بازسازی نمونه‌های بزرگ ماسه‌ای با روش بارش پرده‌ای ماسه

مجید کاظمی، جعفر بلوری بزاز*؛
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹۴/۰۴/۱۷ **پذیرش** ۹۵/۰۲/۱۶

چکیده

آماده‌سازی لایه‌های ماسه به‌صورت یک‌نواخت و تکرارپذیر با وزن مخصوص مورد نیاز، قطعاً پیش‌نیاز انجام آزمایش‌های قابل اعتماد بر نمونه‌های بازسازی‌شده ماسه در آزمایشگاه است. در بین روش‌های مختلف تهیه نمونه، روش بارش ماسه به‌دلیل مزیت‌های منحصربه‌فرد آن به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. در این تحقیق یک روش جدید بارش ماسه به‌نام سیستم متحرک بارش پرده‌ای برای بازسازی نمونه‌های بزرگ در پژوهش‌های آزمایشگاهی توسعه یافته است. این دستگاه یک سیستم ساده و کم‌هزینه است که عملکرد آن بر مبنای بارش ماسه در هوا بوده است و ضمن کاهش زمان تهیه نمونه، توانایی تولید نمونه‌هایی با دامنهٔ وسیعی از تراکم نسبی (۲۵٪-۹۶٪) و یک‌نواختی زیاد را دارد. به‌منظور بررسی مطلوبیت روش بارش پیشنهادی و تعیین اثر سرعت حرکت پرده، عرض پرده، ارتفاع و نرخ بارش بر تراکم نسبی و یک‌نواختی ماسه باریده شده، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد برای ماسه مصرفی در این تحقیق با افزایش سرعت حرکت پرده، مقدار تراکم نسبی نمونه افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزایش عرض پرده، کاهش مقدار تراکم نسبی نمونه را به‌دنبال دارد.

واژه‌های کلیدی: بارش متحرک پرده‌ای، بازسازی نمونه‌های بزرگ، تراکم نسبی، ماسه

مقدمه

به‌دلیل مشکلات و هزینه‌های بسیار در تهیهٔ نمونه‌های دست‌نخورده قابل قبول در خاک‌های ماسه‌ای، بازسازی نمونه به‌حالت اولیه به‌طور گسترده‌ای در بررسی‌های آزمایشگاهی

* **نویسنده مسئول** bolouri@um.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

استفاده می‌شود. آماده‌سازی لایه‌های ماسه به‌صورت یک‌نواخت و تکرارپذیر با وزن مخصوص مورد نیاز، قطعاً پیش‌نیاز انجام آزمایش‌های قابل اعتماد بر نمونه‌های بازسازی‌شده ماسه در آزمایشگاه است. زیرا روش‌های مختلف ساخت نمونه خاک[1] روی بافت و در نتیجه، روی پاسخ تنش-کرنش خاک تأثیر می‌گذارد [۱].

یک روش مناسب برای آماده‌سازی مدل زمین باید توانایی بازسازی نمونه‌های ماسه‌ای با دامنهٔ گسترده‌ای از تراکم نسبی (خیلی شل تا خیلی متراکم) را داشته باشد. هم‌چنین یک‌نواختی حفره‌ها در سرتاسر نمونه، جدانشدن ذرات و تراکم‌پذیری از شرایط لازم برای موفقیت فعالیت‌های آزمایشگاهی است [۲].

روش‌های مختلفی برای آماده‌سازی نمونه‌های ماسه‌ای در پژوهش‌های تجربی به‌کاررفته است که می‌توان به‌روش ارتعاش[2] [۳]، کوبش[3] [٤]، [٥]، بارش در هوا، آب یا خلأ[4] [٦]، [۷]، [۸]، روش تحکیم دوغاب[5] [۱۰]، روش اشباع شیمیایی[6] و روش یخ زدن[7] [۱۱] اشاره کرد.

در بین همه روش‌ها، روش بارش ماسه به‌علت توانایی منحصربه‌فرد آن در تکرارپذیری، بازسازی دامنه وسیعی از تراکم نسبی ماسه، عدم شکستگی ذرات، سهولت در اجرا، آسانی در نصب ابزار دقیق و توانایی ایجاد لایه‌های خاک با جنس متفاوت در بین محققان محبوبیت چشم‌گیری دارد [۹]، [۱۲]، [۱۳].

مرور ادبیات فنی

در چند دههٔ اخیر از روش بارش ماسه برای آماده‌سازی نمونه‌های ماسه بزرگ و کوچک در بررسی‌های مدل‌سازی فونداسیون، آزمایش‌های کالیبراسیون، مدل‌سازی به‌کمک سانتریفوژ، مدل‌سازی به‌کمک میز لرزه و آزمایش‌های سه‌محوری به‌صورت گسترده‌ای استفاده شده است [۱۲].

1. Reconstitution method
2. Vibration method (including tapping)
3. Tamping method
4. Air, Water or Vacuum Pluviation method
5. Slurry consolidation method
6. Chemical impregnation method
7. Freezing method

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

لاجیویا و همکاران[8] (۲۰۰۶) ضمن معرفی یک سیستم بارش ماسه در آب، هوا و خلأ به قطر ۷۰ میلی‌متر برای تهیهٔ نمونه آزمایش سه‌محوری بیان کردند که می‌توان با بارش در آب نمونه‌هایی با تراکم کمینه (مطابق مقدار پیشنهادی استاندارد ASTM D4254) و با بارش در خلأ نمونه‌هایی با تراکم بیشینه (بیش از ٤٠ درصد مقدار پیشنهادی استاندارد ASTM D4253) تهیه کرد [۸].

در سیستم بارش در هوا، معمولاً ماسه تحت نیروی جاذبه از قسمت تحتانی یک قیف خارج می‌شود. بر اساس نوع انتقال ماسه از قیف به سطح نمونه، سیستم بارش به سه گروه اصلی زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

بارش با الک‌های پخش‌کننده[9] که با عبور ماسه از روی یک یا چند پخش‌کننده با سطح مساوی یا بزرگ‌تر از سطح نمونه، روی کل سطح نمونه پخش می‌شود [٦]، [۱۱]، [١٤]، [۱۵].

بارش با لوله منفرد[10] که با حرکت لوله مطابق یک الگوی منظم بر کل سطح نمونهٔ بارش انجام می‌شود. بسیاری از محققان از این سیستم بارش متحرک شامل یک قیف ثابت برای تغذیه ماسه، یک لوله انعطاف‌پذیر و یک لوله صلب در دو حالت با پخش‌کننده و بدون پخش‌کننده برای بازسازی نمونه استفاده کرده‌اند [۹]، [١٦]، [۱۷]، [۱۸].

بارش پرده‌ای[11] که در این سیستم ماسه موجود در قیف از یک شکاف باریک به‌شکل لایه نازک پرده‌ای بارش می‌کند. استیوت[12] (۱۹۹۵) از این سیستم متشکل از یک قیف ثابت دارای خروجی روزنه باریک مستطیلی استفاده کرد [۱۹]. در این سیستم نمونه واقع بر یک چرخ به‌صورت خودکار در جهات افقی و قائم زیر قیف جابه‌جا می‌شود و توانایی تولید نمونه‌هایی با تراکم نسبی مختلف با تغییر در ارتفاع بارش و سرعت حرکت نمونه را دارد. از روش بارش پرده‌ای متحرک مکانیزه، برای پر نمودن نمونه‌هایی به‌ترتیب به ابعاد (۰/۸×۱/۲، ۰/٦٥×۰/٦، ۰/۷۵×۲، ۰/۷۵×۲) برای آزمایش‌های کرنش صفحه‌ای استفاده‌شده است [۲۰]، [۲۱]، [۲۲].

8. Lagioia et al.
9. Diffuser sieves rainer
10. Single nozzle rainer
11. Curtain rainer
12. Stuit

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

دو پارامتر مهم و تأثیرگذار در تراکم نسبی در سیستم بارش، ارتفاع سقوط ماسه (فاصله پایین‌ترین خروجی تا سطح خاک) و نرخ بارش ذرات (مقدار ماسه خروجی در واحد زمان) است [۱]، [۱۳]، [۱٤]. از این‌رو در استفاده از هر سیستم بارش، نیاز به تعیین روابط بین تراکم، ارتفاع و نرخ بارش است. با افزایش ارتفاع بارش مقدار تراکم نسبی افزایش می‌یابد، اما با افزایش نرخ بارش مقدار آن کاهش می‌یابد [۱۱]، [۱۷]، [۱۸]، [۲۳].

راد و تامی[۱۳] (۱۹۸۷) و چین و همکاران[۱٤] (۲۰۱۰) دستورالعملی برای تهیه سیستم بارش ماسه پیشنهاد کردند [۱۳]، [۱۸].

استفاده از اکثر سیستم‌های بارش برای آماده‌سازی نمونه‌های بزرگ با محدودیت‌هایی همراه است. به‌طور مثال استفاده از الک‌های پخش‌کننده ثابت بسیار هزینه‌بر است. هم‌چنین سیستم‌های بارش به‌کمک لوله که تاکنون معرفی شده‌اند دارای دو محدودیت اساسی بدین‌شرح است:

۱. با توجه به‌این‌که خروجی قیف ثابت است، از این رو، در هنگام آماده‌سازی نمونه‌های بزرگ در نقاط دورتر از مرکز و جداره‌ها شیب لوله انعطاف‌پذیر کم شده و جریان ماسه یک‌نواخت نیست.

۲. هنگام عبور ماسه از لوله صلب، امکان تجمع ذرات ماسه روی پخش‌کننده‌ها وجود دارد. از این رو، مساحت خروجی قیف باید طوری در نظر گرفته شود که این امر مانع از ایجاد جریان یک‌نواخت نشود. با توجه به این محدودیت، زمان آماده‌سازی نمونه‌های بزرگ به‌شدت افزایش خواهد یافت.

گید و داکاسا[۱۵] (۲۰۱۵) با اعمال تغییراتی، سیستم پیشنهادی دیو و داکاسا[۱٦] (۲۰۱۲) را مکانیزه کردند [۹]، [۱۲].

با در نظر گرفتن مزایا، معایب و کاربرد روش‌های مختلف و با استفاده از امکانات و محدودیت‌های موجود، ارائه روشی قابل اعتماد و تکرارپذیر برای بازسازی نمونه‌های بزرگ

13. Rad and Tumay
14. Chain et al.
15. Gade and Dasaka
16. Dave and Dakasa

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

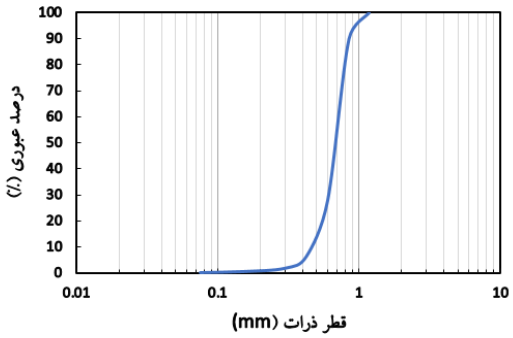
ماسه با دانسیتهٔ مشخص، با تأکید بر کاهش زمان مورد نیاز یکی از اهداف اصلی این تحقیق است. بدین‌منظور یک دستگاه متحرک بارش پرده‌ای ماسه برای پر کردن مخزنی دایره‌ای شکل بزرگ در مرکز مطالعات پیشرفته خاک و پی دانشگاه فردوسی مشهد طراحی و اجرا شد. بسیاری از تحقیقات آزمایشگاهی در زمینهٔ مهندسی مستلزم مدل کردن خاک زیر پی با تراکم‌های گوناگون در آزمایشگاه است. از این مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده می‌توان خاک را با تراکم مورد نظر در مخزن با ابعاد کوچک و بزرگ تهیه کرد. ویژگی شاخص این سیستم تهیه نمونه با هر تراکمی قابل دسترسی است. در بخش‌های بعد جزئیات این دستگاه و نیز چگونگی تهیه نمونه‌های ماسه با تراکم‌های گوناگون آورده شده است.

نوع خاک مصرفی

در پژوهش حاضر از ماسه فیروزکوه به‌رنگ سفید مایل به زرد استفاده شده است. این ماسه به نرخ فراوان برای استفاده‌های صنعتی تولید می‌شود و می‌توان تا حدود زیادی بر استمرار تولید آن اعتماد کرد. بر اساس نمودار دانه‌بندی (شکل ۱)، مقادیر C_u و C_c به‌ترتیب برابر با ۱/۵۸ و ۱/۱۳ است که خاک را در رده SP از رده‌بندی یونیفاید قرار می‌دهد. سایر مشخصات فیزیکی این ماسه در جدول ۱ ارائه شده است. رفتار و خواص خاک در طول یک‌لایه یا در عمق‌های مختلف با توجه به بسیاری از عوامل غیرقابل‌کنترل مانند تاریخچه تنش‌های اعمالی، نوسانات سطح آب زیرزمینی، فرآیندهای شیمیایی، گذر زمان و ... به‌طورکلی متفاوت است. با توجه به این پیچیدگی در رفتار خاک، در بسیاری از پژوهش‌های آزمایشگاهی و به‌منظور تمرکز پژوهش‌ها بر رفتار مدل از ماسه با دانه‌بندی یک‌نواخت استفاده می‌شود.

استفاده از ماسه با دانه‌بندی یک‌نواخت، امکان جداشدگی ذرات در حین فرآیند آماده‌سازی نمونه را به حداقل می‌رساند. علاوه بر این ماسه قبل از استفاده به‌خوبی پردازش‌شده و رفتار آن در زمان آزمایش کنترل می‌شود [۱۲].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی مصالح مصرفی

جدول ۱. مشخصات مهندسی ماسه استفاده شده

G_s	C_u	C_c	D_{10}(mm)	D_{50}(mm)	e_{max}*	e_{min}**
۲/۷۱	۱/۵۸	۱/۱۳	۰/٤٥	۰/٦٧	۱/۰۸۵	۰/٦۹

* روش محاسبه تخلخل بیشینه مطابق استاندارد ASTM D4254 است.

** روش محاسبه تخلخل کمینه مطابق استاندارد ASTM D4253 است.

دستگاه بارش ماسه

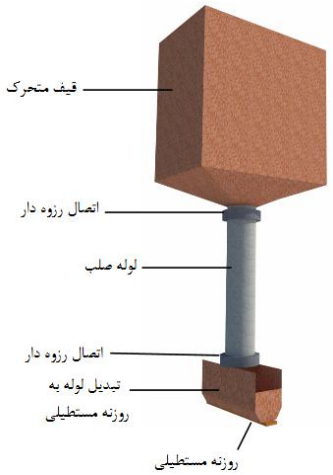
به‌منظور بازسازی نمونه‌های ماسه با دامنهٔ وسیعی از تراکم نسبی و یک‌نواختی زیاد و با تأکید بر کاهش زمان تهیهٔ نمونه، این تحقیق یک مدل ترکیبی از سیستم بارش متحرک و سیستم پرده‌ای را ارائه کرده است. این سیستم شامل مخزن، قیف ساکن، قیف متحرک، لوله انعطاف‌پذیر، لوله صلب و تبدیل لوله به روزنه مستطیلی است. جزئیات این سیستم در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است.

با توجه به این‌که هدف این تحقیق ایجاد نمونه‌های با ابعاد بزرگ است، از این رو، فرآیند پر و خالی کردن مخزن (قطر ۱/٤ متر و ارتفاع ۰/۹ متر) بسیار زمان‌بر است. بدین‌منظور سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده است که بتوان پس از آماده‌سازی نمونه و انجام آزمایش‌های مربوط، به‌کمک جرثقیل مخزن ماسه را درون یک قیف ساکن در ارتفاع ۲/٤ متری تخلیه کرد. ظرفیت قیف ساکن (به ابعاد ۱/۱×۱/۱×۱/۱ متر) بیش‌تر از خاک مورد نیاز برای پر کردن مخزن در حالت متراکم است. شایان ذکر است به‌علت این‌که جابه‌جایی نمونه‌های بزرگ پس از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

آماده‌سازی مشکل است، از این رو، بهتر است آماده‌سازی در محل اصلی آزمایش انجام شود که این موضوع محدودیت‌هایی را برای هر سیستم بارش به‌وجود می‌آورد. طی فرآیند بارش، ماسه تحت نیروی جاذبه و از یک لوله انعطاف‌پذیر به قیف متحرک منتقل می‌شود. قیف متحرک با قابلیت نگه‌داری حدود ۳۰ کیلوگرم ماسه، توانایی حرکت روی کل سطح مخزن را دارا است و وظیفهٔ آن تأمین جریان یک‌نواخت ماسه به‌خصوص در نقاط دورتر از مرکز و جداره‌ها است.

شکل ۲. نمای کلی از قیف اصلی و مخزن

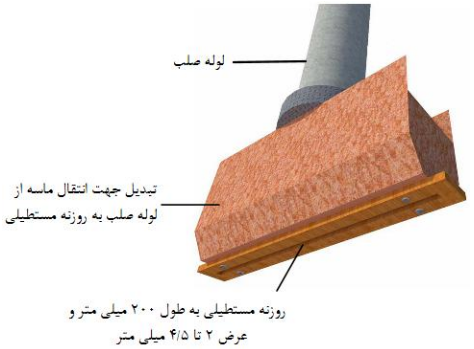


شکل ۳. سیستم انتقال ماسه از قیف متحرک تا روزنه مستطیلی

مجموعه‌ای از صفحات با روزنه مستطیلی به‌طول ۲۰۰ میلی‌متر و عرض ۲ تا ٤/٥ میلی‌متر در انتهای سیستم و با هدف کنترل نرخ بارش طراحی شده است. با توجه به دایره‌ای بودن مخزن، استفاده از خروجی‌هایی با طول بیش از ۲۰۰ میلی‌متر در جداره‌ها مشکل‌ساز است. هم‌چنین از یک تبدیل برای عبور ماسه از لوله صلب به‌روزنه خروجی و سقوط پیوسته و مساوی روی کل سطح روزنه استفاده شده است. مشخصات روزنه و تبدیل آن در شکل ٤

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

ارائه شده است. این تبدیل به‌گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت ذخیره ماسه و ایجاد جریان یک‌نواخت در روزنه مستطیلی را دارد.



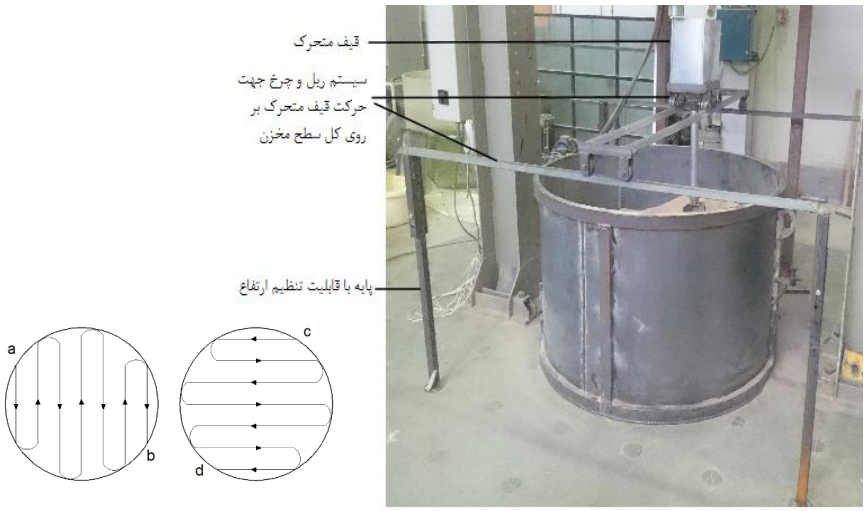
شکل ٤. تبدیل جهت انتقال ماسه از لوله صلب به روزنه مستطیلی

با توجه به دایره‌ای شکل بودن مخزن، و به‌منظور حرکت آسان قیف متحرک بر تمامی سطح آن ، ریل‌ها و چرخ‌هایی ویژه تعبیه شده است. ماسه از طریق لوله صلب و با حرکت در یک مسیر مشخص به درون مخزن منتقل می‌شود. می‌توان الگوهای ریزش متفاوتی برای حرکت قیف متحرک ارائه کرد که قطعاً این الگوها تأثیر بسیار مهمی در یک‌نواختی تراکم نمونه دارند. با توجه به محدودیت‌های ذاتی خاک، امکانات اجرایی، شرایط آزمایش، هندسه نمونه و... انتخاب الگویی مناسب برای ایجاد نمونه‌ای با تراکم یک‌نواخت در سرتاسر سطح و عمق مخزن بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق برای تهیه نمونه از الگوی مارپیچ مطابق شکل ۵ استفاده شده است. ضخامت هر لایه نیز باید طوری انتخاب شود که در هر بار عبور روزنه مستطیلی، کناره‌های لایه ایجاد شده دچار لغزش نشود و تراکم آن تحت تأثیر قرار نگیرد. در الگوی مارپیچ هر دوره شامل حرکت از نقطه a به b و در ادامه از نقطه c به d است؛ بنابراین روزنه در هر دوره دو بار از سطح کل مخزن عبور می‌کند. انتخاب دو مسیر عمود بر هم حرکت پرده از یک لایه به لایه دیگر باعث تولید نمونه با کیفیت بالاتر نسبت به مسیر حرکت هم‌جهت در دو لایه متوالی است [١٦].

برای ثابت نگه‌داشتن ارتفاع بارش در طول فرآیند آماده‌سازی و با توجه به محدودیت‌های ناشی از وجود سیستم جک و اجزا آن، دو روش زیر به‌صورت ترکیبی به‌کار گرفته شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

روش اول از لوله‌های صلب به قطر ٦٠ میلی‌متر و با طول‌های متفاوت با فواصل ١٠٠ میلی‌متر استفاده شده که پس از بارش در هر دوره، این لوله صلب با لوله‌ای کوتاه‌تر جای‌گزین می‌گردد. روش دوم استفاده از قابلیت تنظیم ارتفاع پایه‌های نگه‌دارنده سیستم ریل و چرخ است که به مقدار ٢٠٠ میلی‌متر و با فواصل ٥٠ میلی‌متر در راستای قائم جابه‌جا می‌شود.



ب الف

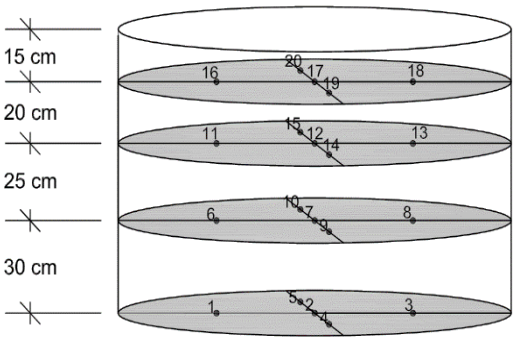
شکل ٥. الف) نمایی از سیستم هدایت قیف بر کل سطح مخزن ب) مسیر حرکت

برنامه آزمایش‌ها

به‌منظور بررسی مطلوبیت روش بارش پیشنهادی در این پژوهش و تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر وزن مخصوص و تراکم نسبی ماسه باریده شده، آزمایش‌ها در ارتفاع و شدت بارش متفاوت انجام شده است. برای تعیین تراکم ماسه باریده شده از تعداد ٢٠ ظرف نمونه‌برداری هم‌اندازه و هم‌شکل هر یک با حجم حدود ٦٠٠ سانتی‌متر مکعب استفاده شده است که محل قرارگیری و شماره آن‌ها در نمونه اصلی در شکل ٦ نمایش داده شده است. در هر لایه یک ظرف در مرکز نمونه و چهار ظرف به فواصل مساوی بین مرکز و جداره قرار گرفته‌اند. هم‌چنین با توجه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

به‌اهمیت کنترل تراکم در لایه‌های فوقانی، فاصلهٔ عمودی ظروف با افزایش عمق بیش‌تر شده است.



شکل ٦. مکان‌های نمونه‌برداری برای تعیین تراکم محلی

آزمایش‌های این پژوهش در چهار بخش بررسی و ارزیابی شده است:

بخش اول: تعیین اثر شدت بارش[17] بر تراکم نسبی نمونه

بخش دوم: تعیین دامنهٔ نرخ بارش سیستم پیشنهادی

بخش سوم: اثر ارتفاع ونرخ بارش بر تراکم نسبی نمونه‌های ماسه

بخش چهارم: یک‌نواختی نمونه به‌وسیلهٔ بررسی تغییرات تراکم موضعی در تمام حجم نمونه

آزمایش‌های بخش اول و سوم صرفاً در لایه تحتانی و بخش چهارم در کل نمونه انجام شده و برای تعیین تراکم از ظروف نمونه‌برداری مطابق جانمایی شکل ٦ استفاده شده است.

نتایج و تحلیل

بخش اول: تعیین اثر شدت بارش بر تراکم نسبی

برای سیستم استفاده شده در این تحقیق، شدت بارش توسط دو پارامتر کنترل شده است:

۱. سرعت حرکت پرده (V)

۲. عرض پرده (W)

برای بررسی تأثیر V وW بر تراکم نسبی، باید بررسی پارامتریک انجام شود. سرعت حرکت پرده به‌وسیلهٔ ضخامت لایه کنترل می‌شود. بدین‌ترتیب که با هر بار عبور روزنه

17. Deposition Intensity

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

مستطیلی از روی سطح کل نمونه (مسیر a تا b در شکل ۵)، در سری اول آزمایش‌ها ضخامت لایهٔ ۲/۵ سانتی‌متر و در سری دوم آزمایش‌ها ضخامت لایهٔ ۵ سانتی‌متر بود. به‌عبارت‌دیگر به‌منظور ایجاد یک لایهٔ ۱۰ سانتی‌متری باید روزنه مستطیلی در سری اول دو دورهٔ کامل و در سری دوم یک دورهٔ کامل سطح نمونه را طی کند.

در این بخش از روزنه مستطیلی به عرض‌های ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ٤ و ٤/۵ میلی‌متر استفاده شده است. هم‌چنین ارتفاع بارش بررسی شده ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ٤۰ و ۵۰ سانتی‌متر است. ارتفاع بارش فاصلهٔ پایین‌ترین قسمت تبدیل لوله به پرده تا سطح فوقانی لایه ماسه باریده شده است. این ارتفاع چنان‌که قبلاً توضیح داده شد در طول فرآیند بارش، با تعویض لوله‌های صلب و استفاده از قابلیت تنظیم ارتفاع پایه‌ها ثابت باقی می‌ماند.

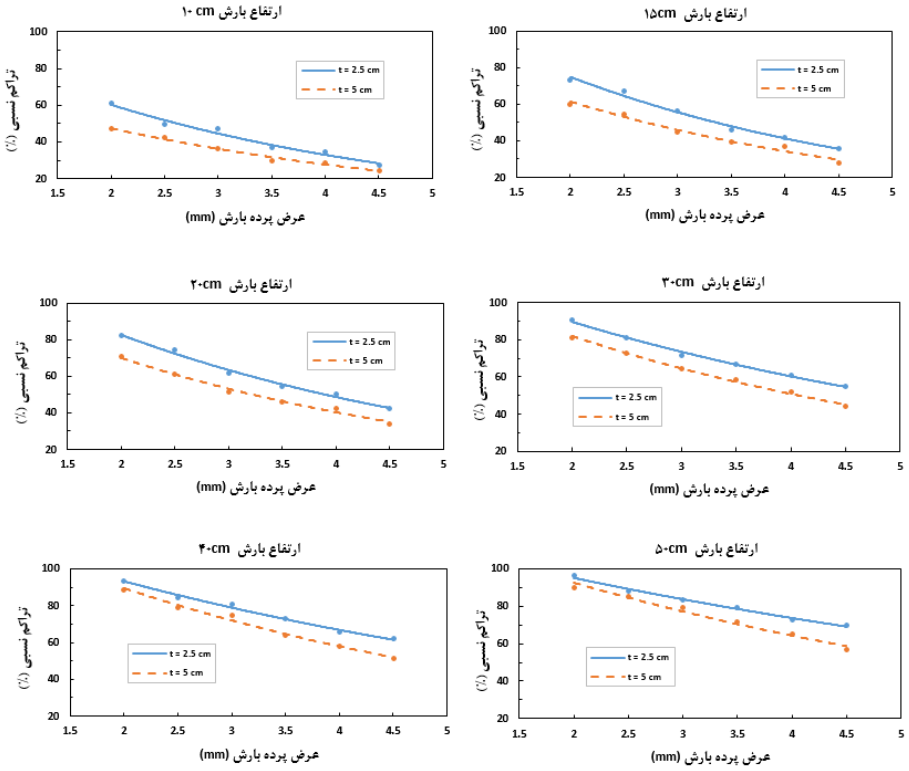
اثر ضخامت لایه ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر و عرض پرده بارش بر تراکم نسبی در ارتفاع بارش ثابت در شکل ۷ نمایش داده شده است. به‌طورکلی می‌توان بیان کرد در ارتفاع بارش کم، در عرض‌های پرده کوچک‌تر اثر ضخامت لایه یا همان سرعت حرکت پرده بر تراکم نسبی بیش‌تر است، اما با افزایش ارتفاع بارش در عرض‌های پرده بزرگ‌تر اثر ضخامت لایه بر تراکم نسبی بیش‌تر می‌شود.

هم‌چنین با دقت در شکل ۷ به‌روشنی می‌توان دریافت در یک ارتفاع بارش ثابت با افزایش نرخ بارش یا همان افزایش عرض پرده، تراکم نسبی کاهش می‌یابد و این موضوع مستقل از ضخامت لایه است و به‌عنوان یک قاعده کلی می‌توان مطرح کرد. ممکن است این موضوع به دلیل این باشد که با افزایش نرخ بارش، فرصت کافی برای خروج هوا از بین ذرات در حال سقوط وجود نداشته باشد و باعث کاهش تراکم نسبی گردد.

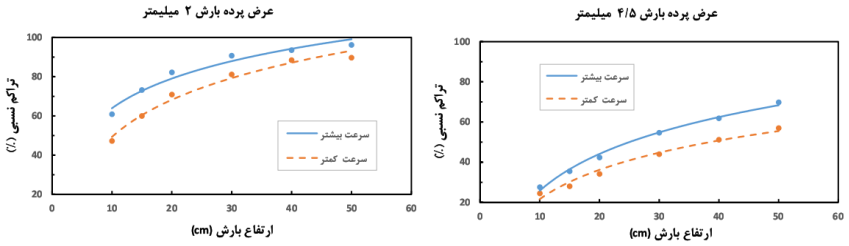
اثر سرعت حرکت پرده و ارتفاع بارش بر تراکم نسبی در عرض پرده ثابت و در دو حالت عرض پرده ۲ و ٤/۵ میلی‌متر در شکل ۸ رسم شده است. بدیهی است در یک عرض پرده ثابت، سرعت حرکت پرده با هر بار عبور از روی نمونه برای ایجاد لایه‌ای به ضخامت ۲/۵ سانتی‌متر بیش‌تر از سرعت لازم برای ایجاد لایه‌ای به ضخامت ۵ سانتی‌متر است. از این رو، در هر ارتفاع بارش با افزایش سرعت حرکت پرده می‌توان به تراکم بیش‌تری دست‌یافت. این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

مهم در پژوهش لو پرستی و همکاران[18] (۱۹۹۳) و استیوت[19] (۱۹۹۵) نیز اثبات شده است [۷]، [۱۹].



شکل ۷. اثر ضخامت لایه و عرض پرده بارش بر تراکم نسبی در ارتفاع ثابت

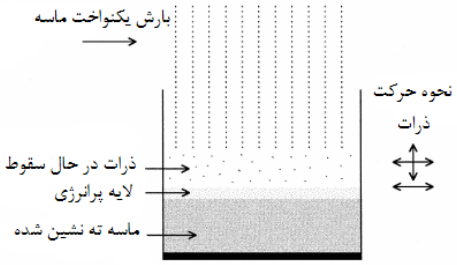


شکل۸. اثر سرعت حرکت پرده و ارتفاع بارش بر تراکم نسبی در عرض پرده ثابت

18. Lo Presti et al.
19. Stuit

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

دلیل افزایش تراکم نمونه با افزایش سرعت حرکت پرده را می‌توان با توجه به شکل ۹ و مکانیزم تراکم در فرآیند بارش بیان کرد. تراکم ذرات در لایه‌ای بسیار نازک به ضخامت ۳ تا ٤ ذره به‌نام لایهٔ پرانرژی[20] شکل می‌گیرد که هر چه در فرآیند بارش فرصت کافی برای شکل‌گیری این لایه وجود داشته باشد، آن‌گاه تراکم بیش‌تری به‌دست می‌آید. البته این زمان یک مقدار بهینه یا بیشینه دارد و با افزایش زمان بارش از مقدار بهینه، مقدار تراکم حداکثر به دست نمی‌آید. از این رو، با افزایش سرعت حرکت پرده فرصت کافی برای ایجاد لایه پرانرژی فراهم می‌گردد و طبیعتاً تراکم بالاتری را به‌همراه دارد.



شکل ۹. مکانیزم تراکم در فرآیند بارش [١٤]

با توجه به یافته‌های فوق کاملاً واضح است که بین تراکم نسبی به‌دست آمده در سیستم بارش پیشنهادی با شدت بارش رابطه عکس وجود دارد.

بخش دوم: تعیین دامنه نرخ بارش

با توجه به این‌که یکی از مهم‌ترین اهداف این پژوهش کاهش زمان تهیه نمونه است، از این رو، تعیین دامنهٔ نرخ بارش و مقایسه آن با سایر روش‌ها بسیار حائز اهمیت است. نرخ بارش عبارت از جرم ماسه باریده شده در واحد زمان است و با اندازه‌گیری جرم ماسه باریده شده به‌مدت یک دقیقه در یک ظرف نمونه‌برداری به حجم ۱۰۰۰۰ سانتی‌متر مکعب برای هر یک از روزنه‌های خروجی به‌دست می‌آید.

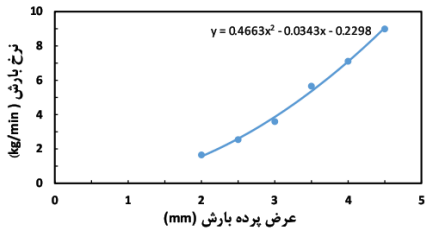
نرخ بارش ماسه در روش پیشنهادی برای عرض‌های متفاوت روزنه مستطیلی بین ۱/٦٥ و ۸/۹۹ کیلوگرم بر دقیقه متغیر است. نتایج نشان می‌دهد که یک رابطهٔ غیرخطی و درجهٔ دوم

20. Energetic Layer

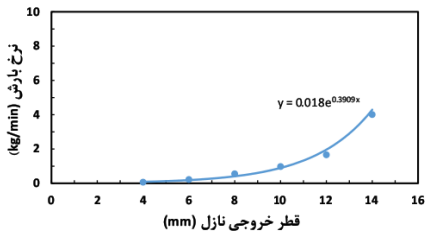
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

بین نرخ بارش و عرض پرده (W)، وجود دارد (شکل ۱۰). برای مقایسهٔ زمان تهیه نمونه در این روش با سایر سیستم‌های بارش و با توجه به استفاده گسترده از روش بارش به‌وسیلهٔ لوله تک [۹]، [۱٦]، اثر قطر خروجی لوله تک بر نرخ بارش در ماسه مصرفی در این تحقیق در شکل ۱۱ رسم شده است.

با دقت در دو شکل ۱۰ و ۱۱ می‌توان به مقادیر قابل قبول نرخ بارش در روش پیشنهادی و کاهش زمان در تهیه نمونه نسبت به‌روش بارش به‌وسیله لوله تک پی برد که این مسئله در تهیه نمونه‌های بزرگ حائز اهمیت است. در این پژوهش زمان لازم برای تهیهٔ نمونه کامل با تراکم بین ۵۰ تا ۷۰ درصد حدود ٤ ساعت به‌طول انجامید.



شکل ۱۰. اثر عرض پرده بارش (W) بر نرخ بارش



شکل ۱۱. اثر قطر خروجی نازل بر نرخ بارش

بخش سوم: بررسی تأثیر ارتفاع و نرخ بارش بر تراکم نسبی

هنگام استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، کالیبره شدن دستگاه نمونه‌ساز برای تولید دقیق نمونه‌هایی با شرایط دلخواه و دانسیتهٔ نسبی، اهمیت دارد [٦]. در این بخش با توجه به داده‌های آزمایش‌های بخش اول، اثر ارتفاع و نرخ بارش بر تراکم نسبی در دو حالت لایه‌هایی به ضخامت ۲/۵ و ۵ سانتی‌متر بررسی و نمودارهای کالیبره سیستم پیشنهادی در دو شکل ۱۲ و ۱۳ رسم شده است. چنان‌که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود بین ارتفاع بارش و تراکم نسبی رابطهٔ مستقیم وجود دارد. این سیستم توانایی تهیه نمونه‌هایی با تراکم نسبی در حالت لایه ۲/۵ سانتی‌متری بین ۲۹٪ تا ۹٦٪ و در حالت لایه ۵ سانتی‌متری بین ۲۵٪ تا ۹۰٪ را دارد.

سرعت ذرات ماسه در هنگام سقوط (همان انرژی جنبشی ذرات) تابعی از ارتفاع بارش بوده و با افزایش ارتفاع بارش تا زمان رسیدن به‌سرعت نهایی به‌صورت غیرخطی افزایش

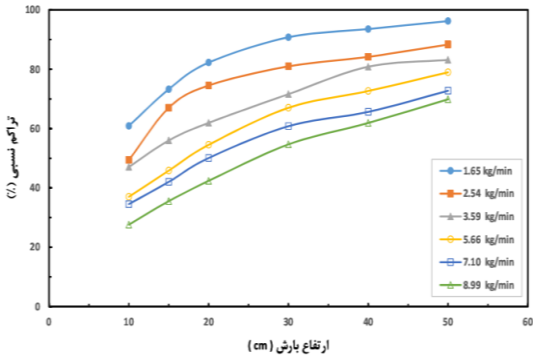
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

می‌یابد. افزایش ارتفاع به بیش از ارتفاع نهایی (متناظر با سرعت نهایی) تأثیری بر تراکم نسبی ندارد [۲۳]. با توجه به شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود در هیچ‌کدام از حالت‌های آزمایش شده، ذرات ماسه در حال بارش به‌سرعت نهایی خود نمی‌رسند و با افزایش ارتفاع بارش به بیش از ۵۰ سانتی‌متر، امکان افزایش تراکم نسبی وجود دارد؛ یعنی ارتفاع نهایی بارش در این تحقیق بیش از ۵۰ سانتی‌متر است.

هم‌چنین با افزایش نرخ بارش در یک ارتفاع مشخص، تراکم نسبی کاهش یافته است. نرخ بارش بیش‌تر باعث به‌وجود آمدن اثرات اندرکنشی ذرات می‌شود که این امر مانع از ایجاد چیدمان پایدار ذرات می‌شود. هم‌چنین نرخ بارش بیش‌تر ممکن است منجر به محبوس شدن هوا در داخل نمونه شود که با خروج احتمالی هوای پایین، انرژی جنبشی ذرات در حال سقوط کم شده و درنتیجه تراکم نسبی کاهش می‌یابد.

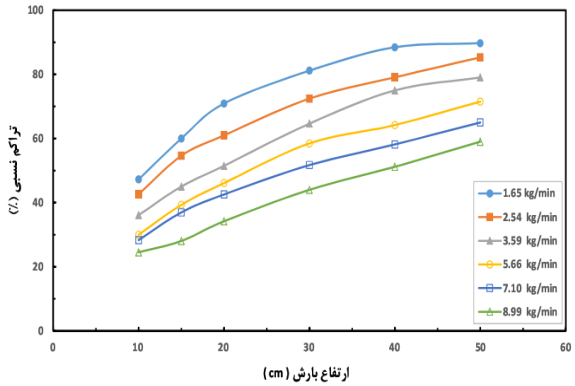
بخش چهارم: کنترل یک‌نواختی نمونه

یکی از عوامل بسیار مهم در موفقیت هر یک از روش‌های بازسازی نمونه، تولید نمونه‌ای یک‌نواخت در جهات افقی و عمودی است. تاکنون روش‌های آماری متعددی برای تفسیر درجه یک‌نواختی یک نمونه به‌کار گرفته شده است. در این بخش ضمن بیان نتایج سایر بررسی‌ها از پارامتر انحراف معیار تراکم نسبی استفاده می‌شود.



شکل۱۲. اثر ارتفاع بارش و نرخ بارش بر تراکم نسبی در حالت لایه ۲/۵ سانتی‌متری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

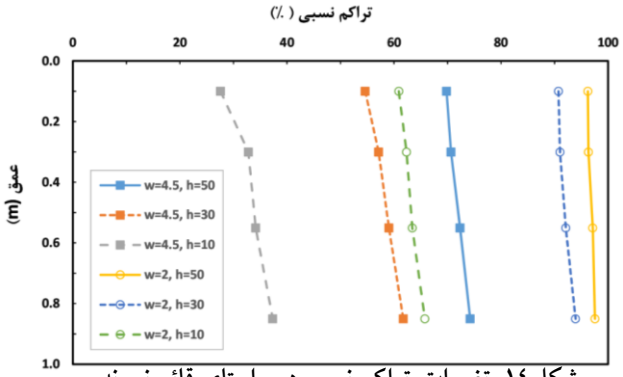


شکل۱۳. اثر ارتفاع بارش و نرخ بارش بر تراکم نسبی در حالت لایه ۵ سانتی‌متری

یکنواختی تراکم در روش پیشنهادی در ٦ حالت با روزنه‌های مستطیلی به عرض ۲ و ٤/٥ میلی‌متر و در ارتفاع‌های بارش ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر بررسی شده است. بدین ترتیب می‌توان اثر نرخ‌های بارش حداقل و حداکثر و هم‌چنین تراکم‌های نسبی بیشینه، متوسط و کمینه بر یک‌نواختی را با یک‌دیگر مقایسه کرد. برای تعیین تراکم محلی ابتدا با قرار دادن ۵ ظرف در کف مخزن مطابق جانمایی شکل ٦، بارش شروع و هنگامی‌که ارتفاع ماسه باریده شده به ۳۰ سانتی‌متر رسید، آن‌گاه بارش متوقف و پس از جای‌گذاری ۵ ظرف نمونه‌برداری جدید در مکان‌های تعیین شده بارش دوباره ادامه می‌یابد. این فرآیند تا زمان پر شدن کامل مخزن با ماسه و تهیه نمونه ادامه می‌یابد.

شکل ١٤ تغییرات عمودی تراکم نسبی در نمونه اصلی را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌گردد که تراکم نسبی در عمق‌های پایین‌تر نمونه بیش‌تر بوده است و با افزایش تراکم نسبی یک‌نواختی عمودی بهبود می‌یابد. این نتایج با بررسی‌های قبلی مطابقت دارد [۱۱]، [٢٤]. این غیریک‌نواختی عمودی به دلیل این است که وزن لایه‌های فوقانی به‌عنوان سربار برای لایه‌های زیرین عمل کرده است و درنتیجه باعث فشردگی لایه‌های پایین می‌شود و اثر آن در تراکم‌های نسبی کم‌تر مشهود است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]



شکل۱٤. تغییرات تراکم نسبی در راستای قائم نمونه

راد و تامی[21] (۱۹۸۷) اختلاف تراکم نسبی در راستای عمودی نمونه‌ای به ارتفاع ٤٥ سانتی‌متر را بین ۲ تا ۵ درصد بیان کردند. چوی و همکاران[22] (۲۰۱۰) در یک نمونه به ارتفاع ۱ متر، مقدار ۵ تا ۱۰ درصد اختلاف تراکم نسبی در راستای عمودی را گزارش کرده‌اند؛ اما با توجه به این‌که مقدار اختلاف بین تراکم در بالا و پایین نمونه در نمونه‌های با تراکم و ارتفاع متفاوت، معیاری برای بررسی یک‌نواختی عمودی خاک نیست، از این رو، پیشنهاد کردند که از انحراف معیار مقادیر میانگین تراکم نسبی در هر لایه استفاده شود. فاصله انحراف معیار مقادیر بین ۲ تا ۵/۵ درصد گزارش شد.

در این تحقیق نیز برای بررسی تغییرات عمودی تراکم در هر نمونه، ابتدا مقادیر میانگین تراکم ۵ ظرف در هر لایه محاسبه گشته است. سپس انحراف معیار این مقادیر میانگین برای هر نمونه محاسبه و در شکل ۱۵ نشان داده شده است. این شکل بیان‌کننده یک‌نواختی عمودی بهتر با افزایش تراکم نسبی است. هم‌چنین در یک ارتفاع بارش ثابت، با کاهش عرض پرده یک‌نواختی عمودی بهبود می‌یابد.

به‌منظور بررسی یک‌نواختی افقی نمونه، انحراف معیار تراکم نسبی ۵ ظرف نمونه‌برداری در لایه تحتانی در شکل ۱٦ رسم شده است.

بردن[23] (۱۹۹۱) مقدار انحراف معیار تراکم نسبی لایه تحتانی خاک را ۷ درصد عنوان کرد [۲۵]. ژائو و همکاران[24] (۲۰۰٦) تغییرات بین تراکم نسبی در لایه‌های افقی را ٤±٪ گزارش

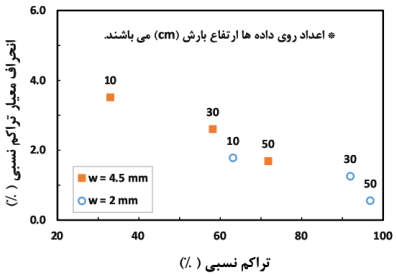
21. Rad and Tumay
22. Choi et al.
23. Borden
24. Zhao et al.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

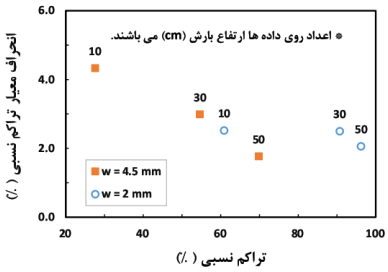
کرده‌اند [۱۷]. چوی و همکاران[۲۵] (۲۰۱۰) بیان کردند که مقدار انحراف معیار تراکم نسبی در لایه‌های افقی بین ۲ تا ۷ درصد است که به‌سرعت با افزایش تراکم کاهش می‌یابد.

نتایج بررسی لو پرستی و همکاران[۲٦] (۱۹۹۳) غیریک‌نواختی در نمونه‌هایی با تراکم نسبی شل–متوسط و تراکم شل را نشان می‌دهد. بااین‌وجود ضریب تغییرات (COV) تراکم نسبی بین ۰/۵ تا ۷ درصد گزارش شده است.

مشاهده می‌شود در این تحقیق انحراف معیار تراکم نسبی در لایه تحتانی خاک بین ۲ تا ٤ درصد است که حاکی از رضایت قابل‌قبول در یکنواختی افقی نمونه دارد.



شکل ۱۵. انحراف معیار تراکم نسبی در راستای قائم نمونه



شکل ۱٦. انحراف معیار تراکم نسبی در راستای افقی نمونه

نتیجه‌گیری

دستگاه متحرک بارش پرده‌ای ماسه، شامل اجزا انتقال‌دهنده ماسه از قیف اصلی تا نمونه است که به‌وسیله یک روزنه مستطیلی در انتهای آن نرخ بارش کنترل می‌گردد. بررسی‌های بارش و کالیبراسیون سیستم پیشنهادی برای ماسه مصرفی در این تحقیق انجام و این نتایج مهم به‌دست آمد:

۱. استفاده از سیستم پیشنهادی ساده، آسان و کم‌هزینه است و به‌راحتی برای هر نمونه با هر شکل و شرایط خاص قابل اجرا است.

۲. در ارتفاع بارش کم، در عرض‌های پرده کوچک‌تر اثر ضخامت لایه یا همان سرعت حرکت پرده بر تراکم نسبی بیش‌تر است، اما با افزایش ارتفاع بارش در عرض‌های پرده بزرگ‌تر اثر ضخامت لایه بر تراکم نسبی بیش‌تر می‌شود.

25. Choi et al.
26. Lo Presti et al.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

۳. در ارتفاع بارش ثابت با افزایش نرخ بارش یا همان افزایش عرض پرده، تراکم نسبی کاهش می‌یابد و این موضوع مستقل از ضخامت لایه است و به‌عنوان یک قاعدهٔ کلی می‌توان مطرح کرد.

٤. با ثابت ماندن ارتفاع و نرخ بارش، می‌توان با افزایش سرعت حرکت پرده به تراکم بیش‌تری دست یافت.

۵. نتایج نشان می‌دهد که رابطه‌ای غیرخطی و درجه دوم بین نرخ بارش و عرض پرده (w)، وجود دارد. هم‌چنین آماده‌سازی نمونه با روش‌های گذشته مانند سیستم بارش با لوله تک به‌دلیل محدودیت‌های ذاتی آن بسیار زمان‌بر است درحالی‌که با روش پیشنهادی می‌توان بسیار سریع‌تر نمونه را تهیه کرد که این مسئله در تهیه نمونه‌های بزرگ حائز اهمیت است.

٦. این سیستم توانایی تهیه نمونه‌هایی با دامنه وسیعی از تراکم نسبی در حالت لایه ۲/۵ سانتی‌متری بین ۲۹٪ تا ۹٦٪ و در حالت لایه ۵ سانتی‌متری بین ۲۵٪ تا ۹۰٪ را دارد.

۷. در یک نمونه تراکم نسبی در عمق‌های پایین‌تر بیش‌تر است و با افزایش تراکم نسبی یک‌نواختی عمودی بهبود می‌یابد. هم‌چنین در یک ارتفاع بارش ثابت، با کاهش عرض پرده یک‌نواختی عمودی بهبود می‌یابد.

۸. انحراف معیار تراکم نسبی در لایه تحتانی خاک بین ۲ تا ٤ درصد است. بدین‌ترتیب کارآیی و عملکرد سیستم پیشنهادی به‌دلیل تأمین درجه بسیار بالایی از یک‌نواختی تراکم نسبی در تمام قسمت‌های نمونه رضایت‌بخش است.

۹. در هیچ‌کدام از حالت‌های آزمایش شده، ذرات ماسه در حال بارش به سرعت نهایی خود نمی‌رسند و با افزایش ارتفاع بارش به بیش از ۵۰ سانتی‌متر، امکان افزایش تراکم نسبی وجود دارد.

۱۰. به‌منظور کاهش زمان و افزایش دقت تهیه نمونه، می‌توان سیستم پیشنهادی را به‌صورت مکانیزه توسعه داد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

منابع

1. Miura S., Toki S., "A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand", Soils and Foundations, Vol. 22, no. 1 (1982) 61-77.
2. Kuerbis R., Vaid Y. P., "Sand sample preparation-the slurry deposition method", Soils and Foundations, Vol. 28, no. 4 (1988) 107-118.
3. Lo Presti D. C. F., Pedroni S., Crippa, V., "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 (1992) 180-189.
4. Boushehrian J. H., Hataf N., "Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 21, no. 4 (2003) 241-256.

۵. عطارزاده ع.، قنبری ع.، حمیدی ا.، "بررسی ظرفیت باربری پی‌های سطحی مجاور شیب‌های ماسه‌ای با مدل آزمایشگاهی"، نشریG زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی، جلد ۹، شمارهٔ ۱ (۱۳۹٤).

۶. محمدی د.، اجل لوئیان ر.، "بررسی مطلوبیت روش بارش ماسه برای نمونه‌سازی خاک‌های ماسه‌ای در مدل‌های آزمایشگاهی"، نشریه عمران مدرس، دورهٔ ۱٤، شمارهٔ ٤ (۱۳۹۲).

7. Lo Presti D. C., Berardi R., Pedroni S., Crippa V. "A new traveling sand pluviator to reconstitute specimens of well-graded silty sands", Geotechnical Testing Journal, Vol.16 (1993) 18-26.
8. Lagioia R., Sanzeni A., Colleselli F., "Air, water and vacuum pluviation of sand specimens for the triaxial apparatus", Soils and foundations, Vol. 46, no. 1 (2006) 61-67.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

9. Dave T. N., Dasaka S. M., "Assessment of portable traveling pluviator to prepare reconstituted sand specimens", Geomechanics and Engineering, Vol. 4, no.2 (2012) 79-90.
10. Brandon T. L., Clough G. W., Rahardjo, P. P., "Fabrication of silty sand specimens for large and small scale tests", Geotechnical Testing Journal, Vol.14, no.1 (1991) 46-55.
11. Choi S. K., Lee M. J., Choo H., Tumay M. T., Lee W., "Preparation of a large size granular specimen using a rainer system with a porous plate", ASTM geotechnical testing journal, Vol. 33, no. 1 (2010) 45-54.
12. Gade V. K., Dasaka S. M., "Development of a Mechanized Traveling Pluviator to Prepare Reconstituted Uniform Sand Specimens", Journal of Materials in Civil Engineering (2015) 04015117.
13. Rad N. S., Tumay M. T., "Factors affecting sand specimen preparation by raining. Geotechnical Testing Journal", Vol. 10, no. 1 (1987) 31-37.
14. Cresswell A., Barton M. E., Brown R., "Determining the maximum density of sands by pluviation", ASTM geotechnical testing journal, Vol. 22, no.4 (1999) 324-328.
15. Camenen J. F., Cavarretta I., Hamlin S., Ibraim E., "Experimental and numerical assessment of a cubical sample produced by pluviation", Géotechnique Letters, Vol. 3 (2013) 44-51.
16. Fretti C., Lo Presti D. C. F., Pedroni S., "A pluvial deposition method to reconstitute well-graded sand specimens", ASTM geotechnical testing journal, Vol. 18, no.2 (1995) 292-298.
17. Zhao Y., Gafar K., Elshafie M. Z. E. B., Deeks A., Knappett J., Madabhushi S., "Calibration and use of a new automatic sand pourer", Physical modelling in Geotechnics, 6th ICPMG'06 (2006) 265-270.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]

18. Chian S. C., Stringer M. E., Madabhushi S. P. G., "Use of automatic sand pourers for loose sand models", In Proceedings of VII international conference on physical model in geotechnics (ICPMG 2010), Zurich. Taylor & Francis (2010, June) 117-121.
19. Stuit H. G., "Sand in the geotechnical centrifuge", Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology (1995).
20. Garnier J., Cottineau L. M., "La centrifugeuse du LCPC: moyens de préparation des modèles et instrumentation", In Proc. Centrifuge, Vol. 88 (1988) 83-90.
21. Portugal J. C., "Modelação física com centrifugadora", PhD Thesis, Universidade Técnica de Lisboa: Instituto Superior Técnico, Lisboa (1999).
22. Oliveira F., Freitas A., Morais P., Mendes B., Carvalho A. T., Serra J. B., "A Travelling Sand Pluviator to Reconstruct Large Soil Specimens", 15th International Conference on Experimental Mechanics (2012).
23. Vaid Y. P., Negussey D., "Relative density of pluviated sand samples", Soils and Foundations, Vol. 24, no.2 (1984) 101-105.
24. Bellotti R., Ghionna V. N., Morabito P., "Uniformity tests in calibration chamber samples by the thermal probe method", Geotechnical Testing Journal, Vol.14. no.2 (1991).
25. Borden, R. H., "Boundary displacement induced by DMT penetration", In Proceedings of the First International Symposium on Calibration Chamber Testing/ISOCCT1, An-Bin Huang, Ed., Potsdam, New York (1991) 101-118.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.6.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.277]