بررسی تأثیر نوع ریزدانه بر به‌سازی بیولوژیکی خاک ماسه‌ای

نوید سهرابی، مهدی خداپرست*؛
دانشگاه قم، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ٩٦/٠١/١٩ پذیرش ٩٦/٠٨/٠٧

چکیده

در بسیاری از مناطق در سراسر جهان پیدایش روش‌های جدید و سازگار با محیط‌زیست برای به‌سازی خاک‌ها در حال افزایش است. استفاده از سیمانتاسیون زیستی به‌وسیلهٔ رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم (MICP) برای بهبود خصوصیات مکانیکی خاک‌های ضعیف، روشی است که از طریق هیدرولیز اوره به‌وسیلهٔ باکتری حاوی آنزیم اوره‌آز و در حضور یون‌های کلسیم محلول منجر به ترسیب کربنات‌کلسیم بین دانه‌های خاک و درنتیجه اتصال بین آن‌ها می‌شود. در این پژوهش با به‌سازی خاک ماسه انزلی (با ریزدانه بسیار اندک و کم‌تر از یک درصد) و مخلوط‌های جداگانه آن با یک نوع خاک ریزدانه چسبنده و یک نوع خاک ریزدانه غیرچسبنده در درصد وزنی ٣٠ به‌روش MICP و با استفاده از آزمایش برش مستقیم کوچک مقیاس (٦×٦) برای ارزیابی پارامترهای مقاومتی خاک، به بررسی تأثیر افزایش ریزدانه‌ها بر روند به‌سازی خاک ماسه انزلی پرداختیم. متوسط تنش برشی حداکثر نمونه‌های به‌سازی‌شده حاصل از تنش‌های قائم ٥٠، ١٠٠ و ١٥٠ کیلوپاسکال نشان می‌دهد که افزایش ریزدانه چسبنده سبب کاهش مقاومت برشی متوسط نمونه به‌سازی‌شده به‌میزان ١١/٩ درصد در مقایسه با ماسه انزلی شده است، درحالی‌که با افزایش ریزدانه غیرچسبنده مقاومت برشی متوسط نمونه به‌سازی‌شده نسبت‌به ماسه انزلی ٢٠/٨ درصد افزایش یافته است. در آنالیزهای SEM و EDX که از نمونه خاک ماسه انزلی در شرایط قبل و بعد از به‌سازی گرفته شده است، وجود عناصر تشکیل‌دهندهٔ رسوب کربنات‌کلسیم در نمونه به‌سازی‌شده تأیید شده و هم‌چنین توزیع مناسب آن در بین دانه‌های خاک مشاهده شده‌است.

واژه‌های کلیدی: سیمانتاسیون زیستی، ماسه‌رس‌دار، به‌سازی خاک، رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم، ماسه‌سیلتی.

*نویسنده مسئول khodaparast@qom.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

مقدمه

در بسیاری از مناطق در سراسر جهان، خصوصیات مکانیکی خاک‌ها برای بهره‌برداری از زمین موردنظر، کافی نیستند. راه‌ها و خطوط راه‌آهن در معرض نشست هستند و احتیاج به نگه‌داری‌های مداوم دارند. سدهای خاکی، ماسه‌های روان و شیب‌ها، می‌توانند ناپایدار شوند و هم‌چنین شیب‌ها، سواحل و رودخانه‌ها در معرض فرسایش قرار دارند. زلزله می‌تواند سبب روان‌گرایی[1] رسوبات سست شود و در نتیجه به سازه‌های روی آن‌ها آسیب وارد کند. در چنین شرایطی تثبیت[2] خاک می‌تواند مفید واقع شود که اغلب از طریق روی‌کردهای سازنده نظیر عملیات تراکم، نصب نیل‌ها، سپری‌ها و یا شمع‌ها و یا مخلوط کردن خاک با آهک یا سیمان، قبل و یا در حین ساخت‌وساز، از سطح زمین یا درون آن انجام می‌شود [۱].

رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم (MICP[3])، به‌دلیل تطبیق‌پذیری و عملکرد پایدار، به‌تازگی توجه پژوهش‌گران زیادی از مهندسی ژئوتکنیک را در سراسر جهان متوجه خود ساخته است. MICP یک تکنیک بیولوژیکی است که به‌صورت طبیعی هدایت می‌شود و از طریق کنترل متابولیسم باکتری باعث ایجاد یک عامل سیمانی‌کننده در محل که به‌عنوان کربنات‌کلسیم یا کلسیت شناخته‌شده‌است، می‌شود. اگرچه فرآیندهای بیولوژیکی زیادی وجود دارند که می‌توانند منجر به MICP شوند، اما به‌کارگیری هیدرولیز اوره به‌وسیلهٔ باکتری بیش‌تر مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش باکتری هوازی با آنزیم اوره‌آز بسیار فعال به خاک موردنظر وارد می‌شود. هنگامی‌که باکتری به واکنش هیدرولیز برای تولید یون‌های آمونیوم و کربنات سرعت می‌بخشد، هیدرولیز اوره اتفاق می‌افتد. در حضور یون‌های کلسیم محلول، یون‌های کربنات تولیدشده، رسوب می‌کنند و کریستال‌های کربنات‌کلسیم را تشکیل می‌دهند. واکنش‌های شیمیایی دخیل در این تکنیک به‌صورت روابط (۱) و (۲هستند:

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (۱)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \quad (۲)$$

زمانی‌که این کریستال‌ها به‌صورت پوششی روی دانه‌های خاک و یا مانند پلی بین آن‌ها تشکیل شوند، از حرکت دانه‌ها جلوگیری می‌کنند و از این‌رو، خصوصیات مکانیکی و

1. Liquefaction
2. Stabilization
3. Microbial-induced carbonate precipitation

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

ژئوتکنیکی خاک را بهبود می‌بخشند [۲]، [۳]. در یکی از اولین پژوهش‌ها در سال ۲۰۰٤ در خصوص استفاده از باکتری برای به‌سازی خاک، ویفین[1] ابتدا طی آزمایش‌هایی باکتری اسپوروسارسینا پاستوری[2] را به‌عنوان بهینه‌ترین باکتری از لحاظ فعالیت اوره‌آزی، هزینه‌های اجرایی، pH محیط و پایداری در برابر آلودگی معرفی کرد [٤] و سپس با انجام پژوهش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری ماسه‌های به‌سازی‌شده با استفاده‌از این باکتری تحت تزریق تک‌فازه با فشار زیاد را بررسی کرد [۵]. دی‌یانگ[3] و همکاران در سال ۲۰۰٦ روشی جدید برای دست‌یابی به رسوب کلسیت به‌صورت طبیعی که در آن ماسه‌های سست و ریزشی با استفاده از باکتری باسیلوس پاستوری به‌همراه اوره و کلریدکلسیم (به‌عنوان محلول سیمانتاسیون) به‌سازی و تثبیت می‌شوند، را معرفی کردند [٦]. التوادی[4] در سال ۲۰۰۸ پژوهش‌های گسترده‌ای برای به‌سازی خاک با مقاومت زیاد به‌روش رسوب میکروبی کلسیت و با به‌کارگیری باکتری‌های به‌دست‌آمده از محل، انجام داد [۷]. ون‌پسن[5] و همکاران در سال ۲۰۰۹ با بررسی تأثیر بیوگروتینگ[6] (تزریق مواد میکروبیولوژیکی) بر پارامترهای مقاومتی خاک‌های سست، به ارزیابی عمل‌کرد این روش در مقیاس‌های یک مترمکعب و ۱۰۰ مترمکعب پرداختند [۸]. روند رسوب‌گذاری و فرآیندهای نظارت بر میزان به‌سازی خاک در سال ۲۰۱۰ در تحقیقات دی‌یانگ و همکاران بررسی شد [۹]. به‌منظور ارائه یک روش تزریق برجا[7] برای خاک‌های غیراشباع، لیانگ‌چنگ[8] و کورد رووییش در سال ۲۰۱۲، تحقیقات گسترده‌ای برای به‌سازی خاک ماسه سیلیسی بر پایهٔ روشی که تحت عنوان نفوذ سطحی[9] نام‌گذاری کردند، انجام دادند [۱۰]. سیوکاموتو[10] و همکاران در سال ۲۰۱۳ با بررسی تأثیر رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم در خاک ماسه تویویورا[11] با تراکم‌های نسبی ۳۰، ٦۰ و ۸۵ درصد، دریافتند که

1. Whiffin
2. Sporosarcina pasteurii
3. Dejong
4. Al-Thawadi
5. Van passaan
6. Biogrout
7. In situ
8. Liang cheng
9. Surface percolation
10. Tsukamoto
11. Toyoura sand

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

میزان کربنات‌کلسیم بیش‌تری در خاک‌های با تراکم نسبی پایین‌تر رسوب می‌کند و این پدیده ناشی‌از جذب بیش‌تر باکتری‌ها و مواد مغذی به‌دلیل وجود منافذ و فضاهای خالی بیش‌تر در خاک‌های سست است [۱۱]. لیانگ‌چنگ و همکاران (۲۰۱٤) و روشن‌بخت و همکاران (۲۰۱٦) در تحقیقات جداگانه‌ای با تأیید نتایج سیوکاموتو و همکاران [۱۱] بیان داشتند که افزایش تراکم نسبی خاک سبب افزایش مقاومت تک‌محوری خاک به‌سازی شده می‌شود و علت این امر آن است‌که ذرات خاک در حالت متراکم‌تر به یک‌دیگر نزدیک‌تر هستند و از این‌رو، کریستال‌های کربنات‌کلسیم در فواصل کوتاه‌تری پل‌های رابط بین ذرات خاک را تشکیل می‌دهند [۱۲]، [۱۳]. در سال ۱۳۹۲ سجادی و همکاران به بررسی و امکان‌سنجی کنترل تورم خاک‌های متورم‌شونده (آماسی) با استفاده از فرآیند رسوب میکروبی کلسیت و تأثیر فاکتورهای مختلف از قبیل غلظت باکتری، زمان انکوباسیون، درصد رطوبت خاک، pH محیط و نسبت بهینه محلول باکتری بر بهبود (کاهش) تورم خاک پرداختند [۱٤]. تأثیر دانه‌بندی ماسه بر مقاومت برشی نمونه‌های به‌سازی‌شده به‌روش بیولوژیکی با استفاده از باکتری اسپوروسارسینا پاستوری در محیط کشت حاوی عصاره مخمر و کلریدآمونیوم با pH برابر با ۸/۵ و به‌وسیلهٔ آزمایش برش مستقیم در پژوهش‌های گل‌محمدی و همکاران (۱۳۹٤) بررسی شد [۱۵]. محسن‌زاده و همکاران (۱۳۹٤) برای تکمیل تحقیقات گل‌محمدی و همکاران (۱۳۹٤) با به‌سازی خاک ماسه بددانه‌بندی شده به‌روش میکروبیولوژیکی دوام نمونه‌ها در برابر آب‌شستگی را بررسی کردند [۱٦]. در سال ۱۳۹۵ میرمحمدصادقی و همکاران به ارزیابی عوامل مؤثر در به‌سازی زیستی خاک به‌روش تزریق باکتری در خاک‌های ماسه‌ای پرداختند [۱۷]. در این پژوهش برای بررسی عملکرد MICP در خاک‌های مخلوط که در مقایسه با خاک‌های خالص به‌میزان بیش‌تری در طبیعت یافت می‌شوند، پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های به‌سازی‌شده با به‌کارگیری روش تزریق نفوذ سطحی به‌وسیلهٔ آزمایش برش مستقیم ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

مصالح ژئوتکنیکی

خاک ماسه بررسی شده در این پژوهش از ساحل منطقهٔ آزاد بندرانزلی جمع‌آوری شده و برای آماده‌سازی نمونه‌های خاک ماسه‌رس‌دار و ماسه‌سیلتی به‌ترتیب از خاک‌های رس کائولینیت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

و سیلت شکسته فیروزکوه به‌میزان ۳۰ درصد (وزنی) استفاده شده است. ماسهٔ انزلی از نوع بددانه‌بندی‌شده و با اندازه متوسط ذرات ۰/۲ میلی‌متر گردگوشه است و تاحدی ذرات تیزگوشه نیز در دانه‌بندی آن یافت می‌شود. هم‌چنین مقدار ریزدانه آن بسیار اندک (کم‌تر از یک درصد) است. خاک رس کائولینیت نیز با حد روانی ٤٠، حد خمیری ۲۵ و شاخص پلاستیسیته ۱۵ به‌عنوان رس با خاصیت خمیری پایین (CL) نام‌گذاری می‌شود.

در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی خاک‌های استفاده شده که براساس استاندارد ASTM ٤٢٢-٦٣ D به‌روش دانه‌بندی با الک برای ماسه انزلی و به‌روش هیدرومتری برای ریزدانه‌ها انجام شده [۱۸]، نشان داده شده و در جدول ۱ نیز اطلاعات کاملی از مشخصات اولیه نمونه‌ها ارائه شده است. لازم به ذکر است که آزمایش‌های تعیین چگالی دانه‌های جامد خاک، تعیین وزن مخصوص بیشینه، تعیین وزن مخصوص کمینه و تعیین حدود اتربرگ به‌ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D٨٥٤-١٠، ASTM D٤٢٥٤-٠٠، ASTM D١٥٥٧ و ASTM D٤٣١٨ انجام شده‌اند [۱۹]-[۲۲].

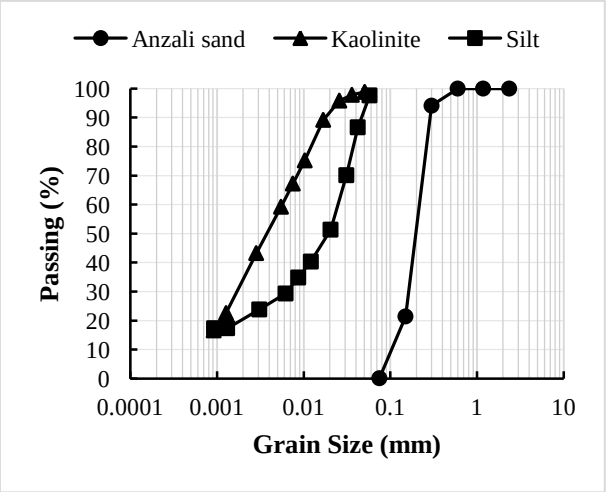
جدول ۱. مشخصات مصالح استفاده شده

پارامتر اندازه‌گیری‌شده	نمونه خاک		
	ماسهٔ انزلی	ماسه‌رس‌دار	ماسه‌سیلتی
G_S	۲/٦٧	۲/٦٥	۲/٦٧
e_{min}	۰/٥٩	۰/۲٦	۰/۳٤
γ_{dmax} (gr/Cm^3)	۱/٦٨	۲/۱۱	۱/۹۹
e_{max}	۰/۸۲	۱/۲٥	۰/۹٥
γ_{dmin} (gr/Cm^3)	۱/٤٧	۱/۱۸	۱/۳۷
$D_{٥٠}$	۰/۲	–	–
C_u	۲	–	–
C_c	۱/۱۹	–	–
Soil group (USCS)	SP	SC	SM

سوسپانسیون باکتری و محلول سیمانتاسیون

میکروارگانیسم استفاده شده در این پژوهش، باکتری اوره‌آزی و گرم مثبت اسپوروسارسینا پاستوری است که با شمارهٔ PTCC١٦٤٥ در مرکز کلکسیون میکروارگانیسم‌های صنعتی سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران نگه‌داری می‌شود. باکتری در محیط کشت حاوی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک‌های بررسی شده

۲۰گرم برلیتر عصارهٔ مخمر و ۱۰گرم برلیتر آمونیوم‌کلرید در pH برابر با ۹ تحت شرایط هوازی در دستگاه شیکرانکوباتور با سرعت ۱۵۰ دور بردقیقه و دمای ۳۰ درجهٔ سانتی‌گراد تا مرحلهٔ رشد لگاریتمی کشت داده شده و تا قبل از تزریق به محیط خاک در دمای ٤ درجهٔ سانتی‌گراد نگه‌داری شد. از محلول کلریدکلسیم و اوره با نسبت مولاریته یک‌به‌یک نیز به‌عنوان محلول سیمانتاسیون استفاده شده‌است.

قالب‌های نمونه‌گیری

با توجه به در نظرگرفتن آزمایش برش مستقیم ٦×٦ به‌عنوان معیار سنجش مقاومت برشی خاک در مراحل قبل و بعد از عملیات به‌سازی، قالب‌هایی با ابعاد متناسب با قالب برش مستقیم از جنس ورق گالوانیزه با ضخامت ۰/٦ میلی‌متر و شامل دو قسمت اصلی، بدنه و صفحه نشیمن که در قسمت میانی آن یک لوله خروجی برای تخلیه پسماند مایعات تزریقی تعبیه شده است، ساخته شدند.

عملیات به‌سازی

در قالب‌های نمونه‌گیری ابتدا از پایین یک لایه کاغذ صافی برای جلوگیری از شسته‌شدن خاک قرار داده شده و پس از آن تمامی نمونه‌ها با ضخامت ۲ سانتی‌متر، در دانسیتهٔ نسبی ۳۰ درصد و در وزن و ارتفاع یک‌سان کوبیده شده‌اند. در قسمت بالایی نمونه‌ها نیز به‌طور مشابه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

یک لایهٔ کاغذ صافی به‌منظور جلوگیری از بهم‌خوردگی ذرات خاک حین تزریق مواد بیولوژیکی استفاده شده است.

محلول‌های بیولوژیکی از بالا به نمونه‌ها تزریق شده و اجازه داده می‌شود تحت اثر نیروهای گرانشی و کاپیلاری در نمونه نفوذ کرده و پسماند مایعات تزریقی از لوله خروجی تخلیه شود. معیار تعیین میزان حجم محلول برای تزریق به هر نمونه حجم حفرات خالی خاک (PV[1]) است. میزان نسبت تخلخل و حجم منافذ خالی هر یک از نمونه‌ها در دانسیته نسبی ۳۰ درصد در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲. میزان نسبت تخلخل و حجم حفرات خالی نمونه‌های خاک بررسی شده در دانسیته نسبی ۳۰ درصد

پارامتر اندازه‌گیری‌شده	نمونه خاک		
	ماسهٔ انزلی	ماسه رس‌دار	ماسه سیلتی
e	۰/۷۵	۰/۹۵	۰/۷۷
$V_V(Cm^3)$	۳۱	۳۶	۳۲

فرآیند تیمار نمونه‌ها به‌ترتیب با تزریق یک واحد PV آب و به‌دنبال آن ترکیب دو لایه‌ای از سوسپانسیون باکتری و محلول سیمانتاسیون هریک به‌حجم یک‌دوم PV آغاز و پس‌از آن برای انجام واکنش‌های بیولوژیکی ۲٤ ساعت به نمونه در دمای آزمایشگاه (۲±۲۵) فرصت داده می‌شود. با گذشت زمان انکوباسیون محلول سیمانتاسیون طی مدت سه روز و هر ۲٤ ساعت یک‌بار به‌میزان یک واحد PV به نمونه تزریق می‌شود. کاهانی و همکاران (۱۳۹۱) عوامل مؤثر بر به‌سازی بیولوژیکی را بررسی کردند و با بررسی مدت‌زمان‌های عمل‌آوری ۱٤، ۲۸ و ٥٦ روزه دریافتند که حداکثر ۲۸ روز، زمان برای رسیدن به مقاومت نهایی نیاز است [۲۳]. از این‌رو مدت‌زمان عمل‌آوری نمونه‌ها نیز ۲۸ روز در نظر گرفته شده است.

روش‌های مانیتورینگ

چگالی نوری

در این پژوهش، مشابه هارکس[2] و همکاران [۲] در حین انجام آزمایش‌ها مربوط به کشت

1. Pore voids volume
2. Harkes

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

باکتری، چگالی نوری (OD[1]) به‌عنوان معیاری برای تخمین‌زدن غلظت سلول‌های باکتری موجود در محیط، انتخاب و در تمامی مراحل به‌سازی و دقیقاً قبل از تزریق سوسپانسیون باکتری به نمونه خاک، به‌وسیلهٔ دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ٦٠٠ نانومتر ($OD_{٦٠٠}$) اندازه‌گیری شده است. روش کار به‌این‌صورت است‌که دستگاه از طریق عبور دادن نور با طول موج ٦٠٠ نانومتر از محیط حاوی باکتری، براساس میزان جذب نور به‌وسیلهٔ سلول‌های باکتری معلق در محیط عددی را به‌عنوان چگالی نوری ارائه می‌دهد و در ادامه با به‌کارگیری رابطهٔ (٣) می‌توان غلظت سلول‌های باکتری درون محیط کشت را تخمین زد [٢٤].

$$Y=8.59\times10^{7}\times Z^{1.3627} \qquad (٣)$$

که درآن، Z مقدار قرائت شده از دستگاه و Y غلظت سلول‌ها در هر میلی‌متر است.

لازم به‌ذکر است که مقدار $OD_{٦٠٠}$ در این تحقیق برای تمامی سوسپانسیون‌های باکتری قبل از عملیات تزریق در محدوده ١/٧ تا ٢ به‌دست آمده است.

فعالیت اوره‌آزی

باکتری اسپوروسارسینا پاستوری با تولید آنزیم اوره‌آز موجب هیدرولیز اوره و تبدیل آن به یون آمونیوم و کربنات می‌شود که این تولید یون باعث افزایش هدایت الکتریکی محلول اوره می‌شود. از این‌رو فعالیت اوره‌آزی باکتری‌ها در غیاب یون کلسیم به‌روش رسانایی الکتریکی[2] قبل از هربار تزریق باکتری به تودهٔ خاک سنجیده شده است. برای تعیین این ویژگی، یک میلی‌لیتر سوسپانسیون باکتری به نه میلی‌لیتر محلول ١/١١ مولار اوره اضافه aده و با غوطه‌ور ساختن الکترود دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی[3] در محلول، رسانایی آن طی مدت ٥ دقیقه و در دمای ٢±٢٠ درجه سلسیوس ثبت شده است [٢]. هدایت الکتریکی با واحد زیمنس[4] بیان می‌شود. در این پژوهش هر یک میلی‌زیمنس بر دقیقه نشان‌دهندهٔ هیدرولیز ١١ میلی‌مول اوره بر دقیقه است. میزان فعالیت اوره‌آزی در مرحلهٔ قبل از به‌سازی برای همهٔ نمونه‌ها در بازهٔ ٠/٨ تا ١/٢٣ میلی‌زیمنس بر دقیقه بوده است که مطابق تحقیقات هارکز و همکاران [٢] در محدودهٔ مناسبی قرار دارد.

1. Optical density
2. Electrical conductivity
3. EC meter

٤. یکای رسانایی الکتریکی در سیستم SI با نماد S است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

آزمایش برش مستقیم

به‌منظور بررسی پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های خاک، قبل و بعد از عملیات به‌سازی از آزمایش برش مستقیم براساس استاندارد ASTM D۳۰۸۰ استفاده شده است [۲۵]. این آزمایش برای تمامی نمونه‌ها تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال در شرایط زهکشی‌نشده با سرعت بارگذاری یک میلی‌متر بر دقیقه و تا کرنش ۱۵درصد انجام گرفته است. هم‌چنین نمونه‌های خاک با رطوبت ۷ درصد و با دانسیتهٔ نسبی ۳۰ درصد (چنان‌که قبلاً ذکر شد) بازسازی شده‌اند.

آنالیزهای SEM و EDX

آنالیز SEM[1] برای بررسی چگونگی توزیع رسوب بین ذرات خاک و آنالیز EDX[2] به‌منظور شناسایی عنصرهای تشکیل‌دهنده‌ی رسوب کربنات‌کلسیم در نمونهٔ خاک به‌سازی‌شده، به‌وسیلهٔ میکروسکوپ الکترونی روبشی روی نمونه خاک ماسه انزلی در شرایط قبل و بعد از به‌سازی انجام شد.

تحلیل نتایج و بحث

تأثیر به‌سازی بر مقاومت برشی

با بررسی نتایج به‌دست آمده از آزمایش برش مستقیم مشاهده می‌شود که مقاومت برشی در هر سه نمونه خاک به‌سازی شده در مقایسه با شرایط قبل از به‌سازی به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. نمودارهای تنش برشی در برابر تغییر شکل برشی برای ماسهٔ انزلی در دو حالت قبل و بعد از به‌سازی به‌عنوان نمونه در شکل ۲ نشان داده شده است. هم‌چنین میزان افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها تحت تنش‌های نرمال اعمال‌شده نیز در جدول ۳ آورده شده است.

چنان‌که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود بیش‌ترین بهبود مقاومت برشی نمونه‌ها نسبت‌به حالت به‌سازی‌نشده ابتدا در نمونه مخلوط ماسه با ۳۰ درصد رس و پس‌از آن در نمونه ماسه حاوی ۳۰ درصد سیلت رخ داده است و ماسه انزلی کم‌ترین میزان افزایش مقاومت برشی را بین نمونه‌ها داشته است. این در حالی است‌که با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ٤ و

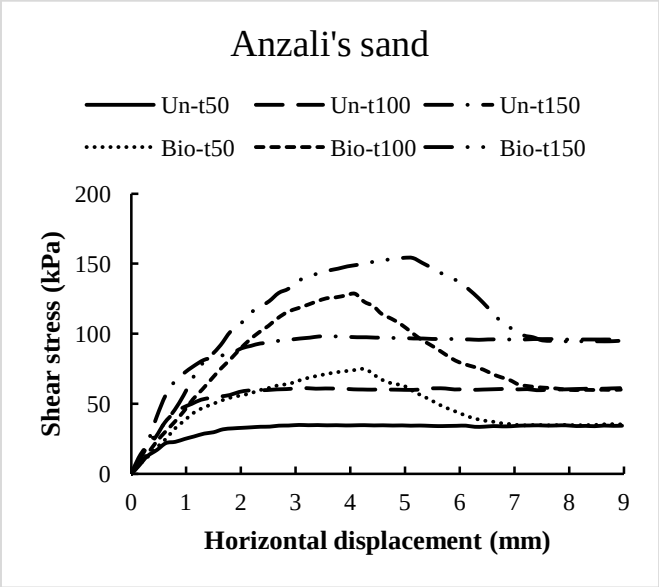
1. Scaning electron microscope
2. Energy dispersive x-ray

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

نمودارهای شکل ۳ که به مقایسهٔ میزان تغییرات مقاومت برشی هریک از نمونه‌ها در سربارهای یک‌سان پرداخته است، می‌توان دریافت که مقاومت برشی مخلوط ماسه با ۳۰ درصد رس علی‌رغم بهبود بیش‌تر نسبت به حالت به‌سازی‌نشدهٔ خود، در مقایسه با ماسه انزلی به‌سازی‌شده دچار افت مقاومت شده‌است.

جدول ۳. میزان افزایش مقاومت برشی نمونه‌های خاک بررسی شده تحت تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال

تنش قائم (کیلوپاسکال)	درصد افزایش مقاومت برشی		
	ماسه انزلی	ماسه رس‌دار	ماسه سیلتی
۵۰	۱۱٤/۹	۱۵۰/۷	۱۳۱/۵
۱۰۰	۱۱۰/۷	۱۲۱/۳	۱۲۲/۵
۱۵۰	۵۷/۲	٦۹/۸	٦۰/۷
	۹٤/۳	۱۱۳/۷	۱۰٤/۹

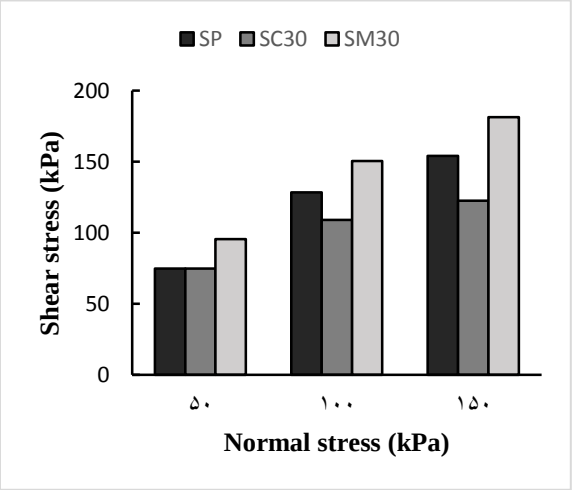


شکل ۲. نمودارهای تنش برشی در برابر تغییر شکل برشی برای ماسهٔ انزلی در دو حالت به‌سازی نشده (Un-t) و به‌سازی‌شده (Bio-t) تحت تنش‌های نرمال ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

جدول ٤. میزان تغییرات مقاومت برشی نمونه‌های مخلوط نسبت‌به ماسهٔ انزلی، به‌سازی شده به‌روش MICP

تنش قائم (کیلوپاسکال)	درصد افزایش مقاومت برشی	
	ماسه رس‌دار	ماسه سیلتی
۵۰	-۰/۱	۲۷/۸
۱۰۰	-۱۵/۱	۱۷/٦
۱۵۰	-۲۰/۵	۱۷
	-۱۱/۹	۲۰/۸



شکل ۳. مقایسهٔ مقاومت برشی نمونه‌های به‌سازی‌شده (ماسهٔ انزلی (SP)، ماسهٔ حاوی ۳۰ درصد رس (SC۳۰) و ماسهٔ حاوی ۳۰ درصد سیلت (SM۳۰)) به‌روش MICP تحت سربارهای یک‌سان

با نگاهی به میزان نسبت تخلخل نمونه‌ها در دانسیتهٔ نسبی ۳۰ درصد و هم‌چنین تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک‌های به‌سازی‌شده و مقایسهٔ آن‌ها با شرایط به‌سازی نشده که مقادیر آن‌ها در جدول ۵ ارائه شده‌اند، می‌توان علت وقوع این پدیده را این‌گونه بیان کرد که افزایش ریزدانه چسبنده به خاک ماسه‌ای سبب افزایش نسبت تخلخل خاک و به‌دنبال آن افزایش فاصلهٔ بین دانه‌های ماسه شده که این مسئله باعث کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی و به تبع آن

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

کاهش مقاومت برشی خاک شده است. از طرفی با افزایش نسبت تخلخل، منافذ بیش‌تر و یکنواخت‌تری در تودهٔ خاک ایجاد می‌شوند که امکان حرکت آزادانه باکتری‌ها و در نتیجه توزیع مناسب آن‌ها در بین حفرات را فراهم می‌کند. باوجود این‌که جذب بهتر باکتری‌ها در خاک ماسه رس‌دار منجربه توزیع مناسب‌تر رسوب کربنات‌کلسیم و به‌دست آمدن پارامتر چسبندگی بیش‌تری نسبت به ماسهٔ انزلی پس‌از فرآیند به‌سازی، شده است اما نمونهٔ ماسهٔ انزلی به‌دلیل دارا بودن زاویهٔ اصطکاک داخلی بزرگ‌تر، در مجموع مقاومت بیش‌تری از خود نشان داده است.

جدول ۵. مقدار پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های بررسی شده قبل و بعد از به‌سازی بیولوژیکی

پارامترهای مقاومت برشی		نمونه خاک		
		ماسهٔ انزلی	ماسه رس‌دار	ماسه سیلتی
چسبندگی (کیلوپاسکال)	به‌سازی‌نشده	۰	۸	۰
	به‌سازی‌شده	۳۹/۸	٥٤/۲	٥٦/۷
زاویهٔاصطکاک داخلی(درجه)	به‌سازی‌نشده	۳۲/٤	۲۳	۳٥/٦
	به‌سازی‌شده	۳۸/٥	۲٥/٦	٤۰/٦

مطابق با جدول ٤ و شکل ۲ مقاومت بیش‌تری برای نمونه مخلوط ماسه با ۳۰ درصد سیلت در مقایسه با ماسهٔ انزلی پس از به‌سازی، مشاهده می‌شود. با توجه‌به این‌که تغییرات نسبت تخلخل در بین این دو نمونه تقریباً ثابت بوده است، این‌گونه استنباط می‌شود که ذرات سیلت با قرار گرفتن در بین دانه‌های ماسه باعث کاهش فاصلهٔ بین ذرات خاک شده و از این‌رو، کریستال‌های کربنات‌کلسیم در فاصله‌های کوتاه‌تری پل‌های رابط بین ذرات خاک را تشکیل می‌دهند.

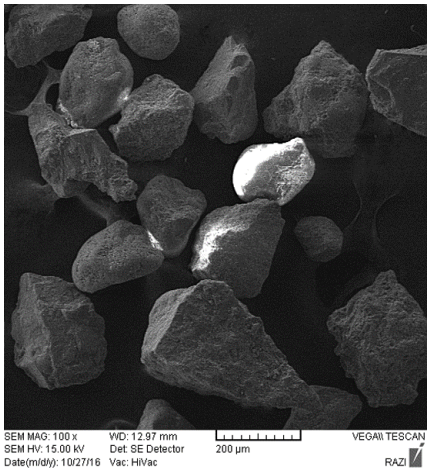
بررسی فرآیند رسوب‌گذاری

تصاویر آنالیز SEM از ماسهٔ انزلی در دو حالت قبل و بعد از به‌سازی به‌ترتیب با بزرگ‌نمایی‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ برابر در شکل‌های ٤) و ٥ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود ماسه انزلی کاملاً تمیز است و ذرات تشکیل دهندهٔ آن ترکیبی از دانه‌های گردگوشه و تیزگوشه‌اند. در نمونهٔ به‌سازی شده نیز ملاحظه می‌شود که رسوب کربنات‌کلسیم به‌صورت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

ترکیبی از الگوهای اول و دوم ارائه شده به‌وسیلهٔ دی‌یانگ و همکاران [۹] در بین ذرات خاک توزیع یافته است، به این‌ترتیب که بخشی از رسوب به‌صورت لایه‌ای یک‌نواخت و نازک دور دانه‌ها را گرفته و بخش دیگر با ایجاد پل‌هایی در دهانهٔ محل اتصال دانه‌ها، ذرات خاک را به یک‌دیگر پیوند داده است.

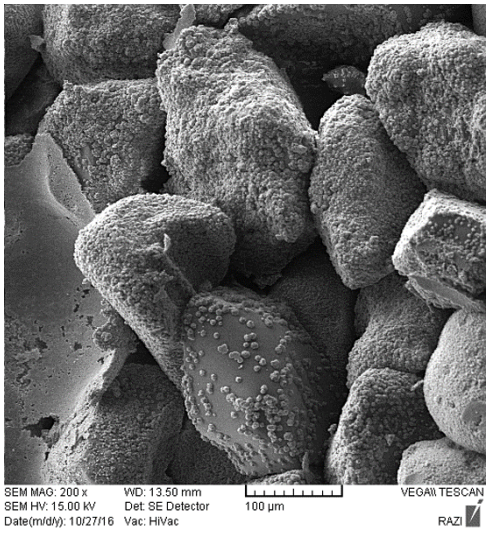
در میان چندین پلی‌مورف[1] کربنات‌کلسیم، کلسیت، آراگونیت[2] و واتریت[3] شایع‌ترین نوع آن‌ها در طبیعت هستند. در بین این پلی‌مورف‌های کربنات‌کلسیم، کلسیت از لحاظ ترمودینامیکی پایدارترین است و دگردیسی کلسیت از گونه‌های دیگر کربنات‌کلسیم مانند آراگونیت و واتریت که پایداری کم‌تری دارند (بی‌ثبات در حرارت و فشار) از طریق انحلال و بازته‌نشینی طبیعی رخ می‌دهد. شکل بلور کانی کلسیت نیز به‌صورت لوزی‌شکل و یا مربعی است، واتریت به شکل‌های کروی و صفحه‌ای تشکیل می‌شود و آراگونیت نیز دارای ساختاری سوزنی‌شکل است [۲۶]. در شکل ٦ نمونه به‌سازی شده ماسه انزلی با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰ برابر قابل مشاهده است. در این تصویر بلورهای مکعبی‌شکل رسوبات نشان می‌دهند که نوع رسوب تشکیل شده بین ذرات خاک از جنس کلسیت است و شاید بتوان علت افزایش نسبی زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک در نمونه‌های به‌سازی‌شده را ناشی از اصطکاک اضافی ایجاد شده بین ذرات جامد و چندوجهی رسوب تشکیل‌شده بین دانه‌های خاک دانست.



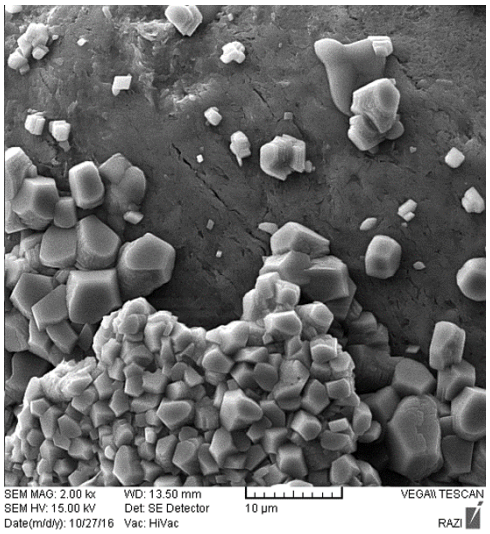
شکل ٤. تصویر گرفته شده از ماسهٔ انزلی به‌وسیلهٔ میکروسکوپ الکترونی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰برابر

1. Polymorph
2. Aragonite
3. Vaterite

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]



شکل ۵. تصویر گرفته شده از ماسه به‌سازی‌شده به‌روش MICP به‌وسیلهٔ میکروسکوپ الکترونی با بزرگ‌نمایی ۲۰۰برابر

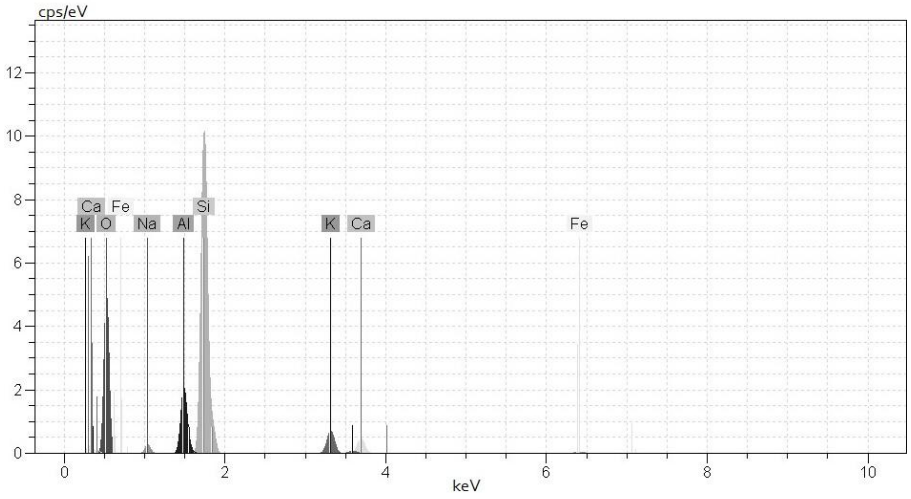


شکل ٦. تصویر گرفته شده از ماسه انزلی به‌سازی‌شده به‌روش MICP به‌وسیلهٔ میکروسکوپ الکترونی با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰برابر

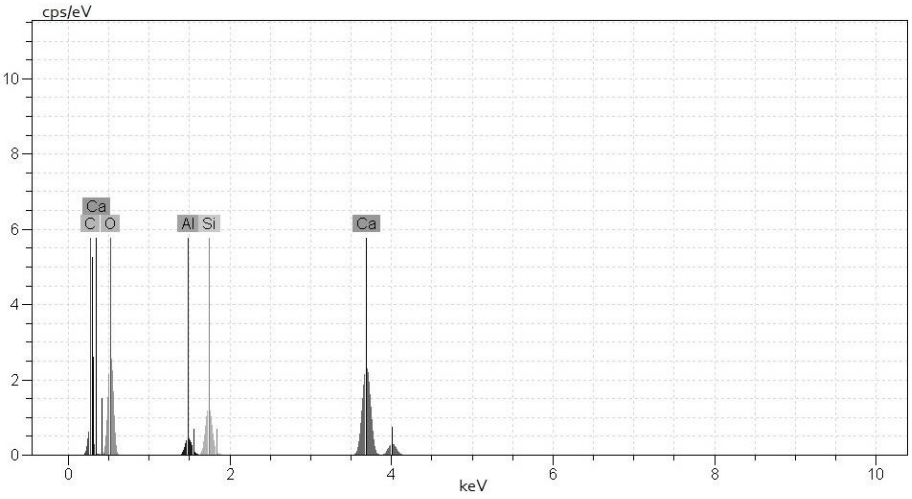
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

عناصر تشکیل‌دهندهٔ رسوب

کربن، اکسیژن و کلسیم عناصری هستند که در تشکیل رسوب کربنات‌کلسیم نقش تعیین‌کننده ایفا می‌کنند [۲٤]. پیک‌های ظاهرشده در آنالیز EDX برای نمونه ماسه به‌سازی شده در مقایسه با نمونه به‌سازی نشده نشان می‌دهند که اجزای اصلی رسوب غالباً کربن، اکسیژن و کلسیم است و وجود آن‌ها ثابت می‌کند که رسوب تشکیل شده در تودهٔ خاک کربنات‌کلسیم است (شکل‌های ۷ و ۸).



شکل۷. نتایج آنالیز EDX ماسه به‌سازی نشده



شکل ۸. نتایج آنالیز EDX ماسه به‌سازی شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر افزایش ریزدانه‌های چسبنده و غیرچسبنده بر روند به‌سازی بیولوژیکی خاک ماسه‌ای موضوع اصلی این تحقیق است. برای این منظور سه نمونه خاک ماسه تمیز، ماسه حاوی ۳۰ درصد رس و مخلوط ماسه با ۳۰ درصد سیلت در دانسیتهٔ نسبی ۳۰ درصد با روش MICP به‌سازی شده و پارامترهای مقاومت برشی آن‌ها پس از مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه به‌وسیلهٔ آزمایش برش مستقیم ارزیابی شد. با استفاده از داده‌های آزمایش برش مستقیم و آنالیزهای SEM و EDX و تجزیه و تحلیل آن‌ها، نتایج به‌دست آمده بدین‌شرح است:

الف) رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم تأثیر به‌سزایی در بهبود خصوصیات مقاومتی هر سه نمونه خاک دارد.

ب) نمونهٔ ماسه رس‌دار علی‌رغم میزان بهبودیافتگی بیش‌تر در مقایسه با دو نمونه دیگر و با افزایش مقاومت برشی میانگین به‌میزان ۱۱۳/۷ درصد نسبت‌به حالت به‌سازی نشده خود، در بین سه نمونه به‌سازی‌شده کم‌ترین مقاومت برشی را دارد.

ج) افزایش ریزدانه‌های رسی به‌میزان ۳۰ درصد سبب افزایش حفرات خاک می‌شود و این مسئله از طرفی باعث کاهش زاویهٔ اصطکاک و مقاومت برشی خاک در حالت قبل از به‌سازی شده و از سوی دیگر سبب حرکت راحت‌تر باکتری‌ها در بین منافذ به‌وجود آمده در خاک و توزیع مطلوب‌تر رسوب کربنات‌کلسیم و در نتیجه افزایش چسبندگی بین ذرات خاک می‌شود.

د) افزایش ریزدانه‌های غیرچسبنده سبب ایجاد نقاط اتصال بیش‌تر در بین ذرات ماسه می‌شود، از این‌رو، کریستال‌های کربنات‌کلسیم در فاصله‌های کوتاه‌تری پل‌های رابط بین ذرات خاک را تشکیل می‌دهند و در نتیجه با پایان فرآیند به‌سازی پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه حاوی ۳۰ درصد سیلت در مقایسه با ماسه تمیز مقدار بیش‌تری دارند.

ه) بررسی تصاویر آنالیز SEM خاک ماسه تمیز در دو حالت قبل و بعد از به‌سازی تشکیل رسوب کربنات‌کلسیم به‌صورت ترکیبی از یک لایه یک‌نواخت و نازک که دور

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

دانه‌های ماسه را احاطه کرده است و قسمت دیگری از رسوبات که در دهانهٔ محل اتصال دانه‌ها تشکیل شده‌اند را نشان می‌دهد.

و) بلور مکعبی‌شکل رسوبات تأیید می‌کنند که جنس رسوب تشکیل شده در خاک از نوع پایدار کلسیت است و می‌توان افزایش نسبی زاویهٔ اصطکاک نمونه‌های به‌سازی‌شده را ناشی‌از ذرات جامد و چندوجهی رسوب دانست، هم‌چنین عناصر کربن، اکسیژن و کلسیم که اجزای اصلی برای تشکیل رسوب کرینات‌کلسیم هستند در آنالیز EDX نمونه به‌سازی‌شده ماسه تمیز دیده شده‌اند.

منابع

1. Van Paassen L. A., "Biogrout, ground improvement by microbial induced carbonate precipitation", PhD Thesis, Murdoch University (2009).
2. Harkes M. P., et al., "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement", Ecological Engineering, **36** (2) (2010) 112-117.
3. Cheng L., Shahin M. A., Mujah D., "Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **143** (1) (2016) 04016083 (1-11).
4. Whiffin V. S., "Microbial CaCO3 precipitation for the production of biocement", PhD Thesis, Murdoch University (2004).
5. Whiffin V. S., van Paassen L. A., Harkes M. P., "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", Geomicrobiology Journal, **24** (5) (2007) 417-423.
6. DeJong J. T., Fritzges M. B., Nüsslein K., "Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear", Journal of

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **132** (11) (2006) 1381-1392.

7. Al-Thawadi S., "High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria", PhD Thesis, Murdoch University (2008).
8. Van Paassen L., et al., "Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method", in Proceedings of the 17th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Lansdale IOS Press (2009).
9. DeJong J. T., et al., "Bio-mediated soil improvement. Ecological Engineering, **36** (2) (2010) 197-210.
10. Cheng L. Cord-Ruwisch R., "In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation", Ecological Engineering, **42** (2012) 64-72.
11. Tsukamoto M., et al., "Influence of relative density on microbial carbonate precipitation and mechanical properties of sand", in Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris (2013).
12. Cheng L., et al., "Soil stabilisation by Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP): Investigation into some physical and environmental aspects", in 7th International Congress on Environmental Geotechnics: iceg 2014 Engineers Australia (2014).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

13. Rowshanbakht K., et al., "Effect of injected bacterial suspension volume and relative density on carbonate precipitation resulting from microbial treatment", Ecological Engineering, **89** (2016) 49-55.

۱٤. سجادی م.، حبیب‌آگهی ق.، "بررسی امکان به‌سازی خاک متورم شونده به‌روش بیولوژیکی"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد, دانشگاه شیراز (۱۳۹۲).

۱۵. گل‌محمدی س.، همکاران, "تأثیر دانه‌بندی ماسه بر روی مقاومت برشی نمونه‌های به‌سازی شده به‌روش میکروبیولوژیکی"، نهمین کنگرهٔ ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد: مشهد، ایران (۱۳۹۵).

۱٦. محسن‌زاده آ.،و همکاران، "تأثیر رسوب میکروبی کلسیم کربنات بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ماسه‌ای. پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز (۱۳۹٤).

۱۷. میرمحمدصادقی م. و همکاران، "ارزیابی عوامل مؤثر در به‌سازی زیستی خاک به‌روش تزریق باکتری در خاک های ماسه‌ای"و نشریهٔ علوم آب و خاک، شماره۷۷، (۱۳۹۵).

18. ASTM D 422-63 (Reapproved), "Standard test method for particle-size analysis of soils", The American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA 19428-2959, United States (2002).

19. ASTM D 854-10, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", The American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA 19428-2959, United States (2010).

20. ASTM D 4254-00, "Standard test method for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density", The American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA 19428-2959, United States (2002).

21. ASTM D 1557, "Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort", The American Society for

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]

Testing and Materials: West Conshohocken, PA 19428-2959, United States (2012).

22. ASTM D 4318-10e01, "Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils", The American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA 19428-2959, United States (2014).

۲۳. کاهانی م.، "رسوب‌گذاری زیستی کلسیم‌کربنات در خاک‌های ماسه‌ای و تأثیر آن بر افزایش مقاومت خاک. فصلنامه علمی محیط زیست، شمارهٔ ۵۲، (۱۳۹۱).

24. Okwadha G. D., Li J., "Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. Chemosphere, 81 (9) (2010) 1143-1148.

25. ASTM D 3080, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions", The American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA 19428-2959, United States (2006).

26. Tegethoff F. W., Rohleder J., Kroker E., "Calcium carbonate: from the Cretaceous period into the 21st century", Springer Science & Business Media (2001).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.7.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.687]