

## مدل‌سازی فیزیکی بستر ماسه‌ای به روش بارش پرده‌ای

احسان سعیدی<sup>۱</sup>، آرش رزم‌خواه<sup>۲\*</sup>، محسن کمالیان<sup>۳</sup>، فرج‌الله عسکری<sup>۳</sup>

۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی  
۲ استادیار گروه مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده فنی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی  
۳ استاد پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

A\_Razmkhah@azad.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۵

### چکیده

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های مدل‌سازی فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک، قابلیت تکرار در آماده‌سازی بستر می‌باشد. روش بارش در آماده‌سازی بستر به دلیل ایجاد شرایط مطلوب و سرعت مدل‌سازی بالا، یکی از مطمئن‌ترین روش‌ها به شمار می‌آید. در این تحقیق روشی جدید مبنی بر بارش متحرک پرده‌ای با دو پرده بارش برای بازسازی نمونه بزرگ مقیاس توسعه یافته است. تاثیر پارامترهای، عرض پرده بارش، سرعت حرکت، تعداد پرده بارش و ارتفاع سقوط ذرات بر درصد تراکم نسبی و شدت بارش با آزمایش بر روی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی نتایج نشان داد که پارامتر متغیر تعداد پرده بارش همانند پارامترهای عرض بارش، سرعت حرکت و ارتفاع سقوط بر درصد تراکم نسبی و شدت بارش تاثیر قابل توجهی داشته و با تغییر در پارامترهای موثر، بازه گسترده‌ای از تراکم نسبی بین ۱۲ تا ۹۳ درصد قابل دستیابی است. مقایسه نتایج آزمایش‌ها یک و دو پرده بارش نشان داد که استفاده از دو پرده بارش با افزایش حجم خروجی ماسه و افزایش شدت بارش، درصد تراکم نسبی برابر با صفحه بارش تک شیار داشته و پرده‌های بارش بصورت مجزا عمل کرده و آماده‌سازی بستر را با سرعتی بالاتر امکان‌پذیر می‌نماید.

**کلیدواژه‌ها:** بارش در هوا، بارش متحرک پرده‌ای، پرده بارش، تراکم نسبی، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه، مدل‌سازی فیزیکی.

### ۱- مقدمه

تحقیقات آزمایشگاهی به شمار می‌آید. یکی از شناخته‌شده‌ترین چالش‌ها در مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی، بازسازی نمونه‌های دانه‌ای با تخلخل یکنواخت می‌باشد. از این‌رو در بازسازی بستر، باید شرایط واقعی نمونه در دامنه گسترده‌ای از تراکم (نمونه سست تا متراکم)، یکنواختی نسبت تخلخل در کل نمونه بازسازی شده، شرایط اشباع کامل برای حالت زهکشی نشده، جدانشدن ذرات و خردشدگی خاک و

کاربرد مدل‌های فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک برای بررسی دقیق‌تر پدیده‌ها امری متداول است [1]. در مدل فیزیکی، سازه ژئوتکنیکی به همراه خاک اطراف و معادل با بار عملی در شرایط واقعی مدل‌سازی می‌شود. با توجه به محدودیت‌های تهیه نمونه دست‌نخورده قابل قبول، بازسازی نمونه راهکاری مناسب در بررسی پارامترهای رفتار خاک در

شبیه‌سازی بافت نهشته، به خوبی محقق شود [2]. فرآیند بازسازی نمونه بر ویژگی‌های بافت خاک تأثیر می‌گذارد و توجه به این نکته ضروری است که پاسخ بارگذاری استاتیکی و دینامیکی (مانند رفتار تنش-کرنش و تغییر شکل) بستر نه تنها تحت تأثیر درصد تراکم نسبی خاک بوده، بلکه تا حد زیادی متأثر از بافت خاک می‌باشد. بافت بستر درشت دانه بستگی به فرآیند رسوب گذاری و آماده‌سازی نمونه دارد [3 و 4]. روش‌های معمول در بازسازی نمونه و آماده‌سازی بستر در مدلسازی فیزیکی، بسته به نوع کنترل تخلخل به دو روش کلی تقسیم می‌شود [5، 6 و 7]. در روش اول نسبت تخلخل بستر پس از رسوب دانه‌ها به دست آمده و تنها برای بازسازی بسترهای متراکم با لایه‌بندی متفاوت مناسب است. بررسی نتایج نشان داده است که استفاده از این روش سبب ایجاد ویژگی‌های فیزیکی ناهمگن در لایه‌ها و تخلخل متناوب در ارتفاع نمونه می‌شود. روش‌های کوبش و لرزش در این بخش دسته‌بندی می‌شوند [7]. در روش دوم مقدار تخلخل در حین آماده‌سازی بستر بدست می‌آید و هدف از آن دستیابی به محدوده تخلخل کمترین تا بیشترین است. دستیابی به تخلخل هدف با تغییر در شدت بارش و ارتفاع سقوط می‌باشد. روش بارش در این دسته قرار می‌گیرد. روش بارش به سه دسته بارش در هوا، بارش به وسیله مکش و بارش در آب تقسیم می‌شود [2، 8، 9، 10، 11، 12، 13 و 14]. همچنین هر دسته از نظر کنترل شدت بارش در مدلسازی بستر به سه دسته کنترل شدت بارش از منافذ تکی یا چندتایی با اشکال مختلف [15]، کنترل شدت بارش از الک تکی یا چندتایی [16، 17 و 18] و کنترل شدت بارش از شکاف طولی (بارش پرده‌ای) [19، 20 و 21] تقسیم می‌شود.

در مدلسازی فیزیکی بستر نه تنها درصد تراکم نسبی حائز اهمیت بوده بلکه توزیع همگن تراکم نیز از پارامترهای تأثیرگذار به شمار می‌آید. از این رو در میان روش‌های مذکور، روش بارش به علت حصول گستره وسیعی از درصد تراکم، سرعت مدلسازی بالا، ایجاد تراکم یکنواخت در بستر و تکرارپذیری، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. Stuit [2] نشان داد که، در نمونه‌های با تراکم برابر و آماده شده با دو

روش بارش و کوبش، به علت عدم توزیع یکنواخت تراکم در روش کوبش، در مقدار نشست معین، بار اعمال شده در روش بارش ۲۵٪ بزرگتر از نمونه بازسازی شده با روش کوبش بوده است.

تراکم نسبی در روش بارش به دو پارامتر اصلی شدت بارش و ارتفاع بارش وابسته است [8، 15، 22، 23 و 24]. پارامتر شدت بارش برابر با جرم ماسه ریخته شده در واحد سطح بر واحد زمان تعریف می‌شود ( $\text{gr/cm}^2/\text{sec}$ )، که با توجه به مساحت روزنه خروجی در زیر قیف بارگیری اندازه‌گیری می‌شود. Lo Presti و همکاران [19]، نشان دادند که افزایش شدت بارش سبب کاهش تراکم نسبی شده و متأثر از دو پارامتر عرض پرده بارش در زیر قیف بارگیری و سرعت حرکت پرده بارش است. بررسی تأثیر عرض پرده بارش بر شدت بارش و تراکم بستر، نشان داد که با افزایش عرض پرده بارش، شدت بارش افزایش یافته و تراکم بستر کاهش می‌یابد. همچنین در تحقیقی جداگانه [25 و 26] با انجام آزمایش روی عرض پرده بارش به ترتیب با انتخاب سه عرض بارش ۲، ۲/۶ و ۳ میلی‌متر و شش عرض، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴ و ۴/۵ میلی‌متر به نتایج مشابه دست یافتند. همانطور که اشاره شد، سرعت حرکت پرده بارش یکی دیگر از پارامترهای کنترل کننده شدت بارش در روش بارش پرده‌ای به شمار می‌آید. Lo Presti و همکاران [19]، با در نظر گرفتن دو سرعت متفاوت ۳ و ۸ سانتی‌متر بر ثانیه که افزایش سرعت حرکت پرده بارش کاهش شدت بارش و در نتیجه افزایش تراکم نسبی را به همراه دارد. همچنین طبق نتایج ارائه شده، افزایش سرعت، موجب ایجاد لایه با ضخامت کمتر و سطحی صاف‌تر می‌شود [3]. همچنین Stuit [2] با ثابت نگه داشتن محفظه بارگیری، شرایط ایجاد سرعت حرکت برای نمونه را ایجاد کرد و با تغییر سرعت حرکت نمونه از ۰/۹ تا ۲/۵ سانتی‌متر بر ثانیه به نتایج مشابه دست یافت. Bolouri Bazaz و همکاران [25] نیز با ساخت دستگاه بارش نیمه اتوماتیک مقادیر متفاوتی از ۰/۴ تا ۶ سانتی‌متر بر ثانیه را برای سرعت حرکت پرده بارش در نظر گرفته‌اند. Bolouri Bazaz و Kazemi [26] سرعت حرکت پرده بارش را

ماسه Leighton Buzzard و ماسه Ottawa دریافتند که بیشترین تاثیر ارتفاع در محدوده بارش تا ۵۰ سانتی متر بوده است. افزایش ارتفاع سقوط تا زمان رسیدن سرعت ذره به سرعت نهایی باعث افزایش انرژی سقوط می شود و بعد از رسیدن سرعت ذره به سرعت حدی، افزایش ارتفاع تاثیری بر درصد تراکم نسبی نداشته است. با بررسی نتایج Vaid و Negussey [29] مشاهده می شود که در ارتفاع سقوط ۳۰ تا ۷۰ سانتی متری مقدار تغییرات درصد تراکم نسبی با ارتفاع سقوط بسیار کم بوده و این پارامتر تاثیر کمی بر مقدار درصد تراکم نسبی داشته است. تاثیر ارتفاع سقوط بر درصد تراکم نسبی، وابسته به مقدار متوسط اندازه دانه ها، دانه بندی خاک، شدت بارش و مشخصات قالب نمونه گیری از جمله قطر دهانه قالب و زبری جدار دارد.

در این تحقیق به طراحی، ساخت و بررسی دستگاه بارش، با تمرکز بر روشی جدید مبتنی بر کنترل شدت بارش از دو پرده بارش به منظور بازسازی نمونه بزرگ مقیاس به منظور مدل سازی فیزیکی مسائل ژئوتکنیکی پرداخته شده است. تاثیر پارامترهای شدت بارش (عرض پرده بارش و سرعت حرکت)، تعداد پرده بارش و ارتفاع سقوط بر درصد تراکم نسبی ماسه فیروزکوه (D161) با انجام ۱۴۴ آزمایش مورد ارزیابی قرارگرفت. در مراحل تحقیق، پارامترهای عرض شکاف بارش (a)، سرعت حرکت (V)، تعداد پرده بارش (N) و ارتفاع سقوط (H<sub>F</sub>) به عنوان متغیر در نظر گرفته شد.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی

### ۲-۱- دستگاه مدل سازی فیزیکی و دستگاه بارش

دستگاه بارش پرده ای طراحی و ساخته شده، بخشی از دستگاه مدل سازی فیزیکی بوده و به منظور آماده سازی بستر ماسه ای در محفظه مدل با ابعاد ۲۰۰ سانتی متر طول، ۵۰ سانتی متر عرض و ۱۰۰ سانتی متر ارتفاع به منظور مدل سازی فیزیکی انواع پی مورد استفاده قرار گرفته است. دستگاه مدل سازی فیزیکی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب ساخته شده و شامل محفظه مدل سازی صلب، قاب بارگذاری، سیستم بارش و ابزار اندازه گیری (لودسل،

به وسیله ضخامت لایه بستر مورد ارزیابی قرار داده اند، که در سری اول آزمایش، ضخامت لایه بستر ۲/۵ سانتی متر و در سری دوم آزمایش، ضخامت ۵ سانتی متر انتخاب شد و به نتایج مشابه دست یافتند.

تاثیر پارامتر ارتفاع سقوط بر درصد تراکم نسبی با فرض کروی بودن دانه های خاک، از رابطه اندازه حرکت سقوط آزاد یک جسم کروی با جرم m، در سیالی به جرم مخصوص ρ (رابطه ۱) بدست می آید،

$$m \times a = m \times g - V \times \rho \times g - C_d \times \rho \times A \times v^2 / 2 \quad (1)$$

که در آن a شتاب ذره، g شتاب ثقل، A و V به ترتیب سطح و حجم ذره، v سرعت ذره و C<sub>d</sub> ضریب پسا وابسته به عدد رینولدز می باشد. با توجه به سقوط آزاد ذره (v<sub>0</sub> = 0) در هنگام بارش، شتاب اولیه ذره برابر با a<sub>0</sub> = g(1-V×ρ/m) بدست می آید. پس از سقوط آزاد و تا زمانی که سرعت ذره به سرعت حدی برسد شتاب ذره افزایش یافته و پس از آن ذره هیچگونه افزایش سرعت نداشته و شتاب ذره برابر با صفر می گردد. سرعت حدی با افزایش قطر ذرات افزایش یافته و در ارتفاع سقوط مشخص (ارتفاع حدی) تعیین می شود. بارش در ارتفاع بیشتر از ارتفاع حدی، تاثیری بر سرعت ذرات نداشته و در نتیجه تغییر محسوسی در تراکم نسبی حاصل نمی شود. Vaid و Negussey [4]، با بررسی ذرات کروی با قطرهای متفاوت نشان دادند که با افزایش قطر ذره، سرعت سقوط آزاد افزایش یافته و پس از رسیدن به ارتفاع حدی سرعت سقوط ثابت می ماند. Kolbuszewski [8] و Tatsuoka و همکاران [27] به بررسی تاثیر ارتفاع بارش بر درصد تراکم نسبی پرداخته اند. بررسی نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع سقوط تاثیر زیادی بر درصد تراکم نسبی داشته است. همچنین تاثیر این پارامتر از نظر Mulilis [28] کم اهمیت بوده و Miura و Toki [3] در آزمایش های مشابه نشان داده اند که افزایش پارامتر ارتفاع سقوط تاثیری بر درصد تراکم نسبی نداشته است. Vaid و Negussey [29]، به بررسی تاثیر ارتفاع بارش بر درصد تراکم نسبی در مدل سازی با روش بارش پرداخته اند. در این تحقیق با آزمایش روی دو نوع

فاصله مرکز به مرکز دو شیار از هم ۹ برابر عرض شکاف (است) به شکلی انتخاب شده که تداخلی بر بارش شیار مجاور نداشته باشد (شکل ۳). صفحه‌های بارش از جنس ورق فولادی با ضخامت سه میلی‌متر بوده و شیارها با برش لیزر (CNC) ایجاد شده است.



Fig. 2. View of the pluviation system

## ۲-۲- مشخصات مصالح

در این تحقیق از ماسه سیلیسی فیروزکوه (شماره ۱۶۱، با یک درصد ریزانده) استفاده شده. مقدار ناخالصی‌های ماسه مورد استفاده ناچیز بوده و ۹۸.۴۱ درصد آن از کوارتز تشکیل شده است. ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ به عنوان ماسه استاندارد در ایران شناخته می‌شود و پر مصرف‌ترین ماسه برای مطالعات آزمایشگاهی به شمار می‌آید. منحنی دانه‌بندی و مشخصات فیزیکی ماسه مطابق آزمایش استاندارد ال‌ک در شکل (۴) و جدول (۱) ارائه شده است. ضریب یکنواختی و ضریب انحنای ترتیب ۲.۰ و ۱.۳۵ می‌باشد. این ماسه بر اساس سیستم طبقه‌بندی یکپارچه، در زمره خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده طبقه‌بندی می‌شود. وزن مخصوص خشک کمترین و بیشترین ماسه به ترتیب ۱۳.۳۷ و ۱۶.۲۱۷ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد [30 و 31].

## ۳- جزئیات آزمایش‌ها

در این تحقیق، به ارزیابی تاثیر پارامترهای عرض پرده بارش، سرعت حرکت دستگاه بارش، تعداد پرده بارش و ارتفاع سقوط بر درصد تراکم نسبی و شدت بارش پرداخته شده است.

جابه‌جایی سنج و دیتالاگر) بود. شکل (۱) نمایی شماتیک از جزئیات دستگاه مدلسازی را ارائه می‌دهد.

شکل ۱. نمایی شماتیک از تجهیزات سیستم مدلسازی فیزیکی

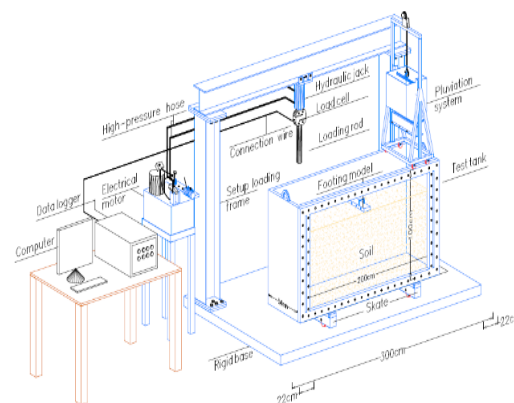


Fig. 1. Schematic view and details of the physical modeling system

سیستم بارش پرده‌ای ماسه، شامل محفظه ماسه، قاب نگهدار با قابلیت جابه‌جایی افقی، شیر کنترل، صفحه بارش و سیستم بالابر است. محفظه ماسه، از ورق فولادی با ضخامت ۳ میلی‌متر و گنجایش تقریبی ۴۰ کیلوگرم و بصورت مخزن قیف‌دار برای تامین جریان ثقلی در طول تخلیه ماسه طراحی گردیده است. قاب نگهدارنده به منظور قرارگیری ثابت محفظه ماسه و قابلیت جابه‌جایی در راستای افقی به کمک چهار چرخ و جابه‌جایی در راستای قائم با استفاده از سیستم بالابر دستی با دقت یک سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در انتهای قیف، شیر کنترل جریان جهت قطع و وصل جریان خروجی ماسه قرار دارد. محفظه ثانویه با ابعاد  $8 \times 6 \times 49.5$  سانتی‌متر جهت نصب صفحه بارش و تامین شرایط سقوط آزاد نصب گردیده که صفحه بارش با یک ردیف پیچ و مهره در هر طرف به محفظه ثانویه متصل می‌گردد. شکل ۲ نمایی از سیستم بارش پرده‌ای ساخته شده را نشان می‌دهد.

در این تحقیق به منظور دستیابی به بستر ماسه‌ای همگن، تاثیر عرض، سرعت حرکت، تعداد پرده بارش و همچنین ارتفاع سقوط بر تراکم نسبی بستر مورد ارزیابی قرار گرفت. از سه صفحه بارش تک شیار و سه صفحه بارش دو شیار با عرض دو، سه و چهار میلی‌متر برای بازسازی بستر ماسه‌ای با ارتفاعی برابر با ۵ سانتی‌متر استفاده شده است. فاصله دو شیار

شکل ۳. نمای از صفحه بارش و جزئیات آن (a - عرض بازشو، N - تعداد بازشو، S - فاصله مرکز به مرکز بازشوها)

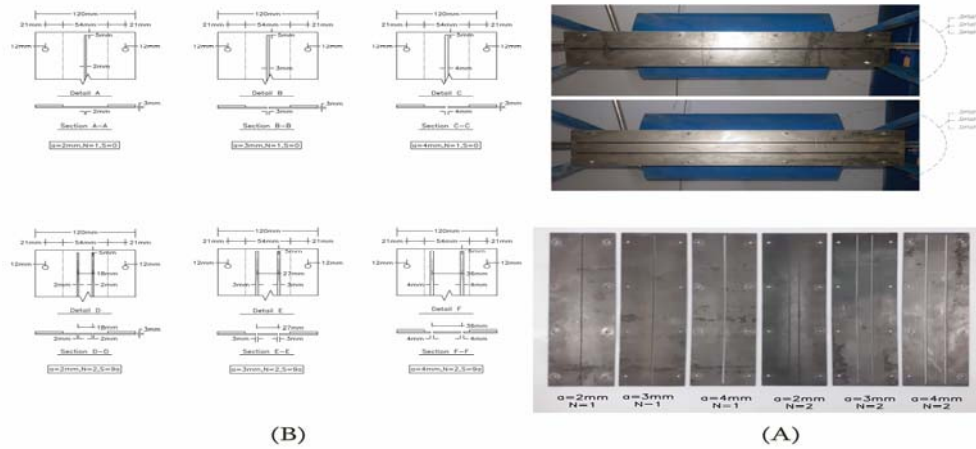


Fig. 3. View of the pluviation plate (a= Opening width, N= Number of curtain, s= distance between the two apertures)

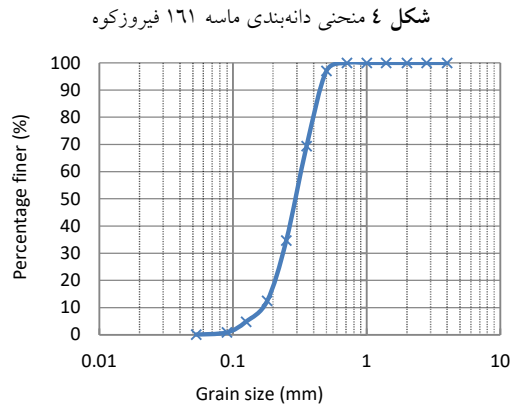


Fig. 4. Grain size distribution curve of Firuzkuh Sand (No.161)

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Firuzkuh (No. 161)	D <sub>50</sub> , mm	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	G <sub>s</sub>
	0.35	0.943	0.603	2.658

Table 1. Physical characteristics of Firuzkuh Sand (No.161)

پس از بارش و آماده‌سازی بستر ماسه‌ای درصد تراکم نسبی هر نمونه با محاسبه وزن آن نمونه و استفاده از رابطه ۲ تعیین شد. در بررسی نتایج ۴ نمونه در هر آزمایش، اختلافی در حدود ۳ درصد وجود داشته و از این‌رو نتایج نهایی هر آزمایش به صورت میانگینی از هر ۴ نمونه بوده است.

به منظور بررسی تاثیر پارامتر عرض پرده بارش بر درصد تراکم نسبی، از سه صفحه بارش تک شیار و سه صفحه بارش دو شیار، با عرض دو، سه و چهار میلی‌متر برای آماده‌سازی بستر ماسه‌ای استفاده شده است. سرعت حرکت پرده بارش برابر با دو، پنج و ده سانتی‌متر بر ثانیه به صورت متغیر در نظر گرفته شد. همچنین به منظور بررسی پارامتر ارتفاع بارش، هفت ارتفاع سقوط از ۱۰ تا ۷۰ سانتی‌متر با توالی ۱۰ سانتی‌متر، از روی نمونه در نظر گرفته شد. به منظور تعیین درصد تراکم نسبی بستر ماسه‌ای به ترتیب صفحه‌های بارش در زیر محفظه ثانویه نصب شد.

در هر آزمایش با یک سرعت انتخابی و در ارتفاع بارش ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متر، مدل‌سازی بستر با ضخامت ۵ سانتی‌متر انجام شد. در جدول (۲) پارامترهای متغیر و تعداد آزمایش‌ها انجام شده در تحقیق به منظور دستیابی به درصد تراکم نسبی بستر و شدت بارش نشان داده شده است. برای محاسبه درصد تراکم بستر مدل‌سازی شده، از نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و با ارتفاع ۵ سانتی‌متر و همچنین وزن ۴۸ گرم و حجم تقریبی ۳۵۰ سانتی‌متر مکعب استفاده شد. به منظور اطمینان از یکنواختی و همگن بودن تراکم در طول و عرض محفظه، چیدمان نمونه‌ها به شکلی انتخاب شد تا تمامی سطوح محفظه پوشش داده شود (شکل ۵).

جدول ۲. جزئیات آزمایش‌ها و متغیرها

Test series	Type of model	N	a (m m)	V (cm /s)	H <sub>f</sub> (cm )	+
Series .01	Relative Density (D <sub>r</sub> )	1	2	2	10	63
					20	
					30	
					40	
Series .02	Deposition Intensity (DI)	2	2	5	50	63
					60	
					60	
					70	
Series .03	single-aperture And double-aperture	2	2	2	40	9
					9	

Table 2. Details of tests and variables

$$D_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{d(\min)}}{\gamma_{d(\max)} - \gamma_{d(\min)}} \times \frac{\gamma_{d(\max)}}{\gamma_d} \times 100 \quad (2)$$

در ادامه تحقیق، ۱۸ آزمایش به منظور محاسبه شدت بارش در ارتفاع بارش ثابت ۴۰ سانتی‌متر در سرعت‌های متفاوت انجام شد و وزن ماسه ریخته شده در واحد سطح بر واحد زمان در نمونه اندازه‌گیری شد. به منظور اطمینان از نتایج حاصل در آزمایش شدت بارش، هر آزمایش در ۳ تکرار متوالی انجام شده و نتایج به صورت متوسط از هر سه آزمایش ارائه شد.

شکل ۵. نمایی از چیدمان نمونه‌ها در محفظه مدل‌سازی

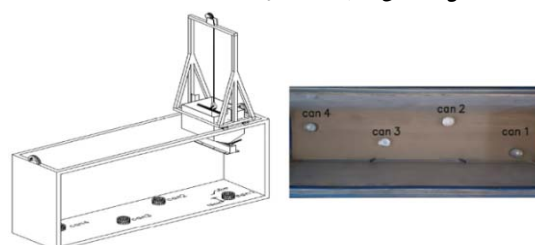


Fig. 5. Plan of the sampler on the chamber

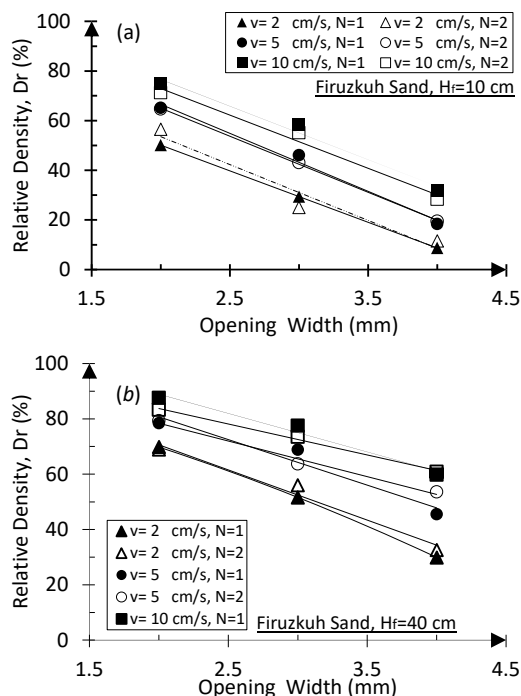
#### ۴- تجزیه و تحلیل

در این تحقیق ارزیابی دستگاه بارش، با رویکرد به روشی جدید مبتنی بر کنترل شدت بارش از دو پرده بارش به منظور بازسازی نمونه بزرگ مقیاس به منظور مدلسازی فیزیکی مسائل ژئوتکنیکی پرداخته شده است. بررسی تاثیر پارامترهای

متغیر عرض پرده بارش، سرعت حرکت، تاثیر تعداد پرده بارش و ارتفاع سقوط بر درصد تراکم نسبی بستر ماسه‌ای خشک آماده شده با روش بارش پرده‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. با تغییر در پارامترهای هدف بازه گسترده‌ای از تراکم نسبی ۱۲ تا ۹۳ درصد بدست آمد. در ادامه به ارزیابی نتایج پرداخته شده است.

عرض پرده بارش: در ابتدا تاثیر عرض پرده بارش با استفاده از صفحه بارش تک شیار و دو شیار بر درصد تراکم نسبی مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور در سرعت حرکت ۰.۲، ۰.۵ و ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه در ارتفاع بارش متفاوت، درصد تراکم نسبی بستر ماسه‌ای برای صفحه‌های بارش یک و دو شیار محاسبه شد. بررسی نتایج در شکل (۶) نشان داد که، مانند نتایج ارائه شده [19، 23 و 24] عرض پرده بارش بر درصد تراکم نسبی بستر تاثیر گذار بوده و با افزایش عرض پرده بارش، تراکم نسبی بستر کاهش می‌یابد.

شکل ۶. تاثیر پارامترهای عرض و تعداد پرده بارش بر درصد تراکم نسبی

(a): H<sub>f</sub>=10 cm; (b): H<sub>f</sub>=40 cmFig. 6. Influence of width and number of openings on relative density in single-curtain and double curtain pluviation plate. (a): H<sub>f</sub>=10 cm; (b): H<sub>f</sub>=40 cm

بررسی نتایج نشان داد که، مانسند نتایج تحقیق Stuit [2] نرخ افزایش درصد تراکم نسبی در پرده بارش با عرض مختلف نسبت به سرعت حرکت پرده بارش مقداری تقریباً یکنواخت است. همچنین بررسی نتایج نشان داد که، با افزایش سرعت حرکت، لایه‌ای با ضخامت کمتر و سطحی منظم‌تر ایجاد شد.

شدت بارش: همانطور که بیان شد، شدت بارش (DI) متأثر از دو پارامتر عرض بازشو و سرعت حرکت پرده بارش بوده است. پارامتر شدت بارش برابر با جرم ماسه ریخته شده در واحد سطح بر واحد زمان تعریف می‌شود ( $\text{gr/cm}^2/\text{sec}$ )، که با توجه به مساحت روزنه خروجی در زیر قیف بارگیری اندازه‌گیری می‌شود. به منظور محاسبه شدت بارش از نمونه‌گیر شماره ۱ با قطر تقریبی ۱۰ سانتی‌متر، مساحت  $70.8821$  سانتی‌مترمربع و حجم  $347.5$  سانتی‌مترمکعب استفاده شد. از تقسیم وزن ماسه ریخته شده در قالب در مدت زمان ۱۰ ثانیه بر مساحت قالب در ارتفاع سقوط  $40$  سانتی‌متر پارامتر شدت بارش برای صفحه‌های بارش تک شیار و دو شیار با عرض بازشو متفاوت محاسبه شد. بررسی نتایج نشان داد که، تعداد پرده بارش نیز بر شدت بارش اثر گذار است و باید پارامتر تعداد پرده بارش را به عنوان پارامتر تاثیر گذار بر نتایج دانست. در شکل (۸) مشاهده شد که، در صفحه بارش یک و دو شیار، با افزایش عرض پرده بارش و کاهش سرعت حرکت، شدت بارش بزرگتری حاصل گردیده که سبب کاهش تراکم نسبی شده است. قابل ذکر است که محاسبه شدت بارش در سرعت حرکت  $2$  سانتی‌متر بر ثانیه در عرض پرده بارش برابر با  $4$  میلی‌متر به علت پر شدن سریع نمونه قابل اندازه‌گیری نیست. مقایسه نتایج آزمایش‌های یک و دو پرده بارش به وضوح نشان داد که استفاده از دو پرده بارش منجر به افزایش حجم خروجی ماسه شده و با توجه به افزایش شدت بارش تأثیری بر درصد تراکم نسبی نداشته است. همانطور که در شکل (۹) نشان داده شده است، در ارتفاع سقوط  $40$  سانتی‌متر و سرعت حرکت  $5$  سانتی‌متر بر ثانیه در صفحه بارش تک شیار با عرض بازشو  $4$  میلی‌متر و صفحه بارش دو شیار با عرض  $2$  میلی‌متر، با توجه به اینکه دارای

همچنین با توجه به استفاده از صفحه بارش دو شیار، استفاده از این صفحه بارش، تراکمی تقریباً برابر با یک پرده بارش با عرض مشابه داشته و با توجه به حجم خروجی بیشتر ماسه در صفحه بارش دو شیار سرعتی بالاتر در بازسازی بستر ماسه‌ای را به همراه دارد.

سرعت حرکت: در ادامه تأثیر پارامترهای موثر، سرعت حرکت پرده بارش بر درصد تراکم نسبی مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۷) نشان داد که افزایش سرعت حرکت پرده بارش سبب افزایش تراکم نسبی شده و با تغییرات سرعت حرکت پرده بارش در ارتفاعها مختلف و برای هر دو صفحه بارش تک شیار و دو شیار، درصد تراکم نسبی بستر ماسه‌ای افزایش می‌یابد.

شکل ۷. تأثیر سرعت حرکت پرده بارش و تعداد پرده بارش بر تراکم نسبی (a):  $H_f=10$  cm; (b):  $H_f=40$  cm

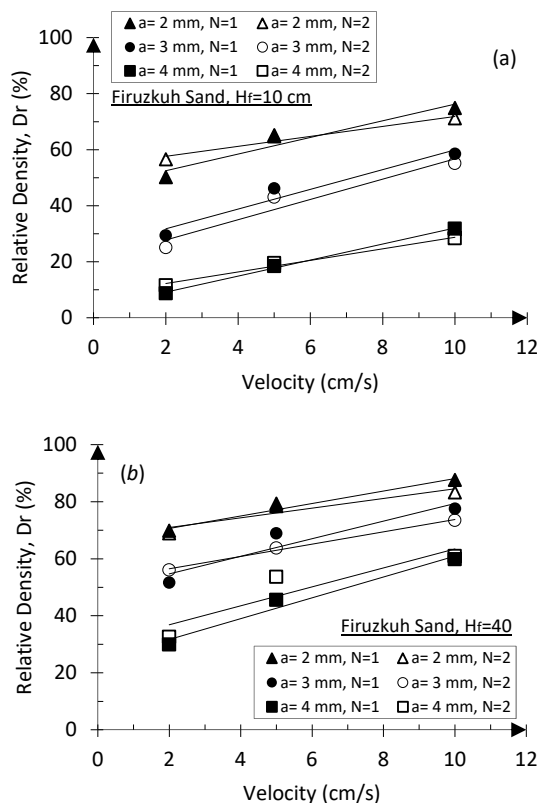


Fig. 7. Influence of the traveling pluviator speed and number of opening on the relative density. (a):  $H_f=10$  cm; (b):  $H_f=40$  cm



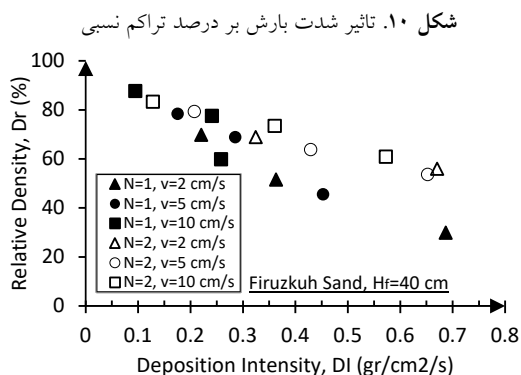


Fig. 10. Relative density versus deposition intensity

شکل ۱۱. شدت بارش ماسه در روش بارش در هوا با مقادیر متفاوت پارامترهای عرض و تعداد بازششود در ارتفاع سقوط ۴۰ سانتی‌متر (A): a=2 mm, N=1; (B): a=2 mm, N=2; (C): a=3 mm, N=1; (D): a=3mm, N=2; (E): a=4 mm, N=1; (F): a=4mm, N=2

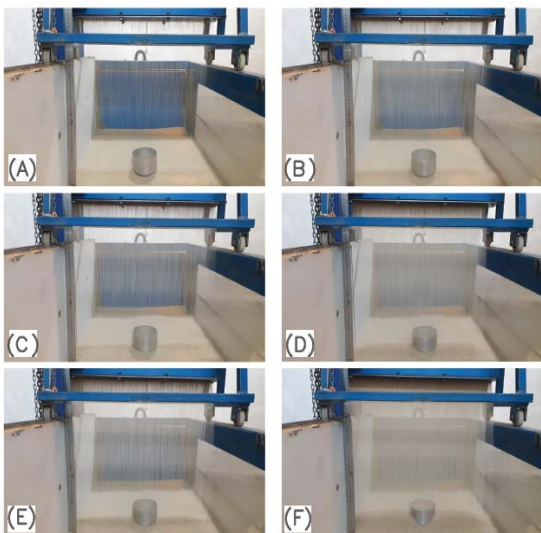


Fig. 11 Pluvial deposition of sand using curtain pluviation system for different values of opening width and number of opening at  $H_f = 40$  cm.

شکل (۱۱) (A-F) جریان ماسه در طول آماده‌سازی نمونه در ارتفاع سقوط معادل ۴۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. با افزایش عرض بازشو، جریان ماسه در واحد زمان افزایش یافته و با افزایش شدت رسوب، درصد تراکم نسبی نمونه کاهش می‌یابد. استفاده از صفحه بارش دو شیار موجب افزایش خروجی ماسه و شدت بارش می‌شود، اما درصد تراکم نسبی بدست آمده معادل با صفحه بارش تک شیار بوده است. ارتفاع سقوط: یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر درصد تراکم نسبی ارتفاع سقوط بارش بوده است. در این

عرض بازشو برابر بوده ولی مقدار درصد تراکم نسبی در صفحه بارش ۲ شیار بیش‌تر از صفحه بارش تک شیار بوده و دو پرده بارش به صورت مجزا عملکرده و با تقریب خوبی استفاده از دو پرده بارش تراکم بدست آمده از یک پرده بارش را در سرعتی بالاتر فراهم نموده است. در ادامه، مقادیر کاهش درصد تراکم نسبی بستر ماسه‌ای آماده شده به روش بارش با افزایش شدت بارش در ارتفاع سقوط ۴۰ سانتی‌متر در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

شکل ۸. تاثیر پارامترهای عرض، تعداد و سرعت حرکت پرده بارش بر

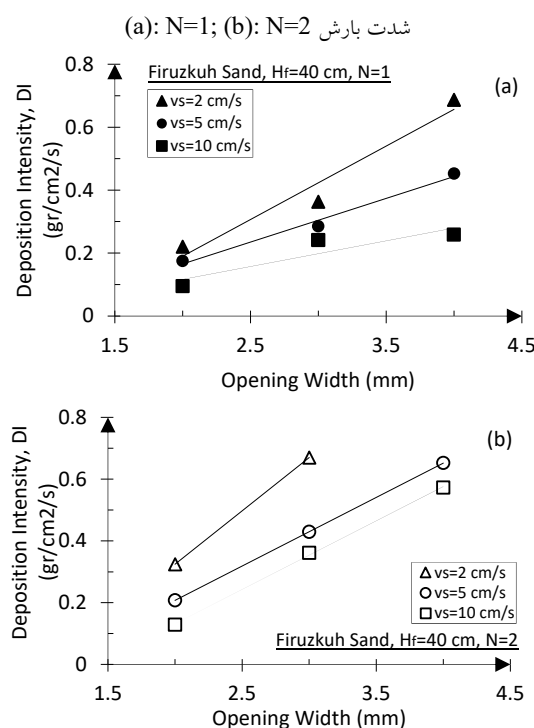


Fig. 8. Influence of opening width, pluviator speed and number of opening on the deposition intensity. (a): N=1; (b): N=2.

شکل ۹. تاثیر تعداد پرده بارش بر درصد تراکم نسبی

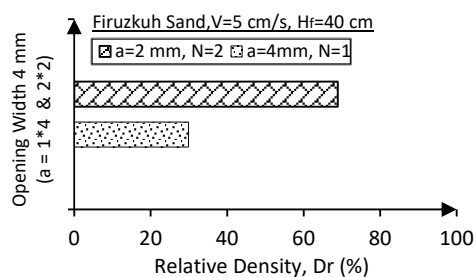


Fig. 9. Influence of number of openings on relative density



گشته ولی استفاده از دو شیار بارش، با توجه به افزایش حجم خروجی ماسه و افزایش شدت بارش و مقایسه با نتایج آزمایش‌ها پرده بارش تک شیار به وضوح نشان می‌دهد که استفاده از دو پرده بارش تاثیر چندانی بر درصد تراکم نسبی نداشته و هر شیار به صورت مجزا عمل کرده و استفاده از دو پرده بارش می‌تواند تراکم بدست آمده از یک پرده بارش در سرعتی بالاتر را فراهم نماید.

شکل ۱۲. تاثیر ارتفاع بارش بر درصد تراکم نسبی  
(a):  $a=2$  mm; (b):  $a=3$  mm; (c):  $a=4$  mm

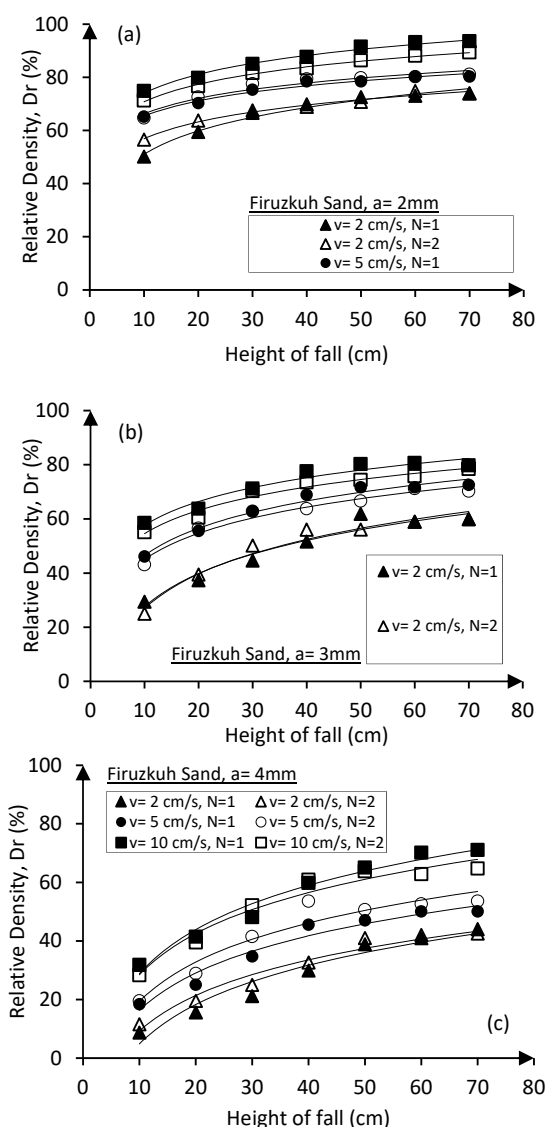


Fig. 12. Influence of fall height on relative density. (a):  $a=2$ mm; (b):  $a=3$ mm; (c):  $a=4$ mm

آزمایش‌ها برای هر صفحه بارش (تک شیار و دو شیار) ارتفاع سقوط در فواصل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متری از روی بستر ماسه‌ای در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۲) و جدول (۲) نشان داده شد که با افزایش ارتفاع سقوط، تراکم نسبی افزایش یافته و در ارتفاع بارش تا ۴۰ سانتی‌متر تاثیر ارتفاع بر درصد تراکم نسبی چشمگیر بوده و در ارتفاع حدود ۴۰ تا ۷۰ سانتی‌متری افزایش ارتفاع تاثیر کمی بر افزایش درصد تراکم داشته است. این اختلاف به دلیل اندازه ذرات و سرعت نهایی ذرات در این محدوده است که در آن ذرات کوچکتر به سرعت نهایی رسیده و ذرات بزرگتر به سرعت نهایی نمی‌رسند. در انتهای تحقیق به منظور استفاده کاربردی از نتایج، الگوریتمی برای دستیابی به درصد تراکم نسبی بستر با در نظر گرفتن پارامترهای تاثیر گذار (شدت بارش، تعداد پرده بارش و ارتفاع سقوط) در شکل (۱۳) ارائه شده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی آماده‌سازی بستر مدل فیزیکی با استفاده از روش بارش پرده‌ای با یک و دو پرده بارش برای مدل‌سازی نمونه بزرگ مقیاس پرداخته شد. تاثیر پارامترهای عرض پرده بارش، سرعت حرکت، تعداد پرده بارش و ارتفاع سقوط بر درصد تراکم نسبی و شدت بارش با آزمایش روی ماسه استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه نشان داد.

۱. پارامترهای تاثیرگذار بر بارش پرده‌ای شامل، شدت بارش و ارتفاع سقوط بوده که شدت بارش خود متاثر از عرض پرده بارش، سرعت حرکت بارش و تعداد پرده بارش می‌باشد.
۲. افزایش عرض پرده بارش در صفحه بارش تک شیار و دو شیار سبب کاهش تراکم نسبی لایه ماسه‌ای می‌شود.
۳. با تغییرات سرعت حرکت پرده بارش، می‌توان بازه‌ای گسترده از درصد تراکم نسبی را بدست آورد. افزایش سرعت حرکت پرده بارش سبب ایجاد سطحی یکنواخت‌تر با تراکم بیشتر می‌شود.
۴. افزایش شدت بارش که متاثر از افزایش عرض بارش و کاهش سرعت حرکت بارش بوده، سبب کاهش تراکم نسبی

جدول ۳. تاثیر پارامترهای متغیر (عرض، سرعت حرکت، تعداد و ارتفاع سقوط) بر درصد تراکم نسبی

	Velocity(cm/s)	Height of Fall (cm)						
		H <sub>f</sub> = 10	H <sub>f</sub> = 20	H <sub>f</sub> = 30	H <sub>f</sub> = 40	H <sub>f</sub> = 50	H <sub>f</sub> = 60	H <sub>f</sub> = 70
a= 2mm, N=1	V= 2	50.12	59.43	66.55	69.80	72.56	73.02	73.93
	V= 5	65.15	70.27	75.29	78.43	78.43	80.21	80.21
	V=10	74.84	79.77	85.04	87.63	91.47	93.15	93.57
a= 3mm, N=1	V= 2	29.38	37.35	44.58	51.61	61.83	58.95	59.92
	V= 5	46.10	55.56	62.78	68.88	71.65	71.65	72.56
	V=10	58.47	63.73	71.18	77.54	80.21	80.66	79.76
a= 4mm, N=1	V= 2	8.70	15.57	21.17	29.90	38.87	40.94	44.01
	V= 5	18.38	25.02	34.68	45.53	47.05	50.05	50.05
	V=10	31.77	41.45	48.05	59.81	65.03	70.14	71.06
a= 2mm, N=2	V= 2	56.53	63.72	67.49	68.88	70.72	74.84	73.93
	V= 5	64.67	72.57	77.54	79.33	79.77	80.21	81.10
	V=10	71.19	76.64	81.54	83.29	86.34	88.06	89.34
a= 3mm, N=2	V= 2	25.02	39.43	50.11	56.02	56.05	58.94	59.90
	V= 5	43.04	56.53	62.78	63.73	66.55	71.19	70.27
	V=10	55.07	60.39	70.26	73.48	74.39	75.74	78.43
a= 4mm, N=2	V= 2	11.54	19.49	25.02	32.59	40.99	42.02	42.53
	V= 5	19.49	28.84	41.50	53.59	50.62	52.61	53.60
	V=10	28.29	39.43	52.11	60.87	63.73	62.78	64.68

Table 3. Experimental results of the effect of fall height on the percentage of relative density



Fig. 13. Radar chart of relative density

۵. دستگاه ساخته شده برای شرایط بازسازی مدل فیزیکی همگن، تکرارپذیر با سرعت بسیار بالا مناسب بوده است.

۷. الگوریتمی برای دستیابی به درصد تراکم نسبی بستر با در نظر گرفتن پارامترهای عرض بارش، سرعت حرکت، تعداد پرده بارش و ارتفاع سقوط ارائه شد.

## ۶- مراجع

1. Saeedi E, Razmkhah A, kamalian M, Askari F. Bearing Capacity Evaluation of Skirted Reinforced Sand Slopes by Physical Modeling. MCEJ 2024; 24 (1):83-96 [In Persian]

۵. با افزایش ارتفاع، درصد تراکم نسبی افزایش یافته ولی در ارتفاع ۴۰ تا ۷۰ سانتی‌متر به دلیل تفاوت در اندازه و سرعت نهایی ذرات در این محدوده نرخ تغییرات ناچیز است. در این بازه ذرات کوچکتر به سرعت نهایی رسیده، در حالی که ذرات بزرگتر انرژی جنبشی خود را افزایش می‌دهند.

۶. استفاده از چهار نمونه‌گیر برای محاسبه درصد تراکم نسبی در طول و عرض محفظه و مقایسه نتایج به خوبی نشان داد که

17. Fretti, C., Lo Presti, D. C. F., and Pedroni, S. 1995. "A pluvial deposition method to reconstitute well-graded sand specimens." *Geotech Test J* 18, no. 2: 292-298.
18. Hossain, M. Z., and Ansary, M. A. 2018. "Development of a portable traveling pluviator device and its performance to prepare uniform sand specimens." *Innov Infrastruc. Solut* 3, no. 1 (June): 53.
19. Lo Presti, D. C. F., Berardi, R., Pedroni, S., and Crippa, V. 1993. "A new traveling sand pluviator to reconstitute specimens of well-graded silty sands." *Geotech Test J* 16, no. 1: 18-26.
20. Tabaroei, A., Abrishami, S., and Hosseininia, E. S. 2017. "Comparison between two different pluviator setups of sand specimens." *J Mater Civ Eng* 29, no. 10 (October): 04017157.
21. Abdollahi, M., & Bolouri Bazaz, J. 2017. "Reconstitution of sand specimens using a rainer system." *International Journal of Engineering*, 30(10), 1451-1463.
22. Lagioia, R., Sanzeni, A., and Colleselli, F. 2006. "Air, water, and vacuum pluviator of sand specimens for the triaxial apparatus." *Soils Found* 46, no. 1 (February): 61-67.
23. Dave, T. N., and Dasaka, S. M. 2012. "Assessment of portable traveling pluviator to prepare reconstituted sand specimens." *Geomech Eng* 4, no.2 (June): 79-90.
24. Gade, V. K., and Dasaka, S. M. 2015. "Development of a mechanized traveling pluviator to prepare reconstituted uniform sand specimens." *J Mater Civ Eng* 28, no. 2 (February): 04015117.
25. Bolouri Bazaz, J., Zadehmohamad, M., & Hashemi, S. S. 2018. "Developing a Portable Curtain Sand Pluviator for Reconstitution of Soil Models." *Modares Civil Engineering journal*, 18(1), 231-242.
26. Kazemi, M., & Bolouri Bazaz, J. 2017. "Reconstruction of a Large Scale Sand Specimen Using a Sand Curtain Rainer System." *Journal of Engineering Geology*, 11(2), 277-298.
27. Tatsuoka, F., Muramatsu, M., and Sasaki, T. 1982. "Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test." *Soils found* 22, no. 2 (June): 55-70.
28. Mulilis, J. P. 1975. "The effects of method of sample preparation on the cyclic stress-strain behaviour of sands." Technical Report No, HERC 75-18, Univ. of California at Berkeley, Earthquake engineering research center.
29. Vaid, Y. P., and Negussey, D. 1984. "Relative density of pluviated sand samples." *Soils Found* 24, no. 2 (June): 101-105.
30. Changizi, F., Razmkhah, A., Ghasemzadeh, H., & Amelsakhi, M. 2022. "Behavior of Geocell-Reinforced Soil Abutment Wall." *A Physical Modeling. Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(3), 04021495.
31. Jahanian, M. S., Razmkhah, A., Ghasemzadeh, H., & Vosoughifar, H. 2022. "Bearing capacity of the strip footing located on the sand reinforced by geocell under eccentric load". *Arabian Journal of Geosciences*, 15(15), 1328.
2. Stuit, H. G. 1995. "Sand in the geotechnical centrifuge." Ph.D. thesis, Tech. Univ.
3. Miura, S., and Toki, S. 1982. "A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand." *Soils found* 22, no. 1 (March): 61-77.
4. Vaid, Y. P., and Negussey, D. 1988. "Preparation of reconstituted sand specimens." In *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 1988.
5. Butterfield, R., and Andrawes, K. Z. 1970. "An air activated sand spreader for forming uniform sand beds." *Geotechnique* 20, no. 1 (March): 97-100.
6. DeGregorio, V. B. 1990. "Loading systems, sample preparation, and liquefaction." *J of Geotech Eng* 116, no. 5 (May): 805-821.
7. Lo Presti, D. C. F., Pedroni, S., and Crippa, V. 1992. "Maximum dry density of cohesionless soils by pluviator and by ASTM D4253-83: A comparative study." *Geotech Test J* 15, no. 2: 180-189.
8. Kolbuszewski, J. J. 1948. "An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands." Paper presented at the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Netherlands.
9. Abdoun, T., Gonzalez, M. A., Thevanayagam, S., Dobry, R., Elgamal, A., Zeghal, M., Mercado, V. M., and El Shamy, U. 2013. "Centrifuge and large-scale modeling of seismic pore pressures in sands: Cyclic strain interpretation." *J Geotech Geoenviron Eng* 139, no. 8 (August): 1215-1234.
10. Yniesta, S., Cappa, R., Lemnitzer, A., and Brandenburg, S. J. 2015. "Centrifuge Testing of Levees: Saturation Techniques during Model Construction." Paper presented at the IFCEE 2015, San Antonio, Texas, March.
11. Gade, V. K., and Dasaka, S. M. 2016. "Assessment of air pluviator using stationary and movable pluviators." *J Mater Civ Eng* 29, no. 5 (May): 06016023.
12. Ghosh, P., Srinivasan, V., and Srivastava, S. 2016. "A Systematic Approach towards the Assessment of Sand Bed Preparation Using the Air Pluviator Technique." Paper presented at Geo-Chicago 2016, Chicago, Illinois.
13. Mohammadi S, Ajalloeian R. Investigation of Desirability of Sand Pluviator Technique in order to Sample Making of Sandy Soils for Laboratory Models. *MCEJ* 2013; 13 (5):53-63 [In Persian]
14. Al-Yasir, Abdullah Talib, and Abbas Jawad Al-Taie. "A new sand raining technique to reconstitute large sand specimens." *Journal of the Mechanical Behavior of Materials* 32, no. 1 (2023): 20220228.
15. Kolbuszewski, J., and Jones, R. H. 1961. "The preparation of sand samples for laboratory testing." Paper presented at the Midland Soil Mechanics and Foundation Engineering Society, Birmingham, U.K.
16. Miura, S., and Toki, S. 1983. "Sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation — strength properties of sand." *Int J Rock Mech Min Sci* 20, no. 1 (February): A6.

# Physical Modeling of Sand Beds Using a New Approach

Ehsan Saeedi<sup>1</sup>, Arash Razmkhah<sup>1</sup>, Mohsen Kamalian<sup>2</sup>, Farajollah Askari<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University,  
<sup>2</sup> Geotechnical Engineering Research Centre, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIIES)

a\_razmkhah@azad.ac.ir

## ABSTRACT

It is common to apply physical modeling for a more precise investigation of phenomena in geotechnical engineering. The reconstitution of specimens is an appropriate way to study soil behavioral parameters in laboratories due to the restrictions of acceptable undisturbed sample preparation. Reconstitution of the sand sample is one of the most well-known challenges of physical modeling. One of the most significant aspects of physical modeling geotechnical engineering is the repeatability of bed preparation. The reconstitution of sample and bed preparation in physical modeling are divided into two general approaches, depending on the type of porosity control employed. Methods where the porosity is adjusted after deposition, is only appropriate for dense beds with diverse layers. This category includes the methods of tamping and vibration. Another methods where the porosity is controlled during deposition, which aim at obtaining any porosity within the maximum-minimum porosity limits of the material that is pluviation technique. Because of the favorable conditions and prompt modeling it enables, the preparation of layers by the pluviation technique is one of the most reliable bed preparation methods. The pluviation technique can be divided into three categories, air pluviation, vacuum pluviation, and water pluviation. In addition, each category is divided into three minor subgroups that monitor sand-rain outflow intensity as follows, controlling the deposition intensity of sand output from single or multiple nozzles of various shapes, controlling the deposition intensity of the sand output from single or multiple sieves, controlling the deposition intensity of the sand output from longitudinal aperture (curtain pluviation). The effective parameters on pluviation system are deposition intensity and fall height. Deposition intensity, itself, is affected by aperture width, traveling pluviator speed, and the number of opening. The sand reconstitution technique must properly provide real sample conditions in a wide range of soil density (loose to dense), the uniform void ratio in the entire reconstructed specimen, fully saturated conditions for undrained status, the samples should be well mixed without particle size segregation, regardless of particle size gradation and simulation of the studied depositional fabric characteristic.

In this research, a novel approach focusing on a traveling sand pluviator with two apertures was developed for the reconstitution of large-scale samples. Experiments on Iran's Firuzkuh sand (#161) \_Silica sand with fine-grained content of about 1% that is known as the standard sand in Iran and has been the most widely used sand for laboratory studies\_ evaluated the effects of opening width, traveling pluviator speed, fall height, and number of openings on deposition intensity and relative density. The results showed that a decrease in deposition intensity is correlated with a decrease in aperture width and an increase in traveling pluviator speed, which significantly enhances relative density. With changes in the effective parameters, a broad range of relative densities could be obtained—from 12 to 93 percent. Comparisons between the findings of the experiments revealed that double-aperture pluviation plate, given the increases in sand outlet and deposition intensity, had a density equivalent to that of single-aperture pluviation plate; moreover, each aperture behaved as separate, resulting in prompt sand bed preparation. The findings also revealed that increase in fall height leads to increase in relative density.

**Keywords:** Air pluviation, traveling sand pluviator, relative density, firuzkuh sand (#161), physical modeling.