

## ارزیابی روشهای نوین زیستی بر پایه رسوب کربنات کلسیم در کنترل فرسایش

حمیده غفاری<sup>1\*</sup>، سید محمدعلی زمردیان<sup>2</sup>

1- دانشآموخته کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، gh.hamideh1987@gmail.com  
2- دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز، mzomorod@shirazu.ac.ir

### چکیده

دو پدیده فرسایش هیدرولیکی و بادی خاک همواره یکی از چالشهای مهم کشور و منطقه، ناشی از بحرانهای آبی موجود، به شمار میرود لذا بررسی و ارائه راهکارهای مقابله با این دو پدیده فراگیر ضروری است. در پژوهش حاضر با معرفی دو روش نوین MICP و EICP، عملکرد آن‌ها در کنترل فرسایش خاک ماسه‌ای بررسی شده است. نتایج بیانگر عملکرد مناسب دو روش در بهبود مقاومت خاک است به گونه‌ای که فرسایش بادی کاملاً کنترل شد. در رابطه با کنترل فرسایش هیدرولیکی با روش MICP در بهینه‌ترین حالت ضریب فرسایش‌پذیری خاک به میزان 97% کاهش یافت که این در روش EICP به میزان 98.47% می‌باشد. نتایج از طریق آنالیز تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی مورد تأیید واقع شد.

**واژه‌های کلیدی:** ضریب فرسایش‌پذیری، رسوب کربنات کلسیم، دستگاه تابع فرسایش، تونل باد

### 1- مقدمه

توسعه شهرنشینی، تغییر اقلیم و دخالت‌های بیرویه و بدون کارشناسی همه‌جانبه انسان فراتر از توان و تراز اکولوژیک، از طیفی منجر به کم آب شدن و خشک شدن تالاب‌ها و رودخانه‌های مهم کشور و به دنبال آن وقوع پدیده گرد و غبار و ریزگرد به خصوص در جنوب غرب و شرق کشور شده است و از طرف دیگر منجر به فرسایش کناره‌های رودخانه‌ها و پر شدن مخازن سدها از رسوب و درنهایت کم شدن ظرفیت نگه داشت آب شده که این تهدیدی در جهت سلامت جوامع انسانی به خصوص در مواقع سیلابی و همچنین سلامت رودخانه و محیط‌زیست آن می‌باشد. از طرف دیگر هزینه‌های زیاد لایروبی و تخلیه رسوب از مخازن سدها و مشکلات دیگر را به بار آورده است. بدون شک که عوامل طبیعی نیز این مسائل را تشدید نموده است. سالانه بیش از 100 میلیون مترمکعب از گنجایش مفید سدها بر اثر انباشته شدن رسوبات کاسه می‌شود [1] که این در شرایط کنونی قطعاً افزایش نموده است. بر اساس گزارش کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ سالانه به طور متوسط بین 5/0 تا 1 درصد از حجم کل ذخیره سدهای موجود در اثر رسوب‌گذاری از دست می‌رود [2]. لازم به ذکر است که علاج واقعه را قبل از وقوع بحران باید چاره کرد با این حال ارائه راه‌حل‌های کنترل فرسایش خاک ضروری است. همچنان که راهکارهای زیادی توسط محققین به مرحله اجرا رسیده است که طرح‌های آبخیزداری و کاشت پوشش گیاهی (علفی، بوته‌ای، درختچه‌ای و درختی) کم آبر، مؤثرترین راه‌حل می‌باشد. علاوه بر این راه‌حل‌هایی جهت مقابله با پدیده گرد و غبار ارائه شده است که علاوه بر حل نکردن مشکل و موقتی و مَسکنی بودن این راه‌حل‌ها، مشکل را نیز دو چندان نموده است که مهم‌ترین آن‌ها عدم سازگاری با محیط‌زیست و اثرات مضر آن‌ها روی سلامت افراد می‌باشد [3]. بنابراین روی آوردن به روشهای پایدار، با تقلید از طبیعت، جهت ترمیم طبیعت به نظر مؤثرتر و تکمیل کننده روشهای مرسوم باشد. در همین راستا در مقاله حاضر دو روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم در خاک (MICP<sup>1</sup>) و روش الهام گرفته از آن یعنی روش رسوب کربنات کلسیم

<sup>1</sup> - Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation

بر پایه استفاده از آنزیم اوره آز به صورت آزاد در خاک (EICP<sup>1</sup>) جهت کنترل فرسایش خاک بررسی شده است. اساس این دو روش دو واکنش شیمیایی در خاک است که در ذیل ارائه شده است:

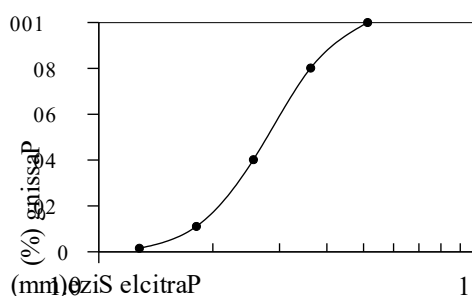


در روش MICP از باکتری‌هایی که به صورت طبیعی در نهشته‌های خاکی زیست می‌کنند در تولید آنزیم اوره آز، استفاده می‌شود که این آنزیم، اوره موجود در محیط را هیدرولیز می‌نماید که با توجه به رابطه 1 یونهای کربنات و آمونیوم ایجاد می‌شود. در صورت وجود یون کلسیم در خاک، کربنات کلسیم به عنوان محصول نهایی در خاک رسوب می‌کند. کربنات کلسیم همانند چسب عمل می‌نماید و با رسوب بین ذرات خاک، ساختار خاک را بهبود می‌بخشد. این پدیده در طبیعت به صورت خود به خود شکل می‌گیرد و پایه شکل‌گیری سنگ‌های آهکی و ماسه‌سنگ‌ها و پدیده استراماتولیتها می‌باشد [4]. روش EICP با الگو گرفتن از روش MICP از آنزیم اوره آز به صورت استخراج شده از انواع گیاهان و میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌کند. مطالعات زیادی نیز روی این دو روش انجام شده است از جمله [5، 6، 7، 8، 9، 10]. در پژوهش حاضر به مقایسه و بررسی عملکرد دو روش ذکر شده در کنترل فرسایش خاک ماسه روان با بهره‌گیری از دستگاه تایع فرسایش هیدرولیکی (EFA<sup>2</sup>) و همچنین تونل باد پرداخته شده است و با بررسی بازدهی دو روش در افزایش مقاومت خاک، زمینه اجرایی و اقتصادی موضوع مورد بحث قرار گرفته است.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- خاک مورد بررسی

خاک استفاده شده از نوع ماسه سیلیسی روان با دانه‌بندی یکنواخت است که فاقد هرگونه مواد شیمیایی و املاح می‌باشد. نمودار دانه‌بندی و خصوصیات فیزیکی خاک به ترتیب در شکل 1 و جدول 1 ارائه شده است.



شکل 1. منحنی دانه‌بندی خاک

جدول 1. مشخصات خاک

| Property        | Value                 |
|-----------------|-----------------------|
| D <sub>50</sub> | mm 0.28               |
| $\rho_{d\max}$  | 1661 $\frac{kg}{m^3}$ |
| e               | 0.675                 |
| G <sub>s</sub>  | 2.65                  |
| Cu              | 1.7                   |
| Cc              | 0.98                  |

<sup>1</sup> - Enzyme Induced Calcium Carbonate Precipitation

<sup>2</sup> - Erosion Function Apparatus

## 2-2- میکروارگانیزم استفاده شده

میکروارگانیزم مورد استفاده از نوع باکتری اسپوروسارسینا پاستوری (PTCC 1645) است که یک نوع باکتری گرم مثبت، اسپوردار و غیر بیماری‌زا است که به صورت طبیعی در نهشته‌های خاکی زیست میکند. سویه این باکتری از مرکز کلکسیون قارچ و باکتری ایران تهیه و در آزمایشگاه کشت و رشد داده شد. از محیط کشت مایع حاوی 20 گرم بر لیتر عصاره مخمر و 10 گرم بر لیتر آمونیوم کلراید با pH=8.5 استفاده شد و تحت دمای 28.5°C در دستگاه شیکرانکوباتور به مدت 48 ساعت با سرعت 150 دور بر دقیقه رشد داده شد. جزئیات بیشتر مربوط به نحوه کشت و رشد باکتری در پژوهش غفاری و زمردیان [3] ارائه شده است.

## 2-3- آنزیم استفاده شده

در این پژوهش از آنزیم اوره آز استخراج شده از مغز دانه‌های هندوانه استفاده شده است. دانه هندوانه منبعی غنی از آنزیم اوهاز است که به دلیل دسترسی آسان و کم کردن هزینه‌ها از این منبع، که به عنوان ضایعات محصولات غذایی به شمار میرود استفاده گردید. نحوه استخراج به این صورت بود که ابتدا مغزهای له شده در بافر فسفات 20 میلی‌مولار با 2/7 = pH در دمای 4 درجه سانتی‌گراد برای یک شبانه‌روز قرار داده شد. سپس به مدت 15 دقیقه با سرعت 13000 دور بر دقیقه، تحت دمای 4°C سانتریفیوژ و رسوب جداسازی شد. به منظور کم کردن هزینه‌ها خالص‌سازی آنزیم در دو مرحله انجام گرفته است و آنزیم استخراج شده در بافر فسفات رقیق و برای تزریق به خاک مورد استفاده قرار گرفت. جزئیات بیشتر در پژوهش [11] ارائه شده است. فعالیت آنزیم اوره‌از با استفاده از روش اسپکتروفتومتری در طول موج 560 nm تعیین شد [12]. بر همین اساس میزان فعالیت آنزیم اوره‌از در دمای 50°C که دمای نگهداری خاکهای تیمار شده میباشد برابر 8/2 U/mL بدست آمد.

## 2-4- دستگاه تابع فرسایش

دستگاه تابع فرسایش EFA توسط et al. Briaud [13, 14] به منظور ارزیابی میزان فرسایش هیدرولیکی خاک، توسعه یافته است. بنابراین با الگوبرداری از این روش، دستگاه تابع فرسایش در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز ساخته شد. اساس کار این روش به این صورت است که با عبور دبی‌های مشخص روی سطح خاک درون قالب متصل شده در کف فلوم، در مدت زمان مشخص و محاسبه تنشهای برشی وارد شده به خاک، میزان فرسایش خاک اندازه‌گیری می‌شود. فلوم مورد استفاده دارای طول 2 m و مقطع عرضی مستطیلی با ابعاد 0.12x0.06 m بود که در کف آن، یک حفره به قطر 6/101 mm قرار داشت که قالب خاک در آن تعبیه میشد. نمای جانبی و پلان دستگاه تابع فرسایش در شکل 2(a و b) ارائه شده است. آزمایشها با 3 تکرار انجام شدند و بعد از هر تکرار میزان فرسایش‌پذیری خاک به صورت حجمی از طریق یک سرنگ آب، اندازه‌گیری شد. تنش برشی با استفاده از رابطه 2 بدست می‌آید. در این رابطه،  $\tau$  تنش برشی ( $N/m^2$ )،  $\rho$  چگالی آب ( $1000 kg/m^3$ )،  $V$  سرعت متوسط جریان ( $m/s$ ) در لوله و  $f$  ضریب اصطکاک است که با استفاده از دیاگرام مودی بدست می‌آید. سرعت فرسایش خاک ( $E$ , mm/hr) با استفاده از رابطه (3) بدست می‌آید.

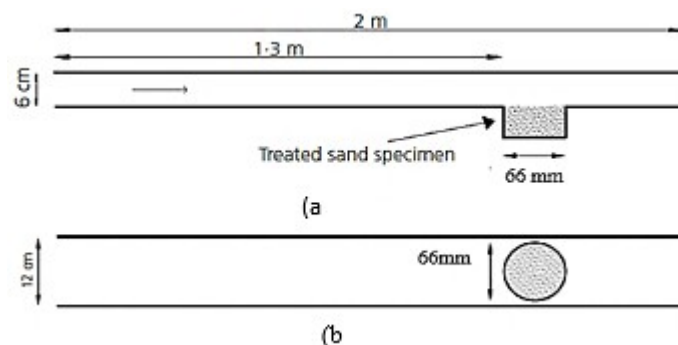
$$\tau = \frac{1}{8} f \rho v^2 \quad (2)$$

$$E = \frac{V_e}{A_s \cdot \Delta t} \quad (3)$$

$V_e$ : حجم آب مورد نیاز برای پر شدن حفره‌ها ( $mm^3$ )،  $A_s$ : سطح نمونه خاک ( $mm^2$ )،  $\Delta t$ : مدت زمان آزمایش (hr)

تابع فرسایش رابطه بین تنش برشی هیدرولیکی و سرعت فرسایش است. تنش برشی بحرانی ( $\tau_c$ ) با توجه به محل برخورد منحنی تابع فرسایش با محور افقی بدست می‌آید.

ضریب فرسایش پذیری خاک ( $k$ ) به عنوان شیب منحنی تابع فرسایش معرفی می‌شود. هرچه میزان ضریب فرسایش پذیری خاک کمتر باشد مقاومت در برابر فرسایش بیشتر می‌باشد.



شکل 2- نمایی از دستگاه تابع فرسایش. (a) نمای عرضی. (b) نمای پلان

### 2-5- تونل باد

به منظور بررسی میزان فرسایش بادی از دستگاه تونل باد واقع در آزمایشگاه فرسایش بادی بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه شیراز استفاده شد (شکل 3). این تونل باد دارای طول 2.65m، عرض داخلی 0.3m و ارتفاع بازشدگی 0.4m است. جزئیات مربوط به تونل باد در پژوهش [15] ارائه شده است. این تونل باد پتانسیل تولید باد با ماکزیمم سرعت 25m/s را دارد که با استفاده از یک دستگاه بادسنج (مدل Lambrecht GmbH) در امتداد محور عمودی مرکزی تونل باد در موقعیت ارتفاعی 20 cm در بالای سینیهای خاک، اندازه گیری شده است. تخمین میزان کمی فرسایش، به صورت مشاهده چشمی و با بررسی میزان از دست رفتن جرم خاک اندازه گیری شد.



(ب)



(الف)

شکل 3. تونل باد استفاده شده، الف: مقطع طولی شامل (1) هرم ناقص، (2) مقطع آزمایش. (ب) موتور دمنده باد و دو عدد پخش کننده با نوارهای تیغهای شکل

### 3- روش انجام آزمایشها

آزمایشها شامل آماده سازی نمونه خاک ماسه تیمار شده با دو روش MICP و EICP است که عملکرد این دو روش در کنترل فرسایش خاک مشابه، با دستگاه تونل باد و همچنین دستگاه تابع فرسایش سنجیده شد. به منظور بررسی میزان فرسایش بادی، از سینیهای به ابعاد 50×30×2 سانتیمتر استفاده شد که خاک ماسهای به آرامی درون آنها ریخته و سطح آنها هموار می گردید. در نمونه خاکهای تیمار شده با روش MICP، محلول باکتری با غلظت  $10^7 \times 8$  cell/ml ( $OD_{600} = 1$ ) به میزان حجمی 1.5 برابر حجم خلل و فرج خاک به خاک اسپری شد و سپس محلول 0.5M و 0.75M اوره و کلسیم کلراید به عنوان محلول سممتاسیون همراه با 10 g/l آمونیوم کلراید، 3 g/l نوترینت برات و 2.12 g/l سدیم بی کربنات (به منظور تغذیه و رشد باکتری) به میزان حجمی برابر با محلول باکتری، به خاک اضافه شد. قالبهای دستگاه تابع فرسایش دارای قطر 101.6 mm بودند که پس از ریختن خاک درون قالبها محلول باکتری و سممتاسیون به خاک اضافه شدند و سپس نمونه خاکها در دستگاه ژرمیناتور تحت دمای 30

درجه به مدت زمان 60 روز نگهداری شدند. در روش EICP از محلول آنزیم اوره‌آز با غلظت 4g/l به همراه محلول سممتاسیون اوره و کلسیم کلراید با غلظت 0.5 و 1 مولار به شیوه مشابه با روش MICP به خاک اضافه شدند. با این تفاوت که نمونه خاکها در دستگاه ژرمیناتور تحت دمای 50 °C به مدت زمان 14 روز نگهداری شدند و پس از اتمام این دوره زمانی تحت آزمایش فرسایش بادی و هیدرولیکی قرار گرفتند. استراتژی‌های تزریق استفاده شده در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2- استراتژی‌های تزریق به کار گرفته شده

| روش بهسازی | تیمار | روز 1                     | روز 2            | روز 14               | روز 15     | روز 16         | روز 60               |
|------------|-------|---------------------------|------------------|----------------------|------------|----------------|----------------------|
| -          | شاهد  | محلول سممتاسیون           | تست فرسایش       | تست فرسایش           | تست فرسایش | تست فرسایش     |                      |
| EICP       | A     | آنزیم و سممتاسیون M 0.5   |                  | تست فرسایش بادی      |            |                |                      |
|            | B     | آنزیم و سممتاسیون M 1     |                  | تست فرسایش بادی      |            |                |                      |
| MICP       | C     | باکتری و سممتاسیون M 0.5  | تست فرسایش بادی  | تست فرسایش بادی      |            |                |                      |
|            | D     | باکتری و سممتاسیون M 0.75 | تست فرسایش بادی  | تست فرسایش بادی      |            |                |                      |
| EICP       | E     | آنزیم و سممتاسیون M 0.5   |                  | تست فرسایش هیدرولیکی |            |                |                      |
|            | F     | آنزیم و سممتاسیون M 1     |                  | تست فرسایش هیدرولیکی |            |                |                      |
| MICP       | G     | محلول باکتری              | سمتاسیون M 0.5 ن |                      |            |                | تست فرسایش هیدرولیکی |
|            | H     | محلول باکتری              | سمتاسیون M 0.5 ن |                      | باکتری     | سمتاسیون M 0.5 | تست فرسایش هیدرولیکی |

## 4- بحث و نتایج

### 4-1- نتایج مربوط به تست فرسایش

نتایج مربوط به فرسایش هیدرولیکی خاک با استفاده از دستگاه تایع فرسایش هیدرولیکی (EFA) با استفاده از هر دو روش MICP و EICP در جدول 3 ارائه شده است. پارامترهای مربوط به فرسایش پذیری خاک از جمله میزان تنش برشی بحرانی و ضریب فرسایش پذیری خاک به ترتیب در ستون دوم و سوم مشاهده می شود. با مقایسه تیمارهای هر دو روش با خاک شاهد متوجه می شویم که ضریب فرسایش پذیری خاک به میزان قابل توجهی کاهش یافته است و میزان تنش برشی بحرانی افزایش یافته است که این میزان افزایش در روش MICP، 6.6 برابر و در روش EICP، 9.5 برابر حاصل شده است. با بکارگیری تیمار E که مربوط به استراتژی اضافه کردن محلول آنزیم و سممتاسیون 0.5 M است میزان ضریب فرسایش پذیری به میزان 68.26% کاهش یافته است که با تغییر استراتژی تزریق و افزایش غلظت محلول سممتاسیون به 1M ضریب فرسایش پذیری خاک ماسه ای به میزان قابل توجه تر 98.47% کاهش پیدا نموده است. در روش MICP نیز با اضافه کردن محلول باکتری و سممتاسیون 0.5 M (تیمار G) تقریباً به میزان مشابه با روش EICP و به میزان 68% ضریب فرسایش پذیری کاهش یافته است. در این روش نیز با تغییر استراتژی تزریق به دو بار تزریق با فاصله زمانی 14 روز، به میزان 97% ضریب فرسایش پذیری کاهش پیدا کرده است. بنابراین هر دو روش تأثیر به سزایی در کنترل فرسایش خاک دارند که با بررسی استراتژی تزریق میتوان بهترین استراتژی در افزایش مقاومت خاک را مشاهده و به کار گرفت که این در مورد روش EICP افزایش غلظت تزریق و در روش MICP تزریق مرحله ای با غلظت های کم و همچنین در نظر گرفتن زمان کافی جهت رشد و تکثیر باکتری در خاک جهت رسوب بیشتر کربنات کلسیم بین دانه های خاک می باشد. نتایج حاصل با پژوهش [16] در افزایش مقاومت خاک با روش MICP هم خوانی دارد. در رابطه با تخمین میزان فرسایش بادی با استفاده از تونل باد هیچ گونه فرسایشی در سرعت های موجود باد و همچنین ماکزیمم سرعت باد (25 m/s) مشاهده نشد که نشانگر عملکرد بسیار مناسب دو روش موجود در مبارزه با فرسایش بادی می باشد. همچنان که پژوهش [7] عملکرد مناسب دو روش را در کنترل فرسایش خاک گزارش نموده است.

جدول 3. نتایج پارامترهای فرسایش پذیری هیدرولیکی خاک در استراتژی های مختلف تزریق در دو روش MICP و EICP

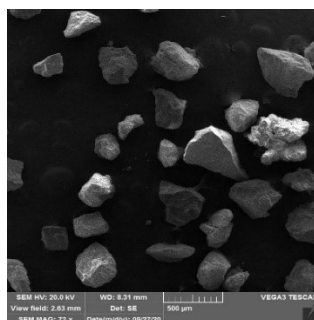
| تیمار | $\tau_c$ (Pa) | $k$<br>( $\frac{mm/hr}{N/m^2}$ ) | میزان افزایش<br>در تنش برشی<br>بحرانی | میزان کاهش در<br>ضریب<br>فرسایش پذیری<br>نسبت به نمونه<br>شاهد: % |
|-------|---------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| شاهد  | 23/0          | 818                              | -                                     | -                                                                 |
| E     | 19/1          | 66/259                           | 17/5                                  | 26/68                                                             |
| F     | 18/2          | 51/12                            | 5/9                                   | 47/98                                                             |
| G     | 46/1          | 259                              | 3/6                                   | 68                                                                |
| H     | 51/1          | 22                               | 6/6                                   | 97                                                                |

### 4-2- آنالیز عکس برداری SEM

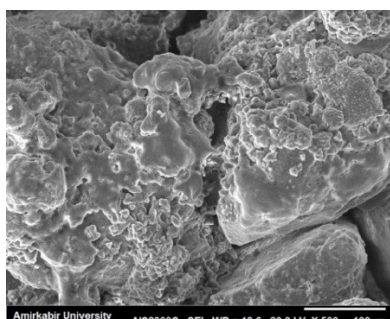
به منظور بررسی توزیع رسوب گذاری و اطمینان از شکل گیری رسوب کربنات کلسیم در خاک تیمار شده با هر دو روش MICP و EICP، از عکس برداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM<sup>1</sup>) استفاده شد و با تست SEM خاک شاهد مقایسه شد. شکل 4 (الف) عکس برداری در خاک شاهد را ارائه می دهد. مجزا بودن دانه های خاک از هم و دندانه ای و تیز

<sup>1</sup> - Scanning Electron Microscope

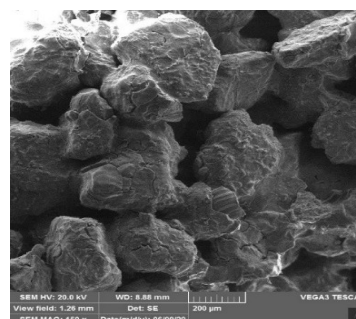
گوشه‌ای بودن دانه‌ها کاملاً قابل مشاهده می‌باشد. شکل 4 (ب و پ) به ترتیب عکس‌های خاک تیمار شده با روش EICP و MICP را نشان می‌دهد. با مقایسه این دو شکل با خاک شاهد، مشاهده می‌شود که بین دانه‌های خاک و همچنین در پیرامون آن‌ها چسب کریبات کلسیم ایجاد شده و فضای خالی بین ذرات به حداقل رسیده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل 4. تصاویر SEM گرفته شده از خاک: (الف) خاک شاهد، (ب) خاک تیمار شده با روش EICP در تزریق بهینه، (پ) خاک تیمار شده با روش EICP با تزریق بهینه

### 3-4- بررسی زمینه اجرایی و اقتصادی

مسئله هر روشی در کنار مزایا و محاسنی که می‌تواند نشان دهد بدون شک محدودیت‌هایی نیز دارد و این امری غیر قابل اجتناب است. روش‌های مرسوم در کنترل فرسایش خاک، محدودیت‌هایی را به اثبات رسانده‌اند از جمله هزینه‌های گزاف، عمر و دوام کم، پتانسیل آتش‌سوزی، خطر آلودگی محیط‌زیست، اثر سوء روی سلامتی افراد و غیره [3]. بکارگیری روش‌های نوین و سازگار با محیط‌زیست در کنترل فرسایش خاک، به دلیل اثبات محدودیت‌های روش‌های مرسوم و ضرورت پیدا کردن توجه به مباحث زیست‌محیطی در کشور، حائز اهمیت است. روش تزریق و رشد باکتریها در خاک به منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، یک روش نوین است که با الگوبرداری از طبیعت و تقلید از آن به حل مشکلات محیط‌زیستی و همچنین نحوه انجام فعالیتهای مداخله‌ای انسان در محیط‌زیست می‌پردازد و مسلماً هنوز جنبه‌هایی از آن ناشناخته است که ضرورت انجام مطالعات بیشتر به منظور شناخت محدودیتهای آن را می‌رساند. میکروارگانیسم مورد استفاده از نوع خاکزی، غیر بیماری‌زا، و محصول اصلی یا فرعی مضر ندارد و همچنین یک گونه اسپوردار است یعنی مقاوم در شرایط غیر مساعد و قابلیت سازگاری با محیط را دارد. در زمینه اجرایی بودن روش‌ها مسلماً ایراداتی وارد است از جمله در روش MICP شامل زمان‌بر بودن، مرطوب بودن محیط خاک در مقیاس باکتری. همچنین عدم توزیع یکنواخت رسوب کریبات کلسیم در خاک به خصوص در مقیاسهای بزرگ، محدودیت استفاده در خاکهای ریزدانه نظیر خاک سیلتی به دلیل عدم جابجایی آزادانه میکروارگانیسم در خاک [9، 17]، محدودیت استفاده از میکروارگانیسم‌های هوازی در عمق خاک، محدودیت‌های مربوط به تأمین مواد مغذی جهت فعالیت و همچنین اندرکنش آن با سایر میکروارگانیسم‌ها [10]. در هر حال در بسیاری از کشورها این روش به مرحله اجرا رسیده است که به منظور مطالعه بیشتر در زمینه اجرایی و اقتصادی بودن موضوع به پژوهش [3] ارجاع داده می‌شود. در روش EICP از آن‌زم به صورت

استخراج شده در محیط خاک استفاده می‌شود که مسلماً اجرای آن در مقیاس‌های بزرگ می‌تواند اقتصادی نباشد. اما این روش از پایداری نسبتاً خوبی در خاک برخوردار است که در شرایط دمایی کمتر از  $100^{\circ}\text{C}$  و همچنین شرایط غیر غرقابی، قابل توجه می‌باشد [18]. محدودیت این روش، وجود مهارکننده‌های فعالیت آنزیم اوره از در خاک می‌باشد. از جمله مهارکننده‌های فعالیت آنزیم اوره از، وجود میکروارگانیسم‌های تولید کننده آنزیم پروتئاز، ترکیبات ادتا ( $^1\text{EDTA}$ ) و ترکیبات دی متیل گلیسین ( $^2\text{DMG}$ ) در خاک است. از مزایای این آنزیم آلوستریک نبودن آن است بنابراین احتمال رخ دادن پدیده مهار پشورد<sup>3</sup> یا مکانیسم بازخورد منفی<sup>4</sup> فرآورده روی فعالیت آنزیم اوره‌از ممکن نمی‌باشد [19]. به صورت کلی روش MICP نسبت به روش EICP دارای اولویت است که از مهم‌ترین دلایل آن وجود سایت‌های هسته‌زایی<sup>5</sup> و همچنین پایداری بیشتر در درازمدت است. روشی مرسوم بیومهندسی از طریق کاشت گیاهان با مصرف آبی کم (علفی، بوته‌ای، درختچه‌ای و درختی) کارایی بسیار مناسبی در کنترل فرسایش خاک دارد. بنابراین به نظر می‌رسد که ترکیب روش‌های بیولوژی معرفی شده در این پژوهش با روش‌های بیومهندسی، اجرایی‌تر و در درازمدت کارایی آن‌ها در جلوگیری از فرسایش بیشتر قابل توجه باشد.

## 5- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک ماسه روان سیلیسی با بکارگیری دو روش MICP و EICP مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد این دو روش با استفاده از دستگاه تونل باد و همچنین دستگاه تابع فرسایش هیدرولیکی (EFA) سنجیده شد. نتایج حاصل شده نشان داد که این دو روش با بکارگیری استراتژی‌های مناسب تزریق به خاک، عملکرد بسیار مناسبی در تغییر ساختار خاک با رسوب کربنات کلسیم دارند و بنابراین فرسایش خاک را به خوبی کنترل می‌کنند. نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی به خوبی تأیید کننده این موضوع می‌باشد. نتایج زیر از پژوهش حاضر حاصل شد:

- در روش EICP بکارگیری استراتژی تزریق آنزیم و محلول سم‌تاسیون با غلظت‌های بیشتر بازدهی این روش در بهسازی خاک را افزایش می‌دهد به گونه‌ای که در تزریق آنزیم و محلول سم‌تاسیون با غلظت 1M محلول سم‌تاسیون، ضریب فرسایش‌پذیری به میزان 98.47% کاهش پیدا نمود.

- در روش MICP تزریق مرحله‌ای آنزیم با غلظت‌های کم و همچنین در نظر گرفتن زمان کافی جهت رشد و تکثیر باکتری در خاک به نسبت در افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش مناسب می‌باشد به گونه‌ای که در تزریق دو بار محلول باکتری و سم‌تاسیون با غلظت 0.5M ضریب فرسایش‌پذیری خاک به میزان 97% کاهش پیدا نمود.

- دو روش MICP و EICP عملکرد بسیار مناسبی در برابر فرسایش بادی نشان دادند و میزان فرسایش خاک را به صفر رساندند.

- نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که دو روش تقریباً عملکرد مشابهی در کنترل فرسایش دارند و با بکارگیری شرایط مناسب تزریق بازدهی هر دو روش در بهسازی خاک افزایش پیدا می‌کند

- لازم به ذکر است که نتایج حاصل از این پژوهش مربوط به استراتژی‌های خاص به کار گرفته شده در این پژوهش است و با تغییر شرایط، قطعاً نتایج متفاوت حاصل می‌شود.

## 6- مراجع

- [1] Mousavi, S.F., Haidarpour, M., Shabanlou, S. (2006). Investigation of Sediments in the Zayandehrud Reservoir through Area-increment and Area-reduction Empirical Models, Journal of Water and Wastewater. 17(1): 76-82, (In Persian).

<sup>1</sup> - Ethylenediaminetetraacetic acid

<sup>2</sup> - Dimethylglycine

<sup>3</sup> - Feedback Inhibition

<sup>4</sup> - Negative Feedback

<sup>5</sup> - nucleation sites

- [2] Atkinson, E. The feasibility of flushing sediment from the reservoir, Report OD 137, 1988.
- [3] Ghaffari, H., Zomorodian, S.M.A. (2017). Evaluation of Shear Strength of Soil Stabilized by Microbiological Method, Iranian Journal of Soil and Water Research, 48(4): 737-748, (In Persian).
- [4] DeJong J.T, Mortensen BM, Martinez BC, and Nelson, DC. Bio-mediate soil improvement. Journal of Ecological Engineering, 36 (2), 197-210, 2010.
- [5] Zomorodian SMA, Ghaffari, H. and O'Kelly, BC. Stabilisation of crustal sand layer using biocementation technique for wind erosion control. Aeolian Research, 40: 34–41, 2019.
- [6] Anderson J, Bang S.S, Bang S, Lee S.J, Dho N.Y, Choi S.R., Ko S. Application of Microbial Calcite to Fiber Reinforced Soils to Reduce Wind Erosion Potential, Int J Geo-Eng, 4(2): 47–54, 2012.
- [7] Bang, S.S, Bang, S, Frutiger, S, Nehl, L. M. and Comes, B.L. Application of Novel Biological Technique in Dust Suppression. TRB 2009 Annual Meeting CD-ROM, 2009.
- [8] Van Paassen LA. Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications. In Proceedings of Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering, Dallas, TX, USA (Han J and Alzamora DE (eds)). American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, pp. 4099–4108, 2011.
- [9] Nafisi, A, Safavizadeh, Sh., and Montoya, B.M. Influence of Microbe and Enzyme-Induced Treatments on Cemented Sand Shear Response. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1090-0241, 2019.
- [10] Khodadadi T, H. Kavazanjian, E, van Paassen L, DeJong, J. Bio-grout Materials: A Review. Grouting, 1-12, 2017.
- [11] Javadi N, Khodadadi H, Hamdan N and Kavazanjian, E. EICP Treatment of Soil by Using Urease Enzyme Extracted from Watermelon Seeds. International Foundations Congress and Equipment Expo (pp.115-124). Temp: Arizona State University, 2018.
- [12] Setefance Z, Tomaskavic M, Rakivic-tresic, Z. Sepectrophotometric Method of Assaying Urease Activity. Analytical Letters, 2(4), 197-210, 2006.
- [13] Briaud JL, Ting FCK, Chen HC et al. Erosion function apparatus for scour rate predictions. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127(2): 105–113, 2001.
- [14] Briaud, J-L, Ting, F.C.K., Chen, H-C, Gudavalli R., Kwak K., Philogene B, Han, S.W, Perugu, S, Wei, G, Nurtjahyo P., Cao Y, and Li Y. SRICOS: Prediction of Scour Rate at Bridge Piers. College Station, USA: Texas A&M University, 1999.
- [15] Koopaenia, M.A, Afzali, S. F. Examining some desert conditions on some non alive waste industrial mulches for controlling wind erosion. Ecol. Environ. Conserv. 21 (1), 15–23, 2015.
- [16] Al Qabany A, Soga K and Santamarina, C. Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(8): 992–1001, 2012.
- [17] Mitchell J.K, Santamarina J.C. Biological Considerations in Geotechnical Engineering, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(10): 1222-1233, 2005.
- [18] Zantua M.I. Bremner J.M. Stability of Urease in Soils, Soil Bid. Bmchem, 9: 135-140, 1977.
- [19] Svane S, Sigurdarson J, Finkenwirth F, Eitinger T. Karring, H. Inhibition of urease activity by different compounds provides insight into the modulation and association of bacterial nickel import and ureolysis. Scientific Reports , 10: 8503, 2020.

## **Evaluation of microbial and enzyme -induced calcite precipitation methods in soil erosion control**

***H. Ghaffari<sup>1\*</sup>, S. M. A. Zomorodian<sup>2</sup>***

***1- Postgraduate Researcher, Department of Water Engineering, Shiraz University, Iran***

***2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Shiraz University, Iran***

***\*gh.hamideh1987@gmail.com***

### **Abstract**

**Soil erosion is one of the important challenges of the country due to the crisis of managing water so badly. So it is necessary to study and provide solutions**

to deal with this pervasive phenomenon. In the present study, two new environmentally friendly methods including Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) and Enzyme- Induced Calcium Carbonate Precipitation (EICP) are examined. The results show the good performance of the two methods in improving soil resistance so that wind erosion was completely controlled. Regarding the control of hydraulic erosion by MICP method, in the optimal case, the soil erodibility coefficient was reduced by 97%, which is 98.47% in EICP method. These findings were confirmed by SEM images.

**Keywords:** Erodibility Coefficient, Calcium Carbonate Precipitate, Erosion Function Apparatus, Wind Tunnel