تزریق‌پذیری خاک ماسه‌ای به‌وسیلهٔ دوغاب بنتونیت

امیر نوری، رضا ضیایی مؤید*، محمود حسنلوراد؛
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکدهٔ مهندسی عمران

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

چکیده

در مقاله حاضر نتایج پژوهش‌*ای* آزمایشگاهی در خصوص مقدار نفوذپذیری دوغاب بنتونیت در داخل ماسه تمیز ارائه شده است. وجود خاک رس بنتوینت در بافت خاک به‌واسطهٔ تزریق آن در ماسه، منجر به تغییر در خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی ماسه می‌شود. در این تحقیق با استفاده از دستگاه تزریق و با تغییر فشار نفوذ، دوغاب بنتونیت با غلظت‌های مختلف در داخل ماسه با دانه‌بندی مختلف تزریق شده است و تغییرات طول نفوذ دوغاب بحث و بررسی شده است. بر پایهٔ آزمایش‌های انجام شده، مقدار نفوذ در فشارهای ثابت با دانه‌بندی رابطهٔ مستقیم و خطی دارد. مقدار غلظت بنتونیت در دوغاب تزریقی نیز به‌واسطهٔ افزایش غلظت و هم‌چنین تأثیر ویسکوزیته نمونه از عوامل مهم دیگری در تعیین طول نفوذ دوغاب در ماسهاست. البته می‌توان با افزایش فشار تزریق تأثیر افزایش غلظت بنتونیت را جبران کرد و دوغاب را تا عمق مورد نظر تزریق کرد. از جمله عوامل تأثیرگذار دیگر در طول نفوذ دوغاب، سطح مخصوص و ظرفیت تبادل کاتیونی ماده تزریق‌شونده است. با مقایسه تزریق دوغاب کائولینیت در ماسه مشاهده شد هرچه مقدار سطح مخصوص و ظرفیت تبادل کاتیونی ماده تزریقی کاهش یابد مقدار نفوذ دوغاب در ماسه افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تزریق، بنتونیت، نفوذپذیری، ماسه فیروزکوه

* **نویسنده مسئول** ziaie@eng.ikiu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

مقدمه

تزریق یکی از روش‌های بهبود خواص مکانیکی خاک‌های سست است که طی آن ماده تزریقی به خلل و فرج، درز و شکاف و یا حفره های تشکیلات سنگی و خاکی تزریق شده و باعث بهبود مشخصات توده می‌شود. به‌طوری‌که در اثر آن نفوذپذیری لایه‌ها کم، مقاومت لایه‌ها زیاد و شکل‌پذیری آن‌ها کم می‌شود. ویژگی مهم استفاده از روش تزریق در به‌سازی تودهٔ خاک، در زیر سازه‌های موجود است که در پروژه‌های مختلف ساختمانی، راه‌سازی و راه آهن در حال بهره‌برداری استفاده می‌شود [٤]. یکی از پدیده‌هایی که تزریق در آن مؤثر است کنترل روان‌گرایی در خاک‌های غیرچسبنده است. در چنین خاک‌هایی، به‌ویژه ماسهٔ ریز تا متوسط و یا حتی خاک ریزتر غیرپلاستیک، بارگذاری زهکشی نشده سیکلی، که می‌تواند در هنگام وقوع زلزله رخ دهد، ممکن است باعث شود تا فشار آب حفره‌ای بیش از حد از مقدار تنش مؤثر بکاهد و باعث شود که زمانی که تنش مؤثر به صفر نزدیک می‌شود روان‌گرایی رخ دهد [۱۸]. به‌منظور افزایش مقاومت خاک در برابر روان‌گرایی، خاک را می‌توان از طریق یکی از چهار روش متراکم کردن خاک سست، افزایش چسبندگی بین دانه‌های خاک، پایین بردن تراز آب‌های زیرزمینی و زهکشی اصلاح کرد [۱۱]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نفوذ بنتونیت به درون فضای منافذ ماسه، با افزایش چسبندگی خاک، مقاومت سیکلیکی ماسه را افزایش می‌دهد. در صورتی که زمان کافی از تزریق بنتونیت به داخل نمونه ماسه گذشته باشد، مقاومت روان‌گرایی بیش از پیش افزایش پیدا می‌کند [۹].

بنتونیت همواره به‌طور صنعتی در پروژه‌های مختلف عمرانی استفاده می‌شود. این ماده با توجه به هدایت هیدرولیکی کمی که دارد در مواردی مانند بستر دفن زباله، دیوارهای آببند و مخازن دفن باله‌های هسته‌ای استفاده می‌شود [١٤]. بر اساس آن‌چه در ادبیات آمده در تزریق بنتونیت در خاک ماسه‌ای، ضریب نفوذپذیری قبل از تزریق مقدار $۱,۱۲\times۱۰^{-۲}$ بوده است که بعد از تزریق به مقدار $۵,۲۲\times۱۰^{-۵}$ رسیده و حدود ۲۱۵ برابر کاهش دارد [۲]. به تازگی، محققان بسیاری به‌منظور بهبود عملکرد مهندسی خاک‌ها، استفاده از سیستم دوغاب بنتونیت را در تزریق به خاک‌های دانه‌ای تحت شرایط بارگذاری استاتیک و دینامیکی بررسی کرده‌اند [۷]،

[۹]، [۲۰]. پژوهش‌هایی در زمینهٔ ارزیابی مشخصات زهکشی نشده خاک ماسه که به‌وسیلهٔ دوغاب بنتونیت تزریق شده است انجام شده است [۱۵]. هم‌چنین پژوهش‌های دیگری در خصوص افزایش مقاومت روان‌گرایی خاک ماسه‌ای سست به‌وسیلهٔ تزریق دوغاب بنتونیت انجام شده است [۱۷]. در این عملکرد، دوغاب بنتونیت در خاک دانه‌ای سست اشباع با فشار کم و بدون اختلال در ساختار خاک تحت تزریق قرار می‌گیرد. با توجه به ماهیت تیکسوتروپی دوغاب بنتونیت، مادهٔ تزریق شده به‌حالت ساختارهای ژل مانند در داخل خلل و فرج خاک قرار می‌گیرد و منجر به افزایش مقاومت خاک در مقابل بارهای استاتیک و دینامیکی می‌شود. در حالی که برای دست‌یابی به خواص مهندسی مناسب در خاک دانه‌ای استفاده از دوغاب بنتونیت غلیظ مناسب است، غلظت‌های زیاد نفوذ بنتونیت را به‌دلیل نفوذپذیری کم خاک محدود می‌کند. به‌منظور غلبه بر این محدودیت، لازم است ویژگی‌های رئولوژیکی دوغاب مانند تنش تسلیم و ویسکوزیته اصلاح شوند تا از این طریق برای افزایش عمق نفوذ در ماسه اقدام عمل آید. محققان دیگری مشاهده کردند با کاهش ویسکوزیته در دوغاب سیمان با ابعاد میکرو، مقدار نفوذ آن در ستون ماسه‌ای به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد [۱٦].

به‌طورکلی دوغاب‌ها به دو دستهٔ دوغاب‌های همراه با دانه‌های معلق (دوغاب زبر) و دوغاب‌های محلول (دوغاب نرم) تقسیم می‌شوند. مخلوط آب و سیمان، رس، بنتونیت و غیره در دسته دوغاب‌های زبر قرار دارند. سیلیکات‌ها، لیگنوسولفونات، آمینوپلاست، آکریلامید، آکریلیت، پلی‌استر، پلی‌اوره اتان و برخی مواد شیمیایی دیگر به‌عنوان دوغاب‌های شیمیایی نرم معروفند [٦]. اختلاف اصلی بین دوغاب‌های شیمیایی نرم و زبر آن است که قابلیت نفوذ دوغاب‌های زبر تابعی از نسبت اندازهٔ ذرات به اندازهٔ حفره‌ها و ترک‌ها و هم‌چنین ویسکوزیته اولیهٔ آن است، در حالی‌که برای دوغاب‌های نرم، تابعی از ویسکوزیته اولیه و زمان ژل‌شدگی است [۱]. هم‌چنین محققان دیگری مشاهده کردند خصوصیات شیمیایی دوغاب در مقدار تزریق‌پذیری آن در خاک‌های دانه‌ای تأثیرگذار است [۲۰].

موضوع تزریق‌پذیری خاک‌های دانه‌ای سال‌هاست که بررسی شده است. در این زمینه تعدادی از محققان برخی از محدودیت‌های تزریق‌پذیری خاک‌ها را با توجه به اندازهٔ دانه‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

خاک ارائه کردند [۱۲]. محققان دیگری براساس اندازهٔ دانه خاک و سیمان مسئلهٔ تزریق‌پذیری را بررسی کردند، در حالی‌که آزمایش‌های با مقیاس بزرگ‌تر نشان می‌دهند که تزریق‌پذیری خاک‌های دانه‌ای متأثر از پارامترهای مختلفی از خاک و ماده تزریق است [۸]، [۱۳]. این پارامترها عبارتند از اندازهٔ دانه‌های خاک و مادهٔ سوسپانسیون تزریق، درصد ریزدانه (FC) خاک، فشار تزریق، دانسیتهٔ نسبی (Dr) خاک و نسبت آب به بنتونیت (یا ویسکوزیته) دوغاب. با بررسی خصوصیات مکانیکی خاک در اثر تزریق سیلیکات سدیم بر ماسه بابلسر مشاهده شده که تزریق این دوغاب با غلظت‌های زیاد حدود ۳۰ ٪ باعث ایجاد چسبندگی در خاک شده و در بالاترین حالت به حدود ۷۰ کیلوپاسکال می‌رسد و تأثیر چندانی هم بر زاویهٔ اصطکاک داخلی ندارد [۳].

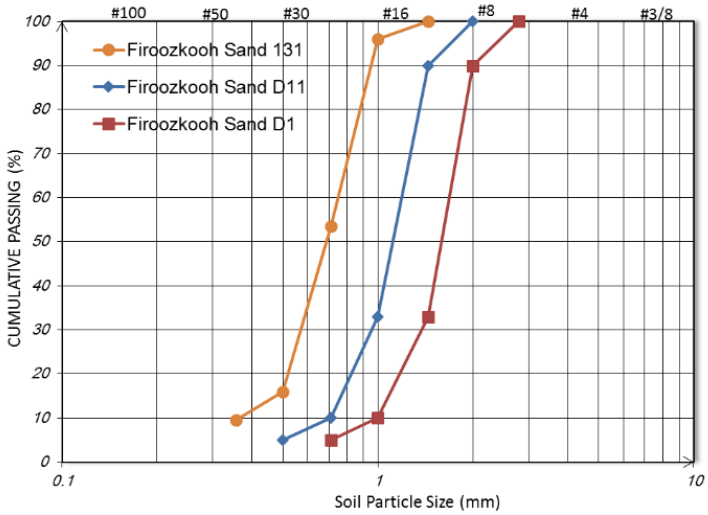
در مقاله حاضر با توجه نبودن بررسی‌های انجام شده بر سرعت نفوذ بنتونیت در ماسه‌ها و هم‌چنین نقش مؤثر بنتونیت در خصوصیات مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای، مقدار نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای به‌وسیلهٔ بنتونیت تحت اثر عوامل تغییر دانه‌بندی، غلظت بنتونیت در سوسپانسیون تزریق و تراکم ماسه بررسی می‌شود. هم‌چنین یکی از اهداف پژوهش انجام شده تعیین میزان کمی درصد دوغاب بنتونیت و هم‌چنین نوع و غلظت بهینهٔ آن برای تزریق در خاک ماسهٔ فیروزکوه بوده است که به‌عنوان پیش‌زمینه‌ای برای انجام پژوهش‌های آتی بر به‌سازی پتانسیل روان‌گرایی خاک مذکور در اثر تزریق بنتونیت استفاده می‌شود.

ویژگی‌های ماسه استفاده شده

در بررسی حاضر، از ماسه سیلیسی شکستهٔ فیروزکوه با نام تجاری ماسه ۱۳۱، ماسه D11 و ماسه D1 برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. این ماسه‌ها دارای رنگ زرد مایل به طلایی است و دانه‌بندی یک‌نواختی دارد. برای بررسی اثر پارامتر دانه‌بندی بر میزان تزریق‌پذیری ماسه با استفاده از دوغاب شیمیایی، سه نوع دانه‌بندی مختلف درشت (رد شده از الک شمارهٔ ٤ و مانده روی الک شمارهٔ ۵۰، ماسهٔ D1)، متوسط (رد شده از الک شمارهٔ ۸ و مانده روی الک شمارهٔ ۱۰۰– ماسهٔ D11)، ریز (بین الک شمارهٔ ۳۰ و ۲۰۰–ماسه ۱۳۱) استفاده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

شد که در ادامه به اختصار ماسه درشت، متوسط و ریز نامیده می‌شوند. در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی ماسه‌های استفاده شده در آزمایش‌ها نشان داده شده است. در جدول ۱ نیز مشخصات هر یک از این ماسه‌ها ارائه شده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ماسه‌های استفاده شده

جدول ۱. مشخصات ماسه‌های استفاده شده در این تحقیق

نام ماسه	ماسه فیروزکوه 131	ماسه فیروزکوه D11	ماسه فیروزکوه D1
D_{50} (mm)	۰/۷	۱/۱	۱/۶
C_u	۲/۱۴	۱/۵۷	۱/۸
C_c	۱/۰۹	۱/۱۷	۱/۰۹
G_s	۲/۶۵	۲/۶۵	۲/۶۵
e_{max}	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۹
e_{min}	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۹
γ_{min} (ton/m^3)	۱/۳۷	۱/۳۵	۱/۳۳
γ_{max} (ton/m^3)	۱/۶۲	۱/۶۰	۱/۵۷

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

دستگاه تزریق

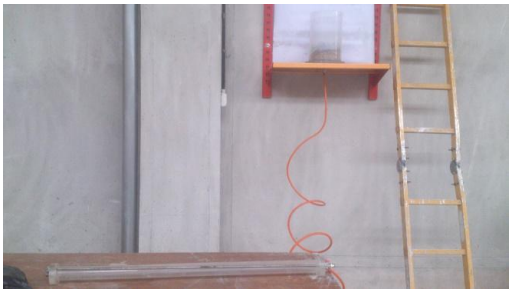
برای انجام عملیات تزریق در آزمایشگاه، از دستگاهی طبق شکل ۲ استفاده شد. دستگاه تزریق متشکل از یک مخزن، قالب استوانه‌ای به طول ۱ متر برای ساخت و تزریق نمونه‌ها و سیستم لوله کشی برای ورود و خروج دوغاب از نمونه است. جنس قالب‌ها و مخزن از نوعی پلاستیک شفاف فشرده و لوله‌ها از جنس پلاستیک شفاف انعطاف‌پذیر است. به‌نحوی که در حین انجام تزریق، روند کار دیده می‌شود. محل قرارگیری مخزن به‌گونه‌ای است که قابلیت تنظیم ارتفاع برای ایجاد فشارهای مختلف تزریق دارد. حداقل ارتفاع قابل تنظیم ۱ متر و حداکثر مقدار آن نیز ۳/۲ متر است و هر گام تغییر ارتفاع برابر با ۳۰ سانتی‌متر است. برای جلوگیری از افت تراز فشار در ارتفاع نمونه، استوانه نمونه در حالت افقی قرار گرفته و تزریق گردید.

ساخت نمونه‌ها

نمونه‌ها به‌روش ریزش خشک و با دانسیته نسبی‌های ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد ساخته شدند. در این روش ابتدا خاک در آون خشک شده و سپس با استفاده از یک قیف استوانه‌ای شکل خیلی آرام و با حرکت مارپیچ و سرعت ثابت، از ارتفاع نزدیک صفر به داخل قالب ریخته می‌شود (قطر خروجی قیف ۱۲ میلی‌متر است). سپس با زدن ضربات آرام به بدنهٔ قالب می‌توان مقدار خاک مشخصی را در قالب ریخت تا دانسیتهٔ نسبی مورد نظر ایجاد شود. بهتر است خاک به ۱ الی ۳ قسمت مساوی تقسیم شود و با تقسیم ارتفاع قالب به همان تعداد لایه، نمونه در چند مرحله ساخته شود تا نمونه همگنی ایجاد شود. نمونه‌ها به شکل استوانه‌ای به قطر٤ سانتی‌متر و ارتفاع۱۰۰ سانتی‌متر ساخته شدند و با ترکیبات مختلف دوغاب تزریق شدند.

دوغاب انتخابی برای تزریق در خاک ماسه، دوغاب بنتونیت است. مونت‌موریلونیت به‌عنوان کانی رسی اصلی در بنتونیت شناخته شده است به‌طوری‌که به‌عنوان مثال در بنتونیت MX80بیش از ۸۷٪ بنتونیت از مونت‌موریلونیت تشکیل شده است [۱٦].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]



شکل ۲. شکل شماتیک دستگاه تزریق استفاده شده

دوغاب تزریقی

هدف اصلی این مقاله یافتن تزریق‌پذیری این دوغاب در خاک ماسه‌ای است. هزینهٔ آن نیز تا حدی کم است و اجرای آن نیز آسان است. از مزایای دیگر دوغاب گفته شده اثرات زیست‌محیطی اندک آن است. به‌دلیل نوع خاک، ترکیبات شیمیایی آن، یون‌های موجود در خاک، بافت، دانه‌بندی، اندازهٔ دانه‌ها، تراکم اولیه، قابلیت عبور دوغاب از توده خاک، ترکیب دوغاب می‌تواند متفاوت انتخاب شود بنابراین با ساخت دوغاب‌های مختلف، نحوهٔ تزریق‌پذیری خاک بررسی می‌شود.

غلظت‌های مختلفی که در این تحقیق استفاده شده است با توجه به تزریق‌پذیری سوسپانیسیون در داخل خاک ماسه و هم‌چنین مقادیر استفاده شده برای روان‌گرایی مقادیر ۳، ۵ و ۷ درصد نسبت بنتونیت به آب در نظر گرفته شده است [۱۰].

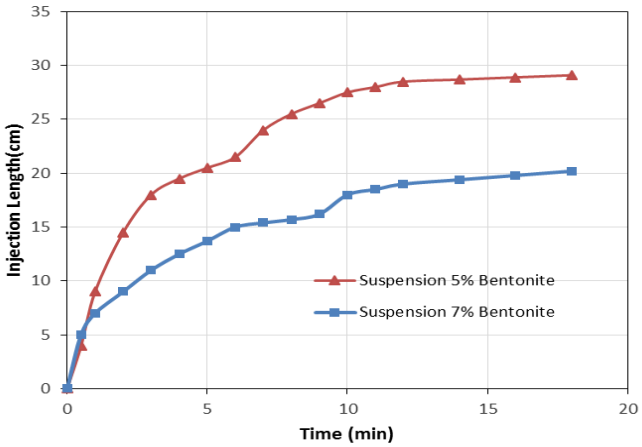
تزریق

پس از تعیین ترکیبات دوغاب، نوع خاک و درصد تراکم، دوغاب را به درون مخزن ریخته و شیر ورودی قالب باز می‌شود. ابتدا از حداقل فشار برای تزریق نمونه استفاده می‌شود، بعد از گذشت مدتی پس از تزریق نمونه، میزان نفوذ دوغاب در قالب ثابت شده و طول نفوذ ثبت شده و سپس فشار تزریق افزایش می‌یابد. با افزایش فشار تزریق دیده می‌شود که نفوذ دوغاب به درون نمونه از سر گرفته می‌شود. مانند مرحلهٔ قبل پس از گذشت مدت زمان محدودی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

مشاهده می‌شود که با افزایش طول تزریق، میزان نفوذ دوغاب به درون نمونه کاهش یافته و پس از ثابت شدن آن، میزان نفوذ ثابت می‌شود. بنابراین با ثبت قرائت نفوذ جدید همانند مرحلهٔ قبل دوباره میزان فشار تزریق افزایش داده می‌شود و این مراحل تا جایی که تمام ستون یک متری نمونه تزریق شود ادامه می‌یابد. شکل ۳ محل قرائت طول نفوذ و شکل ٤ تغییرات طول نفوذ در برابر زمان برای هدهای ارتفاعی مختلف را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.

شکل ۳. محل قرائت طول نفوذ در نمونه



شکل ٤. نمودار تغییرات نفوذ دوغاب با زمان

نتایج آزمایش

برای بررسی نفوذپذیری ماسه‌های انتخابی، نمودارهای طول نفوذ در برابر فشار تزریق (تراز فشار)، برای دوغاب‌های با غلظت‌های مختلف و خاک‌های با تراکم‌های مختلف و دانه‌بندی‌های مختلف ترسیم و بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده بدین شرح است:

اثر دانه‌بندی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

شکل ۵ طول نفوذ را در برابر تراز فشار تزریق برای نمونه با درصد تراکم ۳۰ ٪ و غلظت دوغاب‌های ۷٪ و ۵٪ بنتونیت در هر سه نمونه خاک را نشان می‌دهد. این شکل ارتباط مقدار نفوذپذیری خاک و قطر D_{50} مربوط به دانه‌بندی را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در نمونهٔ ماسه درشت D_{50} برابر ۰/۷ میلی‌متر است که مقدار نفوذ بنتونیت ۵٪ در این خاک برای تراز ارتفاعی ۱۰۰ سانتی‌متر برابر ۵۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد. این مقادیر برای ماسه متوسط با D_{50} برابر ۱/۱ میلی‌متر مقدار ۷۲ و برای نمونه ماسه ریز با D_{50} برابر ۱/٦ میلی‌متر برابر ۱۰۰ سانتی‌متر است. چنان‌که پیش‌بینی می‌شد با ریزتر شدن دانه‌بندی خاک و در نتیجه ریزتر شدن اندازهٔ منافذ، از میزان تزریق‌پذیری ماسه کاسته می‌شود و نیاز به فشارهای بیش‌تری برای تزریق کامل نمونه است. شکل ٦ تغییرات طول نفوذ با قطر دانه‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود مقدار نسبت طول نفود مصالح به‌صورت تقریباً خطی با افزایش قطر دانه‌بندی افزایش می‌یابد. این موضوع در نتایج مربوط به نمونه با تزریق سوسپانسیون حاوی بنتونیت ۷٪ نیز مشاهده می‌شود.

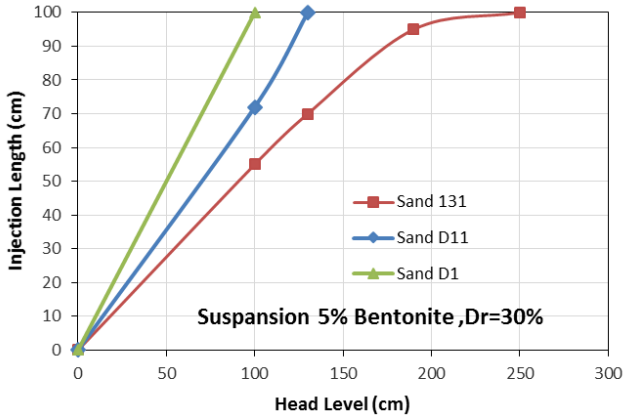
در مقایسه با نتایج حسنلوراد و صرافی یگانه، ۱۳۹۲ مشاهده می‌شود که در این تحقیق روند تغییرات نتایج مربوط به قطر دانه‌ها با تحقیق مذکور مطابقت دارد [۱]. هم‌چنین مشاهده شد که علی‌رغم افزایش قطر دانه‌ها نسبت به نمونه‌های آزمایش شدهٔ حسنلوراد و صرافی یگانه، ۱۳۹۲ که به‌وسیلهٔ دوغاب سیلیکات تزریق شده بودند، مقدار طول نفوذ دوغاب بنتونیت در این تحقیق کم‌تر است. این موضوع به‌دلیل افزایش ویسکوزیته بنتونیت در دوغاب تزریقی مربوط به این تحقیق در مقایسه با ویسکوزیتهٔ دوغاب تزریقی سیلیکات است. از این رو، مشاهده می‌شود ویسکوزیته دوغاب یکی از عوامل مهم و تعیین‌کننده در طول نفوذ دوغاب است.

اثر تراکم

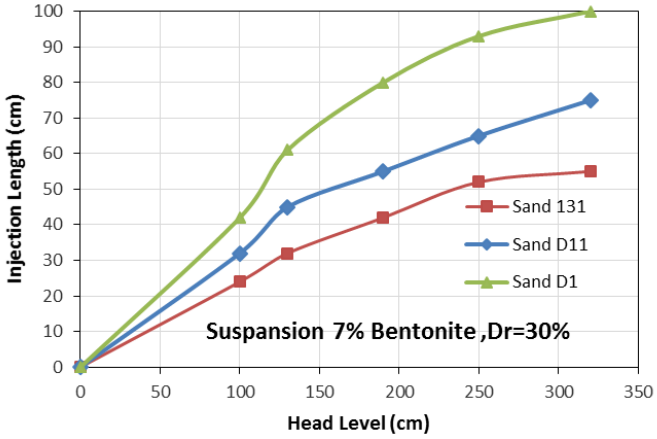
عامل مهم دیگری که در کنار اندازهٔ دانه‌ها باید به‌آن توجه شود تراکم خاک است. چنان‌که در شکل ۷ دیده می‌شود با افزایش درصد تراکم، طول نفوذ در یک فشار تزریق ثابت کاهش می‌یابد و یا فشار تزریق لازم برای تزریق‌پذیری ماسه افزایش می‌یابد. در شکل ۷ الف مشاهده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

می‌شود مقدار نفوذ طولی ماده تزریق‌پذیر بنتونیت در فشار ۱۹۰ سانتی‌متری در تراکم کم (Dr=30%) برابر ۹۷ سانتی‌متر است. این مقادیر برای تراکم متوسط و زیاد به‌ترتیب برابر ۷۲ و ۵۵ سانتی‌متر است. با مقایسه این نتایج می‌توان بیانکرد به‌دلیل کاهش فضای حفرات ماسه با افزایش تراکم خاک و در نتیجه وجود اصطکاک بیش‌تر بین ماده دوغاب و ذرات خاک، از مقدار نفوذ طولی ماده تزریق شونده با افزایش تراکم، کم می‌شود.



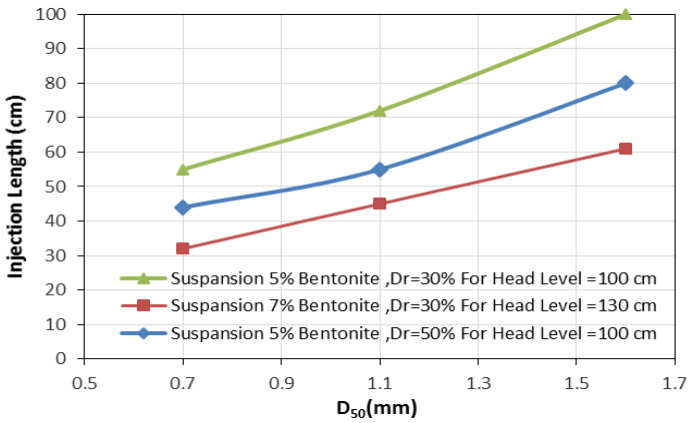
الف



ب

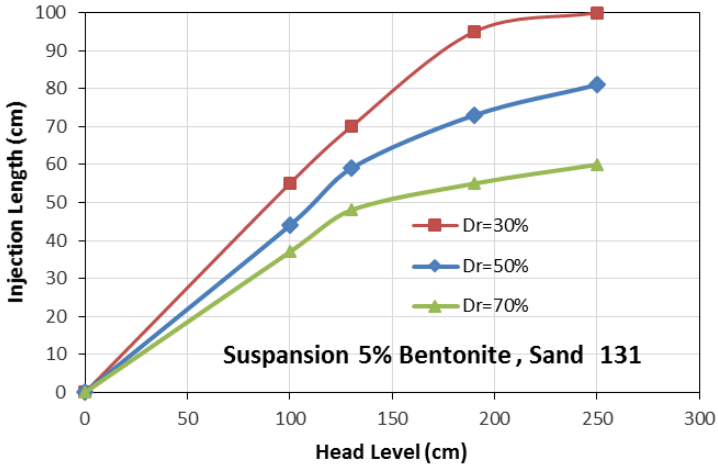
شکل ۵. تغییرات طول نفوذ در برابر تراز فشار تزریق برای نمونه با درصد تراکم ۳۰ ٪ و غلظت دوغاب برابر الف) ۵٪ ، ب) ۷٪ بنتونیت در ماسه‌های مختلف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]



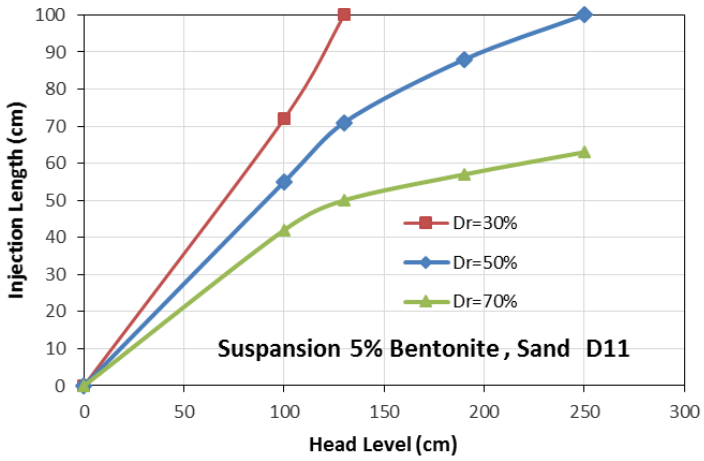
شکل ٦. تغییرات طول نفوذ با قطر دانه‌ها

هم‌چنین از مقایسهٔ دو نمودار نفوذ برای ماسه‌های ریز و درشت مشاهده می‌شود در ماسه ریز با افزایش تراکم از ۵۰٪ به ۷۰٪ مقدار نفوذ بنتونیت در فشار معادل ۱۰۰ سانتی‌متری مخزن کاهش ۱۲ سانتی‌متری دارد در حالی که برای ماسه درشت این مقدار تغییر ۳۳ سانتی‌متر است. از این رو، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اثر تراکم در خاک‌های با دانه‌بندی‌های مختلف متفاوت است. به‌عبارت دیگر در ماسه درشت، اثر تراکم در کاهش طول نفوذ تزریق بیش‌تر از ماسهٔ ریز است.

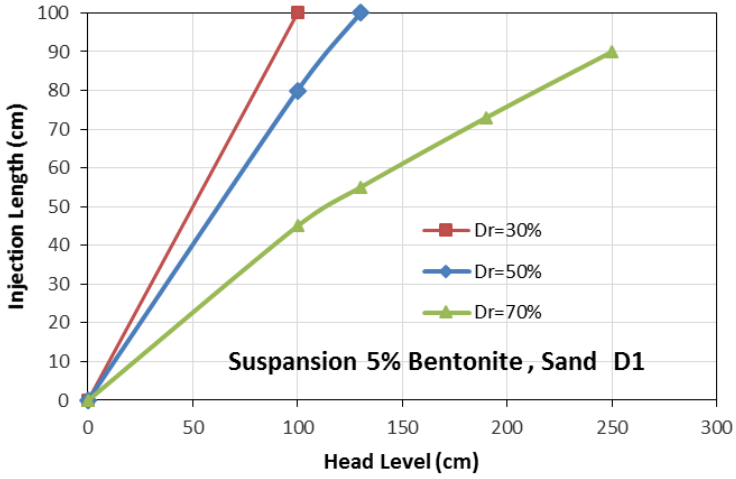


الف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]



ب



ج

شکل ۷. تغییرات طول نفوذ در برابر تراز فشار تزریق برای نمونه‌ها با غلظت دوغاب برابر ۵٪ درصد و در ماسه‌های مختلف با دانه‌بندی مختلف الف) ماسه ریز، ب) ماسه متوسط، ج) ماسه درشت

اثر غلظت

شکل ۸ تغییرات طول نفوذ در برابر تراز فشار برای نمونه‌ها با نسبت تراکم ۷۰٪ در غلظتهای بنتونیت ۳، ۵ و ۷٪ در دانه بندی های مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس نمودارهای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

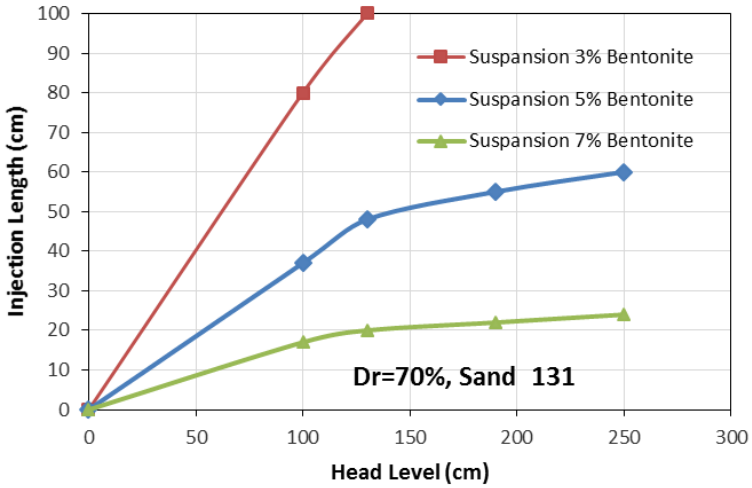
به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که هر چه غلظت نسبت بنتونیت به آب افزایش پیدا می‌کند از نفوذ طولی مادهٔ تزریق‌شونده به داخل نمونه کاسته می‌شود. به‌عنوان مثال برای نمونه ماسه ۱۳۱ (ماسه ریز) در تراکم Dr=70% مقدار نفوذ در ارتفاع فشاری ۱۳۰ سانتی‌متری برای سوسپانسیون حاوی ۳٪ بنتونیت برابر ۱۰۰ سانتی‌متر است. همین مقادیر برای نمونه‌های حاوی ۵٪ و ۷٪ بنتونیت به‌ترتیب برابر ٤٥ و ۲۰ سانتی‌متر است. این موضوع ناشی از افزایش وجود بنتونیت (مادهٔ جامد) در سوسپانسیون است. هرچه مقدار مواد جامد تزریق‌شونده در داخل سوسپانسیون بیش‌تر باشد به‌دلیل تماس بیش‌تر بین دانه‌های ماسه با دانه‌های جامد سوسپانسیون و در نتیجه وجود اصطکاک بیش‌تر برای حرکت طولی، با افزایش غلظت سوسپانسیون از طول حرکت آن در خاک در تراکم ثابت کاسته می‌شود. علاوه بر موارد بیان شده به‌دلیل افزایش ویسکوزیته مادهٔ تزریق شونده با افزایش مقدار بنتونیت امکان حرکت رو به جلو برای سوسپانسیون تحت فشار ثابت کم می‌شود. این موضوع نیز پارامتر مهم دیگری است که منجربه کاهش طول تزریق با افزایش غلظت نمونه می‌شود.

هم‌چنین مشاهده می‌شود تغییرات نفوذ در غلظت‌های بیش‌تر کم‌تر از تغییرات نفوذ در غلظت کم است. به‌عنوان مثال در ماسهٔ D1 (ماسه درشت) در ارتفاع فشاری ۱۰۰ سانتی‌متر مقدار نفوذ در غلظت ۵٪ افزایش ۳۵ درصدی نسبت به غلظت ۳٪ دارد و در غلظت ۷٪ افزایش ۳۰۰ درصدی نسبت به نمونهٔ حاوی ۳٪ بنتونیت دارد. این موضوع نشان‌دهندهٔ این مطلب است که در غلظت کم‌تر از ۵٪ حضور بنتونیت در نمونه اثر کم‌تری دارد و سوسپانسیون با راحتی بیش‌تری می‌تواند در بین حفرات خالی ماسه حرکت کند. لازم به ذکر است این موضوع در ماسه‌های درشت خود را بهتر نشان می‌دهد. این موضوع نشان‌دهندهٔ این مطلب است که با کاهش خلل و فرج در داخل ماسه از اثر تغییر غلظت سوسپانسیون کاسته می‌شود.

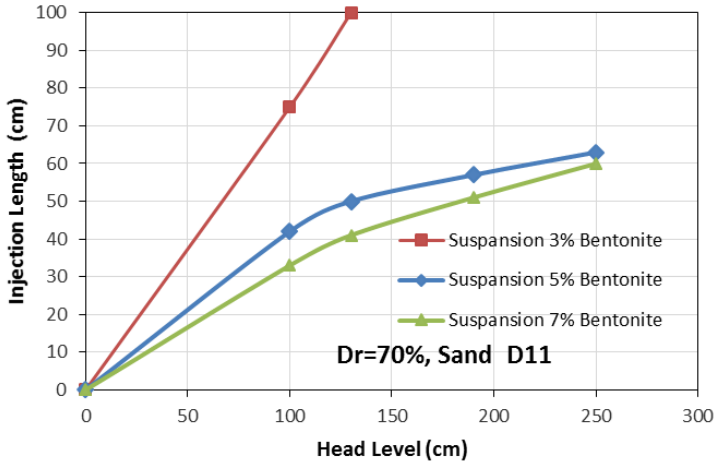
مقایسهٔ نتایج حاضر با نتایج حسنلوراد و صرافی یگانه، ۱۳۹۲ [۱] که بررسی بر تزریق سیلیکات سدیم بر نمونهٔ ماسه را انجام داده بودند، هم‌چنین مقایسه با تحقیقات مشابهی که Chadi S. etal, 2015 روی نفوذ دوغاب بنتونیت در ماسه انجام داده است [۸]، مشاهده شد که طول نفوذ دوغاب با کاهش نسبت آب به بنتونیت یا سلیکات سدیم در داخل نمونه ماسه‌ای کاهش می‌یابد که نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با نتایج محققان مذکور مطابقت داشته و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

نتایج آن‌ها را تأیید می‌کند. هم‌چنین صدقیانی و نصر، ۱۳۸۷، مشاهده کردند تزریق دوغاب‌ها با پایه سیلیکات سدیم با غلظت‌های بالای حدود ۳۰ ٪ در ماسه بابلسر باعث ایجاد چسبندگی در خاک شده و در بالاترین حالت به حدود ۷۰ کیلوپاسکال می‌رسد و تأثیر چندانی هم بر زاویهٔ اصطکاک داخلی ندارد و نیز نفوذپذیری در این خاک‌ها در حالت تزریق شده حدود ۲۰ برابر کاهش می‌یابد.این موضوع نیز مؤید این بحث است و نشان می‌دهد افزایش غلظت ماده تزریقی منجربه کاهش نفوذپذیری و مقدار حرکت ماده تزریقی در ماسه می‌شود.

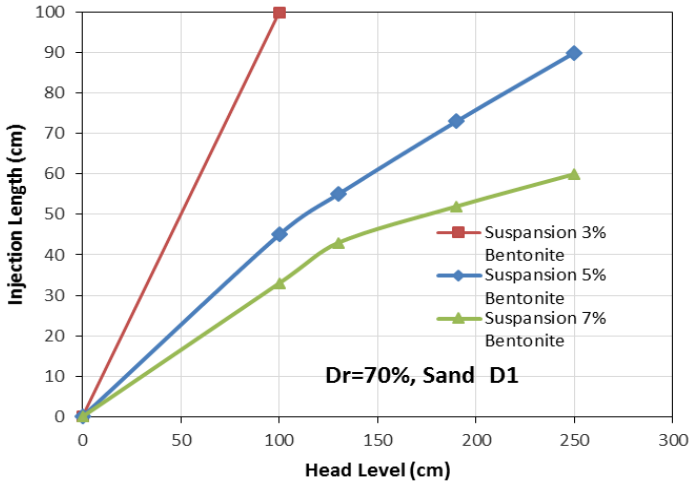


الف



ب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]



ج

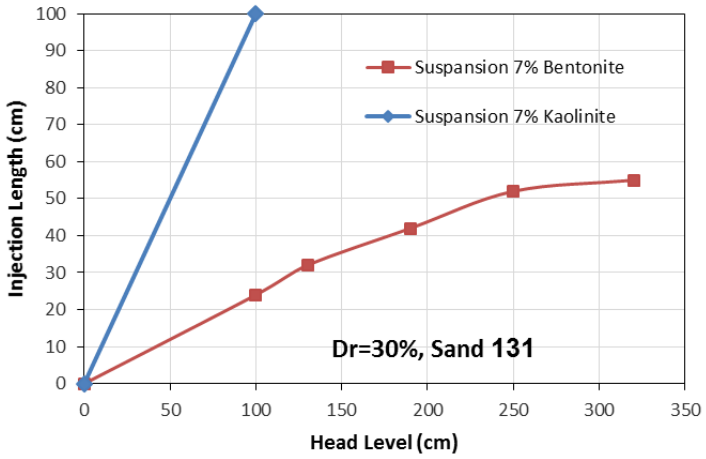
شکل ۸. تغییرات طول نفوذ در برابر تراز فشار برای نمونه‌ها با نسبت تراکم ۷۰٪ در غلظت‌های بنتونیت ۳، ۵ و ۷٪ در دانه‌بندی‌های مختلف الف) دانه‌بندی ریز، ب) دانه‌بندی متوسط، ج) دانه‌بندی درشت

اثر نوع دوغاب تزریقی

شکل ۹ تغییرات طول نفوذ را برای ماسه ۱۳۱ و دانسیته نسبی ۳۰٪ برای دوغاب بنتونیت و کائولینیت در غلظت ۷٪ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود کائولینیت در همان ارتفاع فشار ۱۰۰ سانتی‌متر طول نفوذ کامل را انجام داده است در حالی که بنتونیت در ارتفاع فشار ۳۲۰ سانتی‌متری ۵۵ سانتی‌متر از طول نفوذ را پیموده است. این نمودار نشان‌دهندهٔ اثر SSA[1] (سطح مخصوص ویژهٔ خاک) و CEC[2] (ظرفیت تبادل کاتیونی خاک) را بر تزریق‌پذیری ماسه دارد. جدول ۲ نشان‌دهندهٔ پارامترهای مذکور برای بنتونیت و کائولینیت است. بر اساس نتایج به‌دست آمده هرچه سطح مخصوص ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بیش‌تر باشد به‌دلیل جذب آب بیش‌تر تزریق آن در داخل حفرات ماسه کندتر است و برای نمونه با مقدار SSA و CEC کم‌تر مقدار فشار کم‌تری لازم است تا در ماسه تزریق شود.

1. Specific Surface Area
2. Cation Exchange Capacity

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]



شکل ۹. تغییرات طول نفوذ برای ماسه ۱۳۱ در دانسیتهٔ نسبی ۳۰٪ برای دوغاب بنتونیت و کائولینیت در غلظت ۷٪

جدول ۲. مشخصات زیست محیطی دوغاب‌ها [۵]

	بنتونیت	کائولینیت
SSA (m^2/gr)	۴۱۶/۵	۶۰
CEC (cmol/kg-soil)	۶۲/۵۱	۱۳

با مقایسهٔ نتایج این تحقیق با نتایج مقالهٔ مانشتی و شریفی‌پور، ۱۳۹۲، مشاهده می‌شود که تزریق بنتونیت در خاک ماسه‌ای تنکابن، ضریب نفوذپذیری قبل از تزریق را به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌دهد. با افزودن نانو رس نوع Cloisite® 30B به بنتونیت، ضریب نفوذپذیری افزایش پیدا کرده است. از این رو، تزریق نانورس با ضریب تبادل کاتیونی کم‌تر [۵] منجربه افزایش قابلیت تزریق‌پذیری شده است و این موضوع نیز تأییدکنندهٔ نتایج در این بخش مقاله است.

نتیجه‌گیری

این تحقیق در خصوص بررسی تزریق‌پذیری دوغاب بنتونیت با غلظت مختلف با دانه‌بندی و تراکم مختلف در ماسه انجام شده است. غلظت بنتونیت در این تحقیق ۳، ۵ و ۷ درصد است. هم‌چنین از سه نمونه خاک ماسه فیروزکوه با دانه‌بندی مختلف و با تراکم نسبی‌های مختلف ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد استفاده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

بر اساس نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- دوغاب بنتونیت در درصدهای استفاده ۳، ۵ و ۷ درصد قابلیت مناسبی برای تزریق در بین دانه‌های ماسه با دانه‌بندی ریز ، متوسط و درشت را دارد.
- از مقایسهٔ تأثیر دانه‌بندی نمونه بر میزان تزریق‌پذیری می‌توان به این نتیجه رسید که با کم شدن قطر دانه‌های ماسه از مقدار نفوذ دوغاب در ماسه کاسته می‌شود. عامل اصلی در این خصوص کاهش نسبت تخلخل خاک با ریزتر شدن دانه‌ها و در نتیجه کاهش مقدار نفوذپذیری خاک است.
- با افزایش تراکم خاک از مقدار نفوذ سوسپانسیون بنتونیت به نمونه ماسه ای کاسته می‌شود. علت این موضوع نیز کاهش حفرات خاک است.
- با افزایش غلظت بنتونیت در سوسپانسیون از مقدار نفوذ بنتونیت در ماسه کاسته می‌شود. افزایش مقدار ویسکوزیته با افزایش غلظت بنتونیت در سوسپانسیون از یک طرف و افزایش مقدار دانه‌های دوغاب عبوری از منافذ و حفرات بر اثر افزایش غلظت بنتونیت از طرف دیگر علت این امر است.
- با مقایسه مقدار تزریق‌پذیری بنتونیت و کائولینیت مشاهده شد هرچه مقدار سطح مخصوص ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی دوغاب تزریقی بیش‌تر باشد تزریق‌پذیری خاک کاهش پیدا کرده و نیاز به ارتفاع فشاری بیش‌تری برای تزریق نمونه دارد.
- با توجه به نتایج به‌دست آمده، برای ماسه فیروزکوه با دانه بندی‌های اشاره شده در این تحقیق می‌توان در دانسیته‌ها و غلظت‌های مختلف دوغاب بنتونیت، مقدار فشار تزریقی را برای تزریق بدون شکست هیدرولیکی در داخل نمونه ماسه‌ای تعیین کرد و از آن در ساخت نمونه های آزمایشگاهی بهره گرفت. هم‌چنین می‌توان با مقادیر کمی به‌دست آمده، طول نفوذ را برای فشارهای تزریقی مختلف پیش‌بینی کرد.

منابع

۱. حسنلوراد محمود، صرافی‌یگانه آرش، "بررسی قابلیت تزریق‌پذیری خاک ماسه‌ای با دوغاب شیمیایی سیلیکات سدیم" مجلهٔ علمی پژوهشی امیر کبیر، شمارهٔ ٤٥ (۱۳۹۲).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

۲. مانشتی محسن، شریفی‌پور محمد، "مطالعه آزمایشگاهی اصلاح خواص فیزیکی خاک‌های ماسه‌ای به‌وسیلهٔ تزریق بنتونیت و نانورس" پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی (۱۳۹۲).

۳. صدقیانی محمدحسین، نصر محمد، "بررسی اثر غلظت بر نفوذپذیری و رفتار مکانیکی و فیزیکی ماسه تزریق شده با دوغاب سیلیکاتی" چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، (۱۳۸۷).

٤. ضیایی‌مؤید رضا، کمال زارع، "اصلاح مشخصات فیزیکی خاک‌های رمبنده (بررسی موردی: راه آهن تهران- سمنان)"، زمین شناسی مهندسی، شمارهٔ۲، (۱۳۹٤) ۲۸٦۹-۲۸۹۰.

۵. نوری‌امیر، اوحدی وحیدرضا، "تأثیر آلاینده‌های فلز سنگین در خصوصیات مکانیکی بنتونیت تحت اثر نانورس" پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه بو علی سینا همدان (۱۳۸۷).

6. Army Corps of Engineers, "Engineer Manual, Chemical Grouting", EM 1110-1-3500 (1995).

7. Bell F. G., "Engineering Treatment of soils", E&FN Spon, London (1993) 10-160.

8. Chadi S., El Mohtar, a Jisuk Yoon, b May El-Khattabc, "Experimental study on penetration of bentonite grout through granular soils", Canadian Geotechnical Journal (2015).

9. El Mohtar C., Bobet A., Santagata M., Drnevich V., Johnston, C., "Liquefaction mitigation using bentonite suspensions", J. Geotech. Geoenviron. Eng. 139 (2013) 1369-1380.

10. El Mohtar C. S., Clarke J. P., Bobet A., Santagata M., Drnevich V., Johnston C., "Cyclic response of a sand with thixotropic pore fluid. In", Proceedings of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Congress, Sacramento CA (2008).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

11. Huang Y., Zhuoqiang W., "Recent developments of soil improvement methods for seismic liquefaction mitigation", Nat Hazards (2015) 1927-1938.
12. Herndon J., Lenahan T., "Grouting in soils", Design and Operations Manual, Federal Highway Administration, Halliburton Services, Duncan, Oklahoma, Technical Report, Vol. 2 (1976).
13. Incecik M., Ceren I., "Cement grouting model tests", Bulletin of The technical University of Istanbul, Istanbul, Vol. 48, No. 2 (1995) 305-317.
14. Kazemain S., Huat B. B. K., "Assessment and comparison of grouting and injection methods in geotechnical engineering", Eur. J. Sci. Res. 27(2) ((2009)) 234-247.
15. Rugg D. A., Yoon J., Hwang H., El Mohtar C. S., "Undrained shearing properties of sand permeated with a bentonite suspension for static liquefaction mitigation", In Proceedings of the Geofrontiers, Dallas, TX, (2011) 677–686.
16. Santagata M. C., Santagata E., "Experimental investigation of factors affecting the injectability of microcement grouts", In Proceedings of the 3rd International Specialty Conference on Grouting and Ground Treatment, ASCE (2003) 1221-1234.
17. Sauzeat E., Guillaume D., Neaman A., Dubessy J., Franc¸ois M., Pfeiffert C.,Pelletier M., Ruch R., Barres O., Yvon J., Ville´ras F. et Cathelineau M., "Caracte´risation mine´ralogique, cristallochimique et texturale de l’argile MX80", Rapport ANDRA No. CRP0ENG 01-001 (2001) 82.
18. Seed, H. B., Lee K. L. "Liquefaction of saturated sands during cyclic loading", J. Soil Mech. and Found. Div., 92 (6) (1966). 105-134.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]

19. Yoon J., El Mohtar C. S., "Dynamic rheological properties of sodium phyrophosphate modified bentonite suspensions for liquefaction mitigation", Clays Clay Miner, 61(4) (2013) 319-327.
20. Yoon J., El Mohtar C. S., "Groutability of Granular Soils Using Bentonite Grout Based on Filtration Model", Transp Porous Media (2014).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.7.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.299]