

## تأثیر ریزشمع‌های زیستی در بهسازی خاک ماسه‌ای

محمد نوران‌بخش<sup>۱</sup>، کاظم برخوردار<sup>۲\*</sup>، سمیه قاسمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

<sup>۲</sup> دانشیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

<sup>۳</sup> دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۵، بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶

### چکیده

بهسازی زیستی خاک، روشی جدید، پایدار و تجدیدپذیر می‌باشد. این فرایند، عملکرد مناسبی در افزایش ظرفیت باربری و نفوذپذیری، کاهش نشست، افزایش سختی و کاهش نفوذپذیری خاک به دلیل پدیده انسداد زیستی ایجاد می‌کند. همچنین استفاده از ریزشمع‌ها در بهسازی خاک، بیش از نیم قرن مورد توجه بوده است. با توجه به تحقیقات متعدد در خصوص رفتار ریزشمع‌ها و نوپا بودن بهسازی زیستی و در راستای شیوه‌های پایدار و دوست‌دار محیط‌زیست، ایده استفاده هم‌زمان از ریزشمع‌های زیستی به وجود آمد. در این پژوهش، بهسازی خاک ماسه‌ای کم تراکم با استفاده از ریزشمع‌های زیستی، ریزشمع‌ها با تزریق دوغاب سیمانی و بدون تزریق تحت بارگذاری صفحه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان از افزایش ۹۷ درصدی ظرفیت باربری در خاک مسلح شده با یک ریزشمع زیستی نسبت به خاک غیرمسلح داشت. این میزان افزایش ظرفیت باربری در حالت تزریق سیمانی و بدون تزریق به ترتیب ۱۲۶ و ۵۵ درصد بود. در خصوص بررسی تأثیر تعداد ریزشمع زیستی در حالت یک، سه و پنج ریزشمع، افزایش ظرفیت باربری به ترتیب ۹۷ و ۱۵۱ و ۱۹۱ درصد نسبت به خاک غیرمسلح مشاهده شد. همچنین تأثیر افزایش طول ریزشمع از ۱۴ به ۲۰ سانتی‌متر ظرفیت باربری در حالات بدون تزریق، تزریق زیستی و سیمانی ریزشمع نسبت به حالت خاک غیرمسلح به ترتیب ۲۲ و ۳۳ و ۲۶/۵ درصد افزایش را نشان داد. از مقایسه متغیرها در حالات مختلف این حقیقت روشن شد که با توجه به نتایج، ریزشمع زیستی می‌تواند گزینه مناسبی در جایگزینی ریزشمع‌ها با دوغاب سیمانی باشد.

**کلیدواژه‌ها:** ریزشمع زیستی، ترسیب زیستی، روش تجدیدپذیر، بهسازی زیستی خاک.

### ۱- مقدمه

خاک به عنوان مواد مهندسی صلب و ساکن نگاه کنیم، در عمل خاک یک اکوسیستم زنده است، بنابراین می‌توان راه‌حل‌های نوآورانه و پایدار را برای حل مشکلات ژئوتکنیک ارائه داد (Dejong و همکاران، ۲۰۱۳).

در حقیقت، سیستم بهسازی زیستی، به واکنش‌های شبکه‌ای اطلاق می‌شود که محصولات فرعی تولیدشده در آن، ضمن این که خواص مهندسی خاک را تغییر می‌دهد، آن را کنترل می‌کند (Aggarwal و Hozalski، ۲۰۱۰). نمونه‌هایی از محصولات تولیدشده در فرایند بهسازی زیستی در قالب دو سر فصل عمده بهبود مشخصات مکانیکی خاک در اثر ترسیب زیستی و تشکیل

امروزه به دلیل رشد روزافزون ساخت‌وسازها، توجه به بهسازی و تثبیت ساختگاه‌های این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از یک طرف وجود سازه‌هایی نظیر برج‌های بلندمرتبه مسکونی-تجاری، آژادراه‌ها، باند و فرودگاه، شبکه حمل‌ونقل ریلی، تونل‌ها، سدها و از سوی دیگر کمبود زمین‌های مرغوب و هزینه بالای آن، محققان را بیش از پیش به سوی ابداع شیوه‌های نوین تثبیت می‌کنند (Ch و He، ۲۰۱۴). بهسازی زیستی خاک به عنوان شیوه‌ای نوین، کم‌هزینه و دوست‌دار محیط‌زیست مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. البته با وجود فراوانی بسیار زیاد میکروارگانیسم‌های غیر بیماری‌زا و دوست‌دار محیط‌زیست در خاک، اما در مهندسی ژئوتکنیک کلاسیک آن‌چنان که باید، مورد توجه زیادی قرار نگرفته‌اند. در این دیدگاه به جای این که به

\* نویسنده مسئول؛ رامتین معینی شماره تماس: ۰۹۱۳۳۵۹۵۳۶۳

از معایب ریزشمع‌ها، استفاده از سیمان و سایر مواد شیمیایی در دور هسته فولادی می‌باشد که اولاً به دلیل مصرف بالای انرژی در تولید آن‌ها باعث افزایش آلودگی محیط‌زیست می‌شوند و ثانیاً چون منابع و مواد اولیه تولید سیمان و مواد شیمیایی در جهان محدود و پایان‌پذیر می‌باشد، برخلاف منابع تجدیدپذیر زیستی یافتن شیوه‌های جایگزین تجدیدپذیر و دوست‌دار محیط‌زیست می‌تواند در حل این معضل راهگشا باشد.

در حقیقت استفاده از دوغاب زیستی به جای دوغاب شیمیایی و سیمانی مزایای فراوانی را برای ریزشمع زیستی ایجاد می‌کند. در نشریه FHWA ۲۰۰۵ در خصوص ویژگی‌های دوغاب‌ها چند پارامتر نظیر پایداری و ثبات، اندازه ذرات دوغاب و میزان گرانیوی آن اشاره شده است. دوغاب زیستی با گرانیوی در حد آب و ذراتی به ابعاد نانومتر، یکی از مناسب‌ترین حالت‌ها برای نفوذ بیشتر در خلل و فرج بوده و امکان ترسیب زیستی در منافذ را راحت‌تر ایجاد می‌کند (Hi, Lin, ۲۰۱۶).

همچنین به دلیل گرانیوی بسیار کم این محلول زیستی از تزریق ثقلی نیز می‌توان بهره برد که این خود باعث کاهش مصرف انرژی تزریق و نتیجتاً کاهش هزینه‌ها می‌شود. هدف این تحقیق، بررسی چگونگی نتایج آزمایش و رفتار ریزشمع‌های زیستی و همچنین بررسی امکان استفاده از آن‌ها به‌عنوان جایگزین مناسب برای ریزشمع‌های سیمانی و شیمیایی می‌باشد.

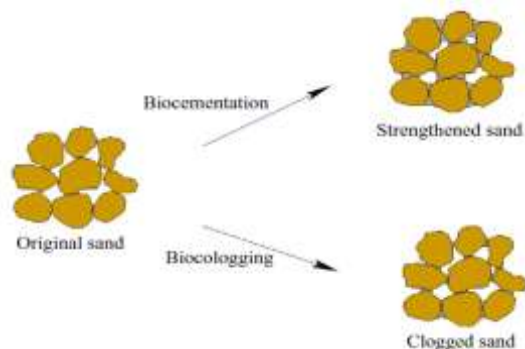
## ۲- مواد و مصالح مورد استفاده

### ۲-۱- خاک ماسه‌ای

خاک مورد استفاده در این آزمایش، از خاک ماسه‌ای کشف رود مشهد و مطابق شکل (۲) در تقسیم‌بندی سیستم متحد، خاک ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) و بر اساس سیستم آستو<sup>۳</sup> نوع خاک A-1-b می‌باشد. مطابق پژوهش‌های انجام‌شده، میزان ترسیب زیستی در ماسه بد دانه‌بندی شده تا ۵ برابر بیشتر از خاک خوب دانه‌بندی شده در شرایط مشابه است (Hitoshi و همکاران، ۲۰۱۹). این مطلب مؤید آن است که دانه‌بندی یکنواخت‌تر امکان ترسیب زیستی بهتر را میسر می‌سازد.

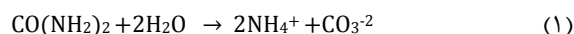
از آنجاکه قطر سلول‌های باکتری بین ۰/۵ تا ۳ میکرومتر است، دوغاب زیستی به‌راحتی در دانه‌بندی خاک مدنظر نفوذ می‌کند (Kavazanjian و همکاران، ۲۰۰۹). ماسه مورد آزمایش دارای ضریب نرمی ۳/۴۴، ارزش هم‌ارز ماسه ۰/۶۷ بوده و دارای تخلخل بیشینه و کمینه ۰/۹۶ و ۰/۳۷، دارای زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه و بدون چسبندگی تحت آزمایش برش مستقیم تند می‌باشد (شکل (۳)). در خاک‌های ماسه‌ای مطابق تحقیقات، تراکم حدود

لایه عایق بیوفیلم<sup>۱</sup> بر مبنای انسداد زیستی (شکل (۱)) تقسیم می‌شوند (Zhiming و Jie، ۲۰۱۹). تحقیقات اخیر نشان داده است که از این روش در حل مشکل روانگرایی در خاک‌های کم تراکم و اشباع ماسه‌ای در حالت بارگذاری لرزه‌ای استفاده می‌شود (Zamani و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۱- تثبیت بیولوژیکی خاک ماسه‌ای از طریق انسداد زیستی و ترسیب زیستی

یکی از روش‌های فرایند ترسیب زیستی، استفاده از آنزیم اوره آز برای تسریع تجزیه اوره می‌باشد. اوره آز آنزیمی است که بعضی از میکروارگانیسم‌ها آن را تولید کرده و اوره را به دی‌اکسید کربن، آب و آمونیاک هیدرولیز می‌کنند (Bo, Liu و همکاران، ۲۰۱۹). آمونیاک در محلول به کربنات آمونیوم تبدیل شده و باعث قلیایی شدن محیط و بالا رفتن pH می‌شود. با اضافه کردن یون کلسیم ( $Ca^{2+}$ )، کربنات کلسیم رسوب می‌کند (معادله (۱) و (۲)). در حقیقت دانه‌های خاک توسط این سیمان زیستی به هم می‌چسبند. این فرایند به‌عنوان ترسیب زیستی کربنات کلسیم ناشی از آنزیم (EICP)<sup>۲</sup> نامیده می‌شود (Hamdan و همکاران، ۲۰۱۴).



همچنین استفاده از ریزشمع‌ها در کاهش نشست خاک و افزایش ظرفیت باربری آن به‌خصوص در خاک‌های مسئله‌دار، مورد توجه بوده است (Valentino و Stevanoni، ۲۰۲۱). ریزشمع‌ها با نسبت طول به قطر بیش از ۱۰، برای رفع مشکل خاک و مسلح‌سازی آن، انتقال بار به‌عنوان فونداسیون عمیق به لایه‌های مناسب، کاهش خطر وقوع روانگرایی، ممانعت از ایجاد نشست‌های غیرهمگن، تثبیت شیروانی‌ها و ممانعت از لغزش خاک مورد استفاده بوده‌اند (Abdrahaman و همکاران، ۲۰۲۰).

آنزیم‌های اوره‌آز<sup>۵</sup> این باکتری، در تبدیل اوره به کربنات کلسیم بسیار فعال هستند. اگرچه در محیط‌های خارجی این فعالیت به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در ترسیب زیستی با استفاده از این باکتری به‌دلیل توزیع یکنواخت‌تر رسوب‌گذاری روی سلول‌های باکتری به‌صورت مناسبی انجام می‌شوند. این امر یعنی توزیع متوازن، موجب ترسیب کامل‌تر می‌شود (Chu و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در پژوهش‌های بهسازی زیستی، به‌دلیل توانایی مناسب اوره‌آزی، بیشترین سهم باکتری مطالعه شده و مورد استفاده از نوع "Sporosarcina pasteurii" می‌باشد.

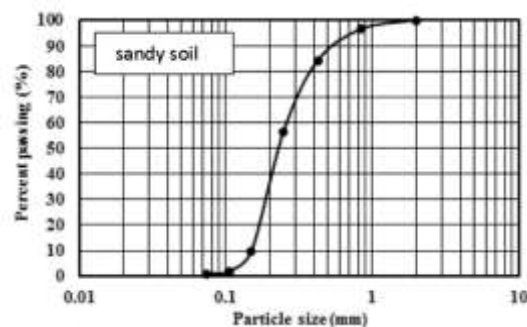
جهت فعال‌سازی سویه و تهیه دوغاب زیستی، می‌بایست ابتدا کشت باکتری صورت پذیرد. بدین منظور لازم است به‌میزان ۲۰ گرم اوره را در یک لیتر آب مقطر حل کرده و حدود ۸ گرم پودر عصاره مخمر به محیط کشت با ۱۰۰ میلی‌گرم کلرید کلسیم صنعتی به داخل ارلن<sup>۶</sup> ریخته شود. سپس محلول توسط دستگاه لرزاننده، به‌خوبی هم زده می‌شود. به‌منظور تهیه محیط کشت جامد، پس از تهیه محیط کشت مایع، آن را بر روی صفحه داغ قرار داده، سپس به میزان ۱۵ گرم آگار<sup>۷</sup> به محلول اضافه می‌شود. به این ترتیب محیط کشت جامد و مایع برای فعال‌سازی و کشت باکتری آماده می‌گردد. باکتری موجود در بانک ذخیره باکتریایی دانشکده منابع طبیعی یزد را به محلول افزوده می‌شود. مراحل افزودن باکتری باید در زیر هود لامینار انجام گیرد.

۰/۴ میلی‌لیتر باکتری از محیط کشت به محلول داخل ارلن که محیط مایع کشت است، اضافه شده و به‌دقت مخلوط می‌گردد. سوسپانسیون حاصل را به داخل محیط کشت منتقل کرده و در دستگاه انکوباتور<sup>۸</sup> لرزان با سرعت لرزش ۱۸۰ دور بر دقیقه و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت به‌منظور رشد باکتری عمل‌آوری می‌شوند. در شکل (۴) یکی از مراحل تهیه محلول زیستی و همچنین تست رنگ‌آمیزی گرام نمایش داده شده است.

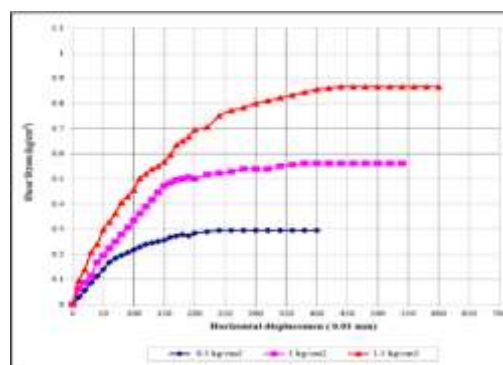


شکل ۴- تهیه محلول زیستی و تست رنگ‌آمیزی در آزمایشگاه

۵۰ تا ۶۰ درصد میزان ترسیب زیستی بیشتری را فراهم می‌آورد (Ng و همکاران، ۲۰۱۲). خاک مورد آزمایش، با رطوبت ۱۰ درصد و تراکم ۵۵ درصد با  $(N_1)_{60}=11$  با تسلیح خاک با ریزش مع مورد تست قرار گرفت.



شکل ۲- نمودار منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای



شکل ۳- نمودار تنش- کرنش خاک تحت بارگذاری جعبه برش مستقیم تند

## ۲-۲- میکروارگانیزم‌ها و کشت و تکثیر آن‌ها

چنانچه گفته شد، در ترسیب زیستی، انتخاب نوع باکتری بر مبنای توانایی آنزیم اوره‌آز آن در هیدرولیز اوره می‌باشد. محققان متعددی از انواع مختلف باکتری دارای آنزیم اوره‌آز در پژوهش‌هایشان استفاده کرده‌اند، که بیشترین سهم تحقیقات در خانواده باسیلیوس‌ها بوده است (Ng و همکاران، ۲۰۱۲). در این پژوهش از باکتری اسپروسارسینا<sup>۴</sup> پاستوری استفاده شده است. این باکتری میله‌ای و گرم مثبت هوازی است که از خاک‌های مختلف و فاضلاب قابل‌جداسازی است. بر اساس ترکیبات موجود در محیط کشت متفاوت، کلنی‌هایی با اشکال عمدتاً کروی شکل و مات ایجاد می‌کند. معمولاً با تکثیر و رشد در محیط مایع به‌صورت ذرات چسبنده و کدر رنگ است (Hamda و همکاران، ۲۰۱۴).

7. Agar  
8. Enkubator

4. Sporosarcina Pasteurii  
5. Urease  
6. Erlen

### ۳-۲- اندازه گیری دانسیته اپتیکی

برای تعیین غلظت باکتری، از روش دانسیته نوری و با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر<sup>۹</sup> انجام می پذیرد. میزان غلظت باکتری در این روش به صورت عددی بدون بعد که دانسیته نوری OD بیان می گردد. به وسیله این دستگاه، می توان مقدار سلولها در یک سی-سی از محلول بیولوژیکی را تعیین کرد. بدین منظور، ابتدا ظرف کوچکی حاوی محیط کشت در دستگاه قرار داده می شود و دستگاه عدد صفر را به محیط کشت شفاف نسبت می دهد. پس از آن ظرف دیگری حاوی محلول بیولوژیکی در دستگاه قرار می گیرد. عددی که اسپکتروفوتومتر نشان می دهد OD محلول است و بیانگر غلظت محلول بیولوژیکی در مقایسه با محیط کشت است.

در این پژوهش نیز، به ترتیب از محتویات هر لوله آزمایش در سل های دستگاه اسپکتروفوتومتر ریخته می شود و اندازه گیری میزان عبور نور و تعیین طول موج مشخص، عددی به عنوان OD در قسمت abs دستگاه نشان می دهد. در این پژوهش طول موج ۶۵۰ نانومتر در نظر گرفته شد و میزان دانسیته اپتیکی محلول زیستی بین ۰/۸ تا ۱/۰ بود.

### ۴-۲- محلول سیمانی کننده

برای تکمیل شدن و انجام واکنش رسوب زیستی کلسیت<sup>۱۰</sup> به واکنش دهنده های کلرید کلسیم و اوره نیاز است. این محلول به عنوان محلول سیمانی کننده شناخته می شود. محلول سیمانی کننده شامل اوره دو درصد و کلسیم کلرید یک مولار می باشد که برای تهیه آن در هر لیتر آب مقطر ۲۰ گرم اوره و ۵۰ گرم کلرید کلسیم اضافه می کنیم (Maleki و همکاران، ۲۰۱۵).

### ۵-۲- دوغاب سیمانی

برای تهیه دوغاب سیمانی تزریقی در ریزشمع، مطابق دستورالعمل و توصیه ۲۰۰۵ FHWA در دسته بندی اجرایی ریزشمعها با تزریق ثقلی، مشخصات ساخت دوغاب با نسبت آب به سیمان در محدوده ۰/۴ تا ۰/۵ استفاده می گردد. در این تحقیق نیز دوغاب مورد نظر، با افزودن ۲۰ درصد وزنی میکروسیلیس، افزودن ۱ درصد وزنی فوق روان کننده و انتخاب نسبت آب به سیمان ۰/۴ تهیه گردید. کند روانی دوغاب به دلیل استفاده از فوق روان کننده به شدت کاهش یافته و کارایی دوغاب بالا شده و تزریق ثقلی دوغاب به راحتی انجام پذیرفت.

### ۶-۲- انتخاب مخزن و ست بارگذاری

مخزن انتخابی از جنس فولاد بود که به شکل استوانه به قطر ۶۰ و عمق ۵۵ سانتی متر بود. جداره مخزن صلب و برای از بین رفتن اثر مرزی تکیه گاه، سطح جداره صاف انتخاب شد که با رنگ روغنی پوشانده شده بود. با این کار، امکان نشست خاک را در محل جداره فراهم شد. طول صفحه بارگذاری با توجه به توصیه نشریه ۲۳۱ وزارت نیرو به گونه ای انتخاب شد که از ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه خاک بزرگتر باشد. بنابراین صفحه صلب فولادی بارگذاری، به ابعاد ۲×۸×۸ سانتی متر مکعب انتخاب شد.

علت انتخاب ابعاد مخزن در راستای کنترل حساسیت ابعادی و امکان چشم پوشی از اثرات مرزی بود. مطابق توصیه نشریه ۲۳۱، فاصله لبه صفحه بارگذاری تا جداره، سه برابر قطر صفحه انتخاب باشد. عمق مخزن نیز مطابق روابط بوزینسک<sup>۱۱</sup> در توزیع پیازچه-های تنش، در عمق پنج برابر قطر صفحه انتخاب شد تا میزان تنش به ۰/۵ تنش زیر صفحه بارگذاری برسد. در شکل (۵) سیستم بارگذاری صفحه، گنج های تغییر مکان و رینگ نیروسنج مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۵- مجموعه ست بارگذاری صفحه، رینگ نیروسنج و گنج تغییر مکان سنج

### ۳- بررسی پارامترهای متغیر

جهت مشخص شدن تأثیر پارامترهایی نظیر قطر، طول، تعداد و نوع تزریق در نتایج، آزمایش هایی را با لحاظ کردن متغیرهای فوق انجام دادیم. با توجه به ماهیت جدار نازک بودن ریزشمع از دو قطر جداره خارجی ۸ و ۱۰ میلی متر با ضخامت جداره ۱ میلی-متر جهت کنترل تأثیر قطر استفاده شد. همچنین جهت بررسی تأثیر کمیت طول از دو طول ۱۴ و ۲۰ سانتی متری استفاده گردید. چیدمان ریزشمعها، یک ریزشمع در مرکز، سه ریزشمع به صورت مثلثی، پنج ریزشمع با قرارگیری یک ریزشمع در مرکز و چهار ریزشمع در کنجها استفاده گردید. در نهایت برای بررسی تأثیر

11. Boussinesq

9. Spektrophotometr  
10. Calsit



شکل ۶- ریزشمع‌های جدار نازک با سوراخ‌هایی در جداره برای نفوذ راحت‌تر دوغاب تزریقی به پیرامون ریزشمع

تزریق دوغاب سیمان فوق روان‌شده، در یک مرحله درون ریزشمع انجام شد. میزان نفوذ در دوغاب سیمانی، به‌طور متوسط ۱۵ میلی‌متر و در دوغاب زیستی به‌دلیل کندروانی کمتر و حرکت سیال محلول زیستی حدود ۲۴ میلی‌متر مشاهده شد. در شکل (۷) نمونه تزریق‌شده ریزشمع زیستی، نمایش داده شده است. همچنین نحوه چیدمان ریزشمع به‌طور شماتیک و آزمایشگاهی در شکل‌های (۸) و (۹) به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۷- نمونه ریزشمع زیستی

پارامترهای نوع دوغاب تزریقی سه حالت بدون تزریق، ریزشمع زیستی و ریزشمع سیمانی مورد آزمایش قرار گرفت.

همچنین از عوامل تأثیرگذار در ترسیب زیستی، شاخصه‌های شیمیایی خاک نظیر وجود املاح، مواد معدنی و میزان pH خاک است. میکروارگانیسم‌ها، مانند سایر جانداران برای رشد، تکثیر و ادامه حیات، به شرایط مناسب محیطی مانند pH نیاز دارند. بنابراین در طول ترسیب زیستی هرچه pH نهایی خاک بهسازی زیستی شده در محدوده خنثی (pH بین ۶ تا ۸) قرار گیرد، ترسیب زیستی مناسب‌تر خواهد بود (Wen و همکاران، ۲۰۱۹). محققانی که تأثیر pH اولیه را با تجزیه کرنات رسوبی موردتحقیق قرار دادند، دریافتند که میزان pH ۷/۵ تا ۸/۵ بهترین امکان ترسیب زیستی را فراهم می‌کند (Randel و Henz، ۲۰۱۸). در این تحقیق میزان اولیه pH خاک ۷/۵ اندازه‌گیری شد که در طول انجام آزمایش مقدار نهایی pH به ۹/۰۶ رسید.

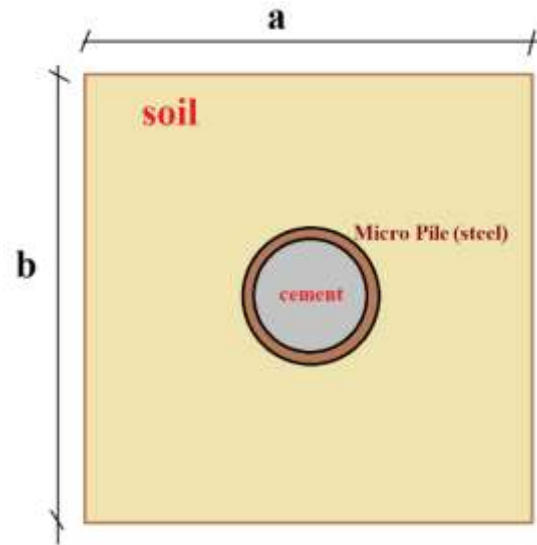
#### ۴- مراحل مسلح‌سازی و تزریق در نمونه‌ها

در راستای هدف تحقیق، یعنی مسلح‌سازی خاک از عمق ۳ سانتی‌متری زیر سطح جایگذاری گردیدند. جهت تأثیر بیشتر نفوذ دوغاب، در اطراف ریزشمع، به فواصل ۴ سانتی‌متر مرکز به مرکز و در دو جهت عمود بر هم سوراخ‌هایی به قطر ۳ میلی‌متر در جداره به‌صورت زیگزآگ، مطابق شکل (۶) ایجاد گردید.

جهت بارگذاری در این آزمایش از یک ست بارگذاری با جک ۵ تن و رینگ نیروسنج مورد استفاده در دستگاه CBR و یک گیج نشست‌سنج با گام یک صدم میلی‌متر و با کورس<sup>۱۲</sup> تا ۵۰ میلی‌متر استفاده گردید، که از یک سو به یک تکیه‌گاه صلب متصل و از سوی دیگر بار جک با سرعت ثابت یک دهم اینچ بر دقیقه بر روی صفحه بارگذاری وارد می‌شود. بعد از جایگذاری ریزشمع، بسته به نوع دوغاب تهیه شده، تزریق ثقلی با سرعت کم و نرخ ثابت ۵ لیتر بر ساعت درون ریزشمع‌های انجام می‌شود. در کف مخزن با تعبیه سطح شیب‌دار و شیر زهکشی، امکان تزریق و زهکشی در مراحل چندگانه ایجاد شده است.



شکل ۹- چیدمان ریزشمع‌ها



شکل ۸- شماتیک جایگذاری و تزریق ریزشمع

در خصوص محلول زیستی مطابق شکل (۱۰) تزریق در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول با بستن شیر زهکشی محلول زیستی درون ریزشمع با نرخ ثابت ۵ لیتر در ساعت، به‌میزانی که درون ریزشمع کامل از این محلول پر شود تزریق گردیده و پس از ۴ ساعت که زهکشی محلول زیستی انجام شد، محلول سیمانی کننده تزریق و به مدت ۱۲ ساعت اجازه ترسیب زیستی داده می‌شود و سپس زهکشی صورت می‌پذیرد. این فرایند دو مرتبه تکرار می‌شود تا ترسیب زیستی صورت پذیرد. در تزریق مرتبه دوم به دلیل ایجاد انسداد زیستی تزریق اول، حجم محلول زیستی و سیمانی کننده ۳۵ درصد کاهش یافت. آزمایش‌ها ۱۲ ساعت بعد از زهکشی تزریق دوم انجام پذیرفت. در خصوص اثر تعداد دفعات تزریق، نتایج حاصل از دو مرحله تزریق زیستی ۷۰ درصد نتایج حاصل از هفت مرحله تزریق زیستی می‌باشد (Chung و همکاران، ۲۰۱۳).

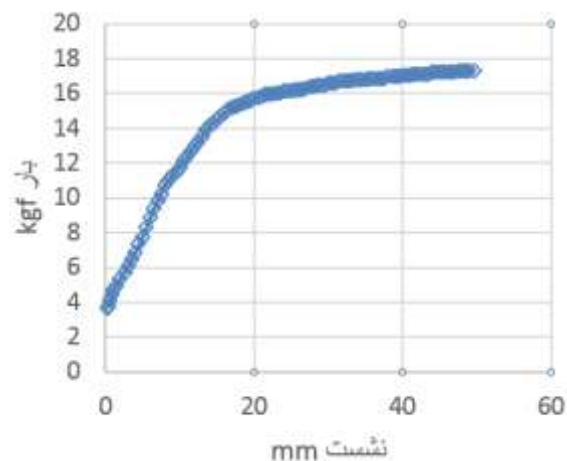


شکل ۱۰- مراحل تزریق ریزشمع زیستی

## ۵- نتایج آزمایش و بحث

## ۵-۱- نتایج بارگذاری خاک غیر مسلح

نتایج بارگذاری خاک غیرمسلح در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. نمودار ذیل نشان‌دهنده خاک ماسه‌ای با تراکم نسبتاً کم می‌باشد که نیرویی معادل ۱۷/۳ کیلوگرم را در نشست معادل ۵۰ میلی‌متر تجربه می‌کند. با توجه به ابعاد صفحه بارگذاری، تنش معادل این نشست حدود ۰/۲۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد. این اعداد با روابط تجربی نظیر رابطه تعیین ظرفیت نهایی باربری خاک، به روش ترقاقی تطابقت خوبی دارد. این مقدار از روابط تجربی ترقاقی تنشی در حدود ۰/۲۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را نشان می‌دهد.

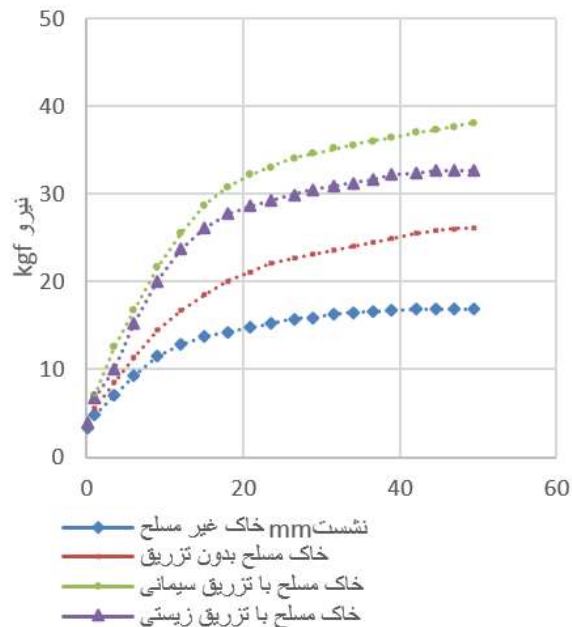


شکل ۱۱- منحنی نیرو- نشست خاک غیرمسلح

## ۵-۲- مقایسه تأثیر مسلح‌سازی خاک و نوع تزریق

جهت بررسی تأثیر نوع تزریق در خاک مسلح، از مقایسه نتایج جایگذاری یک ریزشمع با قطر ۸ میلی‌متر و طول ۲۰ سانتی‌متر استفاده می‌کنیم. نتایج نشان می‌دهد، مسلح‌سازی خاک با یک ریزشمع بدون تزریق، حدود ۵۵ درصد ظرفیت باربری خاک را افزایش می‌دهد. جهت بررسی اثر نوع دوغاب تزریقی در ریزشمع، از حالت تزریق دوغاب سیمانی و زیستی استفاده شد. نتایج آزمایش بارگذاری صفحه نشان داد که نسبت افزایش ظرفیت باربری خاک مسلح با ریزشمع سیمانی به خاک غیرمسلح ۱۲۶ درصد بود و این به معنای تأثیر ۴۶ درصدی تزریق دوغاب سیمانی نسبت به حالت ریزشمع بدون تزریق است. همچنین از مقایسه نتایج آزمایش‌ها، چنین معلوم شد که تزریق زیستی تأثیر چشمگیری در افزایش ظرفیت باربری خاک ایجاد کرد. خاک مسلح با یک ریزشمع زیستی نسبت به خاک غیرمسلح، ظرفیت باربری خاک را ۹۶ درصد افزایش داد. در مقایسه اثر ریزشمع زیستی نسبت به خاک مسلح با ریزشمع بدون تزریق، نتایج حاکی

از افزایش ۲۵ درصدی ظرفیت باربری دارد (شکل (۱۲)). همچنین در شکل (۱۳) بارگذاری و گسیختگی خاک در یکی از آزمایش‌ها نشان‌دهنده شده است.



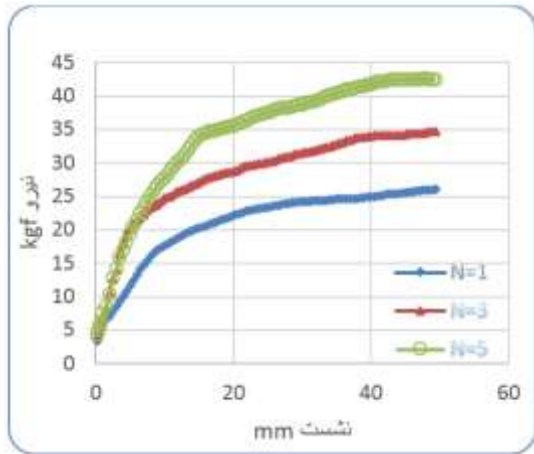
شکل ۱۲- منحنی‌های مقایسه‌ای اثر مسلح‌سازی و نوع دوغاب تزریقی در بهبود ظرفیت باربری خاک در حالت  $L=20$ ,  $N=1$  و  $D=1.0$



شکل ۱۳- گسیختگی در خاک مسلح شده در آزمایش تزریق زیستی  $N=3$ ,  $L=20$  و  $D=0.8$

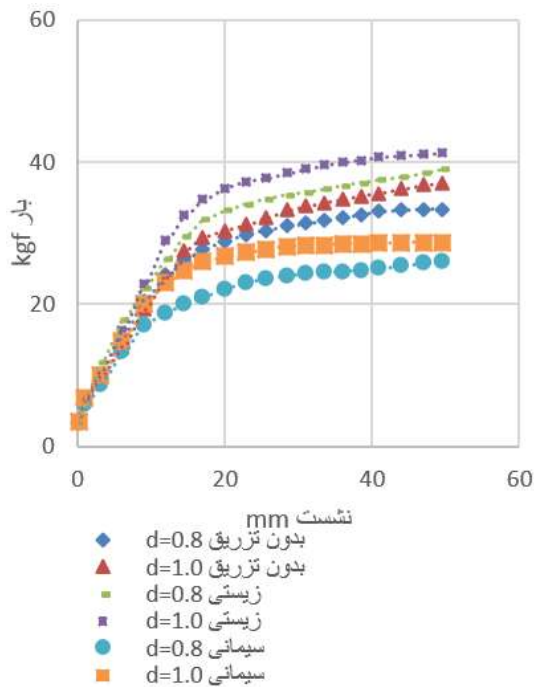
## ۵-۳- مقایسه تأثیر تعداد ریزشمع و نوع تزریق

جهت بررسی اثر تعداد ریزشمع‌ها در حالات مختلف مسلح-سازی با ریزشمع‌های تزریق سیمانی، زیستی و بدون تزریق، چینش‌های یک، سه و پنج ریزشمع مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد، مطابق انتظار، با افزایش تعداد ریزشمع، ظرفیت باربری نیز افزایش یافت. به طوری که تأثیر تزریق زیستی نسبت به حالت



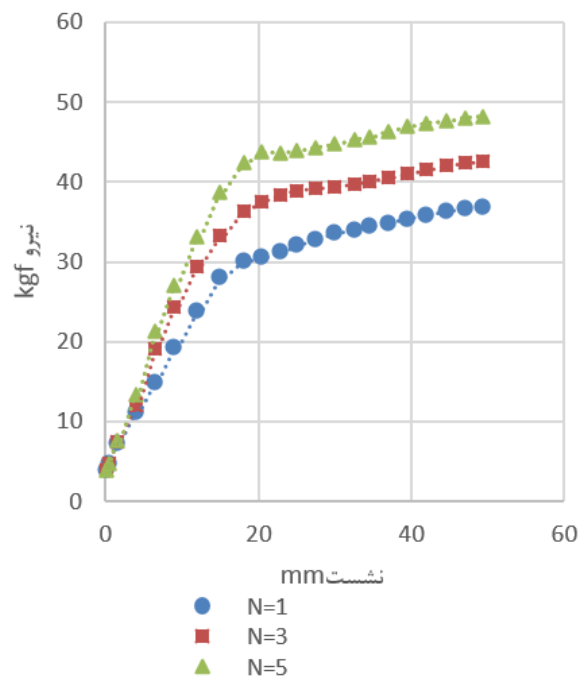
شکل ۱۶- تأثیر تعداد ریزشمع در ظرفیت باربری خاک در حالت بدون تزریق  $L=20$  و  $D=0.8$

۴-۵- مقایسه تأثیر قطر ریزشمع و نوع تزریق جهت بررسی اثر قطر ریزشمع‌ها با جایگذاری یک ریزشمع با طول ۲۰ سانتی‌متر، اثر افزایش ۲ میلی‌متری قطر جدار خارجی که از ۸ به ۱۰ میلی‌متر می‌باشد را بررسی کردیم. در حالات تزریق زیستی، سیمانی و بدون تزریق این افزایش ظرفیت باربری به ترتیب حدود ۱۰، ۸ و ۶ درصد می‌باشد. این میزان افزایش نشان‌دهنده تأثیر کمتر افزایش قطر ریزشمع در بهسازی خاک ماسه‌ای نسبت به افزایش طول می‌باشد (شکل (۱۷)).

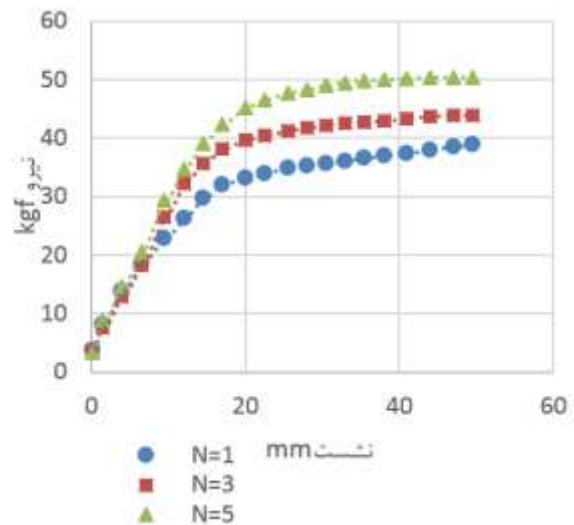


شکل ۱۷- تأثیر قطر ریزشمع در ظرفیت باربری خاک در حالت تزریق زیستی و سیمانی و بدون تزریق  $N=1$  و  $L=20$

بدون تزریق در حالت یک و سه و پنج ریزشمع، به ترتیب ۹۶، ۱۵۱ و ۱۹۱ درصد است. علت این روند کاهشی، تداخل منحنی‌های هم‌ارز و حباب‌های تنشی است که راندمان ظرفیت باربری گروه ریزشمع را کاهش می‌دهد. این روند در ظرفیت باربری خاک مسلح با تزریق دوغاب سیمانی نیز ملاحظه شد. به طوری که در حالت یک، سه و پنج ریزشمع این افزایش به ترتیب ۱۳۱، ۱۶۰ و ۲۰۱ درصد است. شکل‌های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) به ترتیب تأثیر تعداد ریزشمع‌های زیستی را در حالات مختلف تزریق نشان می‌دهد.

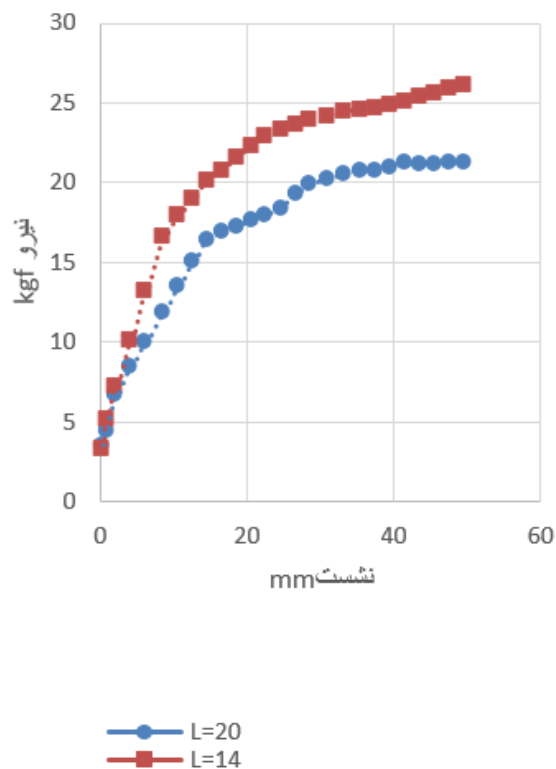


شکل ۱۴- تأثیر تعداد ریزشمع زیستی در ظرفیت باربری خاک  $L=20$  و  $D=0.8$



شکل ۱۵- تأثیر تعداد ریزشمع سیمانی در ظرفیت باربری خاک  $L=20$  و  $D=0.8$





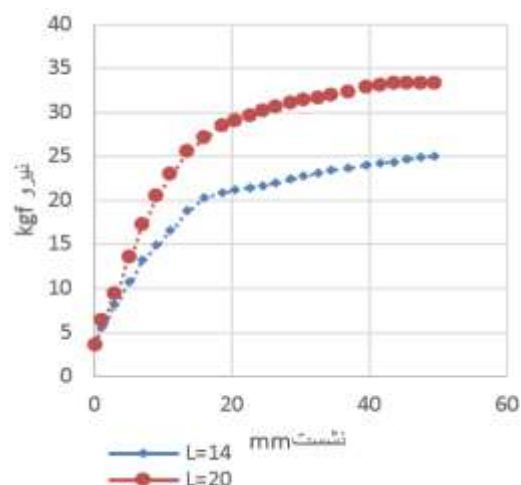
شکل ۲۰- تأثیر طول ریزشمع بدون تزریق در ظرفیت باربری خاک در حالت بدون تزریق  $D=0.8$  و  $N=1$

#### ۶- جمع‌بندی نتایج

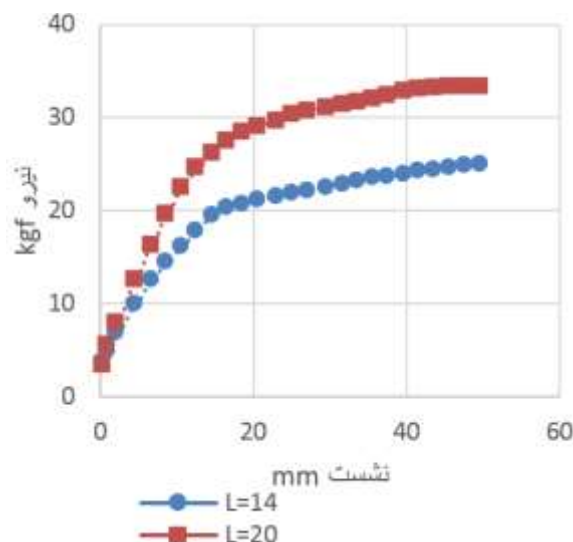
از بررسی نتایج آزمایش‌های انجام‌یافته، چنین برمی‌آید که به‌کارگیری ریزشمع‌های زیستی به‌دلیل استفاده از منابع تجدید پذیر و دوست‌دار محیط‌زیست، می‌تواند جایگزین مناسبی به‌جای ریزشمع با تزریق سیمانی باشد. محلول زیستی با ویسکوزیته‌ای<sup>۱۳</sup> مشابه آب و قابلیت نفوذپذیری بسیار بالا، امکان ترسیب زیستی را فراهم می‌آورد. افزایش ظرفیت باربری در نتیجه تزریق محلول زیستی، سیمانی‌کننده و ایجاد فرصت ترسیب زیستی در خاک درون و اطراف ریزشمع‌ها با نفوذ در آن و نهایتاً تغییر ساختار مکانیکی خاک صورت می‌پذیرد. این فرایند نتیجه نفوذ دوغاب زیستی بوده که با افزایش آنزیم‌های اوره‌آز، منجر به تشکیل زنجیره واکنش‌های بیوشیمیایی شده و نهایتاً باعث ایجاد ترسیب زیستی می‌گردد.

در حقیقت، همان‌گونه که دوغاب سیمانی با نفوذ در ماسه‌های درون و تا حدودی بیرون ریزشمع و انجام عمل هیدراتاسیون<sup>۱۴</sup> باعث ایجاد چسبندگی بین ذرات ماسه می‌گردد، ترسیب زیستی نیز به‌مشابه یک سیمان زیستی مؤثر عمل می‌کند که با واکنش شیمیایی و هیدرولیز شدن اوره موجود در محلول سیمانی‌کننده توسط آنزیم‌های اوره‌آز می‌گردد. در نتیجه این واکنش آنزیمی، pH محیط افزایش می‌یابد و یون‌های کربنات و بی‌کربنات

یکی از پارامترهای دیگر تأثیرگذار در مسلح‌سازی خاک، طول ریزشمع می‌باشد. در آزمایش‌هایی که در جایگذاری تک ریزشمع با تزریق‌های سیمانی، زیستی و بدون تزریق در دو طول ۱۴ و ۲۰ سانتی‌متر انجام شد، نتایج حاکی از آن بود که افزایش ظرفیت باربری در تک ریزشمع ۲۰ سانتی‌متری، نسبت به ۱۴ سانتی‌متری در حالت‌های تزریق زیستی، سیمانی و بدون تزریق، به‌ترتیب ۲۳، ۲۶/۵ و ۲۲ درصد بوده است. شکل‌های (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) نشانگر این تغییرات می‌باشد.



شکل ۱۸- تأثیر طول ریزشمع زیستی در ظرفیت باربری خاک در حالت تزریق زیستی  $D=0.8$  و  $N=1$



شکل ۱۹- تأثیر طول ریزشمع سیمانی در ظرفیت باربری خاک در حالت تزریق سیمانی  $D=0.8$  و  $N=1$

دیدگاه کلاسیک ژئوتکنیک به‌عنوان یک محیط زنده و فعال با قابلیت ترمیم در دراز مدت، بهسازی و دارای منابع تجدیدپذیر معرفی می‌کند.

#### ۷- مراجع

- Aggarwal S, Hozalski RM, "Determination of biofilm mechanical properties from tensile tests performed using a micro-cantilever method", *Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 2010, 26 (4), 479-486.
- Abdraham M, El Naggar MH, "Axial performance of micropile groups in cohesionless soil from full-scale tests", *Canadian Geotechnic Journal* 00: 2020, 1-19. (0000) dx.doi.org /10.1139/cgj-2018-0695
- Bo Liu, Cheng Zhu, Chao-Sheng Tang, Yue-Han Xie, Li-Yang Yin, Qing Cheng, Bin Sh, "Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP)", *Engineering Geology*, 2019 Published by Elsevier.
- Cheng L, Cord-Ruwisch R, "Upscaling effects of soil improvement by microbially induced calcite precipitation by surface percolation", *Geomicrobiology Journal*, 2013b, 31 (5).
- Chou C, Seagren EA, Aydilek AH, Lai M, "Biocalcification of sand through ureolysis", *Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering*, 2011, 137 (12), 1179-1189.
- Dejong JT, Soga K, Kavazanjian E, Burnes S, Van Paassen LA, Al Qabany A, Aydilek A, Bang SS, Burbank M, Caslake LF, Chen CY, Cheng X, Chu J, Ciurli S, Esnault-Filet A, Fauriel S, Hamdan N, Hata T, Inagaki Y, Jefferis S, Kuo M, Laloui L, Larrahondo J, Manning DAC, Martinez B, Montoya BM, Nelson DC, Palomino A, Renforth P, Santamarina JC, Seagren EA, Tanyu B, Tsesarsky M, Weaver T, "Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges", *Géotechnique*, 2013, 63 (4), 287-301.
- Hai L, Suleiman T, Pamukcu S, "Microbial Modification of Soil for Ground Improvement", *Theses and Dissertations*, 2687, 2016. <http://preserve.lehigh.edu/etd/2687>. Lehigh University.
- Hamdan NM, "Applications of enzyme induced carbonate precipitation (EICP) for soil improvement", *PHD Thesis*, Arizona State University, 2014.
- Henze J, Randall D, "Microbial induced calcium carbonate precipitation at elevated pH values (>11) using *Sporosarcina pasteurii*", 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.046>.
- Hitoshi M, Tomonori Y, "Mathematical modelling and simulation of microbial carbonate precipitation: the urea hydrolysis reaction", *Electronic supplementary material the online version of this article* (<https://doi.org/10.1007/s11440-019-00896-6>).
- Jie P, Zhiming L, "Influence of temperature on microbially induced calcium carbonate precipitation for soil treatment", 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218396> June 18, 2019

تشکیل‌شده با یون‌های کلسیم موجود در محیط، به‌شکل کریستال‌های کلسیت رسوب می‌کند. هنگامی‌که این کریستال‌ها تشکیل می‌شود به‌صورت پوشش یا پل در بین دانه‌های ماسه قرار می‌گیرد و باعث اتصال ذرات به یکدیگر می‌شود و در نتیجه این فرایند موجب افزایش و بهبود مشخصات مکانیکی ماسه درون و پوشش بیرونی ریزشمع می‌شود. خروجی این فرایند را می‌شود در نتایج ذیل عنوان کرد:

- ۱) استفاده از ریزشمع زیستی با توجه به منابع تجدیدپذیر و دوست‌دار محیط‌زیست، بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در ظرفیت باربری خاک ماسه کم تراکم ایجاد می‌کند. نتایج نشان می‌دهد، افزایش ظرفیت باربری خاک مسلح با ریزشمع بدون تزریق ۵۵ درصد می‌باشد که با تزریق زیستی این میزان به ۹۴ درصد افزایش می‌یابد.
  - ۲) با وجود نتایج بهتر افزایش ظرفیت باربری خاک در استفاده از ریزشمع‌ها با تزریق دوغاب سیمانی، اولاً به‌دلیل محدودیت منابع معدنی تولید سیمان پرتلند و ثانیاً افزایش آلودگی زیست‌محیطی به‌دلیل انرژی‌بر بودن تهیه سیمان و نهایتاً به‌دلیل شکننده بودن دوغاب و امکان ایجاد ترک در پوشش دوغاب سیمانی اطراف ریزشمع در اثر اعمال بار و ایجاد تنش‌های برشی که جز نقاط ضعف قابل‌اعتنا در این نوع تزریق است، در تزریق زیستی به‌دلیل وجود میکروارگانسیم‌ها در خاک و بقا اوره در اطراف ریزشمع، در صورت ایجاد ترک در پوشش دوغاب زیستی امکان ادامه ترسیب زیستی و خود ترمیمی ترک در ریزشمع زیستی کم‌اکن موجود است.
  - ۳) در خصوص تأثیر گروه ریزشمع، رفتار ریزشمع‌های زیستی مشابهت زیادی به رفتار ریزشمع‌های با تزریق دوغاب سیمانی داشته و تداخل پیازچه‌های تنش در انتهای هر دو نوع ریزشمع باعث کاهش راندمان با افزایش تعداد ریزشمع در یک محدوده معین می‌گردد.
  - ۴) با توجه به نتایج آزمایش، افزایش طول ریزشمع زیستی تأثیر بیشتری نسبت به افزایش قطر ریزشمع در بهبود مشخصات مکانیکی خاک مورد آزمایش دارد. به‌طوری‌که با افزایش ۲۵ درصدی قطر، افزایش ظرفیت باربری خاک مسلح در حالت زیستی و سیمانی تنها ۱۰ و ۸ درصد می‌باشد این در حالی است که با افزایش ۴۲ درصدی طول، ظرفیت باربری خاک مسلح در حالت زیستی و سیمانی ۳۳ و ۲۶/۵ درصد افزایش می‌یابد.
- خلاصه نتایج این آزمایش‌ها نشانگر مناسب بودن استفاده از ریزشمع‌های زیستی به‌عنوان یک روش نوآورانه، پایدار، تجدیدپذیر و دوست‌دار محیط‌زیست می‌تواند جایگزین مناسبی برای سایر ریزشمع‌های سیمانی باشد. دیدگاه نوینی که خاک را برخلاف

- Kavazanjian E, Jr Iglesias E, Karatas I, "Biopolymer soil stabilization for wind erosion control", Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics, Geotechnical and Engineering, Alexandria, Egypt, 2009, 881-884.
- He J, Chu J, "Undrained responses of microbially desaturated sand under monotonic loading", Journal of Geotechnic and Geoenvironment Engineering, 2014, 140 (5), 04014003.
- Maleki M, Ebrahimi S, Asadzade F, Emami Tabrizi M, "Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil", International Journal of Environmental Science Technology, 2016, 13, 937-944.
- Ng WS, Lee ML, Hii SL, "An overview of the factors affecting microbial-induced calcite precipitation and its potential application in soil improvement", World Acadademy Science, Engineering and Technology, 2012, 62, 723-729.
- Stevanoni D, Valentino R, "Practical design of nongrouted micropile foundations based on monte carlo analysis", 2021. DOI: 10.1061/ (ASCE) SC. 1943-5576.0000548. © 2020 American Society of Civil Engineers.
- Wen K, Li Y, Liu S, Bu C, Lin L, "Evaluation of MICP Treatment through Electric Conductivity and pH Test in Urea Hydrolysis Process", Journal of Geotechnic, Geoenvironment and Engineering. 2019, 136, 1721-1728.
- Zamani A, Montoya B, Gab M, "Investigating the challenges of in situ delivery of MICP in fine grain sands and silty sand", Canadian Geotechnical Journal, 2019, 162 (1), 260-271.

## EXTENDED ABSTRACT

# The Effect of Bio-Micro Piles on the Improvement of Sandy Soil

Mohammad Nouranbakhsh<sup>a</sup>, Kazem Barkhordari Bafghi<sup>a,\*</sup>, Somayeh Ghasemi<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

<sup>b</sup> Environmental and Desert Studies School-Management in the Arid Regions, Yazd University, Yazd, Iran

**Received:** 16 December 2021; **Review:** 19 January 2022; **Accepted:** 05 February 2022

---

### Keywords:

MICP, Bio micro piles, Biological solution, Biological improvement of sandy soil, Microorganism.

---

## 1. Introduction

Recently, industrial development and high growth of constructions have increased the need to pay attention to the improvement of construction sites. Meanwhile, soil biological improvement as a new, low cost and environmentally friendly method has been considered by many researchers. On the other hand, the use of micro piles by cement or chemical grout injection as one of the methods of soil improvement has been proposed since almost the middle of the twentieth century. Of course, one of the disadvantages of micro piles is the use of cement or chemical grouts, which have both limited resources and environmental pollution. The use of biological micro piles is one of the new and economical solutions to solve these problems.

## 2. Methodology

### 2.1. Soil characteristics and experimental study

The sandy soil used in this test at the unified system classification is poorly granulated sandy soil (SP) and at the AASHTO system, the soil type is A-1-b. According to MICP research, poorly granulated sandy soil is 5 times more abundant than well-granulated sandy soil under the same conditions. Because more uniform pores allow for better biological precipitation. Since the cell size of microorganisms is between 0.5 to 3 micrometers, it easily penetrates into the soil granulation. From the direct shear test, it was found that the sandy soil has no adhesion and has an internal friction angle of 30 degrees (Fig.1). In this experiment, we use the PLT test to evaluate the effects of biological micro piles. A cylindrical rigid tank with a 50 cm diameter and 60 cm height is considered so that the boundary effect can be ignored. The rigid steel plate with dimensions of 8 x 8 x 1 cm<sup>3</sup>, which acts as a rigid foundation, distributes the stress equivalently. The micro piles used in the steel tube have a grout injection hole with an arrangement of 1, 3 and 5 micro piles below the loading plate. To investigate the effect of grout in mode of micro pile without injection and two modes of injection of cement grout and biological grout.

### 2.2. Biological test

In this study, we used microorganism *Sporosarsina pstorii*. This microorganism is from the *Bacillus* family and is an enzyme with high urease that accelerates biological precipitation by hydrolyzing urea (NG and Lee 2012). To prepare the biological solution, dissolve 20 grams of urea in one liter of distilled water and weigh about 8 grams of yeast extract powder of the culture medium along with 100 mg of industrial calcium chloride and pour it into Erlenmeyer and mix the solution well with a shaker (Chou et al. 2011). In order to prepare a

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: mohamadnouran1355@gmail.com (Mohammad Nouranbakhsh), kbarkhordari@yazd.ac.ir (Kazem Barkhordari), s.ghasemi@yazd.ac.ir (Somayeh Ghasemi).

solid culture medium, after preparing a liquid culture medium, place it on a hot plate until the temperature rises, then 15 grams of agar is added to the solution (Fig. 2).

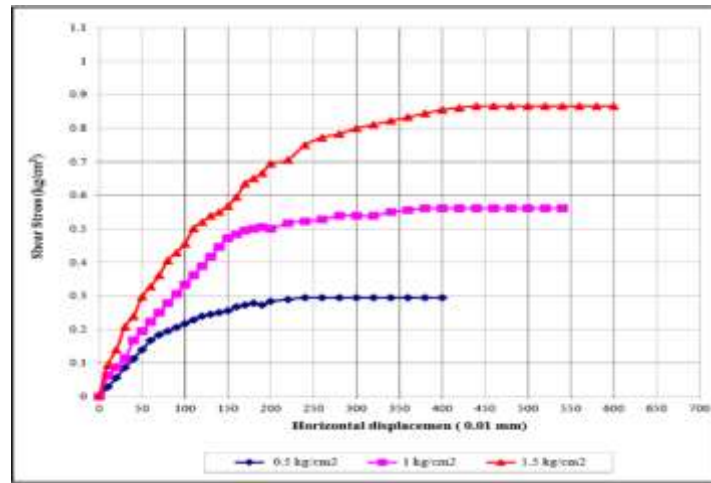


Fig. 1. Rapid direct shear test



Fig. 2. Biological test: a) Production of biological solution in the laboratory, b) Oxidase test

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Investigation of the effects of grout injection in reinforced soil

Experimental results show that soil reinforcement with a micro pile without injection increases soil bearing capacity by about 55%. Also, the results of plate loading test show that the ratio of increasing the load-bearing capacity of reinforced soil with cement grout to non-reinforced soil in the 50 mm meeting is 126%, which means a 46% effect of biological grout injection compared to micro pile without injection. Also, comparing the results of the experiments shows that the soil reinforced with a micro pile by injecting biological grout compared to normal soil increases the bearing capacity of the soil in a settlement such as 50 mm by 94% (Fig. 3).

#### 3.2. Investigation of the effects of micro piles length and diameter in different injection mode

Research has shown that by increasing the length and diameter of the micro pile, the soil bearing capacity increases in all injection modes. The test results with one 20 cm micro pile show that with a 25% increase in micro pile diameter in the mode of biological, cement and without injection, the soil bearing capacity increases by about 10, 6 and 8%. The test results also showed that by increasing the micro pile length by about 42%, the soil bearing capacity in the mode of biological, cement and without injection conditions increased by about 33, 26.5 and 22%. Significantly the greater impact of biological injection compared to cement injection increased in both parameters (Fig. 4).

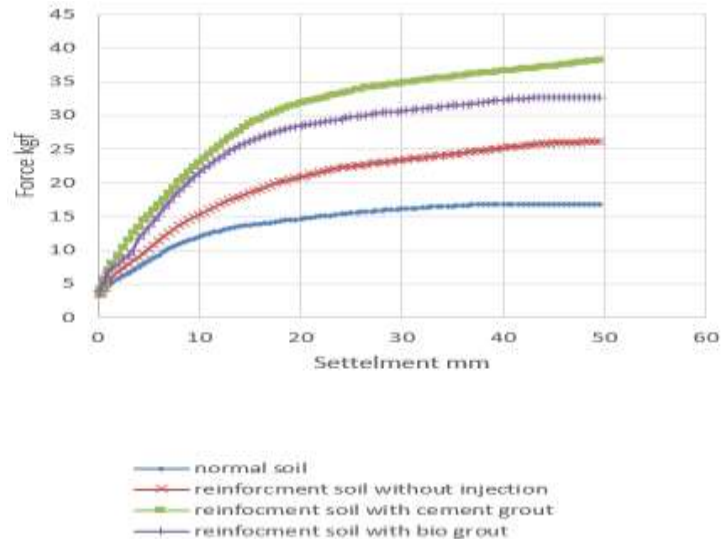


Fig. 3. Comparative diagram of the impact of injection on improving soil bearing capacity

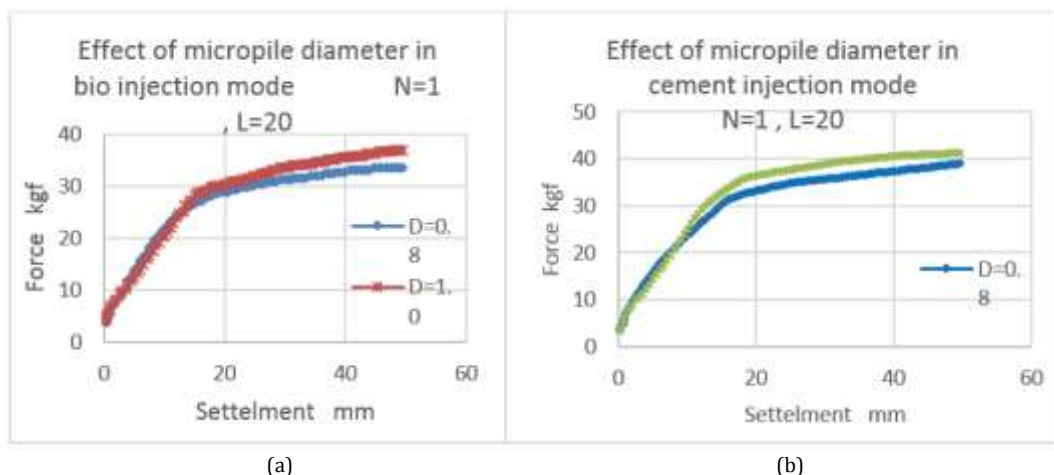


Fig. 4. Comparative diagram of the impact of injection and micro pile diameter on improving soil bearing capacity: a) Without injection mode, b) Bio injection mode

#### 4. Conclusions

The results showed that the biological micro piles method can be an economical and environmentally friendly option. Bio-grout solution with low viscosity provides high permeability and biological precipitation. This biological deposition increases the soil bearing capacity and decrease soil settlement. The results showed that the reinforced soil bearing capacity increasing in without injection mode in the case of one micro pile is 55% but with bio-injection same case this amount increases to 94%. Also, the behavior of micro pile group effect at bio-injection mode is very similar to the cement injection micro pile behavior and the interference of stress bulbs at the end of both types of micro piles reduces the efficiency by increasing the number of micro piles in a certain range. Increasing the length of biological micro piles has a greater effect on increasing the mechanical properties of the soil than increasing its diameter, so that by increasing the diameter of micro piles by 25%, increasing the bearing capacity of reinforced soil in biological and cement state increases only 10 and 8%, while increasing the length of micro piles by 42%. Soil bearing capacity in biological and cementitious condition increases by 33% and 26.5%.

#### 5. References

- Cheng L, Cord-Ruwisch R, "Upscaling effects of soil improvement by microbially induced calcite precipitation by surface percolation", *Geomicrobiology Journal*, 2013b, 31 (5).
- Chou C, Seagren EA, Aydilek AH, Lai M, "Biocalcification of sand through ureolysis", *Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering*, 2011, 137 (12), 1179-1189.
- Ng WS, Lee ML, Hii SL, "An overview of the factors affecting microbial-induced calcite precipitation and its potential application in soil improvement", *World Acadademy Science, Engineering and Technology*, 2012, 62, 723-729.