

# ساخت دستگاه بارش ماسه نیمه خودکار جدید برای ساختن مدل‌های فیزیکی ژئوتکنیکی

محمد مهدی زاده<sup>۱</sup>، جعفر بلوری بزاز<sup>۲\*</sup>، سید صابر هاشمی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری خاک و پی دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک و پی دانشگاه آزاد اسلامی تهران مرکز

\*bolouri@um.ac.ir

تاریخ پذیرش [۹۵/۰۶/۲۸]

تاریخ دریافت [۹۵/۰۲/۲۱]

## چکیده

ساخت مدل‌های آزمایشگاهی یکی از پر کاربردترین روش‌های پژوهشی در مهندسی ژئوتکنیک است. مدل‌های آزمایشگاهی پدیده‌های ژئوتکنیکی را در مقیاسی کوچکتر شبیه‌سازی می‌کنند تا تاثیر پارامترهای مختلف روی آن بررسی شود. یکی از اصلی‌ترین پارامترهای خاک در مدل‌سازی تراکم نسبی است، که در ساخت نمونه‌ها و مدل‌ها باید توجه شود. روش بارش ماسه یکی از روش‌های مورد قبول برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های فیزیکی برای دستیابی به تراکم‌های نسبی معین در پژوهش‌های ژئوتکنیکی است. ساخت مدل‌های خاکی با لایه‌های یکنواخت، تراکم نسبی مشخص و تکرارپذیر، یکی از اهداف روش بارش ماسه است. این پژوهش به معرفی یک دستگاه بارش پرده-ای ماسه نیمه خودکار می‌پردازد که برای ساخت مدل‌های فیزیکی در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه فردوسی مشهد ساخته شده است. در این پژوهش نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته روی دستگاه بارش توسط ماسه ۱۶۱ فیروزکوه، تحلیل و بررسی شده است. تاثیر عوامل مختلف بر تراکم نسبی لایه‌های خاک مانند ارتفاع بارش، شدت بارش، ضخامت پرده بارش و سرعت حرکت پرده بارش در این دستگاه بارش مطالعه شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش ارتفاع، کاهش ضخامت پرده بارش و افزایش سرعت حرکت پرده، تراکم نسبی ماسه افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی آزمایش‌های مختلف، تکرارپذیری و یکنواختی بسیار مطلوبی برای ساخت مدل‌های فیزیکی در تراکم نسبی مشخص به این روش ارائه شده است.

**واژگان کلیدی:** بارش ماسه، دستگاه بارش، بارش پرده ای، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه، تراکم نسبی

## ۱- مقدمه

مختلف تاثیرگذار در مساله در شرایط معین بررسی می‌شود. به این منظور ساخت مدل آزمایشگاهی با پارامترهای اولیه معین ضروری است. ساخت مدل‌های خاکی با تراکم نسبی مشخص و تکرارپذیری ساخت آنها، امری تعیین کننده در نتایج

استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی در بیشتر پژوهش‌های ژئوتکنیکی ضروری است. در این پژوهش‌ها پارامترهای

پژوهش‌گران با تغییر در شکل خروجی، ابعاد، ارتفاع بارش و تعداد خروجی به مطالعه تأثیرات آن‌ها پرداخته‌اند.

روش دیگری که توسط پژوهش‌گران به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است، استفاده از الک‌های تکی یا چند تایی است [9, 10, 16, 17, 18]. در این روش الک‌ها در زیر ظرف حاوی ماسه قرار می‌گیرند و ماسه پس از خروج از مخزن و عبور از الک‌ها به داخل ظرف نمونه سقوط می‌کند.

در روش دیگر، ماسه از طریق یک خروجی به صورت شکاف طولی در زیر مخزن خارج می‌شود. این روش به بارش‌پرده‌ای<sup>۱</sup> معروف است و توسط پژوهش‌گران اندکی مورد بررسی قرار گرفته است [11, 12].

این پژوهش به معرفی دستگاه نیمه اتوماتیک بارش پرده-ای ماسه می‌پردازد. این سیستم که در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه فردوسی مشهد طراحی و ساخته شده است، قادر است لایه‌های ماسه را با یکنواختی و تکرارپذیری بسیار بالا، در محدوده وسیعی از تراکم‌های نسبی بازسازی نماید. همچنین نتایج آزمایش دستگاه توسط ماسه ۱۶۱ فیروزکوه، که به عنوان ماسه مرجع در پژوهش‌های ژئوتکنیکی از آن استفاده می‌شود، ارائه خواهد شد.

از مهمترین مزایای این دستگاه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد

۱- با توجه به این که عوامل تعیین کننده در تراکم نسبی ماسه در این دستگاه ( ارتفاع بارش، ضخامت پرده و سرعت حرکت پرده)، به دقت قابل تنظیم است، دستگاه بارش پرده‌ای ساخته شده می‌تواند در محدوده وسیعی از تراکم‌های نسبی، مدل‌های فیزیکی خاکی را بازسازی نماید.

۲- این دستگاه قادر است بازسازی مدل‌های فیزیکی خاک در تراکم نسبی معین را با دقت بسیار بالا تکرار کند.

۳- با توجه به اینکه عرض پرده بارش برابر عرض جعبه مدل است و همچنین سرعت حرکت پرده و ارتفاع بارش به دقت قابل تنظیم است، مدل خاکی دارای یکنواختی بسیار بالایی در عرض، طول و ارتفاع جعبه مدل است.

آزمایش‌ها است. به این منظور، روش‌های مختلفی برای ساخت نمونه‌ها و مدل‌های فیزیکی در مهندسی ژئوتکنیک پیشنهاد شده است [1, 2, 3] که به طور کلی می‌توان به سه روش کوبشی<sup>۱</sup>، لرزشی<sup>۲</sup> و بارشی<sup>۳</sup> اشاره کرد.

در بین این روش‌ها، روش بارشی [5] مورد توجه بیشتر پژوهشگران قرار گرفته است، که از دلایل آن می‌توان به دستیابی به دامنه وسیعی از تراکم‌های نسبی و همچنین سرعت بالای ساخت در مدل‌های فیزیکی اشاره کرد.

روش بارشی را می‌توان به سه دسته زیر تقسیم‌بندی کرد

[6].

- بارش در هوا<sup>۴</sup>

- بارش به وسیله مکش<sup>۵</sup>

- بارش در آب<sup>۶</sup>

در این بین روش بارش ماسه در هوا کاربرد بیشتری در پژوهش‌های آزمایشگاهی پیدا کرده است که برای آماده کردن مدل‌های فیزیکی برای تست‌های سانتیفریوژ، میز لرزه و نمونه‌های سه محوری به کار برده می‌شود.

به دلیل یکنواختی لایه‌های ماسه پس از بارش، بیشتر از ماسه بد دانه‌بندی شده در این روش استفاده می‌شود. ماسه از طریق یک خروجی در پایین مخزن نگهداری آن به درون نمونه یا ظرف مدل سقوط می‌کند. با توجه به شکل‌های مختلف خروجی در پایین مخزن ماسه، روش‌های مختلف بارش ماسه به صورت زیر معرفی شده‌اند:

- خروجی روزنه‌ای به صورت تکی یا چندتایی<sup>۷</sup>

- خروجی الک به صورت تکی یا چند تایی<sup>۸</sup>

- خروجی به صورت یک شکاف طولی<sup>۹</sup>

پژوهشگران زیادی به مطالعه خروجی‌های تکی یا چند-تایی پرداخته‌اند و عوامل تأثیرگذار بر تراکم نسبی خاک در این روش را مورد بررسی قرار داده‌اند [1, 2, 3, 4, 7, 8]. این

- 1Tamping
- 2Vibration
- 3Pluviation
- 4Air Pluviation
- 5Vacuum Pluviation
- 6Water Pluviation
- 7Single or Multiple Nozzle
- 8Single or Multiple Sieve
- 9Longitudinal Aperture

شکل ۱. شکل شماتیک و تصویر دستگاه بارش

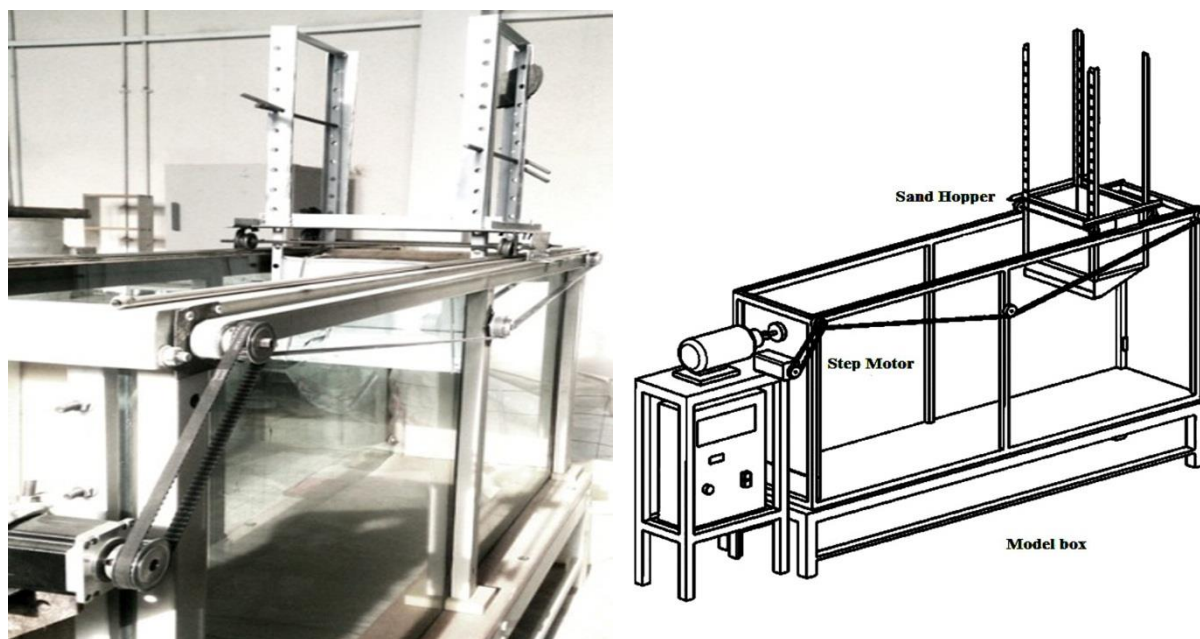


Fig. 1. Picture and schematic view of pluviation system

ثابتی به قاب چرخدار بدهد (شکل ۱). سیستم کنترل کننده موتور پله‌ای سبب می‌شود که مخزن ماسه پس از رسیدن به جداره جعبه، به صورت خودکار تغییر جهت داده و در جهت عکس حرکت کند. همچنین با استفاده از یک کنترل کننده سرعت، بازه سرعت دستگاه از ۰/۴ تا ۸ سانتی متر بر ثانیه قابل تغییر است. ماسه درون مخزن از طریق یک شکاف که روی یک صفحه جدا از مخزن ایجاد شده و در زیر مخزن نصب می‌شود، خارج می‌شود (شکل ۲).

ضخامت‌های مختلف پرده بارش با تغییر عرض شکاف قابل دستیابی است و با تغییر این ضخامت، مقدار ماسه خروجی از مخزن در واحد زمان تغییر خواهد نمود. به منظور به دست آمدن عرض یکنواخت شکاف در این پژوهش از برش لیزری برای ایجاد شکاف استفاده شده است.

لازم به ذکر است که لوپرستی [11] برای بارش پرده‌ای ماسه از دستگاه مشابه استفاده کرده است. در دستگاه ساخته شده به وسیله او، ماسه داخل مخزنی ثابت از طریق شکافی طولی روی صفحه‌ای که با سرعت افقی حرکت می‌کند، سقوط

در این پژوهش تاثیر پارامترهای مختلفی مانند ضخامت پرده بارش، ارتفاع بارش و سرعت حرکت پرده بر تراکم نسبی ماسه مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن به صورت نمودارهایی ارائه و بررسی شده است.

## ۲- دستگاه و مصالح استفاده شده

### ۱-۲- دستگاه بارش نیمه خودکار

دستگاه بارش پرده‌ای ماسه نیمه خودکار برای بازسازی لایه‌های خاک در یک جعبه مدل به ابعاد ۱/۸ متر طول، ۰/۸ متر ارتفاع و ۰/۴ متر عرض ساخته شده است. در این جعبه مدل، خاک پشت کوله پل‌های یکپارچه مدل‌سازی می‌شود. این دستگاه بارش شامل یک مخزن ماسه به ظرفیت حدود ۲۵ کیلوگرم است که روی یک قاب چرخدار با قابلیت تغییر ارتفاع نصب شده است. قابلیت تغییر ارتفاع این اجازه را می‌دهد که ارتفاع بارش ماسه به دلخواه انتخاب شود و در طول ساخت مدل ثابت نگه‌داشته شود. قاب چرخدار می‌تواند روی یک جفت ریل در طول جعبه حرکت کند. نیروی محرکه توسط یک موتور پله‌ای تولید می‌شود و توسط مجموعه‌ای از تسمه‌ها و پولی‌ها می‌تواند سرعت

می توان نتایج بدست آمده از آزمایش ها انجام شده روی ماسه فیروزکوه را با نتایج آزمایش های انجام شده روی ماسه تویورا ژاپن قابل مقایسه دانست.

شکل ۳. مقایسه منحنی دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ماسه های تویورا و سنگنیاما

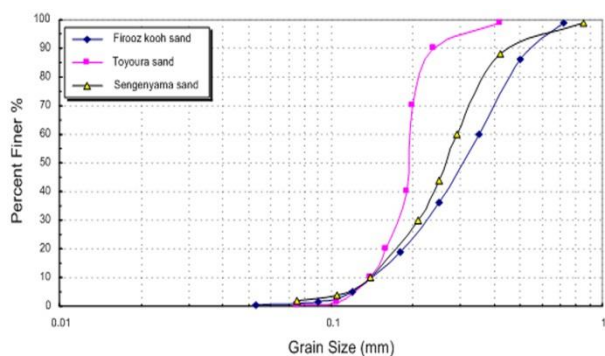


Fig. 3. Particle size distribution of Firoozkooch 161 sand compared with Toyoura and Sengenyama sand

جدول ۱. مقایسه مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ماسه های تویورا و سنگنیاما

Sand	$G_s$	$e_{max}$	$e_{min}$	$D_{50}$ (mm)	$C_u$	$C_c$
Firoozkooch 161	2.658	0.943	0.603	0.3	2.58	0.63
Toyouira	2.65	0.977	0.597	0.17	1.54	1.25
Sengenyama	2.72	0.911	0.55	0.27	2.15	1.21

Table 1. Characteristics of Firoozkooch 161 sand compared with Toyoura and Sengenyama sand

### ۳- پارامترهای موثر در بارش پرده ای ماسه

عوامل تاثیر گذار در روش بارش پرده ای ماسه که در این پژوهش بررسی شده، شامل ارتفاع بارش ماسه، ضخامت پرده بارش و سرعت حرکت پرده بارش است.

#### ۳-۱- ارتفاع بارش

ارتفاع بارش ماسه (HF)، فاصله طی شده توسط ماسه از خروجی مخزن ماسه تا بالای لایه ماسه در داخل جعبه مدل است (شکل ۴). ارتفاع بارش بر روی سرعت حرکت دانه های ماسه در هوا و انرژی آنها هنگام برخورد با لایه بالایی ماسه تاثیر می گذارد.

می نماید. تفاوت دستگاه بارش استفاده شده به وسیله لوپرستی [3] و دستگاه بارش ساخته شده در این پژوهش در چگونگی حرکت دستگاه بارش و همچنین قابلیت تنظیم ارتفاع بارش است. دستگاه بارش ساخته شده در این پژوهش دارای قابلیت تنظیم ارتفاع بارش در مدول های ۵ سانتی متری است.

شکل ۲. شکاف های قابل نصب در زیر مخزن

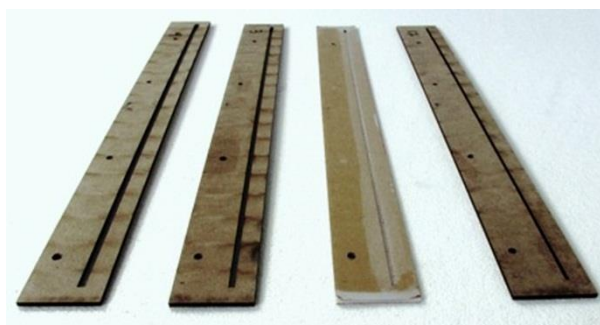


Fig. 2. Mounted aperture below the hopper

#### ۲-۲- ماسه استفاده شده

بسیاری از پژوهش گران گزارش کرده اند که به دلیل سرعت سقوط متفاوت دانه های درشت و ریز در یک ماسه خوب دانه بندی شده، لایه های ماسه ممکن است پس از بارش به اندازه مطلوب همگن نباشند [10, 4]. به همین دلیل برای ساخت مدل در روش بارش ماسه معمولاً از ماسه بدانه بندی شده<sup>۱</sup> استفاده می شود. در این آزمایش ها از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه که به عنوان ماسه مرجع در پژوهش های ژئوتکنیک در ایران به کار می رود، استفاده شده است. منحنی دانه بندی و برخی مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با ماسه های مرجع در پژوهش های خارج از ایران مقایسه شده است (شکل ۳) (جدول ۱). با مقایسه مشخصات فیزیکی و منحنی های دانه بندی ماسه فیروزکوه و ماسه های استاندارد تویورا و سنگنیاما می توان مشاهده نمود که ماسه فیروزکوه از نظر خواص فیزیکی و منحنی های دانه بندی شباهت بسیاری به ماسه های استاندارد تویورا و سنگنیاما داشته و از بین این دو نوع ماسه استاندارد، به ماسه سنگنیاما بیشتر شباهت دارد. با این حال به علت شباهت ویژگی های فیزیکی ماسه فیروزکوه با ماسه استاندارد تویورا

همچنین در پژوهشی دیگر با روش الک‌های چندتایی، با تغییر ارتفاع بارش بین ۳۰ تا ۷۰ سانتی‌متر، تاثیر محسوس در تراکم نسبی ماسه مشاهده نشده است [10]. راد و تومای [4] با تغییر ارتفاع بارش بین ۲/۵ تا ۴۶ سانتی‌متر نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع، تراکم نسبی ماسه افزایش خواهد یافت. همچنین پژوهش‌گران متعدد دیگری با روش‌ها مختلف بارش به بررسی اثر ارتفاع بارش بر تراکم نسبی ماسه پرداخته‌اند [6, 16, 17].

در پژوهش حاضر، تاثیر ارتفاع بارش با تغییر آن بین ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر و در فواصل ۱۰ سانتی‌متری مطالعه شده است.

### ۳-۲- ضخامت پرده بارش

پژوهش‌گران زیادی گزارش کرده‌اند که با افزایش شدت خروج ماسه از مخزن ماسه، تراکم نسبی لایه‌های ماسه کاهش می‌یابد [7, 15]. در روش استفاده از خروجی‌هایی چندتایی و الک‌های چندتایی، با تغییر در الگو و شکل خروجی‌ها و نسبت منافذ، می‌توان مقدار ماسه خروجی از مخزن را تغییر داد [1]. در روش بارش پرده‌ای، مقدار ماسه خروجی از مخزن را می‌توان با تغییر در عرض شکاف بارش ( $t_a$ ) تغییر داد (شکل ۵). لوپرستی [11] شش عرض مختلف شکاف بارش را آزمایش کرد و نتیجه گرفت که در عرض‌های کمتر، تراکم نسبی بالاتری حاصل می‌شود و در عرض‌های بالاتر به دلیل این که نمونه به سرعت پر می‌شود، دقت نتایج پایین‌تر است. در این پژوهش سه عرض مختلف شکاف ۲، ۲/۶ و ۳ میلی‌متر برای خروجی ماسه مطالعه شده است.

### ۳-۳- سرعت حرکت پرده بارش

در روش بارش پرده‌ای، سرعت حرکت پرده بارش (V) تاثیر زیادی بر تراکم نسبی لایه‌های ماسه خواهد داشت. لوپرستی [11] دو سرعت حرکت ۳ و ۸ سانتی‌متر بر ثانیه را مطالعه کرد و نتیجه گرفت که سرعت‌های حرکت بالاتر نتایج زیر را به همراه خواهد داشت:

۱- لایه‌های ماسه با ضخامت کمتر خواهند بود

شکل ۴. تصویر بارش پرده‌ای ماسه



Fig. 4. Picture of sand curtain raining

وید و نگوسی [13] با در نظر گرفتن سقوط آزاد یک جسم کروی درون یک سیال نتیجه گرفتند که دانه‌های ماسه در هنگام سقوط به یک سرعت حدی در شتاب صفر خواهند رسید. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش قطر دانه‌های ماسه، این سرعت حدی افزایش می‌یابد. بنابراین نتایج آن‌ها، سرعت حدی در ارتفاع سقوط مشخصی حاصل می‌شود که ارتفاع حدی نام دارد. بارش ماسه در ارتفاع‌های بیشتر از ارتفاع حدی تاثیری بر سرعت دانه‌ها نخواهد گذاشت و در نتیجه آن، تغییر محسوس در تراکم نسبی حاصل نخواهد شد. همچنین وید و نگوسی [14] نتیجه گرفته‌اند که در تراکم‌های نسبی بالا (نسبت تخلخل پایین)، شدت بارش بر تراکم نسبی حاکم است در صورتی که در تراکم‌های پایین ارتفاع بارش حاکم بر تراکم نسبی است (شکل ۵).

شکل ۵. حاکم بودن شدت بارش و ارتفاع بارش بر تراکم نسبی در

تراکم‌های نسبی مختلف [14]

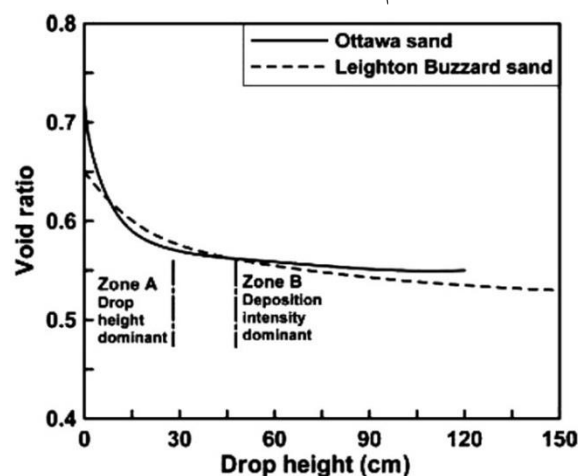


Fig. 5. Dominance of Deposition Intensity and Height of Fall in different Density ratios [14]

پرده در واحد زمان است. به این ترتیب وزن ماسه ریخته شده در جعبه مدل در واحد سطح و در واحد زمان به دست می‌آید.

#### ۴- نتایج آزمایش‌ها

در این پژوهش بیش از ۱۰۰ آزمایش روی دستگاه بارش توسط ماسه ۱۶۱ فیروزکوه صورت گرفته است. در طول این آزمایش‌ها از نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر برای نمونه‌گیری استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی یکنواختی تراکم نسبی در عرض پرده بارش از ۳ نمونه در هر آزمایش در عرض پرده استفاده شده است.

تراکم نسبی نمونه‌ها در این پژوهش با توجه به وزن ماسه ریخته شده در هر نمونه و داشتن نسبت تخلخل کمینه و بیشینه از پژوهش‌های پیشین روی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه [13]، از رابطه (۲) به دست آمده است.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} * 100 \quad (2)$$

نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تکرارپذیری ساخت نمونه‌ها بسیار بالا است و تغییر در تراکم نسبی نمونه‌های گرفته شده در شرایط مشابه از ۱ درصد تجاوز نمی‌کند. همچنین با تغییرات در ارتفاع بارش، ضخامت پرده و سرعت حرکت پرده در بازه وسیعی از تراکم نسبی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه، بین ۳ تا ۹۳ درصد قابل تولید است. نتایج بررسی پارامترهای مختلف در آزمایش‌ها به صورت مجزا بررسی شده است.

#### ۴-۱- بررسی تاثیر ارتفاع بارش

یکی از عوامل تاثیرگذار بر تراکم نسبی ماسه که در تمامی روش‌های بارش مورد مطالعه قرار گرفته است، ارتفاع بارش<sup>۲</sup> است [1, 2, 5, 7, 10, 16, 18]. منظور از ارتفاع بارش در این آزمایش‌ها فاصله خروجی مخزن ماسه تا وسط ظروف نمونه‌گیری است که در تمامی آزمایش‌ها رعایت شده است. در

۲- لایه‌ها منظم‌تر با سطحی صاف‌تر خواهند بود همچنین استویتی با تغییر سرعت حرکت پرده بین ۰/۹ تا ۲/۵ سانتی‌متر بر ثانیه توانست به محدوده وسیعی از تراکم‌های نسبی دست یابد (شکل ۶).

شکل ۶. تصویر شماتیک بارش پرده‌ای در پژوهش استویتی [12]

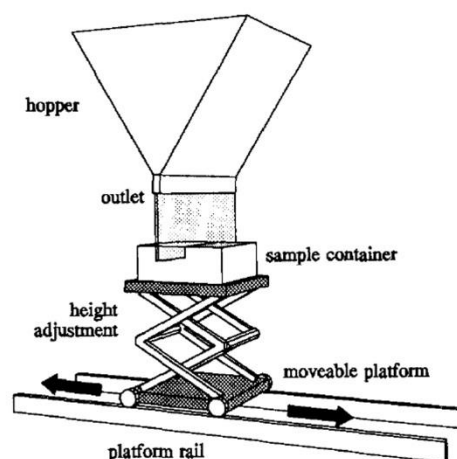


Fig. 6. Schematic view of curtain pluviator in Stuit [12]

در پژوهش حاضر سرعت حرکت پرده ماسه بین ۰/۴ تا ۶ سانتی‌متر بر ثانیه تغییر داده شده و تاثیر آن روی تراکم نسبی ماسه بررسی شده است.

#### ۳-۴- شدت بارش<sup>۱</sup> (DI)

طبق تعریف، شدت بارش، وزن ماسه ریخته شده در ظرف در واحد سطح و در واحد زمان است [11]. در روش بارش پرده‌ای علاوه بر عرض و طول شکاف مخزن، سرعت حرکت مخزن نیز تاثیر زیادی بر شدت بارش دارد. در این پژوهش می‌توان برای محاسبه شدت بارش از رابطه (۱) استفاده کرد:

$$DI = \frac{W}{L_a * V * 1} \frac{\left[ \frac{gr}{s} \right]}{\left[ cm * \frac{cm}{s} * s \right]} \quad (1)$$

که در این رابطه W وزن ماسه خروجی از مخزن ماسه در واحد زمان، L<sub>a</sub> طول پرده و V\*1 مسافت طی شده توسط

افزایش سرعت حرکت پرده تراکم نسبی افزایش می‌یابد (شکل ۹). همچنین در سرعت‌های بالاتر، لایه‌هایی با ضخامت کمتر و با سطحی منظم‌تر حاصل می‌شود که نتیجه آن نمونه‌هایی یکنواخت‌تر و تکرارپذیرتر است.

#### ۴-۴- بررسی تاثیر شدت بارش

اگر چه با توجه به مستقل نبودن شدت بارش بررسی جداگانه آن ضروری نیست، اما برای مقایسه با دیگر پژوهشگران، شدت بارش نیز در این پژوهش بررسی شده است. در بسیاری از پژوهش‌های پیشین سعی شده است که رابطه‌ای کلی بین شدت بارش و تراکم نسبی لایه‌های ماسه ارائه شود [4, 7, 9]. در این پژوهش‌ها با افزایش مساحت خروجی مخزن ماسه، مقدار شدت بارش را تغییر داده‌اند. در پژوهش حاضر، با توجه به این که شدت بارش در ظرف تابع دو متغیر عرض شکاف خروجی ماسه و سرعت حرکت پرده بارش است، با محاسبه وزن ماسه خارج شده از مخزن و سرعت حرکت پرده بارش و با استفاده از رابطه (۱) تغییرات شدت بارش در برابر تراکم نسبی برای ضخامت‌های مختلف پرده بارش به دست آمده است (شکل ۱۰). این تغییرات نشان می‌دهد که با افزایش شدت بارش، تراکم نسبی لایه‌های ماسه کاهش خواهد یافت.

#### ۵- کاربردهای عملی پژوهش

دستگاه بارش ساخته شده در این پژوهش و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های بارش توسط آن، می‌تواند برای ساخت مدل‌های فیزیکی آزمایشگاهی، مورد استفاده دیگر پژوهشگران قرار گیرد. یکی از مزایای اصلی این دستگاه بارش، تکرارپذیری ساخت لایه‌های ماسه درون جعبه مدل است که دارای دقت بسیار بالایی است.

همچنین اگر در پژوهشی تاثیر تراکم نسبی لایه‌های ماسه روی مدل فیزیکی مورد نظر باشد، این دستگاه می‌تواند با دقت بسیار بالا و با تنظیم متغیرهای تاثیرگذار در تراکم نسبی، لایه‌های ماسه را با دقت بالا در تراکم نسبی مشخص شده

پژوهش حاضر ۵ ارتفاع مختلف ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر به فاصله ۱۰ سانتی‌متر آزمایش شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده آن است که با افزایش ارتفاع و در نتیجه افزایش انرژی دانه‌ها در هنگام برخورد با سطح خاک، تراکم نسبی لایه‌ها افزایش می‌یابد (شکل ۷). این نتیجه با نتایج پژوهش صورت پذیرفته توسط رامیار و همکاران [2] هماهنگ است.

همچنین با بررسی نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که در ضخامت پرده ۲ میلی‌متر و در سرعت‌های بالا، افزایش ارتفاع پس از ۴۰ سانتی‌متر، تاثیر محسوسی در تراکم نسبی ماسه ندارد. در حالی که برای دیگر ضخامت‌های پرده بارش، تغییرات تراکم نسبی روندی مشهود دارند.

#### ۴-۲- بررسی تاثیر ضخامت پرده بارش

منظور از ضخامت پرده بارش در این پژوهش عرض شکاف طولی خروجی مخزن ماسه است که اجازه خروج ماسه از مخزن را می‌دهد. این شکاف در طول دارای ضخامتی یکسان و کمینه ضخامت آن با توجه به نوع ماسه انتخاب می‌شود. اگر ضخامت پرده از مقدار کمینه کمتر شود، ماسه از مخزن خارج نخواهد شد و در ضخامت‌های خیلی بالا، به دلیل پر شدن ناگهانی نمونه‌ها نتایج قابل قبولی به دست نمی‌آید. با توجه به دلایل ذکر شده سه ضخامت ۲، ۲/۶ و ۳ میلی‌متر برای ضخامت پرده در این پژوهش انتخاب شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در تمامی سرعت‌های حرکت پرده با کاهش ضخامت پرده بارش، تراکم نسبی ماسه افزایش قابل توجهی می‌یابد (شکل ۸).

#### ۴-۳- بررسی تاثیر سرعت حرکت پرده بارش

در روش بارش پرده‌ای، یکی از عوامل دیگر موثر بر تراکم نسبی سرعت حرکت پرده است. با افزایش سرعت حرکت پرده ضخامت لایه‌های ماسه ریخته شده در جعبه مدل کمتر شده و در نتیجه تراکم نسبی ماسه افزایش می‌یابد. در این آزمایش‌ها با توجه به این که سرعت حرکت مخزن به وسیله موتور قابل تغییر بود، سرعت‌های متفاوتی بین ۰/۴ تا ۸ سانتی‌متر بر ثانیه آزمایش شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با

بازسازی نماید.

باید توجه داشت که برای رسیدن به تراکم نسبی ذکر شده در جدول (۲)، با توجه به تعدد متغیرها، حالات دیگری نیز وجود دارد. همچنین تراکم نسبی ذکر شده در جدول در بازه‌ای با دقت ۲٪ است.

برای تسهیل پژوهش‌گرانی که می‌خواهند مدل‌های فیزیکی را توسط این دستگاه بسازند، نتایج حاصل از آزمایش‌های بارش به صورت جدول (۲) نیز ارائه شده است.

شکل ۸. تغییرات تراکم نسبی در ضخامت‌های پرده مختلف در سرعت‌های ۶ و ۲ و ۰/۴ سانتی‌متر بر ثانیه

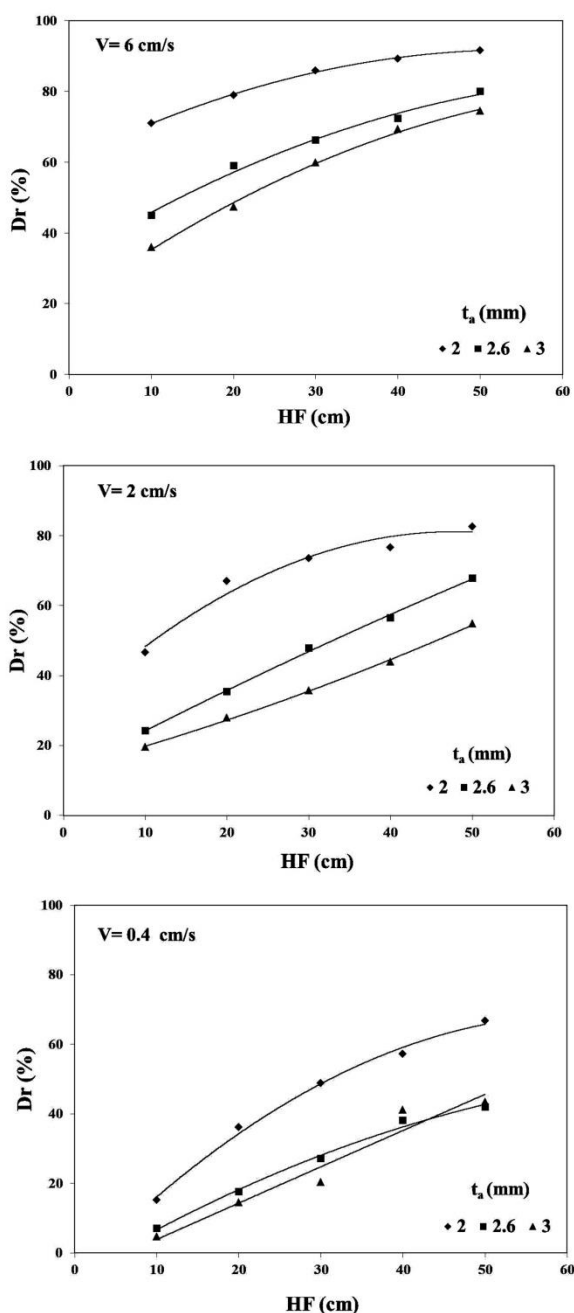


Fig. 8. Variation of Density Ratio in different Aperture Widths with Curtain Velocity of 6 - 2 - 0.4 Cm/s

شکل ۷. تغییرات تراکم نسبی در ارتفاع بارش‌های مختلف در ضخامت پرده بارش ۲ و ۲/۶ و ۳ میلی‌متر

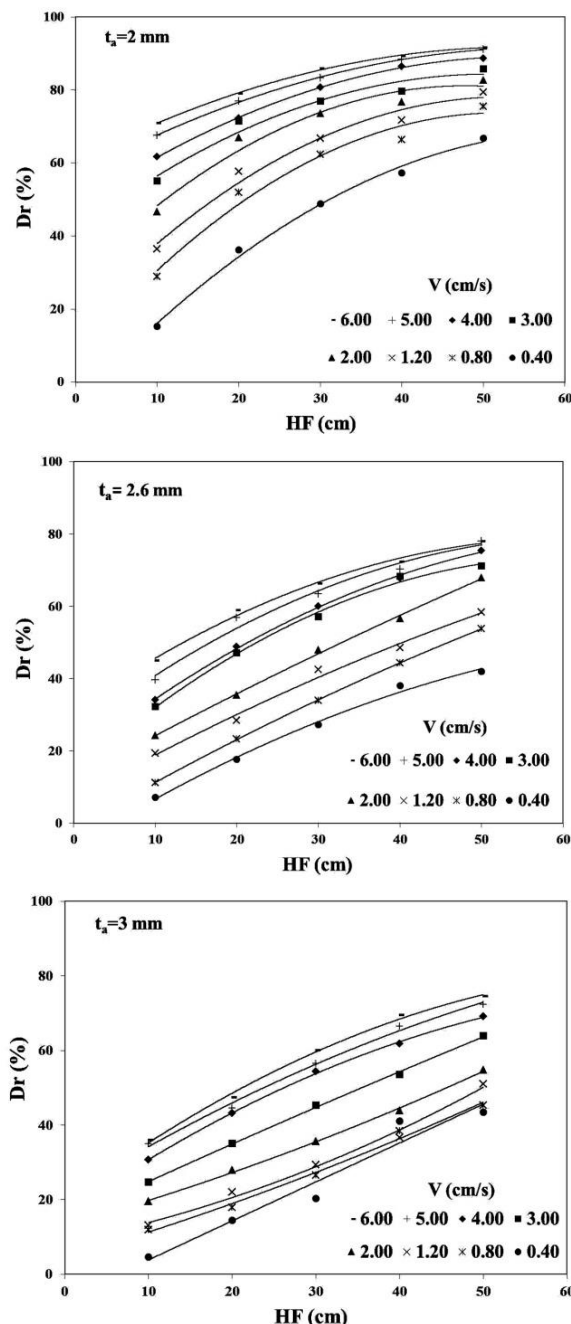


Fig. 7. Variation of Density Ratio in different Height of Falls with Aperture Width of 2 - 2.6 - 3 mm



شکل ۹. تغییرات تراکم نسبی در سرعت‌های مختلف پرده بارش در ضخامت پرده بارش ۲ و ۲/۶ و ۳ میلی‌متر

شکل ۱۰. تغییرات تراکم نسبی در شدت بارش‌های مختلف در ضخامت پرده بارش ۲ و ۲/۶ و ۳ میلی‌متر

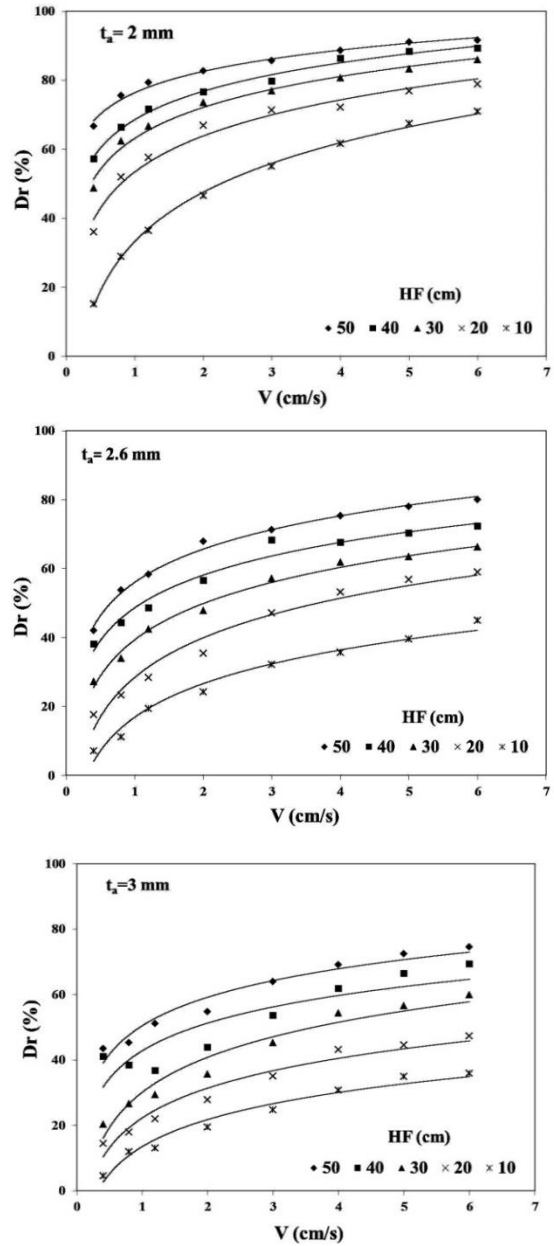


Fig. 9. Variation of Density Ratio in different Curtain Velocities with Aperture Width of 2 - 2.6 - 3 mm

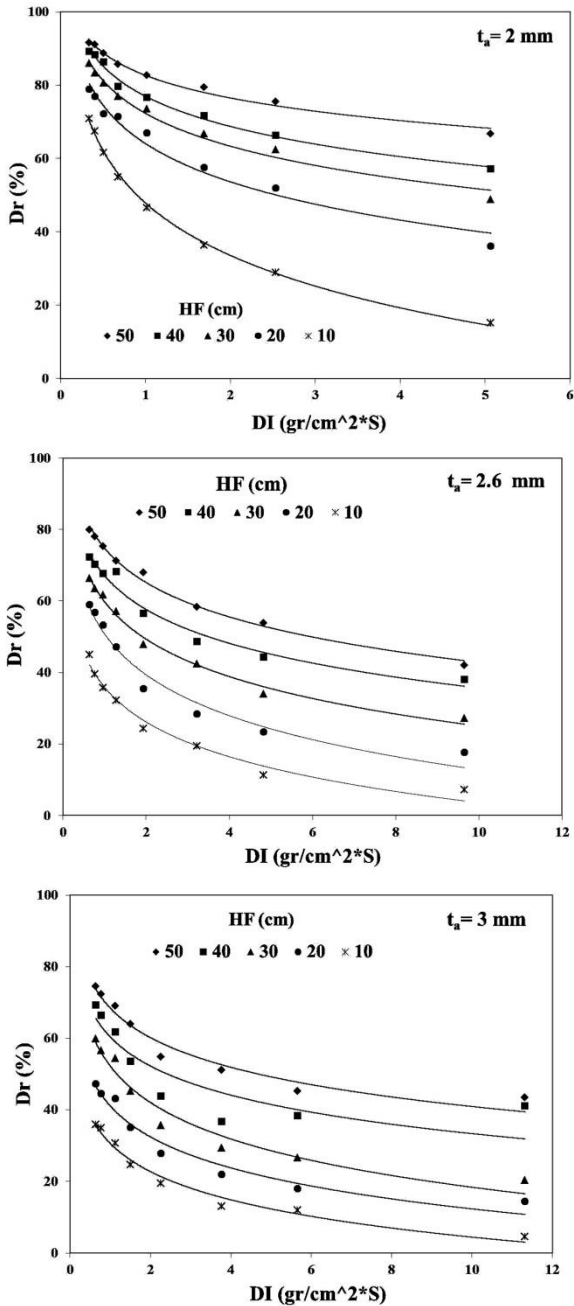


Fig. 10. Variation of Density Ratio in different Deposition Intensities with Aperture Width of 2 - 2.6 - 3 mm

جدول ۲. مشخصات لازم تنظیم دستگاه بارش برای رسیدن به تراکم نسبی تعیین شده

DR%														t <sub>a</sub> (mm)
90		70		50		30		10						
3	2.6	2	3	2.6	2	3	2.6	2	3	2.6	2	3	2.6	2
-	-	4.5	4	5	1.2	7	1.2	0.8	1	1.2	0.8	0.6	0.8	-
-	-	50	50	40	40	20	40	20	20	20	10	10	10	-

Table 2. Required adjustments on curtain pluviator for specific density ratio

## ۶- نتیجه گیری

بلافاصله پر می‌شوند و نتایج آن دارای دقت پایین‌تری است.

۸- سرعت حرکت پرده تاثیر زیادی بر تراکم نسبی ماسه دارد به صورتی که هر چه سرعت بیشتر شود، تراکم نسبی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در سرعت‌های بالاتر، لایه‌هایی با ضخامت کمتر و با سطحی یکنواخت‌تر خواهیم داشت که برای ساخت مدل فیزیکی خاکی مناسب‌تر است.

با توجه به پژوهش انجام گرفته می‌توان نتایج پژوهش را به صورت زیر بیان کرد:

۱- روش پرده‌ای بارش ماسه با دستگاه نیمه خودکار ساخته شده، روشی بسیار مناسب برای ساخت مدل‌های فیزیکی خاکی است که دلیل اصلی آن تکرارپذیری و یکنواختی بسیار بالا برای ساخت نمونه‌هاست. همچنین این روش دارای سرعت قابل قبولی در ساخت نمونه‌هاست.

۲- به این دلیل که پرده بارش در عرض نمونه‌ها یا جعبه مدل، به صورت یکنواخت عمل بارش را انجام می‌دهد یکنواختی نمونه در تمام سطح نمونه یکسان است.

۳- شدت بارش در روش بارش پرده‌ای متغیری وابسته به سرعت و ضخامت پرده بارش است.

۴- عوامل تاثیرگذار بر تراکم نسبی یک نوع ماسه در روش بارش پرده‌ای ارتفاع سقوط ماسه، ضخامت پرده بارش و سرعت حرکت پرده بارش هستند. همچنین با توجه به بند ۳ نتیجه‌گیری می‌توان گفت عوامل تاثیرگذار بر تراکم نسبی یک نوع ماسه در روش بارش پرده‌ای شدت بارش و ارتفاع بارش هستند.

۵- با افزایش ارتفاع سقوط، تراکم نسبی ماسه افزایش می‌یابد. همچنین تاثیر افزایش ارتفاع بر تراکم نسبی در ارتفاع‌های بیشتر از ۵۰ سانتیمتر در ضخامت پرده ۲ میلی‌متر و در سرعت‌های بالای پرده، ناچیز است.

۶- تراکم نسبی در روش بارش پرده‌ای وابسته به شدت بارش و ارتفاع بارش است. در تراکم‌های نسبی پایین، تغییر ارتفاع تاثیر زیادی بر تراکم نسبی دارد در حالی که در تراکم‌های نسبی بالا، تغییر شدت بارش تاثیر بیشتری بر تراکم نسبی دارد.

۷- با افزایش ضخامت پرده، تراکم نسبی کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که ضخامت پرده در محدوده‌ای مشخص قابل قبول است. حد پایین آن اندازه‌ای است که ماسه از مخزن خارج نمی‌شود و حد بالای آن اندازه‌ایست که نمونه‌ها

## References

## ۲-مراجع

- [1] MOHAMMADI, S. D. & AJALLOEIAN, R. 2014. Investigation of Desirability of Sand Pluviation Technique in order to Sample Making of Sandy Soils for Laboratory Models. *Modares Civil Engineering Journal*, 13, 53-63 (In Persian).
- [2] RAMYAR, F., YASROBI, S. S. & NAEEMIFAR, O. 2013. Investigating the Effect of Sample Preparation Method and Plastic Fines Content on the Behavior of Sands. *Modares Civil Engineering Journal*, 13, 11-25 (In Persian).
- [3] D. Lo Presti, S. Pedroni, and V. Crippa, 1992. Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study. *ASTM geotechnical testing journal*, vol. 15, no. 2, pp. 180-189.
- [4] N. Rad, and M. Tumay, 1987. FACTORS AFFECTING SAND SPECIMEN PREPARATION BY RAINING, *ASTM Geotechnical Testing Journal*, vol. 10, no. 1.
- [5] J. Kolbuszewski, 1948. An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands. pp. 158-165.
- [6] R. Lagioia, A. Sanzeni, and F. Colleselli, 2006. Air, water and vacuum pluviation of sand specimens for the triaxial apparatus, *Soils and foundations*, vol. 46, no. 1, pp. 61-67.
- [7] T. N. Dave, and S. Dasaka, 2012. Assessment of portable traveling pluviator to prepare reconstituted sand specimens. *Geomechanics and Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 79-90.
- [8] Y. Zhao, K. Gafar, M. Elshafie et al., 2006. Calibration and use of a new automatic sand pourer, *Physical modelling in Geotechnics, 6th ICPMG'06*, pp. 265-270.
- [9] A. Cresswell, M. E. Barton, and R. Brown, 1999. Determining the maximum density of sands by pluviation. *ASTM geotechnical testing journal*, vol. 22, no. 4, pp. 324-328.
- [10] S. Miura, and S. Toki, 1982. sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand, *Soils and foundations*, vol. 22, no. 1, pp. 61-77.

- [15] S.-K. Choi, M.-J. Lee, H. Choo et al., 2010. Preparation of a large size granular specimen using a rainer system with a porous plate. *ASTM geotechnical testing journal*, vol. 33, no. 1, pp. 45-54,
- [16] GADE, V. K. & DASAHA, S. 2015. Development of a mechanized traveling pluviator to prepare reconstituted uniform sand specimens. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 04015117.
- [17] KHARI, M., KASSIM, K. A. & ADNAN, A. 2014. Sand samples' preparation using mobile pluviator. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 6825-6834.
- [18] SRINIVASAN, V., SRIVASTAVA, S. & GHOSH, P. 2016. Optimization and parametrical investigation to assess the reconstitution of different types of Indian sand using portable travelling pluviator.
- [11] D. C. Lo Presti, R. Berardi, S. Pedroni *et al.*, 1993. A new traveling sand pluviator to reconstitute specimens of well-graded silty sands. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 16, pp. 18-18.
- [12] H.G. Stuit, 1995. Sand in the geotechnical centrifuge. Ph.D Thesis. TU Delft, Delft University of Technology.
- [13] Y. Vaid, and D. Negussey, 1984. Relative density of pluviated sand samples. *Soils and foundations*, vol. 24, no. 2, pp. 101-105.
- [14] Y. Vaid, and D. Negussey, 1988. Preparation of reconstituted sand specimens. *Advanced triaxial testing of soil and rock*. ASTM STP 977, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, , pp. 405-417.

# Developing a Portable Curtain Sand Pluviator for Reconstitution of Soil Models

MEHDI ZADEH MOHAMAD<sup>1</sup>, JAFAR BOLOURI BAZAZ<sup>2</sup>, SEYYED SABER HASHEMI<sup>3</sup>

1- Ph.D Student of Geotechnical Engineering, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2-Associated Professor, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- M.Sc Student of Geotechnical Engineering, Department of civil engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\*bolouri@um.ac.ir

## Abstract

Physical modeling is one of the most applicable researching methods in Geotechnical Engineering. Physical models simulate Geotechnical Engineering phenomenon in small scale to evaluate the effect of different parameters on them. In geotechnical physical modeling, reaching to a targeted specific weight ( $\gamma$ ) and Density Ratio (DR) for sand beds are important. Air pluviation is one of the most adoptable methods for preparation of uniform and repeatable sand beds of required density in physical modeling. In this method sand in a container falls from an opening bellow it through the air. With different openings, there are different types of air pluviation. It may consist of a single or multiple nozzles, single or multiple sieves or a narrow aperture that pours a sand curtain. A pluviator can be stationary or portable. Stationery pluviation is a traditional method that commonly used for preparing small samples. In this method the hopper is station and nozzle outlet is small and sand pours in a limit surface of sample, therefore uniformity of sand beds decreased. Also in the horizontal direction, stationary pluviation results in a great segregation in soils which contain fines. In a Travelling pluviator the hopper usually moves above the area of interest, in a certain pattern and the sand pours uniformly from nozzle or aperture in the sample or model box. This paper presents the details of a test series with a portable curtain rainer pluviator that has been developed for modeling the sand beds in model box in geotechnical laboratory in Ferdowsi University of Mashhad. The new portable sand pluviator has been designed and developed for preparation of sand beds in a box with large dimensions (1.8 m length, 0.4 m width, 0.8 heights). The main function of the pluviator was reproducing sand beds behind the wall in the model box. The apparatus consists of a hopper with a capacity about 20 kg which is placed on a rigid modular frame. The hopper frame is connected to a modular wheeled frame that could move back and forth longitudinally by a belt on a pair of rails. The modular frames could justify the height of sand fall during pluviation and keeps the sand fall height constant. The belt is connected to a series of gearwheels that moved by a stepping motor. The direction of motion is reversed automatically when certain steps of moving finished. The velocity of the hopper could be controlled in the range of 0.4 to 4 cm/s. The sand in the hopper exits from an aperture which is connected below the hopper and could be replaced. Different aperture widths used to change the deposition intensity. In these tests the Firoozkooh sand NO.161 used for calibration. The influence of different parameters such as Height of fall, sand flow Curtain velocity, sand curtain width and Sand deposition intensity (DI) evaluated on Relative Density (RD) of sand beds with obtaining several samples during calibration. As the results clearly shows, by increasing the velocity of container, decreasing the curtain thickness and increasing the height of fall, relative density will increase. The test results show the very good repeatability and uniformity in sand for physical models in a large domain of Relative densities (3% to 93%).

**Key words:** Air pluviation, Portable Pluviator, Curtain Rainer, Firoozkooh sand NO.161, relative density