



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و پنجم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۴۱ تا ۴۸  
Vol. 45, No. 2, winter 2013, pp. 41-48



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی عمران و محیط زیست)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering)  
(AJSR - CEE)

## بررسی قابلیت تزریق پذیری خاک ماسه‌ای با دوغاب شیمیایی سیلیکات سدیم

محمود حسنلوراد<sup>\*۱</sup>، آرش صرافی یگانه<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین  
۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- خاک و پی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین

(دریافت ۱۳۸۸/۱۱/۶، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۳)

### چکیده

علت پیدایش تزریق دوغاب‌های شیمیایی نیاز به افزایش مقاومت و یا کاهش نفوذپذیری در خاک‌هایی است که به دلیل ریز بودن حفرات، امکان تزریق دوغاب‌های زبر سیمانی وجود ندارد. دوغاب‌های شیمیایی به علت محلول بودن و نداشتن ذرات معلق در دوغاب (مانند دوغاب سیمانی) راحت‌تر به درون حفره‌های خاک نفوذ می‌نمایند. آنچه در مورد تزریق‌پذیری این دوغاب‌ها مطرح است ویسکوزیته آن‌ها است، به طوری که با افزایش ویسکوزیته از تزریق‌پذیری خاک کاسته می‌شود. در این مقاله میزان تزریق‌پذیری خاک‌های ماسه‌ای با ساخت نمونه‌های یک متری و تزریق آنها مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها با چهار دانه‌بندی درشت، متوسط، ریز و ماسه سیلتی با درصد‌های تراکم مختلف خاک و با غلظت‌های مختلف دوغاب مورد تزریق قرار گرفتند تا بتوان میزان اثر هر کدام از عوامل فوق را به تنهایی و در ارتباط با یکدیگر در میزان تزریق‌پذیری و شعاع نفوذ انواع خاک‌های ماسه‌ای به‌دست آورد. براساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، از میان عوامل فوق، اندازه دانه بیش‌ترین تاثیر بر روی میزان تزریق‌پذیری است و می‌توان گفت سایر پارامترها وابسته به این متغیر هستند. با ریزتر شدن ماسه از قابلیت تزریق آن کاسته شده به طوری که با اضافه شدن سیلت به اندازه ۵۰ درصد وزنی به ماسه، در عمل امکان تزریق کامل دوغاب در مقدار فشاری که باعث گسیختگی خاک نشود وجود ندارد (حد نهایی تزریق).

### کلمات کلیدی

تزریق‌پذیری، ماسه، دوغاب شیمیایی، سیلیکات سدیم.

\* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات Email: m.hassanlourad@ikiu.ac.ir

## ۱- مقدمه

زیست محیطی کم و پایداری کمتر آن نسبت به دوغابهای زبر اشاره نمود [۳]. در سال ۱۳۸۸ حسنلوراد و همکاران پارامترهای موثر بر مقاومت تک محوری ماسه تزریق شده با دوغاب سیلیکات سدیم را بررسی نمودند [۱]. همچنین در سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ رفتار برشی سه محوری ماسه‌های تزریق شده با دوغاب گفته شده توسط حسنلوراد و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۱]، [۱۳] و [۱۴].

محدوده نفوذ پذیری خاکهای دانه‌ای توسط دوغاب سیلیکات سدیم به صورت کیفی در مراجع معتبر قید شده است [۳]. در این مقاله به صورت جزئی‌تر پارامترهای موثر بر روی میزان تزریق‌پذیری (شعاع نفوذ) خاک ماسه‌ای مانند اندازه دانه‌های خاک، نسبت آب به سیمان دوغاب، دانسیته نسبی اولیه خاک مورد تزریق و فشار تزریق بررسی خواهد شد.

## ۲- ویژگیهای ماسه مورد استفاده

در بررسی حاضر، از ماسه سیلیسی شکسته فیروزکوه برای انجام آزمایشها استفاده شده است. این ماسه دارای رنگ زرد مایل به طلایی بوده و از دانه‌بندی یکنواختی دارد. برای بررسی اثر پارامتر دانه‌بندی بر روی میزان تزریق پذیری ماسه با استفاده از دوغاب شیمیایی، چهار نوع دانه‌بندی مختلف درشت (رد شده از الک شماره ۴ و مانده بر روی الک شماره ۴۰)، متوسط (رد شده از الک شماره ۴۰ و مانده بر روی الک شماره ۱۰۰)، ریز (بین الک شماره ۱۰۰ و ۲۰۰) و بسیار ریز (۵۰٪ بالای الک ۲۰۰ و ۵۰٪ زیر الک ۲۰۰) ساخته شد که در ادامه به اختصار ماسه درشت، متوسط، ریز و بسیار ریز (ماسه سیلتی) نامیده می‌شوند. در شکل (۱) نمودار دانه‌بندی خاک‌های استفاده شده در آزمایشها نشان داده شده است. در جدول (۱) نیز مشخصات هر یک ارائه شده است.

## ۳- دستگاه تزریق

برای انجام عملیات تزریق در آزمایشگاه، دستگاهی طبق شکل ۲ ساخته شد. دستگاه تزریق متشکل از یک مخزن، قالب استوانه‌ای به طول ۱ m برای ساخت و تزریق نمونه‌ها و سیستم لوله کشی برای ورود و خروج دوغاب از نمونه می‌باشد. جنس قالبها و مخزن از نوعی پلاستیک شفاف فشرده و لوله‌ها از جنس پلاستیک شفاف انعطاف پذیر می‌باشد. به نحوی که در حین انجام تزریق، روند کار قابل رویت می‌باشد. مطابق شکل برای تنظیم و کنترل دقیق‌تر، فشار لازم برای تزریق به صورت ثقلی تامین شد. سامانه تولید فشار محفظه دوغاب به صورت افزایش تراز فشار می‌باشد. محل قرارگیری مخزن به گونه‌ای است که قابلیت تنظیم ارتفاع برای ایجاد فشارهای مختلف تزریق دارد

روش تزریق برای بهسازی خواص خاک قدمت ۲۰۰ ساله دارد، در ابتدا تنها ماده تزریقی مورد استفاده تا سالها سیمان پرتلند بود. اما در مواردی که نیاز به تزریق در رسوبات با منافذ ریز وجود داشت، نفوذ نامناسب ماده تزریقی به دلیل بزرگ بودن دانه‌های سیمان نسبت به اندازه منافذ مشکل ایجاد می‌نمود [۲]. به طور کلی دوغابها به دو دسته 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، پلی-استر، پلی اوره اتان و برخی مواد شیمیایی دیگر به عنوان دوغابهای شیمیایی نرم معروفند [۳]. اختلاف اصلی بین دوغابهای شیمیایی و زبر آن است که قابلیت نفوذ دوغابهای زبر تابعی از نسبت اندازه ذرات به اندازه حفرات و ترکها و همچنین ویسکوزیته اولیه آن است، در حالی که برای دوغابهای نرم، تابعی از ویسکوزیته اولیه و زمان ژل شدگی است. موضوع تزریق‌پذیری خاکهای دانه‌ای سالهاست که مورد مطالعه قرار گرفته است. به عنوان نمونه در سال ۱۹۷۶، هرندون و لناهان برخی از محدودیت‌های تزریق‌پذیری خاکها را با توجه به اندازه دانه‌های خاک ارائه نمودند [۴]. در سال ۱۹۹۳، بل و در سال ۱۹۹۵، اینسسیک و سرن تنها براساس اندازه دانه خاک و سیمان مسئله تزریق پذیری را مورد بررسی قرار دادند [۵] و [۶]. در حالی که آزمایش‌های با مقیاس بزرگتر نشان می‌دهند که تزریق‌پذیری خاکهای دانه‌ای متاثر از پارامترهای مختلفی از خاک و ماده تزریق است [۷] و [۸]. این پارامترها عبارتند از اندازه دانه‌های خاک و ماده سوسپانسیون تزریق، درصد ریزدانه (FC) خاک، فشار تزریق، دانسیته نسبی (Dr) خاک و نسبت آب به سیمان (W/C) (یا ویسکوزیته) دوغاب تزریق است [۹].

نمونه تحقیقات گفته شده اغلب در ارتباط با تزریق‌پذیری خاکها با استفاده از دوغابهای زبر می‌باشند. از نظر محدودیت تزریق پذیری خاکها با دوغابهای زبر، در سال ۲۰۰۴، دانو و همکاران، تزریق پذیری چند ماسه را با استفاده از دوغاب سیمان پرتلند بسیار ریزدانه ارزیابی نمودند [۱۰]. این محققین قابلیت تزریق پذیری یک خاک دانه‌ای از ماسه تا سیلت را بررسی نمودند. در سالهای ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹، الاتا و همکاران عوامل موثر بر روی خصوصیات مکانیکی و خزشی ماسه‌های تزریق شده با دوغاب سیلیکات سدیم را بررسی نمودند [۱۱] و [۱۲]. دوغاب بیان شده یک دوغاب شیمیایی بوده که با وجود برخی معایب، همچنان برای اصلاح خصوصیات مکانیکی خاکها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله این معایب می‌توان به رفتار خزشی، اثرات

درصد ساخته شدند. در این روش ابتدا خاک در کوره خشک شده و سپس با استفاده از یک قیف استوانه‌ای شکل به صورت خیلی آرام و با حرکت مار پیچ و سرعت ثابت، خاک از ارتفاع نزدیک صفر به داخل قالب ریخته می‌شود ( قطر خروجی قیف ۱۲ mm می‌باشد). سپس با زدن ضربات آرام به بدنه قالب می‌توان مقدار خاک مشخصی را در قالب ریخت تا دانسیته نسبی مورد نظر ایجاد گردد. بهتر است خاک به ۳ الی ۵ قسمت مساوی تقسیم شود و با تقسیم ارتفاع قالب به همان تعداد لایه، نمونه در چند مرحله ساخته شود تا نمونه همگنی ایجاد گردد. نمونه‌ها به شکل استوانه‌ای به قطر ۴ cm و ارتفاع ۱۰۰ cm ساخته شدند و با ترکیبات مختلف دوغاب تزریق شدند.

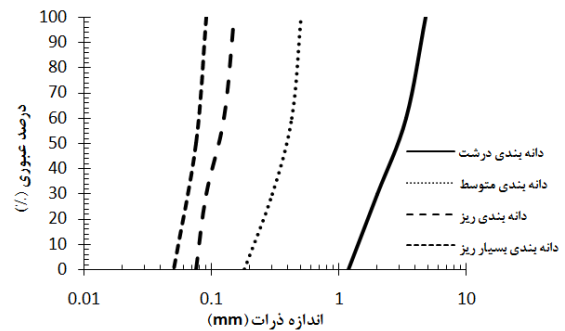
#### ۵- ترکیب دوغاب تزریقی

دوغاب انتخابی برای تزریق در خاک با اساس شیمیایی به نام سیلیکات سدیم با ترکیب شیمیایی  $(Na_2O_2SiO_2)$  می‌باشد. این دوغاب توانایی نفوذ در خاک‌هایی با دانه‌های بزرگ‌تر از ۷۵ میکرون را دارد همان‌طور که در ابتدا گفته شد هدف اصلی این مقاله یافتن حد نهایی تزریق‌پذیری این دوغاب است. هزینه آن نیز تا حدی پایین بوده و پایداری متوسطی در عمل دارد و اجرای آن نیز آسان است. از مزایای دیگر دوغاب گفته شده اثرات زیست محیطی پایین آن است [۲]. به دلیل نوع خاک، ترکیبات شیمیایی آن، یون‌های موجود در خاک، بافت، دانه بندی، اندازه دانه‌ها، تراکم اولیه، قابلیت عبور دوغاب از توده خاک، ترکیب دوغاب می‌تواند متفاوت انتخاب گردد بنابراین با ساخت دوغاب-ها و نمونه‌های مختلف، نحوه تزریق‌پذیری خاک مورد بررسی قرار گرفت.

ترکیب اصلی این دوغاب، سیلیکات سدیم به عنوان ماده اصلی ایجاد کننده پیوندها و آب به عنوان عنصر ترکیبی و عامل کاهش ویسکوزیته می‌باشد. برای آنکه ترکیب آب و سیلیکات سدیم قابلیت واکنش داشته باشند ماده‌ای به عنوان فعال کننده نیاز است تا واکنش‌های شیمیایی شروع شوند برای این کار می‌توان از فرمامید و یا بیکربنات سدیم استفاده نمود. به دلیل پایداری کم بیکربنات سدیم در طبیعت، از فرمامید با فرمول شیمیایی  $(HCONH_2)$  برای این کار استفاده گردید. از طرفی لازم است ماده‌ای برای تسریع واکنشها اضافه گردد.

گفتنی است که دوغاب سیلیکات سدیم در پروژه‌های مهندسی برای افزایش ظرفیت باربری و آب بندی و کنترل تراوش آبهای زیر زمینی استفاده می‌شود. آزمایش‌ها و تجربیات نشان می‌دهند که دوغاب سیلیکات سدیم در محیط‌های اسیدی، قلیایی، نمکی و قارچی مقاوم می‌باشد [۳].

حداقل ارتفاع قابل تنظیم ۱ m و حداکثر مقدار آن نیز ۵ m و هر گام تغییر ارتفاع برابر با ۲۸ cm می‌باشد. در واقع تغییرات فشار تزریق با تغییر ارتفاع مخزن انجام شد برای جلوگیری از افت تراز فشار در ارتفاع نمونه، استوانه نمونه در حالت افقی قرار گرفته و تزریق گردید.



شکل (۱): منحنی دانه‌بندی چهار ماسه بررسی شده

جدول (۱): مشخصات خاک‌های مورد استفاده

پارامتر	ماسه درشت	ماسه متوسط	ماسه ریز	ماسه سیلتی
Cu	۲/۸۳	۲/۳۶	۱/۶۶	-
Cc	۰/۷۳	۰/۸۱	۰/۸۶	-
Gs	۲/۶۵	۲/۶۵	۲/۶۵	۲/۶۵
$e_{min}$	۰/۷۵	۰/۶۵	۰/۶	۰/۷۵
$e_{max}$	۰/۹۵	۰/۹	۰/۸۵	۰/۹۵



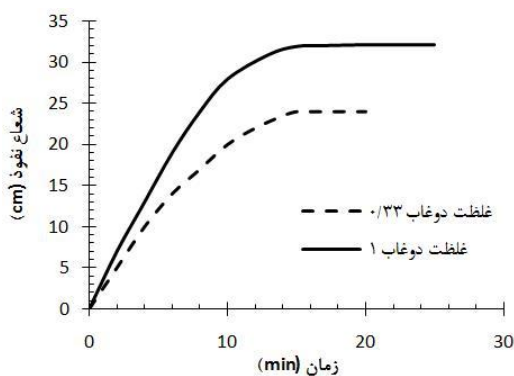
شکل (۲): دستگاه استفاده شده برای تزریق

#### ۴- ساخت نمونه‌ها

نمونه‌ها به روش ریزش خشک و با تراکم‌های ۳۰، ۵۰ و ۹۰

## ۶- زمان ژل شدگی

نرخ نفوذ دوغاب به درون نمونه کاهش یافته و پس از ثابت شدن آن، میزان نفوذ ثابت می‌گردد، بنابراین با ثبت قرائت نفوذ جدید همانند مرحله قبل دوباره میزان فشار تزریق افزایش داده می‌شود و این مراحل تا جایی که تمام ستون یک متری نمونه تزریق گردد ادامه می‌یابد. شکل (۳) محل قرائت شعاع نفوذ و روند تغییرات شعاع نفوذ در برابر زمان برای هر تراز فشار را به عنوان نمونه نشان می‌دهد. نمونه‌های ساخته شده با سه ترکیب دوغاب (با نسبت‌های آب به سیلیکات سدیم ۱، ۲، ۳)  $(W/S=0/33)$  تزریق شدند.



شکل (۳): تعیین شعاع نفوذ و روند تغییرات شعاع نفوذ در برابر زمان

## ۸- نتایج آزمایش

برای بررسی نفوذپذیری ماسه‌های انتخابی، نمودارهای شعاع نفوذ در برابر فشار تزریق (تراز فشار)، برای دوغاب‌های با غلظت‌های مختلف و خاک‌های با تراکم‌های مختلف ترسیم و مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهند که دوغاب حاضر با غلظت‌های فوق به راحتی قابل تزریق در ماسه‌های درشت تا ریز هستند. ماسه درشت در متراکم‌ترین حالت و غلیظ‌ترین دوغاب به راحتی تا انتهای نمونه (شعاع ۱ متری) تزریق شد. همچنین این دوغاب در غلیظ‌ترین حالت مورد بررسی  $(W/S=0/33)$  قابلیت تزریق در ماسه‌های بسیار ریز با ۵۰٪ سیلت (تا حدود ۶۰ سانتی‌متر) بدون ایجاد ترک و شکاف در خاک تحت تراز فشار

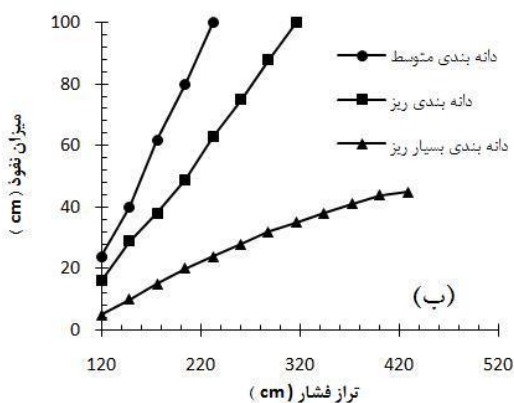
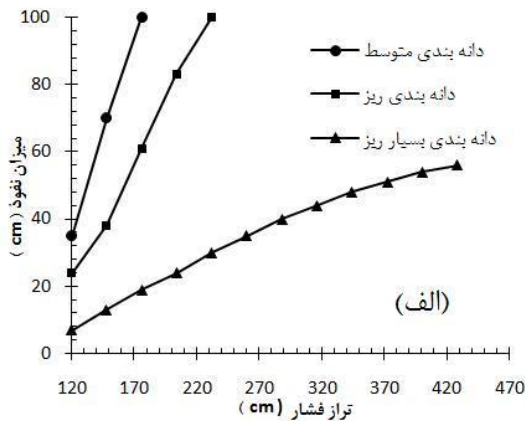
دو عامل مهم در تزریق دوغاب‌های شیمیایی، ویسکوزیته و زمان ژل شدن دوغاب می‌باشد. عامل اول تاثیر مستقیم بر روی شعاع نفوذ دوغاب به خاک مورد تزریق دارد. ویسکوزیته دوغاب سیلیکات سدیم بستگی به درصد سیلیکات در ماده تزریقی دارد. غلظت بالای سیلیکات، در مقایسه با غلظت پایین، موجب ایجاد دوغابی با ویسکوزیته بالا می‌شود که این دوغاب شانس کمی برای نفوذ به داخل منافذ ریز دارد. عامل دوم بیان کننده میزان محدودیت زمانی برای تزریق می‌باشد. زمان ژل شدگی از راه تغییر دادن غلظت‌های محلول و درصد‌های افزودنی، قابل کنترل است. افزایش مقدار غلظت سیلیکات سدیم باعث کند شدن زمان ژل شدگی می‌شود. افزایش غلظت نمک اسید، زمان ژل شدگی را کاهش می‌دهد. همچنین افزایش دما زمان ژل شدگی را کاهش می‌دهد. همچنین زمان‌های ژل شدگی با افزایش غلظت شتاب‌دهنده و ماده واکنش‌زا کاهش می‌یابد. بنابراین با در دست داشتن زمان ژل شدن می‌توان به محدودیت زمانی در اختیار برای تزریق رسید. به محض تشکیل ژل دیگر عملیات تزریق متوقف می‌گردد، لذا می‌توان به اهمیت بالای این عامل پی برد. در جدول (۲) زمان‌های ژل شدن برخی از ترکیبات دوغاب سیلیکات سدیم با غلظت‌های مختلف که در آزمایشگاه به دست آمده آورده شده است این زمان‌ها از این نظر بررسی شدند که در بررسی شعاع نفوذ، این محدودیت زمانی مد نظر قرار بگیرد.

جدول (۲): زمان ژل شدگی برای برخی از ترکیبات دوغاب

ترکیب دوغاب	نسب آب به سیلیکات سدیم (W/S)					
	۱	۱	۱	۲	۰/۳۳	۰/۳۳
آلومینات سدیم (%)	۱/۵	۱	۱	۱	۱	۱
فرم آمید (%)	۲	۴	۶	۴	۴	۴
زمان ژل شدن (hr)	۳:۲۳'	۵	۳:۵۰'	۰:۲۰'	۶	۰:۵۰'

## ۷- تزریق

پس از تعیین ترکیبات دوغاب، نوع خاک و درصد تراکم، دوغاب را به درون مخزن ریخته و شیر ورودی قالب باز می‌گردد. ابتدا از حداقل فشار برای تزریق نمونه استفاده می‌شود، بعد از گذشت مدتی پس از تزریق نمونه، نرخ نفوذ دوغاب در قالب ثابت شده و شعاع 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 مرحله قبل پس از گذشت مدت زمان محدودی مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع تزریق،



شکل (۴): شعاع نفوذ در برابر فشار تزریق برای سه دانه‌بندی مختلف خاک الف ( $Dr=0.50, w/s=1$ ) ب ( $Dr=0.50, w/s=0.33$ )

جدول (۳): شعاع نفوذ برای سه دانه‌بندی مختلف تحت تراز فشار  $176\text{cm}$  تراکم  $0.50\%$  و  $w/s=1$

D50 (mm)	شعاع نفوذ (cm)
0.276	100
0.11	61
0.075	19

### ۸-۲- اثر تراکم

عامل مهم دیگری که در کنار اندازه دانه‌ها باید مورد توجه قرار داد تراکم خاک است. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌گردد با افزایش درصد تراکم، شعاع نفوذ در یک فشار ثابت کاهش می‌یابد و یا فشار لازم برای تزریق‌پذیری ماسه افزایش می‌یابد. همچنین شکل حاضر نشان می‌دهد که اثر تراکم در خاکهای با دانه بندی‌های مختلف متفاوت است. به عبارت دیگر در ماسه متوسط، اثر تراکم بیشتر از ماسه بسیار ریز (ماسه سیلنتی) است و اثر اندازه دانه‌ها نسبت به تراکم بیشتر است.

دوغاب تا حدود  $430\text{ cm}$  را دارد. نتایج نشان می‌دهند که در این شرایط و بدون ایجاد دست خوردگی در خاک، شعاع نفوذ برابر فشار بیشتر دوغاب، اشباع می‌گردد. به عبارت دیگر نمی‌توان با افزایش بیشتر فشار، شعاع نفوذ را افزایش داد. در ادامه نتایج تعدادی از آزمایش‌ها به صورت انتخابی مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۸-۱- اثر دانه‌بندی

همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با ریزتر شدن دانه‌بندی خاک و در نتیجه ریزتر شدن اندازه منافذ، از میزان تزریق‌پذیری ماسه کاسته می‌شود و نیاز به فشارهای بالاتری برای تزریق کامل نمونه است. شکل ۴ شعاع نفوذ را در برابر تراز فشار برای نمونه با درصد تراکم  $0.50\%$  و  $0.90\%$  و غلظت دوغاب برابر  $1, W/S=0.33$  در هر سه خاک نشان می‌دهد. طبق این شکل، ارتباط شعاع نفوذ در برابر اندازه دانه‌های خاک مورد تزریق غیر خطی است. به عبارت دیگر افت شعاع نفوذ با ریزتر شدن دانه بندی از ماسه ریز تا ماسه بسیار ریز (ماسه سیلنتی) نسبت به ماسه متوسط تا ریز شدیدتر است. به طور خلاصه این شکل برای تحلیل‌های راحت‌تر در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق این جدول، میزان شعاع نفوذ به ازای تراز فشار تزریق  $176\text{ cm}$  برای خاک با دانه‌بندی متوسط  $100\text{ cm}$ ، خاک ریز  $61\text{ cm}$  و خاک بسیار ریز (ماسه سیلنتی) برابر با  $19\text{ cm}$  است. به عبارت دیگر کاهش  $3/4$  برابری در اندازه دانه‌ها باعث افت حدوداً  $39\%$  درصدی و کاهش  $5$  برابری در اندازه دانه‌ها منجر به افت حدوداً  $81\%$  درصدی در شعاع نفوذ دوغاب شده است. این روند در دوغاب‌ها و تراکم‌های دیگر عیناً تکرار نشده است. همچنین، شاید دیگر نتوان با این محدوده فشار بدون ایجاد دست خوردگی در ماسه بسیار ریز، عمل تزریق را در خاکهای سیلنتی انجام داد.

سانتیمتر است، در حالی که در ماسه بسیار ریز برای هر دو دانسیته تقریباً برابر است با ۱۲ cm، و این نشان دهنده استهلاک اثر تراکم در ماسه بسیار ریز دارد.

### ۸-۳- اثر غلظت دوغاب

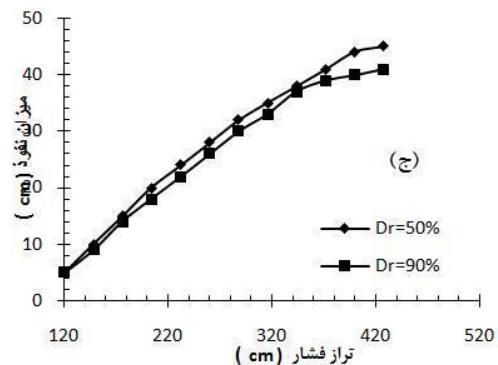
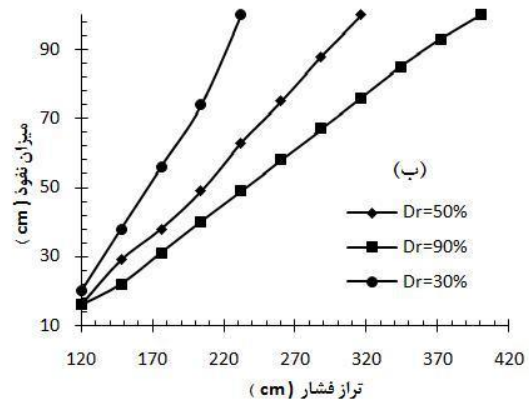
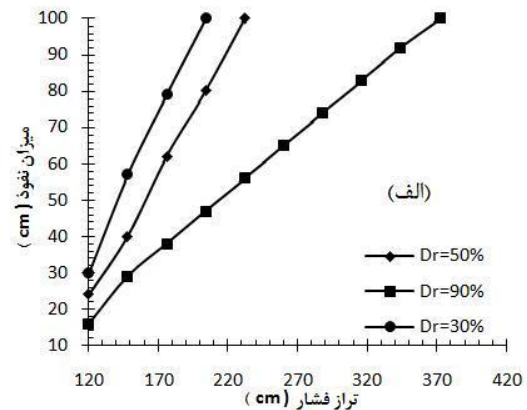
براساس شکل ۶ که اثر غلظت دوغاب را بر روی ارتباط بین تراز فشار و شعاع نفوذ نشان می‌دهد و نتایج سایر آزمایش‌ها می‌توان گفت:

اثر غلظت بر روی شعاع نفوذ، تابع اندازه دانه‌های خاک است و با ریزتر شدن اندازه دانه‌ها، اثر غلظت کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در ماسه متوسط تحت تراز فشار دوغاب ۲۶۰ cm، شعاع تزریق برای نسبت W/S برابر ۱ و ۰/۳۳ به ترتیب برابر است با ۱۰۰ و ۶۵ سانتیمتر (اختلاف ۳۵ cm)، در حالی که در ماسه سیلتی به ترتیب برابر است با ۳۴ و ۲۴ سانتیمتر (اختلاف ۱۰ cm). لذا کاهش ۵ برابری در اندازه دانه‌ها منجر به کاهش ۳/۵ برابری اثر غلظت دوغاب شده است.

اثر غلظت، تابع تراکم خاک است و با افزایش تراکم اثر غلظت بر روی شعاع نفوذ کاهش می‌یابد. ارتباط بین شعاع نفوذ دوغاب و تراز فشار بسته به دو متغیر فوق می‌تواند خطی و یا غیر خطی باشد.

اغلب اختلاف بین شعاع نفوذ در غلظت‌های مختلف در ترازهای فشار پایین کم است و با افزایش تراز فشار اثر غلظت بر روی شعاع نفوذ افزایش می‌یابد.

با توجه به مطالب گفته شده ملاحظه گردید که تزریق نمونه‌هایی با دانه‌بندی درشت، متوسط و ریز با توجه به محدودیت در اعمال فشار در آزمایشگاه به راحتی صورت پذیرفت، اما در مورد ماسه با دانه‌بندی بسیار ریز (۵۰ درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰) امکان تزریق کامل نمونه (۱ متر) در محدوده فشارهای اعمالی وجود نداشت و نمونه به صورت ناقص تزریق گردید (جدول ۴). در واقع برای ماسه‌هایی با درصد ریزدانه قابل توجه، امکان نفوذ دوغاب به سختی صورت می‌گیرد و نیاز به اعمال فشار بسیار بالا برای تزریق کامل نمونه‌ها است که این مقدار فشارها ممکن است منجر به گسیختگی و دستخوردگی خاک گردد.



شکل (۵): اثر تراکم بر روی شعاع نفوذ (w/s=0.33): الف) دانه-بندی متوسط، ب) دانه‌بندی ریز، ج) دانه‌بندی بسیار ریز

دید می‌شود که فشار لازم برای تزریق ماسه با دانه‌بندی ریز با درصد تراکم ۳۰ درصد، با فشار لازم برای تزریق خاک با دانه‌بندی متوسط ولی درصد تراکم بالاتر مثلاً ۹۰ درصد تقریباً برابر است. شکل‌های ۵ الف و ب نشان می‌دهند که اثر تراکم با افزایش فشار تزریق افزایش می‌یابد ولی مطابق شکل ۵ ج در ماسه بسیار ریز، تراکم خاک اثر چندانی ندارد، در نتیجه اثر تراکم نسبی است. بنابراین می‌توان گفت که اثر تراکم بر روی تزریق-پذیری ماسه‌ها تابع اندازه دانه‌های خاک است. به عنوان مثال شعاع تزریق در ماسه متوسط به ازای فشار تزریق ۱۸۰ cm و دانسیته نسبی ۳۰ و ۹۰ درصد به ترتیب برابر است با ۸۰ و ۳۸

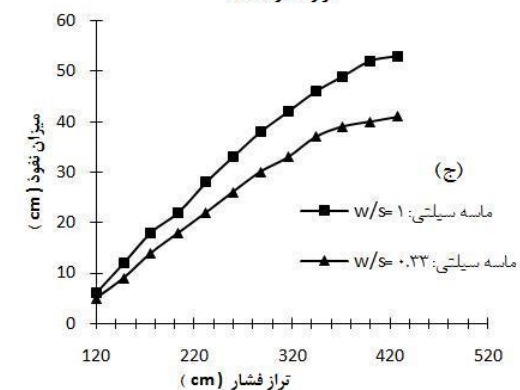
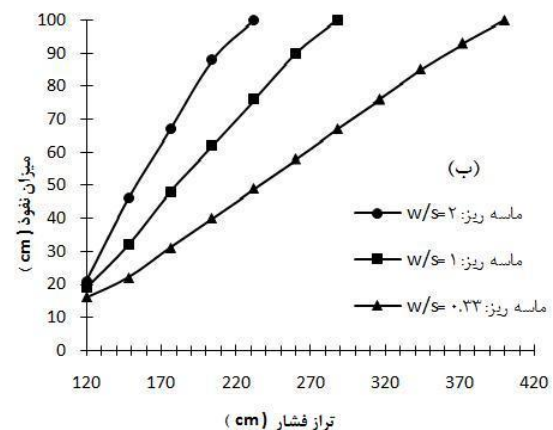
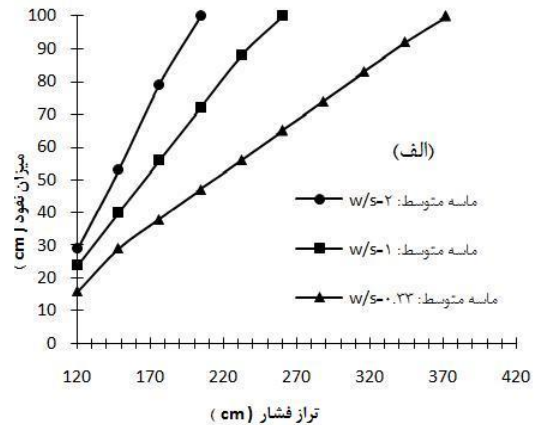
### ۹- نتیجه گیری

در این تحقیق یک سری آزمایش تزریق با دوغاب شیمیایی سیلیکات سدیم با غلظت‌های مختلف به داخل یک خاک ماسه‌ای با چهار دانه‌بندی مختلف از حالت درشت تا بسیار ریز (ترکیب ۵۰ درصد ماسه و ۵۰ درصد سیلت) انجام شد. براساس نتایج آزمایشها می‌توان گفت که:

دوغاب حاضر با نسبت‌های مختلف آب به سیمان از ۲ تا ۰/۳۳ قابل تزریق در ماسه‌های درشت تا ریز می‌باشد. با ریزتر شدن دانه‌بندی خاک و در نتیجه ریزتر شدن اندازه منافذ آن از میزان تزریق پذیری ماسه کاسته می‌شود. اضافه شدن سیلت به ماسه باعث افت شدید شعاع نفوذ دوغاب می‌شود. در واقع در این حالت، با افزایش فشار تزریق، نرخ شعاع نفوذ به سمت صفر میل می‌کند. این امر نشان‌دهنده آن است که افزایش بیشتر فشار نمی‌تواند کارساز باشد و ممکن است این افزایش فشار باعث گسیختگی خاک و شکست هیدرولیکی در برابر فشار دوغاب شود.

با افزایش درصد تراکم، فشار لازم برای تزریق پذیری ماسه نیز افزایش می‌یابد. ولی برای ماسه با دانه‌بندی متوسط و ریز در تراکم‌های ۳۰ و ۵۰ درصد اثر تراکم چندان محسوس نیست. ریزتر شدن اندازه دانه‌های خاک (ماسه بسیار ریز) باعث کاهش اثر تراکم می‌شود. به عبارتی دیگر در ماسه متوسط و ریز اثر تراکم بسیار بارزتر از ماسه سیلته (بسیار ریز) است. افزایش غلظت دوغاب باعث کاهش تزریق پذیری می‌شود و با ریزتر شدن ماسه (برای مثال ماسه سیلته) اثر غلظت دوغاب کاهش می‌یابد.

از بررسی اثر سه عامل بر روی تزریق پذیری می‌توان این‌گونه بیان نمود که اثر دانه‌بندی بر روی تزریق پذیری بسیار بیشتر از سایر عوامل است در واقع آنچه مانع تزریق کامل نمونه گردید ریزتر شدن دانه‌ها و افزودن سیلت به ماسه بود. طبق نشریه ارتش آمریکا، حد نفوذپذیری دوغاب سیلیکات سدیم تا ماسه ریز بیان شده است [۳]، در حالی که در این تحقیق ملاحظه گردید که این دوغاب در ماسه‌های سیلته نیز قابلیت تزریق دارند.



شکل (۶): شعاع نفوذ دوغاب در برابر فشار تزریق در تراکم ۹۰٪ در غلظت‌های مختلف دوغاب، الف: ماسه متوسط، ب: ماسه ریز، ج: ماسه سیلته

جدول (۴): اثر غلظت و تراکم بر روی فشار لازم برای تزریق کامل نمونه خاک با دانه‌بندی بسیار ریز (ماسه سیلته)

Dr (%)	۳۰			۵۰			۹۰		
	۲	۱	۰/۳۳	۲	۱	۰/۳۳	۲	۱	۰/۳۳
غلظت دوغاب	-	-	-	-	-	-	-	-	-
شعاع نفوذ در حدائر فشار (cm)	-	۲۰۴	۲۳۲	-	۱۷۶	۲۰۴	-	۱۷۶	۲۰۴

## ۱۰- مراجع

Underground Space technology, 2002.

- [۱۰] Dano, C., Hicher, P-Y., and Taillierz, S., "Engineering Properties of grouted sands", J. Geotec. And Geoenviron. Eng., Vol. 130, No. 3, pp. 328-338, 2004.
- [۱۱] Ata, A., and Vipulanandan, C., "Cohesive and Adhesive Properties of Silicate Grout on Grouted-Sand Behavior", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124 No. 1, pp. 38-44, 1998.
- [۱۲] Ata, A., and Vipulanandan, C., "Factors Affecting Mechanical and Creep Properties of Silicate-Grouted Sands", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125 No. 10, pp. 868-876, 1999.
- [۱۳] Hassanlourad M., Salehzadeh, H. and Shahnazari H., "Mechanical properties of ungrouted and grouted carbonate sands", International Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 4. pp. 507-516, 2010.
- [۱۴] Hassanlourad M., Salehzadeh, H. and Shahnazari H., "Undrained triaxial shear behavior of grouted carbonate sands", International Journal of Civil Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 307-314, 2011.
- [۱] حسنلوراد محمود، صالح زاده حسین و شاه نظری حبیب، "اصلاح خاکهای ماسه‌ای کربناته با استفاده از تزریق شیمیایی"، مجله علمی پژوهشی امیر کبیر. شماره ۷۰، ۱۳۸۸.
- [۲] Karol, R.H., "Chemical Grouting", Marcel Dekker Inc., New York, 1983.
- [۳] Army Corps of Engineers. "Engineer Manual. CHEMICAL GROUTING". EM 1110-1-3500, 1995.
- [۴] Herndon, J., Lenahan, T., "Grouting in soils", Design and Operations Manual, Federal Highway Administration, Halliburton Services, Duncan, Oklahoma, Technical Report, Vol. 2 , 1976.
- [۵] Bell, F. G., "Engineering Treatment of soils", E&FN Spon, London, pp. 10-160, 1993.
- [۶] Incecik, M. and Ceren, I., "Cement grouting model tests", Bulletin of The technical University of Istanbul, Istanbul, Vol. 48, No. 2, pp. 305-317, 1995.
- [۷] Akbulut, S., "The improvement of geotechnical properties in granular soils by grouting", PhD. Thesis. The Institute of the Istanbul Technical University, Istanbul, 1999.
- [۸] Kutzner, C., "Grouting of Rock and Soil", Bulkema, Netherlands, pp. 10-195, 1996.
- [۹] Saute Akbulut, Ahmet Saglamer, "Estimating the groutability og granular soils: a new approach", Tunneling and