[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]

[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

بررسی تجربی رفتار مکانیکی ماسه تزریق شده با دوغاب سیمان در حضور متاکائولین

محمد ملکی*، محمدامین فرهپور
دانشگاه بوعلی سینا، گروه عمران

تاریخ: دریافت ۹۸/۱۰/۲۳ پذیرش ۹۹/۰۱/۲۴

چکیده

به‌تازگی به نوع خاصی از رس کائولینیت بنام متاکائولین در بتن توجه شده که نتایج جالب توجهی به دنبال داشته است. هر چندکه، در بارهٔ کاربرد این مصالح در شاخه تزریق و بهسازی زمین پژوهش چندانی انجام نشده است و اثرات این ماده بر رفتار مکانیکی خاک بستر به‌خوبی مشخص نیست. هدف اصلی این تحقیق بررسی پارامترهای مکانیکی ماسه تزریق‌شده با دوغاب حاصل از ترکیب سیمان و متاکائولین، در درصدهای مختلف با رویکرد بهبود در عملکرد آن و به‌دست آوردن نسبت بهینه استفاده از متاکائولین است. برای بررسی رفتار خاک تزریق شده با دوغاب‌های سیمان-متاکائولین یک مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. نمونه‌ها بعد از عمل‌آوری به‌مدت ۱۴ و ۲۸ روز تحت آزمایش‌های سه‌محوری با شرایط مختلف قرار گرفتند. به‌طورکلی نتایج نشان داد که متاکائولین می‌تواند در پایدارسازی هر چه بیش‌تر دوغاب سیمان تزریقی در مقابل پدیده آب اندازی نقش مثبت ایفا کند. هم‌چنین با توجه به نتایج حاصل از آزمایش سه‌محوری روی خاک ماسه‌ای تزریق شده با دوغاب‌های سیمان-متاکائولین مشاهده شد، جای‌گزینی درصدی از سیمان مصرفی با متاکائولین سبب همگن‌تر شدن، بهبود در شکل‌پذیری و نرم تر شدن رفتار پس از گسیختگی می‌شود اما پارامتر چسبندگی ناحیهٔ تزریق شده را در مقایسه با استفاده از سیمان خالص در دوغاب مقداری کاهش می‌دهد. هم‌چنین با توجه به نتایج تحقیق حاضر و نتایج حاصل از تحقیق‌های محققان پیشین مشاهده می‌شود مقدار استفاده بهینه از متاکائولین در دوغاب با توجه غلظت دوغاب و شرایط محیط از قبیل تنش همه‌جانبه تعیین می‌شود و در حالت‌های مختلف باید این مقدار را با روش سعی و خطا به‌دست آورد. به‌طورکلی می‌توان گفت با

*نویسنده مسئول maleki@basu.ac.ir

جای‌گزین کردن درصدی از سیمان دوغاب با متاکائولین می‌توان با حفظ تقریبی مقاومت فشاریِ خاک تزریق شده، شکل‌پذیری (افزایش کرنش نظیر مقاومت حداکثر) را افزایش و مدول نرم‌شوندگی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهسازی خاک، تزریق، ماسه، متاکائولین.

مقدمه

تزریق یکی از پرکاربردترین روش‌های بهسازی خاک است که در آن دوغاب تحت فشار به خلل و فرج درزه و حفره‌های موجود در خاک و سنگ وارد می‌شود. در روش تزریق علاوه بر کاهش آب‌گذری محیط، مقاومت برشی و سختی مصالح زمین افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. کاربرد این روش در پروژه‌هایی مانند سدسازی و بهسازی خاک رمبنده، مستلزم استفاده حجم وسیعی از مصالح تزریقی است تا بتوان معیارهای طرح را عملی کرد. تحقیقات چشم‌گیری در خصوص رفتار مکانیکی کوتاه مدت و بلند مدت خاک تزریق شده در منابع وجود دارد. این تحقیقات عمدتاً با هدف بررسی عوامل مختلف چون نوع و درصد مواد تزریقی، درصد مواد افزودنی، زمان و چگونگی عمل‌آوری، درصد تراکم اولیه خاک، نوع و دانه‌بندی خاک، بر مقاومت برشی، سختی و نفوذ پذیری خاک بهسازی شده تعریف و انجام شده‌اند [۱]، [۲]، [۳]، [٤]، [۵]، [٦]، [۷].

دانش کافی در مورد رفتار بلندمدت خاک تزریق‌شده به ما اجازه استفاده از این روش را برای بهره‌برداری‌های بلندمدت به‌دست می‌دهد. تاکنون تحقیقات زیادی نیز در مورد رفتار مکانیکی وابسته به زمان در خاک ماسه‌ای تزریق‌شده با دوغاب‌های رایج سیلیکاتی، سیمان و مواد شیمیایی دیگر انجام شده است [٦]، [۷]، [۵].

در سال‌های اخیر نگرش محققان و مهندسان مشاور به‌سمت به‌کارگیری مواد دیگری برای جای‌گزینی با مواد مرسوم و رایج مانند سیمان تغییر کرده است. دلایل این امر را می‌توان فرآیندهای پیچیده و هزینه زیاد تولید، مسائل زیست‌محیطی و آلودگی‌های جوی در استفاده از این مواد دانست. در همین راستا نیاز به بررسی و تحقیق در مورد مواد جای‌گزین که رفتار یک‌سانی با مصالح مرسوم دارند، امری ضروری است. یکی از مواد که اخیراً مورد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

توجه محققان بوده–است استفاده از متاکائولین به‌جای بخشی از سیمان مصرفی در عملیات تزریق است.

متاکائولین یک ماده پزولانی فعال است که بر اساس استاندارد ASTM C618 در ردهٔ پوزولان‌های کلاس N قرار می‌گیرد. این ماده از تکلیس رس کائولین (رس معدنی) در دمای بین ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست می‌آید. ماده خام ورودی برای تولید متاکائولین رس کائولینیت با فرمول $AL_2Si_2O_7$ است. متاکائولین با $Ca(OH)_2$ ژل CSH در دمای محیطی تولید می‌کند و با CH واکنش می‌دهد که منجر به تولید ترکیبات آلومین شامل C_4AM_{13}، C_2ASH_8 و C_3AH_6 می‌شود. ۹۹٪ ذرات متاکائولین از $16\mu m$ کوچک‌تر و اندازه بیش‌تر ذرات آن در حدود $3\mu m$ است. بخش عمده این مواد (بیش از ۹۱٪) را SiO_2 و AL_2O_3 تشکیل می‌دهد. متاکائولین یک پوزولان بسیار فعال با سطح ویژه زیاد است و به‌همین دلیل می‌تواند به‌عنوان جزئی از مواد تشکیل‌دهنده، جای‌گزین بخشی از حجم سیمان به‌عنوان یک ماده چسباننده شود [۱۱]. تاکنون تحقیقات چندانی مبنی بر استفاده از این ماده در تزریق صورت نگرفته است، اما به‌طورکلی از جمله فواید این ماده که در صنعت ساختمان، بتن و بتن‌خاک به‌کار رفته است، می‌توان به افزایش مقاومت فشاری و خمِشی، کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت در برابر حملات شیمیایی، افزایش دوام و کاهش خزش، کاهش اثرات فعالیت، افزایش کارایی و پرداخت بتن، کاهش پتانسیل شوره‌زدگی و تقویت پرداخت و رنگ و ظاهر اشاره کرد. واکنش هیدراسیون به درجه فعالیت متاکائولین بستگی دارد که آن هم به‌نوبهٔ خود به درجه خلوص خاک رس بر می‌گردد. جدول زیر درجه فعالیت متاکائولین را در مقایسه با سیلیکافوم و خاکستر بادی نشان می‌دهد [۸].

جدول ۱. درجه فعالیت MK در مقایسه با سیلیکافوم و خاکستر بادی [۸]

پوزولان	SF	FA	MK
R(mg) ca(CH) برای دو گرم پوزولان	٤٢٧	٨٧٥	١٠٥٠

ویپولانداندان و همکاران [۹] به‌منظور بررسی تأثیر جای‌گزینی متاکائولین با بخشی از سیمان در رفتار مکانیکی و کارایی دوغاب سیمان با دو نوع WCR پژوهش‌هایی مختلف انجام دادند. در این تحقیق از درصدهای مختلف جای‌گزینی متاکائولین تا مقدار حداکثر ۱۰٪ وزنی سیمان استفاده شد. آزمایش‌ها شامل زمان گیرش، آب اندازی، مقاومت کششی و

فشاری بودند. نتایج نشان داد که با افزایش متاکائولین آب اندازی سیمان کاهش پیدا کرده و موجب پایداری بیش‌تر دوغاب می‌شود. اضافه کردن ۱۰ درصد متاکائولن به دوغاب سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/٦ آب اندازی صفر را نتیجه داده است. علاوه بر این مقاومت‌های بیرون‌کشی و فشاری دوغاب های سیمانی تابعی از درصد متاکائولین متغیر بوده است و گسیختگی برشی در فصل مشترک برای آزمایش‌های بیرون‌کشی مشاهده شد. هزینهٔ متاکائولین یکی از فاکتورهای تعیین‌کننده در کاربرد آن در بتن در مقیاس بزرگ است. بر این اساس هان و همکاران [۱۰] تحقیقاتی برای بررسی اثر نوع کائولین بر میزان واکنش‌پذیری آن با سیمان و رفتار مکانیکی ترکیب دوغاب سیمان با ماسه انجام دادند. انواع رس کائولینیت بررسی شده تحت فرایند مشابه تکلیس شدگی قرار گرفتند تا متاکائولین مربوطه به‌دست آید. سپس متاکاولین‌های به‌دست آمده جای‌گزین بخشی از سیمان در ملات قرارگرفته و نهایتاً مقاومت فشاری نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که برای همه انواع متاکائولین با دانه‌بندی‌های مختلف مقاومت فشاری بیش از حالت ملات بدون متاکائولین بود. هر چند خاکی که اندازه ذرات کم‌تر از ۲ میکرومتر ۵۰ درصد باشد بهترین انتخاب است. در نتیجه با توجه به پائین بودن قیمت خاک رس و بهره‌وری اقتصادی تمایل به استفاده از متاکائولین به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان قابل افزایش است.

کلاواس و همکاران [۱۱] تحقیقاتی روی دوغاب سیمان و متاکائولین در حضور خاک رس برای ساخت خاک-بتن و بررسی رفتار مکانیکی آن انجام دادند. بر اساس نتایج حاصل معلوم شد افزودن متاکائولین سبب افزایش مدول الاستیسیته، تغییر شکل‌پذیری یعنی افزایش کرنش متناظر با مقاومت حداکثر می‌شود. سانبی و همکاران [۱۲] خواص مکانیکی دوغاب سیمان تزریقی در حضور متاکائولن و افزودنی لزج‌کننده را با هدف بهینه‌سازی پارامترهای رئولوژیکی بررسی کردند. آنها نشان دادند که متاکائولین موجب افزایش تنش تسلیم، ویسکوزیته پلاستیک، باندهای چسبندگی و نهایتاً مقاومت فشاری می‌شود. در تحقیق دیگری واوریچوک و همکاران [۱۳] تأثیر کاربرد متاکائولن را روی خواص دوغاب آهک برای استفاده در تعمیرات ساختمان‌های تاریخی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اضافه کردن متاکائولین، در سیال‌پذیری ثابت، تقاضای آب مخلوط تازه با افزایش متاکائولین، افزایش پیدا می‌کند. به‌عبارت دیگر در یک زمان داده شده ظرفیت جذب آب مخلوط دوغاب افزایش پیدا می‌کند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

هم چنین در یک وضعیت سخت شده اضافه کردن متاکائولن علاوه بر افزایش مقاومت باند (چسباننده) باعث افزایش مقاومت فشاری در کوتاه مدت و بلند مدت ماده تزریقی می‌شود.

کلاواس و همکاران [۱٤] خواص مخلوط‌های بتن ماسه که با متاکائولین اصلاح شده است را بررسی کردند. بر اساس نتایج به‌دست آمده خواص مفید متاکائولین در تولید مخلوط‌های بتن ماسه با بهبود در خواص مکانیکی می‌تواند مد نظر قرار گیرد. هم‌چنین آستریس و همکاران [۱۵]، رفتار مکانیکی مخلوط‌های بتن ماسه را در حضور متاکائولین بررسی کردند. با اساس نتایج به‌دست آمده بهبود در مقاومت فشاری در نمونه‌های با غلظت بالای چسباننده و در وضعیت نسبت‌های آب به چسباننده کم تا متوسط بیش‌تر نمایان است. هم‌چنین نمونه‌های با مقاومت فشاری بالا متناسب با مقادیر بالای سرعت امواج اولتراسونیک گزارش شده است. به علاوه مقادیر کرنش در حداکثر مقاومت خیلی بیش‌تر از مقدار کرنش بتن معمولی تحت بار فشاری محوری به‌دست آمد.

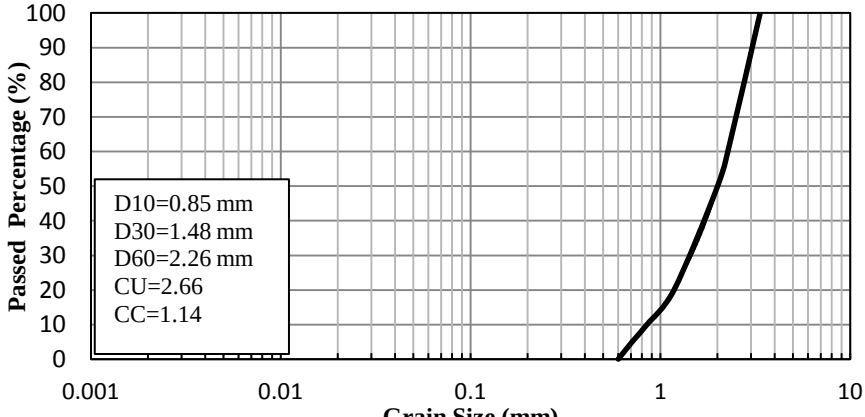
به‌طورکلی استفاده از متاکائولین در سال‌های اخیر در صنعت بتن و دیگر صنایع، رشد چشم‌گیری یافته است، اما کاربرد این ماده در تکنیک‌های ژئوتکنیک، به‌ویژه در شاخه بهسازی خاک‌ها، نیازمند تحقیقات بیش‌تری است. بر این اساس در تحقیق حاضر در ادامه کارهای انجام شده رفتار مکانیکی نوع خاصی از خاک ماسه‌ای تزریق شده با دوغاب سیمان در حضور متاکائولین در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از دستگاه سه‌محوری برای برش نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

خاک استفاده شده در آزمایش

در این تحقیق از خاک ماسه‌ای رودخانهٔ شوشاب ملایر استفاده شده است. آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM D422 انجام گرفت که نمودار دانه‌بندی و نتایج آن در شکل ۱ آمده است. جنس آن از سیلیس و آهک و دارای دانه‌های گردگوشه و تخت است. بر اساس این نتایج، طبق سیستم رده‌بندی متحد خاک (USCS)، این خاک از نوع SP است. وزن مخصوص ویژه خاک ۲/٦ که با انجام این آزمایش طبق آیین‌نامه ASTM D2434 و با

سه بار تکرار انجام شد. با انجام آزمایش نفوذ پذیری و با سه بار تکرار ضریب نفوذپذیری ۰/۰۰۸ سانتی‌متر بر ثانیه به دست آمد.



شکل ۱. دانه‌بندی ماسهٔ استفاده شده

مصالح دوغاب استفاده شده

سیمان

سیمان استفاده شده در این تحقیق از نوع سیمان پرتلند معمولی است. تعیین زمان گیرش ملات این سیمان طبق ASTM C191 انجام شد که زمان گیرش اولیه آن برابر با ۱۲۲ دقیقه و زمان گیرش نهایی آن ۲٤۱ دقیقه تعیین شد. هم‌چنین چگالی ذرات سیمان طبق ASTM C188 برابر $3/29\ gr/cm^3$ به‌دست آمد.

متاکائولین

مشخصات متاکائولین به‌کار گرفته شده در این تحقیق، بر اساس انستیتو مصالح ساختمانی دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران در جدول ۲ ارائه شده است. این ماده بر اساس استاندارد ASTM C618 در رده پوزولان‌های کلاس N قرار می‌گیرد.

جدول ۲. درصد مواد تشکیل‌دهندهٔ متاکائولین

SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	TiO2	Blaine	Gs
٥٦	۳۷	۲/٤	۰/۳	۲/٤	۰/۲	۱۲۰۰	۲/۱

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

بنتونیت

در این تحقیق از بنتونیت تولیدی کارخانه ایران باریت استفاده شد. این بنتونیت سدیمی-کلسیمی است. آزمایش‌های حدود اتربرگ بنتونیت با سه بار تکرار طبق استاندارد ASTM D4318 انجام شد. بر این اساس حد روانی و مشخصه خمیری آن به‌ترتیب ۲۹۶ و ۲۶۲ درصد تعیین شدند. چگالی ذرات نیز طبق استاندارد ASTM C188، ۲/۷٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شد.

آب

آب مصرفی برای ساخت دوغاب‌ها آب شرب شهر همدان است که با توجه به مشخصات استاندارد ASTM C94 کیفیت لازم برای عملیات تزریق را دارد.

دوغاب‌های استفاده شده

جدول ۳ ترکیب دوغاب‌های مختلف به‌صورت کدگذاری شده را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال دوغاب ۱۰-۲/۵ به‌معنای نسبت $\frac{\text{سوسپانسیون بنتونیت}}{\text{متاکائولین+ سیمان}}$ برابر ۲/۵ (در ادامه از آن با عنوان WCR هم یاد می‌شود) و عدد ۱۰ به معنای جای‌گزین شدن ۱۰ درصد سیمان با ماده متاکائولین است.

جدول ۳. انواع ترکیب دوغاب استفاده شده در تحقیق

تعریف ترکیب	درصد سیمان جای‌گزین شده با متاکائولن — $\frac{\text{سوسپانسیون بنتونیت}}{\text{متاکائولین+ سیمان}}$								
ترکیب	٤-۲۵	٤-۱۰	٤-۰	۲/۵-۲۵	۲/۵-۲۰	۲/۵-۱۵	۲/۵-۱۰	۲/۵-۵	۲/۵-۰

روش ساخت دوغاب

بنتونیت موجب پایداری دوغاب‌های سیمانی و کاهش سرعت رسوب‌گذاری می‌شود. هر چند که در برخی منابع و در کاربردهای عملی مقدار استفاده از بنتونیت بین ۳ تا ۵ درصد حجم دوغاب توصیه شده است. اما در تحقیقات آزمایشگاهی پیشین از جمله در تحقیق ریبی [۵]، مقدار بنتونیت استفاده شده ۱ درصد حجم دوغاب در نظر گرفته شده است. توجیه میزان ۱٪ را می‌توان به کوتاه بودن زمان ترکیب دوغاب و تزریق آن به نمونه مرتبط دانست.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

در این تحقیق نیز مقدار بنتونیت یک درصد حجم دوغاب در نظر گرفته شد. برای این کار ابتدا معادل ۱ درصد حجم دوغاب، یعنی به‌ازای هر ۲/۵ لیتر آب ۳۵ گرم، بنتونیت اضافه شد و مدت ٦ دقیقه با مخلوط‌کن با دورِ موتور تند مخلوط شد. سپس محلول به‌دست آمده به مدت ۲٤ ساعت در ظرف دربسته نگه‌داری شد تا عمل آب‌پوشی به‌طور کامل انجام شود. بعد از آن با توجه به نسبت ترکیب مورد نظر، سیمان و متاکائولین به‌صورت وزنی ترکیب و با سوسپانسیون بنتونیت به‌مدت ٦ دقیقه با دور تند همزن مخلوط شد. بعد از اتمام این مراحل، دوغاب در مخزن دستگاه تزریق ریخته شد تا در خاک با شرایط مورد نظر تزریق شود.

دستگاه تزریق

این دستگاه در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه بوعلی‌سینا طی تحقیق حاضر ساخته و راه‌اندازی شده است. اجزای مختلف دستگاه عبارتند از: مخزن ۷ لیتری، شیرهای ورودی و خروجی مایع، شیر ورودی هوای تولید شده از کمپرسور باد، گیج فشارسنج و شیلنگ‌های رابط است. در بالای مخزن یک عدد هم‌زن برقی با قابلیت چرخش ۱/۵ دور در ثانیه برای همگن نگه داشتن دوغاب طی عملیات تزریق در نمونه تعبیه شده است.

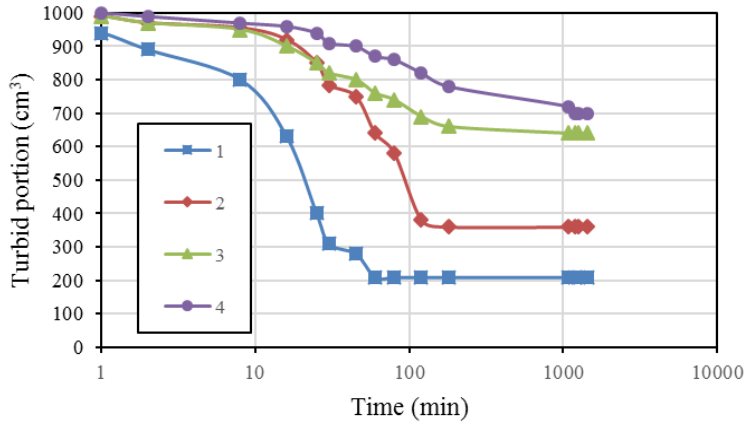
معرفی آزمایش آب‌اندازی و نحوهٔ انجام آن

آزمایش آب‌اندازی پایداری دوغاب را اندازه می‌گیرد. ناپایداری دوغاب مانع نفوذ مناسب در منافذ خاک و درزها و ترک‌های سنگ می‌شود. در پیش‌فرض مسائل تئوریک فرض بر آن است که هیچ‌گونه ته‌نشینی در دوغاب رخ نمی‌دهد و دوغاب در یک محیط کاملاً همگن باقی می‌ماند. اما، در شرایط واقعی، تحقق این امر دشوار است. ته‌نشینی به عواملی از قبیل اندازهٔ ذرات و اختلاف جرمِ حجمی ذرات جامد، مدت زمان ته‌نشینی، دما و ابعاد استوانه آزمایش بستگی دارد. در این تحقیق این آزمایش طبق آیین‌نامه ASTM C94 با یک استوانه شیشه‌ای به قطر ٦۰ میلی‌متر و با حجم ۱۰۰۰ سی‌سی انجام شد. دوغاب‌ها پس از آماده شدن در ظرف‌های مدرّج یادشده ریخته و در محل ثابتی نگه‌داری شدند. قرائت میزان نشست هر دوغاب در فواصل زمانی مشخصی انجام شد. نسبت حجم مواد ته‌نشین شده به حجم کل دوغاب، میزان ته‌نشینی را نشان می‌دهد. قرائت میزان نشست ذرات هر دوغاب در فواصل زمانی ۱، ۲، ۸، ۱٦، ۲۵، ۳۰، ٤۵، ٦۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۱۰۸۰، ۱۲۰۰، ۱۲٦۰ و ۱٤٤۰ دقیقه

انجام شد. فواصل زمانی قرائت با توجه سرعت ته‌نشینی، ابتدا کم و با گذشت زمان زیاد شد. جدول ٤ درصد مواد ار رفته در دوغاب‌ها برای آزمایش آب‌اندازی را نشان می‌دهد.

جدول ٤. درصد مواد به‌کار رفته در دوغاب‌ها برای آزمایش آب‌اندازی

شمارهٔ آزمایش	WCR	آب	سیمان	متاکائولین	بنتونیت
۱	۲/۵	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۰	۰
۲	۲/۵	۲۵۰۰	۷۵۰	۲۵۰	۰
۳	۲/۵	۲۵۰۰	۱۰۰۰	۰	۳۵
٤	۲/۵	۲۵۰۰	۷۵۰	۲۵۰	۳۵



شکل ۲. نمودار رسوب-زمان دوغاب‌ها حاصل از آزمایش آب‌اندازی

چنان‌که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، در حالتی که در دوغاب صرفاً از آب به‌همراه سیمان استفاده شد (منحنی شمارهٔ ۱)، ذرات سیمان از همان ابتدا به‌سرعت شروع به ته‌نشینی کردند. این ناهمگنی در دوغاب در فرآیند تزریق موجب عدم نفوذ کامل در خلل و فرج خاک می‌شود، بنابراین برای تزریق دوغاب سیمانی، استفاده از ماده‌ای پایدارکننده امری ضروری به نظر رسید. در حالت استفاده از ۷۵٪ سیمان و ۲۵٪ درصد متاکائولین در مواد چسباننده دوغاب (منحنی شمارهٔ ۲)، ذرات تا ۲۰ دقیقه با سرعت کم و از آن پس با سرعت نسبتاً زیادی شروع به ته‌نشینی کردند، این مسئله نشان داد که باید از یک ماده پایدار کننده

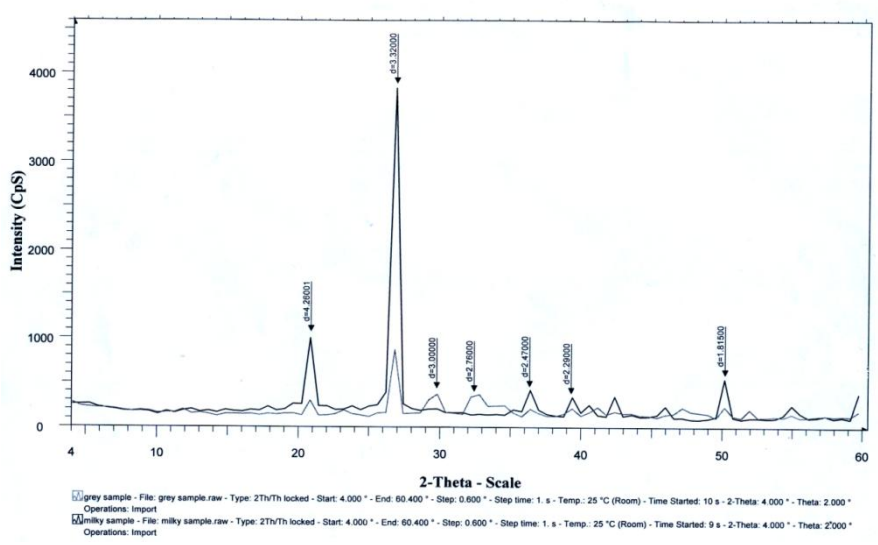
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

قوی‌تری استفاده شود و متاکائولین به تنهایی در WCR برابر با ۲/۵ قادر به پایدار کردن دوغاب نیست. در حالتی که از بنتونیت به‌میزان ۱٪ حجم دوغاب و به‌همراه سیمان استفاده شد (منحنی شمارهٔ ۳)، ملاحظه شد این مقدار می‌تواند نقش بسیار مؤثری در جلوگیری از ته‌نشینی ذرات سیمان داشته باشد و لزوم استفاده از این ماده به اثبات رسید. منحنی شمارهٔ ٤ نیز استفاده از متاکائولین به‌همراه بنتونیت و سیمان در دوغاب را نشان می‌دهد؛ که استفاده هم‌زمان از این دو نوع ماده سبب بهبود در عملکرد پایداری دوغاب شده است. این مهم نشان‌دهندهٔ رفتار هم‌سوی این دو ماده در جهت پایداری هر چه بیش‌تر دوغاب است. اتا و ویپولانادان [١٦] نشان دادند که در WCR برابر با ۱ با افزودن تنها ۱۰٪ متاکائولین، دوغاب پایدار می‌شود؛ اما تحقیق حاضر نشان داد که در WCR برابر با ۲/۵ با جای‌گزین کردن ۲۵٪ متاکائولین بجای سیمان نمی‌توان دوغاب را پایدار ساخت و باید از ماده پایدار کننده قوی‌تری نظیر بنتونیت استفاده شود. این مسئله نشان می‌دهد با بیش‌تر شدن WCR ناپایداری دوغاب سیمان در مقابلِ پدیده آب‌اندازی بیش‌تر شده و در نتیجه استفاده از ماده پایدارکننده قوی‌تر ضروری است.

آزمایش پراش اشعه ایکس

برای بررسی واکنش‌پذیری سیمان با متاکائولین، ترکیب این دو ماده تحت آزمایش پراش پرتو ایکس(XRD) با استفاده از دستگا موجود در دانشکدهٔ مهندسی دانشگاه بوعلی‌سینا قرار گرفتند. در شکل ۳ نتیجه حاصل از آزمایش روی این دو نمونه ارائه شده است. در این شکل محور قائم بیان‌گر شدت پیک و d بیان‌گر فاصلهٔ بین بنیان‌ها در ماده است. تغییری در فاصله بین بنیان‌های متاکائولین پس از ترکیب با سیمان مشاهده نشد که این امر با توجه به عدم امکان نفوذ سیمان به داخل لایه دوگانه متاکائولین منطقی به‌نظر می‌رسد. کاهش شدت پیک متاکائولین در ترکیب با سیمان به میزان ۷۵٪ در نمودار نشان‌دهنده واکنش‌پذیری زیاد این دو ماده با هم است. نتیجه این آزمایش نشان داد که این دو ماده در ترکیب با هم در همان لحظات اولیه واکنش می‌دهند و نسبت استفاده از این مواد در دوغاب، در رفتار مکانیکی خاک تزریق شده باید تأثیرگذار باشد.



شکل ۳. نمودارهای حاصل از آزمایش پراش پرتو ایکس

روش ساخت نمونه‌ها

در شاخهٔ تزریق روش خاص و استانداردی برای نمونه‌سازی وجود ندارد. با وجود این مطابق با تحقیقات گذشته ([۱]، [۹]، [۱۶] و [۵])، به‌طور معمول از یک لایه فیلتر درشت‌دانه در زیر نمونه خاک مورد، با هدف بالا آمدن و پخش یکنواخت دوغاب در نمونه و حفظ ساختار خاک در حین تزریق استفاده شده است. با این همه، در این روش هنگام جداسازی این لایه فیلتر، ترک‌های ریزی در نمونه اصلی ایجاد می‌شود. از این‌رو در تحقیق حاضر علاوه بر رعایت نکات مهم در روش نمونه‌سازی محققان قبلی، برای کاهش خطا، و همگنی ساختار نمونه‌ها تغییراتی در روش نمونه‌سازی نسبت به آن‌چه در منابع آمده است، ایجاد شد. بدین‌منظور از دو تکنیک نمونه‌سازی: الف) استفاده از قالب جداشدنی دو تکه با لایه فیلتر و ب) استفاده از قالب یک تکه با به‌کارگیری لوله‌های PVC بدون اعمال لایه فیلتر استفاده شد. درشکل ٤ تصاویری از دو قالب ها در دو تکنیک مذکور ارائه شده است.با توجه به آیین‌نامه ASTM D7181 قطر نمونه ۳۸ میلی‌متر و نسبت ارتفاع به قطر حدود۲/۱ در نظر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

گرفته شد. مقدار وزن نمونه تابع عوامل مختلفی است. در نمونه‌های تهیه شده در این پژوهش نسبت تخلخل ماسه نمونه‌ها ۰/۰۲±۰/۶۵ تعیین شد.



شکل ٤. تصاویری از قالب‌های یک تکه و دو تکه

با داشتن حجم قالب و چگالی ویژه مقدار وزن مصالح مورد نیاز برای پر کردن قالب تعیین شد. مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها برای تزریق بدین‌شرح است:

- بستن جداره‌های قالب و درپوش انتهایی آن.
- ریختن ۳ سانتی‌متر شن بادامی در ته قالب (در صورت استفاده از روش الف).
- روغن‌کاری دیواره‌های قالب با ترکیبی از وازلین و روغن موتور خودرو به‌منظور ایجاد سطحی با اصطکاک پایین جهت خارج کردن سالم نمونه.
- قرار دادن یک عدد ورق پلاستیکی به‌طول ۱۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۸ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۰۵ میلی‌متر به‌صورت استوانه‌ای در داخل قالب (هدف از این کار ترکیب نشدن دوغاب و خاک مورد نظر با جداره روغن‌کاری شدهٔ قالب است).
- قرار دادن یک توری نمره ٤۰ به قطر ۳۸ میلی‌متر روی لایه فیلتر.
- کوبیدن خاک با استفاده از چکش لاستیکی در ٤ لایه مساوی.
- قرار دادن توری در بالای نمونه و بستن درپوش فوقانی قالب.

روش تزریق و عمل‌آوری نمونه‌ها

بعد از به پایان رسیدن نمونه‌سازی و بستن قالب‌ها و آماده کردن دوغاب مورد نظر، قالب‌های مورد نظر در گیره‌های ساخته شده روی میز تزریق قرار داده شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

سپس دوغاب در داخل مخزن ریخته و بعد از بستن درب مخزن و روشن کردن همزن مخزن، فشار هوا در داخل آن اعمال شد. مقدار این فشار به‌روش آزمون و خطا و با توجه به نوع خاک و نسبت آب به مواد چسباننده، به‌میزان ٪۱۰±۲۰۰ کیلو پاسکال برای تمامی حالت‌ها به‌دست آمد. قبل از باز کردن شیر خروجی مخزن برای تزریق نمونه، ابتدا نمونه با شیر آب شهر به‌صورت کاملاً آرام اشباع می‌شد. معیار سنجش اشباع شدن کامل، خروج آب به‌میزان ۵ برابر حجم داخلی قالب از بالای نمونه بود. بعد از اشباع شدن نمونه‌ها، شیر آب بسته و شیر مخزن برای خروج دوغاب و تزریق در خاک باز شد. این عمل نیز با خروج دوغاب به میزان دو برابر حجم داخلی قالب انجام گرفت. میزان کنترل دوغاب خروجی و آب با ظروف مندرج انجام شد. پس از اتمام این عملیات، نمونه‌ها به مدت حداقل ۲٤ ساعت طبق شکل ۵ نگه‌داری شدند.



شکل ۵. محل نگه‌داری نمونه‌ها در ۲٤ ساعت اولیه

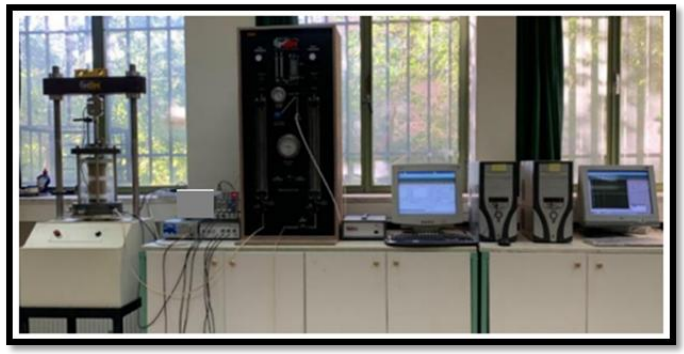
سپس نمونه‌ها از داخل قالب باز و درون کیسه‌های پلاستیکی به‌صورت عمودی در ظرف‌های مخصوصی به محفظه عمل‌آوری منتقل و در دمای ثابت ۲±۱٦ درجه سلسیوس به مدت ۱٤،۷ و ۲۸ روز نگه‌داری شدند. بعد از پایان یافتن زمان عمل‌آوری، برای ایجاد سطح صاف و افقی در سر و ته نمونه‌ها و حصول توزیع تنش یکنواخت طی اعمال بار از جک دستگاه سه‌محوری از ملات متشکل از ماسه بادی و سیمان استفاده شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

دستگاه استفاده شده برای برش نمونه‌ها

از دستگاه سه‌محوری برای بررسی رفتار تنش-تغییر شکل نمونه در تحقیق حاضر استفاده شد. بررسی مطالعات مروری نشان می‌دهد بررسی رفتار تنش-تغییرشکل خاک تزریق شده نمونه‌ها عمدتاً در شرایط محصورنشده انجام شده است. استفاده از دستگاه سه‌محوری امکان بررسی دقیق‌تر رفتار خاک تزریق شده به‌ویژه در نظرگیری اثرات تنش محصورکننده، در نظرگیری شرایط زهکشی و هم‌چنین اعمال مسیر تنش فراهم است. دستگاه سه‌محوری استفاده شده در تحقیق حاضر در آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک خاک دانشکدهٔ مهندسی دانشگاه بوعلی سینا مستقر است و شامل جک، سل، پانل کنترل و سایر ملحقات چون سیستم ثبت و نمایش اتوماتیک داده‌ها است. شکل ٦ تصویری از این دستگاه را نشان می‌دهد. همهٔ نمونه‌های تزریق شده و عمل‌آوری شده در سه تراز تنش محصورکننده ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال، با اعمال نرخ کرنش ثابت تحت برش قرار گرفته و مقاومت برشی حداکثر، مقاومت برشی نهایی طی تغییر شکل‌های بزرگ، کرنش نظیر مقاومت حداکثر و مدول نرم‌شوندگی کرنشی نمونه برداشت و ارزیابی شدند. ساخت نمونه‌های کاملاً همگن و یکسان برای مقایسهٔ نتایج و نتیجه‌گیری صحیح نیازمند اعمال دقت زیاد و لحاظ کردن همه عوامل تأثیرگذار است. حصول این شرایط عموماً با دشواری همراه است و به‌همین دلیل در این تحقیق، برای هر یک از ترکیبات دوغاب آزمایش‌ها حداقل چهار و بعضاً با بیش از ده بار تکرار انجام شدند. بعد از ثبت نتایج آزمایش‌های تکرار شده برای هر ترکیب با خصوصیات اولیه در نظر گرفته شده، با استفاده از کد MATLAB یک منحنی میانگین استخراج شد.

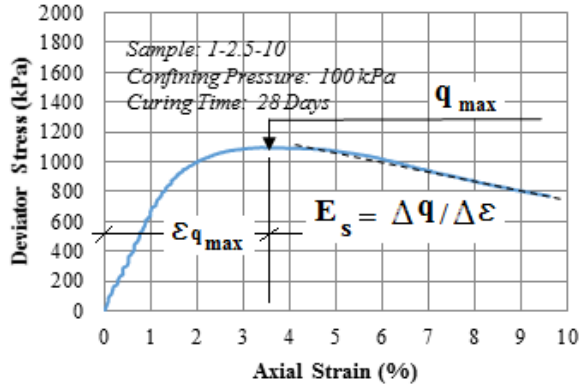


شکل ٦. تصویری از دستگاه سه‌محوری استفاده شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

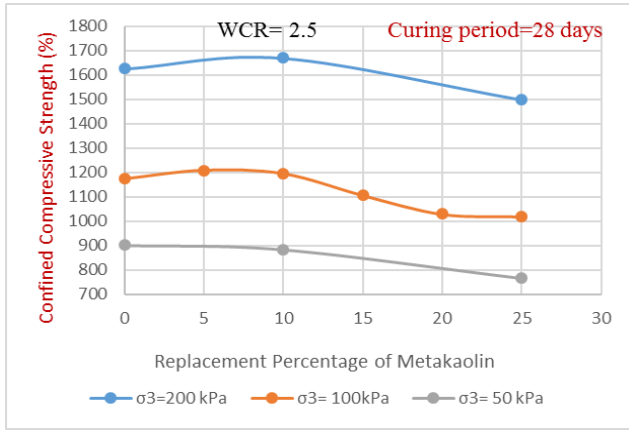
نتایج وبحث

به‌منظور بررسی رفتار تنش-تغییرشکل خاک ماسه‌ای تزریق شده، نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دستگاه سه‌محوری آزمایش شد. در این آزمایش‌ها متاکائولین با درصدهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان در دوغاب استفاده شد. نمونه‌ها تحت سه تنش همه‌جانبه ۵۰ ، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال و در شرایط کرنش کنترل شده و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تحت برش قرار گرفتند. درصد رطوبت نمونه‌ها بعد از اتمام آزمایش مطابق با ASTM D2216 اندازه‌گیری شد که به‌طور میانگین برای تمامی نمونه‌ها ۲±۱۲ درصد به‌دست آمد. برای هر آزمایش مقاومت حداکثر و کرنش محوری نظیر آن از منحنی‌های تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری برداشت شد. هم‌چنین روند کاهش مقاومت در مرحلهٔ نرم شوندگی کرنشی برای بیان رفتار بعد از گسیختگی با تعریف یک شیب متوسط در این ناحیه به نام مدول نرم‌شوندگی ارائه شد.

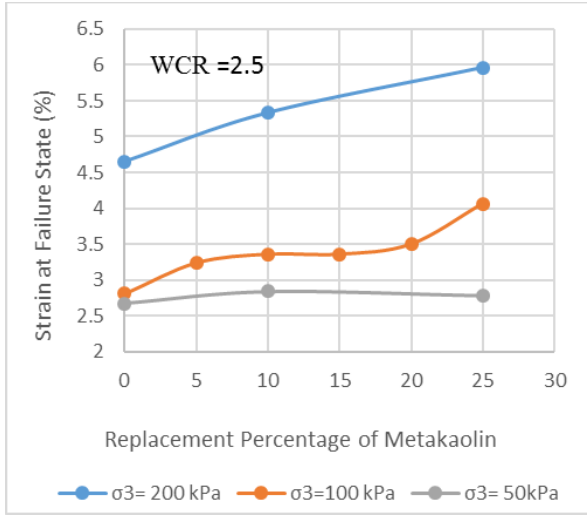


شکل ۷. نمونه‌ای از منحنی تنش-کرنش و تعریف تنش انحرافی حداکثر، کرنش محوری نظیر آن و مدول نرم‌شوندگی

در شکل ۷ یک نمونه از منحنی‌های تنش-کرنش ارائه شده است که در آن موقعیت مقاومت حداکثر و کرنش نظیر آن و مدول نرم‌شوندگی کرنشی نشان داده شده است. در شکل‌های ۸ و ۹ تأثیر جای‌گزینی متاکائولین به‌جای بخشی از سیمان بر مقاومت فشاری حداکثر و کرنش محوری نظیر نقطه گسیختگی برای نمونه‌های با درصدهای مختلف متاکائولین نشان داده شده است.



شکل ۸. درصد متاکائولین در دوغاب جای‌گزین بخشی از سیمان



شکل ۹. تأثیر متاکائولین بر کرنش محوری نظیر گسیختگی

در حالت اعمال تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال با جای‌گزین کردن تا ۱۰٪ از سیمانِ دوغاب با متاکائولین، مقاومت فشاری حداکثر نمونه‌ها تقریباً ثابت و مقدار کرنش نظیر حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌ها ($\varepsilon_{q_{max}}$) ٦ درصد افزایش یافت. در ادامه روند جای‌گزینی سیمان با متاکائولین به مقدار ۲۵ درصد، مقاومت فشاری حداکثر نمونه‌ها در مقایسه با حالت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

اولیه (سیمان خالص) به‌میزان ۱۷ درصد کاهش پیدا کرد. در مقابل، مقدار کرنش در مقاومت حداکثر نمونه‌ها در این حالت نسبت به حالت اولیه ٤ درصد افزایش یافت.

در حالت اعمال تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، با جای‌گزین کردن تا ۱۰٪ از سیمانِ دوغاب با متاکائولین، میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها تقریباً ثابت و مقدار کرنش در مقاومت حداکثر نمونه‌ها ۱۸ درصد افزایش یافت. در ادامه روند جای‌گزینی سیمان با متاکائولین به مقدار ۲۰ درصد، مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به حالت اولیه با شیب ملایم تا حدود ۱۵ درصد کاهش پیدا کرد. با این همه در محدودهٔ ۲۰ تا ۲۵ درصد روند کاهش مقاومت کند شده که این می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند اثرات تحکیم نمونه طی افزایش بیش‌تر متاکائولین باشد. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود در محدودهٔ ۲۰ تا ۲۵ درصد متاکائولین مقدار کرنش در مقاومت حداکثر نمونه‌ها به‌میزان متوسط ٤۰ ٪ افزایش یافته است که حکایت از شکل‌پذیر شدن بیش‌تر نمونه دارد.

در حالت اعمال تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال با جای‌گزین کردن ۱۰٪ از سیمانِ دوغاب با متاکائولین، مقاومت فشاری و کرنش نظیر حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌ها ($\varepsilon_{q_{max}}$) به‌ترتیب با افزایش تقریبی ۵ و ١٤ درصد رو به‌رو شدند. با افزایش جای‌گزینی سیمان با متاکائولین به مقدار ۲۵ درصد، مقاومت نمونه‌ها نسبت به حالت پایه به‌میزان ۸ درصد کاهش پیدا کرد، ولی $\varepsilon_{q_{max}}$ نمونه‌ها به میزان ۲۸ درصد افزایش یافت. به‌طورکلی افزایش تنش همه‌جانبه سبب افزایش مقاومت فشاری و $\varepsilon_{q_{max}}$ و نرم‌تر شدن رفتار پس از گسیختگی نمونه‌ها شد. این روند به‌صورتی است که وقتی تنش همه‌جانبه از ۵۰ به ۲۰۰ کیلوپاسکال افزایش یافت، مقاومت حداکثر و $\varepsilon_{q_{max}}$ در نمونه‌ها به‌ترتیب به‌میزان تقریبی ۸۵ و ۵۰ درصد در همه حالت‌ها افزایش پیدا کرد. این مطلب نشان می‌دهد که در صورت استفاده از این نوع دوغاب‌ها در عملیات تزریق می‌توان با بیش‌تر شدن عمق خاک از درصد متاکائولین بسیار بیش‌تر و نسبت آب به ترکیب سیمان و متاکائولن بیش‌تری استفاده کرد. این نتایج در تحقیقات دانو و همکاران [۱] نیز مشاهده شده است. نتایج حاصل نشان‌دهندهٔ تأثیر تنش محصورکننده بر مقاومت فشاری خاک تزریق شده است. چنین جنبه‌ای از رفتار تنش–تغییرشکل با آزمایش محصورنشده (تک‌محوری) که در بسیاری از تحقیقات استفاده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

شده است، قابل بیان نیست. هم‌چنین نتایج نشان داد که در همه حالت‌ها، افزایش تنش همه‌جانبه تغییر معناداری در مدول سختی اولیه نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند.

تأثیر نسبت آب به ترکیب سیمان و متاکائولن

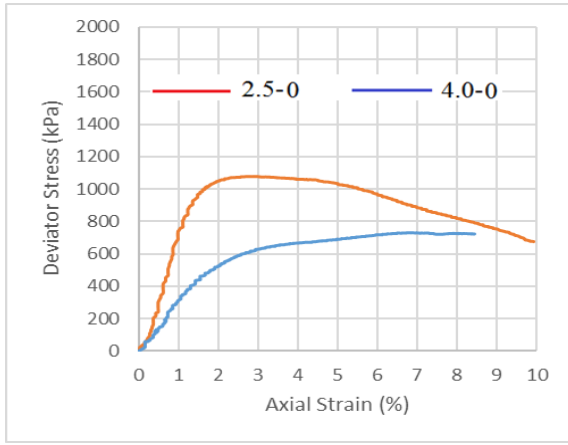
برای بررسی اثر غلظت دوغاب در رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای تزریق شده، نمونه‌هایی با دوغاب‌های ۰-٤، ۱۰-٤ و ۲۵-٤ مورد تزریق قرار گرفتند. نمونه‌ها پس از عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز، تحت آزمایش سه‌محوری با تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال و سرعت بارگذاری یک میلی متر بر دقیقه قرار داده شدند. درصد رطوبت نمونه‌ها بعد از اتمام آزمایش مطابق با ASTM D2216 اندازه‌گیری شد. میانگین درصد رطوبت نمونه‌ها ۱±۱۳ درصد بود. در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از نمونه‌های تزریق شده با WCRهای ۲/۵ و ٤ با تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال برای مقایسه با یک‌دیگر ارائه شده است. ملاحظه می‌شود بیش‌تر شدن WCR از ۲/۵ به ٤ منجر به کاهش مقاومت فشاری و سختی، افزایش $\varepsilon_{q_{max}}$ و نرم‌تر شدن رفتار پس از گسیختگی نمونه‌ها شده است. دلیل این امر را می‌توان کاهش چسبندگی خاک ماسه‌ای تزریق شده، در نتیجه کم‌تر شدن مواد چسباننده در دوغاب دانست. در آزمایش‌های صورت گرفته مشاهده شد افزایش WCR سبب تغییر در مد گسیختگی از حالت گوه‌ای‌شکل به خمره‌ای شکل می‌شود. از دیگر نتایج به‌دست آمده در این آزمایش می‌توان به تأثیر درصدهای مختلف سیمان جای‌گزین شده با متاکائولین در رفتار مکانیکی خاک تزریق شده با دوغاب WCR برابر با ٤ اشاره کرد. در این حالت تغییرات رفتار مکانیکی نمونه‌ها روند متفاوتی با نمونه‌های تزریق شده با دوغاب WCR برابر با ۲/۵ از خود نشان دادند. هنگامی که جای‌گزینی سیمان با متاکائولین در دوغاب از ۰ به ۲۵ درصد افزایش داده شد، مقاومت فشاری نمونه‌ها ۷ درصد کاهش یافت. این در حالی است که مقدار کرنش در مقاومت حداکثر نمونه‌ها با افزودن متاکائولین تغییری نکرد.

بررسی رفتار پس از مقاومت حداکثر

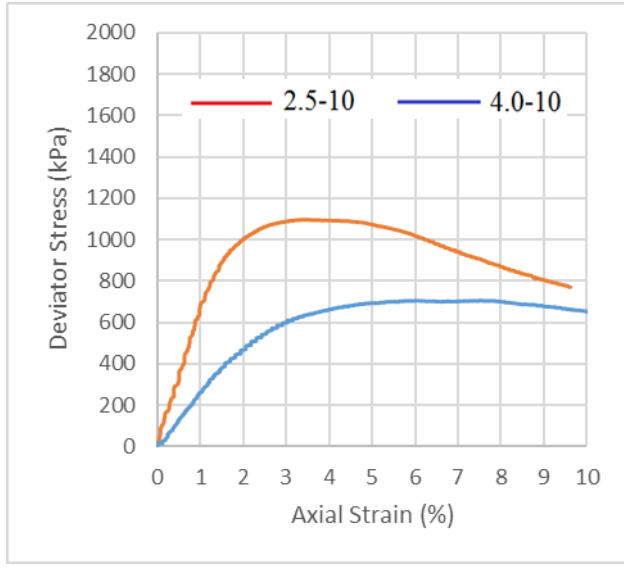
به‌منظور بررسی اثر افزودن متاکائولین به دوغاب در رفتار پس از گسیختگی خاک ماسه‌ای تزریق شده، مدول نرم شوندگی کرنشی برای نمونه‌های مختلف تعیین شد. نتایج حاصل در جدول ۵ ارائه شده است. با مقایسهٔ نتایج می‌توان نتیجه گرفت که با اضافه شدن

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

درصد جای‌گزینی سیمان با متاکائولین در دوغاب، مقاومت فشاری نمونه‌ها بعد از شکست با **شیب کم‌تری نسبت به حالت اولیه (سیمان خالص) کاهش می‌یابد.**

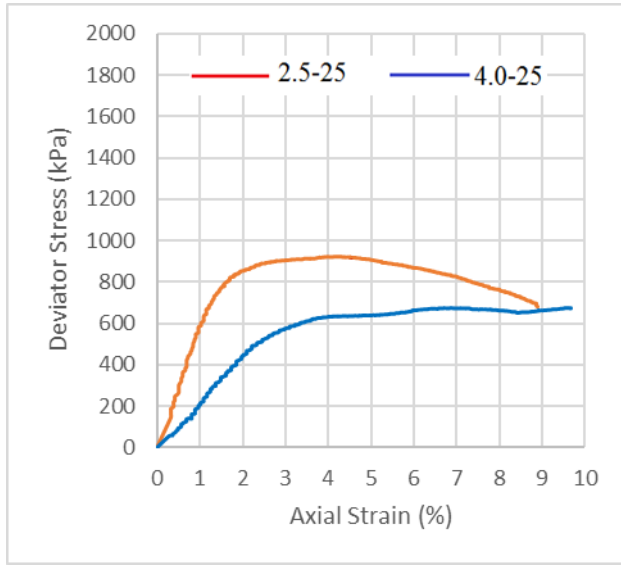


شکل ۱۰. تأثیر نسبت آب به سیمان در حالت صفر درصد متاکائولین



شکل ۱۱. تأثیر نسبت آب به سیمان در حالت ۱۰ درصد متاکائولین

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]



شکل ۱۲. تأثیر نسبت آب به سیمان در حالت ۲۵ درصد متاکائولین

جدول ۵. تأثیر متاکائولن بر رفتار بعد از مقاومت حداکثر خاک ماسه‌ای تزریق شده

$\sigma_3 = 50$kPa		$\sigma_3 = 100$kPa		$\sigma_3 = 200$kPa	
درصد متاکائولین	مدول نرم‌شوندگی (MPa)	درصد متاکائولین	مدول نرم‌شوندگی (MPa)	درصد متاکائولین	مدول نرم‌شوندگی (MPa)
۰	۷/۲۷	۰	۵/۵۵	۰	۵/۵۵
۱۰	٤/٦٤	۱۰	۵/۱۹	۱۰	٤/۳
۲۵	٤/۱۱	۲۵	٤/۸	۲۵	۱/۱۸

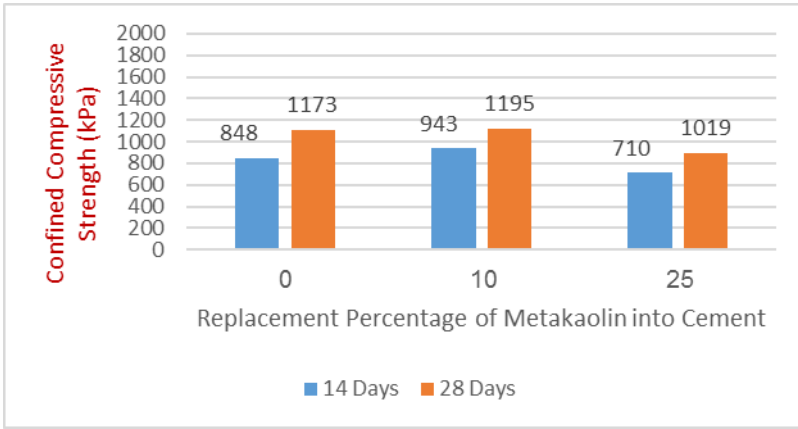
به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت استفاده از متاکائولین سبب کاهش مدول نرم‌شوندگی پس از گسیختگی و به‌عبارت دیگر سبب نرم‌تر شدن مکانیزم شکست خاک تزریق شده می‌شود. یکی از علت‌های این مسئله را می‌توان کم‌تر شدن مقدار چسبندگی نمونه‌های تزریق شده در مقایسه با استفاده سیمان خالص در دوغاب دانست.

تأثیر زمان عمل‌آوری بر رفتار مقاومت خاک ماسه‌ای تزریق شده

با گذشت هر چه بیش‌تر زمان، به‌دلیل کامل‌تر شدن فرآیند هیدراسیون سیمان و کاهش جزئی درصد رطوبت، اسکلت نمونه‌ها صلب‌تر می‌شود. برای شناخت بیش‌تر از تأثیر استفاده از متاکائولین در روند تکامل مقاومت خاک ماسه‌ای تزریق شده، نمونه‌هایی بعد از ۱٤ روز

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

عمل‌آوری برای مقایسه با مقاومت ۲۸ روزه خود مورد آزمایش سه محوری قرار گرفتند. در این آزمایش از دوغاب‌های ۰–۲/۵ و ۱۰–۲/۵ و ۲۵–۲/۵ استفاده شد. میانگین درصد رطوبت نمونه‌ها بعد از اتمام آزمایش مطابق با ASTM D2216 برابر با ۱±۱۵ درصد بود. نتایج این آزمایش در شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۳. تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های تزریق شده تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال

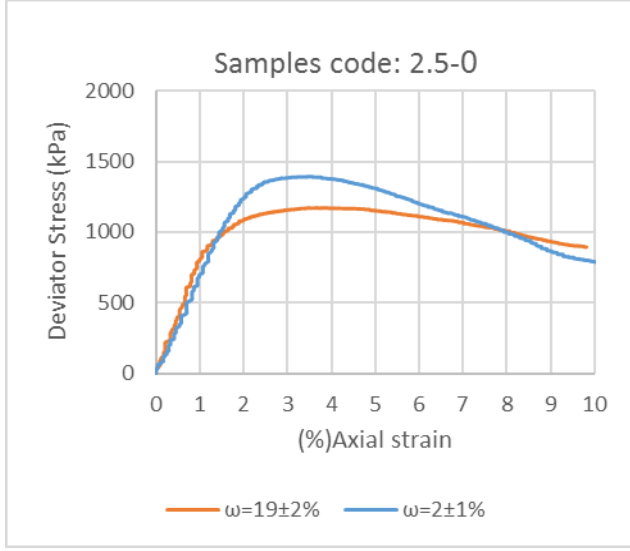
به طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که در ١٤ روز اولیه، نمونه‌ها مقاومتی حدود ۷۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه خود را به دست می‌آورند.

تأثیر درصد رطوبت بعد از عمل آوری بر رفتار مکانیکی خاک تزریق شده

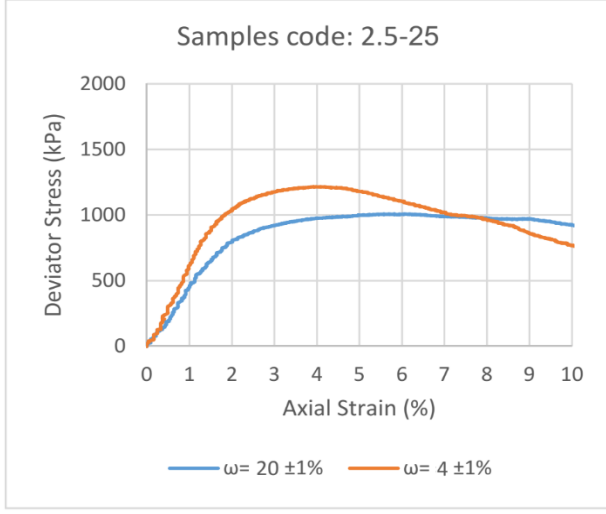
یکی از پارامترهای مهم در بررسی خاک تزریق شده، پایداری آن در شرایط محیطی مختلف از قبیل خشک، مرطوب و اشباع است. بدین منظور باید از پایداری خاک تزریق شده تحت شرایط مختلف اطمینان حاصل نمود. در این بررسی در انجام فرآیند تزریق از دوغاب‌های ۰–۲/۵ و ۲۵–۲/۵ استفاده شد. پس از عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز، تعدادی از نمونه‌ها به‌مدت ٦ روز در معرض هوای آزاد و تعداد دیگر به‌منظور اشباع شدن در داخل مخزن آب قرار داده شدند. بعد از گذشت ٦ روز، نمونه‌ها تحت آزمایش سه‌محوری با تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال قرار گرفتند. پس از اتمام آزمایش درصد رطوبت نمونه‌ها مطابق با ASTM D2166 اندازه‌گیری شد. مقادیر درصد رطوبت **(w)** برای نمونه ها در حالت اول

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

کم‌تر از ٤ درصد و در حالت دوم بیش‌تر از ۱۷ درصد به‌دست آمد. دو نمونه از منحنی‌های تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری برای دوغاب های ۰-۲/۵ و ۲۵-۲/۵ در شکل‌های ۱٤ و ۱۵ و سایر اطلاعات مرتبط در جدول ٦ ارائه شده است.



شکل ۱٤. تأثیر میزان رطوبت بعد از عمل آوری برای نمونه‌های تزریق شده با دوغاب ۰-۲/۵



شکل ۱۵. تأثیر میزان زطوبت بعد از عمل‌آوری برای نمونه‌های تزریق شده با دوغاب ۲۵-۲/۵

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

در جدول ٦ اطلاعات مندرج در دو سطر آخر که با ستاره مشخص شده‌اند، مربوط به نمونه‌هایی هستند که بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری بلافاصله تحت برش قرار گرفته‌اند. با توجه به شکل‌های ١٤ و ١٥ می‌توان دریافت که هم وضعیت تنش در حالت حداکثر و هم رفتار بعد از آن متأثر از میزان رطوبت نمونه‌های تزریق شده است. به‌عبارت دیگر مقاومت فشاری محصور شده برای نمونه‌هایی که بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری به‌مدت ٦ روز در معرض هوای آزاد بوده‌اند نسبت به نمونه‌های مشابه که ٦ روز در مخزن آب بوده‌اند برای هر دو دوغاب ۰ و ۲۵ درصد حدود ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است. هر چند که رفتار بعد از نقطه حداکثر برای نمونه‌های نگه‌داری شده در مخزن آب نسبت به حالت دیگر مدول نرم‌شوندگی کم‌تری دارد. با مراجعه به جدول ٦ دیده می‌شود که کرنش نظیر تنش انحرافی حداکثر برای دوغاب با صفر درصد متاکائولین در دو حالت نگه‌داری بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری تغییر چندانی نداشته است. با این همه برای دوغاب با ۲۵ درصد متاکائولین در حالت نگه‌داری در مخزن آب حدود ۵۰ درصد افزایش در کرنش نظیر گسیختگی مشاهده می‌شود.

جدول ٦. مقادیر مقاومت فشاری، کرنش نظیر مقاومت حداکثر و مدول نرم شوندگی تابعی از رطوبت

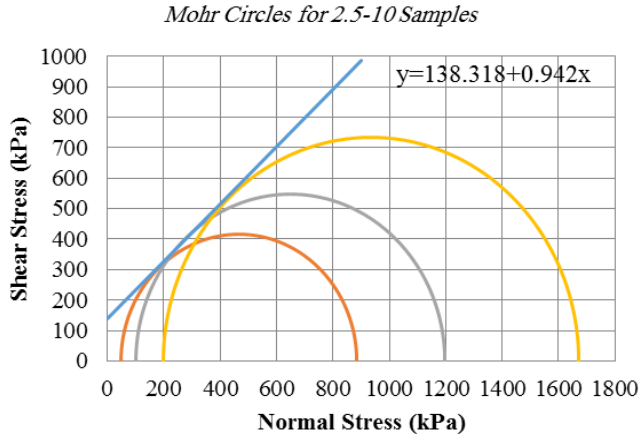
نمونه	تنش محصورکننده(kPa)	رطوبت (%)	$\varepsilon_{q_{max}}$ (%)	تنش انحرافی حداکثر(kPa)	مدول نرم شوندگی (MPa)
۲/۵-۰	۱۰۰	۲±۱	۳/٤٥	۱۳۹٦	٦/۹
		۱۹±۲	۳/۸۸	۱۱۷۱	٤/۹٤
۲/۵-۲۵		٤±۱	۳/۹٦	۱۲۱٤	٦/۰۲
		۲۰±۱	۵/٦۹	۱۰۰۷	۱/۱٤
*۲/۵-۰		۱۲±۲	۲/۸۱	۱۰۷٤	۵/۵۵
*۲/۵-۲۵		۱۲±۲	٤/۰٦	۹۱۹	٤/۸

مقایسهٔ مقادیر مقاومت فشاری در دو حالت ذکر شده با حالتی که نمونه‌ها بلافاصله بعد از ۲۸ روز شکسته شده اند نشان می‌دهد که برای دوغاب صفر درصد متاکائولین، با نگه‌داری نمونه‌ها در هوای آزاد افزایش ۳۰ درصدی و با نگه‌داری نمونه‌ها در آب افزایش ۱۰ درصدی در مقاومت حاصل می‌شود. مقادیر افزایش مقاومت برای دوغاب با ۲۵ درصد متاکائولین

به‌ترتیب ۳۲ و ۱۰ درصد است. رفتار پس از گسیختگی آن‌ها به‌طورکلی ملایم‌تر شد و مقدار کرنش نظیر مقاومت حداکثر نمونه‌ها فقط در حالت استفاده از دوغاب ۲۵-۲/۵ نسبت به حالت اولیه از خود افزایش ۱۵ درصدی نشان داد. این افزایش مقاومت‌ها برای نمونه‌هایی که بعد از عمل‌آوری ۲۸ روزه به‌مدت ٦ روز در آب نگه‌داری شده‌اند را می‌توان پیشرفت و کامل‌تر شدن فرآیند هیدراسیون سیمان و متاکائولین در حضور آب مرتبط دانست. از طرف دیگر برای نمونه‌های نگه‌داری شده در معرض هوای آزاد این‌گونه برداشت می‌شود که خاک تزریق شده با دوغاب‌های حاوی سیمان و متاکائولین مکش‌پذیر هستند و مکش سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها و تردتر شدن رفتار بعد از گسیختگی می‌شود. میزان مکش‌پذیری خاک تزریق شده با حضور ماده افزودنی متاکائولین مقداری بیش‌تر می‌شود.

اثر نوع دوغاب در میزان چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک تزریق شده

در این بررسی چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک‌های تزریق شده با دوغاب‌های ۰-۲/۵، ۱۰-۲/۵ و ۲۵-۲/۵ بررسی شد. با رسم دوایر مور و پوش گسیختگی مقادیر چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی برای نمونه‌ها تعیین شدند. نمونه ای از نتایج در شکل ۱٦ ارائه شده است. هم‌چنین مقادیر چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی برای نمونه‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است.



شکل ۱٦. دوایر مور و پوش گسیختگی خاک ماسه‌ای تزریق شده با دوغاب ۱۰-۲/۵

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

جدول ۷. مقادیر چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی برای نمونه های مختلف

نمونه	چسبندگی(kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۲/۵-۰	۱۵۱/۳۱	٤۱/٤۹
۲/۵-۱۰	۳۱۸/۱۳۸	٤۳/۳
۲/۵-۲۵	۱۱۷/۹۹	٤۱/٤۷

نتایج نشان می‌دهد با عمل تزریق، چسبندگی خاک ماسه‌ای را که در واقعیت بسیار ناچیز است، افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. هم‌چنین با مقایسه نمونه‌های تزریق شده با دوغاب‌های مختلف، طبق نتایج مشخص شد که با افزایش درصد متاکائولین به سیمان، مقدار چسبندگی نمونه کاهش می‌یابد؛ اما تأثیر معناداری بر تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی ایجاد نمی‌شود. این مکانیزم رفتار در تحقیقی که دانو و همکاران [۲] بر روی خاک ماسه‌ای تزریق شده با دوغاب سیمانی انجام دادند نیز مشاهده شده است.

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر افزدون متاکائولین به دوغاب سیمان در رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای تزریق شده انجام شده است. در این راستا برای انجام تزریق یک مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. در این تحقیق ابتدا آزمایش- های اولیه شامل آزمایش‌های تعیین خصوصیات مصالح مصرفی و هم‌چنین آزمایش‌های آب‌اندازی برای بررسی ته‌نشینی در دوغاب و آزمایش پراش پرتو ایکس برای اطلاع از واکنش‌پذیری سیمان با متاکائولین اجرا شد. برای بررسی رفتار مکانیکی خاک تزریق شده نیز بیش از ۱۵۰ نمونه، با دستگاه سه محوری آزمایش شد. در مجموع نتایج مهم حاصل کار حاضر بدین‌شرح است:

- آزمایش آب اندازی نشان داد که افزودن متاکائولین به دوغاب‌های سیمانی-بنتونیتی موجب پایداری دوغاب و جلوگیری از رسوب گذاری می‌شود.
- در آزمایش پراش پرتو ایکس مشخص شد که متاکائولین و سیمان در حضور آب با یک‌دیگر در همان لحظات اولیهٔ اختلاط واکنش می‌دهند.
- با جای‌گزین کردن ۱۰٪ از سیمان دوغاب با متاکائولین می‌توان با حفظ مقاومت فشاری، شکل‌پذیری خاک تزریق شده را افزایش داد. افزودن مقادیر بیش‌تر متاکائولین شکل‌پذیری خاک را افزایش می‌دهد اما از میزان مقاومت خاک تزریق شده می‌کاهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

اثر شکل‌پذیری به‌ویژه در دوغاب‌های با WCRهای کم و در تنش‌های همه جانبه بالاتر محسوس‌تر می‌شود.

- در تنش‌های همه جانبه بالاتر می‌توان از مقادیر بیش‌تر متاکائولین در دوغاب استفاده کرد. استفاده از متاکائولین سبب نرم‌تر شدن رفتار پس از گسیختگی می‌شود.
- رقیق‌تر شدن غلظت دوغاب تزریقی سبب کاهش مقاومت فشاری و سختی و هم‌چنین نرم‌تر شدن رفتار پس از گسیختگی خاک تزریق شده می‌شود.
- افزایش زمان عمل آوری سبب افزایش مقاومت خاک تزریق شده می‌شود.
- افزایش تنش همه جانبه سبب افزایش مقاومت فشاری، افزایش شکل‌پذیری و نرم‌تر شدن رفتار پس از گسیختگی خاک تزریق شده با دوغاب های حاوی سیمان و متاکائولین می شود.
- تغییرات درصد رطوبت سبب تغییر در رفتار پس از گسیختگی خاک‌های تزریق شده با دوغاب‌های حاوی سیمان و متاکائولین می‌شود به‌گونه‌ای که کاهش درصد رطوبت سبب ترد شدن رفتار پس از گسیختگی و افزایش درصد رطوبت سبب نرم‌تر شدن رفتار پس از گسیختگی می‌شود.
- تزریق دوغاب در خاک ماسه‌ای سبب بهبود معنی‌داری در مشخصات مکانیکی خاک از جمله چسبندگی آن می‌شود. با افزایش درصد متاکائولین به سیمان دوغاب با تغییرات کمی در زاویهٔ اصطکاک داخلی ماسه تزریق شده حاصل می‌شود اما مقدار چسبندگی خاک کاهش می‌یابد.

منابع

1. Abraham A., "Effect of Initial Moisture State on the Engineering Properties of Micro-fine Cement Grouted Sands: A Thesis (Doctoral dissertation", University of Alabama in Huntsville) (2006).
2. Dano C., Hicher P. Y., Tailliez S., "Engineering properties of grouted sands", Journal of Geotechnical and Geo-environmental engineering, 130 (3) (2004) 328-338

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

3. Pantazopoulos I. A., Markou I. N., Atmatzidis D. K., Droudakis A. I., "Triaxial Compression Testing of Micro-fine Cement Grouted Sands", In Grouting and Deep Mixing 2012, ASCE (2012) 1721-1730.
4. Schwarz L. G., Chirumalla M., "Effect of injection pressure on permeability and strength of micro-fine cement grouted sand", Proceedings of geo-denver (2007).
5. Ribay E., Djeran-Maigre I., Cabrillac R., Gouvenot D., "Factors affecting the creep behavior of grouted sand", Journal of geotechnical and geo-environmental engineering, 132 (4) (2006) 488-500.
6. Kirzek R. J., Benltayf M. A., Atmatzidis D. K., "Effective stress-strain-strength behavior of silicate-grouted sand", In Grouting in Geotechnical Engineering. ASCE (1982) 482-497.
7. Ozgurel H. G., Vipulanandan C., "Effect of grain size and distribution on permeability and mechanical behavior of acrylamide grouted sand", Journal of geotechnical and geo-environmental engineering, 131 (12) (2005) 1457-1465.
8. Siddique R., Klaus J., "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review", Applied Clay Science, 43 (3) (2009) 392-400.
9. Vipulanandan C., Sunder S., "Effects of Meta-Kaolin Clay on the Working and Strength Properties of Cement Grouts", In Grouting and Deep Mixing 2012, ASCE (2012) 1739-1747.
10. Han J., Shui Z., Wang G., "Research on the reactivity of metakaolin with different grade", Bridges, 10 (9780784412671.0015) (2014) 365.
11. Kolovos K. G., Asteris P. G., Cotsovos D. M., Badogiannis E., Tsivilis S., "Mechanical properties of soilcrete mixtures modified with metakaolin", Construction and Building Materials, 47 (2013) 1026-1036.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]

12. Sonebi M., Lachemi M., Hossain K. M. A., "Optimization of rheological parameters and mechanical properties of superplasticizer cement grouts containing metakaolin and viscositymodifying admixture", Construction and Building Materials, 38 (2013) 126-138.
13. Vavricuk A., Bokan-Bosiljkov V., Kramar S., "The influence of metakaolin on the properties of natural hydraulic lime-based grouts for historic masonry repair", Construction and Building Materials, 172, (2018) 706-716.
14. Kolovos K. G., Asteris P. G., Tsivilis S., "Properties of sandcrete mixtures modified with metakaolin", European Journal of Environmental and Civil Engineering, Publishedonline, http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2016.1246690 (2016).
15. Asteris P. G., Kolovos K. G., Athanasopoulous A., Plevris V., Konstantakatos G., "Investigation of the mechanical behavior of metakaolin-based sandcrete mixtures", European Journal of Environmental and Civil Engineering, Published online, http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2016.1277373 (2017).
16. Ata A., Vipulanandan C., "Factors affecting mechanical and creep properties of silicate-grouted sands", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 125 (10) (1999) 868-876.
17. Gonzalez H. A., Vipulanandan C., "Behavior of a sodium silicate grouted sand", Grouting for Ground Improvement, 168 (2007) 1-10.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.1.6]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.149]