مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲-۳۲، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۱۳-۱۹

Original Article

تأثیر تزریق باکتری در کاهش سرعت فرسایش ماسه

مینو امین (دانشجوی کارشناسی ارشد)
سید محمدعلی زمردیان* (دانشیار)
دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شیراز

روش زیست ـ تزریق، روشی نوین در مسائل ژئوتکنیک و اصلاح خاک بر مبنای رسوب کربنات کلسیم با استفاده از باکتری است. در این پژوهش از باکتری pasteurii Sporosarcina برای کنترل فرسایش ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده است. همچنین از آزمایش XRD برای بررسی رسوبات ایجادشده بر روی نمونه‌ها و از دستگاه تابع فرسایش برای بررسی پارامتر فرسایش‌پذیری استفاده شده است. باکتری و محلول اوره به همراه کلسیم کلراید به طور جداگانه بر روی نمونه‌ی ماسه تزریق شده و به مدت ۲۴ ساعت به حالت اشباع درآمده است. سپس محلول‌ها از انتهای نمونه با استفاده از پمپ، تخلیه شده‌اند. در این پژوهش تأثیر هوادهی در داخل باکتری و محلول اوره، که به‌صورت اشباع بر روی سطح ماسه قرار گرفته است، بر روی پارامترهای فرسایش‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که ضریب فرسایش‌پذیری ماسه تا ۲ برابر در حالت تزریق به همراه هوادهی نسبت به حالت بدون هوادهی کاهش پیدا می‌کند. همچنین تکرار تزریق نیز مورد ارزیابی قرار گرفته و ضریب فرسایش‌پذیری تا ۹۵٪ کاهش پیدا کرده است. بنابراین اعمال هوادهی و همچنین تکرار تزریق باکتری و محلول کلسیم کلراید باعث افزایش عملکرد روش زیست ـ تزریق در کنترل فرسایش خاک می‌شود.

واژگان کلیدی: تزریق باکتری، تابع فرسایش، Sporosarcina pasteurii، کربنات کلسیم، ضریب فرسایش‌پذیری.

m.amin228@yahoo.com
mzomorod@shirazu.ac.ir

۱. مقدمه

خاک برای کاربردهای مختلف از جمله: کاهش فرسایش‌پذیری، افزایش ظرفیت بارگذاری، و افزایش مقاومت برشی باید پایدار شود. در سطح زمین می‌توان با استفاده از روش‌های تراکم و روش‌های اکولوژیکی خاک را پایدار و از فرسایش آن جلوگیری کرد. روش‌های اکولوژیکی، که اخیراً مورد توجه واقع شده است، شامل: کشت گیاهان، درخت، چمن، و بوته برای کاهش فرسایش خاک است. اما اگر بهبود خاک در عمق مد نظر باشد، باید از روش‌های تزریق استفاده کرد. از آنجا که تزریق مواد شیمیایی هزینه‌بر و سمی است، لذا کاربرد آنها مطلوب نیست و راه حل این مشکل استفاده از روش زیست ـ تزریق بیان شده است.[۱] یکی از دلایل عمده‌ی مقاوم‌کردن خاک، جلوگیری از فرسایش است. زیرا فرسایش در سدها، خاکریزها، و پایه‌ی پل خسارت‌های جبران‌ناپذیری به‌بار می‌آورد. همانند فرایند سرریزشدن آب مخزن[۱] که باعث نابودی کامل سد می‌شود و یا آب‌شُستگی پایه‌ی پل، که در صورت عدم کنترل باعث در هم شکسته‌شدن پل می‌شود. بنابراین فرسایش‌پذیری یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد توجه مهندسان طراح در سدها، خاکریزها، و پل‌هاست، تا بتوان با روش‌های نوین و کارآمد فرسایش‌پذیری را کاهش داد و از خسارت‌های جبران‌ناپذیر بعدی جلوگیری کرد.

عمده‌ترین روشی که برای کاهش فرسایش اطراف پایه‌ی پل استفاده می‌شود، ایجاد سنگ‌چین است. این روش نیز به نوبه‌ی خود مشکلاتی از جمله هزینه و همچنین ایجاد تفاوت در دانه‌بندی بین سنگ‌چین و خاک رودخانه دارد، که در روش زیست ـ تزریق می‌توان این مشکلات را بر طرف کرد. در این روش با استفاده از باکتری، خواص مکانیکی خاک را بدون بر هم‌زدن خاک بهبود می‌بخشند. باکتری در طبیعت به فراوانی یافت می‌شود و با تولید آنزیم‌های گوناگون باعث تسریع در فرایندهای شیمیایی می‌شود. یکی از این آنزیم‌ها، آنزیم اوره‌ی آز است. این آنزیم همان‌طور که در روابط ۱ و ۲ ارائه شده است، باعث هیدرولیز اوره و ایجاد یون‌های کربنات و آمونیوم می‌شود، که در صورت وجود یون کلسیم، رسوبات کربنات کلسیم تشکیل می‌شود. این فرایند در طبیعت به فراوانی رخ می‌دهد و باعث ایجاد کوه‌های آهکی می‌شود.

$$Co(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + Co_3^{2-} \quad (1)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3\,(s) \quad (2)$$

پژوهشگران بسیاری به بررسی این فرایند در محیط آزمایشگاهی برای اصلاح خاک

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۶/۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۲۷، پذیرش ۱۳۹۴/۳/۲۶.

Archive of SID
www.SID.ir

پرداخته‌اند، زیرا روش مذکور مزیت‌هایی نسبت به روش‌های دیگر اصلاح خاک از جمله هزینه‌ی کمتر نسبت به روش‌های دیگر دارد.[۳و۲] برخلاف تزریق شیمیایی یا روش‌های دیگر اصلاح خاک، تزریق باکتری سمی نیست و با طبیعت سازگاری دارد.[۵و۴،۲] در این روش برای مقاوم‌کردن خاک نیاز به خاک‌برداری و به‌هم‌ریختن خاک وجود ندارد.[۶]

فرایند کلسیت‌شدن نتایج آزمایشگاهی خوبی در افزایش مقاومت برشی خاک،[۱۱-۷] بازسازی ترک‌های بتن،[۱۴-۱۲] کنترل فرسایش در مناطق ساحلی و رودخانه‌ها،[۱۵و۲] و همچنین کاهش نفوذپذیری خاک داشته است.[۱۶و۷]

در پژوهش‌های انجام‌شده توجه کمتری به اثر روش زیست ـ تزریق در کاهش فرسایش ماسه شده است. بنابراین، این ضرورت مشاهده شد که مطالعاتی در زمینه‌ی فرسایش‌پذیری خاک انجام شود. از آنجا که فرسایش‌پذیری به‌عنوان یک اصطلاح در مطالعات جوشش و فرسایش استفاده می‌شود، ممکن است گمان شود فرسایش‌پذیری فقط یک عدد (سرعت فرسایش‌پذیری) را نشان می‌دهد. زمانی که مقدار مذکور زیاد باشد، به معنی آن است که خاک فرسایش‌پذیری بالایی دارد و اگر مقدار کمی را نشان دهد، یعنی خاک مقاومت فرسایش‌پذیری خوبی دارد، که این مفهوم مناسبی نیست. فرسایش‌پذیری یک عدد نیست، بلکه ارتباط بین سرعت جریان آب و مقدار فرسایش‌پذیری در خاک است. اما سرعت آب یک کمیت بُرداری است، که جهت و مقدار آن در سرتاسر جریان متغیر است، بنابراین بهتر است کمیت تنش برشی، که تأثیر آب در خاک را نشان می‌دهد، مورد استفاده قرارگیرد. در نتیجه فرسایش‌پذیری، ارتباط بین تنش برشی با سرعت فرسایش خاک است، که به آن تابع فرسایش[۲] می‌گویند.[۱۷] بنابراین پژوهش‌های آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر فرایند کلسیت‌شدن در مقاومت فرسایشی خاک با استفاده از دستگاه تابع فرسایش انجام شده است.

روش تزریق باکتری به پارامترهای متعددی از جمله: دما، pH، غلظت باکتری، غلظت اوره، کلسیم کلراید، روش تزریق، و دفعات تزریق بستگی دارد. به طوری که فعالیت باکتری از ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد شروع و در ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به اوج خود می‌رسد و در دمای ۱۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد متوقف می‌شود.[۱۸] همچنین بهینه‌ترین میزان pH برای آنزیم‌های اوره‌ی آز، بین ۷٫۵ تا ۸ است.[۱۹]

در تمام مطالعات انجام‌شده، عدم یکنواختی در تشکیل کربنات کلسیم یکی از مهم‌ترین مشکلات روش تزریق باکتری به منظور استفاده در عمل بوده و بیشتر به بررسی تأثیر غلظت باکتری، غلظت اوره و کلسیم کلراید، دما و خصوصیات خاک در عملکرد و میزان تشکیل رسوبات پرداخته شده است. در صورتی که به نظر می‌رسد یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در یکنواختی تشکیل کربنات کلسیم، روش تزریق باکتری و دفعات تزریق است. بنابراین هدف دیگر از انجام این پژوهش، بررسی روش‌های تزریق و همچنین دفعات تزریق در کاهش عدم یکنواختی است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. کشت باکتری

برای پژوهش حاضر از باکتری اوره‌ی آز مثبت Sporosarcina pasteurii استفاده شده است. این نوع باکتری غیر سمی و یکی از شناخته‌شده‌ترین نوع باکتری در هیدرولیز اوره است و در طبیعت به وفور یافت می‌شود. همچنین مقاومت بالایی در برابر عوامل فیزیکی و شیمیایی محیط دارد. به همین دلیل برای استفاده در محیط‌های آزاد مناسب است.[۲۰]

باکتری Sporosarcina pasteurii در شرایط هوازی و در دمای ۲۸ درجه‌ی سانتی‌گراد رشد می‌کند. این باکتری به طول ۰٫۵ – ۳ میکرومتر است. استوک آن از مرکز کلکسیون قارچ و باکتری ایران خریداری شده است. محیط کشت مناسب، ۲۰ g/L عصاره‌ی مخمر[۳] به همراه ۱۰ g/L آمونیوم کلراید است. پس از آماده‌کردن محیط، pH بر روی ۸٫۵ تنظیم و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد استریل شده است. سپس باکتری در شرایط استریل به محیط اضافه و به مدت ۴۸ ساعت در شیکر انکوباتور برای رسیدن به رشد مطلوب قرار داده شده است.

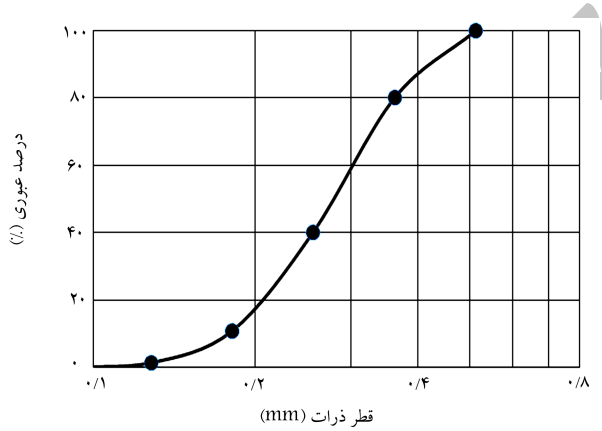
۲.۲. مشخصات ماسه

بهترین محدوده‌ی دانه‌بندی برای استفاده از روش زیست ـ تزریق، ۵۰ تا ۴۰۰ میکرومتر است. زیرا در اندازه‌ی ریزتر، حرکت و فعالیت باکتری کم می‌شود و در اندازه‌ی درشت‌تر نیاز به مواد غذایی بیشتری برای مقاوم‌شدن خاک است.[۲۱]

بنابراین از ماسه‌ی سیلیسی (۹۸٪ سیلیس) با محدوده‌ی دانه‌بندی بین ۰٫۳۵ – ۰٫۱۸ میلی‌متر استفاده و نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۱، و مشخصات فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

۳.۲. تزریق باکتری و کلسیم کلراید

در این مرحله، خاک سیلیسی با تراکم نسبی ۷۵٪، در قالب مخصوص دستگاه تابع فرسایش، که همان استوانه‌ی تراکم استاندارد با قطر ۱۰۱٫۶ میلی‌متر است، ریخته شده است. برای ایجاد یکنواختی تراکم در نمونه، خاک به ۳ قسمت تقسیم و در ۳ لایه در قالب ریخته شده است. در انتهای قالب، سوراخی برای اتصال به پمپ Peristaltic به منظور مکش و خارج‌کردن باکتری تعبیه شده است. شکل ۲، نحوه‌ی تهیه‌ی نمونه را نشان می‌دهد. به طوری که برای انجام تزریق، ابتدا باکتری با غلظت ثابت 8×10^{7} cell/ml (OD۶۰۰ = ۱)، به اندازه‌ی ۱٫۵ برابر خلل



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک.

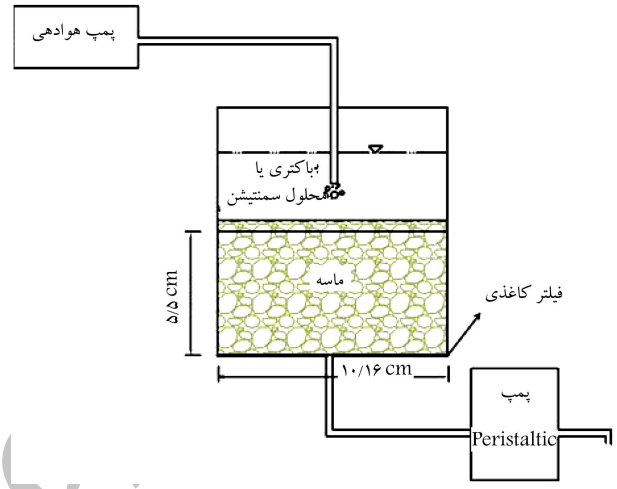
پارامتر	مقدار
D_{50}	۰٫۲۸ mm
$\rho_{d\max}$	۱۶۶۱ kg/m^3
$\rho_{d\min}$	۱۴۰۱ kg/m^3
G_s	۲٫۶۵
C_u	۱٫۷
C_c	۰٫۹۸

www.SID.ir

جدول ۲. تیمارهای اعمال‌شده.

زمان/تیمار	A*	B#	C	D
روز اول	تزریق باکتری	تزریق باکتری	تزریق باکتری	تزریق باکتری
روز دوم	تزریق اوره و کلسیم کلراید	تزریق اوره و کلسیم کلراید	تزریق اوره و کلسیم کلراید	تزریق اوره و کلسیم کلراید
روز سوم	زهکشی	زهکشی	زهکشی	زهکشی
-			۵ روز بعد از زهکشی	۵ روز بعد از زهکشی
روز هشتم			تزریق اوره و کلسیم کلراید	تزریق باکتری
روز نهم			زهکشی	تزریق اوره و کلسیم کلراید
روز دهم				زهکشی

*بدون هوادهی، # با هوادهی.



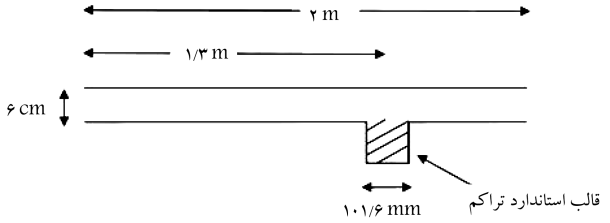
شکل ۲. روش تزریق باکتری به داخل خاک.

و فرج خاک (۲۵۰ میلی‌لیتر)، در قالب تزریق و به حالت اشباع (باکتری به ارتفاع ۲ سانتی‌متر روی سطح خاک قرار می‌گیرد) و بدون زهکش به مدت ۲۴ ساعت در آورده شده است. بعد از ۲۴ ساعت،توسط پمپ با دبی خروجی ml/min ۱۵ باکتری خارج و همین فرایند برای محلول اوره و کلسیم کلراید به میزان ۱/۵ برابر خلل و فرج تکرار شده است.

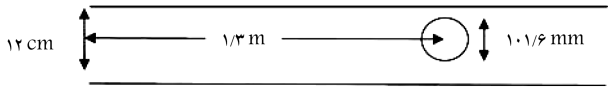
محلول اوره و کلسیم کلراید حاوی ۰/۵ مولار اوره و ۰/۵ مولار کلسیم کلراید بوده است. همچنین به منظور ایجاد محیط مناسب برای رشد باکتری در داخل خاک، ترکیبات g/L ۱۰ آمونیوم کلراید، nutrient broth ۳ g/L و g/L ۲/۱۲ سدیم بی‌کربنات به محلول اوره و کلسیم کلراید اضافه شده است.

یکی از مهم ترین مشکلات روش زیست ـ تزریق در عدم یکنواختی تشکیل رسوبات کربنات کلسیم است. در مطالعاتی اشاره شده است که تجمع رسوبات، بیشتر درکف و گوشه‌هاست.[۱۰] به نظر می‌رسد یکی از دلایل غیریکنواختی رسوبات، در عدم یکنواختی فعالیت باکتری است و در مناطقی که اکسیژن وجود دارد، همانند سطح، گوشه و کف نمونه‌ی خاک، تجمع رسوبات بیشتر است. برای بررسی این نظریه، دو نمونه‌ی A و B با شرایط یکسان از لحاظ غلظت محلول‌ها و دفعات تزریق آماده شده است. اما در نمونه‌ی A، هوادهی در محلول اشباع باکتری و محلول اوره صورت نگرفته و در نمونه‌ی B، در محلول‌ها هوادهی با استفاده از پمپ هوا انجام شده است.

به منظور بررسی تعداد دفعات تزریق بهینه برای به‌دست‌آوردن بهترین حالت در کاهش فرسایش‌پذیری خاک، نمونه‌های C و D تهیه شده است، که در نمونه‌ی



شکل ۳. طرح شماتیک فلوم.



شکل ۴. پلان فلوم.

C مجدداً تزریق اوره به همراه کلسیم کلراید، بعد از گذشت ۵ روز از تزریق مرحله‌ی اول انجام شده است. نمونه‌ی D همانند نمونه‌ی C است، با این تفاوت که تزریق باکتری نیز بعد از گذشت ۵ روز تکرار شده است (جدول ۲). نهایتاً نمونه‌ها به مدت ۶۰ روز، در دمای ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد عمل‌آوری شده است. سپس آزمایش تابع فرسایش روی نمونه‌ها انجام شده است.

۴.۲. دستگاه تابع فرسایش[۴]

بریود از سال ۱۹۹۹ به بررسی عمق آب‌شُستگی پایه‌ی پل و تکیه‌گاه در خاک‌های چسبنده پرداخته و برای این منظور نرم‌افزار SRICOS-EFA را ارائه کرده است. در این روش برای تعیین مقاومت فرسایشی خاک محل در آزمایشگاه از دستگاه تابع فرسایش (EFA) استفاده می‌شود.

در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز، دستگاه تابع فرسایش مطابق با آنچه بریود ارائه کرده است، ساخته شده است، که در آن با عبور دبی مشخص بر روی نمونه و اندازه‌گیری زمان می‌توان میزان تنش برشی را به‌دست آورد. در پایان آزمایش نیز میزان فرسایش انجام‌شده‌ی نمونه، اندازه‌گیری شده است، تا بتوان نمودار تابع فرسایش را برای خاک موردنظر به‌دست آورد. به منظور ایجاد سرعت جریان زیاد، از یک مجرای بسته با مقطع عرضی مستطیلی شکل با ابعاد ۶ × ۱۲ سانتی‌متر استفاده شده است (شکل ۳).

طول فلوم ۲ متر بوده است، که یک حفره با قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر در کف آن تعبیه شده است، که محل قرارگیری نمونه‌ی خاک است (شکل ۴). بدین ترتیب استوانه‌ی تراکم استاندارد به قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر، می‌تواند از طریق حفره‌ی تعبیه‌شده در کف فلوم به آن متصل شود. از این رو نمونه‌ی خاک که تحت تزریق باکتری قرار گرفته

Archive of SID
www.SID.ir

است، در معرض جریان فلوم قرار گرفته و بدین طریق آزمایش فرسایش بر روی نمونه‌ی خاک انجام شده است.

بنابراین تابع فرسایش به‌عنوان ارتباط بین سرعت فرسایش[۵] (E) و تنش برشی[۶] (τ)، تعریف می‌شود. تنش برشی بحرانی[۷] (τ_c)، با توجه به محل برخورد نمودار با محور افقی به دست می‌آید و ضریب فرسایش پذیری[۸] (K) به‌عنوان شیب نمودار تعریف می‌شود. افزایش تنش برشی بحرانی به‌عنوان نقطه‌ی آغاز فرسایش و همچنین کاهش ضریب فرسایش‌پذیری، نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت خاک در مقابل فرسایش است.

در مطالعاتی از دستگاه تابع فرسایش ساخته‌شده در دانشگاه شیراز، برای بررسی تأثیر درصد بنتونیت، میزان تراکم، و درصد رطوبت بر فرسایش استفاده شده است، که نتایج نشان داده است سرعت فرسایش نمونه‌ها یک رابطه‌ی خطی با تنش برشی اعمال‌شده بر روی آن‌ها دارد.[۲۲]

۱.۴.۲. تنش برشی

به‌منظور محاسبه‌ی تنش برشی اعمال‌شده بر روی سطح نمونه‌ی خاک توسط جریان آب برای هر دبی معین از رابطه‌ی ۳ استفاده شده است:

$$\tau = (۱/۸) \times f\rho V^۲ \qquad (۳)$$

که در آن، τ تنش برشی ($\mathrm{N/m^۲}$)، f ضریب اصطکاک، ρ چگالی آب ($۱۰۰۰\ \mathrm{kg/m^۳}$)، V سرعت متوسط جریان ($\mathrm{m/s}$). ضریب اصطکاک f با توجه به عدد رینولدز جریان (رابطه‌ی ۴) و زبری نسبی، از طریق دیاگرام مودی تعیین می‌شود:[۱۷]

$$\mathrm{Re} = VD/\upsilon \qquad (۴)$$

که در آن، Re عدد رینولدز، D قطر هیدرولیکی (۴ برابر شعاع هیدرولیکی) (m)، υ لزوجت سینماتیکی آب ($۱۰^{-۶}$ در دمای $۲۰^{\circ}\mathrm{c}$).

۲.۴.۲. سرعت فرسایش

نمونه‌ی خاک بعد از قرارگرفتن در جریان فلوم در یک دبی ثابت، تحت تأثیر فرسایش قرار گرفته است. اما این فرسایش به‌صورت یکنواخت روی نمونه رخ نداده و در طول زمان آزمایش، قسمتی از سطح، بیشتر فرسایش یافته و در قسمت‌هایی کمتر دچار فرسایش شده است. از این رو با توجه به شکل نامشخص حفره‌ی نمایان‌شده روی سطح نمونه‌ی خاک، سرعت آب‌شُستگی بر پایه‌ی اندازه‌گیری حجم کل فرسایش‌یافته‌ی خاک تخمین زده شده است. برای این منظور با استفاده از یک سرنگ، آب برای پُرکردن حجم‌های فرسایش‌یافته به سطح نمونه اضافه شده است. سپس از طریق رابطه‌ی ۵ سرعت فرسایش قابل تعیین است:

$$E = V_e/(A_s \times \Delta t) \qquad (۵)$$

که در آن، E سرعت فرسایش ($\mathrm{mm/hr}$)، V_e حجم آب لازم برای پُرکردن حفره‌ها ($\mathrm{mm^۳}$)، A_s سطح نمونه‌ی خاک (سطح قالب تراکم) ($\mathrm{mm^۲}$)، Δt مدت زمان آزمایش (hr).

۵.۲. آزمایش XRD

XRD نوع مواد تشکیل‌دهنده‌ی ماده را به‌صورت کیفی بیان می‌کند. این آزمایش نمودار شدت اشعه‌ی ایکس بازتابیده از یک نمونه را به‌صورت تابعی از زاویه نشان می‌دهد. بعد از انجام آزمایش XRD بر روی خاک موردنظر و شمارش طیف‌های برگشتی، با استفاده از نرم‌افزار Xpert high score و براساس الگوهای موجود برای هر ماده‌ی خاص و مطابقت آن با پیک‌های به‌دست‌آمده از آزمایش نمونه، مواد موجود در نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

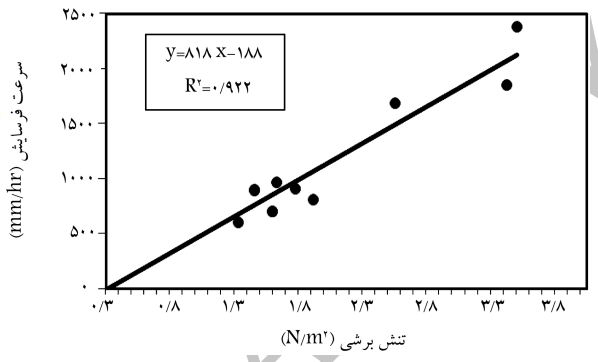
۳. نتایج

سرعت فرسایش نمونه‌ی خاک، رابطه‌ی خطی با تنش برشی اعمال‌شده بر روی آن دارد. محل تلاقی نمودار با محور افقی، نشان‌دهنده‌ی تنش برشی بحرانی است، همچنین شیب نمودار به‌صورت ضریب فرسایش‌پذیری k تعریف می‌شود. بدین ترتیب با رسم تابع فرسایش برای همه‌ی نمونه می‌توان پارامترهای فرسایشی آن را به‌دست آورد. به منظور ارزیابی تأثیر روش‌های مختلف تزریق در ضریب فرسایش‌پذیری و همچنین تنش برشی بحرانی در هر یک از تیمارها، ۴ نمونه تهیه شده است. دبی‌های متفاوت از آن‌ها عبور داده شده و با نمونه‌ی خاک سیلیسی بدون انجام تیمار مقایسه شده‌اند.

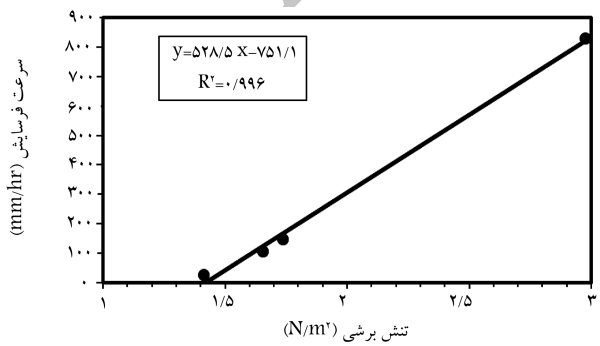
ضریب فرسایش‌پذیری و تنش برشی بحرانی در نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر ۸۱۸ $(\mathrm{mm/hr})/(\mathrm{N/m^۲})$ و ۰٫۲۳ $\mathrm{N/m^۲}$ بوده است (شکل ۵).

ضریب فرسایش‌پذیری تیمار A و B نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب ۳۵٫۴٪ و ۶۸٫۳٪ کاهش نشان داده است (شکل‌های ۶ و ۷).

در مقایسه‌ی دو تیمار A و B مشاهده شده است که با مقادیر و شرایط یکسان باکتری و محلول اوره، که به نمونه‌ها اعمال شده است، نمونه‌ی B در حدود ۲ برابر عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌ی A داشته است. لذا این نتیجه گرفته شده است که اعمال هوادهی به همراه شرایط مناسب دما و همچنین وجود مواد مغذی موردنیاز برای رشد باکتری (آمونیوم کلراید، nutrient broth و سدیم بی‌کربنات)، موجب

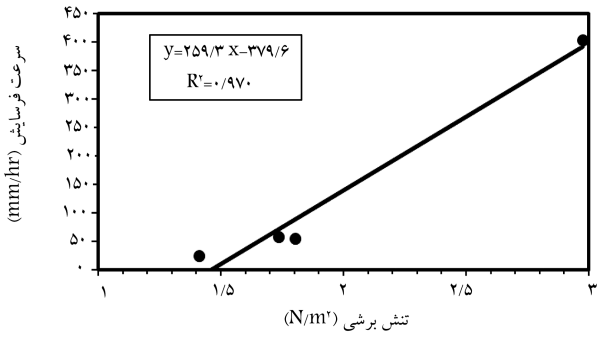


شکل ۵. تابع فرسایش نمونه‌ی شاهد.

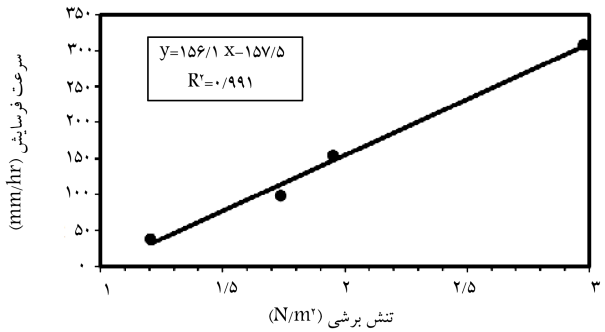


شکل ۶. تابع فرسایش تیمار A.

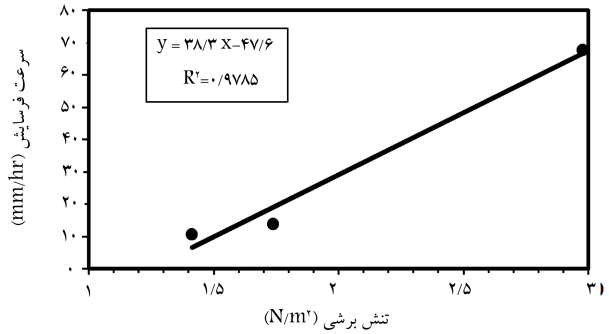
www.SID.ir



شکل ۷. تابع فرسایش تیمار B.



شکل ۸. تابع فرسایش تیمار C.



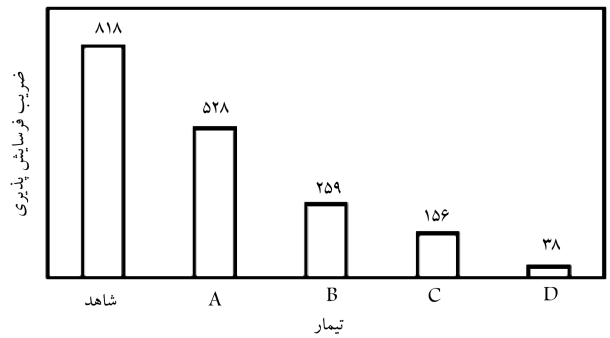
شکل ۹. تابع فرسایش تیمار D.

تکثیر و توزیع یکنواخت‌تر باکتری در داخل خاک می‌شود و درنهایت، نمونه‌هایی با عملکرد بهتر را ایجاد می‌کند.

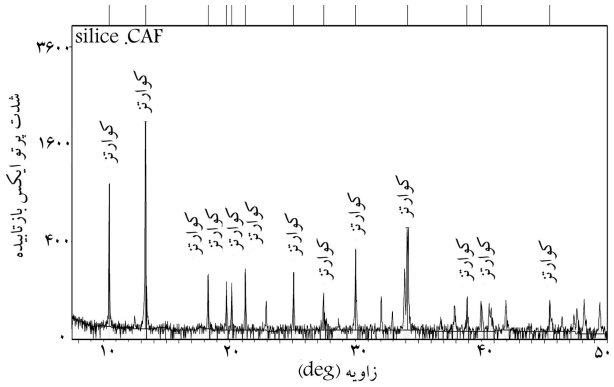
ضریب فرسایش‌پذیری تیمار C نسبت به نمونه‌ی شاهد ۸۱٪ کاهش نشان داده است. در تیمار D کاهش تا ۹۵٪ مشاهده شده است، که نشان‌دهنده‌ی تأثیر دفعات تزریق بالاخص تزریق دوباره‌ی باکتری و اوره بوده است (شکل‌های ۸ و ۹). تیمار D به دلیل اینکه باکتری دوباره بعد از ۵ روز تزریق شده است، عملکرد بهتری نسبت به تیمار C داشته است.

استفاده از روش زیست ـ تزریق، باعث کاهش ضریب فرسایش‌پذیری تا ۹۵٪ نیز شده است. مقادیر ضریب فرسایش‌پذیری (شیب نمودار تابع فرسایش) در تیمارهای مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده است.

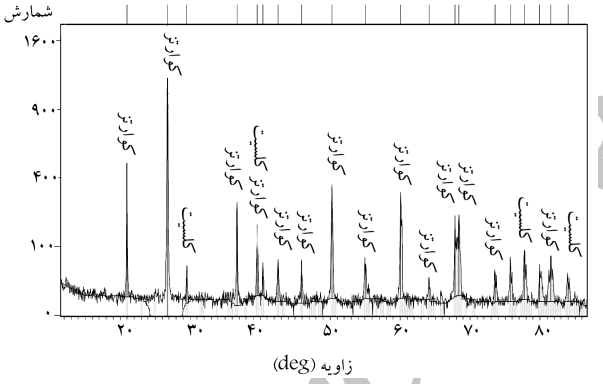
همچنین روش زیست ـ تزریق باعث افزایش ۴ تا ۶ برابری تنش برشی بحرانی نسبت به نمونه‌ی شاهد شده و آزمایش طیف‌سنج پراش X بر روی نمونه‌ی شاهد انجام شده است. شکل ۱۱، ماسه‌ی سیلیسی بدون داشتن ترکیبات کربنات کلسیم را نشان می‌دهد. بر روی نمونه‌ی D نیز آزمایش XRD انجام شده است (شکل ۱۲). براساس اوره و کلسیم کلراید استفاده‌شده و معادلات شیمیایی، از لحاظ تئوری میزان



شکل ۱۰. تأثیر تیمارها در کاهش ضریب فرسایش‌پذیر.



شکل ۱۱. آزمایش XRD برای نمونه‌ی شاهد.



شکل ۱۲. آزمایش XRD در تیمار D.

کربنات کلسیم تشکیل‌شده در خاک به میزان بیشینه‌ی ۱۰٪ بوده است، که پیک‌های مشخص‌شده با نام کلسیت در نمودار، نشان‌دهنده‌ی فعالیت باکتری و ایجاد کربنات کلسیم در خاک است.

۴. نتیجه‌گیری

روش زیست ـ تزریق، روشی نوین برای اصلاح خاک است، که در این پژوهش برای کاهش فرسایش‌پذیری خاک از آن استفاده شده و نتایج خوبی را به همراه داشته است. به طوری که کاهش ۹۵ درصدی ضریب فرسایش‌پذیری را در بهترین نمونه نشان داده است. نتایج این پژوهش به‌صورت خلاصه بدین صورت بیان شده است:

۱. باکتری Sporosarcina pasteurii به همراه اوره و کلسیم کلراید باعث تشکیل رسوبات کربنات کلسیم می‌شود.

www.SID.ir

۲. در هنگام فرایند تزریق، اعمال هوادهی در باکتری و محلول اوره باعث افزایش ۲ برابری مقاومت فرسایشی نسبت به عدم هوادهی است. در نتیجه، اعمال هوادهی به همراه شرایط مناسب دما و همچنین وجود مواد مغذی موردنیاز برای رشد باکتری، موجب تکثیر و توزیع یکنواخت‌تر باکتری در داخل خاک می‌شود و درنهایت، نمونه‌هایی با عملکرد بهتر را ایجاد می‌کند.

۳. تزریق مجدد باکتری و محلول اوره و کلسیم کلراید در مقاسیه با تزریق مجدد فقط محلول اوره و کلسیم کلراید، عملکرد بالاتری در افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش دارد.

۴. انجام ۲ مرتبه تزریق در مقایسه با انجام ۱ بار تزریق، نمونه‌هایی با مقاومت فرسایشی به مراتب بالاتر را ایجاد می‌کند.

پانوشت‌ها

1. overtopping
2. erosion function
3. yeast extract
4. erosion function apparatus
5. erosion rate
6. shear stress
7. critical shear stress
8. erodibility coefficient

منابع (References)

1. Van Paassen, L.A. "Bio-mediated ground improvement: from laboratory experiment to pilot applications", GeoFrontiers Congress, Dallas, Texas, United States, pp. 1-10 (13-16 March 2011).
2. Ivanov, V. and Chu, J. "Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ", *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, **7**(2), pp. 139-153 (2008).
3. Whiffin, V.S. "Microbial CaCO3 precipitation for the production of biocement", ph.D Thesis, Murdoch University, Perth, Western Australia, 154 p. (2004).
4. Cheng, L. and Cord-Ruwisch, R. "In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation", *Ecological Engineering*, **42**, pp. 64-72 (2012).
5. Le Metayer-Levrel, G., Castanier, S., Orial, G., Loubiere, J.F. and Perthuisot, J.P. "Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony", *Sediment. Geol.*, **126**(1-4), pp. 25-34 (1999).
6. Van der Ruyt, M. and van der Zon, W. "Biological in situ reinforcement of sand in near-shore areas", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering*, **162**(1), pp. 81-83 (2009).
7. Shahrokhi-Shahraki, R., Zomorodian, S.M.A., Niazi, A. and O'Kelly, B.C. "Improving sand with microbial-induced carbonate precipitation", Ground Improvement, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (ice)*, Paper 1400001 (2014).
8. Al Qabany, A., Soga, K. and Santamarina, C. "Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,* Atlanta, GA, **138**(8), pp. 992-1001, (2012).
9. Chou, C.W., Eric A., Seagren, A.M., Ahmet, H., Aydilek, M. and Michael, L. "Biocalcification of sand through ureolysis", *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering,* ASCE, **137**(12), pp. 1179-1189 (2012).
10. Van Paassen, L.A., Harkes, M.P., Van Zwieten, G.A., Van der Zon, W.H., Van der star, W.R.L. and Van Loosdrecht, M.C.M. "Scale up of biogrout: A biological ground reinforcement method", *Proc. 17th Int. Conf. On Soil Mechanics & Geotechnical Engineering (ICSMGE)*, M. Hamza, M. Shahien, and Y. E. Mossallamy, eds., pp. 2328-2333 (2009).
11. Whiffin, V.S., Van Paassen, L.A. and Harkes, M.P. "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", *Geomicrobiol. J.,* **24**(5), pp. 417-423 (2007).
12. Bang, S.S., Galinat, J.K. and Ramakrishnan, V. "Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized sporosarcina pasteurii", *Enzyme Microb. Technol.*, **28**(4-5), pp. 404-409 (2001).
13. De Muynck, W., De Belie, N. and Verstraete, W. "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review", *Ecological Engineering*, **36**(2), pp. 118-136 (2009).
14. Tobler, M.J., Maclachlanb, E. and Phoenix, V.R. "Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies", *Ecological Engineering*, **42**, pp. 270-278 (2012).
15. Shanahan, C. and Montoya, B.M. "Strengthening coastal sand dunes using microbial induced calcite precipitation", *Geo-Congress 2014, Technical Papers,* GSP 234, ASCE (2014).
16. Le Metayer-Levrel, G., Castanier, S., Orial, G., Loubiere, J.F. and Perthuisot, J.P. "Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony", *Sediment. Geol.*, **126**(1-4), pp. 25-34 (1999).
17. Briaud, J.L., Chen, H.C., Chang, K.A. and Chen S., *Abutment Scour in Cohesive Materials*, National Cooperative Highway Research Program, Final Report for NCHRP Project 24-15(02) (2009).
18. Sahrawat, K. "Effects of temperature and moisture on urease activity in semi-arid tropical soils", *Plant and Soil,* **78**(3), pp. 401-408 (1984).

Archive of SID

www.SID.ir

19. Ng, W.S., Lee, M.L. and Hii, S.L. "An Overview of the factors affecting microbial-induced calcite precipitation and its potential application in soil improvement", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **62**, pp. 723-729 (2012).

20. Todar, K., *The Genus Bacillus* (2007). www.textbook of bacteriology.net/Bacillus.html

21. Rebata-Landa, V., *Microbial Activity in Sediments: Effects on Soil Behaviour*, Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology (2007).

22. Abroshan, M. and Zomorodian, S.M.A. "Experimental study of erodibility in compacted cohesive soils for embankments", *Irrigation & Water Engineering Journal*, **2**(8), pp. 108-116 (In Persain) (2012).

Archive of SID

www.SID.ir