

Improving Soil Surface Resistance and Stability Using EICP Process

Sepideh Aghaalizadeh¹ *, Farzin Kalantary¹, Faezeh Ghanati²

¹ Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Valiasr St., Mirdamad Cr., Tehran, Iran.

² Department of Plant Biology, Faculty of Biological Science, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.

ABSTRACT: In recent years, soil surface erosion, especially by wind, has increased the area of deserts and increased problems for the ecosystem. Using biological methods to strengthen the soil's surface is a new way to prevent soil erosion. In this study, crude extract of soybean shoots has been used as a rich source of urease enzyme in the process of enzyme induced calcium carbonate precipitation (EICP). In this process, urea is hydrolyzed by urease enzyme and then the produced carbonate is combined with calcium in the EICP solution to produce calcium carbonate which acts as a binder for soil particles. The plant extract is a suitable substitute for pure urease enzyme or enzyme obtained by bacteria, which is costly to prepare. Three types of soils have been sprayed with EICP solution for biocementation using the EICP process and soil strength measurement test has been performed on the soil using a penetrometer. The thickness of the crust formed by the spraying of the solution has been measured. The results show that the method used increases the soil surface resistance and is a suitable method to prevent soil erosion.

Review History:

Received: Jun. 19, 2024

Revised: Jul. 25, 2025

Accepted: Aug. 22, 2025

Available Online: Sp. 06, 2025

Keywords:

EICP

Erosion

Retrofitting

Penetrometer

Sand

1- Introduction

In recent years, numerous applications for biocementation technology have been reported. These applications cover a wide range of fields, such as pollutant removal [1], soil improvement [2], self-healing of conventional concrete [3], preservation and restoration of historic structures [4], and prevention of surface soil erosion [5].

Wind erosion significantly contributes to the degradation of soil and the environment, as well as to air pollution, the movement of suspended particles, and their accumulation in irrigation and drainage systems.

In this research, a plant extract formulated with phosphate buffer (as a source of urease enzyme) was used in the biological biocementation process by the enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP) method. The effectiveness of the crude plant extract as an economical alternative in comparison to other established sources in the EICP process was assessed.

Three types of soil were evaluated to investigate the performance of the EICP process using the spray method. Soil surface resistance testing was performed on the treated soils using a pocket penetrometer, and the thickness of the formed crust was measured. Unconfined compressive strength testing was also performed on the soil samples.

2- Test methods and results

2- 1- Soil surface resistance measurement test

In this study, soybean aerial part extract with urease enzyme activity $9.355 \times 10^{-3} (\Delta \text{Abs } 340\text{nm})/(\mu\text{g protein ml}^{-1})$ was utilized. For the extraction of soybean aerial parts, phosphate buffer at a concentration of 20 mM was utilized [6]. The characteristics of the treated soils are evident in Figure 1.

Eight cylindrical samples with a diameter of 40 cm and a height of 20 cm were prepared from each soil type. The EICP solution was sprayed in varying volumes onto cylindrical samples of prepared soil. After 21 days, the surface resistance of the improved samples was examined using a pocket penetrant test (Standard: ASTM D1558. D2573).

2- 2- The measurement of the treated soil's unconfined compressive strength

Three cylindrical samples were made for each soil in order to determine its unconfined compressive strength. The cylindrical samples were injected with EICP solution. The strength measurement test was carried out following the samples' drying.

*Corresponding author's email: saghaalizadeh@email.kntu.ac.ir

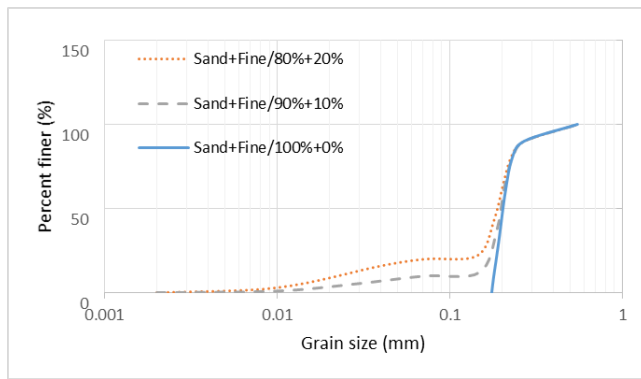


Fig. 1. Soil grain size characteristics

3- Costs of production of 1 liter of crude soybean extract (containing urease enzyme)

The preparation of one liter of crude soybean extract for the EICP process costs about 17,000 rials.

4- Cost of preparing one liter of solution containing pure urease enzyme

According to the EICP study, 0.25 to 5 grams of enzymes are used in the EICP process to produce one liter of solution containing enzymes [7-13]. According to the prices reported by the sellers, the cost of preparing one gram of urease enzyme (Merck) is over twenty million Rials.

5- Discussion and analysis of results

In this study, soybean aerial part extract was used as a source of urease enzyme in the EICP process. It is also more cost-effective and easier to prepare than pure enzyme. Numerous studies have confirmed that spraying EICP solution increases soil surface resistance. These studies show a correlation between soil erodibility indicators and an increase in soil surface resistance. Additionally, soil erodibility parameters decrease as surface resistance rises [14-16]. The penetrometer's maximum resistance for SP soil in this investigation was approximately 360 kPa. The UCS test results show that the strength of the improved soil decreased as the percentage of fine-grained soil (less than 0.075 mm) increased and the percentage of sand soil decreased. The Tung Hoang et al. study found similar outcomes for varying soil grain sizes [17].

6- Suggestions

- To further investigate the effectiveness of using crude soybean extract to increase soil surface resistance, solutions with different concentrations of calcium chloride and urea should be used in the EICP process. The optimal concentration of materials in this process should be investigated.
- The process of surface erosion should be examined using wind tunnel testing.

7- Conclusions

The resistance measured by the surface penetrant test and the thickness of the layer that forms decrease with increasing silt content in sandy soil under the same conditions as when EICP solution is sprayed on it.

Increasing the spraying recurrence results in higher surface resistance of the soil and a thicker crust formation in the samples.

The experiments in this study demonstrate the effectiveness of crude soybean extract as a source of urease, which is easier and cheaper to prepare than other methods.

According to the results, this method can be used as an effective method to control surface soil erosion.

References

- [1] Hammes, F., et al., Calcium removal from industrial wastewater by bio-catalytic CaCO_3 precipitation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 2003. 78(6): p. 670-677.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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(1-2): p. 139-145.
- [5] Movahedan, M., N. Abbasi, and M. Keramati, Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian Journal of Soil Science*, 2012. 1(2): p. 81-86.
- [6] 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.
- [7] Kavazanjian, E. and N. Hamdan, Enzyme Induced carbonate precipitation (EICP) columns for ground improvement, in *IFCEE 2015*. 2015. p. 2252-2261.
- [8] Khodadadi Tirkolaei, H., et al., Crude urease extract for biocementation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020. 32(12): p. 04020374.
- [9] Putra, H., H. Yasuhara, and N. Kinoshita, Applicability of natural zeolite for NH-forms removal in enzyme-mediated calcite precipitation technique. *Geosciences*, 2017. 7(3): p. 61.
- [10] Hamdan, N., et al., Hydrogel-assisted enzyme-induced carbonate mineral precipitation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016. 28(10): p. 04016089.
- [11] 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.
- [12] Knorr, B., Enzyme-induced carbonate precipitation for the mitigation of fugitive dust. 2014: Arizona State University.
- [13] 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.
- [14] Almajed, A., et al., Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique. *Soils and Foundations*, 2020. 60(2): p. 356-371.
- [15] Rahman, M.M., et al., A potentially sustainable weed control method using urease enzymes extracted from weeds. 22nd Australasian Weeds Conference, Adelaide, 2022.
- [16] 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.
- [17] 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.



بهبود مقاومت و پایداری سطحی خاک با استفاده از فرایند EICP

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

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۲- دانشکده علوم زیستی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

کلمات کلیدی:

EICP

فرسایش

مقاوم سازی

نفوذ سنج جیبی

ماسه

خلاصه: 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 مسئله‌ی 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.

۱- مقدمه

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 میکروارگانیزم‌ها کنترل کرد. در نتیجه این فرایند موجب تولید الگویی 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 می‌

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saghaalizadeh@email.kntu.ac.ir



توانند 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 شبکه های 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 روش های آماده سازی در سطح تحت اثر فرسایش باد در ماسه ی خوب دانه بندی شده پرداختند [۹]. در این تحقیقات سینی‌های خاک با نمونه هایی 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 Sporosar-cina 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 خاک های 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 سرعت های 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) می‌باشد که به لحاظ اقتصادی گران می‌باشد 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 می‌باشد و فعالیت این آنزیم موجب تولید کلیسیت و آراگونیت در محیط خاک گردید. تحقیقات آنها نشان داد که این ماسه های 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 می‌باشند. مقاومت فشاری ماسه‌های پایدار شده زیستی بستگی به تراکم آنزیم اوره‌آز و غلظت Ca^{2+} و اوره داشت.

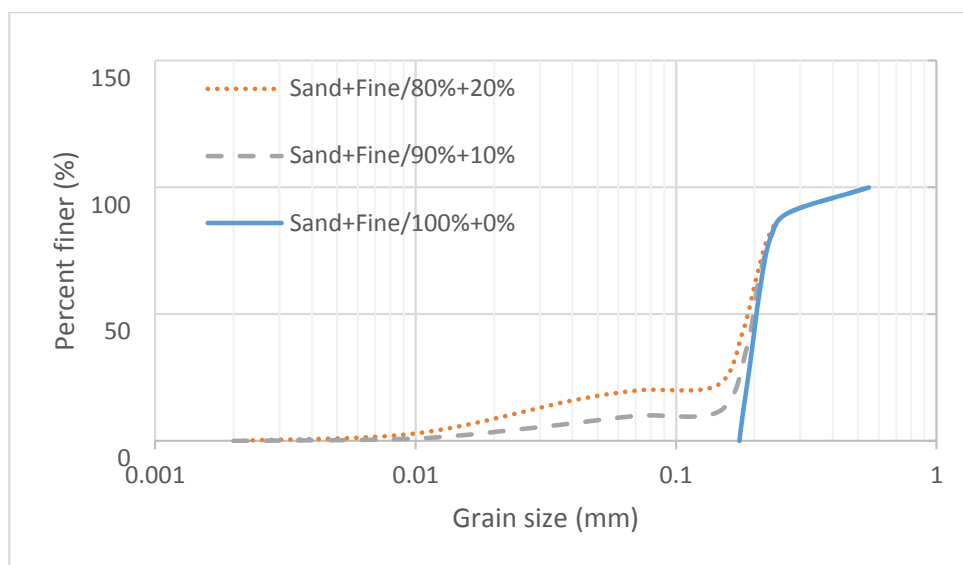
در این تحقیق از عصاره‌ی گیاهی تهیه شده با بافر فسفات (به عنوان منبع آنزیم اوره‌آز) در فرایند بیوسیمان‌تاسیون زیستی به روش ترسیب کلسیم کربنات القایی با استفاده از آنزیم اوره آز (EICP) استفاده گردیده است. کارایی عصاره‌ی خام گیاهی به عنوان منبع ارزان نسبت به سایر منابع شناخته شده در فرایند EICP مورد ارزیابی 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 عمل‌آوری شده انجام شده و ضخامت پوسته تشکیل شده اندازه گیری شد. همچنین آزمایش سنجش مقاومت فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌های حاکی 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 اوره‌آزی در عصاره‌ی استفاده شده

از اندام هوایی گیاه سویا برابر $\text{Abs}_{340\text{nm}} / \mu\text{g protein ml}^{-1}$ 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). روش آزمایش به این صورت می باشد که از هر نوع خاک، هشت نمونه ی استوانه‌ای با قطر ۴۰ cm و ارتفاع ۲۰cm آماده گردید. در ابتدا خاک



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

Fig. 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



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

Fig. 2. Soil sample treated with the EICP process

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 ۲۰ mM و کلسیم کلرید و اوره با غلظت ۱ 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 ۰/۵ 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

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

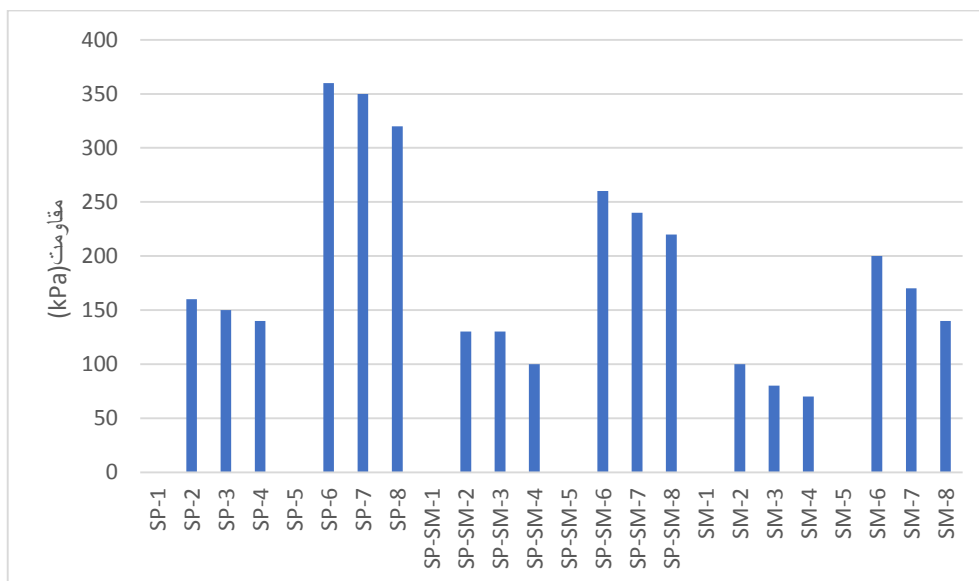
جدول ۲. نتایج آزمایش نفوذ سنج برای سنجش مقاومت سطحی خاک

Table 2. Penetrometer test results for measuring soil surface resistance

نمونه	دفعات تکرار پاشش	حجم پاشش در هر ۲۴ ساعت (mL)	غلظت کلسیم کلرید و اوره در محلول پاششی (M)	میانگین ضخامت پوسته (mm)	میانگین مقاومت نفوذ سنج (kPa)
SP-1	۱	۵۰۰	۰	۰	۰
SP-2	۱	۵۰۰	۱	۱۴	۱۶۰
SP-3	۱	۵۰۰	۱	۱۲	۱۵۰
SP-4	۱	۵۰۰	۱	۱۲	۱۴۰
SP-5	۳	۵۰۰	۱	۰	۰
SP-6	۳	۵۰۰	۱	۲۹	۳۶۰
SP-7	۳	۵۰۰	۱	۲۸	۳۵۰
SP-8	۳	۵۰۰	۱	۲۷	۳۲۰
SP-SM-1	۱	۵۰۰	۰	۰	۰
SP-SM-2	۱	۵۰۰	۱	۱۰	۱۳۰
SP-SM-3	۱	۵۰۰	۱	۹	۱۳۰
SP-SM-4	۱	۵۰۰	۱	۶	۱۰۰
SP-SM-5	۳	۵۰۰	۰	۰	۰
SP-SM-6	۳	۵۰۰	۱	۲۱	۲۶۰
SP-SM-7	۳	۵۰۰	۱	۲۱	۲۴۰
SP-SM-8	۳	۵۰۰	۱	۱۸	۲۲۰
SM-1	۱	۵۰۰	۰	۰	۰
SM-2	۱	۵۰۰	۱	۷	۱۰۰
SM-3	۱	۵۰۰	۱	۵	۸۰
SM-4	۱	۵۰۰	۱	۵	۷۰
SM-5	۳	۵۰۰	۰	۰	۰
SM-6	۳	۵۰۰	۱	۱۵	۲۰۰
SM-7	۳	۵۰۰	۱	۱۳	۱۷۰
SM-8	۳	۵۰۰	۱	۱۰	۱۴۰

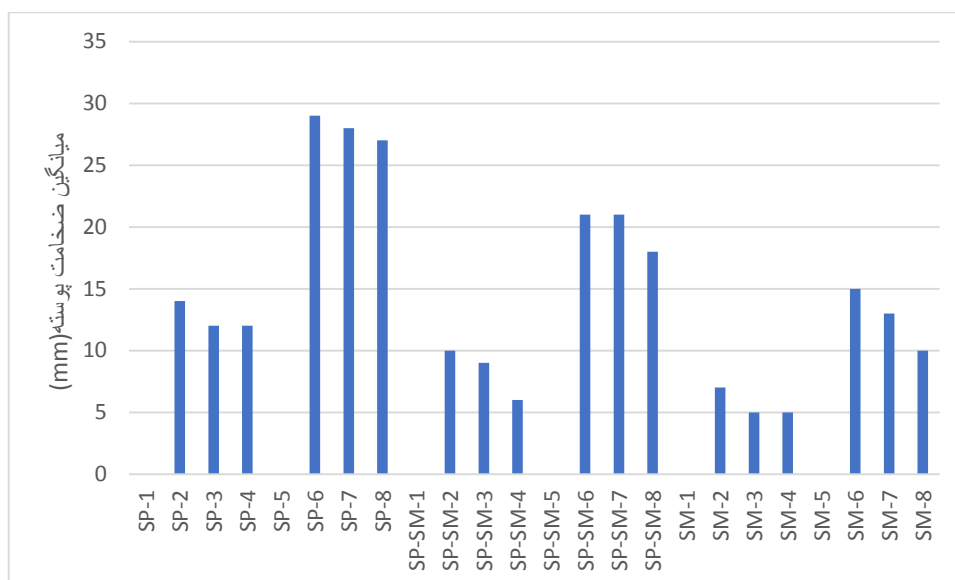
بار پس از پایان عمل اسپری کردن ظرف اسپری با محلول HCL شسته شد تا کلسیم کربنات ترسیبی مسیر اسپری را مسدود نکند. نمونه ها به مدت ۲۱ روز در محیط آزمایشگاه و در دمای محیط باقی ماندند تا خشک گردند و در نهایت در روز بیست و یکم با آزمایش نفوذ سنج جیبی (استاندارد: ASTM D1558.D2573) برای بررسی چگونگی تغییر مقاومت 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 ۳. میانگین مقاومت نفوذ سنج برای ۲۴ نمونه

Fig. 3. Average penetrant strength for 24 samples



شکل ۴. میانگین ضخامت پوسته برای ۲۴ نمونه خاک

Fig. 4. Average crust thickness for 24 soil samples



شکل ۵. نفوذ سنج جیبی مورد استفاده

Fig. 5. Pocket penetrator used

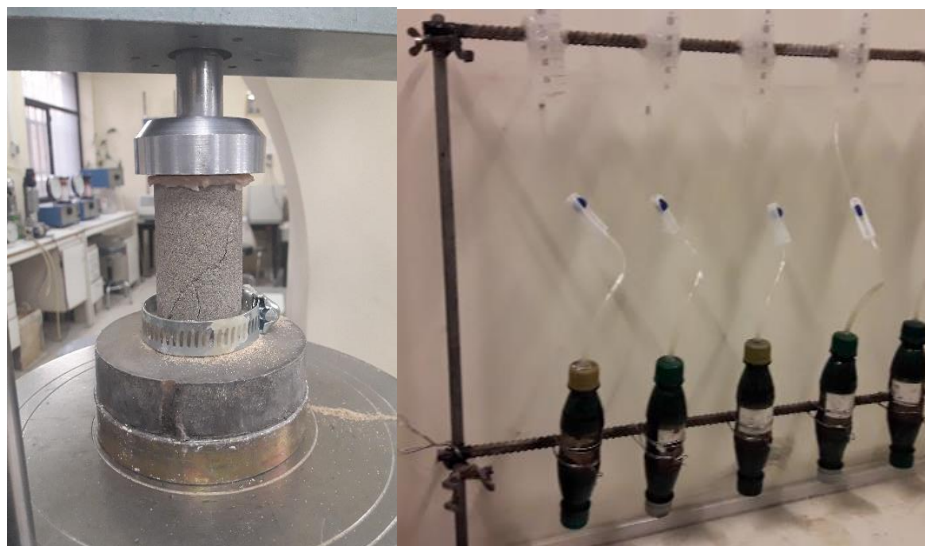
که غلظت هر دو ماده ی افزودنی ۱ میلی مولار استفاده شد. محلول آماده به نمونه استوانه‌ای آماده شده تزریق شد. پس از بیست و چهار ساعت محلول درون نمونه زهکشی گردید (شکل ۶) و مراحل تزریق دوباره تکرار شد. این عمل سه بار تکرار گردید. در نهایت یک هفته نمونه در دمای اتاق باقی ماند. پس از یک هفته نمونه ها از قالب 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 نمونه‌ها 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.

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 میلی‌متر محلول کلسیم کلرید و ۵ میلی لیتر محلول Fe-EDTA استفاده می شود. در جداول ۳، ۴، ۵ و ۶ مواد

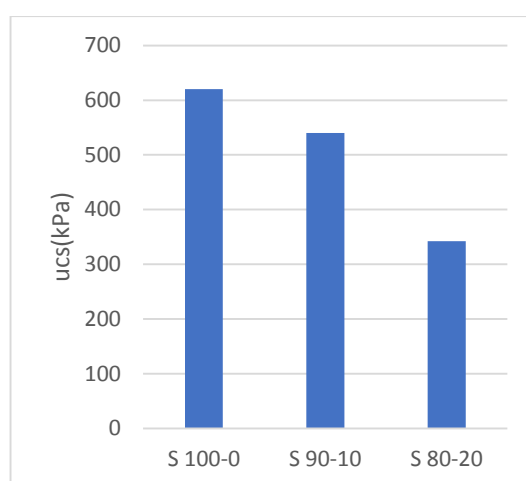
۲-۲- سنجش مقاومت فشاری محصور نشده ی خاک عمل آوری شده به روش EICP

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 ۰/۰۱ 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 حدوداً ۱۴۷ g بود. به هر پیاله ده درصد وزن آن که تقریباً ۵ 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 ۲۰ 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 عمل آوری 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 ۴ سانتی گراد است سی میلی لیتر از آن را برداشته و بلافاصله اوره و کلسیم کلرید به آن افزوده شد به صورتی



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

Fig. 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)

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

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. 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

تشکیل دهنده محلول های مذکور (استوک ها) ثبت گردیده است. 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 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 ₄ NO ₃ (Merck)	۸/۰۴	۸۰۰۰
NaH ₂ PO ₄ (Merck)	۱۲/۱۸	۶۴۰۰
K ₂ SO 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 ₃ BO ₃ (Merck)	۳۰۲۰	۲۱۰۰
MnSO ₄ .H ₂ O (Merk)	۱۵۲۰	۱۰۰۰۰
CuSO ₄ .5H ₂ O (Merck)	۷۵	۷۵۰۰
ZnSO ₄ .7 (Merck)H ₂ O	۲۰۱	۷۵۵۰
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ 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)
CaCl ₂ .2H ₂ 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

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)
مواد مربوط به تهیه بافر فسفات		
Na ₂ HPO ₄ (Merck)	۱۱۰۷	۲۰۰۰
NaH ₂ PO ₄ (Merck)	۱۴۶۳	۶۴۰۰

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

Table 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

۵- بحث و تحلیل نتایج

در اکثر مطالعاتی که از فرایند EICP برای عمل آوری خاک ها استفاده شده است از آنزیم اوره‌آز خالص، عصاره‌ی بذر سویا و بذر گیاهان دیگر (به عنوان منبع غنی از آنزیم اوره‌آز) 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 عصاره‌ی اندام هوایی گیاه سویا (که تهیه ی آن نسبت به مواد مذکور مقرون به صرفه‌تر و آسان‌تر است) برای بررسی کارایی این عصاره در فرایند EICP به عنوان منبع آنزیم اوره‌آز استفاده شد. استفاده از عصاره خام گیاه سویا با توجه به نتایج مربوط به رسوب‌گذاری و مقاومت سطحی به دست آمده برای خاک‌های عمل‌آوری شده قابل قبول می‌باشد.

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

شده برای برآورد هزینه تهیه عصاره‌ی 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 ۰/۲۵ گرم تا ۵ گرم آنزیم در فرایند مذکور استفاده می‌گردد [۲۱-۱۵]. که مطابق با قیمت اعلام شده از شرکت های فروشنده هزینه تهیه هر گرم آنزیم اوره از (Merck) از بیست میلیون ریال بالاتر است. در نتیجه تهیه آنزیم به روش استفاده از عصاره‌ی خام گیاهی مقرون به صرفه می باشد. حداقل نسبت هزینه های استفاده از آنزیم خالص به عصاره‌ی خام حاوی آنزیم برابر ۳۰۰ می باشد (هزینه نیروی انسانی و اصطحلاک دستگاه های به کار گرفته شده در تهیه عصاره‌ی خام گیاه سویا در نظر گرفته نشده است).

گزارش کرده اند [۲۶]. نتایج تست UCS نشانگر آن است با افزایش درصد بخش ریزدانه خاک (کمتر ۰/۰۷۵ 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 ماسه ای، هنگام پاشش محلول EICP موجب مقاوم شدن سطحی خاک می گردد. همچنین در شرایط یکسان عمل پاشش محلول EICP به خاک ماسه ای، 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 می گردد. با افزایش دفعات تکرار عمل پاشش در نمونه ها مقاومت سطحی خاک و ضخامت پوسته ی تشکیل شده بیشتر می گردد. همچنین سنجش مقاومت فشاری محصور نشده خاک های عمل آوری شده به روش EICP نیز نشانگر افزایش مقاومت خاک ماسه ای می باشد که آن هم با افزایش درصد وزنی خاک ریزدانه کاهش می یابد. آزمایش ها نشانگر

فرسایش پذیر رده بندی شده است [۲۰، ۲۷، ۲۸]. در این تحقیق نیز از خاک ماسه ای 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 و SP-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 نمونه ی خاک ماسه ای که سه بار با محلول EICP (با غلظت کلسیم کلرید M 1 و اوره M ۱/۵) 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 شاخص های 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 ماسه ای 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 [۳۲] 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 10^{-4} m/s 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

stabilization: application of *Sporosarcina pasteurii* for fugitive dust control, in *Geo-frontiers 2011: advances in geotechnical engineering*. 2011. p. 4002-4011.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Chen, F., et al., Biostabilization of desert sands using bacterially induced calcite precipitation. *Geomicrobiology Journal*, 2016. 33(3-4): p. 243-249.
- [13] 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.
- [14] Almajed, A., et al., Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique. *Soils and Foundations*, 2020. 60(2): p. 356-371.
- [15] Kavazanjian, E. and N. Hamdan, Enzyme induced carbonate precipitation (EICP) columns for ground improvement, in *IFCEE 2015*. 2015. p. 2252-2261.
- [16] Hamdan, N., et al., Hydrogel-assisted enzyme-induced carbonate mineral precipitation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016. 28(10): p. 04016089.
- [17] Putra, H., H. Yasuhara, and N. Kinoshita, Applicability of natural zeolite for NH-forms removal in enzyme-mediated calcite precipitation technique. *Geosciences*, 2017. 7(3): p. 61.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Knorr, B., Enzyme-induced carbonate precipitation

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.

منابع

- [1] Hammes, F., et al., Calcium removal from industrial wastewater by bio-catalytic CaCO_3 precipitation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2003. 78(6): p. 670-677.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Fryrear, D.W. and E. Skidmore, Methods for controlling wind erosion. *Soil erosion and crop productivity*, 1985:24: p. 443-457.
- [8] Larsson, M., Dune: Arenaceous Anti-Desertification Architecture, in *Macro-engineering Seawater in Unique Environments*. 2010, Springer. p. 431-463.
- [9] Meyer, F., et al., Microbiologically-induced soil

- 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.
- for the mitigation of fugitive dust. 2014: Arizona State University.
- [21] Khodadadi Tirkolaei, H., et al., Crude urease extract for biocementation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020. 32(12): p. 04020374.
- [22] 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*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Aghaalizadeh1 , F. Kalantary, F. Ghanati, Improving Soil Surface Resistance and Stability Using EICP Process, Amirkabir J. Civil Eng., 57(6) (2025) 1093-1110.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23283.8142](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23283.8142)



