

## تزریق پذیری خاک ماسه‌ای به‌وسیلهٔ دوغاب بنتونیت

امیر نوری، رضا ضیایی مؤید\*، محمود حسنلوراد؛

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکدهٔ مهندسی عمران

پذیرش ۹۵/۰۲/۱۶

تاریخ: دریافت ۹۴/۰۴/۱۷

### چکیده

در مقاله حاضر نتایج پژوهش‌های آزمایشگاهی در خصوص مقدار نفوذپذیری دوغاب بنتونیت در داخل ماسه تمیز ارائه شده است. وجود خاک رس بنتونیت 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](mailto:ziaie@eng.ikiu.ac.ir)

### 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 حفره‌های تشکیلات سنگی و خاکی تزریق شده و باعث بهبود مشخصات توده می‌شود. به طوری که در اثر آن نفوذپذیری لایه‌ها کم، مقاومت لایه‌ها زیاد و شکل‌پذیری آن‌ها کم می‌شود. ویژگی مهم استفاده از روش تزریق در به‌سازی توده خاک، در زیر سازه‌های موجود است که در پروژه‌های مختلف ساختمانی، راه‌سازی و راه آهن در حال بهره‌برداری استفاده می‌شود [۴]. یکی از پدیده‌هایی که تزریق در آن مؤثر است کنترل روان‌گرایی در خاک‌های غیرچسبنده است. در چنین خاک‌هایی، به ویژه ماسه 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 بتونیت به درون فضای منافذ ماسه، با افزایش چسبندگی خاک، مقاومت سیکلیکی ماسه را افزایش می‌دهد. در صورتی که زمان کافی از تزریق بتونیت به داخل نمونه ماسه گذشته باشد، مقاومت روان‌گرایی بیش از پیش افزایش پیدا می‌کند [۹].

بتونیت 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 آبنند و مخازن دفن باله‌های هسته‌ای استفاده می‌شود [۱۴]. بر اساس آنچه در ادبیات آمده در تزریق بتونیت در خاک ماسه‌ای، ضریب نفوذپذیری قبل از تزریق مقدار  $1,12 \times 10^{-2}$  بوده است که بعد از تزریق به مقدار  $5,22 \times 10^{-5}$  رسیده و حدود ۲۱۵ برابر کاهش دارد [۲]. به تازگی، محققان بسیاری به‌منظور بهبود عملکرد مهندسی خاک‌ها، استفاده از سیستم دوغاب بتونیت 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 بتونیت تزریق شده است انجام شده است [۱۵]. هم‌چنین پژوهش‌های دیگری در خصوص افزایش مقاومت روان‌گرایی خاک ماسه‌ای سست به‌وسیلهٔ تزریق دوغاب بتونیت انجام شده است [۱۷]. در این عملکرد، دوغاب بتونیت در خاک دانه‌ای سست اشباع با فشار کم و بدون اختلال در ساختار خاک تحت تزریق قرار می‌گیرد. با توجه به ماهیت تیکسوتروپی دوغاب بتونیت، 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 بتونیت غلیظ مناسب است، غلظت‌های زیاد نفوذ بتونیت 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 [۱۶].

به‌طورکلی دوغاب‌ها به دو دستهٔ دوغاب‌های همراه با دانه‌های معلق (دوغاب زبر) و دوغاب‌های محلول (دوغاب نرم) تقسیم می‌شوند. مخلوط آب و سیمان، رس، بتونیت 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 [۶]. 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 حالی که 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

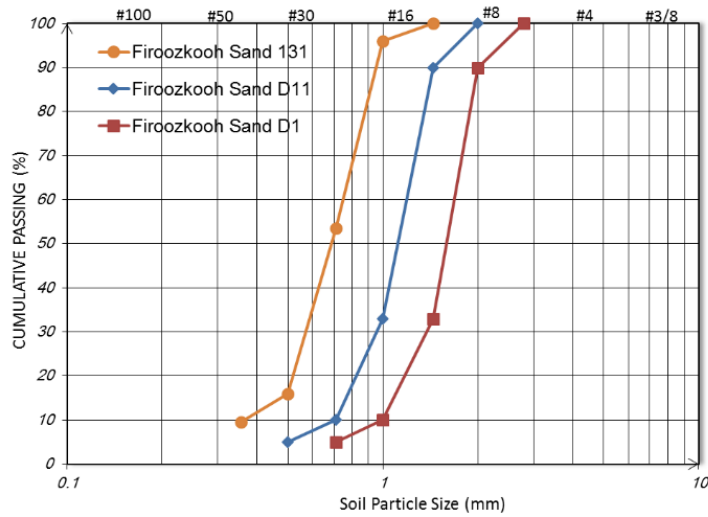
خاک ارائه کردند [۱۲]. محققان دیگری براساس اندازه دانه خاک و سیمان مسئله تزریق پذیری را بررسی کردند، در حالی که آزمایش‌های با مقیاس بزرگ‌تر نشان می‌دهند که تزریق پذیری خاک‌های دانه‌ای متأثر از پارامترهای مختلفی از خاک و ماده تزریق است [۸]، [۱۳]. این پارامترها عبارتند از اندازه دانه‌های خاک و ماده سوسپانسیون تزریق، درصد ریزدانه (FC) خاک، فشار تزریق، دانسیته نسبی (Dr) خاک و نسبت آب به بتونیت (یا ویسکوزیته) دوغاب. با بررسی خصوصیات مکانیکی خاک در اثر تزریق سیلیکات سدیم بر ماسه بابلر 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 زاویه اصطکاک داخلی ندارد [۳].

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

### ویژگی‌های ماسه استفاده شده

در بررسی حاضر، از ماسه سیلیسی شکسته 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 تزریق پذیری ماسه با استفاده از دوغاب شیمیایی، سه نوع دانه‌بندی مختلف درشت (رد شده از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۵۰، ماسه D1)، متوسط (رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۱۰۰- ماسه D11)، ریز (بین الک شماره ۳۰ و ۲۰۰- ماسه ۱۳۱) استفاده

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	ماسه فیروزکوه	ماسه فیروزکوه
	131	D11	D1
D <sub>50</sub> (mm)	۰/۷	۱/۱	۱/۶
C <sub>u</sub>	۲/۱۴	۱/۵۷	۱/۸
C <sub>c</sub>	۱/۰۹	۱/۱۷	۱/۰۹
G <sub>s</sub>	۲/۶۵	۲/۶۵	۲/۶۵
e <sub>max</sub>	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۹
e <sub>min</sub>	۰/۶۴	۰/۶۶	۰/۶۹
γ <sub>min</sub> (ton/m <sup>3</sup> )	۱/۳۷	۱/۳۵	۱/۳۳
γ <sub>max</sub> (ton/m <sup>3</sup> )	۱/۶۲	۱/۶۰	۱/۵۷

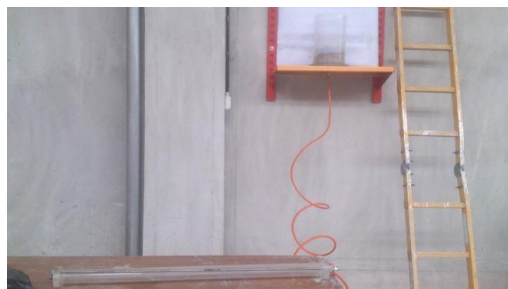
### دستگاه تزریق

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. به نحوی که در حین انجام تزریق، روند کار دیده می‌شود. محل قرارگیری مخزن به گونه‌ای 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 به روش 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 بدنه قالب می‌توان مقدار خاک مشخصی را در قالب ریخت تا دانسیته 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 قطر ۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر ساخته شدند و با ترکیبات مختلف دوغاب تزریق شدند.

دوغاب انتخابی برای تزریق در خاک ماسه، دوغاب بتونیت است. مونت‌موریلونیت به‌عنوان کانی رسی اصلی در بتونیت شناخته شده است به طوری که به‌عنوان مثال در بتونیت MX80 بیش از ۸۷٪ بتونیت از مونت‌موریلونیت تشکیل شده است [۱۶].



مخزن دوغاب با  
ارتفاع قابل تغییر

قالب نمونه

شکل ۲. شکل شماتیک دستگاه تزریق استفاده شده

### دوغاب تزریقی

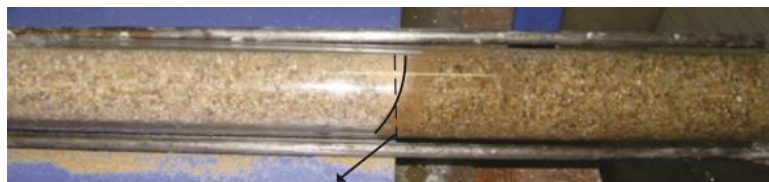
هدف اصلی این مقاله یافتن تزریق پذیری این دوغاب در خاک ماسه‌ای است. هزینه آن نیز تا حدی کم است و اجرای آن نیز آسان است. از مزایای دیگر دوغاب گفته شده اثرات زیست محیطی اندک آن است. به دلیل نوع خاک، ترکیبات شیمیایی آن، یون‌های موجود در خاک، بافت، دانه بندی، اندازه دانه‌ها، تراکم اولیه، قابلیت عبور دوغاب از توده خاک، ترکیب دوغاب می‌تواند متفاوت انتخاب شود بنابراین با ساخت دوغاب‌های مختلف، نحوه تزریق پذیری خاک بررسی می‌شود.

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

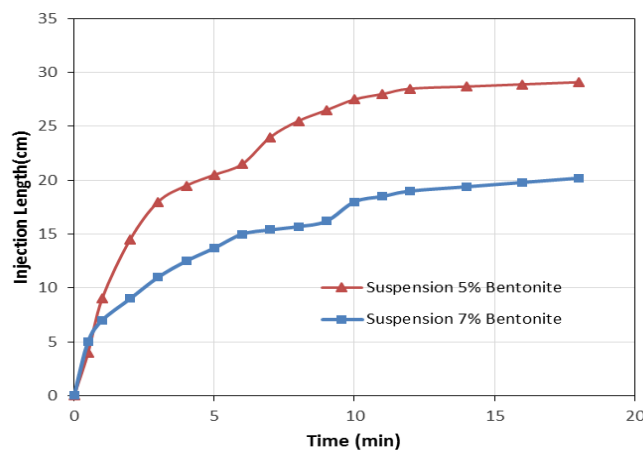
### تزریق

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 مرحله قبل پس از گذشت مدت زمان محدودی

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 مرحله 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 ۴ تغییرات طول نفوذ در برابر زمان برای هدهای ارتفاعی مختلف را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.



شکل ۳. محل قرائت طول نفوذ در نمونه



شکل ۴. 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

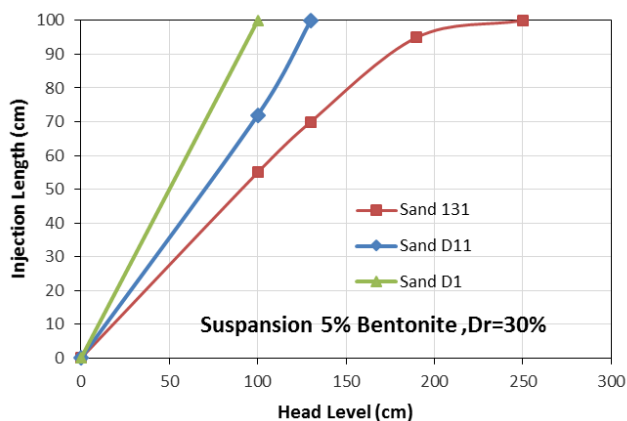
شکل ۵ طول نفوذ را در برابر تراز فشار تزریق برای نمونه با درصد تراکم ۳۰٪ و غلظت دوغاب‌های ۷٪ و ۵٪ بتونیت در هر سه نمونه خاک را نشان می‌دهد. این شکل ارتباط مقدار نفوذپذیری خاک و قطر  $D_{50}$  مربوط به دانه‌بندی را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال در نمونهٔ ماسه درشت  $D_{50}$  برابر ۰/۷ میلی‌متر است که مقدار نفوذ بتونیت 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 ۱/۶ 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 ۶ تغییرات طول نفوذ با قطر دانه‌ها را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود مقدار نسبت طول نفوذ مصالح به‌صورت تقریباً خطی با افزایش قطر دانه‌بندی افزایش می‌یابد. این موضوع در نتایج مربوط به نمونه با تزریق سوسپانسیون حاوی بتونیت 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 بتونیت در این تحقیق کم‌تر است. این موضوع به‌دلیل افزایش ویسکوزیته بتونیت 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.

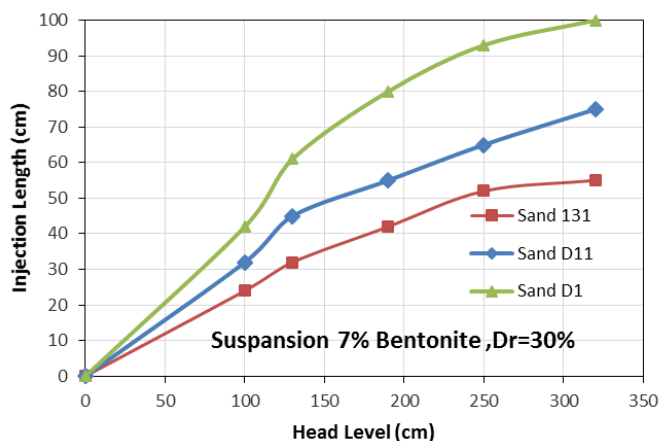
### اثر تراکم

عامل مهم دیگری که در کنار اندازهٔ دانه‌ها باید به آن 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

می‌شود مقدار نفوذ طولی ماده تزریق‌پذیر بتونیت در فشار ۱۹۰ سانتی‌متری در تراکم کم ( $Dr=30\%$ ) برابر ۹۷ سانتی‌متر است. این مقادیر برای تراکم متوسط و زیاد به ترتیب برابر ۷۲ و ۵۵ سانتی‌متر است. با مقایسه این نتایج می‌توان بیان کرد به دلیل 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 تزریق‌شونده با افزایش تراکم، کم می‌شود.

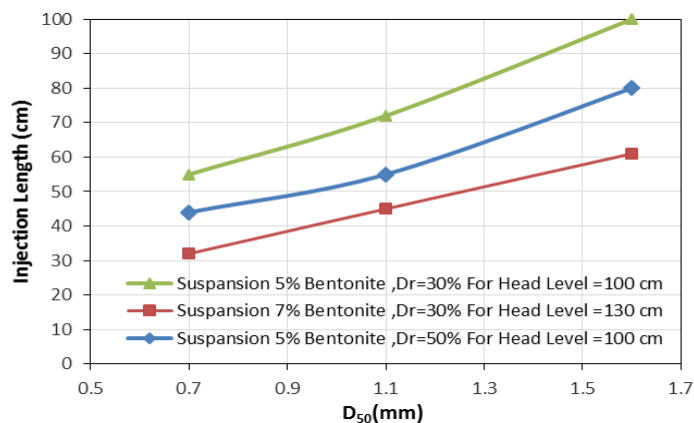


الف



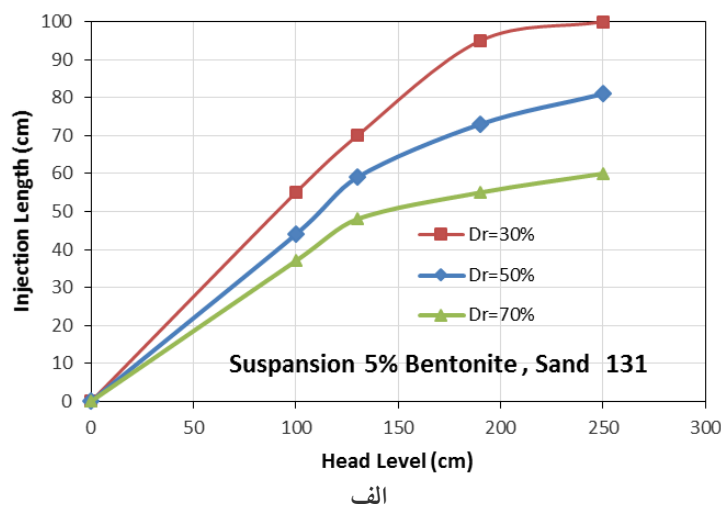
ب

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

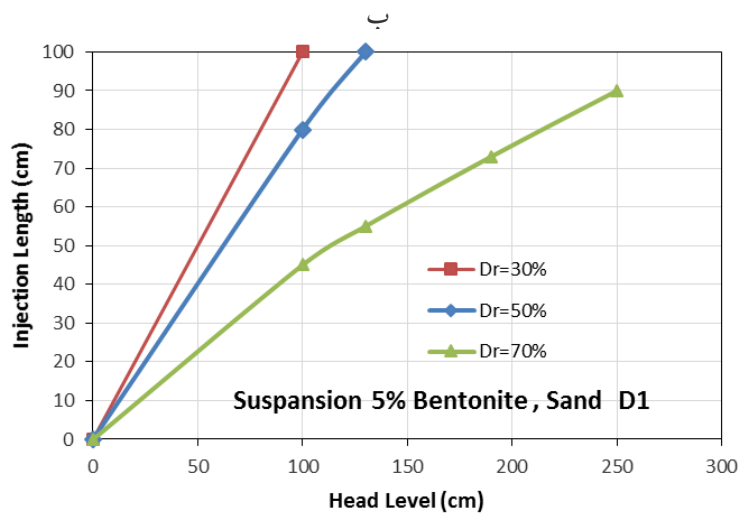
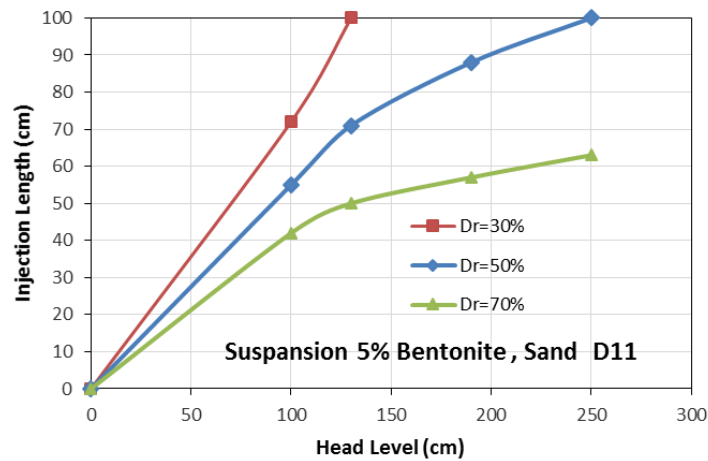


شکل ۶. تغییرات طول نفوذ با قطر دانه‌ها

هم‌چنین از مقایسه 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. به عبارت دیگر در ماسه درشت، اثر تراکم در کاهش طول نفوذ تزریق بیش‌تر از ماسه ریز است.



الف



ج

شکل ۷. تغییرات طول نفوذ در برابر تراز فشار تزریق برای نمونه‌ها با غلظت دوغاب برابر ۰.۵ درصد و در ماسه‌های مختلف با دانه‌بندی مختلف الف) ماسه ریز، ب) ماسه متوسط، ج) ماسه درشت

### اثر غلظت

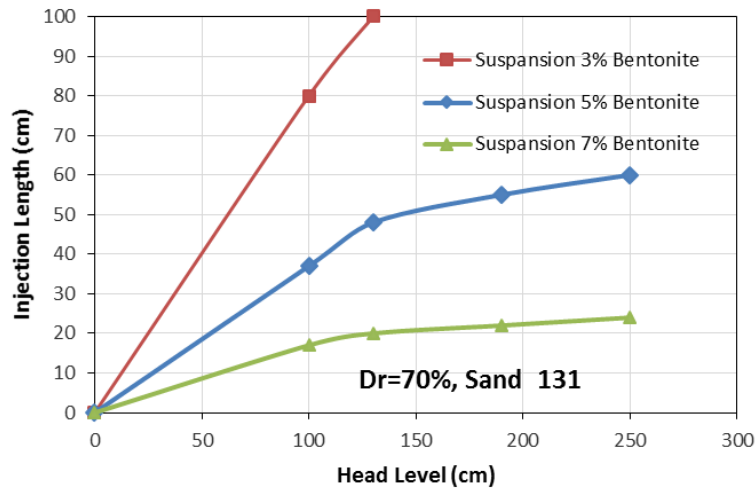
شکل ۸ تغییرات طول نفوذ در برابر تراز فشار برای نمونه‌ها با نسبت تراکم ۰.۷۰ در غلظت‌های بنتونیت ۳، ۵ و ۷٪ در دانه بندی های مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس نمودارهای

به دست آمده می‌توان بیان کرد که هر چه غلظت نسبت بتونیت به آب افزایش پیدا می‌کند از نفوذ طولی ماده تزریق شونده به داخل نمونه کاسته می‌شود. به عنوان مثال برای نمونه ماسه ۱۳۱ (ماسه ریز) در تراکم  $D_r=70\%$  مقدار نفوذ در ارتفاع فشاری ۱۳۰ سانتی‌متری برای سوسپانسیون حاوی ۳٪ بتونیت برابر ۱۰۰ سانتی‌متر است. همین مقادیر برای نمونه‌های حاوی ۵٪ و ۷٪ بتونیت به ترتیب برابر ۴۵ و ۲۰ سانتی‌متر است. این موضوع ناشی از افزایش وجود بتونیت (ماده جامد) در سوسپانسیون است. هرچه مقدار مواد جامد تزریق شونده در داخل سوسپانسیون بیش‌تر باشد به دلیل 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 به دلیل افزایش ویسکوزیته ماده تزریق شونده با افزایش مقدار بتونیت امکان حرکت رو به جلو برای سوسپانسیون تحت فشار ثابت کم می‌شود. این موضوع نیز پارامتر مهم دیگری است که منجر به کاهش طول تزریق با افزایش غلظت نمونه می‌شود.

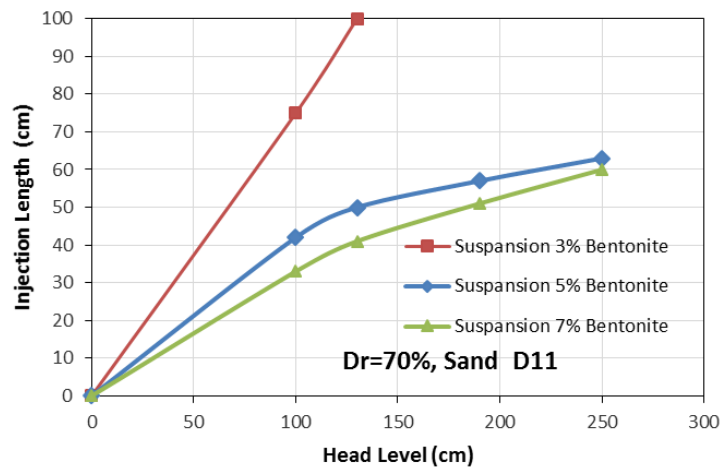
هم‌چنین مشاهده می‌شود تغییرات نفوذ در غلظت‌های بیش‌تر کم‌تر از تغییرات نفوذ در غلظت کم است. به عنوان مثال در ماسه D1 (ماسه درشت) در ارتفاع فشاری ۱۰۰ سانتی‌متر مقدار نفوذ در غلظت ۵٪ افزایش ۳۵ درصدی نسبت به غلظت ۳٪ دارد و در غلظت ۷٪ افزایش ۳۰۰ درصدی نسبت به نمونه حاوی ۳٪ بتونیت دارد. این موضوع نشان‌دهنده این مطلب است که در غلظت کم‌تر از ۵٪ حضور بتونیت 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 نشان‌دهنده این مطلب است که با کاهش خلل و فرج در داخل ماسه از اثر تغییر غلظت سوسپانسیون کاسته می‌شود.

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

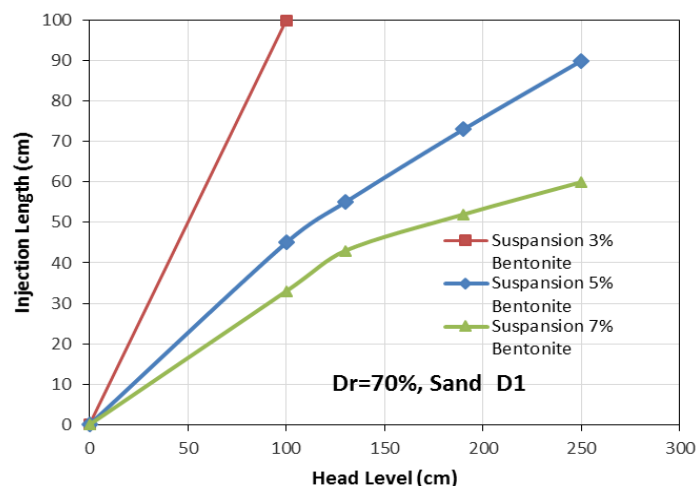
نتایج آن‌ها را تأیید می‌کند. هم‌چنین صدقیانی و نصر، ۱۳۸۷، مشاهده کردند تزریق دوغاب‌ها با پایه سیلیکات سدیم با غلظت‌های بالای حدود ۳۰٪ در ماسه بابلسر باعث ایجاد چسبندگی در خاک شده و در بالاترین حالت به حدود ۷۰ کیلوپاسکال می‌رسد و تأثیر چندانی هم بر زاویه اصطکاک داخلی ندارد و نیز نفوذپذیری در این خاک‌ها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



الف



ب



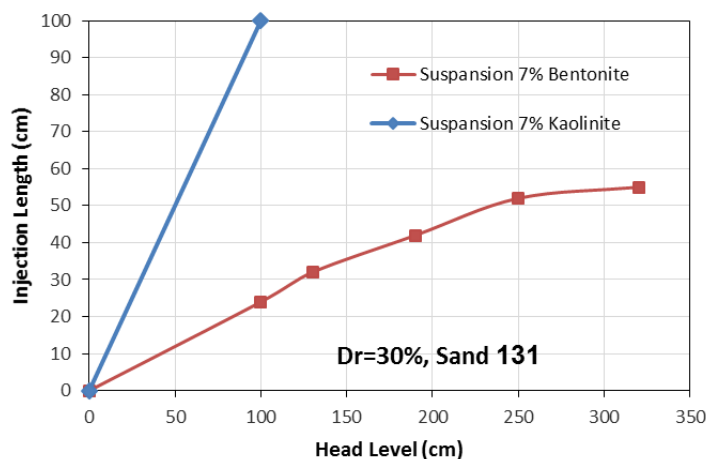
ج

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 نشان‌دهنده اثر  $SSA^1$  (سطح مخصوص ویژه خاک) و  $CEC^2$  (ظرفیت تبادل کاتیونی خاک) را بر تزریق‌پذیری ماسه دارد. جدول ۲ نشان‌دهنده پارامترهای مذکور برای بنتونیت و کائولینیت است. بر اساس نتایج به دست آمده هرچه سطح مخصوص ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بیش‌تر باشد به دلیل 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



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

جدول ۲. مشخصات زیست محیطی دوغاب‌ها [۵]

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

با مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج مقاله مانشتی و شریفی‌پور، ۱۳۹۲، مشاهده می‌شود که تزریق بنتونیت در خاک ماسه‌ای تنکابن، ضریب نفوذپذیری قبل از تزریق را به صورت 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] منجر به افزایش قابلیت تزریق‌پذیری شده است و این موضوع نیز تأییدکننده 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.

- بر اساس نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد:
- دوغاب بتونیت 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 بتونیت به نمونه ماسه‌ای کاسته می‌شود. علت این موضوع نیز کاهش حفرات خاک است.
  - با افزایش غلظت بتونیت در سوسپانسیون از مقدار نفوذ بتونیت در ماسه کاسته می‌شود. افزایش مقدار ویسکوزیته با افزایش غلظت بتونیت در سوسپانسیون از یک طرف و افزایش مقدار دانه‌های دوغاب عبوری از منافذ و حفرات بر اثر افزایش غلظت بتونیت از طرف دیگر علت این امر است.
  - با مقایسه مقدار تزریق‌پذیری بتونیت 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 بتونیت، مقدار فشار تزریقی را برای تزریق بدون شکست هیدرولیکی در داخل نمونه ماسه‌ای تعیین کرد و از آن در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی بهره گرفت. همچنین می‌توان با مقادیر کمی به‌دست آمده، طول نفوذ را برای فشارهای تزریقی مختلف پیش‌بینی کرد.

### منابع

۱. حسنلوراد محمود، صراف‌یگانه آرش، "بررسی قابلیت تزریق‌پذیری خاک ماسه‌ای با دوغاب شیمیایی سیلیکات سدیم" مجله علمی پژوهشی امیر کبیر، شماره ۴۵ (۱۳۹۲).

۲. مانشتی محسن، شریفی‌پور محمد، "مطالعه آزمایشگاهی اصلاح خواص فیزیکی خاک‌های ماسه‌ای به‌وسیله تزریق بنتونیت و نانورس" پایان‌نامه 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).
۴. ضیایی‌مؤید رضا، کمال زارع، "اصلاح مشخصات فیزیکی خاک‌های رمبنده (بررسی موردی: راه آهن تهران- سمنان)"، زمین‌شناسی مهندسی، شماره ۲، (۱۳۹۴) ۲۸۶۹-۲۸۹۰.
۵. نوری‌امیر، اوحدی وحیدرضا، "تأثیر آلاینده‌های فلز سنگین در خصوصیات مکانیکی بنتونیت تحت اثر نانورس" پایان‌نامه 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).

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. Kazemian 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., Francois M., Pfeiffert C., Pelletier M., Ruch R., Barres O., Yvon J., Ville'ras F. et Cathelineau M., "Caracté'risation mine'ralogique, cristalochimique 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.

19. Yoon J., El Mohtar C. S., "Dynamic rheological properties of sodium pyrophosphate 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).