

بهبود مقاومت و پایداری سطحی خاک با استفاده از فرایند EICP

سپیده آقاعلی زاده^{۱*}، فرزین کلانتری^۲، فائزه قناتی^۳

۱- دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، saghaalizadeh@email.kntu.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، fz_kalantary@kntu.ac.ir

۳- استاد، دانشکده علوم زیستی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، ghanagia@modares.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر فرسایش سطحی خاک، به خصوص توسط باد موجب افزایش سطح بیابان‌ها و افزایش مشکلات برای اکوسیستم شده است. مقاوم کردن سطحی خاک با استفاده از روش‌های زیستی یکی از روش‌های جدید مقابله با مسئله فرسایش در خاک می‌باشد. در این تحقیق عصاره‌ی خام اندام هوایی گیاه سویا به عنوان منبع غنی از آنزیم اوره‌آز در فرایند ترسیب کلسیم کربنات القایی (EICP) استفاده شده است. در این فرایند اوره توسط آنزیم اوره‌آز هیدولیز می‌گردد و سپس کربنات تولید شده با کلسیم موجود در محیط محلول EICP ترکیب می‌شود و کلسیم کربنات تولید می‌شود که به عنوان چسباننده ذرات خاک عمل می‌کند. عصاره‌ی گیاهی جایگزین مناسبی برای آنزیم خالص اوره‌آز یا آنزیم به دست آمده توسط باکتری‌های تولید کننده آنزیم اوره‌آز می‌باشد که تهیه آنها هزینه‌بر می‌باشد. سه نوع خاک برای عمل سیمانتاسیون زیستی با استفاده از فرایند EICP مورد پاشش محلول EICP قرار گرفته و آزمایش سنجش مقاومت خاک با استفاده از نفوذ سنج جیبی بر روی خاک انجام شده است. ضخامت پوسته‌های تشکیل شده در اثر پاشش محلول اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان‌گر آن است که روش استفاده شده موجب افزایش مناسب مقاومت سطح خاک می‌گردد و روشی مناسب برای جلوگیری از فرسایش خاک می‌باشد.

کلمات کلیدی

EICP، فرسایش، مقاوم سازی، نفوذ سنج جیبی، ماسه

در سال‌های اخیر کاربردهای متعددی برای فناوری بیوسیمانتاسیون گزارش شده است. این کاربردها در طیف وسیعی از حوزه‌ها نظیر حذف آلاینده‌ها [۱]، بهسازی خاک [۲]، خود ترمیمی بتن معمولی [۳] و حفاظت و مرمت آثار تاریخی [۴] جای می‌گیرند.

فرسایش بادی یکی از عوامل اصلی تخریب خاک و محیط زیست، آلودگی هوا، انتقال ذرات معلق و ترسیب آن در شبکه‌های آبیاری و زهکشی است [۵]. حرکت و انتقال ذرات گرد و غبار خاک توسط نیروی باد به عنوان یکی از علل فرآیند بیابان‌زایی شناخته شده است که نتیجه آن تبدیل مناطق کشاورزی به زمین‌های بایر و ایجاد پوشش شن و ماسه بر روی آن‌ها است. تپه‌های شنی، به علت رطوبت ناکافی و همچنین عدم پوشش گیاهی، دارای چسبندگی کمی بوده و مستعد فرسایش بادی می‌باشند. در طی فرآیند فرسایش بادی از سطح خاک‌ها و به تبع آن ایجاد طوفان‌های گرد و غبار، مواد مغذی و مواد آلی خاک از بین می‌رود که این امر به نوبه‌ی خود سبب کاهش بهره‌وری کشاورزی می‌گردد. علاوه بر این آلودگی هوا و آب‌های سطحی و همچنین کاهش دید افقی ناشی از گرد و غبار از پیامدهای منفی فرسایش بادی است که می‌تواند اثرات سوئی بر سلامت انسان داشته باشد [۶]. فرسایش بادی حتی ممکن است در مناطق اقلیمی مرطوب نیز به صورت موضعی رخ دهد اما وقوع آن در مناطق خشک و نیمه خشک شایع‌تر است [۷].

از آنجایی که در بیابان‌ها طوفان ایجاد می‌گردد در نتیجه زندگی در بیابان خیلی سخت می‌باشد به صورتی که ممکن است این عامل موجب مرگ و میر افراد در بیابان‌ها گردد. یک روش جدید معماری در بیابان می‌تواند بسیار مفید باشد. تپه‌ها در بیابان قابلیت حرکت دارند و یک روش جدید برای ساکن کردن مصالح دانه‌ای روش عمل‌آوری سیمانتاسیون زیستی می‌باشد که می‌توان این تپه‌ها را از طریق میکرو ارگانیسم‌ها کنترل کرد. در نتیجه این فرایند موجب تولید الگوی می‌شود که به عنوان معماری در بیابان به کار برده می‌شود [۸]. برای تزریق محیط کشت باکتری در ماسه‌ها از بالون پنوماتیک استفاده می‌گردد بنابراین تپه‌ها پایدار گردیده و مردم می‌توانند به صورت ایمن در بیابان‌ها زندگی کنند.

در کنار کاربردهای سیمانتاسیون زیستی در زمینه‌های مختلف، اخیراً استفاده از این روش به عنوان یک عامل مهارکننده گرد و غبار در خاک‌های سیلتی و رسی مورد بررسی قرار گرفته است [۹]. این مطالعه در واقع به عنوان یک بسطی بر پژوهش‌های اخیر در زمینه ارزیابی پتانسیل فناوری سیمانتاسیون زیستی در کنترل فرآیند فرسایش بادی و جلوگیری از انتقال ماسه‌های سست تپه‌های شنی است. فرسایش بادی یکی از عوامل اصلی تخریب خاک و محیط زیست، آلودگی هوا، ذرات معلق و ترسیب آن در شبکه‌های آبیاری و زهکشی است.

محققان در SDSMT در مورد استفاده از فرایند سیمانتاسیون زیستی برای کنترل فرسایش، بررسی‌هایی انجام دادند. این تحقیق مخصوصاً برای مشخص کردن فواید کنترل فرسایش که می‌تواند با فرایند سیمانتاسیون زیستی انجام پذیرد بحث می‌کند. محققان در SDSMT به تأثیر غلظت باکتری‌های تولید کننده آنزیم اوره آز، دما، رطوبت و روش‌های آماده‌سازی در سطح تحت اثر فرسایش باد در ماسه‌ی خوب دانه بندی شده پرداختند [۹]. در این تحقیقات سینی‌های خاک با نمونه‌هایی از ماسه خوب دانه بندی شده (SW) پر گردید. نصف نمونه‌های حاکی آماده شده به صورت اولیه و بدون دست خوردگی استفاده شد و نصف دیگر به منظور بررسی اثر حذف دانه‌های ریزتر شسته شد. میر از باکتری *Sporosarcina pasteurii* به عنوان منبع اوره‌آز در این آزمایش‌ها استفاده نمود. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، آنها را برای تعیین کاهش جرم و درجه‌ی تولید آئروسول در تونل باد با مقیاس بزرگ تحت بارگذاری بادی قرار دادند. میر نتیجه گرفت که بیشترین اثر فرایند بیوسیمانتاسیون در کاهش جرم و درجه تولید آئروسول در دمای بالا و رطوبت پایین اتفاق می‌افتد که مشابه بیابان‌ها می‌باشد.

مالکی و همکاران [۱۰] بر اساس فرایند ترسیب کلسیم کربنات القایی میکروبی یک روش حفاظت از خاک بر روی خاک‌های ماسه‌ای را بررسی کردند. و نتایج نشانگر آن بود که روش ترسیب زیستی می‌تواند روش مناسب برای حفاظت از سطح خاک در برابر فرسایش بادی به خصوص در سرعت‌های بالای باد باشد. ایشان از مقاومت نفوذی لایه‌ی سطحی خاک به عنوان معیاری برای بررسی مقابله با فرسایش خاک استفاده کردند. ارتباط بین مقاومت نفوذی خاک و مقدار خاک فرسایش یافته نشان می‌دهد که فرایند ترسیب زیستی می‌تواند روش مناسبی برای جلوگیری از فرسایش خاک و ثابت نگه داشتن آن و در نتیجه کنترل گرد و غبار باشد. محیط کشت باکتری استفاده شده در این روش

عصاره‌ی مخمر (yeast extract) می باشد که به لحاظ اقتصادی گران می باشد و استفاده از مالس و ذرت له شده برای ادامه روش‌ها توصیه شده است.

گومز و همکاران [۱۱] برای بهبود بخشیدن مقاومت تپه های شنی شل در برابر فرسایش و به وجود آوردن سطح ثابت برای کنترل گرد و غبار و ایجاد زمین مناسب برای زراعت، سه نمونه باکتری تولید کننده آنزیم اوره‌آز کشت داده شده با غلظت‌های متفاوت آماده کردند و بر روی چهار قطعه زمین با ابعاد یکسان آزمایش انجام دادند. برای بررسی بهبود خاک از آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی (DCP) و ارزیابی محتوای کلیستی خاک استفاده گردید. در بین این چهار نمونه‌ی آزمایشی نمونه‌ای که کمترین غلظت اوره و کلسیم کلرید در آن استفاده شده بود بهبود بیشتری یافته بود. بیشترین عمقی که نمونه‌ی با غلظت مواد کم بهبود یافته بود برابر ۲۸ cm بود.

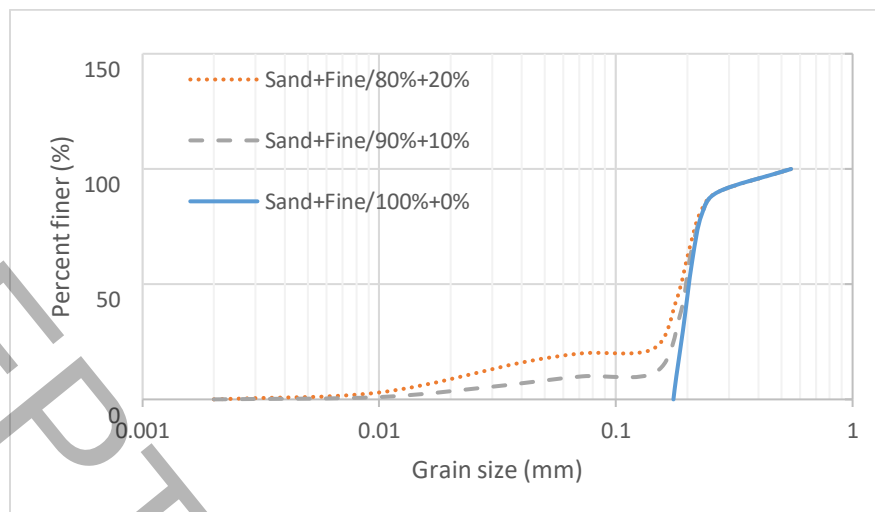
چن و همکاران [۱۲] پایدارسازی ماسه‌ها با روش سیمان‌تاسیون زیستی را در مقابل طوفان‌های شنی ارزیابی نمودند. نتایج آزمایش‌های ایشان نشان داد که آنزیم اوره‌آز امکان استحکام بخشیدن به خاک‌های ماسه‌ای را از طریق هیدولیز اوره، دارا می باشد و فعالیت این آنزیم موجب تولید کلیسیت و آراگونیت در محیط خاک گردید. تحقیقات آنها نشان داد که این ماسه‌های بهبود یافته و پایدار شده زیستی که حتی ۱۲ روز به صورت چرخه ای تحت فرایند یخ زدن و گرم کردن قرار داشتند مقاومت بالایی در برابر فرسایش بادی با سرعت 33 m s^{-1} را دارا می باشند. مقاومت فشاری ماسه‌های پایدار شده زیستی بستگی به تراکم آنزیم اوره‌آز و غلظت Ca^{2+} و اوره داشت.

در این تحقیق از عصاره‌ی گیاهی تهیه شده با بافر فسفات (به عنوان منبع آنزیم اوره‌آز) در فرایند بیوسیمان‌تاسیون زیستی به روش ترسیب کلسیم کربنات القایی با استفاده از آنزیم اوره‌آز (EICP) استفاده گردیده است. کارایی عصاره‌ی خام گیاهی به عنوان منبع ارزان نسبت به سایر منابع شناخته شده در فرایند EICP مورد ارزیابی قرار گرفت. سه نوع خاک برای بررسی کارایی فرایند EICP با استفاده از روش پاشش مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش سنجش مقاومت سطحی خاک با کمک نفوذ سنج جیبی (پنترومتر) روی خاک‌های عمل آوری شده انجام شده و ضخامت پوسته تشکیل شده اندازه گیری شد. همچنین آزمایش سنجش مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌های خاکی انجام گردید.

۲- روش آزمایش و نتایج

۲-۱- آزمایش سنجش مقاومت سطحی خاک

در این مطالعه از فرایند EICP (رسوب کلسیم کربنات القایی با کمک آنزیم اوره‌آز) برای بررسی مقاوم شدن سطحی خاک استفاده شده است. در این روش آنزیم اوره‌آز موجود در عصاره‌ی اندام هوایی گیاه سویا به جای آنزیم اوره‌آز خالص یا آنزیم تولیدی توسط باکتری‌ها برای سرعت بخشیدن به هیدرولیز اوره موجود در محیط محلول EICP و ترکیب کربنات تولیدی با کلسیم استفاده شد. مقدار فعالیت آنزیم اوره آزی در عصاره‌ی استفاده شده از اندام هوایی گیاه سویا برابر $9.355 \times 10^{-3} \Delta\text{Abs } 340\text{nm}/\mu\text{g protein ml}^{-1}$ می باشد. که از بافر فسفات با غلظت ۲۰ mM در عصاره گیری اندام هوایی سویا استفاده شده است [۱۳]. سه نوع خاک شامل خاک های SP, SM, SP-SM برای بررسی کنترل فرسایش سطحی خاک با کمک روش EICP انتخاب گردید (مشخصات خاک استفاده شده در شکل ۱ و جدول ۱ زیر مشهود است).



شکل ۱: منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده در آزمایش ها

Figure 1. Soil grading curve used in the experiments

جدول ۱: مشخصات خاک مورد استفاده

Table 1. Characteristics of the used soil

Material	USCS	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	FC(%)	LL	PL
۱۰۰-۰	SP	۰/۱۸۰	۰/۱۹۲	۰/۲۱۰	۰	NP	NP
۹۰-۱۰	SP-SM	۰/۰۷	۰/۱۷۸	۰/۲۰۴	۱۰	۳۱/۶	۲۵/۲
۸۰-۲۰	SM	۰/۰۲۸	۰/۱۶۱	۰/۱۹۹	۲۰	۳۱/۶	۲۵/۲

Not: NP=Non Plastic

روش آزمایش به این صورت می باشد که از هر نوع خاک، هشت نمونه ی استوانه ای با قطر ۴۰ cm و ارتفاع 20cm آماده گردید. در ابتدا خاک مورد نظر را به ارتفاع ۵ cm درون ظرف ریخته و برای متراکم کردن با دست پنج ضربه به کل سطح خاک ضربه زده شد این عمل را در هر ۵ cm با افزودن خاک تکرار کردیم. سطح نهایی خاک با یک خط کش صاف گردید. در نهایت وزن مخصوص خشک خاک حاصل، به طور متوسط برای هشت نمونه از SP-SM برابر $1/64 \text{ g/cm}^3$ (با نسبت تخلخل $e = 0/61$) برای نمونه SM برابر $1/69 \text{ g/cm}^3$ (با نسبت تخلخل $e = 0/54$) و برای نمونه SP برابر $1/59 \text{ g/cm}^3$ (با نسبت تخلخل $e = 0/67$) به دست آمد. برای یک نمونه از هر سه نوع خاک یک مرتبه ۵۰۰ mL آب یک بار تقطیر پاشیده شد. برای سه نمونه از هر خاک، یک بار محلول EICP به میزان ۵۰۰ mL پاشیده شد. برای بررسی اثر تعداد دفعات پاشش برای چهار نمونه ی بعدی آماده شده از هر نوع خاک سه بار عمل پاشش انجام گرفت. در ابتدا در یک نمونه از این خاک سه مرتبه ۵۰۰ mL آب یک بار تقطیر با فاصله زمانی ۲۴ ساعت پاشیده شد. سپس برای سه نمونه ی بعدی از هر خاک محلول مواد واکنش دهنده و آنزیم که بلا فاصله با هم ترکیب شده اند به میزان ۵۰۰ mL به روش پاشش بر سطح این نمونه ها سه بار با فاصله زمانی ۲۴ ساعت افزوده شد. محلول اعمالی حاوی عصاره ی اندام هوایی سویا آماده شده با بافر فسفات 20 mM و کلسیم کلرید و اوره با غلظت 1 mM بود. در نتیجه در مجموع برای هر نمونه خاک ۱/۵ L محلول EICP تزریق گردید که این میزان انتخابی بر اساس مطالعه مشابه الماجد و همکاران [۱۴] انتخاب گردید که در مطالعه ایشان نیز برای بررسی فرسایش سطحی حدود ۰/۰۵ حجم نمونه خاک به سطح آن محلول EICP پاشیده شده بود. ارتفاع خروجی اسپری با سطح نمونه خاک در حدود ۸ cm در نظر گرفته شد. در هر بار پس از پایان عمل اسپری

کردن ظرف اسپری با محلول HCL شسته شد تا کلسیم کربنات ترسیبی مسیر اسپری را مسدود نکند. نمونه ها به مدت ۲۱ روز در محیط آزمایشگاه و در دمای محیط باقی ماندند تا خشک گردند و در نهایت در روز بیست و یکم با آزمایش نفوذ سنج جیبی (استاندارد: ASTM D1558.D2573) برای بررسی چگونگی تغییر مقاومت نمونه های بهبود یافته مورد سنجش قرار گرفتند (نتایج در جدول ۲ و شکل ۳ ارائه شده است). ظرف پر شده با ماسه ها شکافته شده و نحوه ی رسوب گذاری سطحی مذکور بررسی گردید و ارتفاع پوسته تشکیل شده بر روی خاک با کولیس برای هر نمونه اندازه گیری شد (نتایج در شکل ۴ ارائه گردیده است). در شکل ۵ نفوذ سنج استفاده شده مشهود می باشد.



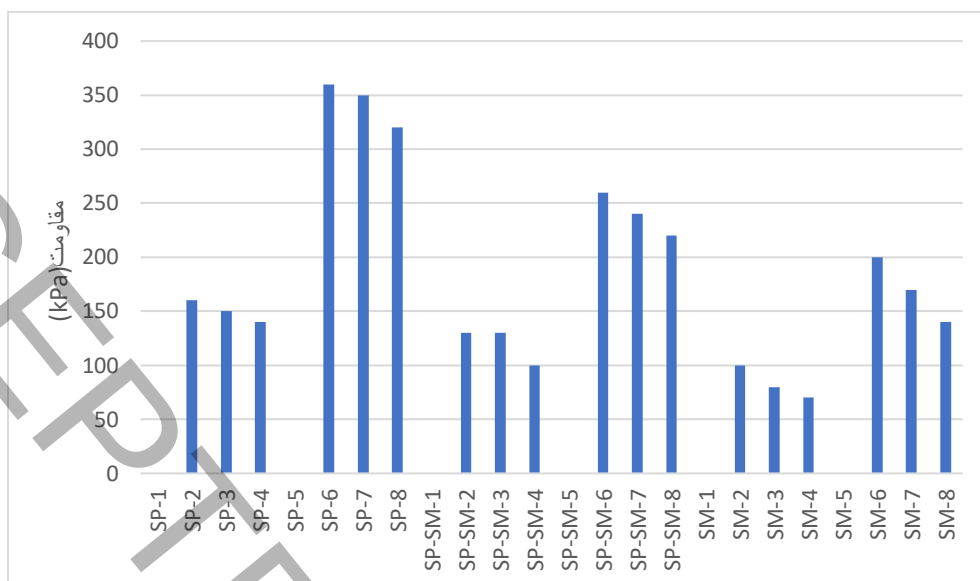
شکل ۲: نمونه ی خاک عمل آوری شده با فرایند EICP

Figure 2. Soil sample treated with the EICP process

جدول ۲: نتایج آزمایش نفوذ سنج برای سنجش مقاومت سطحی خاک

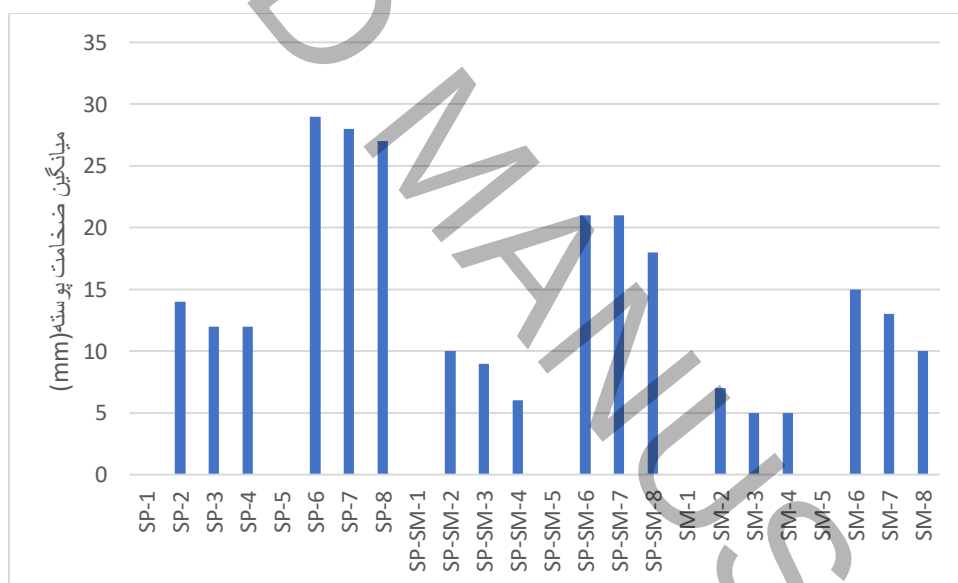
Table 2. Penetrometer test results for measuring soil surface resistance

میانگین مقاومت نفوذ سنج (kPa)	میانگین ضخامت پوسته (mm)	غلظت کلسیم کلرید و اوره در محلول پاششی (M)	حجم پاشش در هر ساعت (mL)	دفعات تکرار پاشش	نمونه
۰	۰	۰	۵۰۰	۱	SP-1
۱۶۰	۱۴	۱	۵۰۰	۱	SP-2
۱۵۰	۱۲	۱	۵۰۰	۱	SP-3
۱۴۰	۱۲	۱	۵۰۰	۱	SP-4
۰	۰	۱	۵۰۰	۳	SP-5
۳۶۰	۲۹	۱	۵۰۰	۳	SP-6
۳۵۰	۲۸	۱	۵۰۰	۳	SP-7
۳۲۰	۲۷	۱	۵۰۰	۳	SP-8
۰	۰	۰	۵۰۰	۱	SP-SM-1
۱۳۰	۱۰	۱	۵۰۰	۱	SP-SM-2
۱۳۰	۹	۱	۵۰۰	۱	SP-SM-3
۱۰۰	۶	۱	۵۰۰	۱	SP-SM-4
۰	۰	۰	۵۰۰	۳	SP-SM-5
۲۶۰	۲۱	۱	۵۰۰	۳	SP-SM-6
۲۴۰	۲۱	۱	۵۰۰	۳	SP-SM-7
۲۲۰	۱۸	۱	۵۰۰	۳	SP-SM-8
۰	۰	۰	۵۰۰	۱	SM-1
۱۰۰	۷	۱	۵۰۰	۱	SM-2
۸۰	۵	۱	۵۰۰	۱	SM-3
۷۰	۵	۱	۵۰۰	۱	SM-4
۰	۰	۰	۵۰۰	۳	SM-5
۲۰۰	۱۵	۱	۵۰۰	۳	SM-6
۱۷۰	۱۳	۱	۵۰۰	۳	SM-7
۱۴۰	۱۰	۱	۵۰۰	۳	SM-8



شکل ۳: میانگین مقاومت نفوذ سنج برای ۲۴ نمونه

Figure 3. Average penetrant strength for 24 samples



شکل ۴: میانگین ضخامت پوسته برای ۲۴ نمونه خاک

Figure 4. Average crust thickness for 24 soil samples

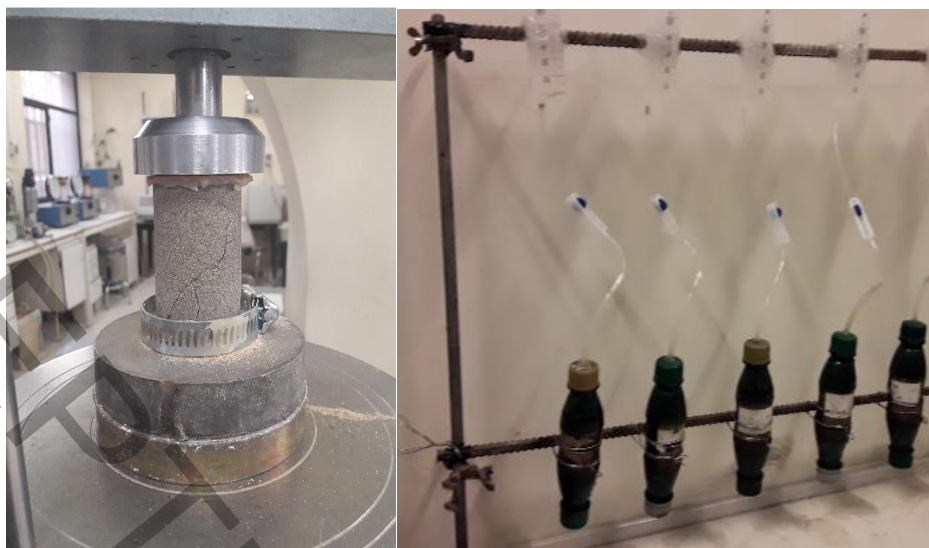


شکل ۵: نفوذ سنج جیبی مورد استفاده

Figure 5. Pocket penetrator used

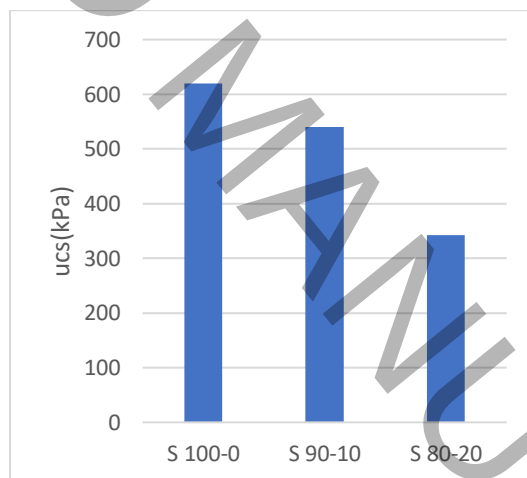
۲-۲- سنجش مقاومت فشاری محصور نشده‌ی خاک عمل‌آوری شده به روش EICP

مراحل آزمایش به این ترتیب است که برای تهیه یک نمونه استوانه‌ای برای آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده در ابتدا خاک ماسه‌ای انتخابی را در سه پیاله و در هر پیاله پنجاه گرم ریخته شد. این خاک‌ها را با ترازوی با دقت 0.01 وزن گردید. به صورتی که مجموع وزن سه پیاله باید بتواند قالب استوانه‌ای را پر کند. وزن مورد نیاز برای پر کردن یک قالب اندازه گیری مقاومت تک محوره حدودا 147 g بود. به هر پیاله ده درصد وزن آن که تقریباً 5 گرم بود آب اضافه کردیم تا در موقع پر کردن قالب‌ها ماسه بتواند درون قالب حالت گرفته و پس از کوبیدن ثابت بماند. هر قالب در سه مرحله با 20 ضربه با کوبه کوبیده شد. قالب‌های تک محوره از دو طرف باز بود. در مرحله بعد از آماده کردن نمونه، در قسمت سر و ته نمونه، اسفنج قرارداده شد تا نمونه در اثر گذر محلول عمل‌آوری شسته نشود. بالا و پایین نمونه را پس از اسفنج گذاری با شن پر گردید تا آب در تمام سطح نمونه به صورت یکنواخت پخش گردد از بالای نمونه لوله‌ای جهت انتقال محلول به درون نمونه تعبیه گردید و همچنین از پایین نمونه خروجی جهت خروج محلول وارد شده تعبیه گردید. نمونه‌های آماده شده در شکل ۶ نشان داده شده است. پس از استخراج عصاره گیاه که دمای آن 4 سانتی گراد است سی میلی لیتر از آن را برداشته و بلافاصله اوره و کلسیم کلرید به آن افزوده شد به صورتی که غلظت هر دو ماده ی افزودنی 1 میلی مولار استفاده شد. محلول آماده به نمونه استوانه‌ای آماده شده تزریق شد. پس از بیست و چهار ساعت محلول درون نمونه زهکشی گردید (شکل ۶) و مراحل تزریق دوباره تکرار شد. این عمل سه بار تکرار گردید. در نهایت یک هفته نمونه در دمای اتاق باقی ماند. پس از یک هفته نمونه ها از قالب درآورده شد و نمونه های عمل آوری شده به مدت یک روز در دمای اتاق قرار داده شد. سپس نمونه های عمل آوری شده در دمای 110°C درون اون قرار داده شد و نمونه ها به مدت بیست و چهار ساعت درون اون قرار داده شد. برای سه نمونه خاک SP, SP-SM, SM (مشخصات خاک ها در جدول ۱ و شکل ۱ آورده شده است) مقاومت نمونه‌های بهبود یافته با کمک عصاره‌ی گیاه در نمودار آورده شده است. این تست برای هر خاک سه بار تکرار گردید و میانگین مقدار مقاومت حاصل در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۶: آماده سازی نمونه خاک استوانه ای بهبود یافته و سنجش مقاومت فشاری محصور نشده

Figure 6. Preparation of improved cylindrical soil sample and measurement of unconfined compressive strength



شکل ۷: نتایج آزمایش سنجش مقاومت فشاری محصور نشده برای نمونه خاک بهبود یافته با فرایند EICP (تزریق مواد واکنش دهنده و عصاره ی آنزیم به صورت هم زمان)

Figure 7. Results of the unconfined compressive strength test for soil samples improved by the EICP process (simultaneous injection of reactants and enzyme extract)

۳- هزینه تهیه ی یک لیتر عصاره ی خام گیاه سویا (حاوی آنزیم اوره آز)

برای پرورش ۲۵ گرم بذر سویا تقریباً ده لیتر محلول مغذی برای محیط کشت هیدروپونیک لازم است که در آن ۵۰ میلی لیتر محلول ماکروکوماچی، ۵۰ میلی متر محلول میکروکوماچی، ۵ میلی متر محلول کلسیم کلرید و ۵ میلی لیتر محلول Fe-EDTA استفاده می شود. در جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ مواد تشکیل دهنده محلول های مذکور (استوک ها) ثبت گردیده است.

جدول ۳: قیمت مواد تشکیل دهنده محلول ماکروکوماچی

Table 3. Prices of ingredients for Macrokomachi solution

ماده شیمیایی	مقدار (g/L)	قیمت به ریال (g)
NH_4NO_3 (Merck)	۸/۰۴	۸۰۰۰
NaH_2PO_4 (Merck)	۱۲/۱۸	۶۴۰۰
K_2SO_4 (Merck)	۵/۳	۵۱۰۰
MgCl_2 (Merck)	۸/۱۳	۵۵۰۰

محلول ماکرو
kamachi

جدول ۴: قیمت مواد تشکیل دهنده محلول میکروکوماچی

Table 4. Prices of ingredients for Microkomachi solution

نوع ماده شیمیایی	مقدار (mg/L)	قیمت به ریال (g)
H_3BO_3 (Merck)	۳۰۲۰	۲۱۰۰
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Merk)	۱۵۲۰	۱۰۰۰۰
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (Merck)	۷۵	۷۵۰۰
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Merck)	۲۰۱	۷۵۵۰
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Merck)	۲۴	۱۰۰۰۰۰

محلول میکرو
kamachi

جدول ۵: قیمت تهیه ماده موجود در محلول کلسیم کلرید

Table 5. Price of the substance contained in calcium chloride solution

ماده شیمیایی	مقدار (g/L)	قیمت به ریال (g)
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Merck)	۲۹/۴	۴۹۰۰

محلول کلسیم کلرید

جدول ۶: قیمت ماده سازنده محلول Fe-EDTA

Table 6. Price of the ingredient for Fe-EDTA solution

ماده شیمیایی	مقدار (g/L)	قیمت به ریال (g)
Fe-EDTA (Merck)	۱۸/۹۵	۱۰۰۰۰

محلول Fe-EDTA

از هر گرم بذر سویا تقریباً ۱۵ گرم اندام هوایی به دست می آید. از ۲۵ گرم بذر سویا ۳۷۵ گرم اندام هوایی سویا به دست می آید. برای تهیه ۱۵ میلی لیتر از عصاره ی خام گیاهی، ۱ گرم از اندام هوایی سویا استفاده می شود که با بافر فسفات (جدول ۷) با غلظت ۲۰ میلی مولار و با pH ۷ تهیه می شود.

جدول ۷: قیمت مواد مربوط به تهیه محلول بافر فسفات

Table 7. Price of materials for preparing phosphate buffer solution

ماده شیمیایی	مقدار (mg/L)	قیمت به ریال (g)
Na_2HPO_4 (Merck)	۱۱۰۷	۲۰۰۰
NaH_2PO_4 (Merck)	۱۴۶۳	۶۴۰۰

مواد مربوط به تهیه بافر
فسفات

از ۳۷۵ گرم اندام هوایی سویا به دست آمده می توان ۵۶۲۵ میلی لیتر عصاره ی سویا با بافر فسفات (با غلظت ۲۰ میلی مولار) تهیه کرد. جمع هزینه های انجام شده برای تهیه ۵۶۲۵ میلی لیتر عصاره ی خام گیاه سویا در جدول ۸ ثبت شده است.

جدول ۸: هزینه تهیه ۵۶۲۵ میلی لیتر عصاره خام گیاه سویا

Figure 8. Cost of producing 5625 ml of crude soybean extract

نوع مواد	مقدار مورد نیاز (mL)	هزینه تهیه ۵۶۲۵ میلی لیتر عصاره (ریال)
محلول ماکروکوماچی	۵۰	۱۰۷۰۰
محلول میکروکوماچی	۵۰	۱۳۰۰
کلسیم کلرید دوآبه	۵	۷۲۰
Fe-EDTA	۵	۱۰۰۰
تهیه بافر فسفات	۵۶۲۵	۶۵۱۰۰
۲۵ گرم سویا		۲۰۰۰۰
مجموع هزینه ها		۹۸۸۲۰

در نتیجه برای تهیه هر لیتر عصاره ی خام گیاه سویا برای استفاده در فرایند EICP تقریباً ۱۷۰۰۰ ریال هزینه شده است. البته در محاسبات انجام شده برای برآورد هزینه تهیه عصاره ی خام گیاهی هزینه ی مربوط به نیروی انسانی به کارگرفته شده و همچنین اصطحلاک دستگاه ها در نظر گرفته نشده است.

۴- هزینه تهیه ی یک لیتر محلول حاوی آنزیم خالص

مطابق تحقیقات انجام شده در زمینه فرایند EICP برای تهیه هر لیتر محلول حاوی آنزیم از ۲۵/۰ گرم تا ۵ گرم آنزیم در فرایند مذکور استفاده می گردد [15-21]. که مطابق با قیمت اعلام شده از شرکت های فروشنده هزینه تهیه هر گرم آنزیم اوره آز (Merck) از بیست میلیون ریال بالاتر است. در نتیجه تهیه آنزیم به روش استفاده از عصاره ی خام گیاهی مقرون به صرفه می باشد. حداقل نسبت هزینه های استفاده از آنزیم خالص به عصاره ی خام حاوی آنزیم برابر ۳۰۰ می باشد (هزینه نیروی انسانی و اصطحلاک دستگاه های به کار گرفته شده در تهیه عصاره ی خام گیاه سویا در نظر گرفته نشده است).

۵- بحث و تحلیل نتایج

در اکثر مطالعاتی که از فرایند EICP برای عمل آوری خاک ها استفاده شده است از آنزیم اوره آز خالص، عصاره ی بذر سویا و بذر گیاهان دیگر (به عنوان منبع غنی از آنزیم اوره آز) برای سرعت بخشیدن به هیدرولیز اوره موجود در محیط محلول EICP و ترکیب کربنات تولیدی با کلسیم استفاده شد است [۲۶-۲۲]. در این تحقیق به عنوان نوع آوری از عصاره ی اندام هوایی گیاه سویا (که تهیه ی آن نسبت به مواد مذکور مقرون به صرفه تر و آسان تر است) برای بررسی کارایی این عصاره در فرایند EICP به عنوان منبع آنزیم اوره آز استفاده شد. استفاده از عصاره خام گیاه سویا با توجه به نتایج مربوط به رسوب گذاری و مقاومت سطحی به دست آمده برای خاک های عمل آوری شده قابل قبول می باشد.

در اکثر مطالعات در زمینه پایدارسازی سطحی خاک با کمک فرایند EICP از خاک ماسه ای استفاده شده است و خاک ماسه سیلت دار به دلیل عدم چسبندگی کافی بین ذرات و وزن پایین ذرات خاک به عنوان خاک فرسایش پذیر رده بندی شده است [۲۰، ۲۷، ۲۸]. در این

تحقیق نیز از خاک ماسه‌ای برای بررسی تغییر مقاومت سطحی خاک با پاشش مواد واکنش دهنده و عصاره ی خام گیاه سویا استفاده گردید. سه نوع خاک شامل SP-SM، SP و SM برای بررسی ارزیابی نحوه ی اثر فرایند EICP در خاک با دانه بندی متفاوت، استفاده گردید. مارتین و همکاران در سال ۲۰۲۰ مقاومت سطحی نمونه‌ی خاک ماسه‌ای که سه بار با محلول EICP (با غلظت کلسیم کلرید 1 M و اوره 1/5 M) فرایند عمل آوری را انجام داده بودند، با استفاده از آزمایش نفوذ سنج سنجیدند. در نتیجه میزان افزایش مقاومت سطحی خاک را تا ۵۰۰ kPa گزارش کردند [۲۹]. تحقیقات محققان مختلف، افزایش مقاومت سطحی خاک در اثر پاشش محلول EICP و تشکیل پوسته پس از خشک شدن و شکافته شدن ظرف حاوی خاک عمل آوری شده را تایید می کند و در این مطالعات افزایش مقاومت سطحی خاک با شاخص‌های مربوط به فرسایش پذیری خاک دارای ارتباط می باشد به صورتی که افزایش مقاومت سطحی موجب کاهش پارامترهای مربوط به فرسایش پذیری خاک می گردد [۱۴، ۳۰، ۳۱]. در این تحقیق بیشترین مقاومت سنجیده شده توسط دستگاه نفوذ سنج برای خاک SP می باشد که تقریباً برابر ۳۶۰ kPa می باشد.

همچنین در این مطالعه بیشترین مقاومت به دست آمده برای خاک SP-SM تقریباً برابر ۷۳٪ و خاک SM ۵۶٪ مقاومت به دست آمده برای خاک SP می باشد. علت این امر این است که با افزایش میزان ریزدانه در خاک ماسه‌ای میزان تخلخل و نفوذپذیری در خاک کاهش می یابد و موجب می شود محلول EICP کمتر بتواند در عمق نفوذ کند. در نتیجه میزان عمق نفوذ محلول EICP و یکنواختی پخش این محلول در بین ذرات خاک کاهش می یابد. مطابق تحقیقات [32] برای اینکه محلول سیمان تاسیون تا عمق مطلوبی از خاک نفوذ نمایند و رسوبات $CaCO_3$ به صورت همگن در عمق خاک پخش گردد، خاک مورد نظر باید حداقل دارای نفوذپذیری $m/s \times 10^{-4}$ باشد. نکات ذکر شده نشان می دهد نوع دانه بندی خاک برای توانایی استفاده از فرایند EICP در بهبود خواص مقاومتی آن بسیار مهم می باشد. محققان از عصاره ی خام حاوی آنزیم اوره از منابع گیاهی مختلف برای بررسی مقاومت فشاری محصور نشده خاک بهبود یافته نیز استفاده کرده اند. برای مثال بذر لوبیای جک [۳۳، ۳۴]، سویا [۲۱، ۳۵-۳۹] و دانه های هندوانه [۲۱، ۲۶، ۴۰] برای استفاده در فرایند EICP مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده خاک بهبود یافته با کمک عصاره ی خام دانه هندوانه را Dilrukshi et al. تقریباً ۴/۵ MPa گزارش کرده اند [۲۶]. نتایج تست UCS نشانگر آن است با افزایش درصد بخش ریزدانه خاک (کمتر ۰/۷۵ mm) و کاهش درصد خاک ماسه مقاومت خاک بهبود یافته (در شرایط عمل آوری یکسان) کاهش می یابد. نتایج مشابه برای دانه بندی های مختلف خاک در مطالعه ی Tung Hoang et al. به دست آمده است [۲۸].

۶- پیشنهاد ها

- برای بررسی بیشتر کارایی استفاده از عصاره خام گیاه سویا برای افزایش مقاومت سطحی خاک از محلول با غلظت های متفاوت کلسیم کلرید و اوره در فرایند EICP استفاده گردد و غلظت بهینه مواد در استفاده از این فرایند مورد بررسی قرار گیرد.
- از آزمایش تونل باد برای بررسی نحوه ی فرسایش سطحی استفاده گردد.
- کارایی این روش بر روی طیف وسیعی از دانه بندی های مختلف خاک با تخلخل و نفوذپذیری متفاوت انجام گردد.
- و موارد دیگر.

۷- نتایج

امروزه فرسایش سطحی خاک معضلی بزرگ در زندگی جامعه ی بشری می باشد و مطالعات مختلفی برای جلوگیری از فرسایش خاک انجام شده است. در این تحقیق برای کاهش هزینه فرایند EICP در بهبود فرسایش سطحی خاک، به جای آنزیم خالص از عصاره خام اندام هوایی گیاه سویا (که حاوی منبع غنی از آنزیم اوره آز می باشد) برای کاتالیز کردن هیدرولیز اوره استفاده شده است. کربنات تولیدی از این روش می تواند با کلسیم موجود در کلسیم کلرید ترکیب شده و تولید کلسیم کربنات نماید که به عنوان چسباننده ذرات خاک می تواند به کار رود. نتایج نشانگر آن است که پوسته تشکیل در خاک ماسه‌ای، هنگام پاشش محلول EICP موجب مقاوم شدن سطحی خاک می گردد. همچنین در شرایط یکسان عمل پاشش محلول EICP به خاک ماسه‌ای، هرچه قدر درصد مقدار لای افزوده شده به خاک بیشتر شود، میزان مقاومت به

دست آمده از آزمایش نفوذ سنج سطحی و ضخامت لایه تشکیل شده کمتر می‌گردد. با افزایش دفعات تکرار عمل پاشش در نمونه‌ها مقاومت سطحی خاک و ضخامت پوسته ی تشکیل شده بیشتر می‌گردد. همچنین سنجش مقاومت فشاری محصور نشده خاک‌های عمل‌آوری شده به روش EICP نیز نشانگر افزایش مقاومت خاک ماسه‌ای می باشد که آن هم با افزایش درصد وزنی خاک ریزدانه کاهش می یابد. آزمایش‌ها نشانگر کارایی عصاره‌ی خام گیاه سویا به عنوان منبع اوره‌آز می‌باشد که تهیه آن نسبت به روش‌های دیگر آسان‌تر و ارزان‌تر است. با توجه به نتایج این روش می‌تواند به عنوان روشی موثر در کنترل فرسایش سطحی خاک به کار برده شود.

۸-مراجع

۱. Hammes, F., et al., Calcium removal from industrial wastewater by bio-catalytic CaCO₃ precipitation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2003. 78(6): p. 670-677.
۲. van Paassen, L.A., et al., Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010. 136(12): p. 1721-1728.
۳. Wiktor, V. and H.M. Jonkers, Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2011. 33(7): p. 763-770.
۴. Tiano, P., L. Biagiotti, and G. Mastromei, Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. *Journal of microbiological methods*, 1999. 36(1): p. 139-145.
۵. Movahedan, M., N. Abbasi, and M. Keramati, Wind erosion control of soils using polymeric materials. *EURASIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE (EJSS)*, 2012. 1(2): p. 81-86.
۶. Van Pelt, R. and T. Zobeck, Effect of polyacrylamide, cover crops, and crop residue management on wind erosion. in *International Soil Conservation Organization Conference-Brisbane*. 2004.
۷. Fryrear, D.W. and E. Skidmore, Methods for controlling wind erosion. *Soil erosion and crop productivity*, 1985:24: p. 443-457.
۸. Larsson, M., Dune: Arenaceous Anti-Desertification Architecture, in *Macro-engineering Seawater in Unique Environments*. 2010, Springer. p. 431-463.
۹. Meyer, F., et al., Microbiologically-induced soil stabilization: application of *Sporosarcina pasteurii* for fugitive dust control, in *Geo-frontiers 2011: advances in geotechnical engineering*. 2011. p. 4002-4011.
۱۰. Maleki, M., et al., Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016. 13(3): p. 937-944.
۱۱. Gomez, M.G., et al., Field-scale bio-cementation tests to improve sands. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2015. 168(3): p. 206-216.
۱۲. Chen, F., et al., Biostabilization of desert sands using bacterially induced calcite precipitation. *Geomicrobiology Journal*, 2016. 33(3-4): p. 243-249.
۱۳. Aghaalizadeh, S., et al., Improving the Stability of Sandy Soils by Using Urease Enzyme in Soybean Plants. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2024. 11(6): p. 4275-4288.
۱۴. Almajed, A., et al., Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique. *Soils and Foundations*, 2020. 60(2): p. 356-371.
۱۵. Kavazanjian, E. and N. Hamdan, Enzyme induced carbonate precipitation (EICP) columns for ground improvement, in *IFCEE 2015*. 2015. p. 2252-2261.
۱۶. Hamdan, N., et al., Hydrogel-assisted enzyme-induced carbonate mineral precipitation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016. 28(10): p. 04016089.
۱۷. Putra, H., H. Yasuhara, and N. Kinoshita, Applicability of natural zeolite for NH₄-forms removal in enzyme-mediated calcite precipitation technique. *Geosciences*, 2017. 7(3): p. 61.
۱۸. Oliveira, P.J.V., L.D. Freitas, and J.P. Carmona, Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017. 29(4): p. 04016263.
۱۹. Kavazanjian Jr, E., A. Almajed, and N. Hamdan, Bio-inspired soil improvement using EICP soil columns and soil nails, in *Grouting 2017*. 2017. p. 13-22.
۲۰. Knorr, B., Enzyme-induced carbonate precipitation for the mitigation of fugitive dust. 2014: Arizona State University.
۲۱. Khodadadi Tirkolaei, H., et al., Crude urease extract for biocementation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020. 32(12): p. 04020374.
۲۲. Sun, X., et al., Mineralization crust field experiment for desert sand solidification based on enzymatic calcification. *Journal of Environmental Management*, 2021.278 : p. 112315.

- .23 Wang, H., et al., Experimental study of enzyme-induced carbonate precipitation for high temperature applications by controlling enzyme activity. *Geomicrobiology Journal*, 2022. 39(6): p. 502-514.
- .24 Wang, H., et al., Erosion resistance of treated dust soils based on the combined enzymatically induced carbonate precipitation and polyacrylic acid. *Biogeotechnics*, 2023. 1(4): p. 100050.
- .25 Ahenkorah, I., et al., Characteristics of MICP-and EICP-treated sands in simple shear conditions: A benchmarking with the critical state of untreated sand. *Géotechnique*, 2023. 74(13): p. 1649-1663.
- .26 Dilrukshi, R., K. Nakashima, and S. Kawasaki, Soil improvement using plant-derived urease-induced calcium carbonate precipitation. *Soils and foundations*, 2018. 58(4): p. 894-910.
- .27 Hamdan, N. and E. Kavazanjian Jr, Enzyme-induced carbonate mineral precipitation for fugitive dust control. *Géotechnique*, 2016. 66(7): p. 546-555.
- .28 Hoang, T., et al., Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzyme-induced calcite precipitation (BEICP). *Canadian Geotechnical Journal*, 2019. 56(6): p. 808-822.
- .29 Martin, K.K., T.H. Khodadadi, and E. Kavazanjian Jr. Enzyme-induced carbonate precipitation: Scale-up of bio-cemented soil columns. in *Geo-Congress 2020*. 2020. American Society of Civil Engineers Reston, VA.
- .30 Rahman, M.M., et al. A potentially sustainable weed control method using urease enzymes extracted from weeds. in *Proceedings of 22nd Australasian Weeds Conference*. 2022.
- .31 Yu, X., Laboratory and Field Testing in Support of Field Studies of Enzyme Induced Carbonate Precipitation (EICP) for Fugitive Dust Control. 2023, Arizona State University.
- .32 Chu, J., et al., Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand. *Acta Geotechnica*, 2014. 9(2): p. 277-285.
- .33 Deshmukh, R.K., J.F. Ma, and R.R. Bélanger, Role of silicon in plants. 2017, *Frontiers Media SA*. p. 1858.
- .34 Nam, I.-H., et al., Calcite precipitation by ureolytic plant (*Canavalia ensiformis*) extracts as effective biomaterials. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015. 19: p. 1620-1625.
- .35 Gao, Y., et al., Calcium carbonate precipitation catalyzed by soybean urease as an improvement method for fine-grained soil. *Soils and Foundations*, 2019. 59(5): p. 1631-1637.
- .36 Chen, Y., Y. Gao, and H. Guo, Bio-improved hydraulic properties of sand treated by soybean urease induced carbonate precipitation and its application Part 2: Sand-geotextile capillary barrier effect. *Transportation Geotechnics*, 2021. 27: p. 100484.
- .37 Lee, S. and J. Kim, An experimental study on enzymatic-induced carbonate precipitation using yellow soybeans for soil stabilization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020. 24(7): p. 2026-2037.
- .38 Pratama, G.B.S., et al. Application of soybean powder as urease enzyme replacement on EICP method for soil improvement technique. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. IOP Publishing.
- .39 Yuan, H., et al., Experimental study of EICP combined with organic materials for silt improvement in the yellow river flood area. *Applied Sciences*, 2020. 10(21): p. 7678.
- .40 Javadi, N., et al., EICP treatment of soil by using urease enzyme extracted from watermelon seeds, in *IFCEE 2018*. 2018. p. 115-124.