

توزیع پذیری محلول نانوسیلیس کلوئیدی در ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر با درصد لای مختلف

احسان آذینی (دانشجوی دکتری)

رضا ضیائی مؤید* (استاد)

سید ابوالحسن نائینی (استاد)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

مهندسی عمران شریف (پهار ۲۰۲۰) (۱۴۰۲)
دوری ۲ - ۳۹، شماره ۱، ص. ۳۸-۲۹، پژوهشی

در مطالعه‌ی حاضر، توزیع‌پذیری روی خاک کربناته‌ی خلیج فارس (بوشهر) با محلول نانوسیلیس با ساخت نمونه‌های یک متری بررسی شده است. نمونه‌های ماسه‌ی کربناته با ترکیب مختلف لای با درصد‌های (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) و ۳ غلظت محلول با درصد‌های (۱۰، ۲۰ و ۳۰) توزیع شده‌اند. تا بتوان اثر عواملی، مانند: غلظت محلول، درصد ریزدانه و فشار تزریقی در میزان توزیع‌پذیری، نفوذ، و ارتباط آنها با یکدیگر را بررسی کرد. همچنین به منظور به دست آوردن غلظت بهینه‌ی توزیع، آزمایش‌های تک‌محوری با مقادیر مختلف درصد لای، ۳ درصد مختلف غلظت و در ۳ دوره‌ی عمل‌آوری انجام و مشاهده شد که تثبیت مؤثر و تمامی غلظت‌ها توزیع‌پذیر بوده است؛ به نحوی که غلظت ۳۰٪، بهینه‌ی غلظت تزریقی است، که بهترین نتیجه را در افزایش مقاومت داشته است. همچنین غلظت ۳۰٪، نسبت به غلظت ۱۰٪، به طور میانگین ۴۰٪ افزایش مقاومت را در پی داشته است.

واژگان کلیدی: ماسه‌ی کربناته‌ی لای‌دار بوشهر، نانوسیلیس کلوئیدی، توزیع‌پذیری، بهسازی خاک، آزمایش تک‌محوری.

e_azini@yahoo.com
ziaie@eng.ikiu.ac.ir
naeini@eng.ikiu.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه بهسازی خاک‌های مسئله‌دار، یکی از مسائل پیش روی جامعه‌ی مهندسی است. یکی از خاک‌های مسئله‌دار، خاک ماسه‌ی کربناته‌ی سُست است، که در جنوب ایران، از جمله: هرمز، قشم، کیش و بوشهر یافت می‌شوند. منطقه‌ی خلیج فارس به ویژه بندر بوشهر، از منطقه‌های راهبردی کشور است، که در آن ماسه‌ی کربناته با درصد لای مختلف به وفور یافت می‌شود. لذا مطالعه‌ی دقیق بهسازی خاک منطقه‌ی خلیج فارس، اهمیت به‌سزایی دارد. خواص ماسه‌ی کربناته، که جزء خاک‌های مسئله‌دار محسوب می‌شود، را می‌توان با تثبیت‌کننده‌های شیمیایی به ویژه محلول نانوسیلیس کلوئیدی افزایش داد.

خاک‌های کربناته به خاک‌هایی گفته می‌شود که مقادیر قابل ملاحظه‌ی کربنات کلسیم دارند (عمدتاً در حدود ۵۰٪ یا بیشتر). اگر بیش از ۵۰٪ مواد حل شده از خاکی در اسید هیدروکلریک، از نوع کربناته باشد، آن خاک کربناته تلقی می‌شود.^[۱] رسوبات کربناته، تنوع بسیار زیادی هم از لحاظ منشأ تولید و هم از نظر ویژگی‌های

مورد ذکر شده وجود داشته باشد.^[۲] سیلیس کلوئیدی، تثبیت‌کننده‌ی مناسب برای تثبیت خاک‌های ماسه‌ی سُست است.^[۳-۶] سیلیس کلوئیدی تعلیقی، کلوئیدی است که فاز پیوسته‌ی آن، آب و ذرات پراکنده‌ی آن، ذرات سیلیس است و در صورتی پایدار می‌ماند که رسوب نکند و یا لخته شدن در آنها با سرعت کم رخ دهد. ژل‌شدگی^۲، فرایندی است که طی آن محلول سیلیس به ساختار زنجیره‌ی شکل به حالت ژل در می‌آید. زمان ژل‌شدگی نانوسیلیس به عوامل مختلفی، مانند: درصد سیلیس، اندازه‌ی ذرات نانوسیلیس، pH و حرارت محلول بستگی دارد. با ثابت ماندن درجه حرارت و اندازه‌ی ذرات عامل pH باقی می‌ماند. کوتاه‌ترین زمان ژل‌شدگی در محدوده‌های $7 < pH < 4$ رخ

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۳۱، اصلاحیه ۱۴۰۱/۸/۹، پذیرش ۱۴۰۱/۸/۱۸

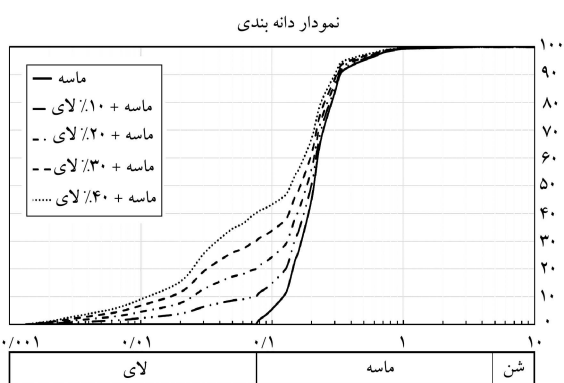
DOI:10.24200/J30.2022.60975.3135

استناد به این مقاله:

آذینی، احسان، ضیائی مؤید، رضا و نائینی، سید ابوالحسن (۲۰۲۰). «توزیع‌پذیری محلول نانوسیلیس کلوئیدی در ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر با درصد لای مختلف»، مهندسی عمران شریف، ۲(۱)، ۳۹-۲۹، ص. ۳۸-۲۹

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح.

مشخصات خاک (gr/cm ³)							نوع خاک
C _c	C _u	D ₅₀	γ _{dmin} (gr/cm ³)	γ _{dmax} (gr/cm ³)	e _{min}	e _{max}	
۰/۹۶۴۰	۱/۸۷۰	۰/۲۰۸	۱/۶۰	۱/۹۱	۰/۴۳۱	۰/۷۰۲	ماسه‌ی خالص
۱/۳۸۸	۲/۸۸۰	۰/۲۰۰	۱/۵۹	۱/۹۶	۰/۳۹۵	۰/۷۲	ماسه با ۱۰٪ لای
۳/۳۵۳	۸/۷۵۰	۰/۱۹۰	۱/۵۴	۱/۹۷	۰/۴۰	۰/۷۹	ماسه با ۲۰٪ لای
۱/۵۹۸	۱۳/۸۷۰	۰/۲۰۰	۱/۵۲	۱/۹۷	۰/۴۱۶	۰/۸۳۳	ماسه به ۳٪ لای
۰/۸۱۷	۱۶/۱۸۰	۰/۱۴۰	۱/۴۸	۱/۹۵	۰/۴۴۹	۰/۹	ماسه با ۴۰٪ لای



شکل ۱. دانه‌بندی ترکیب‌های مختلف ماسه = لای به کار رفته در پژوهش حاضر.

نانوسیلیس، تاکنون مطالعاتی انجام نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر، بررسی‌ها در خصوص توزیع‌پذیری ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر در درصد‌های مختلف لای انجام شده است. همچنین نقش مؤثر محلول تریقی (نانوسیلیس کلوتیدی) تحت تأثیر عواملی از جمله: درصد لای، غلظت و pH محلول بررسی شده و هدف نهایی پژوهش حاضر، رسیدن به غلظت بهینه و مؤثر در خاک ماسه‌ی کربناته‌ی لای‌دار بوده است، که بر اساس نتایج آزمایش‌های تک‌محوری به دست آمده است.

۲. مشخصات مصالح و محلول استفاده شده

۲.۱. مشخصات ماسه‌ی استفاده شده

در سواحل شمالی خلیج فارس، عمدتاً خاک‌هایی دارای کربنات کلسیم (CaCO₃) هستند. در پژوهش حاضر از ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر استفاده شده است. با توجه به اطلاعات لاگ گمانه، که از پروژه‌های مختلف منطقه‌ی بوشهر به دست آمده است، درصد لای در خاک‌های ماسه‌ی لای‌دار در مکان‌های مختلف بین ۱۰ تا ۴۲ درصد بوده است.^[۱۹] بنابراین در پژوهش حاضر، درصد وزنی لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ انتخاب شده است. به دست آوردن درصد کربنات کلسیم خاک ماسه‌ی بوشهر نیز بر اساس استاندارد BS۱۳۷۷-۳ انجام شده است، که مقدار آن ۷۲/۵٪ بوده است.^[۲۷] دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM D۶۹۱۳-۱۷ انجام شده است، که در شکل ۱ مشاهده می‌شود.^[۲۸] بر اساس استاندارد ASTM D۴۲۵۴-۱۶، نسبت تخلخل بیشینه و بر اساس استاندارد ASTM D۴۲۵۳-۱۶، نسبت تخلخل کمینه به دست آمده‌اند.^[۲۹] همچنین جهت به دست آوردن چگالی ویژه (G_s) از استاندارد ASTM D۸۵۴-۱۴ استفاده شده است.^[۳۱] در جدول ۱، مشخصات فیزیکی مصالح ارائه شده است. همچنین عکس‌های SEM گرفته شده از ماسه‌ی لای‌دار

می‌دهد و خارج از محدوده‌ی اخیر، به شدت این زمان می‌تواند افزایش یابد.^[۷] موضوع توزیع‌پذیری خاک‌های دانه‌ی، سال‌هاست که مورد پژوهش پژوهشگران مختلف بوده و در بیشتر موارد از دوغاب‌های زبر، مانند سیمان، استفاده کرده‌اند.^[۹] و^[۱۰] در پژوهش‌های مذکور، اثر اندازه‌ی دانه‌های خاک و سیمان ارزیابی شده است. در حالی که در مطالعات دیگری، پارامترهای: اندازه‌ی خاک و ماده‌ی سوسپانسیون تریقی، درصد ریزدانه، فشار تریقی، چگالی نسبی و نسبت آب به سیمان بررسی شده‌اند.^[۱۱] و^[۱۲] دانو^۳ و همکاران (۲۰۰۴)، توزیع‌پذیری خاک دانه‌ی از ماسه تا سیلت را با تریقی دوغاب سیمان پرتلند بسیار ریز بررسی کرده‌اند.^[۱۳] با توجه به استفاده‌ی گسترده از تریقی نفوذی^۴ با سیمان در بهسازی خاک‌ها، تولید سیمان مشکلاتی را در پی دارد. برای تولید سیمان پرتلند انرژی زیادی مصرف می‌شود و همچنین صنعت سیمان سبب انتشار حدود ۷٪ گاز کربنیک در جهان می‌شود.^[۱۴] لذا استفاده از مصالح جایگزین به ویژه بهسازی با مواد شیمیایی، که غیرسمی و دوستدار محیط‌زیست هستند (به ویژه نانوسیلیس) رواج یافته است. مطالعات مختلفی بر روی تثبیت خاک‌ها با استفاده از مواد مختلف، از جمله: زئولیت، بنتونیت و محلول سیلیکات سدیم انجام گرفته است. اما کمتر به مطالعه‌ی تریقی‌پذیری و عوامل مؤثر در تریقی با مواد ذکر شده پرداخته شده است. از جمله در مطالعه‌ی حسن‌نوراد و صرافانی یگانه (۱۳۹۲)، بر روی قابلیت تریقی‌پذیری خاک‌های ماسه‌ی با دوغاب شیمیایی سیلیکات سدیم پرداخته‌اند.^[۱۵] آنچه در مورد تریقی‌پذیری دوغاب سیلیکات سدیم مطرح است، ویسکوزیته‌ی آنهاست، به طوری که با افزایش لزجت از تریقی‌پذیری خاک کاسته می‌شود. در پژوهش نوری و همکاران (۱۳۹۵)، به تریقی‌پذیری خاک ماسه‌ی به وسیله‌ی دوغاب بنتونیت پرداخته‌اند.^[۱۶] به دلیل این‌که اخیراً، استفاده از نانومواد در پروژه‌های مهندسی عمران به دلیل مزایای متعدد و افزایش خواص مهندسی افزایش یافته است^[۱۷] و^[۱۸] از طرفی تاکنون مطالعاتی در خصوص تریقی نانوسیلیس کلوتیدی در ماسه‌ی کربناته انجام نشده است. لذا در پژوهش حاضر، به قابلیت تریقی‌پذیری محلول نانوسیلیس و عوامل مؤثر بر آن در ماسه‌ی کربناته‌ی لای‌دار پرداخته شده است.

با توجه به گزارش‌های ژئوتکنیک می‌توان گفت که در بیشتر موارد، خاک‌های بندر بوشهر تا عمق حدود ۱۲ متری از ماسه‌ی لای‌دار تشکیل شده‌اند.^[۱۹] با توجه به این نکته که مطالعات صورت گرفته در خاک‌های منطقه‌ی خلیج فارس در ماسه‌های تمیز صورت گرفته است،^[۲۰-۲۶] نیاز به بررسی رفتار ماسه‌های لای‌دار در منطقه‌ی خلیج فارس به شدت احساس می‌شود. همچنین از آنجایی که نقش حضور ریزدانه‌ی غیرخمیری در تریقی‌پذیری خاک‌های کربناته در مطالعات پیشین کمتر به چشم می‌خورد، بنابراین بررسی تأثیر درصد ریزدانه‌ی غیرخمیری در پارامترهای تریقی‌پذیری در خاک‌های کربناته‌ی منطقه‌ی خلیج فارس (بندر بوشهر) اهمیت زیادی پیدا می‌کند. از طرفی، در مورد بررسی اثر ریزدانه‌ها با حضور محلول تثبیت‌کننده‌ی

جدول ۲. مشخصات محلول نانوسیلیس کلوتیدی با غلظت ۳٪ استفاده شده در پژوهش حاضر.

فرمول شیمیایی	$\text{SiO}_2\text{NH}_2\text{O}$
غلظت	۰/۳
حالت	مایع
رنگ	سفید شیری
وزن مولکولی	$60/0 \text{ kg/mol}$
چگالی ویژه	$1/19 - 1/21 (25^\circ\text{C})$
مقدار PH	۹/۰ - ۱۰/۰
لزجت	5 mPa.s
سایز ذره	۱۲-۲۵nm
نقطه جوش اولیه	100°C

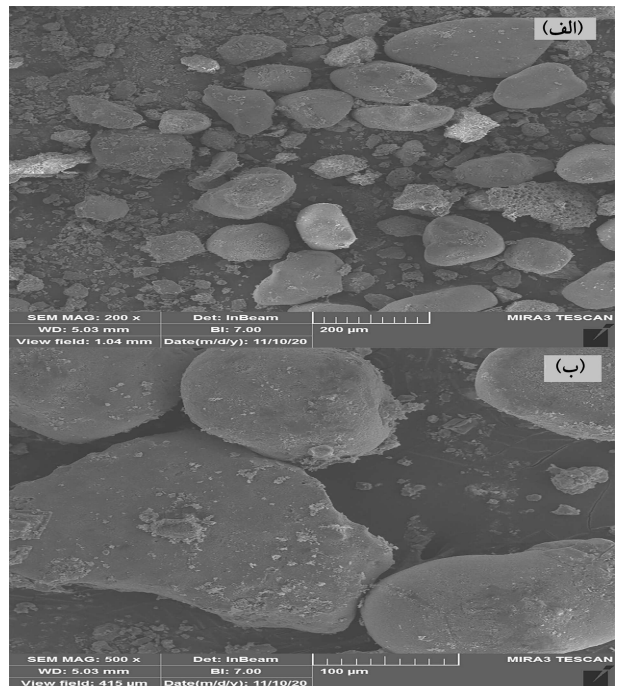


شکل ۳. دستگاه تزریق با اعمال فشار و مکش قابل تنظیم.



شکل ۴. قالب تزریق استوانه‌ای مدرج با قطر داخلی ۳/۸ و طول ۱۰۰ سانتی متر جهت آزمایش تزریق پذیری.

حرکت محلول در داخل قالب مشهود باشد و برای اندازه‌گیری طول نفوذ، روی قالب ۱ متری مدرج شده است، که بتوان بر اساس آن طول نفوذ را اندازه‌گیری کرد. فشار لازم برای تزریق، توسط رگلاتور فشار به مخزن حاوی محلول اعمال و محلول از طریق سیستم لوله‌کشی، که به ابتدای قالب متصل شده بود، وارد نمونه شده است. شایان



شکل ۲. عکس میکروسکوپ الکترونیکی ماسه‌ی کربناته‌ی لای دار بوشهر.

کربناته‌ی بوشهر در شکل ۲ مشاهده می‌شود، که در دسته‌ی نیمه تیرگوشه تا تیرگوشه قرار گرفته و بر اساس تقسیم‌بندی دانه‌های کربناته، که در نوشتار فوکوز و هایجین باتوم^۵ (۱۹۷۵)،^[۲۲] ارائه شده است، بافت آن از نوع اسکلتی (بیولوژیکی) بوده است. در این نوع از ماسه‌های کربناته، زیاد بودن نسبت منافذ داخل دانه‌ها و نسبت منافذ بین دانه‌ها، سبب خردشدگی دانه‌ها در اثر فشار می‌شود. لازم به ذکر است که با بررسی چشمی، خاک باقیمانده‌ی ذرات پوسته‌های صدفی^۶ و باقیمانده‌ی خارتان^۷ مشاهده می‌شود.

۲.۲. مشخصات محلول نانوسیلیس کلوتیدی استفاده شده

سیلیس کلوتیدی تعلیقی، کلوتیدی است که فاز پیوسته‌ی آن آب و ذرات پراکنده‌ی آن ذرات سیلیس است و در صورتی پایدار می‌ماند که رسوب نکند و یا لخته شدن در آنها با سرعت کم رخ دهد. ژل‌شدگی، فرایندی است که طی آن محلول سیلیس به ساختار زنجیره‌ی شکل به حالت ژل در می‌آید. زمان ژل‌شدگی نانوسیلیس به عوامل مختلفی، مانند: درصد سیلیس، اندازه‌ی ذرات نانوسیلیس، قدرت یونی، pH و حرارت محلول بستگی دارد. مشخصات دوغاب سیلیس کلوتیدی با استعلام از شرکت دانش‌بنیان صنایع نانوسیلیس ایساتیس تهیه شده است (جدول ۲).

۳. روش پژوهش

۱.۳. دستگاه و قالب‌های تزریق

برای انجام تزریق از دستگاهی مطابق شکل ۳ استفاده شده است. دستگاه تزریق متشکل از یک مخزن ۱۰ لیتری و سیستم اعمال فشار تزریق قابل تنظیم بوده است، که می‌تواند تا بیش از ۵۰ کیلوپاسکال فشار اعمال کند، اما در پژوهش حاضر، بیشینه‌ی فشار اعمالی حدود ۴۵ کیلوپاسکال بوده است. قالب استفاده شده به طول ۱ متر بوده است، که از پلاستیک شفاف ساخته شده است، تا فرایند تزریق قابل رؤیت باشد (شکل ۴). در حین تزریق، شفاف بودن قالب باعث شده است که



ب) قطعات تشکیل دهنده قالب تزریق.

الف) نمای کلی قالب تزریق؛

شکل ۵. قالب تزریق استوانه‌یی با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر جهت آزمایش فشاری محدود نشده.



شکل ۶. دستگاه کوبش با ارتفاع قابل تنظیم در روش تراکم کاهش یافته.

ذکر است که در پژوهش حاضر، جهت آزمایش‌های تک‌محوره از قالب استوانه‌یی جداشونده‌ی فازی با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است (شکل ۵).

۲.۳. روش ساخت نمونه

در مطالعه‌ی قبیری و همکاران (۱۴۰۱)، با استفاده از روش تراکم کاهش یافته به نمونه‌سازی خاک ماسه‌ی کربناتی لای‌دار بوشهر پرداخته شده است. [۳۳] ایشان به منظور کنترل همگن بودن نمونه در لایه‌های مختلف از روش تزریق ژلاتین^۸ استفاده کرده و دریافته‌اند که با استفاده از تراکم کاهش یافته، نمونه‌سازی همگن در نمونه‌های ماسه‌ی لای‌دار کربناتی بوشهر امکان‌پذیر است. لذا در پژوهش حاضر، از روش تراکم کاهش یافته^۹ استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مطالعه‌ی قبیری و همکاران (۱۴۰۱)، که بر روی خاکی مشابه انجام شده است، برای رسیدن به نمونه‌ی همگن نیاز به ۸٪ رطوبت بهینه بوده است. [۳۳]

به منظور انتخاب درصد تراکم، بر اساس مطالعات رسولی و حسنلوورد (۱۳۹۴)، مشاهده شد که ظاهراً ماسه‌های کربناته‌ی خلیج فارس و دریای عمان نسبت به ماسه‌های سایر نقاط جهان، در محدوده‌ی ماسه‌های با قابلیت فشردگی کم تا نسبتاً زیاد قرار دارند. [۳۳] همچنین در مطالعه‌ی زارع و حاجیانی (۱۳۹۶)، پس از بررسی عدد نفوذ استاندارد و تراکم نسبی رسوب‌های شهر بوشهر مشاهده شد که در اعماق ۱۵ متری، تراکم نسبی ماسه‌ی لای‌دار، متوسط و سست گزارش شده است. [۱۹] بنابراین جهت انجام آزمایش از چگالی نسبی ۵۰٪ استفاده شده است.

همان گونه که پیشتر عنوان شد، جهت انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده، از قالب جداشونده با قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. وزن مورد نظر خاک با توجه به چگالی نسبی ۵۰٪ به دست آمده است. در روش مذکور، خاک در ۶ لایه در قالب مورد نظر با دستگاه کوبش ریخته می‌شود. از آنجایی که در روش تراکم کاهش یافته، لایه‌های بالایی باعث متراکم شدن لایه‌های پایینی می‌شوند، جهت ساخت نمونه‌ها از دستگاه کوبش تراکم کاهش یافته، که یک سیستم چکش با قابلیت تنظیم ارتفاع دارد، استفاده شده است (شکل ۶). ارتفاع چکش به اندازه‌ی h برای هر لایه تنظیم و خاک هر لایه به صورت دورانی و یکنواخت کوبیده شد تا جایی که به ارتفاع مورد نظر برسد. سپس لایه‌ی بعدی ریخته و مجدداً کوبیده شد و این کار ادامه یافت تا ارتفاع قالب پُر شود. شایان ذکر است میزان رطوبت در روش مذکور، به میزان ۸٪ به دست آمده است.

۳.۳. غلظت‌های محلول نانوسیلیس کلوتیدی

همان گونه که پیشتر گفته شد، هدف پژوهش حاضر، تزریق محلول نانوسیلیس است. از آنجایی که نانوسیلیس توسط شرکت داخلی تولید می‌شود، هزینه‌ی آن تا حدی پایین است و از سوی دیگر، به جهت خاصیت کلوتیدی بودن آن در خاک‌های ماسه‌یی ریزو یا حاوی ریزدانه، اجرای راحتی دارد. نکته‌ی قابل توجه، آثار زیست‌محیطی آن است، که دوستدار محیط‌زیست است. لذا جایگزین مناسبی برای دوغاب‌های زبر است، از جمله سیمان است. غلظت‌های انتخابی برای تزریق در ماسه‌ی کربناته‌ی لای‌دار، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد بوده است. لازم به ذکر است که نهایتاً مقدار غلظت بهینه با استفاده از آزمایش تک‌محوره به دست آمده است، که در ادامه بیان شده است.

۴. روش تزریق و عمل‌آوری

همان طوره که در بخش مقدمه عنوان شده است، مصالح ریزدانه‌ی موجود در دوغاب می‌توانند به راحتی سبب بسته شدن^{۱۰} منافذ بین ذرات خاک شوند. [۳۵] جهت بررسی تزریق‌پذیری از لوله‌ی ۱ متری شفاف با قطر داخلی ۳/۸ سانتی‌متر استفاده

جدول ۳. نتایج آزمایش تزریق پذیری در لوله‌ی ۱ متری بر اساس طول نفوذ (سانتی متر) و فشار تزریق (کیلوپاسکال) در مقادیر لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد و مقادیر غلظت نانوسیلیس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد.

		غلظت ۳۰ درصد					غلظت ۲۰ درصد					غلظت ۱۰ درصد					
ماده خالص	طول نفوذ	۱۰۰	۸۸	۷۵	۶۰	۴۰	۰	۱۰۰	۶۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۵۵	۰	۰	۰
	فشار تزریق	۲۲	۲۰	۱۸	۱۳	۱۰	۱۰	۱۸	۸	۸	۰	۰	۱۵	۵	۵	۰	۰
لای ۱۰٪	طول نفوذ	۱۰۰	۸۰	۷۰	۵۸	۴۰	۰	۱۰۰	۸۰	۴۳	۰	۰	۱۰۰	۴۰	۰	۰	۰
	فشار تزریق	۲۷	۲۵	۲۲	۱۷	۱۰	۱۰	۲۰	۱۵	۸	۸	۰	۱۸	۵	۵	۰	۰
لای ۲۰٪	طول نفوذ	۱۰۰	۸۰	۶۲	۴۵	۳۵	۰	۱۰۰	۷۰	۴۰	۰	۰	۱۰۰	۸۰	۳۰	۰	۰
	فشار تزریق	۳۵	۲۸	۲۵	۱۷	۱۰	۱۰	۲۵	۱۵	۸	۸	۰	۲۰	۱۳	۵	۵	۰
لای ۳۰٪	طول نفوذ	۱۰۰	۷۳	۶۰	۴۵	۳۰	۰	۱۰۰	۷۰	۳۸	۰	۰	۱۰۰	۷۰	۲۰	۰	۰
	فشار تزریق	۴۰	۳۵	۲۸	۲۳	۱۵	۱۵	۲۷	۲۰	۱۰	۱۰	۰	۲۲	۱۵	۱۰	۱۰	۰
لای ۴۰٪	طول نفوذ	۱۰۰	۷۵	۵۵	۴۰	۲۵	۰	۱۰۰	۶۰	۳۵	۰	۰	۱۰۰	۵۰	۱۵	۰	۰
	فشار تزریق	۴۳	۳۸	۲۸	۲۶	۱۵	۱۵	۳۰	۲۲	۱۴	۱۳	۰	۲۶	۲۰	۱۳	۱۳	۰

زمان و بسته به مدت عمل‌آوری، محلول داخل نمونه نسبتاً خشک می‌شود.

۱.۴. اثر pH و زمان ژل شدن

دو عامل مهم در تزریق دوغاب‌های شیمیایی، ویسکوزیته و زمان ژل شدن دوغاب است. عامل اول تأثیر مستقیم در شعاع نفوذ دوغاب به خاک مورد تزریق دارد. [۱۵] ویسکوزیته‌ی محلول نانو بستگی به عدد pH در ماده‌ی تزریقی دارد. pH‌های پایین نسبت به pH‌های بالا، موجب ایجاد محلولی با ویسکوزیته‌ی بالا می‌شود، که مسلماً نفوذ کمی به داخل منافذ ریز دارد. در نوشتار حاضر، برای کاهش pH از اسید هیدروکلریک استفاده شده و pH محلول به محدوده‌ی ۶/۵ رسیده است. اما با کاهش این مقدار به اعداد کمتر از ۶، محلول به سرعت ژل می‌شود و امکان تزریق میسر نیست. لذا مقدار pH مناسب تزریق در این خاک pH محدوده‌ی ۶/۵ بوده است.

۵. نتایج و بحث

۱.۵. اثر غلظت و درصد ریزدانه در تزریق پذیری

غلظت محلول و همچنین ارتباط آن با درصد ریزدانه، عامل مهمی در فرایند تزریق است. لذا به منظور ارزیابی تزریق‌پذیری، ۱۵ آزمایش با مقادیر لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، با تراکم ۵۰٪ و سه غلظت ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، در لوله‌ی ۱ متری انجام شده است. نتایج آزمایش تزریق‌پذیری در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۷، تغییرات طول نفوذ بر حسب فشار تزریق در ۳ حالت: الف) غلظت ۳۰٪، ب) غلظت ۲۰٪، ج) غلظت ۱۰٪ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که محلول حاضر با غلظت‌های ذکر شده با فشارهای نسبتاً کم در ماسه‌ی بدون درصد ریزدانه (ماسه‌ی خالص) تا ماسه‌ی حاوی بیشترین درصد ریزدانه (۴۰٪)، به آسانی تا انتهای طول نفوذ (شعاع ۱ متری) و بدون ایجاد هیچ‌گونه ترک و شکافی نفوذ کرده است.

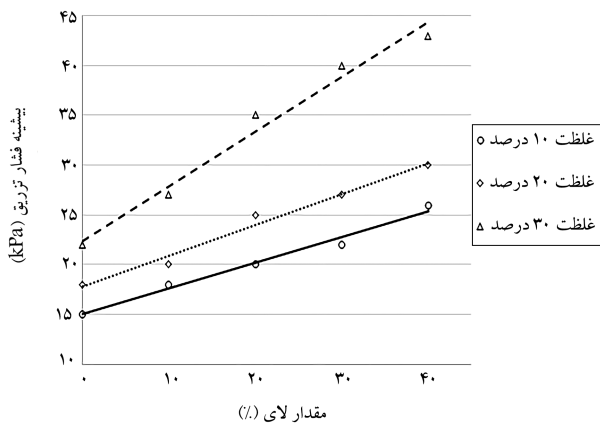
بر اساس شکل ۸، در یک درصد لای ثابت (به عنوان مثال ۴۰٪) با افزایش غلظت به دلیل کاهش لزجت، به فشار تزریق بیشتری احتیاج است و روند ذکر شده در تمامی مقادیر لای قابل مشاهده است.

شده است. همچنین به منظور تعیین غلظت بهینه‌ی محلول (از بین غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) از آزمایش‌های تک‌محوره استفاده شده است، که نیازمند تزریق در قالب استوانه‌ی ۱ متری است. در ادامه، روش تزریق در قالب لوله‌ی ۱ متری و قالب استوانه‌ی ۱ متری توضیح داده شده است.

جهت تزریق در لوله‌ی ۱ متری، در ابتدا محلول نانوسیلیس با اسید هیدروکلریک در pH حدوداً ۶/۵ می‌رسد و سپس در مخزن دستگاه تزریق وارد می‌شود. بر اساس چگالی نسبی ۵۰٪، خاک مورد نظر در درون قالب ریخته می‌شود. در ابتدا با فشار تزریق ۵ کیلوپاسکال تزریق آغاز می‌شود و بعد از گذشت دقایقی سرعت نفوذ مایع کاهش می‌یابد و تقریباً ثابت می‌شود. با توجه به این‌که قالب شیشه‌ی مدرج است، طول نفوذ یادداشت می‌شود، سپس فشار تزریق افزایش می‌یابد (۵ کیلوپاسکال)، که مشاهده می‌شود مجدداً به سرعت نفوذ اولیه باز می‌گردد. پس از مدتی مجدداً امکان دارد سرعت نفوذ کاهش یابد، که عدد طول نفوذ را قرائت می‌کند و مرحله‌ی قبل مجدداً تکرار می‌شود تا محلول طول یک متر را طی کند و از لوله‌ی خروجی خارج شود.

جهت ساخت نمونه‌های آزمایش تک‌محوره از قالب استوانه‌ی ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری استفاده شده است. مشابه تزریق در لوله‌ی ۱ متری، محلول آماده شده با pH حدوداً ۶/۵ به مخزن تزریق وارد و سپس، محلول با توجه به نوع نمونه، با فشار ۵ تا ۱۵ کیلوپاسکال به قالب تزریق می‌شود. معمولاً سعی می‌شود با کمیته‌ی فشار، تزریق صورت گیرد تا ساختار یکنواخت نمونه‌های ساخته شده تغییر نکند. محلول تزریق شده از پایین نمونه وارد و از بالای نمونه خارج می‌شود. جهت اطمینان از اشباع شدن نمونه تا ۲ برابر حجم قالب (حدود ۴۰۰ CC) خارج می‌شود. [۳۶، ۳۷]

شایان ذکر است با توجه به آن‌که خاک برداشت شده از سواحل دریا و اشباع است، در ابتدا قبل از تزریق محلول نانوسیلیس، آب به میزان ۲ برابر حجم نمونه تزریق شد تا کاملاً اشباع شود و سپس محلول تزریق شده است. با عملیات تزریق، محلول جایگزین آب مابین حفره‌ها شده است و پس از تکمیل تزریق می‌توان گفت آب ما بین حفره‌ها، از نمونه خارج و کلیه‌ی حفره‌های نمونه با محلول پر می‌شود. پس از تزریق، نمونه‌های تک‌محوره جهت عمل‌آوری، پس از گذشت ۲ ساعت، از قالب خارج می‌شوند. سپس نمونه‌ها در دمای تقریبی ۲۳ درجه‌ی سیلیسیوس اتاق، برای طی زمان عمل‌آوری، یعنی ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، نگهداری می‌شوند. با گذر



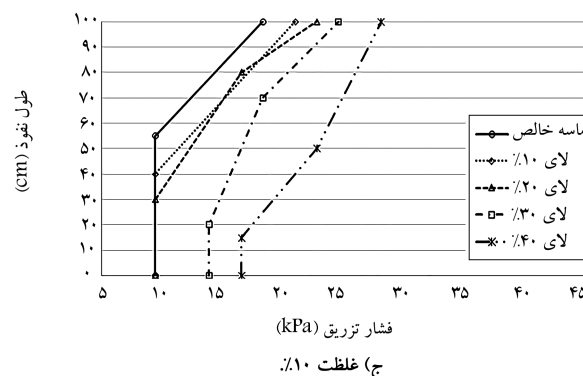
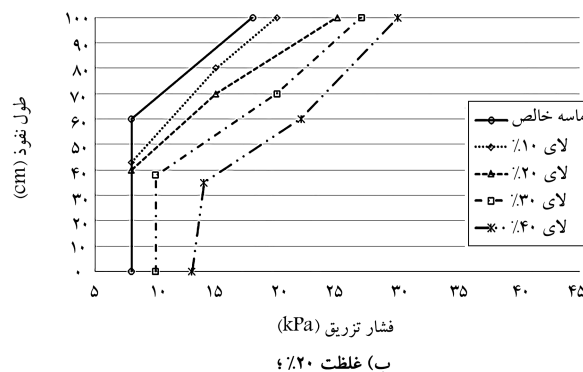
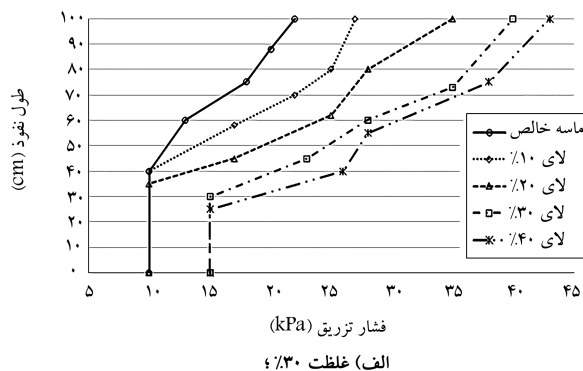
شکل ۹. نمودار تغییرات بیشینه‌ی فشار تزریق (کیلوپاسکال) به مقدار لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد در غلظت محلول نانوسیلیس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد.

از سوی دیگر در شکل ۹ می‌توان پی برد که با افزایش درصد لای، به فشار تزریق بیشتری نیاز است؛ به طوری که در ماسه‌ی خالص با کمترین فشار تزریق صورت می‌گیرد، اما با افزایش درصد لای به دلیل کاهش حفره‌های نمونه، به فشار بیشتری مورد نیاز است، برای مثال، برای لای ۴۰٪، به بیشترین فشار تزریق در حدود ۴۵ کیلوپاسکال نیاز است. اما در نمونه‌های فاقد لای (ماسه‌ی خالص) در محدوده‌ی ۲۰ کیلوپاسکال تزریق انجام می‌شود. اما نکته‌ی حائز اهمیت آن است که همه‌ی غلظت‌های استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر به خصوص غلظت ۳۰٪، قابلیت تزریق در ماسه‌ی کربناته‌ی مورد استفاده را دارند. همچنین محلول اشاره شده، در فشارهای نسبتاً کم و با یک زمان کوتاه (متوسط ۱۵ دقیقه) تزریق انجام می‌شود.

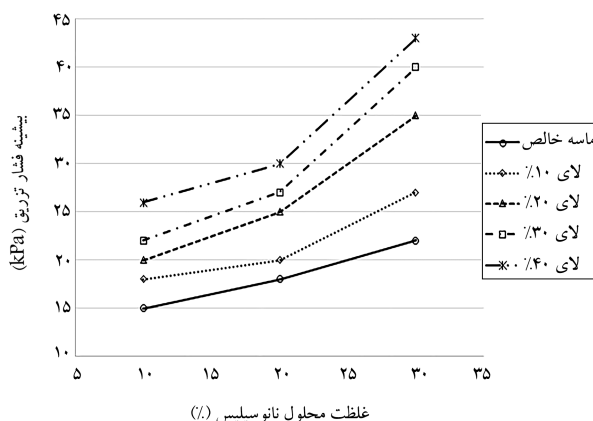
۲.۵. آزمایش فشاری محدود نشده

بیشتر مواقع از آزمایش تک‌محوری به عنوان معیاری برای ارزیابی بهسازی خاک در فرایند تثبیت استفاده می‌شود. خاک مورد نظر در حالت تثبیت نشده، هیچ‌گونه مقاومتی از خود نشان نمی‌دهد. در واقع، ماسه‌ی کربناته‌ی لای‌دار به سبب سست بودن، فاقد مقاومت تک‌محوری است. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، یکی از اهداف پژوهش حاضر، به دست آوردن غلظت بهینه‌ی محلول جهت تزریق است. به همین منظور ۴۵ آزمایش تک‌محوری مطابق دستورالعمل ASTM D۴۲۱۹ [۳۸]، در ۵ درصد مختلف لای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد)، یک درصد تراکم (۵۰٪)، ۳ دوره‌ی عمل‌آوری (۷، ۱۴ و ۲۸ روز) و در ۳ غلظت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) انجام شده است. بدین منظور از دستگاه بارگذاری اتوماتیک با ظرفیت بیشینه‌ی ۱۰ kN استفاده شده و بار محوری به صورت پیوسته با نرخ کرنش ۰/۳ (mm) افزایش یافته است. در آزمایش‌های انجام شده برای رسیدن به گسیختگی از دو معیار بیشینه‌ی بار بر واحد سطح یا بار واحد سطح در کرنش ۲۰٪، به طوری که هر کدام زودتر به وقوع به پیوندد، استفاده شده است. [۳۹] در جدول ۴، نتایج آزمایش تک‌محوری روی نمونه‌های تزریق شده با نانوسیلیس کلونیدی ارائه شده است.

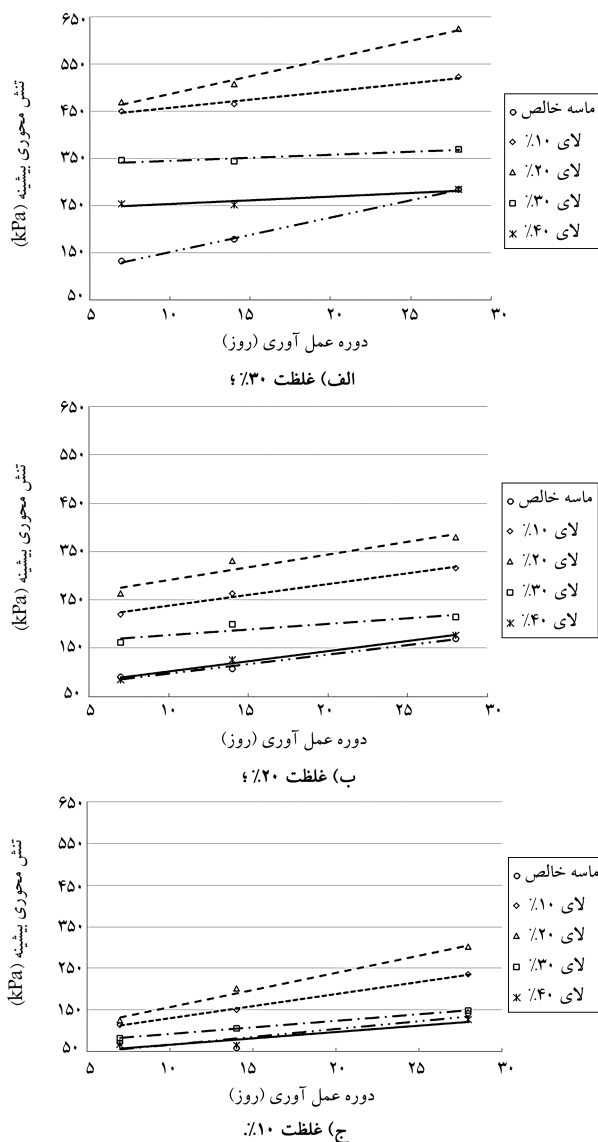
شایان ذکر است همان‌گونه که در بخش ۱.۳ بیان شده است، ابعاد نمونه‌های تک‌محوری استوانه‌یی به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر هستند، که بر اساس استاندارد ASTM D۴۲۱۹، نمونه‌های آزمایش باید دارای نسبت طول به قطر بین ۲ تا ۳ باشند. همچنین قطر نمونه باید بیشتر از ۱۰ برابر اندازه‌ی بیشینه‌ی ذرات نمونه و کمتر از ۳۵ میلی‌متر باشد، [۳۸] که ابعاد انتخابی این شرایط را احراز می‌کند. از طرفی دیگر،



شکل ۷. نمودار تغییرات طول نفوذ (سانتی‌متر) به فشار تزریق (کیلوپاسکال) در مقدار لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد.

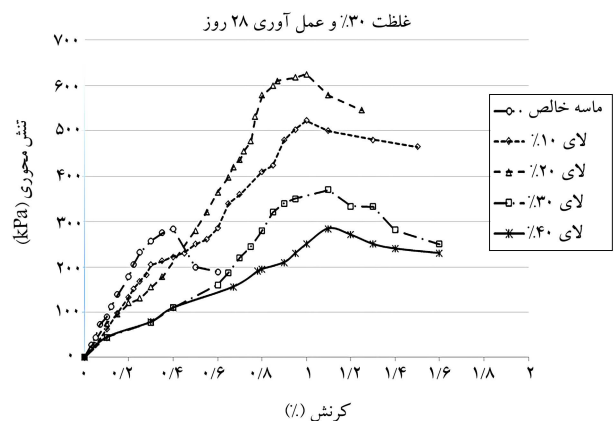


شکل ۸. نمودار تغییرات بیشینه‌ی فشار تزریق (کیلوپاسکال) به غلظت محلول نانوسیلیس کلونیدی ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد و با مقدار لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد.



جدول ۴. نتایج آزمایش تک محوره روی نمونه‌های تزریق شده با نانوسیلیس در دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و تراکم ۵۰٪.

مقدار لای (%)	مقاومت فشاری تک محوری نانوسیلیس			مقدار لای (%)
	روزه ۷	روزه ۱۴	روزه ۲۸	
۰	۵۸	۷۱	۱۴۲	۰
۱۰	۱۱۴	۱۵۱	۲۳۵	۱۰
۲۰	۱۲۵	۲۰۲	۳۰۲	۲۰
۳۰	۸۳	۱۰۶	۱۴۹	۳۰
۴۰	۶۷	۶۶	۱۲۷	۴۰
۰	۹۰	۱۰۷	۱۷۰	۰
۱۰	۲۲۰	۲۶۳	۳۱۷	۱۰
۲۰	۲۶۳	۳۳۱	۳۸۰	۲۰
۳۰	۱۶۲	۲۰۰	۲۱۴	۳۰
۴۰	۸۵	۱۲۶	۱۷۶	۴۰
۰	۱۳۳	۱۷۹	۲۸۴	۰
۱۰	۴۵۱	۴۶۵	۵۲۴	۱۰
۲۰	۴۷۰	۵۰۸	۶۲۵	۲۰
۳۰	۳۴۵	۳۴۴	۳۶۹	۳۰
۴۰	۲۵۳	۲۵۱	۲۸۵	۴۰



شکل ۱۱. تغییرات تنش محوری بیشینه به دوره‌ی عمل‌آوری در درصد لای‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰.

اما حضور لای فضای بین دانه‌های ماسه را پر کرده و تا حد نسبتاً خوبی باعث افزایش مقاومت شده است. در تمامی نمونه‌ها می‌توان بیان کرد بیشترین مقاومت تک محوری مربوط به لای ۲۰٪ و در تراکم ۵۰٪ و عمل‌آوری ۲۸ روزه بوده است، که مقدار ۶۲۵ کیلو پاسکال به دست آمده و پس از آن مربوط به لای ۱۰٪ با مقدار ۵۲۴ کیلو پاسکال بوده است (جدول ۳). در حقیقت می‌توان گفت حفره‌های ماسه‌ی بدون لای (ماسه‌ی خالص) فقط با نانوسیلیس پر می‌شود، ولی با اضافه کردن لای به ساختار ماسه، سختی نمونه به شدت تا لای ۲۰٪ افزایش می‌یابد، که حد نهایی را می‌توان لای ۲۰٪ عنوان کرد؛ اما با افزایش لای به میزان ۳۰ و ۴۰ درصد، ذرات لای علاوه بر پر کردن حفره‌های ماسه، ساختار نمونه را سست کرده و سیر نزولی مقاومت تک محوری ادامه داشته است، به طوری که کمترین مقاومت‌ها مربوط به ماسه‌ی خالص و ماسه‌ی حاوی لای ۴۰٪ بوده است.

دوره‌ی عمل‌آوری، یکی از عوامل مؤثر در تثبیت نمونه‌ها و مقاومت تک محوری است. در شکل ۱۱، تغییرات تنش محوری بیشینه به دوره‌ی عمل‌آوری (۷، ۱۴ و

شکل ۱۰. نمودار تغییرات تنش محوری محدود نشده (کیلو پاسکال) به کرنش (%) در لای‌های ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، غلظت ۳۰٪، تراکم ۵۰٪ و دوره‌ی عمل‌آوری ۲۸ روزه.

در بیشتر دستگاه‌های آزمایش، از جمله سه محوری، از ابعاد مذکور استفاده می‌شود. لذا در پژوهش حاضر، از ابعاد منتخب استفاده شده است تا شرایط یکسان آزمایش با دیگر دستگاه‌ها فراهم شود.

در شکل ۱۰، نمودار تنش - کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه روی مقادیر لای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد، در غلظت ۳۰٪ و تراکم ۵۰٪ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشینه‌ی مقاومت تک محوری مربوط به لای ۲۰٪ و سپس ۱۰٪ بوده و با افزایش میزان لای از ۳۰ به ۴۰ درصد، مقاومت کاهش یافته است. همچنین، شیب نمودار (سختی) در ابتدا زیاد بوده است، که مربوط به لای ۲۰٪ بوده و سپس به ترتیب برای لای ۱۰، ۳۰ و ۴۰ درصد کاهش یافته است.

همچنین با توجه به شکل ۱۰، کمترین کرنش‌ها مربوط به ماسه‌ی خالص بوده است، که به دلیل ماهیت شکننده بودن دانه‌های ماسه‌ی کربناته بوده است،

۲۸ روزه) مشاهده می‌شود. نمودار الف، مربوط به غلظت ۳۰٪؛ نمودار ب، مربوط به غلظت ۲۰٪ و نهایتاً نمودار ج، مربوط به غلظت ۱۰٪ بوده و آزمایش‌ها در تراکم ۵۰٪ انجام شده است. همچنین در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش دوره‌ی عمل‌آوری، مقاومت تک‌محوری افزایش یافته است؛ به طوری که در عمل‌آوری‌های ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت به دست آمده است. در واقع رشد مقاومت در بیشتر نمونه‌ها با افزایش دوره‌ی عمل‌آوری چشمگیر بوده است. از سوی دیگر، غلظت محلول تزریقی، عامل تعیین‌کننده‌ی دیگری در فرایند تثبیت است. مشاهده می‌شود که نمودار الف، که در غلظت ۳۰٪ تزریق انجام شده است، نسبت به نمودارهای ب و ج، یعنی در غلظت‌های ۲۰ و ۱۰ درصد، مقاومت به شدت افزایش یافته است، به طوری که غلظت ۳۰٪ نسبت به غلظت ۱۰٪، مقاومت را در محدوده ۳ تا ۴ برابر افزایش داده است. لذا می‌توان غلظت را عامل مهم و اساسی در تثبیت نمونه‌ها دانست.

مطابق استاندارد ASTM D۴۶۰۹ (۲۰۰۸)، در صورتی که مقاومت فشاری تک‌محوری به مقدار ۳۴۵kPa یا بیشتر برسد، تثبیت خاک را می‌توان مؤثر در نظر گرفت.^[۳۰] در پژوهش حاضر، همان‌طور که پیشتر عنوان شد، غلظت (۳۰٪ بیشینه‌ی غلظت استفاده شده) در تمامی نمونه‌ها، خصوصاً لای ۴۰٪، تزریق‌پذیر بوده و از سوی دیگر، با توجه به عمل‌آوری ۷ روزه‌ی بیشتر نمونه‌ها، مقاومت آنها بیش از ۳۴۵ kPa به دست آمده و با افزایش دوره‌ی عمل‌آوری، مقدار اخیر از مرز مذکور عبور کرده و به شدت افزایش یافته است. لذا می‌توان غلظت ۳۰٪ را غلظت بهینه و مؤثر جهت تزریق اعلام کرد. در واقع، با کمترین زمان عمل‌آوری (۷ روز)، به نتیجه‌ی قابل قبول (۳۴۵ کیلوپاسکال) می‌رسد، که نتیجه‌ی به دست آمده حائز اهمیت بسیار در پژوهش حاضر است.

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک سری آزمایش بررسی تزریق‌پذیری با محلول نانوسیلیس کلونیدی با ۳ غلظت متفاوت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) به داخل خاک ماسه‌ی کربناته‌ی بوشهر و با ۵ ترکیب درصد متفاوت لای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) و نیز در چگالی نسبی ۵۰٪ انجام شده است. همچنین به جهت تعیین غلظت بهینه‌ی محلول نانوسیلیس و مؤثر بودن تثبیت خاک، یک سری آزمایش‌های تک‌محوری در ۵ میزان مختلف درصد لای (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰)، ۳ غلظت (۱۰، ۲۰ و ۳۰)، چگالی نسبی

۵۰٪ و نهایتاً ۳ دوره‌ی عمل‌آوری (۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) انجام شده است. براساس نتایج آزمایش‌ها می‌توان گفت که:

۱- اثر غلظت در طول نفوذ، تابع اندازه‌ی درصد لای خاک است و با افزایش درصد لای، اثر غلظت کاهش می‌یابد؛ که در واقع، در یک درصد ثابت لای با افزایش غلظت محلول، فشار تزریق افزایش می‌یابد. به طوری که در غلظت ۳۰٪ به فشار بیشتری جهت تزریق نیاز بوده است، چرا که با افزایش غلظت، لزجت کاهش یافته است.

۲- با افزایش درصد لای در یک چگالی نسبی ثابت (۵۰٪)، به فشار تزریق بیشتری احتیاج است؛ به طوری که برای تزریق در طول یک متر در لای ۴۰٪ به فشار تزریق تا محدوده‌ی ۴۵ کیلوپاسکال احتیاج بوده و در ماسه‌ی فاقد لای (ماسه‌ی خالص) با فشار کمینه‌ی در حدود ۲۵ کیلوپاسکال تزریق انجام شده است.

۳- از آنجایی که نمونه‌های تثبیت نشده هیچ‌گونه مقاومتی از خود نشان نمی‌دهند، با تزریق محلول نانوسیلیس براساس نتایج آزمایش تک‌محوری، مقاومت چندین برابر افزایش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی مؤثر بودن تزریق در بهسازی خاک کربناته‌ی لای‌دار بوشهر است.

۴- در هر ۳ غلظت استفاده شده با اضافه شدن لای به ماسه تا ۲۰٪ (با توجه به افزایش مقاومت تک‌محوری)، می‌توان اثر تزریق را مؤثر دانست. به گونه‌ی که ماسه‌ی حاوی لای ۲۰٪، بهترین نتیجه‌ی تثبیت را داشته است. اما با افزایش لای به بیش از ۲۰٪، اثر تزریق در بهسازی خاک را می‌توان کمتر دانست، که کمترین آن مربوط به ماسه‌ی بدون لای (ماسه‌ی خالص) و ماسه‌ی حاوی ۴۰٪ لای بوده است.

۵- دوره‌ی عمل‌آوری، عامل مهمی در بهسازی خاک است، که با افزایش آن در هر ۳ غلظت تزریقی، با توجه به افزایش مقاومت نمونه‌ها، تزریق در بهبود خاک مؤثر بوده است.

۶- در غلظت محلول ۳۰٪ پس از ۷ روز عمل‌آوری، در بیشتر نمونه‌ها، مقاومت به بیش از ۳۴۵ کیلوپاسکال رسیده و با افزایش دوره‌ی عمل‌آوری تا ۲۸ روز، به بهترین شرایط بهسازی و عبور از مرز مذکور رسیده است؛ به طوری که در ماسه‌ی حاوی ۲۰٪ لای به مقاومت تک‌محوری ۶۲۵ کیلوپاسکال و ماسه‌ی حاوی ۱۰٪ لای به مقاومت ۵۲۴ کیلوپاسکال رسیده است. بنابراین می‌توان غلظت ۳۰٪ را به عنوان غلظت بهینه در نظر گرفت.

پانوشته‌ها

1. Calcite
2. Gelation
3. Dano
4. Permeation Prouting
5. Fookes & Higginbottom
6. Shell Fragments
7. Echinoderms
8. Injection of Gelatin

9. Undercompaction
10. Coagulate

منابع (References)

1. Valle, C., Camacho, B.I., Stokoe, K.H. and et al. "Comparison of the dynamic properties and undrained shear strength of offshore calcareous sand and artificially ce-

- mented sand”, *22th International Conference on Off-shore Mechanics and Artic Engineering*, American Society of Mechanical Engineering (ASME) (2003).
2. Sharma, S. and Ismail, M. “Monotonic and cyclic behavior of two calcareous soils of different origins”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **132**(12), pp. 1581-1591 (2006).
 3. Totunchian, M.A. “Evaluation of the liquefaction phenomenon of non-cement carbonate sands using cyclic tests-case study”, *Ph.D Thesis, Faculty of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology* (In Persian) (1393/2015).
 4. Gallagher, P.M. and Mitchel, J.K. “Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loos sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9), pp. 1017-1026 (2002).
 5. Gallagher, P.M., Pamuk, A. and Abdoun, T. “Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout”, *Journal of Material in Civil Engineering*, **19**(1), pp. 33-40 (2007).
 6. Gallagher, P.M. and Y.L. “Colloidal silica transport through liquefiable porous media”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(11), pp. 1702-1712 (2009).
 7. DuPont. “Ludox colloidal silica: properties, uses, storage, and handling”, *Product Information, Wilmington, Del* (1997).
 8. Gallagher, P.M. “Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk”, *Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg, Va* (2000).
 9. Herndon, J. and Lenahan, T. “Grouting in oils”, *Design and operations Manual, Federal Highway Traction, Alliburton Services, Duncan, Oklahoma, technical Report*, 2 (1976).
 10. Bell, F.G. “Engineering treatment of soils”, *E and FN Spon*, London, pp. 10-160 (1993).
 11. Akbulut, S. “The improvement of geotechnical properties in granular soils by grouting”, *Ph.D. Thesis, The Institute of the Istanbul Technical University, Istanbul* (1999).
 12. Kutzner, C. “Grouting of rock and soil”, *Bulkema, Netherlands*, pp. 10-195 (1996).
 13. Dano, C., Hicher, P-Y. and Taillierz, S. “Engineering properties of grouted sands”, *Geotechnec. And Geoenviron. Eng.*, **130**(3), pp. 328-338 (2004).
 14. Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D. and et al. “Sustainable development and climate change initiatives”, *Cement and Concrete Research*, **38**(2), pp. 115-127 (2008).
 15. Hassanlourad, M. and Sarrafi, A. “Investigation of sandy soils grouting-ability with sodium silicate chemically grout”, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **45**(2), pp. 41-48 (In Persian) (1392/2014).
 16. Nori, A., Ziaie Moayed, R. and Hassanlourad, M. “Injectability of sands using bentonite”, *Journal of Engineering Geology*, **11**, pp. 299-318, (In Persian) (1394/2016).
 17. Choobbasti, A.J. and Kutanaei, S.S. “Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nano-silica”, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, **9**(5), pp. 981-988 (2017).
 18. Sahu, A., Dey, T. and Chakraborty, S. “Influence of nano silica on mechanical and durability characteristic of mortar made by partial replacement of natural fine aggregate with recycled fine aggregate”, *SILICON*, **13**, pp. 4391-4405 (2020).
 19. Zare, M. and Hajiani Boushehrian, A. “Boushehr liquefaction hazard zonation based on SPT and result presentation by using GIS plat form resentation by Using GIS plat form of natural fine aggregate with recycled fine aggregate SILICON”, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, **48**(3), pp. 109-119 (In Persian) (1396/2018).
 20. Dehnavi, Y., Shahnazari, H., Salehzadeh, H. and et al. “Compressibility and undrained behavior of hormuz calcareous sand”, *Electronic Journal of Electrical Engineering (EJGE)*, **15**, pp. 1684-1702 (2010).
 21. Farshbaf Aghajani, H., Salehzadeh, H. and Rezvani, R. “Energy equilibrium during crushing of sandy soils underisotropic compression”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**, pp. 1531-1542 (2016).
 22. Hassanlourad, M., Salehzadeh, H. and Shahnazari, H. “Undrained triaxial shear behavior of grouted carbonate sands”, *International Journal of Civil Engineering*, **9**(4), pp. 307-314 (2011).
 23. Kargar, S.H.R., Shahnazari, H. and Salehzadeh, H. “Post-cyclic behavior of carbonate sand with anisotropic consolidation”, *International Journal of Civil Engineering*, **12**(4) pp. 316-325 (2014).
 24. Shahnazari, H. and Rezvani, R. “Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: An experimental study”, *Engineering Geology*, **159**, pp. 98-105 (2013).
 25. Shahnazari, H., Rezvani, R. and Tutunchian, M.A. “An experimental study on the phase transformation point of crushable and non-crushable soils”, *Marine Georesources & Geotechnology*, **35**(2), pp. 176-185 (2017).
 26. Shahnazari, H., Salehzadeh, H., Rezvani, R. and et al. “The effect of shape and stiffness of originally different marine soil grains on their contractive and dilative behavior”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18**(4), pp. 975-983 (2014).
 27. BS1377-3, “BS 1377: Part 3 chemical and electrochemical tests”, London: BSI (1990).
 28. ASTM D6913-17, “Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis”, ASTM (2017).
 29. ASTM D4254-16, “Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density”, *West Conshohocken, PA: ASTM International* (2016).
 30. ASTM D4253-16e1, “Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table”, *West Conshohocken, PA: ASTM International* (2016).

31. ASTM D854-14, "Standard test methods for specific gravity of soils by water pycnometer", *West Conshohocken, PA: ASTM International* (2014).
32. Fookes, P. and Higginbottom I. "The classification and description of nearshore carbonate sediments for engineering purposes", *Geotechnique*, **25**(2), pp. 406-411 (1975).
33. Ghanbari, E., Ziaie Moayed, R. and Naeini, S.A. "Application of under compaction method in sampling of boushehr carbonated silty sand", *Amirkabir Journal of Engineering*, Amirkabir University of Technology (In Persian) (1401/2022).
34. Rasouli. M.R. and Hassanlourad, M. "Study on geotechnical properties of four carbonates sands from the southern coastal of Iran", *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J.)*, **15**(4), (In Persian) (1394/2016).
35. Toumbakari, E.E., Van Gemert, D., Tassios, T.P. and et al. "Effect of mixing procedure on injectability of cementitious grouts", *Cement and Concrete Research*, **29**(6), pp. 867-872 (1999).
36. Pantazopoulos, I.A. and Atmatzidis, D.K. "Dynamic properties of microfine cement grouted sands", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **42**, pp. 17-31 (2012).
37. Dupla, J.C., Canou, J. and Gouvenot, D. "An advanced experimental set-up for studying a mono directional grout injection process" *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, **8**(3), pp. 91-99 (2004).
38. ASTM D4219, "Standard test method for unconfined compressive strength index of chemical-grouted soils", *West Conshohocken* (2008).
39. ASTM D4609, "Standard guide for evaluating effectiveness of admixtures for soil stabilization", *West Conshohocken* (2008).