

## بررسی عملکرد نانوسیلیس بر تثبیت بیولوژیکی دو نوع خاک ماسه‌ای (بد دانه‌بندی شده و سیلت‌دار)

علیرضا نگهدار<sup>۱\*</sup>، معین خوشدل سنگده<sup>۲</sup>، اکبر قویدل<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

(دریافت: ۹۸/۱۰/۱۲، پذیرش: ۹۹/۶/۲۲، نشر آنلاین: ۹۹/۶/۲۲)

### چکیده

خاک نقش مهمی در ساختار هر سازه‌ای دارد و با گذشت زمان نیاز به بهسازی خاک‌های ضعیف از بدیهی‌ترین قسمت‌های پروژه‌های عمرانی می‌باشد. در این مطالعه برای بهسازی خاک ماسه‌ای از ترکیب نانوسیلیس و روش رسوب میکروبی کلسیم کربنات، که یک روش بهسازی پایدار و دوستدار محیط‌زیست است، استفاده شد. در این روش، اوره موجود در محیط به‌وسیله باکتری اسپوروسارسینا یوریا (*Sporosarcina ureae*) هیدرولیز شده و به‌وسیله شبکه‌ای از واکنش‌های بیوشیمیایی رسوب کلسیم کربنات شکل می‌شود و این باعث افزایش مقاومت خاک می‌گردد. عوامل موردبررسی در این مطالعه، شامل غلظت مواد واکنش‌دهنده، زمان عمل‌آوری، تغییرات درصد سیلت بر رفتار خاک ماسه‌ای و احتمال سازگاری باکتری با نانو سیلیس بودند. در این مطالعه نتایج آزمایش‌ها نشان داد، پارامترهای مقاومت برشی خاک توسط تأثیر توأمان باکتری و نانوسیلیس بهبود یافته است و در حضور نانوسیلیس میزان مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بهسازی شده بیولوژیکی تا ۴/۵ برابر افزایش پیدا کرد. میزان چسبندگی در خاک ماسه‌ای از ۰/۱ به ۱۸۶kPa و زاویه اصطکاک خاک به حدود ۳۵/۶ درجه رسید، که در مقایسه با ماسه سست بهسازی نشده، زاویه اصطکاک داخلی افزایش حدود ۱۲٪ را نشان می‌دهد. در نمونه‌های ماسه سیلته، بیشینه مقاومت نیز افزایش یافت. در نمونه خاک با ۳۰٪ سیلت، حداکثر مقاومت برشی در تنش ۵۰kPa با مقدار افزایش تا ۸۱٪ مشاهده شد، همچنین حداکثر افزایش مقاومت برشی در تمامی تنش‌ها برای نمونه حاوی ۳۰٪ سیلت رخ داد. در ضمن عمده تأثیر بر روی زاویه اصطکاک داخلی در نمونه ۳۰٪ سیلت پس از روز ۱۴ عمل‌آوری به‌دست آمد.

**کلیدواژه‌ها:** بهسازی خاک، رسوب میکروبی کلسیم کربنات، نانو سیلیس، باکتری.

### ۱- مقدمه

خاک ماسه‌ای که به‌طور عام مورد استفاده قرار می‌گیرند، سمی بوده و ممکن است تأثیرات جدی بر سلامت انسان و محیط‌زیست داشته باشند. به‌دلیل وجود این قبیل مشکلات زمینه برای توسعه روش‌های جدید ایجاد می‌شود. در سال‌های اخیر یک روش بهسازی پایدار خاک ماسه‌ای که دوستدار محیط‌زیست است، به‌نام رسوب میکروبی کلسیم کربنات<sup>۱</sup> معرفی شده است. این روش نتیجه هیدرولیز اوره توسط آنزیم اوره آزیم اوره آز ترشح‌شده از باکتری می‌باشد. به‌واسطه این واکنش آنزیمی، pH افزایش می‌یابد و کریستال‌های سنگ‌آهک روی سطح ذرات و بین حفرات خاک ماسه‌ای رسوب می‌کند و نهایتاً منجر به اتصال ذرات به یکدیگر و انسداد حفرات خاک می‌شود. از آنجاکه بهسازی خاک ماسه‌ای به روش رسوب زیستی نوین بوده، محققان به‌دنبال گسترش و

افزایش روزافزون جمعیت جهان حاکی از توسعه مناطق شهری است و به‌تبع آن استفاده از روش‌های مناسب جهت اصلاح خاک ماسه‌ای در این مناطق، مهندسان را به فکر ابداع روش‌هایی برای بهبود خواص خاک ماسه‌ای واداشت. یکی از این روش‌های کارآمد برای اصلاح رفتار خاک‌های نامناسب در مهندسی ژئوتکنیک تغییر خصوصیات خاک‌های مسئله‌دار هست، که به بهسازی موسوم است. در این راستا بهسازی خاک ماسه‌ای با افزودن موادی به آن به‌منظور بهبود خواص مکانیکی (تراکم‌پذیری، سختی، مقاومت برشی، نفوذپذیری و ...) انجام می‌پذیرد. افزودنی‌هایی که در گذشته استفاده شده و امروزه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ سیمان، قیر، آهک، خاکستر آتش‌فشانی و ... اضافه کردن برخی از این مواد به

### 1. Microbially Induced Calcite Precipitation

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۲۳۴۴۲۸۰

بتن با استفاده از ریزجانداران و در سال‌های بعد بر روی تقویت خاک ماسه‌ای با شرایط تزریق بهتر و فشار کمتر، مطالعات آزمایشگاهی و میدانی وسیعی انجام گرفت (Ramachandran و همکاران، ۲۰۱۱؛ Al Thawadi و Salwa، ۲۰۰۸). محققان برای بررسی بهسازی زیستی خاک‌های ماسه‌ای بر پایه رسوب میکروبی کلسیم کربنات از روش تثبیت و توزیع فعالیت میکروبی استفاده نمودند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از این بوده است، که رقیق‌سازی سوسپانسیون باکتری با محلول شور منجر به افزایش فعالیت‌های ویژه، در طی فرایند سمانتاسیون<sup>۵</sup> (بیشترین فعالیت به‌ازای هر زیست‌توده)، از ۱ به ۱/۸ شد (Harkes و همکاران، ۲۰۱۰).

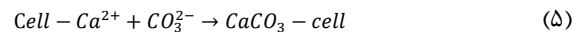
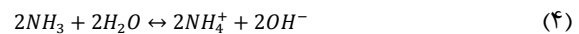
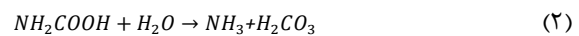
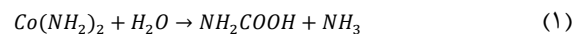
درواقع هدف از بهسازی و مقاوم‌سازی سطحی خاک ماسه‌ای در مناطقی است که در آن‌ها خطر گسترش شن‌های روان و بیابان‌زایی وجود دارد و این روش به‌منظور کنترل خاک‌هایی است که مستعد تولید غبار و ریزگردها هستند، با این اوصاف مطالعاتی صورت گرفت تا روش بهسازی بیولوژیکی جایگزین روش‌های سنتی بهسازی خاک‌های ماسه‌ای سطحی (مالچ‌پاشی و ریگ‌پاشی) شده و پیامدهای زیست‌محیطی این وقایع را به حداقل برساند. همچنین برای ارزیابی قابلیت سیمانی شدن زیستی برای کاربردهای وسیع، آزمایش‌هایی در یک محیط سه‌بعدی کنترل‌شده توسط Van Passen و همکارانش (۲۰۰۹) انجام گرفت و از شرایط و تکنیک‌های تزریقی که در عمل انجام می‌شود، استفاده شد. کنترل توزیع در محل فعالیت باکتری‌ها و واکنش-دهنده‌ها و نتایج توزیع کلسیم کربنات و خصوصیات مهندسی مربوطه در زیر سطح خاک، برای بهسازی‌های آینده چالش بزرگی است، به‌ویژه اگر بهسازی زیستی در یک سیستم سطحی یا در عمق خاک (جهت جایگزینی روش بهسازی عمیق خاک به‌سیله آهک مصنوعی) اجرا شود. جهت تجاری‌سازی فرآیند بهسازی زیستی بهینه‌سازی‌های بیشتری در عملکرد فرآیند رسوب بیولوژیکی (بهبود استفاده مؤثر از باکتری‌ها، واکنش دهنده‌ها و کاهش ناهمگنی‌ها) باید صورت پذیرد (Sharma و همکاران، ۲۰۱۶). با این اوصاف هدف از این مطالعه بررسی سازگاری نانوسیلیس با باکتری بوده تا بتوان با بهره‌گیری از مواد معدنی برای افزایش توان خصوصیات خاک بهسازی شده به روش بیولوژیکی بهره جست.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات خاک مورد استفاده

سازگاری اندازه دانه‌های خاک و ریزجانداران اهمیت ویژه‌ای در فرآیند رسوب کلسیت دارد. مناسب‌ترین محدوده اندازه ذرات خاک جهت فعالیت باکتری بین  $(50-400)$   $\mu\text{m}$  می‌باشد، به

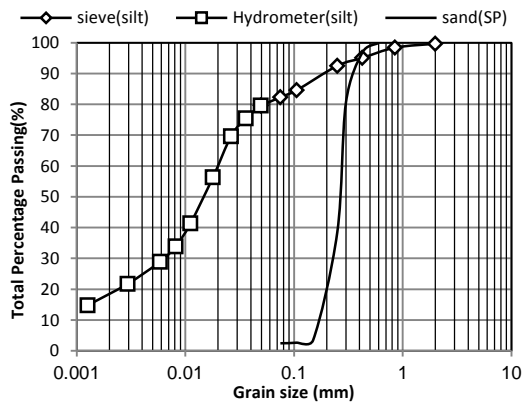
صنعتی‌سازی این روش می‌باشند. از این رو صنعت نانو برای عملیاتی شدن این موضوع می‌تواند بسیار مؤثر باشد. در این مطالعه با توجه به نقش انکارناپذیر نانو ذرات در بهسازی خاک ماسه‌ای و تأثیر نانوسیلیس به‌همراه باکتری در امر بهسازی بیولوژیکی نمونه‌های خاک که تاکنون مورد آزمایش قرار نگرفته، بررسی شد (Dejong و همکاران، ۲۰۱۰). فرمول‌های (۱) تا (۵) فرآیند کلی تولید رسوب میکروبی کلسیت<sup>۲</sup> را نشان می‌دهند (Dejong و همکاران، ۲۰۱۰). ابتدا اوره توسط باکتری، اسید آمینه تولید کرده و از هیدرولیز آن (معادله (۲)) کربنیک اسید و آمونیاک تشکیل می‌شود. کربنیک اسید هیدرولیز شده و یون هیدروژن کربنات و یون هیدروژن حاصل می‌گردد و آمونیاک نیز به‌طور خود به خودی هیدرولیز شده تا به آمونیوم و یون هیدروکسید تبدیل شود. سپس یون هیدروژن کربنات و آمونیوم حاصله با هم ترکیب شده و یون بی‌کربنات لازم برای فرآیند رسوب زیستی را تشکیل می‌دهند. دیواره سلولی باکتری بار منفی داشته و به همین خاطر قادر خواهد بود یون کلسیم دو بار مثبت را به دیواره جذب کند. نهایتاً یون  $\text{Ca}^{2+}$  با  $\text{CO}_3^{2-}$  واکنش می‌دهد و رسوب کلسیم کربنات ( $\text{CaCO}_3$ ) حاصل می‌شود.



اولین بار پدیده سمانتشدن<sup>۳</sup> زیستی در غرب استرالیا در پارک ملی نامبونگ<sup>۴</sup> مشاهده شد. در این منطقه تحریک شیمیایی زیستی باعث رسوب‌گذاری کلسیم کربنات در اطراف ریشه‌های درختان موجود در آن منطقه شد، که باعث سفت شدن قابل توجه خاک ماسه‌ای سست با ماهیت کربناته شد. بعد از این که ماسه‌های سست اطراف ناحیه تثبیت‌شده به‌وسیله نیروی باد فرسایش یافت، خاک سمانت‌شده نمایان شده و به شکل ستون‌هایی در پارک ملی نامبونگ درآمد. پس از آن تلاش‌های زیادی در جهت اصلاح بیولوژیکی خاک‌ها انجام شد، که می‌توان از افزایش مقاومت برشی خاک‌ها نام برد (Qabany و همکاران، ۲۰۱۲؛ Cou و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین Whiffin و همکارانش جهت بررسی بهسازی زیستی خاک ماسه‌ای با استفاده از رسوب میکروبی کلسیم کربنات از روش تثبیت باکتری در خاک استفاده نمودند (Whiffin و همکاران، ۲۰۰۷). در این میان مطالعه‌های دیگری نیز بر روی کاربردهایی غیر از بهسازی خاک ماسه‌ای از جمله ترمیم مقاومت

4. Nambung National Park  
5. Cementation

2. Calcite  
3. Cementing



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی ماسه سست فیروزکوه و سیلت

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایش تراکم بر خاک‌ها قبل از

بهسازی

$G_s$	$\gamma_d^{max}$ ( $\frac{gr}{cm^3}$ )	$\omega_{optm}$ (%)	خاک
۲/۶۶	۱/۸۶	۹	ماسه سیلتی (۱۵٪ سیلت)
۲/۶۵	۱/۹۷	۱۰	ماسه سیلتی (۲۰٪ سیلت)
۲/۶۳	۱/۹۳	۱۱	ماسه سیلتی (۴۵٪ سیلت)
۲/۶۷	۱/۵۲	۸/۹	ماسه سست فیروزکوه

جدول ۳- مشخصات فیزیکی نانو سیلیس

>۹۹٪	خلوص
۱۱-۱۳	اندازه ذرات (nm)
سفید	رنگ
۲/۴	وزن واحد حجم ( $gr/cm^3$ )
۲۰۰	سطح ویژه ( $m^2/gr$ )

۳-۲- انتخاب و کشت باکتری

مطالعات اولیه در خصوص شناسایی انواع باکتری‌های تولیدکننده آنزیم اوره آز و نیز توانایی باکتری‌ها در تولید آنزیم انجام شد و باکتری اسپوروسارسینا یوریا (PTCC = ۱۶۴۲) به‌عنوان عامل انجام واکنش انتخاب گردید (Kilic و Canakci، ۲۰۱۵). همچنین از مزایای این باکتری می‌توان به فعالیت بالا و بیماری‌زا نبودن و سازگار بودن با محیط‌زیست اشاره کرد. در این مطالعه، از محیط کشت مایع نوترینت براث مرک<sup>۹</sup> استفاده گردیده و پس از تهیه آن در دمای ۱۲۰°C به مدت ۱۵ دقیقه استریل شد. پس از اتمام استریل، در داخل دستگاه هود تلقیح باکتری به همراه محلول اوره استریل انجام گرفته و برای تکثیر به انکوباتور شیکردار<sup>۱۰</sup> تحت دمای ۲۸°C و به مدت ۲۴ ساعت منتقل شد. برای آماده‌سازی محلول سمانتاسیون<sup>۱۱</sup> از اوره و کلسیم کلرید استفاده شد و غلظت‌های محلول سمانتاسیون در این مطالعه متغیر mol/L

همین منظور در این مطالعه سعی شد این محدوده برای نتیجه‌گیری بهتر رعایت شود (A.Sharma و همکاران، ۲۰۱۶). با توجه به محدوده ذکر شده جهت حرکت و فعالیت باکتری‌ها در خاک نیاز بود تا ماسه‌ای تهیه شود، که از لحاظ دانه‌بندی برای باکتری بهینه باشد. خاک‌های مورد استفاده در این مطالعه، ماسه سست فیروزکوه و ماسه سیلتی است، که از شرکت تأمین ماسه ریخته‌گری فیروزکوه تهیه شد. براساس آزمایش‌های دانه‌بندی استاندارد سیستم طبقه‌بندی متحد، خاک ماسه‌ای، بد دانه‌بندی شده (SP) و خاک ماسه سیلتی در رده SM طبقه‌بندی شد. آزمایش تراکم به روش پراکتور<sup>۶</sup> استاندارد براساس ASTM D 698 بر روی هر نمونه از خاک‌های مورد مطالعه انجام شد، که نتایج آن در جداول (۱) و (۲) و شکل (۱) آورده شده است.

۲-۲- انتخاب نانو سیلیس

با توجه به این‌که بعضی از نانوذرات همانند نانو ذرات مس، نقره، روی و تیتانیوم خاصیت آنتی‌باکتری قوی دارند. در این مطالعه سعی شد از نانو ذره‌ای استفاده شود، که بر روی عملکرد باکتری عکس‌العمل خنثی یا خاصیت آنتی‌باکتری بسیار ضعیفی داشته باشد تا بهسازی خاک به‌صورت مناسب انجام پذیرد. با مطالعه صورت گرفته بر روی نانوذرات مختلف نهایتاً نانو سیلیس به دلیل توانایی آن در برقراری پیوند با طیف وسیعی از مولکول‌ها و پلیمرها و تأثیر آن بر افزایش مقاومت برشی خاک ماسه‌ای انتخاب شد (کریم‌آبادی و شوش‌پاشا، ۱۳۹۵) و با نسبت اختلاط (۰/۲٪ وزنی خاک) همراه با باکتری به نمونه‌ها تزریق شد.

خصوصیات نانو سیلیس استفاده شده در این مطالعه که از شرکت تولیدی صنایع نانو سیلیس ایساتیس ایران (شناسه: ۱۰۸۴۰۴۴۹۴۵۵) خریداری شد، به شرح جدول (۳) است.

جدول ۱- مشخصات ماسه سست فیروزکوه

۱/۵۵	ضریب یکنواختی ( $C_u$ )
۱/۰۱	ضریب خمیدگی ( $C_c$ )
۰/۲	(mm) $D_{10}$
۰/۲۵	(mm) $D_{30}$
۰/۳۱	(mm) $D_{60}$
SP	نوع خاک بر مبنای یونیفاید <sup>۷</sup>
۲/۶۸	چگالی ذرات جامد خاک ( $G_s$ )
سفید متمایل به زرد	رنگ
۱/۵۲	وزن مخصوص خشک حداکثر ( $\frac{gr}{cm^3}$ )
۱/۳۳	وزن مخصوص خشک حداقل ( $\frac{gr}{cm^3}$ )

9. Shaker incubator  
10. Cementation

6. Proctor  
7. Unified Soil Classification System  
8. Nutrient Broth Merck

بر اساس کار انجام شده توسط Hai Lin در دانشگاه آریزونا بود (Hai Lin و همکاران، ۲۰۱۶). در این روند، محلول باکتری به اندازه دو برابر حجم حفرات و با نرخ جریان ثابت (1 ml/min) به قالب‌ها تزریق شد، سپس به مدت ۷ الی ۸ ساعت اجازه داده شد تا خاک کاملاً اشباع شده به این محلول در سطوح و مابین ذرات قرار گرفته، ایجاد چسبندگی کرده و فرآیند هیدرولیز اتفاق بیافتد. پس از این بازه زمانی، محلول سمانتاسیون حاوی کلسیم کلرید و اوره نیز به اندازه دو برابر حجم حفرات، ۵ بار و در دامنه زمانی ۳ ساعته تزریق شدند. با انتخاب این روش، تعداد دفعات و چرخه‌های مواد مغذی، کیفیت سمانتاسیون تأثیرگذار و قابل توجه می‌شود. با اتمام آخرین مرحله تزریق محلول سمانتاسیون، نمونه‌ها یک شبانه‌روز (۲۴ ساعت) در حالت اشباع درون قالب نگهداری شدند و پس از آن قالب‌ها از سیستم تزریق جدا شده (بعد از این بازه زمانی رسوب کلسیت قابل مشاهده است) و با توجه به متغیر بودن زمان‌های عمل‌آوری (۷، ۳ و ۱۴ روزه) نمونه‌ها در دمای اتاق °C (۲۵-۲۶) و رطوبت ۳۰٪ نگهداری شدند و با پایان یافتن مدت زمان عمل-آوری نمونه‌های بهسازی شده تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند.

#### ۲-۵- آنالیز الکترونی (SEM)

برای مشخص شدن نوع رسوب تشکیل شده جهت توصیف اشکال آن، تعیین مکان‌های CaCO<sub>3</sub> رسوب شده و بررسی رفتار پیوند میان دانه‌های خاک ماسه‌ای مورد آزمایش و عوامل سمانتاسیون، آنالیز میکروسکوپی (SEM) بر روی نمونه‌های بهسازی شده انجام شد.



شکل ۲- قالب‌های قرارگیری نمونه‌های خاک برای تزریق محلول سمانتاسیون

(۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵) در نظر گرفته شده است. با توجه به وزن مولکولی و غلظت‌های مورد نیاز میزان اوره و کلسیم محاسبه گردید و پس از انحلال در آب مقطر به حجم مورد نظر رسانده شدند. جهت اندازه‌گیری غلظت سلول‌های باکتری (OD)<sup>۱۱</sup> موجود در محلول تزریقی به درون خاک، از روش اسپکتروفتومتری<sup>۱۲</sup> بهره گرفته شد و جذب نور توسط باکتری در طول موج ۶۰۰nm، قرائت شد. نحوه کار با این دستگاه بدین صورت است که ابتدا محیط کشت را درون ظرف مخصوص ریخته و عدد مرتبط با محیط کشت به تنهایی به عنوان شاخص در نظر گرفته می‌شود، که در واقع چگالی نوری صفر را دارا است. سپس بقیه مقادیر (چگالی نوری مخلوط باکتری و ترکیبات محیط کشت) را نسبت به آن مقدار پایه اندازه می‌گیریم. به این ترتیب چگالی نوری محلول باکتری به دست می‌آید. برای باکتری باسیلوس<sup>۱۳</sup> اسپوروسارسینا یوریا OD برابر ۱، معادل با غلظت cell/ml<sup>۱۰</sup> است. پس از تهیه باکتری با غلظت مطلوب با محلول سمانتاسیون با غلظت‌های تعیین شده، ترکیب و به خاک تزریق شد (گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Fahmi و همکاران، ۲۰۱۸).

#### ۲-۴- تزریق محلول سمانتاسیون

در این تحقیق برای ارزیابی مقاومت، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک و با توجه به محدودیت‌های ذکر شده در استاندارد ASTM D3080 قالب‌هایی با مشخصات هندسی مشابه آزمایش برش مستقیم، به عنوان پایلوت آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت (Canakci، ۲۰۱۴). این قالب‌ها از جنس آهن گالوانیزه بوده (شکل (۴)) و مطابق با ابعاد و جعبه دستگاه برش مستقیم به قطر ۶ cm و ارتفاع ۳ cm است. به منظور توزیع یکنواخت محلول-های باکتری و سمانتاسیون در نمونه‌های مورد آزمایش در کف این قالب‌ها شیارهایی ایجاد شد تا مشکلی از بابت غیریکنواختی ایجاد نشود. همچنین برای جلوگیری از چسبیدن نمونه‌های عمل‌آوری شده به قسمت درونی قالب از تلق‌های آغشته به گریس در درون قالب‌ها استفاده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های خاکی، ابتدا یک لایه فیلتر ژئوتکستایل<sup>۱۴</sup> نبافته برای بهبود روند زهکشی در کف قالب قرار داده شد، سپس نمونه‌های خاک را درون قالب قرار گرفته و بالای نمونه نیز از فیلتر کاغذی استفاده شد. تزریق سوسپانسیون باکتری (باکتری نانودار<sup>۱۵</sup>، ۰/۲٪ وزنی خاک، نانو سیلیس در درون محلول باکتری ریخته شده تحت فشار به نمونه تزریق می‌شود) و محلول سمانتاسیون به قالب‌ها با استفاده از پمپ پرستالتیک<sup>۱۶</sup> و از پایین به بالا انجام گردید؛ روش به کار گرفته شده در این مطالعه

15. Bacteria containing nanoparticles  
16. Peristaltic  
17. Scanning Electron Microscope

11. Optical Density  
12. Spectrophotometry  
13. Bacillus  
14. Geotextile



از میکروسکوپ الکترونی (PHILIPS XL20 آیندهوون، هلند) انجام شده است (شکل‌های (۱۱) تا (۱۳)).

### ۲-۶- آزمایش برش مستقیم

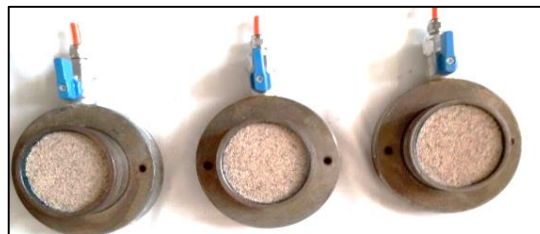
قالب‌ها پس از عمل‌آوری باز شده و به کمک تلق‌های آغشته به گریس از قالب بیرون کشیده و به دلیل متناسب بودن ابعاد نمونه‌ها با جعبه برش دستگاه بدون هیچ دست‌خوردگی و تغییر در ظاهر آن بلافاصله برای آزمایش برش مستقیم آماده شدند. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D3080 و با اعمال کرنش ثابت برشی با سرعت ۱mm/min در سطوح تنش‌های قائم (۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰) برای نمونه‌های استوانه‌ای شکل خاک انجام گرفت (Vander Star و همکاران، ۲۰۱۱). در ضمن نویسندگان بر این موضوع واقف هستند که تغییر نرخ برش می‌تواند پارامتر تأثیرگذاری باشد، ولی در این تحقیق به این موضوع پرداخته نشده است. برای بررسی بیشتر این موضوع به مقاله با مضمون تأثیر نرخ کرنش بر خاک تثبیت‌شده در آزمایش برش مستقیم مراجعه شود (Dey. A، ۲۰۱۵).

### ۳- نتایج و بحث

برای اغلب مسائل مکانیک خاک می‌توان مقاومت برشی بر روی صفحه گسیختگی را با تقریب مناسب یک تابع خطی از تنش قائم در نظر گرفت. به‌منظور بررسی و مقایسه پارامترهای مقاومتی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در نمونه‌ها قبل و بعد از بهسازی از آزمایش برش مستقیم استفاده شد و نمودارهای مربوط به آزمایش برش مستقیم نمونه‌های بهسازی شده آورده شده‌اند.

### ۳-۱- بررسی تغییرات مقاومت برشی خاک ماسه‌ای سست

بهسازی شده با مقادیر مختلف مولار محلول سمانتاسیون تغییرات تنش برشی در برابر کرنش برشی برای نمونه‌های ماسه‌ای بهسازی شده به‌ازای محلول‌های سمانتاسیون (۰/۷۵، ۰/۲۵، ۰/۵) در سه بازه زمانی مختلف (۳، ۷ و ۱۴ روزه) و تحت تنش‌های عمودی (۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ کیلوپاسگال) در شکل (۷) نشان داده شده است. تغییر در رفتار نمونه‌های بهسازی شده با محلول سمانتاسیون ۰/۲۵mol/L به‌وضوح قابل‌مشاهده بود؛ به‌طوری‌که نمونه‌های بهسازی شده در تمام تنش‌های عمودی رفتاری شبیه خاک متراکم از خود نشان دادند. همچنین میزان کرنش برشی بیشینه در نمونه‌های بهسازی شده کاهش یافت، که این امر حاکی از کاهش تغییر شکل ماسه بهسازی شده نسبت به ماسه بهسازی نشده به‌علت سخت‌شدگی قابل‌توجه آن است. میزان مقاومت برشی نمونه‌های بهسازی نیز افزایش بیش از ۲ برابری را برای نمونه‌های بهسازی شده نشان داد و تأثیر زمان عمل‌آوری در



شکل ۳- نمونه‌های آماده‌شده برای تزریق محلول سمانتاسیون



شکل ۴- سیستم تزریق محلول تزریق به خاک درون قالب‌ها با استفاده از پمپ پرستالتیک



شکل ۵- نمونه‌های عمل‌آوری با غلظت محلول ۰/۵ mol/L در زمان ۳، ۷ و ۱۴ روزه که به ترتیب از چپ به راست نمونه بهسازی شده ۳، ۷ و ۱۴ روزه است



شکل ۶- نمونه‌های بهسازی شده خاک ماسه‌ای سست با غلظت‌های متفاوت (۰/۷۵، ۰/۲۵، ۰/۵) mol/L

در ضمن، قبل از انجام آزمایش میکروسکوپی، تمام نمونه‌های بهسازی شده قبل از آزمایش و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. تصویربرداری الکترونی با استفاده

غلظت سمانتاسیون جهت ارتقای تأثیرگذاری فرآیند (MICP) محدود است و دلیل این امر می‌تواند این باشد که یون‌های اوره ( $Co(NH_2)_2$ ) و کلسیم کلرید (CaCl) در غلظت‌های بالاتر به‌طور کامل مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و هیدرولیز اوره متوقف می‌شود، در نتیجه نرخ فعالیت کاهش می‌یابد.

با مقایسه نتایج آزمایش برش مستقیم به‌دست‌آمده در این مطالعه با نتایج گزارش‌شده در مطالعات قبلی برخی شباهت‌ها اختلافات دیده شد. Zheng و همکاران (۲۰۱۶) ماسه بهسازی شده به‌روش زیستی با محلول سمانتاسیون ۱ مولار را تحت آزمایش تک‌محوری قرار دادند و دریافتند مقاومت فشاری تک-محوری از ۲/۸ تا ۳/۲ مگاپاسکال بود که مشابه نتایج این مطالعه بود. ولی از طرفی طبق گزارشات Qabany با بررسی نمونه‌های بهسازی شده ماسه با غلظت‌های متفاوت ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ مولار مشاهده کردند، مقاومت فشاری برای نمونه‌هایی با غلظت ۰/۵ مولار برابر با ۱/۷ مگاپاسکال بود که با توجه نتایج به‌دست‌آمده توسط آزمایشات قابل قبول بود (Qabany و همکاران، ۲۰۱۲). ولی وقتی نمونه‌ها با غلظت‌های بالاتر تحت بهسازی قرار گرفتند، بیشتر نمونه‌های بهسازی شده با محلول سمانتاسیون با غلظت ۱ مولار مقاومتی از خود نشان ندادند و عملاً مقاومت فشاری تک محوری آن برابر صفر داشتند و بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه بهسازی شده با محلول سمانتاسیون ۰/۱ مولار بود و ادعا شده بود که استفاده از محلول با غلظت کم‌تر منجر به نمونه‌های قوی‌تر می‌شود که با نتایج آزمایشات این مطالعه مطابقت ندارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایشات مقاومت برشی این مطالعه، مشاهده شد با افزایش غلظت محلول سمانتاسیون تا ۰/۵ mol/L میزان مقاومت نمونه‌های بهسازی شده روند صعودی داشته اما استفاده از محلول سمانتاسیون با غلظت بیشتر از ۰/۷۵ mol/L باعث کاهش مقاومت کسب‌شده از فرآیند رسوب زیستی کلسیم کربنات می‌شود.

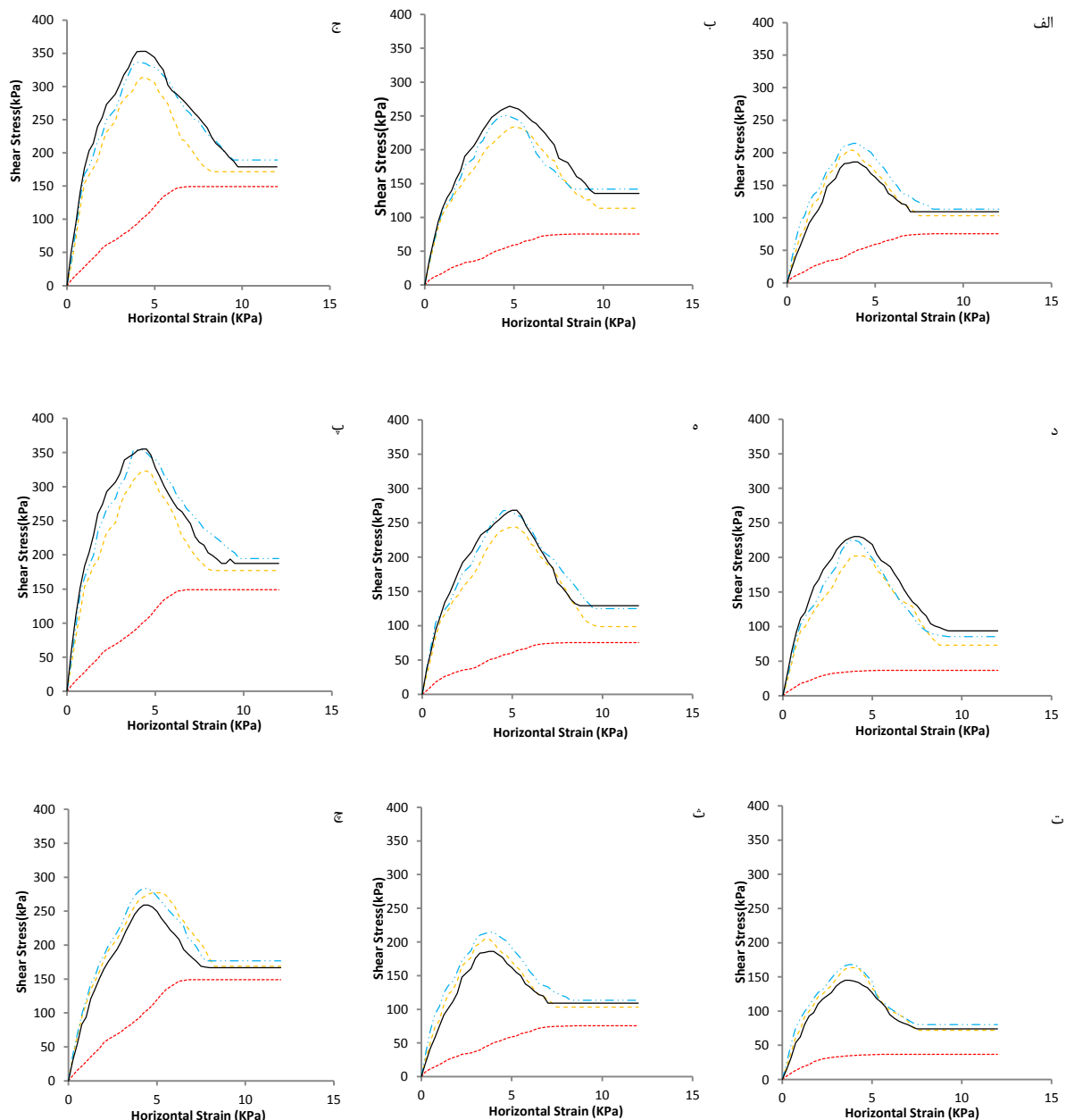
افزایش مقاومت به‌طور میانگین در حدود ۱۰٪ بود. با بررسی نتایج آزمایش مقاومت برشی متوجه شدیم که پارامتر چسبندگی در نمونه‌های بهسازی شده افزایش قابل توجه پیدا کرده است، به‌طوری‌که با افزایش زمان عمل‌آوری نیز تا حدودی بر مقدار آن افزوده می‌شود. همچنین مقدار زاویه اصطکاک داخلی نیز افزایش تا ۱۰٪ را نشان داد. با این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت عمدتاً مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بهسازی شده بیشتر به‌وسیله پارامتر چسبندگی تأمین می‌گردد و زاویه اصطکاک داخلی تأثیر کمی بر روی آن دارد. شکل (۸) تغییرات زمان-مقاومت برشی نمونه‌های بهسازی شده با غلظت‌های متفاوت محلول سمانتاسیون در تنش‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند افزایش مقاومت برشی نمونه‌های بهسازی با محلول سمانتاسیون ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ mol/L در بازه‌های زمانی ۳ و ۷ روزه کماکان ادامه یافت، اما تنش ماکزیمم نمونه‌های ۷ و ۱۴ روزه نزدیک به هم تغییر کردند و علت این امر نفوذ کامل باکتری در زمان عمل‌آوری ۷ روزه بود و به‌همین دلیل فعالیت آنزیم در بازه زمانی ۱۴ روزه کاهش محسوسی پیدا کرد.

با افزایش غلظت محلول سمانتاسیون از ۰/۲۵ به ۰/۵ mol/L مقاومت برشی افزایش یافت، که در نهایت به افزایش ۱۲٪ زاویه اصطکاک داخلی منجر شد، که با توجه به ریزدانه بودن نوع خاک مورد مطالعه، نتیجه منطقی محسوب می‌شود. نکته مهم در نمونه‌های بهسازی شده با محلول سمانتاسیون ۰/۷۵ mol/L، کاهش مقاومت برشی نمونه‌ها علی‌رغم افزایش غلظت محلول سمانتاسیون نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ mol/L بود. با توجه به جدول (۴) علی‌رغم افزایش غلظت محلول سمانتاسیون به ۰/۷۵ mol/L کاهش قابل توجهی در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مشاهده شد. در توضیح علت آن می‌توان گفت، اگرچه غلظت‌های بالای محلول سمانتاسیون می‌تواند خواص مکانیکی خاک را بهبود ببخشد، اما میزان افزایش

جدول ۴- چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده فیروزکوه تثبیت‌شده به‌ازای محلول سمانتاسیون (۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵) mol/L

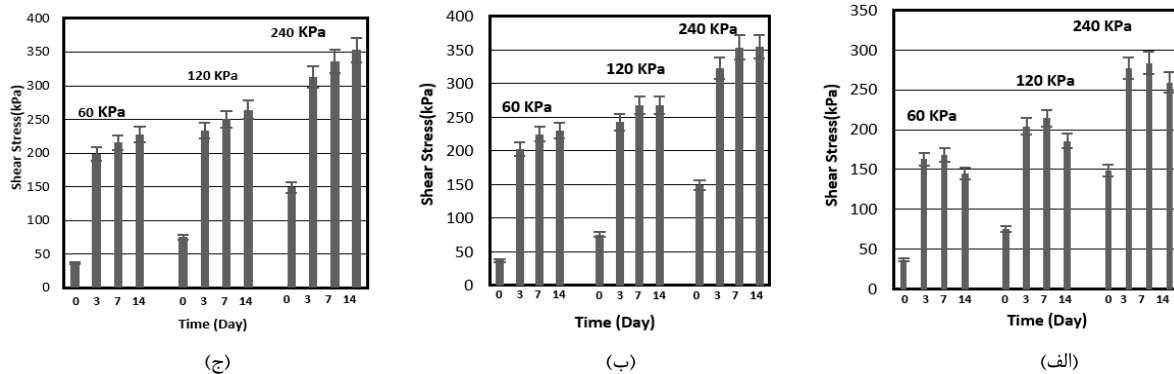
مدت زمان عمل‌آوری (روز)		غلظت محلول‌های سمانتاسیون			
۱۴	۷	۳	۰		
۱۸۳/۷۵	۱۷۳/۰۵	۱۵۹/۲۵	۰/۱	چسبندگی (kPa)	۰/۲۵ mol/L
۳۵/۰۱	۳۴	۳۲/۶۲	۳۱/۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	
۱۸۶/۵	۱۸۱/۹	۱۶۲	۰/۱	چسبندگی (kPa)	۰/۵ mol/L
۳۴/۹۵	۳۵/۶۳	۳۳/۸۸	۳۱/۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	
۱۰۸/۵	۱۳۳/۴۵	۱۲۶/۴۳	۰/۱	چسبندگی (kPa)	۰/۷۵ mol/L
۳۲/۲	۳۲/۲۶	۳۲/۲۴	۳۱/۸	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	

منظور از روز ۰ نمونه بهسازی نشده می‌باشد.

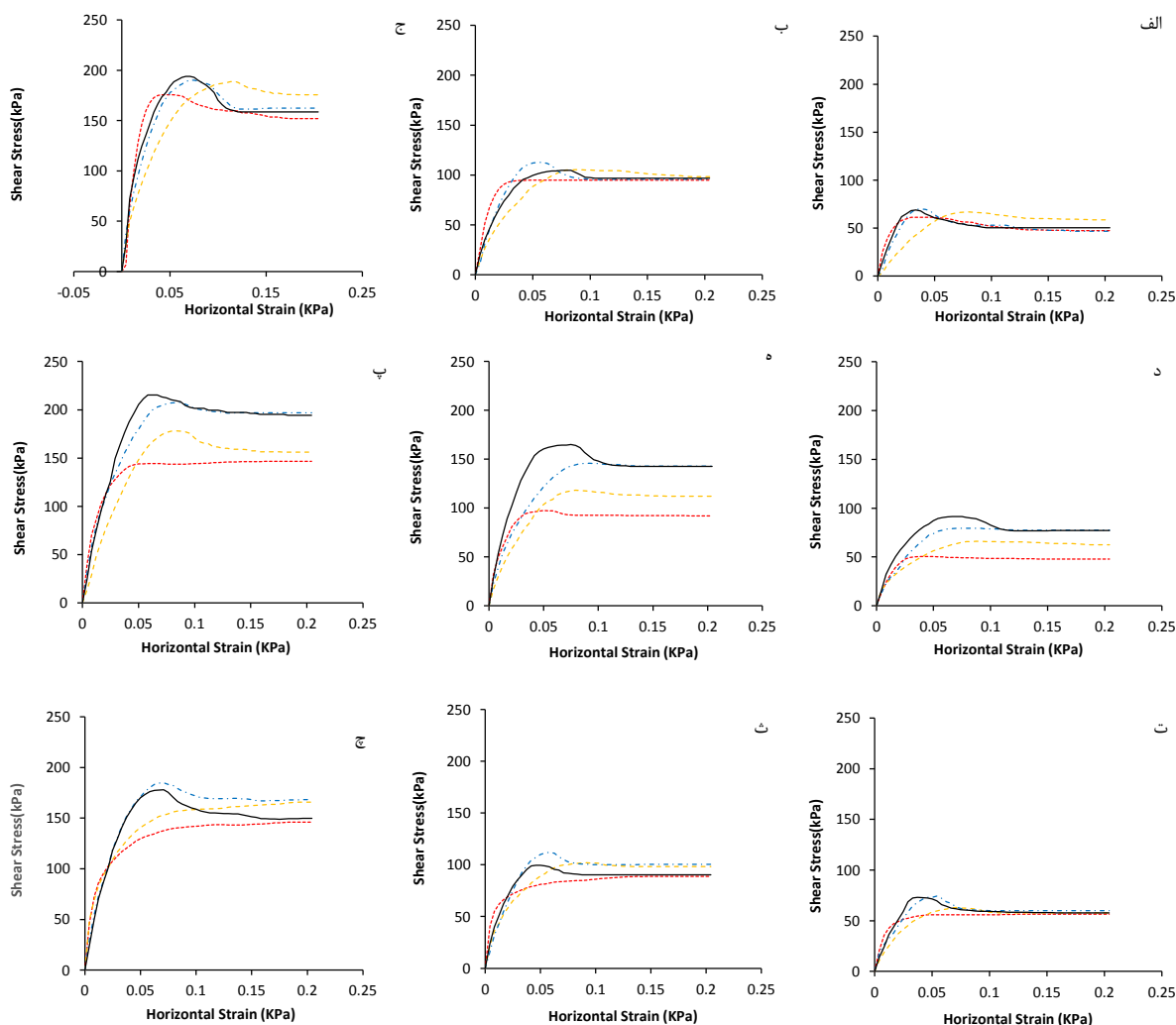


improved sample in 14 days: ..... ; improved sample in 7 days: -.-.-.-.- ; improved sample in 3 days: - - - - - ; unimproved sample: ..... days:

شکل ۷- تغییرات تنش برشی- کرنش برشی خاک ماسه سست فیروزکوه با محلول (۰/۷۵، ۰/۲۵، ۰/۵) mol/L سماتاسیون، تحت بارهای (۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰): الف) (۰/۲۵M، ۶۰kPa، ب) (۰/۲۵M، ۱۲۰kPa، ج) (۰/۲۵M، ۲۴۰kPa، د) (۰/۵M، ۶۰kPa، ه) (۰/۵M، ۱۲۰kPa، پ) (۰/۵M، ۲۴۰kPa، ت) (۰/۷۵M، ۶۰kPa، ث) (۰/۷۵M، ۱۲۰kPa، ج) (۰/۷۵M، ۲۴۰kPa



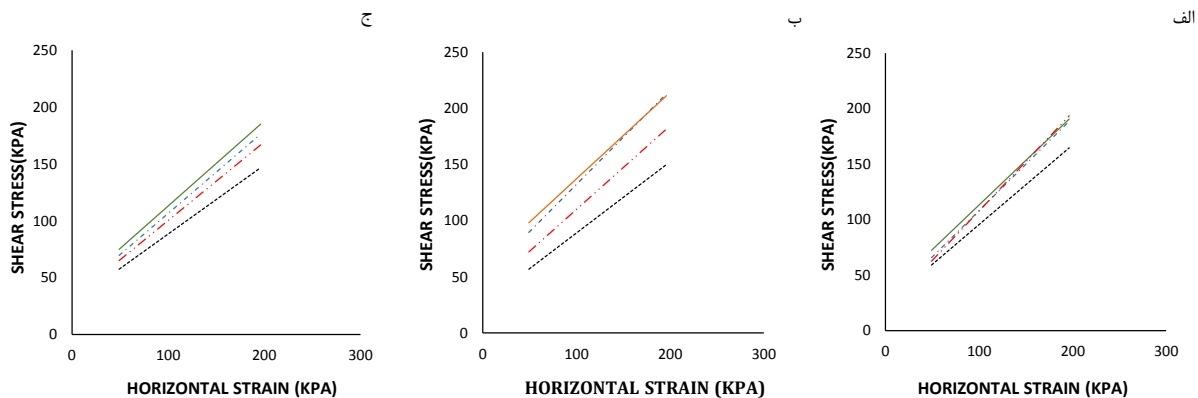
شکل ۸- تغییرات زمان- مقاومت برشی خاک ماسه سست فیروزکوه بهسازی شده با محلول mol/L سمانتاسیون: (الف) ۰/۲۵، (ب) ۰/۵، (ج) ۰/۷۵



improved      improved sample in 14 days:      improved sample in 7 days      unimproved sample:      sample in 28 days:

شکل ۹- کرنش برشی نمونه خاک‌های ماسه سیلتی با درصدهای (۰/۱۵، ۰/۳۰، ۰/۴۵) سیلت، تحت بارهای kPa (۵۰ و ۲۰۰): (الف) ۵۰kPa، ۱۵٪، (ب) ۱۰۰kPa، ۳۰٪، (ج) ۲۰۰kPa، ۴۵٪، (د) ۵۰kPa، ۱۵٪، (ه) ۱۰۰kPa، ۳۰٪، (پ) ۲۰۰kPa، ۴۵٪، (چ) ۵۰kPa، ۱۵٪، (چ) ۱۰۰kPa، ۳۰٪، (ث) ۲۰۰kPa، ۴۵٪





شکل ۱۰- پوش موهر کلمب<sup>۱۸</sup> نمونه‌های ماسه سیلتی با (a=۱۵٪، b=۳۰٪ و c=۴۵٪) سیلت

improved sample: ——— improved sample in 14 days: - - - improved sample in 7 days: ····· unimproved sample: - - - - in 28 days:

نمونه‌های تثبیت‌شده با باکتری، مقدار بیشینه مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته است.

جدول ۵- میزان تغییرات مقاومت برشی در تنش‌های قائم kPa (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰)

تنش قائم (kPa)	میزان افزایش تنش برشی (%)		
	نمونه ۱۵٪ سیلت	نمونه ۳۰٪ سیلت	نمونه ۴۵٪ سیلت
۵۰	۲۲٪	۸۱٪	۳۱٪
۱۰۰	۱۸٪	۴۹٪	۲۶٪
۲۰۰	۱۸٪	۴۱٪	۲۴٪

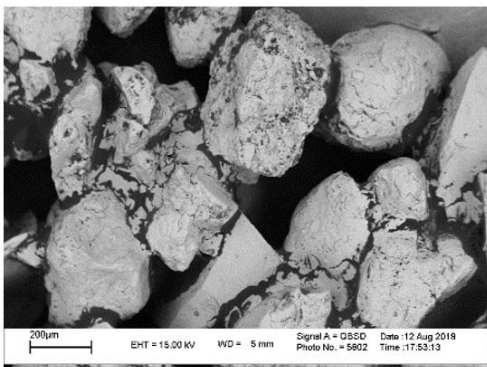
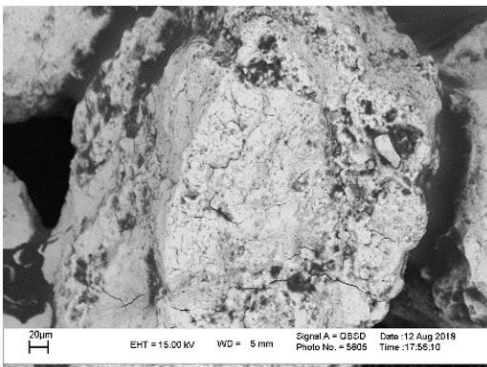
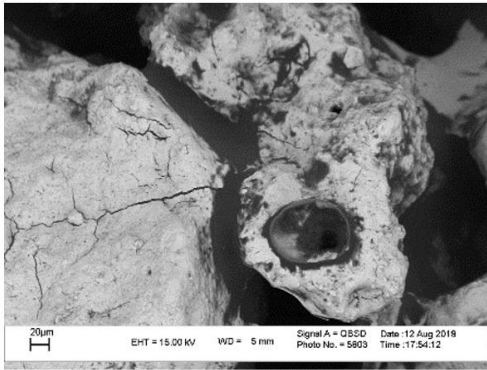
جدول ۶- چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌های حاوی ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ سیلت در آزمایش برش مستقیم به روش تند

درصد نمونه حاوی سیلت (%)	مدت زمان عمل‌آوری (روز)			
	۰	۷	۱۴	۲۸
۱۵٪	۲۳/۹۲	۲۴/۸۵	۳۳/۵	۱۸/۷۴
	زاویه اصطکاک داخلی (°C)	۳۵/۶۴	۳۷/۸۶	۳۸/۷۵
۳۰٪	۲۵/۶۲	۳۵/۸۶	۴۸/۳۶	۶۰/۴
	زاویه اصطکاک داخلی (°C)	۳۵/۸۶	۴۰/۸۸	۴۳/۱۹
۴۵٪	۲۷/۷۷	۳۱/۰۵	۳۷/۹۹	۳۳/۸۷
	زاویه اصطکاک داخلی (°C)	۳۱/۲۲	۳۴/۶۷	۳۵/۸۴

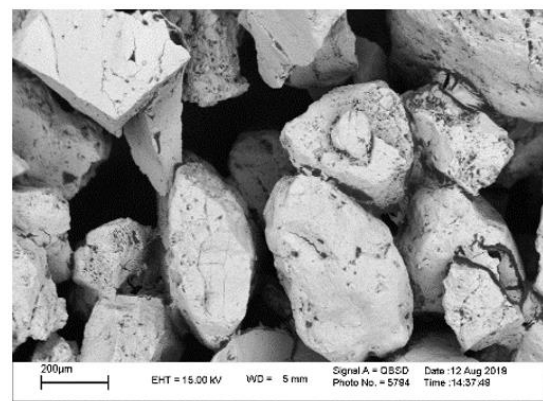
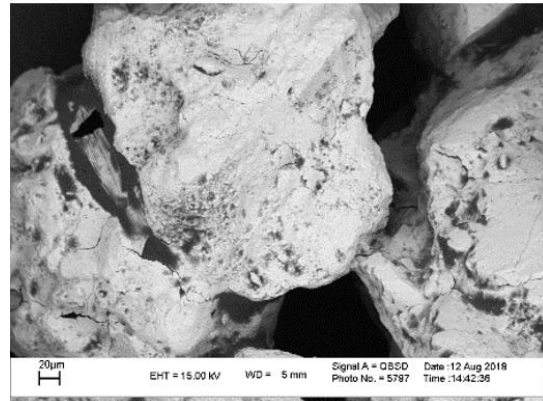
ولی با افزایش بیشتر درصد ریزدانه تا (۴۵٪) در نمونه‌های تثبیت‌شده با باکتری، بیشینه مقاومت نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. همچنین منحنی تنش- کرنش و الگوی گسیختگی به‌دست‌آمده و رفتار مکانیکی نمونه ماسه سیلتی را در سه مرحله الاستیک، پلاستیک و مرحله گسیختگی در طول بارگذاری را قابل‌مشاهده

### ۲-۳- بررسی تغییرات مقاومت برشی نمونه‌های خاک ماسه‌ای بهسازی شده با مقادیر مختلف سیلت

در شکل (۱۰) پوش موهر کلمب مربوط به خاک‌های ماسه سیلتی با (۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ سیلت) نشان داده شده است. به‌منظور بهسازی این نمونه‌ها از محلول سمانتاسیون با غلظت ۰/۵ mol/L (به‌دلیل عملکرد بهتر نسبت به غلظت‌های دیگر) به‌همراه ۰/۲ درصد نانو سیلیس استفاده و مقاومت برشی خاک‌ها در سه تنش قائم (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰) اندازه‌گیری شد. پوش موهر کلمب در نمونه‌های بهسازی شده بالاتر از نمونه بهسازی نشده است، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت این شیوه بهسازی در هر سه نمونه خاک بود. با توجه به جدول (۵) که نشان‌دهنده میزان افزایش مقاومت برشی خاک در هر سه نمونه است، می‌توان دید که در هر سه نمونه خاک تأثیر این نوع تثبیت در تنش‌های قائم پایین‌تر از تأثیر این نوع تثبیت در تنش‌های قائم بالا بود. با توجه به جدول (۶)، عمده تأثیر بهسازی بیولوژیکی بر روی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در نمونه ۱۵٪ سیلت پس از ۱۴ روز مشاهده شد که این تأثیر بیشینه در نمونه ۳۰٪ سیلت برای پارامتر زاویه اصطکاک داخلی پس از ۲۸ روز و برای پارامتر چسبندگی در نمونه ۱۴ روزه مشهود است. همچنین برای نمونه بهسازی شده با ۴۵٪ سیلت بیشینه تأثیر در نمونه ۱۴ روزه رؤیت شد. در ضمن، بیشترین میزان مقاومت برشی در نمونه ۳۰٪ قابل‌رؤیت است، که این قسمت را می‌توان یک شرایط بهینه در بین نمونه‌ها در نظر گرفت. همچنین تأثیر تثبیت بیولوژیکی روی افزایش چسبندگی به‌مراتب بیشتر از افزایش زاویه اصطکاک داخلی بوده، که نشان‌دهنده تأثیر بیشینه این نوع تثبیت روی چسبندگی است. مقایسه منحنی تنش- کرنش برای نمونه‌های حاوی ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ سیلت نشان می‌دهد، که با افزایش درصد ریزدانه تا ۳۰٪ در



است. در این راستا، زمانی که تغییر شکل کم‌تر از ۲٪ است، خاک رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهد. در مرحله پلاستیک منحنی تنش- کرنش با افزایش تغییر شکل، به سمت پایین انحنا پیدا می‌کند. این انحنا وضعیتی را روشن می‌کند که بر اساس آن بخش ضعیف نمونه خاک شروع به جاری شدن می‌کند. در نهایت، در مرحله گسیختگی تنش بعد از نقطه بیشینه مقاومتی، به سمت پایین نزول می‌کند.



شکل ۱۲- تصویر از نمونه خاک ماسه سست فیروزه کوه بهسازی شده با غلظت محلول  $0.5 \text{ mol/L}$  طی ۷ روز که کریستال‌های کربنات کلسیم (خاکستری تیره) بین دانه‌های ماسه (خاکستری روشن) ایجاد شده توسط هیدرولیز اوره کاتالیزوری میکروبی ایجاد شده است

ماکزیمم تنش برشی (تنش برشی افقی در لحظه گسیختگی) برای نمونه‌های حاوی ۳۰٪ سیلت بزرگ‌تر از نمونه‌ای می‌باشد که حاوی ۱۵٪ سیلت است (شکل (۹)).

۳-۳- تصاویر الکترونی از رسوب زیستنی کلسیم کربنات در تصاویر SEM رسوب تشکیل شده بین دو ذره خاک نشان شده است. فرآیند رسوب‌گذاری به‌صورتی است که ابتدا یک لایه نازکی از رسوب دور ذرت را پوشانده، سپس در محل اتصال ذرات پلی تشکیل می‌شود، که دلیل اصلی تقویت خاک است.

شکل ۱۱- تصویر از نمونه خاک ماسه سست فیروزه کوه بهسازی شده با غلظت محلول  $0.5 \text{ mol/L}$  طی ۳ روز که کریستال‌های کربنات کلسیم (خاکستری تیره) بین دانه‌های ماسه (خاکستری روشن) ایجاد شده توسط هیدرولیز اوره کاتالیزوری میکروبی ایجاد شده است

تثبیت‌کننده استفاده نشد، مشخص شد با شروع دوره عمل‌آوری نمونه‌ها رسوب کلسیم کربنات ناشی از واکنش بیولوژیکی باکتری و محلول سمانتاسیون بین ذرات خاک قرار گرفته و با گذشت زمان مقدار این رسوب افزایش می‌یابد (شکل (۱۱)). همان‌طور که در شکل (۱۲) واضح است، بلورهای کلسیت بر روی دانه‌های خاک تشکیل شده و در شکل (۱۳) نیز مشخص است، که پس از ۱۴ روز همچنان بلورهای کلسیت بر روی دانه‌ها باقی‌مانده است.

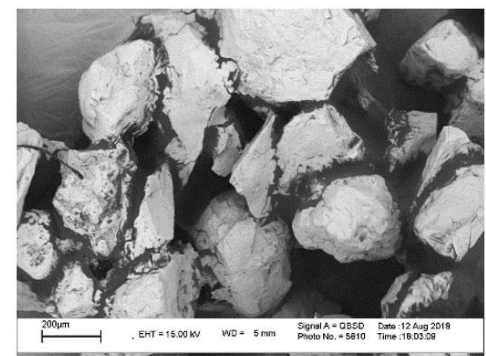
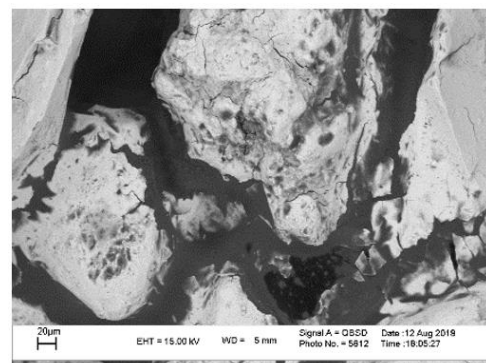
#### ۴- نتیجه‌گیری

یادآوری می‌شود، این مطالعه به بررسی نقش نانو سیلیس بر فرایند بهسازی خاک ماسه‌ای بدانه‌بندی شده و ماسه سیلتی با رسوب زیستی کلسیم کربنات (MICP) پرداخته است. سازگاری نانو سیلیس با باکتری و میزان پارامترهای مقاومتی خاک بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم، ارزیابی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که:

۱) ترکیب باکتری و نانو سیلیس (در درصد محدود نانو) باعث بهبود روند بهسازی و افزایش پارامترهای مکانیکی خاک ماسه‌ای شده است، که این نشان‌دهنده سازگاری نانو سیلیس و باکتری می‌باشد. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه و نتایج تحقیقات Canakci (۲۰۱۵) مشخص شد که مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بهسازی شده با رسوب زیستی کلسیم کربنات در حضور نانو سیلیس حدود ۴/۵ برابر افزایش یافته است. اگرچه پیشنهاد می‌شود آزمایشات بیشتر و دقیق‌تر برای روشن‌تر شدن و امکان بهسازی در ابعاد مختلف (به‌عنوان مثال، در درصدهای بالاتر از نانو سیلیس) انجام پذیرد؛

۲) در غلظت‌های  $0/5 - 0/25$  mol/L برای نمونه‌های ماسه‌ای بدانه‌بندی شده با افزایش زمان عمل‌آوری به‌وضوح روند افزایشی پارامترها مشاهده شد؛ طوری که چسبندگی نمونه‌ها به‌ترتیب حدوداً به  $159 - 186$  kPa رسید و برای نمونه‌ی بهسازی شده با محلول سمانتاسیون  $0/5$  mol/L افزایش زاویه اصطکاک داخلی در حدود ۱۲٪ و افزایش بیش از ۲ برابری در مقاومت به ثبت رسید. در نمونه‌های ماسه سیلتی، حداکثر افزایش مقاومت برشی در تنش  $50$  KPa یافت، همچنین حداکثر افزایش مقاومت برشی در تمامی تنش‌ها برای نمونه حاوی  $0/30$  سیلت رخ داد. عمده تأثیر بر روی زاویه اصطکاک داخلی در نمونه  $0/30$  سیلت پس از روز ۱۴ به‌دست آمد.

۳) در غلظت  $0/75$  mol/L روند متفاوتی را شاهد بودیم؛ به شکلی که در کل، کاهش محسوسی در این غلظت و در



شکل ۱۳- تصویر از نمونه خاک ماسه سست فیروزکوه بهسازی شده با غلظت محلول  $0/5$  mol/L طی ۱۴ روز که کریستال‌های کربنات کلسیم (خاکستری تیره) بین دانه‌های ماسه (خاکستری روشن) ایجاد شده توسط هیدرولیز اوره کاتالیزوری میکروبی ایجاد شده است

اساساً مکانیزم حرکت باکتری در خاک به‌صورتی است، که از سطوح بزرگ فاصله می‌گیرد و تمایل دارد به سمت مناطقی با مواد غذایی بیشتر در اتصال ذرات خاک و دارای میزان نیروی برشی بیش‌ترین است (Azadi و همکاران، ۲۰۱۶). به‌منظور بررسی چشمی تغییرات حاصل از اصلاح زیستی بر روی خاک تحت مطالعه، از سه نمونه خاک ماسه سست فیروزه کوه بهسازی شده با غلظت محلول  $0/5$  mol/L با دوره عمل‌آوری (۳، ۷ و ۱۴ روزه) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تصویربرداری شده است. با بررسی و مقایسه نمونه‌های شاهد که در آن‌ها از هیچ ماده



- DeJong JT, Mortensen BM, Martinez BC, Nelson DC, "Bio-mediated soil improvement", *Ecological Engineering*, 2010, 36 (2), 197-210.
- Fahmi A, Katebi H, Hajjalilue Bonab M, Samadi Kafil H, "Microbial sand stabilization using corn steep liquor culture media and industrial calcium reagents in cementation solutions", *Industrial Biotechnology*, 2018, 14 (5), 270-275.
- Harkes MP, Van Paassen LA, Booster JL, Whiffin VS, Van Loosdrecht MC, "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement", *Ecological Engineering*, 36 (2), 112-117.
- Jawad F, Zheng JJ, "Improving poorly graded fine sand with microbial induced calcite precipitation", *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2016, 1-9.
- Lin H, Suleiman MT, Brown DG, Kavazanjian Jr E, "Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142 (2), 04015066.
- Mamo BG, Banoth KK, Dey A, "Effect of strain rate on shear strength parameter of sand", In *Proceedings of the 50th Indian Geotechnical Conference*, Pune, India, 2015.
- Qabany AA, Soga K, "Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils", In *Bio-and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering: Géotechnique Symposium in Print*, 2013 (107-115), ICE Publishing, 2014
- Ramachandran SK, Ramakrishnan V, Bang SS, "Remediation of concrete using micro-organisms", *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, 98 (1), 3-9.
- Rebata-Landa V, Santamarina JC, "Mechanical limits to microbial activity in deep sediments", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7 (11).
- Rebata-Landa V, *Microbial activity in sediments: effects on soil behavior (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology)*, 2007.
- Sharma A, Ramkrishnan R, "Study on effect of microbial induced calcite precipitates on strength of fine grained soils", *Perspectives in Science*, 2016, 8, 198-202.
- Van der Star WRL, Van Wijngaarden WK, Van Paassen LA, Van Baalen LR, Zwieten G, "Stabilization of gravel deposits using microorganisms", In *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Athens, Greece, 5-9 October 2011. IOS Press.
- Van Paassen LA, Ghose R, Van Der Linden TJ, Van Der Star WR, Van Loosdrecht MC, "Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136 (12), 1721-1728.
- Van Paassen LA, Harkes MP, Van Zwieten GA, Van Der Zon WH, Van Der Star WRL, Van Loosdrecht MCM, "October. Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method", In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and*
- پارامتر چسبندگی نسبت به غلظت‌های (۰/۵)mol/L -۰/۲۵) اتفاق افتاد. همچنین تا بازه زمانی ۷ روزه تقریباً روند تغییرات پارامترهای مقاومتی ثابت ولی در بازه زمانی ۱۴ روزه کاهش مشاهده شد.
- ۴) با توجه به این که در کارهای عمرانی مسائل اقتصادی و باصرفه تمام شدن پروژه همواره از اهمیت خاصی برخوردار است، با توجه به تجربه نویسندگان و نتایج به دست آمده، غلظت ۰/۲۵mol/L از محلول سمانتاسیون در بازه زمانی ۷ روزه می‌تواند گزینه مناسب‌تری باشد. اگرچه برای بهره‌مندی هرچه بهتر از مزایای این نوع بهسازی می‌توان از غلظت ۰/۵mol/L نیز بهره جست.
- ۵) در بهسازی روند تغییرات مقاومت و پارامترهای مقاومت برشی در غلظت‌های مختلف، محلول سمانتاسیون و زمان‌های عمل‌آوری متفاوتی مشاهده شد که از بین این موارد، افزایش غلظت شبکه سمانتاسیون در ارتقای تأثیرگذاری فرآیند (MICP) محدود بود.

#### ۵- مراجع

- آبادی ک، شوش پاشا، شوش پاشا ع، "بررسی تأثیر افزودن ژل نانوسیلیس بر سختی و پارامترهای مقاومت برشی ماسه بابلرس با استفاده از آزمایش سه محوری"، کنفرانس بین-المللی پژوهش‌های نوین در علوم مهندسی، تهران، مؤسسه مدیریت دانش شبک، دانشگاه تهران، ۱۳۹۵.
- گل محمدی س، حاجی‌علیلو م، ابراهیمی س، محسن‌زاده آ، ملکی م، تأثیر دانه‌بندی ماسه بر روی مقاومت برشی نمونه‌های بهسازی شده به روش میکروبیولوژیکی، نهمین کنگره ملی مهندسی عمران مشهد، ۱۳۹۵.
- Al Qabany A, Soga K, Santamarina C, "Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138 (8), 992-1001.
- Al-Thawadi S, "High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria (Doctoral dissertation, Murdoch University)", 2008.
- Azadi M, Pouri S, "Estimation of Reconstructed Strength of Disturbed Biologically Cemented Sand under Unconfined Compression Tests", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41 (12), 4847-4854.
- Canakci H, Sidik W, Kilic IH, "Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil", *Soils and Foundations*, 2015, 55 (5), 1211-1221.
- Chou CW, Seagren EA, Aydilek AH, Lai M, "Biocalcification of sand through ureolysis", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137 (12), 1179-1189.

Geotechnical Engineering, 2009, (2328-2333). IOS Press, Lansdale, PA.

Whiffin VS, Van Paassen LA, Harkes MP, "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", Geomicrobiology Journal, 24 (5), 417-423.

## EXTENDED ABSTRACT

# Evaluation of Nano Silica Performance on Biological Stabilization of Two Types of Sandy Soils (Poorly Granulated and Silty)

Alireza Negahdar <sup>a,\*</sup>, Moein Khoshdel Sangdeh <sup>a</sup>, Akbar Ghavidel <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>b</sup> Faculty of Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

**Received:** 02 January 2020; **Accepted:** 28 September 2020

---

### Keywords:

Soil improvement, Microbial induced calcite precipitation, Shear strength, Bacteria, Sand.

---

## 1. Introduction

The increasing population of the world indicates the development of urban areas, and consequently the use of appropriate methods to improve sandy soils in these areas, led engineers to think of inventing methods to improve the properties of sandy soils. One of these efficient methods to modify the behavior of unsuitable soils in geotechnical engineering is to change the properties of problematic soils, which is called improvement. In this regard, sandy soil is improved by adding materials to improve mechanical properties (compressibility, hardness, shear strength, permeability, etc.). In this study, the undeniable role of nanoparticles in the improvement of sandy soil and the effect of nanosilica along with bacteria in the biological improvement of soil samples that have not been tested, was investigated (Dejong et al., 2010). Controlling the distribution at the site of bacterial and reactant activity and the results of calcium carbonate distribution and related engineering properties below the soil surface is a major challenge for future improvements, especially if bioremediation in a surface or deep soil system (To replace the method of deep soil improvement with artificial lime). In order to commercialize the bioremediation process, further optimizations in the performance of the biological deposition process (improving the effective use of bacteria, reactants and reducing heterogeneity) should be done (Sharma et al., 2016). Therefore, the aim of this study was to investigate the compatibility of nanosilica with bacteria in order to be able to use minerals to increase the strength of biologically improved soil properties.

## 2. Methodology

### 2.1. Selection and culture of bacteria

Preliminary studies were performed on the identification of urease-producing bacteria and the ability of bacteria to produce enzymes, and the bacterium *Sporosarcinina urea* (PTCC=1642) was selected as the reaction agent (Kilic and Canakci, 2015).

### 2.2. Select Nano Silica

Due to the fact that some nanoparticles, such as copper, silver, zinc, and titanium nanoparticles have strong antibacterial properties. In this study, we tried to use nanoparticles, which have a neutral reaction on bacterial function or very weak antibacterial properties, to improve the soil properly. After studying different nanoparticles, nanosilica was finally selected because of its ability to bond with a wide range of molecules and

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: negahdar@uma.ac.ir (Alireza Negahdar), moein.khoshdel@yahoo.com (Moein Khoshdel Sangdeh), ghavidel@outlook.com (Akbar Ghavidel) [www.SID.ir](http://www.SID.ir)



polymers and its effect on increasing the shear strength of sandy soils (Karimabadi and Shoush Pasha, 2016) and in proportion. The mixture (0.02% by weight of soil) was injected into the samples with bacteria. Properties of nano-silica used in this study, which was purchased from Iran Nano Silica Industries Manufacturing Company (ID: 10840449455).

### 2.3. Injection of cementation solution

In this study, to evaluate the strength, adhesion and internal friction angle of the soil and according to the limitations mentioned in ASTM D3080, molds with geometric characteristics similar to the direct shear test were used as a laboratory pilot (Canakci, 2014).

### 2.4. Electronic analysis (SEM)

To determine the type of sediment formed to describe its shapes, to determine the locations of deposited  $\text{CaCO}_3$  and to investigate the bonding behavior between the sand grains of the tested sand and the cementation factors, Scanning Electron Microscope analysis was performed on the improved samples. In addition, all microscopic specimens were dried at 60 °C for 24 hours before microscopic testing. Electron imaging was performed using an electron microscope (PHILIPS XL20 Eindhoven, Netherlands)

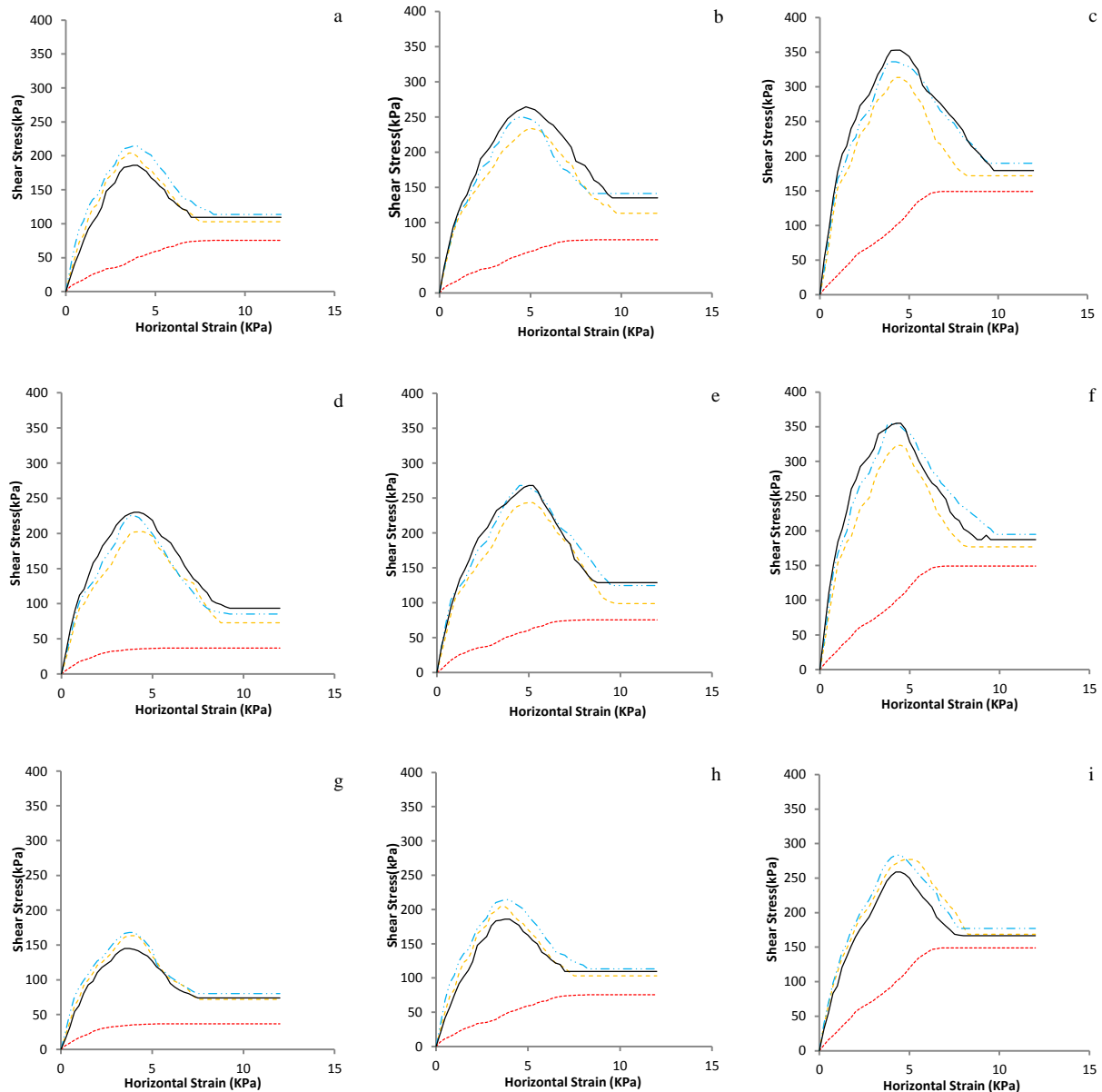
### 2.5. Direct cutting test

The molds were opened after processing and removed from the mold with the help of grease impregnated droplets. Due to the proportional dimensions of the samples with the cutting box of the machine without any interference and change in its appearance, they were immediately prepared for a direct cutting test. This test was performed according to the ASTM D3080 standard and by applying a constant shear strain at a speed of 1 mm/min at the vertical stress levels of kPa (60, 120 and 240) for soil-shaped cylindrical specimens (Vander Star et al., 2011). The authors are also aware that changing the cut-rate can be an effective parameter, but this research has not addressed this issue. To further investigate this issue, refer to the article on the effect of strain rate on stabilized soil in direct shear experiments (Dey, A, 2015).

## 3. Results and discussion

### 3.1. Investigation of changes in shear strength of loose sandy soil improved with different amounts of molar cementation solution

Shear stress versus shear strain changes for sand samples improved for mol/L cementation solutions (0.25, 0.5 and 0.75) at three different time intervals (3, 7 and 14 days) and under vertical stresses (60, 120 and 240 kPa). As shown in Figure 9, the change in the behavior of the samples improved with the 0.25 mol/L cementation solution was clearly visible, so that the improved specimens showed compacted soil-like behavior in all vertical stresses. Also, the maximum shear strain in the improved specimens was reduced, which indicates a reduction in the deformation of the improved sand compared to the non-improved sand due to its significant hardening. The shear strength of the improved samples also showed a more than 2-fold increase for the improved samples and the effect of processing time on the increase in strength was on average about 10%. Examining the results of the shear strength test, we found that the adhesion parameter in the improved specimens has increased significantly, so that with increasing processing time, its value increases to some extent. The amount of internal friction angle also increased by 10%. With these interpretations, it can be concluded that mainly the shear strength of improved sandy soils is mainly provided by the adhesion parameter and the internal friction angle has little effect on it. Fig. 1 shows the time-shear changes of improved specimens with different concentrations of cementation solution at different stresses. As can be seen, the trend of increasing shear strength of the improved specimens with mol/L cementation solution (0.25, 0.5 and 0.75) continued at 3 and 7 day intervals, but the maximum stress of the specimens of 7 specimens continued. And the 14-day period changed close to each other, due to the complete penetration of the bacteria during the 7-day processing time, and therefore the enzyme activity was significantly reduced over a 14-day period.



improved sample in 14 days: —; improved sample in 7 days: - - - - ; improved sample in 3 days: - - - - ; unimproved sample: - - - -

**Fig. 1.** Shear stress changes - Shear strain of loose sandy turquoise soil with mol / L solution (0.5, 0.5 and 0.75) cementation, under loads

kPa, 60M 0.25= a kPa, 120M 0.25= b kPa, 240M 0.25= c 0.5 kPa, 60M = d 0.5 kPa, 120M = e  
 i= 0.75 kPa, 240M h= 0.75 kPa, 120M g= 0.75 kPa, 60M, f=0.5 kPa, 240M

### 3.2. Investigation of shear strength changes of improved sand soil samples with different amounts of silt

In order to improve these samples, cement solution with a concentration of 0.5 mol/L (due to better performance than other concentrations) with 0.2% nanosilica and shear strength of soils at three vertical stresses (50, 100 and 200 kPa) was used and measured. Columbine mohair cover in improved samples was higher than in unmodified samples, which showed the positive effect of this improvement method in all three soil samples. According to Table (1), The main effect of biological improvement on the angle of internal friction and adhesion was observed in 15% silt sample after 14 days. This maximum effect is evident in 30% silt sample for the internal friction angle parameter after 28 days and for adhesion parameter in 14-day sample.

**Table 1.** Cohesion and internal friction angle for samples containing 15%, 30% and 45% silt in a direct shear test

Percentage of sample containing silt		Processing time (days)			
		0	7	14	28
15%	Cohesion (kPa)	23.92	24.85	33.5	18.74
	Internal friction angle (°C)	35.64	37.86	38.75	41.7
30%	Cohesion (kPa)	25.62	35.86	48.36	60.4
	Internal friction angle (°C)	35.86	40.88	43.19	38.35
45%	Cohesion (kPa)	27.77	31.05	37.99	33.87
	Internal friction angle (°C)	31.22	34.67	35.84	36.95

#### 4. Conclusions

In this study, nano-silica and calcium carbonate microbial deposition methods, which is a sustainable and environmentally friendly improvement method, were used to improve sandy soils. In this method, urea in the environment is hydrolyzed by the bacterium *Sporosarsina urea* and formed by a network of biochemical reactions of calcium carbonate deposition, which increases soil resistance. Factors studied in this study included the concentration of reactants, curing time, changes in silt percentage on sandy soil behavior and the possibility of bacterial compatibility with nanosilica. In this study, the results showed that the soil shear strength parameters were improved by the combined effect of bacteria and nanosilica, and in the presence of nanosilica, the shear strength of biologically improved sand increased up to 4.5 times. The adhesion rate in sandy soil increased from 0.1 to 186 kPa and the soil friction angle reached about 35.6 degrees, which compared to loose sand, the internal friction angle increased by about 12%. In silty sand samples, the maximum strength also increased. And for the soil sample with 30% silt, the maximum shear strength at 50 kPa stress was observed with an increase of up to 81%, also the maximum increase in shear strength at all stresses occurred for the sample containing 30% silt. In addition, the main effect on the internal friction angle in the 30% silt sample was obtained after the 14th day of curing.

#### 5. References

- Canakci H, Sidik W, Kilic IH, "Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil", *Soils and Foundations*, 2015, 55 (5), 1211-1221.
- DeJong JT, Mortensen BM, Martinez BC, Nelson DC, "Bio-mediated soil improvement", *Ecological Engineering*, 2010, 36 (2), 197-210.
- Mamo BG, Banoth KK, Dey A, "Effect of strain rate on shear strength parameter of sand", In *Proceedings of the 50th Indian Geotechnical Conference*, Pune, India, 2015.
- Sharma A, Ramkrishnan R, "Study on effect of microbial induced calcite precipitates on strength of fine grained soils", *Perspectives in Science*, 2016, 8, 198-202.
- Van der Star WRL, Van Wijngaarden WK, Van Paassen LA, Van Baalen LR, Zwieteren G, "Stabilization of gravel deposits using microorganisms", In *Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Athens, Greece, 5-9 October 2011. IOS Press.