تأثیر روش‌های ساخت نمونه و درصد ریزدانه خمیری روی رفتار استاتیکی و سیکلیک ماسه‌های رس‌دار

امید نعیمی‌فر*؛ باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، ایران
سید شهاب‌الدین یثربی؛ دانشگاه تربیت مدرس، دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط‌زیست

تاریخ: دریافت ۹۳/۰٤/۰۲ پذیرش ۹۵/۰۹/۲۸

چکیده

تأثیر بافت اولیه و درصد ریزدانه خمیری روی رفتار ماسه‌های رسدار بررسی شده است. برای مدل‌سازی بافت اولیه نمونه در شرایط نهشته‌گذاری مختلف از چهار روش نمونه‌سازی درآزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی و سیکلیک استفاده شده است. آزمایش‌ها روی ترکیبات ماسه با صفر تا ۲۵ درصد ریزدانه که با چهار روش تراکم مرطوب، ریزش خشک، ته‌نشینی در آب و ریزش جریانی ساخته شده‌اند و تحت بارگذاری‌های استاتیکی و سیکلیک انجام شده است. نتایج نشان‌دهندهٔ آن است که روش‌های ته‌نشینی در آب و ریزش جریانی و ریزش خشک تمایل به تولید بافت‌های اتساعی دارند که حتی با افزایش درصد ریزدانه خمیری نیز هم‌چنان رفتارهای اتساعی خود را حفظ می‌کنند. در مقابل روش تراکم مرطوب تنها در حالت ماسه تمیز از خود رفتار اتساعی نشان می‌دهد و با افزایش درصد ریزدانه به سرعت به‌سمت ناپایداری و بروز رفتارهای نرم‌شوندگی کامل با کرنش می‌رود. در حالت بارگذاری سیکلیک تفاوت بین روش‌ها کم‌تر شده و با افزایش درصد ریزدانه به‌نظر می‌رسد رفتارهای مشاهده شده برای روش‌های مختلف به‌سمت یک روند یک‌سان میل می‌کنند. به‌صورت کلی با افزایش درصد ریزدانه خمیری تا حدود ۲۰ درصد ناپایداری در نمونه‌های تحت آزمایش افزایش یافته است و بعد از آن مجددا نمونه‌ها به‌سمت پایداری بیش‌تر حرکت می‌کنند. نکته قابل توجه آن است که نوع روش نمونه سازی و بافت اولیه نمونه تأثیر خاصی روی این حد آستانه نداشته است.

واژه‌های کلیدی: تراکم مرطوب، ریزش خشک، ریزش جریانی، ته نشینی در آب، سه‌محوری، درصد ریزدانه خمیری

***نویسنده مسئول** o.naeemifar@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

مقدمه

تحقیقاتی که تاکنون در مورد رفتارهای ناپایدار ماسه‌ها و عوامل مؤثر بر آن‌ها صورت گرفته است، نشان داده است که تراکم، فشار همه جانبه، درصد ریزدانه و روش نمونه‌سازی از مهم‌ترین پارامترهایی هستند که روی رفتار حالت بحرانی یا حالت پایدار ماسه‌ها تأثیرگذار هستند. تحقیقات سال‌های اخیر نشان داده است که علاوه بر ماسه‌های تمیز و ماسه‌های سیلت‌دار ماسه‌های حاوی ریزدانه خمیری نیز می‌توانند در حالت بحرانی از خود رفتار ناپایدار نشان دهند و از این رو، پلاستیسیته ریزدانه نمی‌تواند مانع از بروز رفتارهای ناپایدار در آن‌ها شود [۱]، [۲]. شواهد بسیاری از زلزله‌های اخیر نشان داده است که خاک‌هایی با PI برابر ۱۲ و یا حتی ۱۷ درصد نیز روان‌گرا شده‌اند [۳].

پارک[1] و کیم[2] در (۲۰۱۲) [٤] با انجام آزمایش‌های سیکلیک کنترل تنش روی ترکیبات ماسه با ۱۰ درصد از رس‌های مختلف با مقادیر پلاستیسیته ۸، ۱۸، ۵۰ و ۳۷۷ درصد نتیجه‌گیری کردند که هرچه پلاستیسیته رس استفاده شده در درصد ریزدانه ثابت افزایش می‌یابد، مقادیر مقاومت در مقابل روان‌گرایی کاهش می‌یابد. ضمناً با افزایش دانسیته این روند کاهشی تشدید می‌شود [٤]. گراچیو[3] در (۲۰۰۷) با انجام آزمایش‌های برش پیچشی سیکلیک روی ماسه و بنتونیت با روش ریزش خشک نتیجه‌گیری کرد که اضافه شدن ۷ درصد بنتونیت موجب تسریع در روند افزایش فشار آب حفره‌ای شده، در حالی که ادامه افزایش درصد بنتونیت به ۱۵ درصد موجب بالا رفتن مجدد مقاومت می‌شود [۵]. تحقیقات درخشندی (۲۰۰۸) نیز نشان داده است که با افزایش درصد رس کائولن به‌تدریج رفتار اتساعی نمونه محو شده و در درصد رس برابر با ۲۰ و ۳۰ درصد از ابتدا فشار آب حفره‌ای مثبت است [٦].

چنان‌که اشاره شد، علاوه بر درصد ریزدانه و پلاستیسیته، بافت اولیه نمونه نیز دارای تأثیر چشم‌گیری روی نتایج است. بافت نمونه و نحوهٔ تشکیل نهشته‌های ماسه‌ای می‌تواند به‌نحو چشم‌گیری روی رفتار مشاهده شده تأثیرگذار باشد. صدرکریمی و اولسون[4] در (۲۰۱۲) بیان

1. Park
2. Kim
3. Gratchev
4. Olson

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

کردند که بافت[1] شامل آرایش، شکل و نحوهٔ قرارگیری دانه‌ها در کنار هم است، اما ساختار[2] شامل بافت به‌اضافه نیروهای بین‌دانه‌ای مانند سیمانتاسیون، نیروهای جاذبه الکترو استاتیکی یا الکترومغناطیسی وغیره است [۷].

چانگ[3] و چونگ[4] در (۲۰۰۱) نیز بیان کردند که بافت متفاوت به‌وجود آمده بر اثر روش‌های مختلف نمونه‌سازی، می‌تواند به دو صورت تأثیرگذار باشد: در حالت اول اختلاف در جهت قرارگیری و زاویهٔ نهشته شدن دانه‌ها که در کرنش‌های زیاد هم از بین نمی‌رود و در حالت دوم اختلاف مربوط به وضعیت تماس هر دانه با دانه‌های دیگر است که با افزایش کرنش و جابه‌جایی دانه‌ها تا حد زیادی اثر آن از بین می‌رود. بنابراین هرچه دانه‌ها تیزگوشه‌تر باشند، اثر اول تقویت شده و از این رو، در کرنش‌های زیاد و حالت پایدار هم اثر بافت اولیه در رفتار نمونه مشهود است [۸].

نتایج تحقیقات هم‌چنین نشان داده است که در کرنش‌های معمول که در آزمایش‌های سه محوری به‌دست می‌آید، بحث خرابی و شکستن دانه‌ها و تغییر جهت‌یابی آن‌ها کم‌تر امکان‌پذیر می‌شود، در حالی که در کرنش‌های بسیار زیاد علاوه بر تغییر وضعیت تماس بین دانه‌ها، جهت‌یابی آن‌ها نیز تغییر کرده و از این‌رو، خطوط حالت پایدار ناشی از روش‌های مختلف نمونه‌سازی به هم نزدیک می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تأثیر بافت نمونه در کرنش‌های کوچک‌تر به وضعیت نماسی اولیه و جهت‌یابی دانه‌ها و در کرنش‌های بزرگ علاوه بر عوامل فوق به شکل دانه‌ها و خصوصیات آن‌ها نیز بستگی دارد [۷].

بر اساس سایر تحقیقات نیز نوع ریزدانه و نحوهٔ قرار گرفتن آن در میان دانه‌های ماسه نقش اساسی را در نوع رفتار ایفا می‌کند. به‌عنوان مثال زمانی که ذرات رس به‌صورت پل‌های ناپایدار در میان دانه‌های ماسه قرار می‌گیرند، خاک به‌نحو چشم‌گیری در مقابل روان‌گرایی آسیب‌پذیر است. اما زمانی که این ذرات بیش‌تر در فضای اطراف ذرات ماسه و به‌صورت یک‌نواخت قرار گیرند، ساختار به‌وجود آمده دارای مقاومت بیش‌تری در مقابل روان‌گرایی است [۵].

1. Fabric
2. Structure
3. Chung
4. Chuang

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

به‌منظور مدل‌سازی بافت نمونه در شرایط مختلف، روش‌های مختلف نمونه‌سازی توسعه یافته‌اند که هرکدام دارای مزایا و معایب خاص و هم‌چنین مطابق با نوع خاصی از روش تشکیل نهشته‌های ماسه‌ای در شرایط واقعی هستند. در ادامه خلاصه‌ای از نتایج تحقیقات مختلف که در زمینه تأثیر بافت و روشهای مختلف نمونه‌سازی انجام شده‌اند، ارائه شده است:

یامارو[1] (۲۰۰٤): روش‌های نهشته‌گذاری مرطوب نمونه‌های نسبتاً پایداری را تولید می‌کنند، در حالی که نمونه‌های ساخته شده با روش‌های نهشته‌گذاری خشک رفتارهای ناپایدارتری را نشان می دهند [۹].

پاپادیمیترو[2] و همکاران (۲۰۰۵): حالت بحرانی به‌دست آمده از روش تراکم مرطوب و نیز روش ریزش خشک یک‌سان بوده و هردو در کرنش‌های زیاد به نقاط مشابهی می‌رسند [۱۰].

مورثی[3] و همکاران (۲۰۰۷): روش ته‌نشینی دوغاب[4] به‌مراتب مقادیر مقاومت نقطه اوج کم‌تری را نسبت به‌روش تراکم مرطوب تولید می‌کند [۱۱].

یامارو و فلچر[5] (۲۰۰۸): با آزمایش‌هایی که روی نمونه‌های ساخته شده با روش‌های AP ، SD و TFD انجام دادند، نتیجه‌گیری کردند که همهٔ روش‌ها رفتار سخت‌شوندگی با کرنش از خود نشان می‌دهند، ضمن آن‌که با افزایش درصد سیلت تفاوت محسوسی در رفتار زهکشی نشده نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. هم‌چنین آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که با افزایش دانسیته تأثیر روش نمونه‌سازی کاهش می‌یابد، در حالی که افزایش ریزدانه منجر به افزایش تأثیر روش نمونه‌سازی به‌ویژه در دانسیته‌های پایین می‌شود [۱۲].

مورثی و همکاران (۲۰۱۰): روش تراکم مرطوب[6] نسبت به‌روش ته‌نشینی دوغاب به‌میزان چشم‌گیری مقادیر مقاومت بیش‌تری را در نقطه اوج نتیجه می‌دهد. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که در کرنش‌های زیاد و رسیدن به حالات بحرانی (پایدار)، مقدار مقاومت‌های موجود تا حد زیادی مستقل از نوع روش نمونه‌سازی است [۱۳].

1. Yamamuru
2. Papadimitriou
3. Murthy
4. Slurry Deposition
5. Fletcher
6. Moist Tamping

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

دالوی[1] و پتاک[2] (۲۰۱۱): با انجام آزمایش‌ها با استفاده از روش‌های مختلف نمونه‌سازی نتیجه‌گیری کردند که روش‌های ته‌نشینی آب[3]، ریزش خشک[4] و تراکم مرطوب[5] به‌ترتیب مقاومت‌های بیش‌تری را در مقابل بار وارده نشان می‌دهند [۱٤].

با توجه به تحقیقات انجام شده مشاهده می‌شود که روش نمونه‌سازی و به‌عبارت دیگر بافت اولیه نمونه تأثیر چشم‌گیری روی نتایج دارد. این مسئله به‌خصوص در مورد ماسه‌های رسدار بیش‌تر حائز اهمیت است، زیرا چسبندگی رس بسته به‌نوع روش نمونه‌سازی استفاده شده می‌تواند بافت‌های اولیه مختلفی را در ماسه ایجاد کند که این موضوع تأثیر چشم‌گیری در نتایج به‌دست آمده دارد. بر خلاف ماسه‌های سیلت‌دار، تأثیر روش نمونه‌سازی و بافت اولیه در مورد ماسه‌های رسدار چندان بررسی نشده است.

در این مقاله تلاش شده است تا با بررسی تغییرات رفتاری نمونه‌های ماسه‌رس‌دار ساخته شده با روش‌های مختلف نمونه‌سازی، ضمن بررسی تأثیر درصد ریزدانه خمیری، تأثیر بافت اولیه نمونه روی پارامترهای مختلفی مانند رفتار تنش- کرنش، خطوط حالت پایدار یا تغییرات مقاومت سیکلیک بررسی شود. برای این منظور از نتایج آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی و سه‌محوری سیکلیک استفاده شده است. هم‌چنین با تهیهٔ عکس‌های میکروسکوپی از بافت نمونه‌های آزمایش شده تلاش شده است تا نتایج به‌دست آمده با تکیه بر بافت میکروسکوپی آن‌ها تحلیل و تفسیر شوند.

مشخصات مصالح

برای مصالح ماسه‌ای این آزمایش‌ها از ماسه استاندارد سیلیسی شکسته فیروزکوه استفاده شده است که به اختصار ماسه ۱٦۱ نامیده می‌شود. این ماسه رنگ زرد متمایل به طلایی داشته و مشخصات بیش‌تر آن در جدول ۱ آمده است. ریزدانه خمیری استفاده شده، رس مصنوعی با نام تجاری **SI** است که مشخصات بیش‌تر آن در جدول ۲ آمده است. در شکل ۱ منحنی‌های دانه‌بندی مصالح مورد استفاده ارائه شده است.

1. Dalvi
2. Pathak
3. Water Sedimentation
4. Dry Deposition
5. Moist Tamping

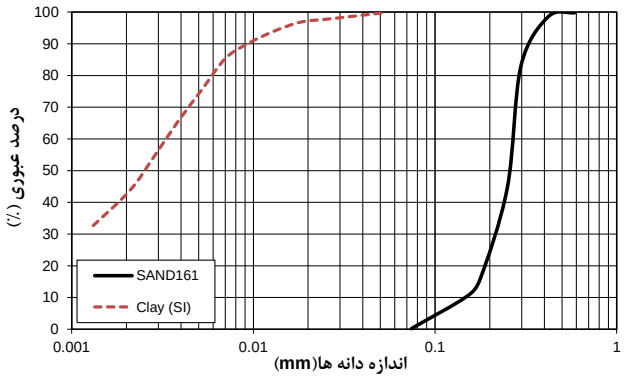
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

جدول ۱. مشخصات ماسه ۱۶۱

خصوصیات	ماسه ۱۶۱
چگالی ویژه (G_s)	۲/۶۶
نسبت تخلخل حداکثر	۰/۹۲۸
نسبت تخلخل حداقل	۰/۵۸۳
D_{50} (mm)	۰/۲۶
D_{10} (mm)	۰/۱۵

جدول ۲. مشخصات ریزدانه خمیری استفاده شده

نوع رس	حد روانی ٪	حد خمیری ٪	شاخص خمیری ٪	چگالی ویژه
رس SI	۵۰	۲۸	۲۲	۲/۵۵



شکل ۱. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح استفاده شده

روند آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام شده از نوع سه‌محوری سیکلیک کنترل تنش و نیز سه‌محوری استاتیکی بوده است. در تمامی آزمایش‌ها نمونه‌ها دارای ۵ سانتی‌متر قطر و ۱۰ سانتی‌متر طول بوده‌اند. دو فشار همه جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال در آزمایش‌های استاتیکی و سیکلیک استفاده شده‌اند.

در آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی، برش به‌صورت کنترل کرنش محوری با سرعت معادل ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. در آزمایش‌های سه‌محوری سیکلیک، بار قائم

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

به‌صورت سیکلیک و با فرکانس ۰/۱ هرتز بر نمونه وارد شده است. CSR یا نسبت تنش تناوبی استفاده شده در آزمایش‌ها متغیر است و با انجام چند آزمایش با CSR مختلف روی نمونه‌های مشابه امکان گسیختگی و ایجاد ناپایداری در نمونه در تعداد سیک‌های مختلف فراهم شده است. به‌منظور در اختیار داشتن محدودهٔ وسیعی از تراکم در نمودارها، نمونه‌ها با وزن مخصوص خشک اولیه ۱/٤، ۱/٤٥، ۱/٥ و ۱/٥٥ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شده‌اند. این وزن‌مخصوص‌ها متناظر با دانسیته ۸، ۲۷، ٤٥ و ٦۱ درصد در ماسه تمیز هستند. با توجه به خروج آب و کاهش حجم نمونه در حین تحکیم، مقدار نسبت تخلخل نهایی بعد از تحکیم با اندازه‌گیری حجم آب خروجی در حین تحکیم به دقت اندازه‌گیری شده است.

پس از ساخت نمونه، گاز دی‌اکسید کربن از آن عبور داده شده و سپس جریان آب بدون هوا از پایین به بالای نمونه برقرار شده است. در مرحلهٔ بعد، برای رسیدن به اشباع کامل پس فشار از بالا و پایین نمونه به آن اعمال شده است. به‌دلیل تأمل زیاد که در مراحل قبلی به‌کار رفت، عموماً نمونه‌ها با حداکثر پس فشاری در حدود ۸۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال به اشباع کامل می‌رسیدند. پس از اعمال پس فشار، مقدار اشباع نمونه اندازه‌گیری می‌شد. در این آزمایش‌ها رسیدن به مقدار B-Value برابر یا بزرگ‌تر از ۰/۹۷ به منزلهٔ اشباع کامل فرض شده است. در مرحلهٔ بعد پس از تحکیم نمونه با فشار مؤثر تحکیمی مورد نظر، بسته به نوع آزمایش، بارگذاری لازم روی نمونه آغاز شده و فشار آب حفره‌ای، نیروی محوری و میزان کرنش محوری نمونه با سنسورهای مربوط قرائت شده و با دیتالاگر به کامپیوتر منتقل شده است.

آزمایش‌های سه‌محوری استاتیکی تا رسیدن کرنش محوری نمونه به حالت پایدار ادامه پیدا کرده است. در آزمایش‌های سه‌محوری سیکلیک عموماً یکی از معیارهای رسیدن ضریب فشار آب حفره‌ای به یک (ru=1) و یا رسیدن کرنش‌محوری با دامنهٔ دوبل به ٥ درصد یا کرنش‌محوری با دامنهٔ تک به ۲/٥ درصد به‌عنوان معیار گسیختگی نمونه و پایان آزمایش فرض می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق عموماً معیارهای یاد شده با یک‌دیگر و در فاصله‌های کوتاه از هم اتفاق افتاده است. شایان ذکر است در نتایج این مقاله از نتایج حدود ٤۰ آزمایش سه‌محوری سیکلیک و ٥٤ آزمایش سه‌محوری استاتیکی استفاده شده است. در جدول‌های ۳ و ٤ بخشی از آزمایش‌های استاتیکی و سیکلیک انجام شده ارائه شده است. طبعاً با توجه به محدودیت صفحات ارائه جزییات همهٔ آزمایش‌ها ممکن نیست.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

جدول ۳. برنامه انجام آزمایش‌های استاتیکی با روش WT

Test No.	نام ترکیب	تراکم (gr/cm^3)	فشار همه جانبه (kPa)	درصد ریزدانه	روش نمونه‌سازی
1	1.4-100-0-WT	1,40	100	0	WT/DD
2	1.45-100-0-WT	1,45	100	0	WT/DD
3	1.45-300-0-WT	1,45	300	0	WT/DD
4	1.5-100-0-WT	1,50	100	0	WT/DD/WS/AP
5	1.5-300-0-WT	1,50	300	0	WT/DD
6	1.5-100-5-WT	1,50	100	5	WT/DD/WS
7	1.5-300-5-WT	1,50	300	5	WT/DD
8	1.55-300-5-WT	1,55	300	5	Wet Tamping
9	1.5-100-10-WT	1,50	100	10	WT/DD/WS/AP
10	1.5-300-10-WT	1,50	300	10	WT/DD
11	1.45-100-10-WT	1,45	100	10	Wet Tamping
12	1.55-300-10-WT	1,55	300	10	WT/DD
13	1.5-100-15-WT	1,50	100	15	WT/DD/WS/AP
14	1,5-300-15-WT	1,50	300	15	WT/DD
15	1.55-300-15-WT	1,55	300	15	Wet Tamping
16	1.5-100-20-WT	1,50	100	20	WT/DD/WS/AP
17	1.5-300-20-WT	1,50	300	20	WT/DD
18	1.55-300-20-WT	1,55	300	20	Wet Tamping

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

19	1.4-100-25-WT	1,40	100	25	WT/DD
20	1.5-100-25-WT	1,50	100	25	WT/DD/WS
21	1.55-300-25-WT	1,55	300	25	WT/DD

جدول ٤. برنامه انجام آزمایش‌های تناوبی با روش WT روی ماسه تمیز و ماسه دارای ۵ درصد ریزدانه

Test No.	نام ترکیب	تراکم (gr/cm^3)	فشار همه جانبه (kPa)	درصد ریزدانه	CSR	روش نمونه‌سازی
55	1,5-100-0-0,20-WT	1,50	100	0	0,20	Wet Tamping
56	1,5-100-0-0,25-WT	1,50	100	0	0,25	Wet Tamping
57	1,5-100-0-0,30-WT	1,50	100	0	0,30	Wet Tamping
58	1,45-100-0-0,20-WT	1,45	100	0	0,20	Wet Tamping
59	1,45-100-0-0,25-WT	1,45	100	0	0,25	Wet Tamping
60	1,4-100-0-0,15-WT	1,40	100	0	0,15	Wet Tamping
61	1,4-100-0-0,20-WT	1,40	100	0	0,20	Wet Tamping
62	1,55-300-0-0,20-WT	1,55	300	0	0,20	Wet Tamping
63	1,55-300-0-0,25-WT	1,55	300	0	0,25	Wet Tamping
64	1,55-300-0-0,30-WT	1,55	300	0	0,30	Wet Tamping
65	1,5-100-5-0,20-WT	1,50	100	5	0,20	Wet Tamping
66	1,5-100-5-0,15-WT	1,50	100	5	0,15	Wet Tamping

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

67	1,5-100-5-0,25-WT	1,50	100	5	0,25	Wet Tamping
68	1,45-100-5-0,15-WT	1,45	100	5	0,15	Wet Tamping
69	1,45-100-5-0,20-WT	1,45	100	5	0,20	Wet Tamping
70	1,5-300-5-0,15-WT	1,50	300	5	0,15	Wet Tamping
71	1,5-300-5-0,20-WT	1,50	300	5	0,20	Wet Tamping
72	1,55-300-5-0,20-WT	1,55	300	5	0,20	Wet Tamping
73	1,55-300-5-0,25-WT	1,55	300	5	0,25	Wet Tamping

روش نمونه‌سازی

برای ساخت نمونه از این تحقیقات از چهار روش نمونه‌سازی مختلف استفاده شده است. در ادامه خلاصه‌ای از این چهار روش ارائه شده است:

- **روش تراکم مرطوب:** که در این مقاله با نام WT[1] نشان داده می شود. در این روش ماسه و رس با حدود ۵ درصد رطوبت با هم مخلوط شده و در شش لایه به درون قالب ریخته و کوبیده می‌شود. این روش بهترین مدل شبیه‌سازی بافت خاک خاک‌ریزهای کوبیده شده (غلتکی) یا ماسه‌های مرطوبی است که به‌صورت مرطوب انباشته و متراکم شده‌اند و با بالا آمدن سطح آب اشباع شده‌اند [۱۵]. مشابه این فرآیند برای خاک‌های سست و بادرفتی کهبه‌وسیلهٔ رطوبت آب در حالت سست نهشته شده‌اند می‌تواند اتفاق بیفتد.

هرچند روش تراکم مرطوب ممکن است به‌طور کامل ساختار واقعی خاک در محل را مدل نکند، اما ایشیهارا (۱۹۹۳) و یثربی (۱۳۷٦) نشان دادند که تهیه نمونه به این روش دارای مزایای چشم‌گیری است. همگنی کامل نمونه در لایه‌های مختلف، عدم وقوع جداشدگی

1. Wet Tamping

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

دانه‌ها از هم‌دیگر، امکان ساخت نمونه بسیار سست حتی با دانسیته منفی و غیره، از جمله این مزایا هستند [۱٦]، [۱۷]، [۱۸]. در این تحقیقات مشاهده شد که روش تراکم مرطوب برای نمونه‌های تا وزن مخصوص خشک حدود ۱/٤٥ گرم بر سانتی‌متر مکعب مناسب بوده و تراکم لایه‌های بالایی تأثیری در متراکم شدن لایه‌های پایین‌تر ندارد. به‌منظور جلوگیری از تراکم بیش از حد لایه‌های پایینی برای نمونه‌هایی که دارای تراکم بیش‌تر از ۱/٤٥ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند، استفاده از روش تراکم مرطوب بر اساس اصلاحات پیشنهادی لد[1] (۱۹۷۸) مد نظر قرار گرفت.

- **روش ریزش خشک:** که در این مقاله با نام DD[2] نشان داده می‌شود و شامل ریختن مخلوط خشک ماسه و رس از یک قیف با دهانه ۱۲ میلی‌متر و با ارتفاع سقوط صفر به داخل قالب است. برای رسیدن به تراکم بیش‌تر از ضربات متقارن روی دیواره قالب می‌توان استفاده کرد. به‌نظر می‌رسد این روش بهترین روش در فرایند شبیه‌سازی رسوبگذاری طبیعی خاک با حداقل انرژی است [۹].
- **روش ته‌نشینی در آب:** که با نام اختصاری WS[3] در این مقاله نشان داده می شود و در آن مخلوط ماسه و رس از یک قیف با دهانه حدود ۳/٥ میلی‌متر به داخل آب قالب ریخته می‌شود. ریختن خاک در ٦ لایه انجام شده و قبل از ریختن هر لایه حدود یک ششم قالب از آب پر می‌شود. این روش یکی از روش‌های متعارف در ساخت نمونه است، به‌دلیل این‌که روشی مناسب در شبیه‌سازی بافت ماسه مشابه آن‌چه‌که در رودخانه طبیعی یا رسوبات هیدرولیکی مصنوعی یافت می‌شود، است [۱٥]، [۱۸].
- **روش ریزش در هوا:** که در این مقاله با نام اختصاری AP[4] نشان داده خواهد شد. ریزش ذرات ماسه تقریباً ازطریق رسوب‌گذاری طبیعی با تولید نمونه‌هایی با بافت ناهم‌سان و ساختمان خاکی شبیه به آنچه که در محیط آبرفتی طبیعی مشاهده می‌شود، انجام می‌شود. نمونه‌هایی که با این روش تهیه می‌شوند تمایل به یک‌نواختی بیش‌تری در طول ارتفاع

1. Ladd
2. Dry Deposition
3. Water Sedimentation
4. Air Pluviation

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

نمونه نسبت به دیگر روش‌ها مثل روش M.T دارند [۱۹]، [۲۰]، [۲۱]. برای ایجاد نمونهٔ یک‌نواخت در این روش نیاز است تا جریانی یک‌نواخت از خاک با نرخ ثابت و از ارتفاع سقوط ثابت به داخل قالب ریخته شود. برای ساخت نمونه با روش AP در این تحقیق از دستگاه نمونه‌ساز تمام اتوماتیک ساخته شده به‌وسیلهٔ نگارندگان استفاده گردید. به‌منظور تعیین میزان ریزش و ارتفاع سقوط مناسب نیز، از نتایج تحقیقات قبلی این نویسندگان در مورد تأثیر میزان ریزش و ارتفاع سقوط روی تراکم نمونه‌ها استفاده شده است [۲۲].

نتایج

در این بخش نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق و تحلیل آن‌ها ارائه شده است. در ابتدا نمودارهای تنش کرنش، مسیر تنش و تغییرات مقاومت حالت پایدار نمونه‌های ساخته شده با چهار روش نمونه‌سازی مختلف در درصدهای مختلف ریزدانه با هم مقایسه شده است. سپس روش‌هایی که دارای تفاوت‌های بنیادی با یک‌دیگر هستند انتخاب شده و با بررسی تغییرات خطوط حالت پایدار و نیز مقاومت سیکلیک آن‌ها تلاش شده است تا بررسی جامعی در خصوص تأثیر بافت اولیه و نیز درصد ریزدانه خمیری انجام شود. برای این منظور از عکس‌های میکروسکوپی نیز استفاده شده است.

شایان ذکر است در نمودارهای ارائه شده هر ترکیب با علامتی مانند A-B-C-D-E مشخص شده است که در آن A نشان‌گر وزن مخصوص خشک نمونه بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، B فشار همه جانبه بر حسب کیلو پاسکال، C درصد ریزدانه نمونه، D نوع روش نمونه‌سازی و E نشان‌گر CSR اعمال شده در بارگذاری است. گاهی که یکی از این پارامترها ثابت یا مشخص بوده است، از علامت نمونه حذف شده است.

۱. تأثیر روش نمونه سازی روی مشخصات رفتاری

۱-۱. آزمایش‌های انجام شده با روش‌های مختلف روی ماسه تمیز

در شکل ۲ نمودارهای تنش کرنش محوری مربوط به آزمایش‌های انجام شده روی ماسه تمیز با روش‌های مختلف نمونه‌سازی ارائه شده است. منحنی‌های ارائه شده دارای شرایط

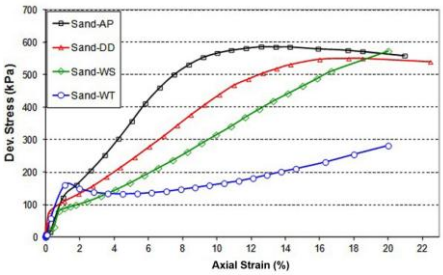
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

یک‌سان بوده و فقط نوع روش نمونه‌سازی آنها متفاوت است.

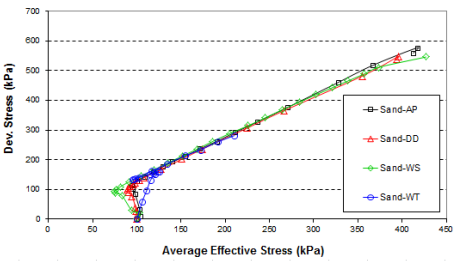
می‌توان مشاهده کرد که روش AP بیش‌ترین مقاومت را نتیجه داده است. بعد از روش AP، به‌ترتیب روش‌های DD، WS و WT مقاومت‌های بیش‌تری را نتیجه داده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که در مورد ماسه‌های فاقد ریزدانه روش AP منجر به بیش‌ترین تمایل برای تولید رفتارهای اتساعی می‌شود. به هر حال می‌توان مشاهده کرد که نمونه ساخته شده با روش WT به‌نحو محسوسی مقاومت کم‌تری دارد. این مسئله در منحنی‌های مسیر تنش (شکل ۳) نیز کاملاً مشهود است، نمونه ساخته شده با روش WT رفتار شبه‌پایدار موقتی از خود نشان می‌دهد، در حالی که نمونه‌های ساخته شده با سه روش دیگر شدیداً از خود رفتارهای اتساعی نشان می‌دهند.

۱-۲. آزمایش‌های انجام شده با روش‌های مختلف روی ترکیب ماسه و ۵ درصد رس

در شکل‌های ٤ و ۵ منحنی‌های تنش کرنش محوری و مسیر تنش آزمایش‌های انجام شده روی ترکیبات ماسه با ۵ درصد رس ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که بر خلاف حالت مربوط به ماسه تمیز، این بار بیش‌ترین مقاومت در روش نمونه‌سازی WS حاصل شده است و روش‌های DD و AP مقاومت کم‌تری دارند. نمونه ساخته شده با روش WT نیز رفتار نرم شوندگی کامل با کرنش از خود نشان داده است و دارای اختلاف چشم‌گیری با سایر روش‌های نمونه سازی است. با مقایسهٔ منحنی‌های مسیر تنش نیز به روشنی می‌توان تفاوت رفتار موجود بین روش WT و سه روش دیگر را مقایسه کرد.

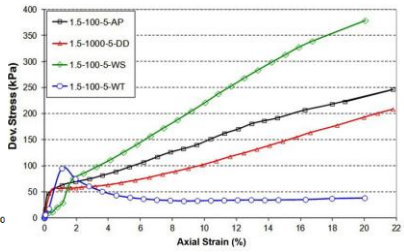


شکل ۲. نمودارهای تنش کرنش محوری ترکیبات ماسه و رس (1.5-100-0-WT;DD;WS;AP)

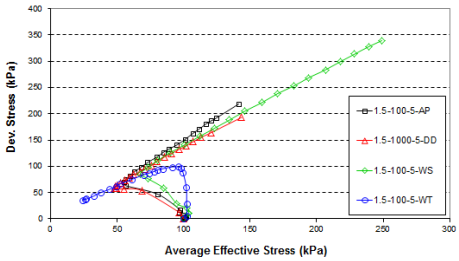


شکل ۳. نمودارهای مسیر تنش ترکیبات ماسه و رس (1.5-100-0-WT;DD;WS;AP)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]



شکل ٤. نمودارهای تنش کرنش محوری ترکیبات ماسه و رس (1.5-100-5-WT;DD;WS;AP)



شکل ٥. نمودارهای مسیر تنش ترکیبات ماسه و رس (1.5-100-5-WT;DD;WS;AP)

۱-۳. آزمایش‌های انجام شده با روش‌های مختلف روی ترکیب ماسه با ۱۰ و ۲۰ درصد رس

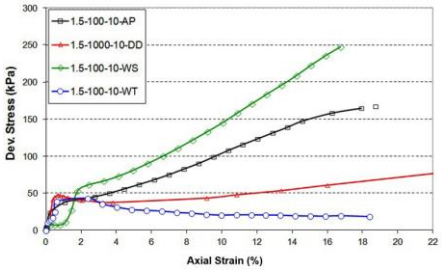
در شکل‌های ٦ و ۷ نمودارهای تنش کرنش محوری و مسیر تنش ترکیب ماسه با ۱۰ درصد رس ارائه شده است. در شکل‌های ۸ و ۹ نیز نمودارهای تنش کرنش محوری و مسیر تنش ترکیب ماسه با ۲۰ درصد رس ارائه شده است.

مجدداً مشاهده می‌شود که همان روند ترکیبات دارای ۵ درصد رس در مورد ترکیبات دارای ۱۰ و ۲۰ درصد رس نیز وجود دارد. به‌عبارت دیگر روش WS بیش‌ترین مقاومت و تمایل به رفتارهای اتساعی را نتیجه داده است، در حالی که روش WT کم‌ترین مقاومت و بیش‌ترین تمایل به ناپایداری را نشان داده است. با توجه به نتایج ارائه شده در مورد ترکیبات ماسه با درصدهای مختلف از ریزدانه می‌توان مشاهده کرد که روش WT دارای تفاوت رفتاری بنیادی با سه روش دیگر است. این روش تنها در مورد ماسه تمیز مقداری رفتار اتساعی نشان داده است و ترکیبات دارای ریزدانه آن همگی رفتارهای نرم شوندگی کامل با کرنش از خود نشان داده‌اند.

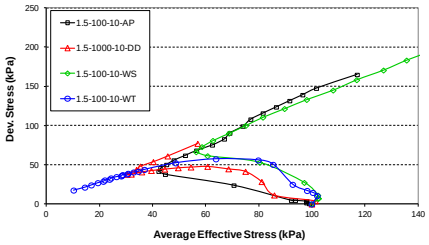
بر اساس نتایج به‌دست آمده در این بخش نوع روش نمونه‌سازی و بافت تولید شده تأثیر چشم‌گیری روی نتایج دارد. روش‌های DD، WS و AP معمولاً بافت‌هایی با تمایلات اتساعی شدید و نتایج نزدیک به یک‌دیگر تولید می‌کنند و نمونه حتی در کرنش محوری‌های زیاد نیز تمایل به افزایش مقاومت و کاهش فشار آب حفره‌ای از خود نشان می دهد. این مسئله حتی با

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

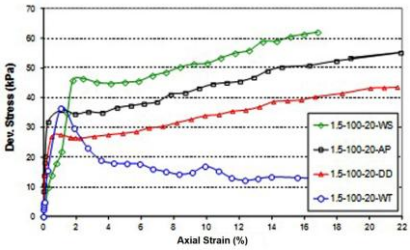
افزایش درصد رس نیز تغییر نمی‌کند، به‌طوری‌که حتی نمونه‌های دارای درصدهای مختلف از رس علی‌رغم کاهش مقاومت‌ها با افزایش ریزدانه، هم‌چنان تمایلات اتساعی خود را حفظ می‌کنند. در مقابل در روش WT نمونه ماسه تمیز دارای مقداری تمایلات اتساعی است، اما با اضافه شدن ریزدانه‌های خمیری نوع رفتار تغییر کرده و به حالت نرم‌شوندگی با کرنش تبدیل می شود.



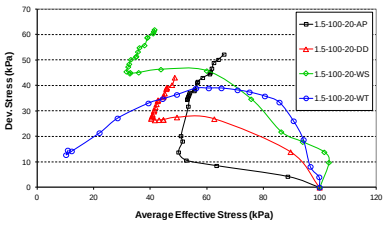
شکل ٦. نمودارهای تنش کرنش محوری ترکیبات ماسه و رس (1.5-100-10-WT;DD;WS;AP)



شکل ۷. نمودارهای مسیر تنش ترکیبات ماسه و رس (1.5-100-10-WT;DD;WS;AP)



شکل ۸. نمودارهای تنش کرنش محوری ترکیبات ماسه و رس (1.5-100-20-WT;DD;WS;AP)



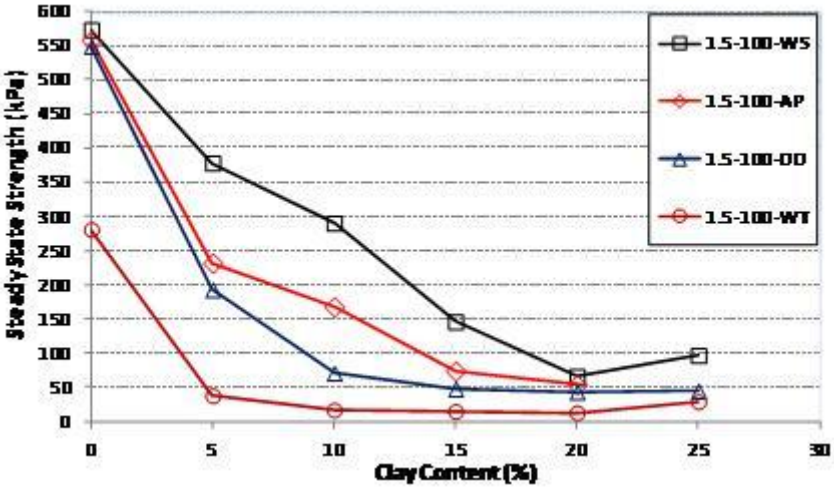
شکل ۹. نمودارهای مسیر تنش ترکیبات ماسه و رس (1.5-100-20-WT;DD;WS;AP)

۲. تغییرات مقاومت حالت پایدار

در این بخش به‌منظور بررسی بهتر تأثیر روش نمونه‌سازی و هم‌چنین بررسی تأثیر درصد ریزدانه خمیری روی نتایج به‌دست‌آمده، تغییرات مقاومت حالت پایدار در مقابل افزایش درصد ریزدانه برای روش‌های مختلف نمونه‌سازی بررسی شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

در شکل ۱۰ تغییرات مقاومت حالت پایدار در مقابل درصد رس برای چهار روش نمونه‌سازی مورد استفاده رسم شده است. این نتایج مربوط به نمونه‌هایی با تراکم ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال هستند.



شکل ۱۰. روند تغییرات مقاومت حالت پایدار در مقابل درصد رس برای روش‌های مختلف نمونه‌سازی

چنان‌که مشاهده می‌شود در هر چهار روش با افزایش درصد رس، مقاومت حالت پایدار کاهش یافته است که نشان‌گر تمایل ذرات رسی به ایجاد بافت سست‌تر و مقاومت کم‌تر در کرنش‌های زیاد است. با توجه به شکل مقادیر مقاومت به‌دست آمده در روش WS از همه بیش‌تر و در روش WT از همه کم‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر بافت اولیه حتی در کرنش‌های زیاد نیز تأثیرگذار است.

نکته قابل توجه دیگر آن است که با افزایش درصد رس نمودارهای مربوط به روش‌های مختلف نمونه‌سازی به یک‌دیگر نزدیک شده و اختلاف آن‌ها کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر افزایش درصد رس موجب می‌شود تا تأثیر روش نمونه‌سازی و بافت اولیه ایجاد شده در نمونه تا حدودی کم‌رنگ شده است از این رو، اختلاف مقادیر روش‌های مختلف باهم کاهش یابد. مشاهده می‌شود که نقاط مربوط به ماسه تمیز در سه روش AP، WS و DD تقریباً یک‌سان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

بوده، ولی اختلاف چشم‌گیری با روش WT دارند. به‌نظر می‌رسد که این سه روش که هر سه تمایلات اتساعی دارند، در خاک‌های بدون ریزدانه منجر به نتایج تقریباً یک‌سانی می‌شوند.

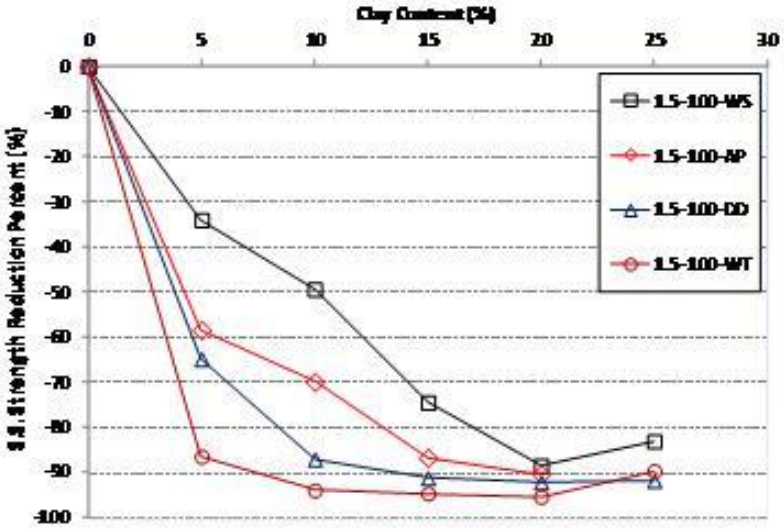
چنان‌چه روند نمودارها بعد از رسیدن به ۲۰ درصد مورد توجه قرار گیرد، می‌توان مشاهده کرد که نمودارها با گذشتن درصد رس از ۲۰ درصد دچار یک افزایش جزئی می‌شوند که به نوعی نشان‌دهندهٔ تغییر در روند کاهشی موجود بعد از رسیدن به ۲۰ درصد ریزدانه است.

به‌منظور بررسی بهتر روند کاهشی مقاومت حالت پایدار، نتایج شکل ۱۰ به‌صورت درصد کاهش مقاومت محاسبه شده و در شکل ۱۱ مجدداً رسم شده است. در این شکل محور عمودی نشان‌دهندهٔ درصد کاهش مقاومت حالت پایدار هر ترکیب نسبت به مقاومت ماسه تمیز در شرایط مشابه است که از این رابطه محاسبه شده است:

$$\mathrm{Re}(\%) = \frac{qs_{CS} - qs}{qs_{CS}}$$

qs_{CS}: مقاومت حالت پایدار ترکیب ماسه تمیز

qs: مقاومت حالت پایدار ترکیب ماسه و ریزدانه در شرایط مشابه



شکل ۱۱. درصد کاهش مقاومت حالت پایدار در مقابل درصد رس برای روش‌های مختلف نمونه‌سازی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

چنان‌که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد رس تا حدود ۲۰ درصد، ترکیبات ماسه تمیز حدود ۹۰ درصد مقاومت خود را از دست می‌دهند. هرچه بافت اولیه تولید شده اتساعی‌تر بوده است، کاهش ایجاد شده بر اثر افزایش اولیه رس نیز کم‌تر بوده است. به‌عنوان مثال با افزایش تنها ۵ درصد رس، نمونه‌های ساخته شده با روش تراکم مرطوب کاهش ۹۰ درصدی در مقاومت خود داشته‌اند، در حالی که در شرایط مشابه کاهش مقاومت نمونه‌های روش WS کمی بیش‌تر از ۳۰ درصد بوده است.

چنان‌که انتظار می‌رود، با افزایش درصد ریزدانه خمیری میزان کاهش مقاومت‌ها به هم نزدیک شده که این موضوع می‌تواند به‌علت فاصله گرفتن دانه‌ها ماسه از یک‌دیگر و تغییر تدریجی بافت از حالت ماسه‌ای به رسی باشد که طبعا تأثیر روش نمونه‌سازی را کم‌رنگ می‌کند. در درصد ریزدانه حدود ۲۰ درصد می‌توان مشاهده کرد که مقدار کاهش مقاومت‌ها نسبت به مقاومت نمونه ماسه تمیز در شرایط مشابه، برای روش‌های مختلف نمونه‌سازی تقریباً برابر شده است.

۳. مقایسهٔ خطوط حالت پایدار ماسه و ترکیبات آن در روش‌های مختلف نمونه‌سازی

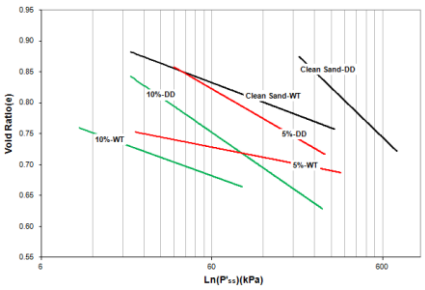
خطوط حالت پایدار نشان‌دهندهٔ وضعیت نمونه‌های آزمایش شده در حالت پایدار است. خط حالت پایدار استاتیکی معمولاً در فضای نیمه‌لگاریتمی نسبت تخلخل در مقابل تنش مؤثر میانگین رسم می‌شود. برای رسم این خطوط نسبت تخلخل بعد از تحکیم برای همهٔ ترکیبات محاسبه شده و با توجه به نمودارهای مسیر تنش مقدار تنش مؤثر میانگین در حالت پایدار نیز محاسبه می‌شود. بنابراین خطوط حالت پایدار نشان‌گر موقعیت نمونه‌های با تراکم‌ها و فشارهای همه جانبه مختلف هستند.

باید توجه کرد از آن‌جاکه حرکت نمونه‌های زهکشی نشده به‌سمت خط حالت پایدار در نسبت تخلخل ثابت و بدون تغییر حجم تا رسیدن به حالت پایدار انجام می‌گیرد، از این رو، نمونه‌هایی که بالای خط هستند، به مقدار تنش مؤثر میانگین کم‌تری نسبت به تنش مؤثر آزمایش می‌رسند که متناظر با رفتار نرم‌شوندگی با کرنش است. نمونه‌هایی که در پایین خط قرار می‌گیرند، در ضمن رسیدن به حالت پایدار به تنش مؤثر میانگینی بیش‌تر از تنش مؤثر

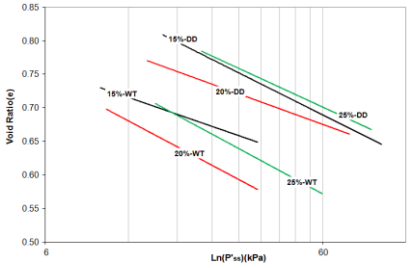
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

آزمایش می‌رسند از این رو، رفتار و مسیر تنش اصطلاحاً به حالت سخت‌شونده تبدیل می‌شود. به این ترتیب نمونه‌هایی که در بالای این خط قرار دارند تمایل به ایجاد رفتارهای سست و بروز رفتارهای نرم‌شوندگی با کرنش دارند، در حالی که نمونه‌هایی که در زیر این خط قرار می‌گیرند تمایل به بروز رفتارهای سخت‌شوندگی با کرنش دارند. بر همین اساس حرکت خطوط حالت پایدار به‌سمت پایین به منزلهٔ افزایش پتانسیل روان‌گرایی تلقی می‌شود.

به‌منظور مقایسه خطوط حالت پایدار به‌دست آمده برای ماسه و ترکیبات آن با روش‌های مختلف نمونه‌سازی، در شکل ۱۲ خطوط حالت پایدار ماسه تمیز و ترکیبات آن با ۵ و ۱۰ درصد رس با استفاده از دو روش نمونه‌سازی DD و WT ارائه شده است. شکل ۱۳ نیز خطوط حالت پایدار ترکیبات ماسه با ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد رس را با استفاده از دو روش نمونه‌سازی DD و WT نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. مقایسه خطوط حالت پایدار ماسه و ترکیب آن با ۵ و ۱۰ درصد رس برای روش‌های DD و WT



شکل ۱۳. مقایسه خطوط حالت پایدار ترکیب ماسه با ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد رس برای روش‌های DD و WT

بر اساس شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان مشاهده کرد که خطوط حالت پایدار مربوط به‌روش نمونه‌سازی DD در درصد ریزدانه یک‌سان، همواره بالاتر از خطوط متناظر در روش نمونه‌سازی WT قرار گرفته‌اند. این موضوع دو نکته را نشان می‌دهد:

اول این‌که پایین‌تر بودن خطوط حالت پایدار روش WT مجددا نشان‌گر پتانسیل روان‌گرایی بیش‌تر و تمایل برای تولید رفتارهای ناپایدار بیش‌تر برای نمونه‌های ساخته شده با این روش است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

دوم این‌که تأثیر روش نمونه‌سازی حتی در کرنش‌های زیاد هم ادامه دارد. از این رو، خطوط حالت پایدار روش‌های مختلف با هم متفاوت هستند. البته می‌توان پیشبینی کرد روش‌هایی مانند WS یا AP که بافت‌های اتساعی شبیه روش DD تولید می‌کنند، خطوط حالت پایدار مشابه تری با این روش دارند، در حالی که روش WT به‌علت تمایل برای تولید بافت‌های سست و رفتارهای ناپایدار، دارای خطوط پایدار متفاوت‌تری نسبت به‌روش DD است.

با بررسی تغییرات خطوط حالت پایدار مربوط به هریک از روش‌های نمونه‌سازی DD یا WT در مقابل افزایش درصد ریزدانه خمیری، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد رس تا ۲۰ درصد، خطوط حالت پایدار به‌سمت پایین حرکت کرده است. با گذشت درصد ریزدانه از ۲۰ درصد، خط حالت پایدار مجددا به‌سمت بالا حرکت کرده است و خط حالت پایدار مربوط به ترکیب ماسه و ۲۵ درصد ریزدانه بالاتر از خط ماسه و ۲۰ درصد ریزدانه خمیری قرار گرفته است.

این موضوع نشان می‌دهد که افزایش درصد ریزدانه خمیری باعث افزایش پتانسیل بروز رفتارهای ناپایدار در ترکیبات ماسه و رس خواهد شد. بر اساس تحلیل خطوط حالت پایدار و نیز تغییرات مقاومت حالت پایدار در مقابل افزایش درصد ریزدانه خمیری، یک حد آستانه در حدود ۲۰ درصد برای مصالح استفاده شده پیش‌بینی می‌شود که با گذشتن از آن روند رفتاری معکوس می‌شود. به‌عبارت دیگر با گذشتن از حد آستانه ادامه افزایش درصد ریزدانه خمیری منجر به بالا رفتن پایداری ترکیبات خواهد شد که نشان‌گر تغییر بافت از حالت غالب ماسه‌ای به‌حالت غالب رسی است.

نکته مهم دیگری که با در نظر گرفتن مجموعه خطوط حالت پایدار به‌دست آمده از دو روش نمونه‌سازی DD و WT می‌توان نتیجه‌گیری کرد، آن است که حد آستانه به‌دست آمده مبتنی بر روش نمونه‌سازی نبوده و برای هردو روش نمونه‌سازی استفاده شده در یک حدود به‌دست آمده است. شایان ذکر است که روش‌های WT و DD بافت‌هایی کاملاً متفاوت تولید می‌کنند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

٤. تحلیل نتایج به‌دست آمده با استفاده از آنالیز میکروسکوپی

به‌منظور تحلیل نتایج به‌دست آمده در این بخش از آنالیز عکس‌های میکروسکوپی استفاده شده است. شکل ١٤ تصویر میکروسکوپی از ماسه تمیز با استفاده از روش WT را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، دانه‌های ماسه تیزگوشه بوده است.از این رو، اصطکاک آن‌ها با هم موجب افزایش مقاومت و بروز رفتارهای اتساعی در هنگام بارگذاری می‌شود. نمونه‌های ساخته شده با روش ریزش خشک دارای بافت مشابه بوده است، ولی به‌علت استفاده نکردن از رطوبت در ساخت نمونه ناپایداری ناشی از کشش سطحی بین دانه‌ها در روش WT وجود ندارد و دانه‌ها به‌صورت مستقیم و تک به تک با یک‌دیگر درگیر می‌شوند.

شکل ١٤. تصویر میکروسکوپی ماسه تمیز با روش WT (بزرگ نمایی ١٦ برابر)

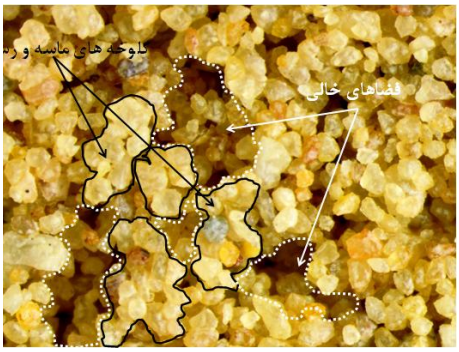
این مسئله باعث بروز رفتارهای اتساعی شدیدتر نسبت به‌روش WT می‌شود.

در شکل‌های ١٥ و ١٦ تصویر میکروسکوپی ترکیب ماسه با ١٠ درصد ریزدانه خمیری برای دو روش نمونه‌سازی WT و DD ارائه شده است. با دقت در تفاوت بافت به‌وجود آمده در این دو شکل می‌توان تفاوت‌های رفتاری اشاره شده در بخش‌های قبلی را تفسیر کرد. در نمونه ساخته شده با روش WT می‌توان مشاهده کرد که اضافه شدن ریزدانه خمیری همراه با رطوبت باعث کلوخه شدن و به هم چسبیدن ذرات رس و ماسه و در نتیجه پیدایش فضاهای

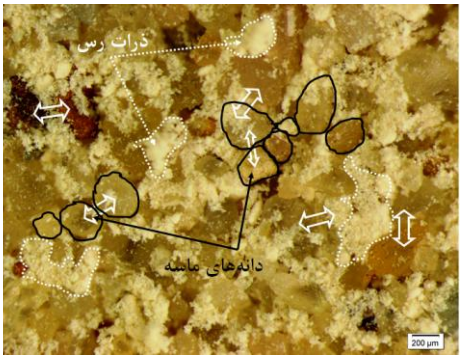
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

خالی قابل توجه در بین آن‌ها شده است. در هنگام بارگذاری کلوخه‌های ماسه و رس که بر اثر چسبندگی ذرات رسی تشکیل شده‌اند، به درون حفرات خالی بین آن‌ها حرکت و ریزش می‌کنندوازاین رو، کاهش‌های شدید در مقاومت به‌وجود خواهد آمد که متناظر با بروز رفتار نرم‌شوندگی کامل با کرنش است.

برای نمونه ساخته شده با روش DD در شکل ۱۶ می‌توان مشاهده کرد که با وجود اضافه شدن ریزدانه خمیری در بسیاری از موارد هم‌چنان دانه‌های ماسه در تماس مستقیم با یک‌دیگر قرار دارند و به‌علت وجود نداشتن رطوبت در ساخت نمونه ذرات خشک رس بیش‌تر در فضاهای خالی و یا به‌صورت موضعی روی دانه‌های ماسه قرار گرفته‌اند. در چنین حالتی حتی پس از اشباع و ایجاد چسبندگی بین ذرات رس تماس‌های مستقیم بین دانه‌های ماسه و در نتیجه مقاومت اصطکاکی آن‌ها زیاد است. از این رو، نوع رفتار به‌صورت اتساعی حفظ می‌شود، هرچند به‌علت کاهش اصطکاک ناشی از قرارگیری ذرات رس بین دانه‌های ماسه مقدار مقاومت نهایی نسبت به ماسه تمیز کاهش خواهد یافت.



شکل ۱۵. تصویر میکروسکوپی ترکیب ماسه با ۱۰ درصد ریزدانه خمیری با روش WT (بزرگ‌نمایی ۱۶ برابر)

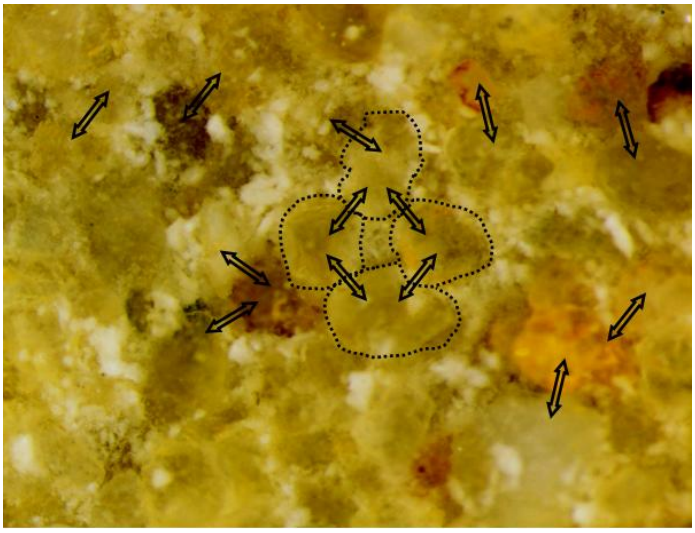


شکل ۱۶. تصویر میکروسکوپی ترکیب ماسه با ۱۰ درصد ریزدانه خمیری با روش DD (بزرگ‌نمایی ۴۰ برابر)

در شکل ۱۷ نیز تصویر میکروسکوپی از ترکیب ماسه با ۱۰ درصد ریزدانه خمیری که با استفاده از روش WS ساخته شده است، نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود نوع روش ساخت نمونه که از طریق ریزش در آب صورت می‌گیرد، باعث می‌شود که ذرات ضمن چرخش و حرکت در آب به پایدارترین حالت ممکن برسند. از این رو، دانه‌های مختلف در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

تماس مستقیم و شدید با هم قرار گیرند که برای تعدادی از آن‌ها نقاط تماس روی شکل مشخص شده است. تشکیل چنین بافتی باعث می‌شود روش نمونه‌سازی WS حتی از روش‌های DD و AP نیز رفتارهای اتساعی شدیدتری نشان دهد.



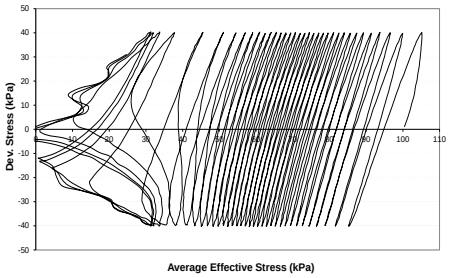
شکل ۱۷. تصویر میکروسکوپی ترکیب ماسه با ۱۰ درصد ریزدانه خمیری با روش WS (بزرگ‌نمایی ٤٠ برابر)

۵. تغییرات مقاومت سیکلیک ماسه و ترکیبات آن

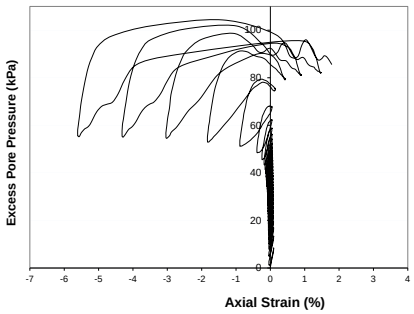
در شکل ۱۸ نمونه‌ای از نمودارهای آزمایش‌های سه‌محوری سیکلیک ارائه شده است. این نمودار مربوط به ترکیب 1.5-100-0-DD-0.2 است. به‌عبارت دیگر نمونه ماسه تمیز است که با وزن مخصوص خشک ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و روش ریزش خشک ساخته شده و تحت فشار همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال با نسبت تنش تناوبی(CSR) برابر با ۰/۲ بارگذاری شده است. با توجه به شکل ۱۸ می‌توان مشاهده کرد که بار سیکلیک به‌صورت سینوسی و مداوم روی نمونه اعمال شده و بعد از آن باعث روان‌گرایی و ناپایداری آن شده است. بر اثر بارگذاری تنش مؤثر میانگین به‌صورت مداوم کاهش پیدا کرده و به‌سمت صفر میل می‌کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

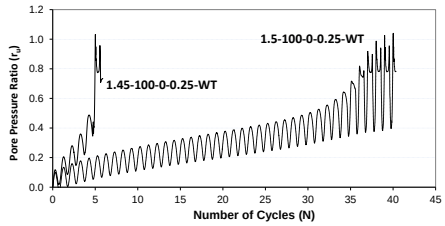
شکل ۱۹ نیز تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در مقابل کرنش محوری به‌وجود آمده را نشان می‌دهد که حاکی از افزایش مداوم این دو پارامتر بر اثر بارگذاری و افزایش ناگهانی آن‌ها در هنگام رسیدن به ناپایداری است. در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ نمونه‌های دیگری از نتایج به‌دست آمده برای مقایسه رفتار ترکیبات مختلف با هم ارائه شده است.



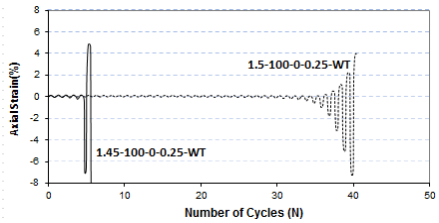
شکل ۱۸. مسیر تنش ترکیب 1.5-100-0-DD-0.2



شکل ۱۹. نمودار تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در مقابل کرنش محوری برای ترکیب 1.5-100-0-DD-0.2



شکل ۲۰. تغییرات ضریب فشار آب حفره ای برای ترکیبات ماسه تمیز با تراکم مختلف



شکل ۲۱. تغییرات کرنش محوری برای ترکیبات ماسه تمیز با تراکم مختلف

به‌منظور بررسی بهتر تأثیر بافت اولیه یا روش نمونه‌سازی و هم‌چنین درصد ریزدانه خمیری روی رفتار ماسه در حالت بارگذاری سیکلیک و نیز به‌منظور لحاظ کردن همهٔ پارامترهای تأثیرگذار مانند تراکم و فشار همه جانبه می‌توان بر اساس تعداد قابل توجه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، تغییرات مقاومت سیکلیک را در فضای e-CSR رسم کرد.

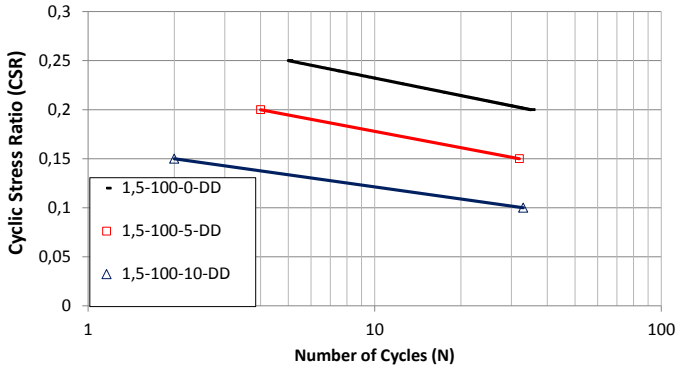
مقاومت سیکلیک در مقابل روانگرایی عموماً به‌صورت نسبت تنش تناوبی یا CSR لازم برای رسیدن نمونه‌ها به ناپایداری در ۱۵ سیکل تعریف می‌شود [۲۳]. برای به‌دست آوردن این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

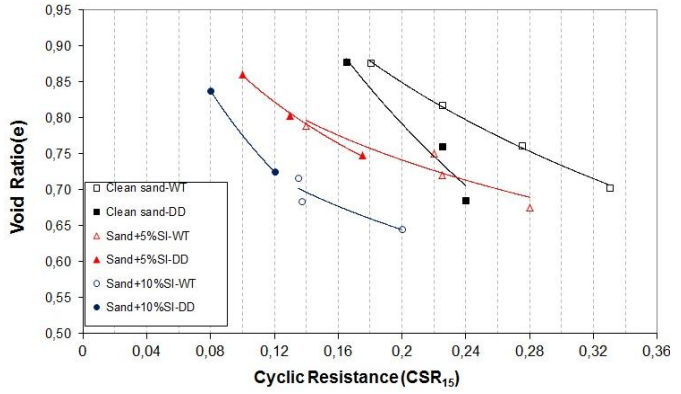
عدد لازم است هر ترکیب حداقل در دو CSR مختلف آزمایش شده قرار گیرد و سپس با رسم نمودار مشابه شکل ۲۲ برای همهٔ ترکیبات، CSR مربوط به N برابر با ۱۵ سیکل استخراج شود.

با رسم نمودارهایی مشابه با شکل ۲۲ برای همهٔ ترکیبات آزمایش شده با استفاده از دو روش نمونه‌سازی WT و DD، مقاومت سیکلیک این ترکیبات محاسبه شده و بر مبنای اعداد به‌دست آمده نمودار شکل (۲۳) نتیجه‌گیری شده است.

در این شکل تغییرات مقاومت روان‌گرایی ماسه تمیز و ترکیب آن با ۵ و ۱۰ درصد ریزدانه خمیری برای دو روش نمونه‌سازی WT و DD با هم مقایسه شده است. با بررسی شکل می‌توان نکات زیر را نتیجه‌گیری کرد:



شکل ۲۲. نمودار تغییرات CSR-N برای تعدادی از ترکیبات مشابه با درصد ریزدانه خمیری مختلف



شکل ۲۳. مقایسهٔ تغییرات مقاومت روان‌گرایی در دو روش WT و DD بر اساس نتایج آزمایش‌های سیکلیک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

- با افزایش درصد ریزدانه خمیری خط مربوط به تغییرات مقاومت سیکلیک برای هریک از روش‌های نمونه‌سازی به‌سمت پایین حرکت کرده است که نشان‌دهندهٔ آن است که در نسبت تخلخل ثابت ترکیب با درصد ریزدانه بیش‌تر مقاومت روان‌گرایی کم‌تری دارد. از این رو، تحت سیکل‌های کم‌تری روان‌گرا می‌شود.
- با مقایسه خطوط مربوط به‌روش‌های مختلف نمونه‌سازی در درصد ریزدانه یک‌سان، می‌توان مشاهده کرد که بر خلاف حالت بارگذاری استاتیکی روش نمونه‌سازی DD اختلاف چشم‌گیری نسبت به‌روش نمونه‌سازی WT ندارد. هم‌چنین با افزایش درصد ریزدانه به‌نظر می‌رسد که خطوط دو روش نمونه‌سازی بررسی شده به‌هم نزدیک‌تر شده و به‌عبارت دیگر تأثیر روش نمونه‌سازی با افزایش درصد ریزدانه کم‌رنگ شده است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در راستای بررسی تأثیر بافت اولیه و روش نهشته‌گذاری و هم‌چنین تأثیر درصد ریزدانه خمیری روی رفتار استاتیکی و سیکلیک ماسه از نتایج حدود ٤۰ آزمایش سه‌محوری سیکلیک و ٥٤ آزمایش سه‌محوری استاتیکی روی نمونه‌های ساخته شده با چهار روش نمونه‌سازی مختلف استفاده شد. آزمایش‌ها روی ترکیبات ماسه با صفر تا ۲٥ درصد ریزدانه خمیری، فشار همه جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال و تراکم متغیر ۱/٤ تا ۱/٥٥ گرم بر سانتی‌متر مکعب (معادل دانسیته حدود ۸ تا ٦۰ درصد) انجام شد. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده بدین‌شرح است:

- روش‌های نمونه‌سازی مختلف تحت شرایط کاملاً مشابه رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. روش‌های ریزش خشک، ریزش جریانی و ته‌نشینی در آب رفتارهای اتساعی و روش تراکم مرطوب عموماً رفتارهای نرم‌شوندگی کامل با کرنش از خود نشان می‌دهند.
- روش ته‌نشینی در آب عموماً شدیدترین رفتارهای اتساعی و بیش‌ترین مقاومت‌ها را از خود نشان می‌دهد که ناشی از فرصت دانه‌ها برای چرخش در آب و رسیدن به پایدارترین موقعیت است. تحلیل عکس‌های میکروسکوپی هم‌چنین نشان داده است که

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

رفتارهای ناپایدار مشاهده شده در روش تراکم مرطوب ناشی از بافت متخلخل به‌وجود آمده بر اثر رطوبت و چسبندگی ذرات رسی است.

- بررسی خطوط حالت پایدار نشان داد که نوع روش نمونه‌سازی و بافت اولیه نمونه حتی تا کرنش‌های زیاد هم روی رفتار تأثیرگذار است و باعث به‌وجود آمدن خطوط حالت پایدار مختلف می‌شود.
- با افزایش درصد ریزدانه تأثیر بافت اولیه و نوع روش نمونه‌سازی روی نتایج کم‌تر می‌شود. به‌ویژه در حالت بارگذاری سیکلیک با افزایش ریزدانه تغییرات مقاومت سیکلیک روش‌های مختلف به‌هم نزدیک می‌شوند.
- با افزایش درصد ریزدانه خمیری ناپایداری و کاهش مقاومت تا حدود ۲۰ درصد ادامه می‌یابد و سپس با افزایش بیش‌تر درصد ریزدانه مقاومت‌ها دوباره افزایش می‌یابند. نتایج نشان داده است که نوع روش نمونه‌سازی تأثیری روی این روند یا روی حد آستانه ندارد.

تشکر و قدردانی

از هیات محترم داوری به‌دلیل بررسی و راهنمایی‌های ارزنده برای بهبود این مقاله و نیز از اعضای مجله برای زحمت‌ها و پیگیری ایشان تشکر می‌کنیم.

منابع

1. Bray J. D., et.al., "Subsurface characterization at ground failure sites in adapazari, turkey", Journal Of Geotechnical and Geo environmental Eng., 130(7), (2004a) 673-685
2. Chu D. B., et al., "Documentation of soil conditions at liquefaction and non liquefaction sites from 1999 chi-chi (Taiwan) earth quake", Soil Dyn. Earth quake Eng., 24 (9-10) (2004) 647-657
3. Boulanger R, Meyers M, Mejia L, Idriss I, "Behavior of a fine grained soil during Loma Prieta earthquake", Can Geotech J 35 (1998) 146-158

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

4. Park Sung-Sik, Kim Young-Su, "Liquefaction Resistance of Sands Containing Plastic Fines with Different Plasticity", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, doi:10.1061/ (ASCE)GT. 1943-5606.0000806 (2012).
5. Gratchev I. B. et al, "Undrained cyclic behavior of bentonite-sand mixtures and factors affecting it", Geotech Geol Eng 25, (2007) 349-367
6. Derakhshandi M., et al, "The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands", Soil Dyn Earthquake Eng 28, (2008) 376-386.
7. Abouzar Sadrekarimi, Scott, Olson M., "Effect of Sample-Preparation Method on Critical-State Behavior of Sands", Geotechnical Testing Journal, Vol. 35, No. 4, Paper ID GTJ104317 (2012).
8. Yao-Chung Chen, Jiun-Chi Chuang, "Effects of Fabric on Steady State and Liquefaction Resistance", Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference Stavanger, Norway, June 17-22 (2001).
9. Yamamuro J. A., Wood F. M., "Effect of depositional method on the undrained behavior and microstructure of sand with silt", Soil Dynamics and EarthquakeEngineering, 24:751,760.doi:10.1016/j. soildyn. 2004. 06. 004 (2004).
10. Papadimitriou A. G., Dafalias Y. F., Yoshimine M., "Plasticity modeling of the effects of sample preparation method on sand response", Soils Found. 45, No. 2 (2005) 109-123.
11. Murthy T. G., Loukidis D., Carraro J. A. H., Prezzi M., Salgado R., "Undrained monotonic response of clean and silty sands", Geotechnique, 57(3), (2007) 273-288.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

12. Fletcher M., Wood, Jerry A., Yamamuro, Poul V. Lade, "Effect of depositional method on the undrained response of silty sand", Can. Geotech. J. 45 (2008) 1525-1537

13. Murthy G. et al, "UNDRAINED RESPONSE OF CLEAN AND SILTY SANDS, Proceedings of the 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics", San Diego, California (2010)

14. Pathak S. R., Dalvi R. S., "Effect of Sample Preparation Method on Liquefaction of Sandy Soil", EJGE Journal, Vol. 16 (2011) 1411-1426

15. Vaid Y. P., Kuerbis R., "Sand Sample Preparation-The Slurry Deposition Method", Journal of Soils and Foundations, 28(4) (1988) 107-118.

16. Yasrobi S. S., "Investigating the Effects of Content and Shapes of Fines on Steady State Behavioural Properties of Saturated Sands to Assess Liquefaction Potential in Such Soils", PhD Thesis, Civil Engineering School, Sharif University of Technology (1997).

17. Ishihara K., "Liquefaction and flow failure during earthquakes", Geotechnique, VOL43,No.3 (1993) 351-415

18. Vaid Y. P., Sivathayalan S., Stedman D., "Influence of specimen-reconstituting method on the undrained response of sands. Geotechnical Testing Journal, 22(3), (1999) 187-195.

19. Vaid Y. P., Negussey D., "Preparation of Reconstituted Sand Specimens", Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP 977 (1988) 405-417.

20. Oda, Masanobu, "Deformation Mechanism of Sand in Triaxial Compression Test", SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 12, No. 4, (1972) 45-63.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]

21. Oda M., "The Mechanism of Fabric Changes during Compressional deformation of sand", Journal of Soils and Foundations, 12(2) (1972) 1-18.

22. Naeemifar O., Yasrobi S., "The effect of depositional method on the stress strain bahaviour of clayey sands", Modares journal, Vol.13, No.3, (2013).

23. Seed H. B., Lee K. L., "Liquefaction of Saturated Sands During cyclic loading", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE 92 (1966) 105-134.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.8.4]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.315]