ولتاژ نامی ۲۲۰ ولت، جریان نامی ۰/۳۵ آمپر و بیشینه هد خروجی ۲/۱ متر است.

۱۷) سوئیول: برقراری ارتباط بین سیستم‌های حرکت دورانی و تزریق دوغاب که به ترتیب می‌بایست به صورت گیردار و اصطکاکی هرزگرد باشد، بر عهده‌ی سوئیول است. دوغاب پس از گذشتن از شیر تنظیم جریان دوغاب، از داخل سوئیول عبور نموده و وارد شفت اختلاط می‌شود. هنگام اجرای ستون‌های دی.اس.ام که شفت اختلاط در حال دوران است، اگر شفت بدون واسطه‌ی سوئیول به سیستم تزریق دوغاب متصل گردد، اجزای آن سیستم را همراه با خود چرخانده، به آنها آسیب زده و در نهایت عملکرد دستگاه را مختل می‌نماید. از این رو، سوئیول نه تنها وظیفه‌ی انتقال دوغاب از شیر تنظیم جریان به شفت اختلاط را بر عهده دارد، بلکه موظف است با اتصال اصطکاکی هرزگرد خود به شفت اختلاط، از انتقال حرکت دورانی به سیستم تزریق دوغاب نیز جلوگیری نماید.

با توجه به آن که در بازار سوئیول مناسب برای دستگاه توسعه داده شده عرضه نمی‌گردد، این قطعه طراحی و ساخته شده است. جهت ساخت این قطعه از یک لوله‌ی مانیسمن از جنس فولاد A106 Gr B رده‌ی ۴۰، یک عدد رینگ نگه‌دارنده‌ی لوله‌ی مانیسمن از جنس فولاد S235 و ۳ عدد اورینگ حلقوی از جنس NBR (نیتریل) که در برابر سایش مقاوم هستند استفاده شده است. لوله‌ی مانیسمن بستر عبور دوغاب از شیر بالای خود (شیر تنظیم جریان دوغاب) تا شفت اختلاط را فراهم می‌نماید که به دلیل قطر کم خود می‌تواند از داخل جعبه‌دنده‌ی سیستم حرکت دورانی عبور نموده و وارد شفت اختلاط شود. رینگ نگه‌دارنده وظیفه دارد تا لوله‌ی مانیسمن را ثابت نگه داشته و از چرخش و سقوط آن جلوگیری نماید. اورینگ‌های حلقوی که دور لوله‌ی مانیسمن قرار می‌گیرند نیز وظیفه‌ی پر نمودن فضای خالی بین لوله‌ی مانیسمن سوئیول و شفت اختلاط را بر عهده دارند تا از فرار دوغاب از این فضای خالی جلوگیری نموده و اجازه ندهند دوغاب وارد جعبه‌دنده شود. در شکل ۴ اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سوئیول، چگونگی قرارگیری و

اتصال آنها به شیر تنظیم جریان دوغاب، جعبه‌دنده و شفت اختلاط را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل ۴- اجزای تشکیل‌دهنده سوئیول.

۱۸) شیر تنظیم جریان دوغاب: حجم دوغاب مورد نیاز برای احداث هر ستون، به ابعاد هندسی ستون، عیار سیمان و نسبت آب به سیمان وابسته است. به همین خاطر، در این دستگاه از یک شیر تنظیم جریان دوغاب که در بالای سوئیول نصب شده است، استفاده شد. این شیر از جنس فولاد A105 بوده که توسط کارخانه‌ی افرا صنعت کهن در بازار عرضه می‌گردد.

۲-۵- سیستم محفظه‌ی خاک

وظیفه‌ی این سیستم ایجاد فضایی با ابعاد و حجم مناسب جهت آماده‌سازی بستر خاک است تا کاربر دستگاه بتواند تعداد مناسبی ستون دی.اس.ام را با

چیدمان دلخواه در هر بستر خاک نصب نماید. مطابق شکل‌های ۱، ۲ و ۳، جعبه (۱۹)، سخت‌کننده‌ها (۲۰) و دستک‌ها (۲۱) اجزای اصلی این سیستم می‌باشند.

۱۹) جعبه: جعبه‌ی دستگاه که تأمین‌کننده‌ی فضای لازم به منظور آماده‌سازی بسترهای خاک می‌باشد، مکعبی شکل با ابعاد $1 \times 1 \times 1$ متر مکعب است. این جعبه از اتصال ورق‌های فولادی از جنس S235 ساخته شده است.

۲۰) در اثر تنش‌های افقی خاک و همچنین وزن سایر سیستم‌های دستگاه، تنش زیادی به جداره‌های جعبه وارد شده که موجب آسیب دیدن آنها می‌شود. به همین خاطر، هشت سخت‌کننده به صورت گیردار به جداره‌های بیرونی جعبه متصل شدند. سخت‌کننده‌ها از پروفیل قوطی مربعی فولادی (S235) تهیه شده‌اند.

۲۱) دستک‌ها: برای آن که سیستم جابجایی افقی بتواند کارایی کامل خود را حفظ نموده و دستگاه قادر به اجرای ستون‌های دی.اس.ام در نقاط دلخواه بستر خاک باشد، ریل‌های سیستم جابجایی افقی به ناچار بلندتر از جعبه طراحی شدند. از این رو، از دستک‌ها برای اتصال ریل‌ها به جعبه استفاده شد. دستک‌ها از پروفیل قوطی مربعی فولادی (S235) تهیه شده‌اند.

۳- مصالح

۳-۱- ماسه

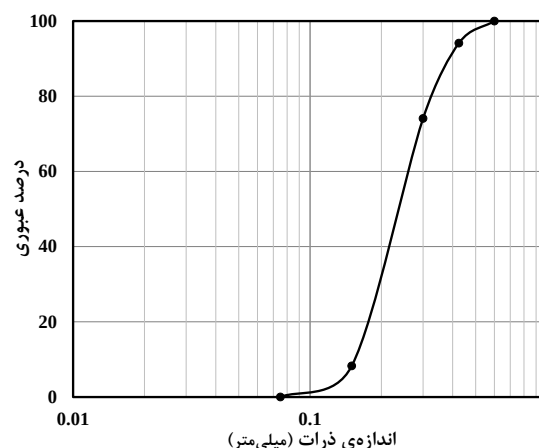
با توجه به آن که یکی از کاربردهای اصلی تکنیک اختلاط عمیق خاک مقابله با روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای ریز با تراکم پایین است [۲۲-۲۹، ۳۰ و ۴۷]، در پژوهش حاضر از یک خاک ماسه‌ای تمیز ریز یکنواخت دانه‌بندی شده جهت آماده‌سازی بسترهای خاکی استفاده شد که بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک‌ها^{۲۱}، ماسه بد دانه‌بندی شده می‌باشد. نمودار دانه‌بندی ماسه در شکل ۵

²¹- Unified soil classification system (USCS)

و مشخصه‌های فیزیکی و ترکیب‌های شیمیایی آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

۳-۲- سیمان

جهت اجرای ستون‌های دی.اس.ام از انواع مختلف مواد چسباننده نظیر سیمان، آهک، ژئوپلیمر، خاکستر بادی و سرباره‌ی کوره چه به صورت مجزاء و چه در ترکیب با یکدیگر استفاده می‌گردد. با این حال، با توجه به کاربرد بیشتر چسباننده‌های سنتی در پروژه‌های میدانی و تحقیقاتی، در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲ برای احداث ستون‌های دی.اس.ام استفاده شد. ترکیب‌های شیمیایی سیمان در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۵- نمودار دانه‌بندی ماسه.

۴- آماده‌سازی بسترهای ماسه‌ای

با توجه به آن بسترهای ماسه‌ای مستعد روانگرایی، تراکم پایین و رطوبت بالایی دارند، در این پژوهش دانسیته‌ی نسبی ۲۲ برابر ۳۰ درصد انتخاب و ماسه اشباع گردید [۲۲-۲۹، ۳۰ و ۴۷]. برای آماده‌سازی بسترهای ماسه‌ای، ابتدا جداره‌های داخلی جعبه به ازای هر ۱۰ سانتی‌متر در راستای ارتفاع مدرج شدند تا لایه‌های ماسه به صورت کنترل‌شده‌تری متراکم گردند (شکل ۶ الف)). پس از آن، وزن‌های مشخصی از ماسه‌ی خشک و آب با یکدیگر مخلوط شدند تا رطوبت ماسه به پنج درصد

افزایش یافته و آماده‌سازی بستر ماسه‌ای آسان‌تر گردد. سپس، ماسه‌ی مرطوب لازم برای یک لایه‌ی ۱۰ سانتی‌متری توزین و به درون جعبه‌ی خاک منتقل و پخش شد (شکل ۶ ب)). در ادامه، ماسه‌ی پخش شده با استفاده از یک کوبه کمی کوبیده شد تا دانسیته‌ی نسبی آن خیلی افزایش نیافته و برابر با ۳۰ درصد شود (شکل ۶ ج)). جهت دستیابی به دانسیته‌ی نسبی مورد نظر، در حین کوبش ارتفاع لایه‌ی ماسه به طور مداوم با علائم جداره‌های جعبه کنترل می‌شد.

پس از کوبش لایه‌ی ماسه، آب به آرامی در نزدیکی جداره‌های جعبه به خاک اضافه شد تا تراز آب کمی بالاتر از سطح ماسه قرار بگیرد. اجرای لایه‌ی بعدی ۱ ساعت پس از افزودن آب به لایه‌ی زیرین صورت پذیرفت تا حباب‌های هوای موجود در ماسه زمان مناسب جهت خروج داشته باشند. آماده‌سازی لایه‌های بستر ماسه‌ای ۹ مرتبه تکرار شد تا تراز ماسه‌ی درون جعبه به ارتفاع ۹۰ سانتی‌متری رسید. برای اطمینان بیشتر از اشباع شدن بستر ماسه‌ای، بین پایان آماده‌سازی بستر و نصب ستون‌های دی.اس.ام، دو روز فاصله‌ی زمانی در نظر گرفته شد

۵- عیار سیمان و نسبت آب به سیمان ستون‌ها

در این پژوهش دو گروه ستون دی.اس.ام کوچک مقیاس با ابعاد و روش ساخت مشابه در بسترهای ماسه‌ای احداث شدند. عیار سیمان و نسبت آب به سیمان دسته‌ی اول ستون‌ها ثابت و به ترتیب برابر با ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲/۵ بود تا امکان بررسی تغییرپذیری مقاومت فشاری آنها ممکن گشته و دقت دستگاه اختلاط عمیق خاک توسعه داده شده در اجرای ستون‌ها ارزیابی گردد. در گروه دوم ستون‌ها، عیار سیمان و نسبت آب به سیمان متغیر و به ترتیب برابر با ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲/۵، ۳/۰ و ۳/۵ بود تا اثرگذاری این دو عامل بر مقاومت فشاری ستون‌ها واکاوی شود. لازم به ذکر است که عیارها و نسبت‌های آب

22- Relative Density (R_d)

به سیمان انتخاب شده در پروژه‌های میدانی رایج می‌باشند [۲۲-۲۶ و ۳۱-۳۴].

جدول ۱- مشخصه‌های فیزیکی ماسه

مقدار	استاندارد	مشخصه
۱/۶۰	ASTM D4253-16 (2019)	دانسیته‌ی خشک بیشینه (kN/m^3)
۱/۳۵	ASTM D4254-16 (2016)	دانسیته‌ی خشک کمینه (kN/m^3)
۱/۶۶	ASTM D422-63 (2014)	ضریب یکنواختی (C_u)
۰/۹۴	ASTM D422-63 (2014)	ضریب انحناء (C_c)
۲۷	ASTM D3080-04 (2012)	زاویه‌ی اصطکاک (درجه)
۲/۶۲	ASTM D854-23 (2023)	چگالی ویژه (G_s)
$4/5 \times 10^{-5}$	ASTM D2434-22 (2022)	نفوذپذیری (m/s)
	ASTM D2487-17 (2020)	طبقه‌بندی خاک
		ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP)

جدول ۲- ترکیب‌های شیمیایی ماسه و سیمان

مقدار (%)		اکسید
سیمان	ماسه	
۲۰/۰۹-۲۰/۵۹	۹۶-۹۸	SiO_2
۴/۵۴-۴/۹۶	۰/۵-۱/۱	Al_2O_3
۳/۶۵-۴/۰۴	۰/۱-۰/۵	Fe_2O_3
۶۳/۳۷-۶۳/۹۱	۰/۰۶-۰/۳	CaO
*	۰/۵-۱/۰	Na_2O
*	۰/۵-۱/۰	K_2O
۱/۹۲-۲/۱۲	*	MgO
۲/۰۶-۲/۵۰	*	SO_3
۵/۳۷-۶/۵۵	*	$\text{C}_3\text{A} (\text{CaAl}_2\text{O}_4)$



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۶- آماده‌سازی بسترهای ماسه‌ای؛ (الف) مدرج نمودن جداره‌های داخلی جعبه، (ب) انتقال و پخش ماسه و (ج) کوبش لایه‌ها

۶- ابعاد، روش اجراء و چیدمان ستون‌ها

۶-۱- ابعاد ستون‌های دی.اس.ام

۵۹ و ۶۰. بر این اساس، گرچه دستگاه توسعه داده شده قادر به احداث ستون‌هایی به قطر ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و با طول تا ۸۰ سانتی‌متر بود، ولی در این پژوهش قطر ۱۰ سانتی‌متر و عمق ۶۰ سانتی‌متر برای تمامی ستون‌ها در نظر گرفته شد. بر اساس توصیه‌ی بسیاری از مراجع نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌های اخذ شده از ستون‌های دی.اس.ام می‌بایست حداقل برابر با ۲ باشد

مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که در پژوهش‌های گذشته، قطر و عمق ستون‌های دی.اس.ام کوچک‌مقیاس به ترتیب در محدوده‌های ۵ الی ۱۵ سانتی‌متر و ۲۰ تا ۹۰ سانتی‌متر بوده است [۳۶، ۳۷، ۴۴-۴۱، ۴۹، ۵۱، ۵۵، ۵۶،

[۲۶-۲۲]، بنابراین، با توجه به قطر ۱۰ سانتی‌متری ستون‌ها، عمق ۶۰ سانتی‌متر جهت اخذ دو نمونه از هر ستون کافی است.

۶-۲- روش اجرای ستون‌های دی.اس.ام

در این مطالعه، تمامی ستون‌ها با شیوه‌ی نشان داده شده در شکل ۷ اجراء گشتند. مطابق شکل ۷، ابزار اختلاط با سرعت ثابت ۱ سانتی‌متر بر ثانیه به بستر خاک نفوذ نموده و همزمان دوغاب سیمان تزریق می‌شد (روش تزریق نفوذی). با توجه به حجم متفاوت دوغاب لازم بر اساس عیار و نسبت آب به سیمان هر ستون، کنترل دبی دوغاب با استفاده از شیر تنظیم جریان دوغاب بر اساس آزمون و خطاء طی آزمون‌های مقدماتی مشخص می‌گردید تا تزریق دوغاب با دبی یکسان طی زمان ۶۰ ثانیه‌ی نفوذ ابزار اختلاط صورت بپذیرد. برای این منظور، طی آزمون‌های مقدماتی، میزان بازشدگی لازم شیر جهت تزریق حجم مورد نیاز دوغاب طی ۶۰ ثانیه در بیرون از بستر ماسه اندازه‌گیری می‌شد. در شکل ۸ نمونه‌ای از کالبراسیون میزان بازشدگی شیر تنظیم جریان دوغاب در آزمون‌های مقدماتی نشان داده شده است. در حین نفوذ ابزار اختلاط به بستر ماسه‌ای، مازاد دوغاب تزریق شده به ستون‌های دی.اس.ام کوچک‌مقیاس مانند پروژه‌های میدانی به سمت بالا هدایت و به شکل اسپویل روی سطح بستر جریان می‌یافت (شکل ۹).

پس از رسیدن به عمق ۶۰- سانتی‌متری، ابزار اختلاط به مدت ۱۰ ثانیه به صورت درجا دوران می‌نمود. دوران برجای ابزار اختلاط در پایین‌ترین بخش ستون‌های دی.اس.ام که جهت جبران زمان اختلاط پایین در آن ناحیه انجام می‌گردد، امری متداول در پروژه‌های میدانی می‌باشد [۲۶-۲۲]. در انتها نیز ابزار اختلاط با سرعت ثابت ۰/۳۳ سانتی‌متر بر ثانیه به سمت بالا حرکت می‌نمود و از بستر ماسه‌ای خارج می‌گشت. لازم به ذکر است که سرعت‌های نفوذ و خروج بکارگیری شده در محدوده‌ی رایج پروژه‌های میدانی قرار دارند [۲۷-۲۲].

پس از نصب هر ستون، که ابزار اختلاط بیرون از بستر ماسه قرار داشت، آب توسط الکتروپمپ پمپاژ می‌شد تا آب خروجی از نازل‌های تزریق کاملاً شفاف گردد. این شست و شوی مسیر تزریق از مسدود شدن آن در اثر گیرش دوغاب جلوگیری می‌نمود.

۶-۳- چیدمان ستون‌های دی.اس.ام

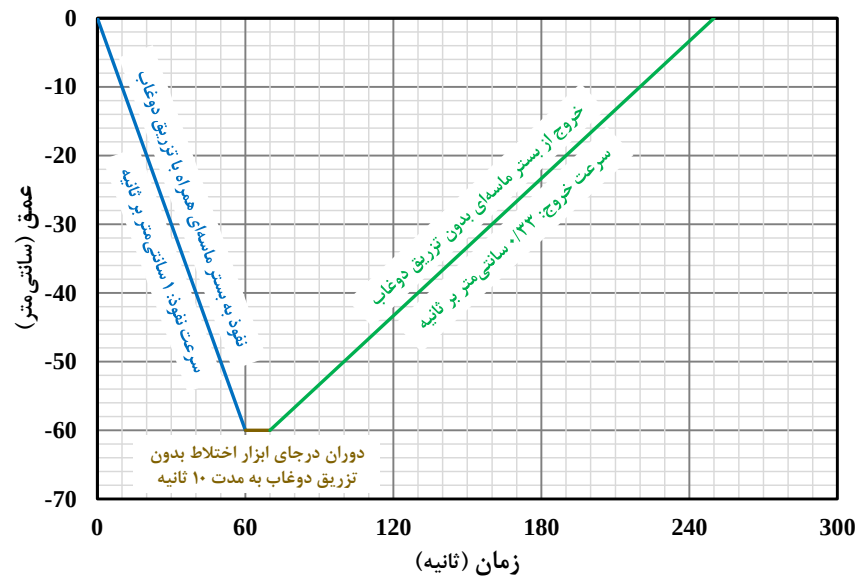
چیدمان ستون‌های دی.اس.ام در شکل ۱۰ نشان داده شده است. معیارهای انتخاب این چیدمان که بر اساس آزمون و خطاء تعیین شده بود، استخراج راحت ستون‌ها، عدم آسیب‌دیدگی آنها و بیشترین تعداد ستون قابل نصب در هر بستر ماسه‌ای بوده است.

۷- عمل‌آوری و نمونه‌گیری از ستون‌ها

۷-۱- عمل‌آوری ستون‌های دی.اس.ام

پس از نصب ستون‌های دی.اس.ام، مطابق با پیشنهاد سایر محققین [۴۱، ۴۳، ۴۴ و ۵۰]، هفت روز به آنها استراحت داده شد که هم از مقاومت مناسبی برخوردار شوند تا موقع بیرون آوردن از بستر ماسه‌ای آسیب نبینند و هم در روزهای اولیه که عمل‌آوری بیشترین تأثیر را دارد تا جای ممکن مشابه پروژه‌های میدانی، درون بستر خاک عمل‌آوری شوند. پس از طی دوره‌ی عمل‌آوری ۷ روزه‌ی ستون‌ها داخل بستر ماسه‌ای، خاک اطراف آنها به آرامی حفاری و به بیرون جعبه منتقل شد (شکل ۱۱ الف)).

سپس ستون‌ها بیرون آورده شده (شکل ۱۱ ب)) و با یک برس سیمی دانه‌های ماسه‌ی چسبیده به آنها جدا شد (شکل ۱۱ ج)). بلافاصله ستون‌های با چند لایه پلاستیک پوشانده شدند تا از تبخیر رطوبتشان جلوگیری شود (شکل ۱۱ د)). در انتها، ستون‌ها به مدت ۲۱ روز در محیط آزمایشگاه با دمای ۲۰ الی ۲۵ درجه‌ی سانتیگراد که توسط سایر محققین توصیه شده بود [۲۳، ۴۱، ۴۳، ۴۴، ۵۵، ۵۶]، عمل‌آوری شدند.



شکل ۷- روش اجرای ستون‌های دی.اس.ام.



شکل ۸- کالیبراسون میزان بازشدگی شیر تنظیم جریان دوغاب در بیرون از بستر ماسه طی آزمون‌های مقدماتی.

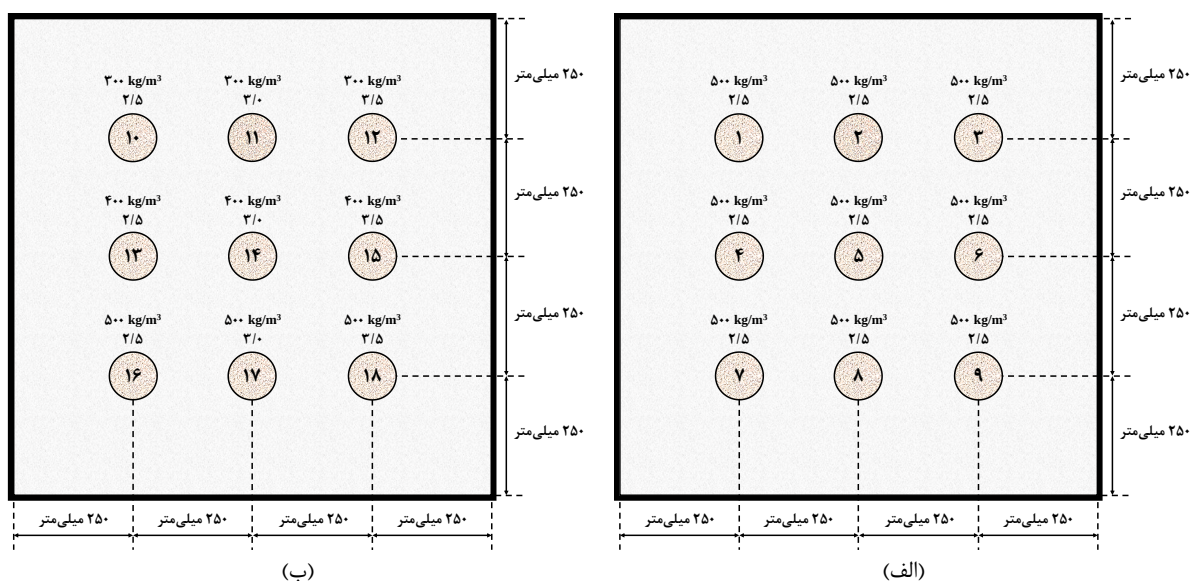


(ب)



(الف)

شکل ۹- نمونه‌هایی از اسپویل جریان یافته به سطح بستر؛ (الف) پروژه‌های میدانی و (ب) پژوهش حاضر.



شکل ۱۰- چیدمان ستون‌های دی.اس.ام گروه؛ (الف) اول و (ب) دوم



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۱- استخراج ستون‌های دی.اس.ام از داخل بسترهای ماسه‌ای؛ (الف) کندن خاک اطراف ستون‌ها، و (ب) ستون‌های استخراج شده، (ج) جدا نمودن دانه‌های ماسه از سطح ستون‌ها و (د) پوشاندن ستون‌ها با چندین لایه پلاستیک

۸- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

در پروژه‌های میدانی، تنش محصورشدگی وارد بر ستون‌های دی.اس.ام بزرگ‌مقیاس موجب بهبود مشخصه‌های مقاومتی می‌شود، ولی با توجه به توصیه بسیاری از مراجع اصلی بهسازی زمین به روش اختلاط عمیق، بهتر است از این عامل در جهت اطمینان صرف

۷-۲- نمونه‌گیری از ستون‌های دی.اس.ام

پس از پایان عمل‌آوری ستون‌های دی.اس.ام، با استفاده از یک دستگاه برش، از هر ستون دو نمونه با نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۲ اخذ شد (شکل ۱۲ (الف)). نمونه‌ها پس از کپ شدن (شکل ۱۲ (ب))، تحت آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده قرار گرفتند.

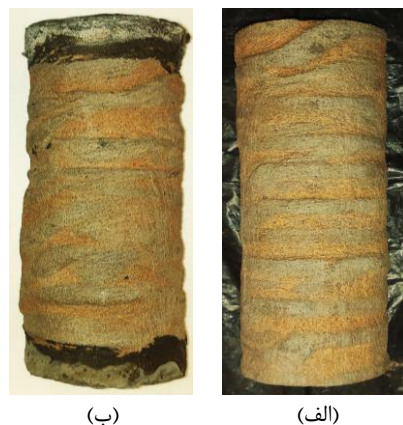
شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری محصور نشده‌ی نمونه‌ها در محدوده‌ی ۰/۷ الی ۲/۱ مگاپاسکال با میانگینی برابر با ۱/۲۸ مگاپاسکال به دست آمده است که مطابق با مقاومت‌های به دست آمده در پروژه‌های میدانی بوده [۲۶-۲۲] و تأییدی بر عملکرد مناسب دستگاه توسعه داده شده در احداث ستون‌های دی.اس.ام کوچک‌مقیاس می‌باشد. علاوه بر آن، خروجی‌ها نشان می‌دهند که ضریب تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها برابر با ۲۲ درصد به دست آمده که مشابه با ضریب تغییرات به دست آمده در پروژه‌های میدانی بوده [۲۶-۲۲ و ۶۳-۶۱] و نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب و دقت بالای دستگاه در نصب ستون‌های دی.اس.ام است.

نظر گردد. به همین خاطر، آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده به پذیرفته‌شده‌ترین آزمایش جهت تعیین ویژگی‌های مقاومتی ستون‌های دی.اس.ام تبدیل گشته است [۲۶-۲۲]. بر این اساس، در این پژوهش نیز از این آزمایش مطابق استاندارد با ASTM D2166 استفاده شد. بر اساس این استاندارد، آزمایش‌ها به صورت کنترل کرنش با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردیدند.

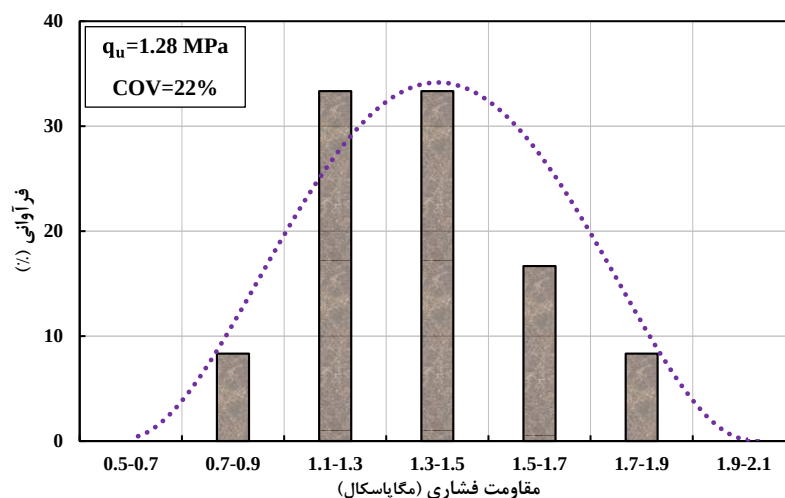
۹- ارائه و تفسیر نتایج

۹-۱- تغییرپذیری مقاومت فشاری ستون‌های گروه اول

در شکل ۱۳ هیستوگرام مقاومت فشاری نمونه‌های اخذ شده از دسته‌ی اول ستون‌های دی.اس.ام نمایش داده



شکل ۱۲- نمونه‌های اخذ شده از ستون‌های دی.اس.ام؛ (الف) کپ نشده و (ب) کپ شده



شکل ۱۳- هیستوگرام مقاومت فشاری نمونه‌های اخذ شده از ستون‌های دی.اس.ام گروه اول.

۹-۲- کیفیت اختلاط ستون‌های گروه اول

گرچه ژل سیمان به طور کاملاً یکنواخت و ایده‌آل در سطوح مقاطع عرضی ستون‌ها پراکنده نشده است، ولی در مجموع ستون‌ها کیفیت اختلاط خوبی دارند که نشان از موفقیت فرآیند اختلاط و عملکرد مناسب دستگاه توسعه داده شده دارد.

شکل ۱۴ نمونه‌هایی از مقاطع عرضی ستون‌های دی.اس.ام گروه اول را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که که ژل سیمان به خوبی فضای بین دانه‌های ماسه را پر نموده و پل‌زدگی مناسب توانسته است ذرات ماسه را به یکدیگر متصل نماید. این شکل همچنین نشان می‌دهد که

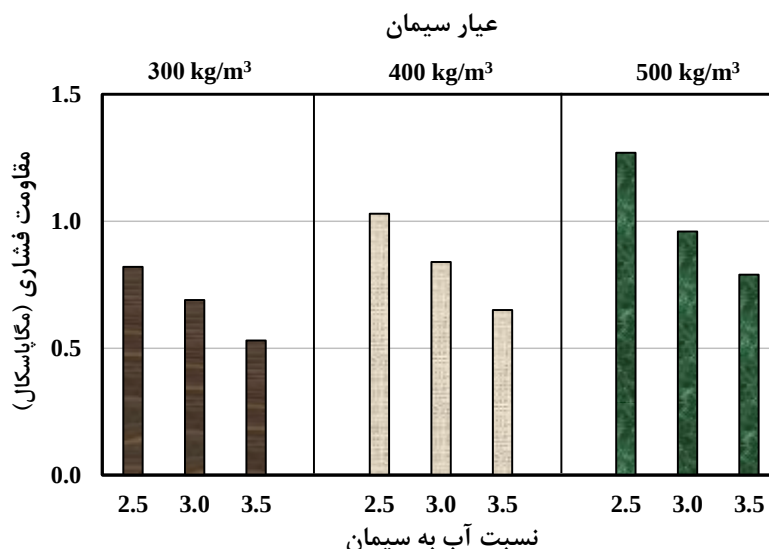


شکل ۱۴- نمونه‌هایی از مقاطع عرضی ستون‌های دی.اس.ام گروه اول.

بسته به نسبت آب به سیمان به ترتیب ۲۲ الی ۲۶ درصد و ۳۹ تا ۵۵ درصد افزایش یافته است. علاوه بر آن، داده‌های ارائه شده در شکل ۱۵ نشان می‌دهند که مقاومت فشاری ستون‌های دی.اس.ام متأثر از نسبت آب به سیمان می‌باشند، به گونه‌ای که با افزایش نسبت آب به سیمان از ۲/۵ به ۳/۰ و سپس ۳/۵، مقاومت فشاری ستون‌ها بسته به عیار سیمان به ترتیب ۱۹ تا ۳۲ درصد و ۵۵ الی ۶۱ درصد کاهش یافته است.

۹-۳- اثر عیار و نسبت آب به سیمان

در شکل ۱۵ تغییرات میانگین مقاومت فشاری دو نمونه‌ی اخذ شده از هر ستون دی.اس.ام گروه دوم در برابر عیار سیمان و نسبت آب به سیمان ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت فشاری ستون‌ها تحت تأثیر عیار سیمان قرار گرفته است، طوری که با افزایش عیار سیمان از ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، میانگین مقاومت فشاری ستون‌ها



شکل ۱۵- تغییرات میانگین مقاومت فشاری ستون‌های دی.اس.ام گروه دوم در برابر عیار سیمان و نسبت آب به سیمان.

۱۰- نتیجه‌گیری

مقاومت فشاری ستون‌ها به طور متوسط به

ترتیب ۲۴ و ۴۸ درصد افزایش یافته است.

۳- مقاومت فشاری ستون‌ها با نسبت آب به سیمان

رابطه‌ی عکس دارد. با افزایش نسبت آب به

سیمان از ۲/۵ به ۳/۰ و ۳/۵، مقاومت فشاری

ستون‌ها به طور متوسط به ترتیب ۲۵ و ۵۸

درصد کاهش یافته است.

۱۱- محدودیت‌ها و پیشنهادها

در پژوهش حاضر از یک دستگاه اختلاط عمیق

خاک مقیاس آزمایشگاهی، یک نوع خاک (ماسه‌ی ریز

یکنواخت دانه‌بندی شده)، یک نوع ماده‌ی چسباننده

(سیمان پرتلند تیپ ۲) و شرایط بیان شده جهت احداث

و عمل‌آوری ستون‌های دی.اس.ام کوچک مقیاس استفاده

شده و مقایسه‌ای بین نتایج این مطالعه با خصوصیات

مقاومتی ستون‌های دی.اس.ام بزرگ مقیاس میدانی

صورت نپذیرفته است. به همین خاطر توصیه می‌گردد

قبل از تعمیم نتایج، مطالعات تکمیلی به منظور بررسی

عواملی مختلف نظیر اثر مقیاس (تعیین نسبت‌های

هندسی، مقاومت، زمان تزریق، سرعت‌ها نفوذ و خروج

ابزار اختلاط و ...)، روش نصب ستون‌ها (نرمال، زیگزاگی و

نفوذ و خروج چند مرحله‌ای)، زمان اختلاط، فشار تزریق،

فشار محصورشدگی و عمل‌آوری ستون‌ها، فرم و تعداد

پره‌های اختلاط، موقعیت و تعداد نازل‌های تزریق، شیوه‌ی

تزریق (نفوذی و خروجی)، نوع خاک بستر و نوع ماده‌ی

چسباننده انجام گردد.

۱۲- بیانیه دسترسی داده‌ها

داده‌ها و نقشه‌ها در صورت درخواست در دسترس

قرار خواهند گرفت.

در پژوهش حاضر ابتدا توسعه‌ی یک دستگاه

اختلاط عمیق خاک مقیاس آزمایشگاهی بیان، و

سیستم‌ها و اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن تشریح گردیده

است. با استفاده از دستگاه توسعه داده شده، دو گروه

ستون دی.اس.ام کوچک مقیاس با ابعاد و روش اجرای

یکسان احداث گردید. دسته‌ی اول ستون‌ها عیار و نسبت

آب به سیمان مشابه و به ترتیب برابر با ۵۰۰ کیلوگرم بر

متر مکعب و ۲/۵ داشتند، در حالی که عیار و نسبت آب

به سیمان دسته‌ی دوم ستون‌ها متفاوت و به ترتیب برابر

با ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، و ۲/۵، ۳/۰ و

۳/۵ بود. هر دو گروه ستون‌ها ۷ روز داخل بستر ماسه و

۲۱ روز پس از پلاستیک‌پیچ شدن در محیط آزمایشگاه

تحت دمای ۲۰ الی ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد عمل‌آوری

شدند. از هر ستون دو نمونه اخذ و نمونه‌ها در روز ۲۸ام

تحت آزمایش فشاری محصور نشده قرار گرفتند. مهم‌ترین

یافته‌های این مطالعه به شرح زیر می‌باشند.

۱- مشابه بودن محدوده، میانگین و ضریب تغییرات

مقاومت فشاری ستون‌های دی.اس.ام گروه اول با

مقادیر به دست آمده از پروژه‌های میدانی، و

همچنین کیفیت اختلاط خوب این ستون‌ها

نشانگر دقت بالا و عملکرد مطلوب دستگاه توسعه

داده شده در احداث ستون‌های دی.اس.ام

کوچک مقیاس بوده است.

۲- مقاومت فشاری ستون‌های دی.اس.ام

کوچک مقیاس با عیار سیمان رابطه‌ی مستقیم

دارد. با افزایش عیار سیمان از ۳۰۰ کیلوگرم بر

مترمکعب به ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب،

References

- [1] Abdi MR, Abbasi E, Safdari Seh Gonbad M. Performance comparison of polypropylene and elastic fibers in enhancing the flexural behavior of lime-stabilized kaolinite clay. Construction and Building Materials, 2025;141422. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141422



- [2] Mahmoudi J, Pourhosseini R. The Study of the Effect of Drainage Conditions on the Collapse Potential of Soil. *Civil Infrastructure Researches*. 2024;10(1):109-24. **doi: 10.22091/CER.2024.10063.1520**
- [3] Jafarzadeh F, Afzalsoltani S. Pile group behavior under unsymmetrical cyclic thermal loading in dry silty sand: 1g Physical modeling. *Scientia Iranica*, 2024. **doi: 10.24200/sci.2024.61493.7345**
- [4] Ghassemi S, Ekraminia SS, Hajjalilue-Bonab M, Tohidvand HR, Azarafza M, Derakhshani R. Innovative insights into micropile seismic response: Shaking table tests reveal critical dependencies and liquefaction mitigation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2025;84(4):1-25. **doi: 10.1007/s10064-025-04225-y**
- [5] Kalantary F, Abbasi Govanjik D, Safdari Seh Gonbad M. Stimulation of native microorganisms for improving loose salty sand. *Geomicrobiology Journal*. 2019;36(6):533-42. **doi: 10.1080/01490451.2019.1579876**
- [6] Abdi MR, Hajjalilue Bonab M, Jalilzadeh Z. Impact of various binders on loess durability subjected to different freeze-thaw regimes. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2024;28(8):1924-42. **doi: 10.1080/19648189.2023.2286470**
- [7] Kalantary F, Aghaalizadeh S, Ghanati F. Soil Stabilization Approach via Crude Plant Extracts. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2025;12(1):1-9. **doi: 10.1007/s40515-024-00463-x**
- [8] Abdi MR, Safdari Seh Gonbad M. Enhancement of soil-geogrid interactions in direct shear mode using attached elements as anchors. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020;24(8):1161-79. **doi: 10.1080/19648189.2018.1454861**
- [9] Abdi MR, Safdari Seh Gonbad M. Studying the effect of roughness on soil-geotextile interaction in direct shear test. *Journal of Engineering Geology*. 2018;12(5):1-30. **doi: 10.18869/acadpub.jeg.12.5.1**
- [10] Abdi MR, Nakhaei P, Safdari Seh Gonbad M. Prediction of enhanced soil-anchored geogrid interactions in direct shear mode using gene expression programming. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2021;39:957-72. **doi: 10.1007/s10706-020-01537-6**
- [11] Abdi MR, Khakbazan A, Kazemi Abyaneh M, Safdari Seh Gonbad M. Assessment of relative density on shear strength and volumetric characteristics of sand-EPS particulate mixtures. *Scientia Iranica*. 2024. **doi: 10.24200/SCI.2024.62072.7634**
- [12] Li P, Sun J, Ge X, Zhang M, Wang J. Parameters of dynamic compaction based on model test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023;168:107853. **doi: 10.1016/j.soildyn.2023.107853**
- [13] Jifang D, Shuaifeng W, Sen H, Yinqiu Z, Hong C, Yingqi W, Junwei S. Dynamic response and densification mechanism of dynamic compaction for silt soil through a large scale field test at Daxing Airport. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2025;190:109201. **doi: 10.1016/j.soildyn.2024.109201**
- [14] Jia F, Dong F, Ma S, Shen J, Liu Z. Vibratory compaction characteristics of the subgrade under cyclical loading based on finite element simulation. *Construction and Building Materials*. 2024;419:135378. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135378**
- [15] Lloret-Cabot M, Zhang K, Zhang W, Kourdey A, Hicks MA. Quantifying the effects of vibro-compaction on soil heterogeneity and geotechnical uncertainty. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2025;1-21. **doi: 10.1080/17499518.2025.2478636**
- [16] Nazariafshar J, Shayegh S, Ghanbari A, Shafiee A. A New Analytical Formula for Estimation the Bearing Capacity of Stone Column Group in Soft Soils. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2024;1-6. **doi: 10.1007/s13369-024-09728-6**
- [17] Amirafshari S, Ghanbari A. A Geotechnical Centrifuge Study on the Bearing Capacity of Ring Foundations Reinforced by Stone Columns. *International Journal of Geomechanics*. 2025;25(1):04024321. **doi: 10.1061/IJGNALGMENG-9948**
- [18] Bayesteh H, Sabermahani M. Field study on performance of jet grouting in low water content clay. *Engineering Geology*. 2020;264:105314. **doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105314**
- [19] Spagnoli G, Oreste P. Statistical Interpretation of Jet Grouting Field Data Regarding Its Strength and Stiffness. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2025;43(1):44. **doi: 10.1007/s10706-024-03008-8**
- [20] Safdari Seh Gonbad M, Abdi MR. Influence of mixing time and execution procedure on strength characteristics of improved sand using deep soil mixing (DSM) method. *Construction and Building Materials*. 2024;448:138115. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138115**
- [21] Nguyen TD, Phan TN, Likitlersuang S. Evaluating the Applicability of Large-Diameter Cement Deep Mixing Method for Soft Ground Improvement: A Landmark Case Study in Vietnam. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2025;11(2):19. **doi: 10.1007/s40891-025-00624-z**
- [22] Kempfert HG, Gebreselassie B. *Excavations and foundations in soft soils*. Germany: Springer; 2006. **doi: 10.1007/3-540-32895-5**
- [23] FHWA-HRT-13-046. Design manual: Deep mixing for embankment and foundation support. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, USA, 2013.
- [24] Kitazume M, Terashi M. *The deep mixing method*. London: UK: CRC press; 2013. **doi: 10.1201/b13873**
- [25] Han J. *Principles and practice of ground improvement*. USA: John Wiley & Sons; 2015.

- [26] Kitazume M. Quality Control and Assurance of the Deep Mixing Method. UK: CRC Press; 2022. doi: **10.1201/9781003223054**
- [27] Moradi P, Dehghan Khalili H, Arvin MR. Deep Soil Mixing Columns as Settlement-Reducing Elements in Sandy Soils: A Numerical Study. *International Journal of Geomechanics*. 2023;23(4):04023015. doi: **10.1061/IJGNALGMENG-7983**
- [28] Mehdizadeh MJ, Dehghan Khalili H, Raisianzadeh J. Investigation of effectiveness of deep mixing method on seismic response of liquefiable soils using 3D numerical simulation. *Numerical Methods in Civil Engineering*. 2024;8(4):79-91. doi: **10.61186/NMCE.2406.1062**
- [29] Ramezani B, Dehghan Khalili H, Moradi P, Pourbagheri A. Seismic Resilience with Deep Soil Mixing: Numerical and Experimental Insights into Liquefaction Mitigation. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2025;43(2):71. doi: **10.1007/s10706-024-03041-7**
- [30] Singh MJ, Yao K, Hou Y, Liu S, Yao Z, Borana L. Deep cement mixing columns for infrastructure development: a review of research progress, challenges, and future research directions. *Geomechanics and Geoenvironmental Engineering*. 2025;1-26. doi: **10.1080/17486025.2025.2477474**
- [31] Le Kouby A, Guimond-Barrett A, Reiffsteck P, Pantet A, Mosser JF, Calon N. Improvement of existing railway subgrade by deep mixing. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2018;24(8):1229-44. doi: **10.1080/19648189.2018.1456977**
- [32] Hessouh JJ, Eslami J, Beaucour AL, Noumowe A, Mathieu F, Gotteland P. Physical and mechanical characterization of deep soil mixing (DSM) materials: Laboratory vs construction site. *Construction and Building Materials*. 2023;368:130436. doi: **10.1016/j.conbuildmat.2023.130436**
- [33] Arjmand A, Eslami A. Appraisal of soil-cement columns load displacement behavior through full-scale tests database. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2024;1-16. doi: **10.1080/1064119X.2024.2380530**
- [34] Alavi SM, Aghamolaei M, Shakeri Talarposhti S, Khodaei Ardabili AA, Salemi S. Efficiency Evaluation of Deep Soil Mixing Method in Stiff Clayey Soils: A Comprehensive Field Study. *International Journal of Geomechanics*. 2024;24(11):04024250. doi: **10.1061/IJGNALGMENG-9893**
- [35] Eslami A, Arjmand A, Ardehe A, Ebrahimipour A, Nobahar M, Mo PQ. New approach for the numerical analysis of stiffened deep cement mixing columns and piles in coastal engineering through 1D elements. *Ocean Engineering*. 2024;313:119529. doi: **10.1016/j.oceaneng.2024.119529**
- [36] Al-Tabbaa A, Evans CW. Laboratory-scale soil mixing of a contaminated site. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*. 1999;3(3):119-34. doi: **10.1680/gi.1999.030303**
- [37] Chitambira B, Al-Tabbaa A, Evans CW. Laboratory and full-scale behaviour of soil-mixed columns. In *Geoenvironmental Engineering: Geoenvironmental Impact Management: Proceedings of the third conference organized by the British Geotechnical Association and Cardiff School of Engineering*, Cardiff University, and held in Edinburgh on 17–19 September 2001 (pp. 183-188). Thomas Telford Publishing.
- [38] Hernandez-Martinez FG, Al-Tabbaa A. Laboratory strength correlations for cement-treated peat. In *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, Los Angeles, California, USA, 2004 (pp.1403-1411). doi: **10.1061/40744(154)130**
- [39] Castelbaum D, Olson MR, Sale TC, Shackelford CD. Laboratory apparatus and procedures for preparing test specimens of slurry mixed soils. *Geotechnical Testing Journal*. 2011;34(1):18-26. doi: **10.1520/GTJ102981**
- [40] Yi Y, Liska M, Akinyugha A, Unluer C, Al-Tabbaa A. Preliminary laboratory-scale model auger installation and testing of carbonated soil-MgO columns. *Geotechnical Testing Journal*. 2013;36(3):384-93. doi: **10.1520/GTJ20120052**
- [41] Esmaeili M, Gharouni-Nik M, Khajehei H. Evaluation of deep soil mixing efficiency in stabilizing loose sandy soils using laboratory tests. *Geotechnical Testing Journal*. 2014;37(5):817-27. doi: **10.1520/GTJ20130099**
- [42] Esmaeili M, Khajehei H. Mechanical behavior of embankments overlying on loose subgrade stabilized by deep mixed columns. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016;8(5):651-9. doi: **10.1016/j.jrmge.2016.02.006**
- [43] Esmaeili M, Astaraki F, Khajehei H. Laboratory investigation on the effect of microsilica additive on mechanical properties of deep soil mixing columns in loose sandy soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2017;24(3):321-35. doi: **10.1080/19648189.2017.1382394**
- [44] Esmaeili M, Astaraki F, Yaghouti H, Movahedi Rad M. Laboratory investigation on the effect of microsilica additive on the mechanical behavior of deep soil mixing columns in saline dry sand. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021;65(4):1080-91. doi: **10.3311/PPci.18126**
- [45] Frikha W, Zargayouna H, Boussetta S, Bouassida M. Experimental study of Tunis soft soil improved by deep mixing column. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017;35:931-47. doi: **10.1007/s10706-016-0151-2**

- [46] Sakr M, Nazir A, Azzam W, Aamer FA. Model study of deep soil mixing in loose sand. 15th international conference on structural and geotechnical engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt. 2019 (pp. 1-11). **doi: 10.13140/RG.2.2.14054.68161**
- [47] Dehghan Khalili H, Ghalandarzadeh A, Moradi M, Karimzadeh R. Effect of distribution patterns of DSM columns on the efficiency of liquefaction mitigation. *Scientia Iranica*. 2020;27(5):2198-208. **doi: 10.24200/SCI.2019.21647**
- [48] Sakr MA, Elsawwaf MA, Rabah AK. Soft clay improved by deep cement mixing column technique. *Arabian Journal of Geosciences*. 2022;15(15):1321. **doi: 10.1007/s12517-022-10577-6**
- [49] Onur Mİ, Bıçakçı M, Kardoğan PS, Erdağ A, Aghlmand M. Laboratory model design for deep soil mixing method. *Advances in Civil and Architectural Engineering*. 2022;13(24):59-69. **doi: 10.13167/2022.24.6**
- [50] Cao B, Xu J, Wang F, Al-Tabbaa A. Self-healing soil mix cut-off wall materials incorporating reactive magnesium oxide pellets. *Géotechnique*. 2023;74(12):1317-1328. **doi: 10.1680/jgeot.21.00187**
- [51] Hammad MA, Mohamedzein Y, Al-Aghbari M. Improving the Properties of Saline Soil Using a Deep Soil Mixing Technique. *CivilEng*. 2023;4(4):1052-70. **doi: 10.3390/civileng4040057**
- [52] Hammad MA, Mohamedzein YE, Al-Aghbari MY, Al-Nuaimi AS. Laboratory investigation of deep soil mixing for the improvement of salt-cemented soils. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2024;42(8):7753-70. **doi: 10.1007/s10706-024-02949-4**
- [53] Yenginar Y, Olgun M. Optimizing installation parameters of DM columns in clay using Taguchi method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2023;82(4):145. **doi: 10.1007/s10064-023-03168-6**
- [54] Yenginar Y, Olgun M. Physical, mechanical, and microstructural characteristics of fly ash replaced cement deep mixing columns. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2024;83(8):309. **doi: 10.1007/s10064-024-03800-z**
- [55] Saride S, Mypati VN. Scale-Model Studies on Geopolymer Binder-Based Deep Mixing of Loose Sands to Improve Strength and Shear Modulus. *Indian Geotechnical Journal*. 2024;54(1):169-84. **doi: 10.1007/s40098-023-00823-3**
- [56] Saride S, Mypati VN. Effect of area improvement ratio of geopolymer-based deep mixing columns on swell-shrink behavior of expansive soils. *Construction and Building Materials*. 2024;417:135163. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135163**
- [57] Kitazume M. Recent development and future perspectives of quality control and assurance for the deep mixing method. *Applied Sciences*. 2021;11(19):9155. **doi: 10.3390/app11199155**
- [58] Kitazume M. Deep mixing technology-diversity and future development. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2024;11(2):1-6. **doi: 10.3208/jgssp.vol11.kl-1**
- [59] Ge CW, Liu Z, Yu TX, Lan W, Yang NY, Zhao MY. Model test study of key factors of deep soil mixing mechanism using contra-rotational shear method. *Rock and Soil Mechanics*. 2024;45(1):68-67. **doi: 10.16285/j.rsm.2023.5072**
- [60] Ge CW, Liu Z, Wen L, Ma X, Yang N, Lan W. Full-scale and model test study on CS-DSM technology. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2024;25;11(6):197-203. **doi: 10.3208/jgssp.vol11.DS-2-06**
- [61] Liu Y, Jiang YJ, Xiao H, Lee FH. Determination of representative strength of deep cement-mixed clay from core strength data. *Géotechnique*. 2017;67(4):350-64. **doi: 10.1680/jgeot.16.P.105**
- [62] Zuo J, Wang B, Li W, Han S, Wang J, Zhang F. Quality assessment and quality control of deep soil mixing columns based on a cement-content controlled method. *Scientific Reports*. 2023;13(1):4813. **doi: 10.1038/s41598-023-31931-y**
- [63] Mahabub MS, Hasan MR, Khatti J, Hossain AS. Assessing the effects of influencing parameters on field strength of soft coastal soil stabilized by deep mixing method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2024;83(1):9. **doi: 10.1007/s10064-023-03502-y**