ارزیابی کاهش مخاطرات خاک‌های ریز دانهٔ دشت سیستان به کمک سیمان‌های زیستی

حسینعلی بگی*: *استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران*
سیروس قنبری: *دانشیار جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۱۳)

چکیده

در سال‌های اخیر، محققان مختلف به تولید سیمان‌های زیستی برای تثبیت خاک‌ها، مقابله با ریزگردها و محافظت از زیست‌بوم‌ها در مناطق مختلف جهان توجه زیادی داشتند. با توجه به اینکه ریزگردها بر اقتصاد و سلامت جامعهٔ شهری و روستایی ایران به ویژه در دشت سیستان (با جمعیت شهری ۴۳/۳۷ درصد و جمعیت روستایی ۵۶/۶۳ درصد) اثرات مخربی داشت، امکان استفاده از فناوری تثبیت خاک‌های ریز دانه سیلتی به کمک کلسیت‌زایی و افزایش مقاومت برشی خاک توسط باکتری‌های باسیلوس مگاتریوم و اسپوروسارسینا پاستوری در این پژوهش ارزیابی شد. در این راستا، بررسی‌های آزمایشگاهی تولید سیمان زیستی به کمک آزمایش‌های برش مستقیم و امواج فشاری در دوره‌ای هشت هفته‌ای بر روی خاک‌های ریز دانه درشت سیستان انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقاومت نمونه‌های خاک در طی سه هفتهٔ اول افزایش، سپس اندکی کاهش یافت. هم زمان در این بازهٔ زمانی، نمونه‌های تیمار شده توسط آزمایش امواج فشاری (UPV) بررسی و مقایسه شد. در نمونه‌های تحت مراقبت در ۲۱ روز اول، سرعت امواج فشاری افزایش و در هفته‌های بعد کمی کاهش یافت. کاهش مقاومت برشی و سرعت امواج در نمونه‌های حاوی باکتری‌ها تیمار شده، مرتبط با انحلال پل‌های کلسیتی بعد از هفتهٔ سوم است. این مطالعه، تثبیت بیوزیستی خاک‌های سیلتی توسط باکتری‌های استاندارد و باسیلوس مگاتریوم را برای کاهش مخاطرات ریزگردها در دشت سیستان ممکن می‌سازد و تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی: خاک‌های ریز دانه، سیمان زیستی، سیستان، کاهش مخاطرات.

۱ـ مقدمه

امروزه تغییرات آب و هوایی، سدسازی‌های بی‌رویه و ... از مهم‌ترین چالش‌های زیست کرهٔ زمین محسوب می‌شود. پدیده‌هایی همانند خشکی‌ها و سیلاب‌های گسترده، آتش‌سوزی‌ها و به دنبال آن ریزگردهای با مقیاس بزرگ از نتایج این تغییرات اقلیمی است. ریزگردها یکی از بزرگ‌ترین مشکلات زیست محیطی محسوب می‌شود. منشأ داخلی و عمدهٔ ریزگردها در ایران در بخش‌های جنوب غرب، مرکز و جنوب شرقی کشور قرار دارد (Velayatzadeh, 2020). طوفان

* نویسندهٔ مسئول: Hbagi@tvu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

گرد و غبار به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ممکن است بتواند ابر متراکمی از گرد و غبار را تا ارتفاع حدود سه هزار متر در فضا ایجاد کند. تراکم این ابر غبارآلود آن قدر زیاد ــ حدود چهار هزار تن غبار در هر کیلومتر مکعب هوا ــ است که می‌تواند جلوی دید را به طور کامل مسدود کند (Yang et al, 2020). انتقال ریزگردها در اتمسفر و رسیدن آنها به آب‌های دریایی سبب می‌شود فلزات سنگین و سمی زیادی به آب دریاها و اقیانوس‌ها وارد شود (Rashki, 2012). همچنین ریزگردها ممکن است حاوی میکرو ارگانیسم‌های زنده مثل باکتری، قارچ یا ترکیبات شیمیایی مقاوم در برابر تجزیهٔ ارگانیسم‌ها باشد و به بیماری‌های رایج ناخنک چشم، کراتیت شنی یا اثرات فیزیکی مانند خراش قرنیه، کاهش دید و ... در طول شبانه‌روز منجر شود (Yang et al, 2020).

فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین فرایندهای طبیعی در مناطق نیمه‌خشک، خشک و فراخشک است. این فرایند در شرایطی رخ می‌دهد که علاوه بر وجود خاک حساس، باد دارای حاکمیت و سرعت قابل توجه باشد. انتقال ذرات خاک به صورت‌های مختلف معلق، جهشی و خزشی انجام می‌شود و به محیط زیست خسارت‌های جدی وارد می‌سازد. در این ارتباط، وضعیت پوشش سطحی خاک یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سرعت آستانه است. پوشش سنگفرش بیابانی، میانگین قطر ذرات، شوری و مقدار گچ از مهم‌ترین عوامل در این زمینه محسوب می‌شود (Azimzadeh et al, 2008).

اغلب طوفان‌های ریزگردی در مناطق خاصی از کرهٔ زمین دیده می‌شود. به‌کارگیری هر روشی برای مقابله با ریزگردها، به نوع خاک، درصد خاک ریز دانه، عمق مورد نظر برای تثبیت و دسترسی به مواد لازم بستگی دارد. روش رایج در تثبیت خاک، استفاده از سیمان پرتلند، اکسید کلسیم یا آهک، روش‌های شیمیایی همانند به‌کارگیری اپوکسی‌ها، سیلیکات‌ها و ژئوتکستال‌ها است تا فضاهای خالی خاک پر شود و وزن حجمی و مقاومت خاک افزایش یابد؛ با این وجود، تقریباً همهٔ این موارد به جز سیلیکات سدیم برای محیط زیست سمی و خطرناک است (Manav et al, 2019)؛ برای نمونه در سال ۱۹۷۴، تزریق آکریلامید در خاک به سمی شدن آب‌ها در ژاپن منجر شد و ممنوعیت تزریق تقریباً تمام مواد شیمیایی را در این کشور به همراه داشت (Afrin, 2017& Manav et al, 2019). با عنایت به گزارش‌ها و توصیه‌های متعدد خطرات زیست محیطی مرتبط با تزریق مواد شیمیایی در خاک، تمایل متخصصان به فناوری زیستی در چند سال اخیر افزایش یافت و به طور تصورناپذیر از روش‌های نوین استفاده شد. یکی از این روش‌ها، تولید کلسیت به روش تحریک میکروبی یا رسوب دادن باکتریایی کلسیت[1](MICP) است که به سیمانی شدن ذرات منجر می‌شود (رحمان و همکاران، ۲۰۲۰). رایج‌ترین نوع MICP، روش غیر مستقیم است که در آن غلظت یون هیدروژن یا PH تغییر می‌کند. یون بیکربنات تولید می‌شود و در نهایت، به رسوب کربنات کلسیم در حضور یون کلسیم منجر می‌شود. پدیدهٔ سیمانی شدن در گام نخست، ذرات خاک را می‌پوشاند و آنها را به کمک سیمان کلسیتی به

[1] Microbiologhically Induced Calcite Precipitation

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

یکدیگر متصل می‌سازد (شکل ۱). در طی تکوین کرهٔ زمین در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی، فرایند سیمانی-شدن در سیانوباکتری‌ها نیز مشاهده می‌شود؛ برای نمونه، سیمانی شدن در ریف‌های میکروبی به جا مانده به صورت فسیل در ابتدای مزوزوییک (۲۴۰ میلیون سال قبل) دیده می‌شود (Bagi et al, 2021).

برخی از جنس و گونه‌های باکتری به دلیل داشتن آنزیم آز، می‌توانند به تغییر و افزایش غلظت یون هیدروژن در سیستم و تولید یون‌های کربنات منجر شوند. از نظر شیمیایی، رسوب کربنات کلسیم در PH بالاتر از ۸/۳ تا ۹ آغاز می‌شود. در این شرایط، محیط به سمت قلیایی‌شدن یا بازی‌شدن پیش می‌رود (Van Paassen, 2009). در دو دههٔ اخیر، کارشناسان و پژوهشگران مختلفی توان باکتری‌ها را در کلسیم‌زایی داخل خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه بررسی و ارزیابی کردند (Kano et al, 2017). در این پژوهش‌ها مشخص شد که به کمک فناوری زیستی می‌توان مقاومت خاک را افزایش داد و شیروانی‌های ناپایدار را تثبیت کرد.

همچنین هنگام بررسی منحنی تغییرات در آزمایش امواج برشی و فشاری در این خاک‌ها مشخص شد که کلسیت‌زایی باکتری‌ها در بین ذرات خاک، به افزایش سرعت امواج منجر می‌شود (Akyol et al, 2017). در این راستا، Jiang و همکاران (2016) توانستند فرسایش خاک را به روش MICP کاهش دهند.

گروه‌ها، جنس‌ها و گونه‌های مختلفی از باکتری‌ها می‌توانند آنزیم اوره تولید کنند. از مهم‌ترین آنها می‌توان باسیلوس‌ها، اسپوراسارسینا، اسپولواکتوباسیلوس، کلوستریدیوم، دزفولوتوماکلوم و .... را نام برد. در این روش تثبیت خاک، راهکارهای مؤثری برای تشکیل ذرات ریزدانهٔ آهکی به منظور تغییر خواص مهندسی خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه شناخته شد (Kucharski et al, 2006). موجودات ذره‌بینی می‌توانند کانی‌ها یا مینرال‌هایی مانند سیلیکات، کربنات‌ها و کلسیم را در فرایند کانی‌سازی زیستی تولید کنند (Lowenstam et al, 1989). این مواد ممکن است توسط فرایند مشخص زیستی ــ که به کانی‌سازی منجر می‌شود ــ ساخته شود. کانی‌های ساخته شده می‌توانند نقش پرکنندهٔ فضاهای خالی را داشته باشند و بنابراین، به کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت و سختی خاک منجر شوند.

از روش MICP به صورت گسترده‌ای برای بهبود خواص مکانیکی و هیدرولیکی خاک استفاده می‌شود. افزایش مقاومت خاک با استفاده از این روش به گسترهٔ جغرافیایی، خواص فیزیکی ــ شیمیایی خاک، آب محتوی، کانی‌شناسی ذرات، پراکندگی یا یکنواختی ذرات و بافت خاک بستگی دارد. در مطالعات متعدد گزارش شده‌است که روند بهبود مقاومت خاک در اثر کانی‌سازی زیستی در ابتدا به صورت نمایی یا لگاریتمی افزایش یافت، بعد از مدتی متوقف شد و در ادامه، کاهش یافت که دقیقاً این نوسان‌ها با تغییر جمعت باکتری‌ها مرتبط بود (Sharma et al, 2003).

با عنایت به گسترهٔ جغرافیایی وسیع، ایران از نظر آب و هوایی به خصوص میزان رطوبت تنوع زیادی دارد. همچنین انواع مختلفی از خاک‌ها در اقلیم‌های متفاوت آن یافته می‌شود. به دلیل شرایط آب و هوایی نسبتاً خشک در قارهٔ آسیا به خصوص در بیابان‌های هند و چین و گسترش مناطق بیابانی در شرق ایران همانند سیستان، باکتری‌های مقاوم و کلسیت‌زا به خصوص باسیلوس مگاتریوم نسبتاً فراوان است (Shivakumar et al, 2014).

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

برای نمونه در جنوب شرق ایران به خصوص دشت سیستان، هر ساله میلیون‌ها تن خاک توسط طوفان‌های مخرب فرسایش می‌یابد و با تجمع در مناطق مختلف، منبع و پتانسیلی جدید برای ریزگردها به وجود می‌آورد. ذرات با قطر حدود ۱/. میکرون پس از آنکه توسط باد از سطح زمین بلند می‌شوند، مدت بسیار طولانی در هوا معلق می‌مانند و خطرات زیستی مخرب به همراه دارند. دشت پهناور سیستان در واقع، منطقه‌ای با گودی کم شیب با مساحت هیجده هزار کیلومترمربع در بخش جنوب غربی حوضهٔ هیرمند است. این دشت توسط دلتای رود هیرمند و سه پهنهٔ آبی فصلی به نام‌های هامون پوزک (۴۸۰ کیلومترمربع)، هامون صابوری (۸۰۰ کیلومترمربع) و هامون هیرمند (۶۵۰ کیلومترمربع) پوشیده می‌شود. رسوبات بستر دشت نیز شامل خاک‌های سیلتی رسی دریاچه‌ای و دلتایی هیرمند است (Sahebzadeh et al, 2019). این دشت بر روی دلتای رودخانهٔ هیرمند در شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده‌است و ورود زیاد رسوبات در گذشته سبب شده ژرفای دریاچهٔ هامون به دلیل انباشت رسوبات کاهش یابد. امروزه شهر زابل در برخی نقاط نسبت به دریاچهٔ هامون ارتفاع کمتری دارد؛ از این رو برای محافظت شهر در برابر سیلاب‌های هیرمند، سیلاب‌بندهایی پیرامون شهر بنا شده‌است. با توجه به اینکه دشت سیستان از تناوب خاک‌های ریزدانهٔ رسی و سیلتی تشکیل شده‌است؛ احتمال دارد پدیدهٔ واگرایی خاک در فرسایش و تخریب رسوبات در این منطقه نقش داشته باشد.

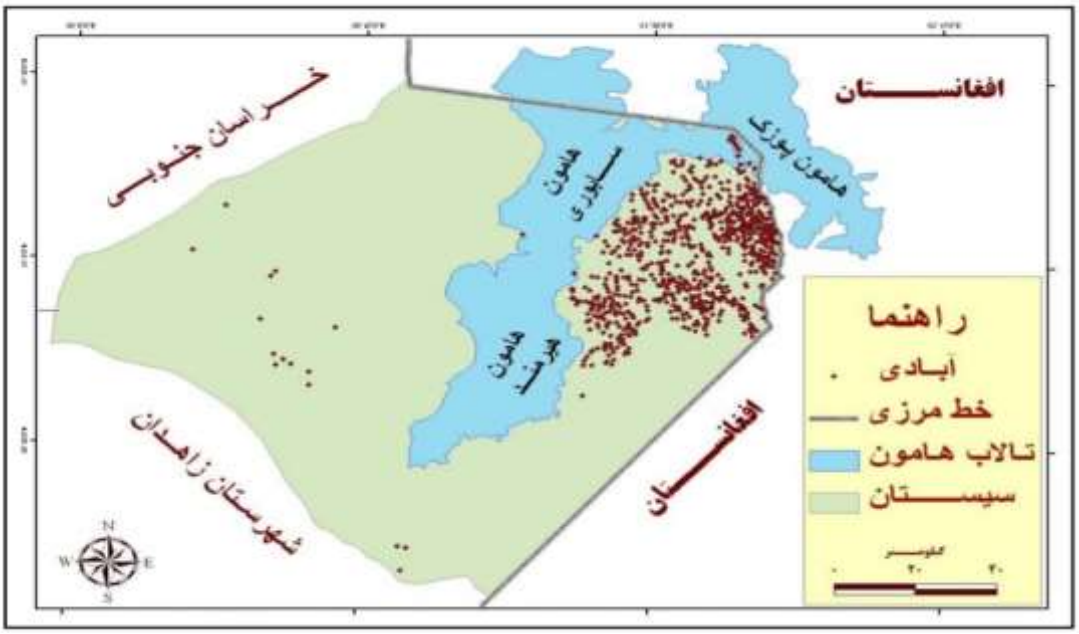
در این راستا برای افزایش شاخص‌های مقاومتی خاک و کاهش مخاطرات زیست محیطی، تا کنون از راهکارهای مختلفی همانند کشت گیاهان سازگار یا تثبیت خاک به روش‌های متعدد استفاده شده‌است.

هدف از این پژوهش، مطالعه و مقایسهٔ توان کربنات‌زایی باکتری‌های کلست‌زا مانند باسیلوس مگاتریوم و باکتری استاندارد سپورسارسینا پاستوری و ارزیابی افزایش مقاومت خاک‌های سیلتی از طریق زیستی به منظور تثبیت و کاهش مخاطرات ریزگردها در دشت سیستان است.

۲ـ محدودهٔ مطالعاتی

در این مطالعه، از خاک‌های ریز دانهٔ دشت سیستان در اطراف روستای محمدشاه کرم استفاده شد. این خاک از نظر شیمیایی و دانه‌بندی با ماسه‌های بیابان‌های مرکزی هند (کلکته) شباهت دارد. در منطقهٔ سیستان نیز به صورت قابل توجهی گسترده است و منبع اصلی آلودگی زیست محیطی (ریزگردها) در منطقه به شمار می‌رود (شکل ۱).

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]



شکل ۱: ناحیهٔ سیستان و سکونتگاه‌های شهری و روستایی در معرض خطر ریزگردها (karegar et al, 2017)



شکل ۲: اطراف روستای محمد شاه محمد کرم (شهرستان زهک- سیستان)، تپه‌های ماسه‌ای و دشت سیلتی

در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی بخش سیستان به همراه سکونتگاه‌های روستایی ــ که به طور معمول در معرض وزش بادهای ۱۲۰ روزهٔ سیستان و بادهای محلی قرار دارد ــ نمایش داده شده‌است. با توجه به اینکه روستای محمد شاه‌کرم از کریدورهای بادهای ۱۲۰ روزهٔ سیستان محسوب می‌شود، نمونه‌برداری‌های متعددی از عمق ۳۵ سانتی‌متری اطراف این سکونتگاه (بخش مرکزی شهرستان زهک در محدودهٔ طول جغرافیایی ۶۱ درجه و ۳۹ تا ۴۹ دقیقه، عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۶ تا ۳۹ دقیقه) انجام شد.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

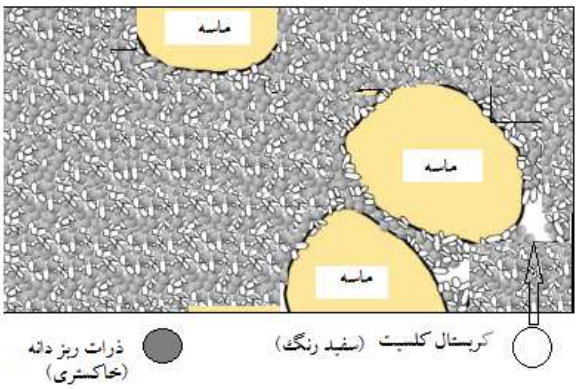
در تصویر ۲، تپه‌های ماسه‌ای ـ سیلتی اطراف روستا و گیاهان گز و تاق در امتداد محوری تپه‌ها مشخص است. خاک‌های این تپه‌های کم ارتفاع (ماسه‌ای ـ سیلتی) و دشت مجاور آن در دوره‌های کم باران، منبع اصلی ریزگردها محسوب می‌شود (Batanouny, 2001).

۳ـ مواد و روش

در این پژوهش به منظور تثبیت بیوزیستی، از روش‌های مشابه Burbank و همکاران (2013) و Hoffmann و همکاران (2021) استفاده شد. تحلیل و ارزیابی نیز از تشکیل کلسیت زیستی بر مبنای هیدرولیز و رسوب کلسیت انجام شد:

$$CO(NH_2)2 + CaCl_2 + 2H2O \rightarrow 2NH_4Cl + CaCO_3$$

در محیط آزمایشگاهی که در آن باکتری، مواد فعال‌کننده، اوره و یون‌های کلسیم وجود داشته باشد؛ پس از رسوب کلسیت و پوشش ذرات ریز (شکل ۳)، تدریجاً مقاومت خاک افزایش می‌یابد. در این راستا به منظور ارزیابی عددی و بررسی خواص مکانیکی خاک همزمان با رشد باکتری‌ها، آزمایش‌های سرعت امواج (UPV)، برش مستقیم و پراکتور بر روی نمونه‌ها انجام شد. همزمان، تأثیر زمان در تغییر دانسیته (وزن حجمی خشک) و مقاومت در نمونه‌های آزمایشی در نظر گرفته شد. در شکل ۳، ذرات خاکستری، سفید، لکه‌های سفید و زرد به ترتیب بیانگر دانه‌های ریز خاک، کلسیت ریز، کلسیت درشت و ذرات درشت خاک یا ماسه است. در این تصویر مشخص است که تدریجاً بخش سفید رنگ یا کلسیت‌های زیستی توسط باکتری‌ها رسوب می‌شود و فضاهای خالی را پر می‌کند.



شکل ۳: رسوب کلسیت زیستی در فضاهای خالی (رنگ سفید)

همزمان با مطالعات اولیه‌ای که در خصوص شناسایی انواع باکتری‌های تولیدکنندهٔ آنزیم اوره‌آز و ارزیابی توانایی باکتری‌ها در تولید آنزیم انجام شد و پس از بررسی‌های مقدماتی، باکتری استاندارد pasteurii Sporosarcina به عنوان شاهد و باکتری Bacillus megaterium به عنوان تثبیت‌گر زیستی انتخاب شد. ضمن آنکه در این تحقیق، باکتری‌ها در محیط مجزا از خاک کاشته شد. از محیط کشت مغذی جامد و مایع نیز برای کشت و تکثیر باکتری باسیلوس مگاتریوم استفاده شد. این محیط حاوی پپتون پنج گرم در لیتر،

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

کلرید سدیم پنج گرم در لیتر، عصارهٔ مخمر ۱/۵ گرم در لیتر و عصارهٔ گوشت ۱/۵ گرم در لیتر بود. پس از استریل کردن محیط کشت مغذی مایع در اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجهٔ سیلسیوس برای مدت بیست دقیقه، محلول اورهٔ دو درصد (وزنی/حجمی)، فیلتر و محلول ۲۵ میلی‌مولار کلرید کلسیم فیلتر شده به آن اضافه شد و pH آن در حد هشت تنظیم شد. باکتری باسیلوس مگاتریوم نیز به صورت خطی (استریک) بر روی محیط کشت مغذی جامد کاشته شد و در دمای ۳۷ درجهٔ سیلسیوس برای ۲۴ ساعت گرمخانه گذاری شد. پس از آن، چندین لوپ باکتری باسیلوس مگاتریوم از محیط کشت جامد مغذی در شرایط آسپتیک به محیط مایع انتقال داده شد و در دمای ۳۷ درجهٔ سیلسیوس بر روی شیکر (۱۲۰ rpm) قرار داده شد تا باکتری مورد نظر کاملاً رشد کند. پس از ۲۴ ساعت، از این محیط به عنوان محیط پیش کشت برای اجرای بقیهٔ آزمایش‌ها استفاده شد. نمونه‌های استاندارد (SP) در محیط نوترینت براث به حجم دو هزار میلی‌لیتر در مایع کشت شد. کشت باکتری در محیط مایع شامل پانزده گرم در لیتر پپتون کازین، پنج گرم در لیتر پپتون سویمل، پنج گرم در لیتر نمک و ۲۶ گرم در لیتر اوره و با اسیدیتهٔ ۷/۳ انجام شد. همچنین برای طی دورهٔ کشت و گرماگذاری، از انکوباتور شیکردار و دمای ۹۶ درجهٔ سانتی‌گراد استفاده شد. این مدل کشت با پروژهٔ Mukherjee و همکاران (2022) مرتبط با تیمار باکتری‌ها مطابقت دارد.

ده گرم از هر نمونه با محلول نمکی نه دهم درصد مخلوط شد و به مدت دو ساعت، در دمای سی درجه در شیکر انکوباتور صد دور در دقیقهٔ گرمخانه قرار داده شد. پس از این مدت، پلیت‌ها برای مشاهدهٔ وضعیت رشد بررسی شد و از هر کلونی مجدداً کشت به عمل آمد تا اینکه کشت‌های کاملاً خالصی حاصل شود. برای غربالگری باکتری‌های تولیدکنندهٔ اورهٔ آز، از محیط اوره براث استفاده شد. تغییر رنگ این محیط از زرد به صورتی نیز بیانگر فعالیت اورهٔ آزی مثبت است (Chu et al, 2011).

پس از آنکه نمونه‌برداری از خاک‌ها در منطقهٔ سیستان (در اطراف روستای محمدشاه کرم) از عمق ۳۵ سانتی‌متری انجام شد، نمونه‌ها در فلاسک‌های استریل قرار گرفت و تمام نمونه تا زمان بررسی در دمای چهار درجه نگهداری شد. قبل از آماده‌سازی و تیمار نمونه‌ها، آزمایش‌های دانه‌بندی بر روی نمونه‌های برداشت شده مطابق با رده‌بندی خاک به روش انگلیسی و یونیفاید (ASTM، ۲۰۱۲) انجام شد، سپس تغییرات دانسیته این نمونه‌ها در مراحل مختلف پژوهش تحت آزمایش پراکتور (ASTM D ۶۹۸-۷۸) بررسی شد. همچنین در طی دورهٔ ۵۶ روزی، شاخص‌های مقاومتی نمونه‌های دارای باکتری و فاقد باکتری به کمک آزمایش‌های برش مستقیم و اولتراسونیک بررسی شد.

سرعت موج فشاری در این مطالعه به وسیلهٔ ابزار فراصوت (التراسونیک) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری فراصوت، یکی از روش‌های ژئوفیزیکی غیرمخرب است. در این پژوهش برای بررسی افزایش مقاومت حاصل از کلسیت‌زایی باکتری‌ها، از امواج فشاری دستگاه اولتراسونیک مدل E0049 /B -58 استفاده و صحت‌سنجی شد (Park et al, 2017 & Cui et al, 2020). با توجه به اینکه امواج فشاری نسبت به امواج برشی سرعت بیشتر و از نظر سهولت در انتشار و بازگشت امواج، دارای برتری بود و به عنوان امواج سطحی، به دلیل ضخامت کم نمونه و معادل‌سازی و مقایسه در محل کارگاه از این مدل آزمایشگاهی استفاده شد. در ابتدا در

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

آزمایشگاه مدل‌سازی مصالح، نمونه مطابق آزمایش پراکتور آماده شد و در ادامه، مصالح با محدودهٔ دانه‌بندی مشخص و بر اساس پارامترهای کیفی نظیر درصد تراکم، در معرض امواج فشاری دستگاه اولتراسونیک به صورت مستقیم قرار گرفت. براساس نتایج حاصل از سرعت و زمان، عبور امواج با فراوانی بیش از سی بار تکرار شد. در این ارتباط، تمام آزمایش‌ها در محیط آزمایشگاه بود و آزمایش‌های صحرایی انجام نشد. برای کاهش خطاهای اندازه‌گیری انسانی و دستگاهی و امکان اجرای آزمایش‌ها با فراوانی بیشتر در زمان کوتاه‌تر، پارامترهای فیزیکی خاک با استفاده از نمودارهای کالیبره براساس نمونهٔ مبنا در محل به دست آمد (شکل ۶). چون خاک داخل استوانه باید متراکم شود به جنس مقاوم نیاز دارد، اما با توجه به اینکه فلزات در امواج اختلال ایجاد می‌کند برای بهبود دقت تحقیق از پلی اتیلن حفره‌دار استفاده شد که با پژوهش‌های دیگر محققان همانند کامپوس تطابق داشته باشد. لوله‌های پلی اتیلن فقط نقش نگهدارندهٔ مجموعهٔ خاک دارد و قابلیت جذب امواج برشی در آنالیز نیز کم است. در این راستا، Szabo و همکاران در تحقیقاتشان از نمونه‌هایی با قطر صد میلی‌متر و ارتفاع دویست میلی‌متر استفاده کردند تا امکان تشکیل رسوب کلسیت به آسانی میسر شود (Szabo et al, 2000 & Miturski et al, 2021).

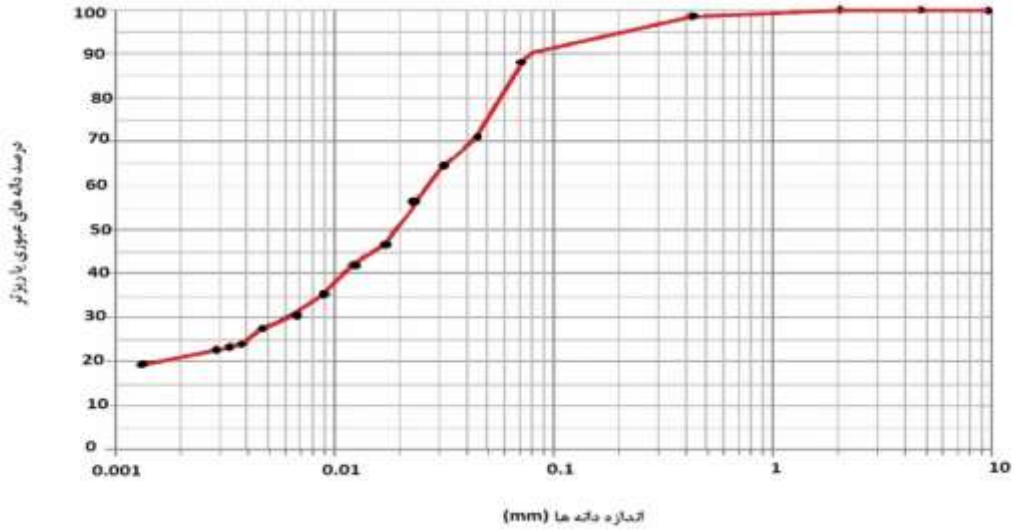
۴ـ یافته‌ها (نتایج)

۴ـ۱ـ ابتدا نمونه‌های برداشت شده، تحت آزمایش دانه‌بندی و حدود کاساگراند قرار گرفت (جدول ۱ و شکل ۴) و در ارزیابی‌های بعدی هم در آزمایش تراکم یا پراکتور بررسی شد (شکل ۵). خاک‌های برداشت شده از نظر توصیفی، سیلت با خمیری متوسط است و غالباً در هر دو رده‌بندی به صورت لای یا سیلت با خمیری متوسط (MI) نام‌گذاری می‌شود. نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود خمیری خاک‌ها در جدول ۱ مشخص شده‌است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

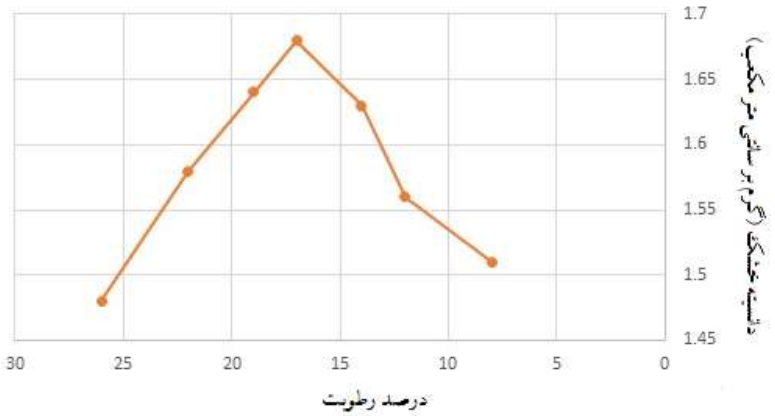
جدول ۱: نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود خمیری خاک‌های آزمایش شده

مشخصات خاک (مورد آزمایش)	رس	سیلت	ماسه
درصد ذرات یا دانه های خاک	۲۲	۶۶	۱۲
حد روانی (درصد)	۳۵		
حد خمیری (درصدی)	۲۵		
شاخص خمیری (درصد)	۱۰		
دانسیته خشک حداکثر (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱۶.۸۸		
رده خاک در طبقه بندی یونیفاید	ML		



شکل ۴: دانه‌بندی خاک مورد استفاده در اطراف روستای محمدشاه کرم

این آزمایش برای ارزیابی پوکی و تخلخل خاک‌های ریز دانهٔ منطقهٔ سیستان در زمان رشد باکتری‌ها و بررسی تغییرات دانسیتهٔ خشک خاک پس از رشد باکتری‌ها انجام شد.



شکل ۵: محور X درصد رطوبت و محور Y دانسیتهٔ خشک حداکثر در آزمایش پراکتور

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

۴-۲- بررسی نمونه‌ها در آزمایش برش مستقیم

برای بررسی و ارزیابی مقاومت قابل حصول در طی هشت هفته، از آزمایش مقاومت برش مستقیم سریع استفاده شد. این آزمایش با هدف تعیین مقاومت برشی خاک انجام شدو حداکثر مقاومت خاک را در هنگام قرارگرفتن در برابر برش بررسی و اندازه‌گیری کرد. ابعاد قالب در آزمایش، ۱۰*۱۰ سانتی‌متر بود و از هر سری یک نمونه خاک بدون باکتری، خاک با باکتری باسیلوس مگاتریوم و خاک با باکتری استاندارد Sporosarcina pasteurii، در دوره‌های هفت روزه و به مدت ۵۶ روز آزمایش شد. برای ساخت نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش برش مستقیم بدون باکتری (با استفاده از منحنی رطوبت بهینه)، از آزمایش تراکم با هفده درصد رطوبت استفاده شد. در نمونه‌های با باکتری، هفده درصد محلول باکتری به جای آب اضافه شد و نمونه‌ها برای هر هفته آماده شد. همچنین هم زمان با آزمایش‌های برش مستقیم، آزمایش امواج فشاری در دوره‌های متوالی هفت روزه انجام شد. برای آماده‌سازی و نگهداری مناسب نمونه‌ها تا زمان اجرای آزمایش، ابتدا نمونه‌ها داخل قالب با روغن چرب و در یک نایلون قرار داده شد، سپس نمونه‌های برش مستقیم درون قالب قرار گرفت تا با همان نایلون از قالب به راحتی جدا شود. این نمونه‌ها تا روز آزمایش در شرایط مناسب نگهداری شد و در زمان آزمایش درون قالب برش مستقیم قرار گرفت؛ ضمن آنکه تمام آزمایش‌ها تحت نود درصد دانسیتهٔ حداکثر خشک (آزمایش پراکتور) انجام شد.

پس از آزمایش‌های برش مستقیم در طی دورهٔ هشت هفته‌ای بر روی نمونه‌های حاوی دو نوع باکتری باسیلوس مگاتریوم و باکتری استاندارد ــ که نسبت به زمان‌های مورد نظر تیمارسازی شده‌اند ــ نتایج ارزیابی شد. این نتایج آزمایشی مشتمل بر تنش‌های برشی و زمان تحت بارهای قائم ۲۵، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوپاسکال است. در این راستا، پدیدهٔ MICP می‌تواند در طبیعت با استفاده از باکتری‌های بومی شبیه‌سازی شود. همان طوری که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقاومت برشی خاک در نمونه‌های تیمار شده با باکتری‌ها تا هفتهٔ سوم افزایش می‌یابد که به فعالیت کلسیت‌زایی باکتری‌ها مرتبط است؛ با این وجود، کاربرد میدانی و استفاده در مقیاس گسترده، به نوع موجودات ذره‌بینی و موقعیت‌های فیزیکی و محیطی موجود ارتباط بسیار مؤثری دارد.

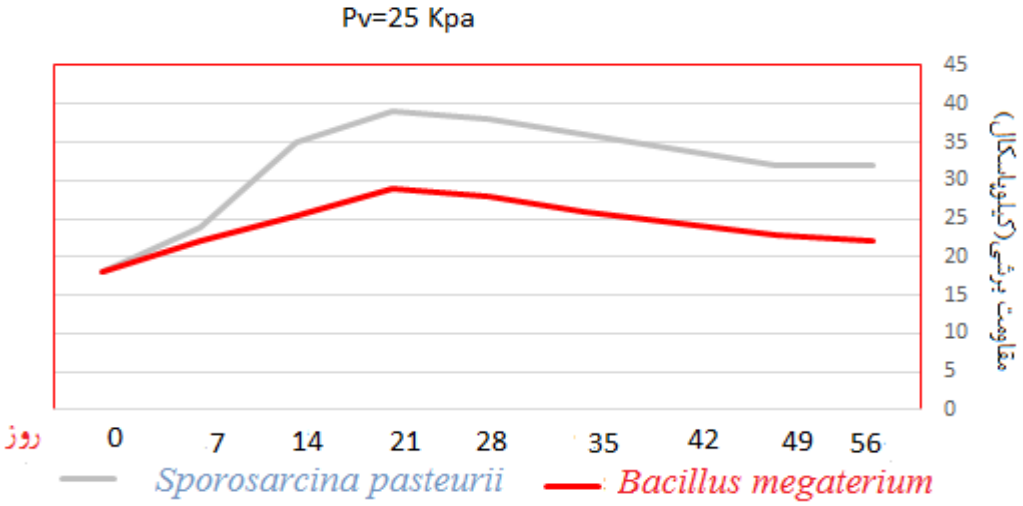
[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

جدول ۲: نتایج حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم (فشار اعمال شده بر حسب کیلوپاسکال)

تنش قایم اعمال شده	Pv= 25 Kpa								
زمان شروع (روز)	۰	۷	۱۴	۲۱	۲۸	۳۵	۴۲	۴۹	۵۶
Sporosarcina pasteurii	۱۸	۲۴	۳۵	۳۹	۳۸	۳۶	۳۴	۳۲	۳۲
Bacillus megaterium	۱۸	۲۲	۲۵,۵	۲۹	۲۸	۲۶	۲۴,۵	۲۳	۲۲
ابعاد نمونه	۱۰*۱۰سانتی متری								
تنش قایم اعمال شده	Pv=75 Kpa								
زمان شروع (روز)	۰	۷	۱۴	۲۱	۲۸	۳۵	۴۲	۴۹	۵۶
Sporosarcina pasteurii	۳۴	۴۷,۳	۶۵	۷۰,۹	۶۵,۲	۶۴,۵	۶۳,۷	۶۳,۲	۶۱,۵
Bacillus megaterium	۳۴	۴۰	۴۸	۶۰	۵۸	۶۰	۶۳,۷	۶۳,۲	۶۱,۵
ابعاد نمونه	۱۰*۱۰سانتی متری								
تنش قایم اعمال شده	Pv=100 Kpa								
زمان شروع (روز)	۰	۷	۱۴	۲۱	۲۸	۳۵	۴۲	۴۹	۵۶
Sporosarcina pasteurii	۷۰	۷۸	۸۸,۶	۱۰۵	۹۹,۶	۹۴,۳	۹۲,۳	۹۱,۳	۹۰
Bacillus megaterium	۷۰	۷۵,۲	۸۰,۱	۹۲,۱	۹۰	۹۲,۱	۹۰	۸۸,۱	۸۷
ابعاد نمونه	۱۰*۱۰سانتی متری								

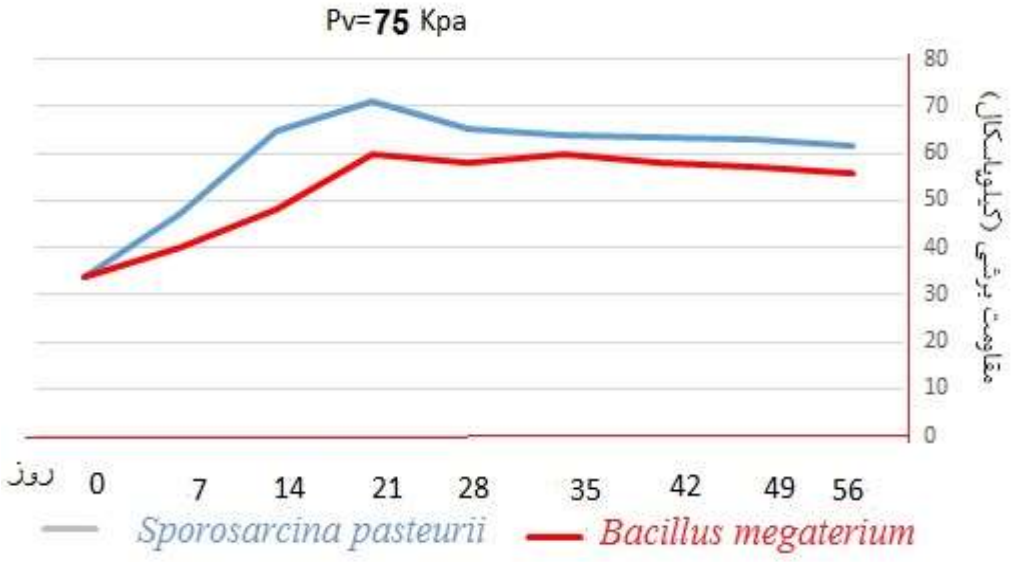
نمودارهای تنش - برش نمونه‌های تثبیت شده توسط باکتری‌های اسپوروسارسینا و باسیلوس مگاتریوم حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم تحت سربارهای ۲۵، ۷۵ و ۱۰۰ کیلو پاسکال، در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شد. در این اشکال، در محور X مقاومت برشی نمونه‌ها در طی هفت هفته بررسی شد. همان طوری که مشاهده می‌شود با افزایش رسوب کربنات‌کلسیم، مقاومت برشی خاک افزایش و در هفته‌های بعدی به مقدار جزئی کاهش می‌یابد. در شکل ۷، نمونه‌ها تحت فشار ثابت سی کیلوپاسکال قرار دارد و در دو هفتهٔ اول، مقاومت برشی خاک دارای باکتری‌های اسپوروسارسینا به سرعت افزایش می‌یابد و افزایش مقاومت تا هفتهٔ سوم ادامه دارد. اما در هفته‌های بعد، کاهش کمی در مقاومت برشی خاک دیده می‌شود. در خاک حاوی باکتری باسیلوس مگاتریوم، افزایش مقاومت برشی خاک تا هفتهٔ سوم تدریجی است و متوقف می‌شود. در هفته‌های سوم تا ششم نیز همانند نمونه‌های حاوی باکتری استاندارد، کاهش تدریجی مقاومت برشی دیده می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]



شکل ۷: مقاومت برشی خاک تحت تنش ۲۵ کیلوپاسکال در طی هشت هفته، محور x بیانگر تنش برشی، محور Y زمان بر حسب روز

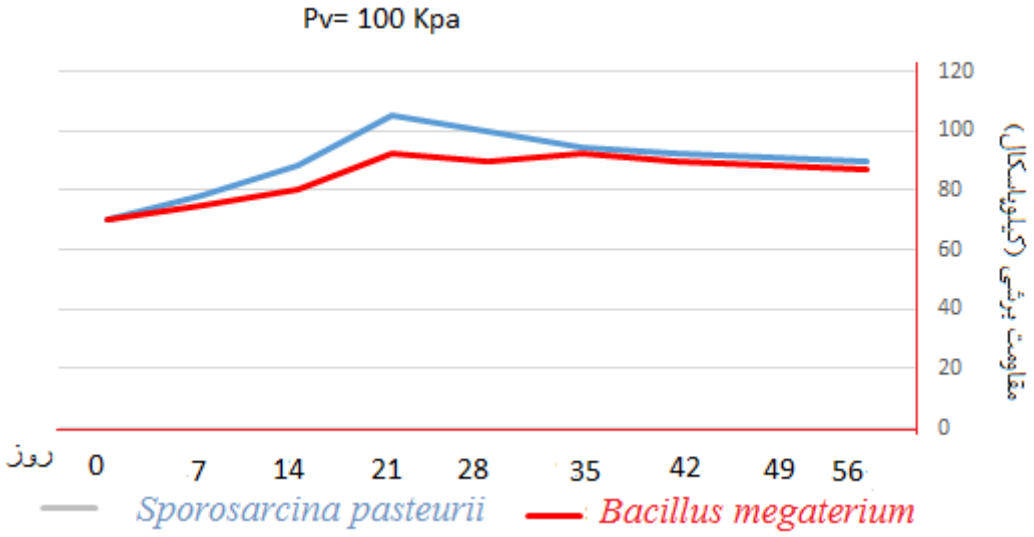
در شکل ۷، نمونه‌های تیمارشده با باکتری‌های استاندارد و باسیلوس مگاتریوم، تحت فشار ثابت ۲۵ کیلوپاسکال قرار می‌گیرد. مقاومت برشی خاکِ دارای باکتری‌های اسپوروسارسینا افزایش می‌یابد، اما افزایش مقاومت در هفتهٔ آخر تدریجی است. در خاک حاوی باکتری باسیلوس مگاتریوم مقاومت خاک در دو هفته کمی اول افزایش می‌یابد، اما شیب افزایش مقاومت در هفته‌های بعدی قابل توجه است. در هفته‌های بعدی نیز مقاومت برشی خاک اندکی کاهش می‌یابد.



شکل ۸: مقاومت برشی خاک تحت تنش ۷۵ کیلوپاسکال در طی ۵۶ روز، محور x بیانگر تنش برشی، محور Y زمان بر حسب روز

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

در شکل ۸، نمونه‌ها تحت فشار ثابت ۷۵ کیلوپاسکال در طی هشت هفته قرار می‌گیرد. مقاومت برشی خاک دارای باکتری‌های اسپوروسارسینا و باسیلوس مگاتریوم در ۲۱ روز ابتدایی تدریجاً افزایش می‌یابد و از هفتهٔ سوم تا ششم، در مقاومت برشی نمونه‌های تحت آزمایش کاهش اندکی دیده می‌شود.

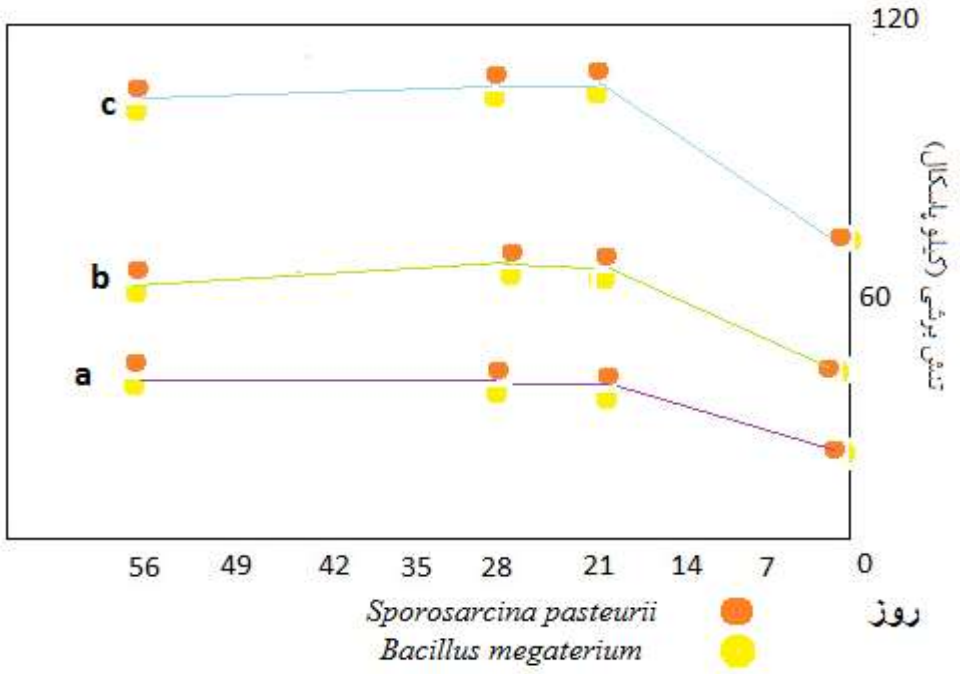


شکل ۹: مقاومت برشی خاک تحت تنش ۱۰۰ کیلوپاسکال در طی ۵۶ روز، محور x نشانگر تنش برشی، محور Y زمان بر حسب روز

در شکل ۹ مشاهده می‌شود که نمونه‌ها تحت فشار ثابت صد کیلوپاسکال قرار می‌گیرد. مقاومت برشی خاک دارای باکتری‌های اسپوروسارسینا و باسیلوس مگاتریوم در سه هفتهٔ اول تدریجاً افزایش می‌یابد و از هفتهٔ سوم تا ششم، در مقاومت برشی خاک‌ها اندکی کاهش دیده می‌شود.

زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک، یکی از پارامترهای ژئوتکنیکی مؤثر بر مقاومت برشی خاک است که تغییرات آن در این مطالعه بررسی می‌شود. تأثیر کلیست‌زایی باکتری‌ها در طی سه هفتهٔ اولیه، در بهبود پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های مورد آزمایش به افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک منجر می‌شود؛ زیرا باکتری با ایجاد رسوب بر روی سطوح ذرات و سیمان‌شدگی بین آنها سبب افزایش اصطکاک ذرات با یکدیگر می‌شود و درنهایت، مقاومت برشی سطح گسیختگی را نیز افزایش می‌دهد. روند افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک در زمان‌های عمل‌آوری در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

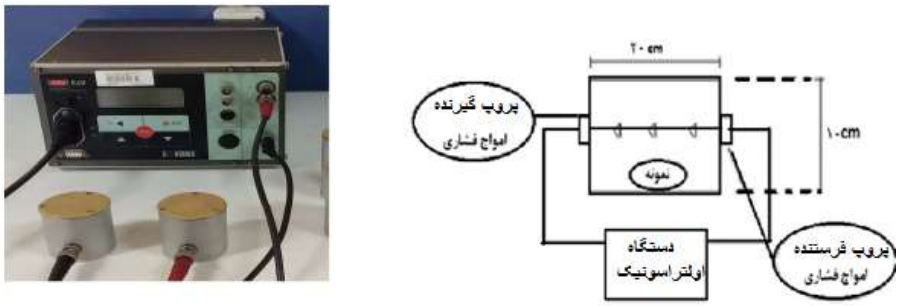


شکل ۱۰: مقاومت برشی خاک تحت تنش در طی ۵۶ روز، محور x دورهٔ زمان آزمایش بر حسب روز ، محور Y بیانگر تنش برشی است

اشکال a- ۱۰، b-۱۰ و c-۱۰، به‌ترتیب افزایش مقاومت برشی خاک تحت بارهای قائم ۲۵ کیلو پاسکال، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوپاسکال را مشخص می‌کند. روند افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک از هفتهٔ اول بـه هفتـهٔ سـوم باکتری استاندارد زیاد است و همزمان به افزایش تدریجی مقاومت خاک منجر می‌شود. ایـن وضـعیت بـرای باکتری باسیلوس مگاتریوم مشابه است، اما شیب افزایش کمتر می‌باشد. بنابراین، روند افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی نسبت به باکتری استاندارد اسپوروسارسینا کمتر است.

۴-۳- بررسی نمونه‌ها در آزمایش امواج فشاری

در این پژوهش برای ارزیابی دقیق و تفاوت نوع ساختار این نوع خاک‌ها، از سه نمونـه خـاک حـاوی باکتری استاندارد، نمونهٔ حاوی باکتری باسیلوس مگاتریوم و نمونهٔ بدون باکتری استفاده شد. این نمونـه‌هـا در استوانه‌های حفره‌دار به ابعاد ده سانتی‌متر قطر و طول بیست سانتی‌متر از جنس پلی اتیلین قرار داده شد. ارزیابی حداکثر دانسیتهٔ خشک نمونه‌ها در حالت تیمار شده و غیر تیمار شده نشان می‌دهد که وزن حجمی نمونه‌هـای حاوی باکتری باسیلوس مگاتریوم، حدود دو درصد و باکتری استاندارد حدود پنج درصد افزایش یافت.



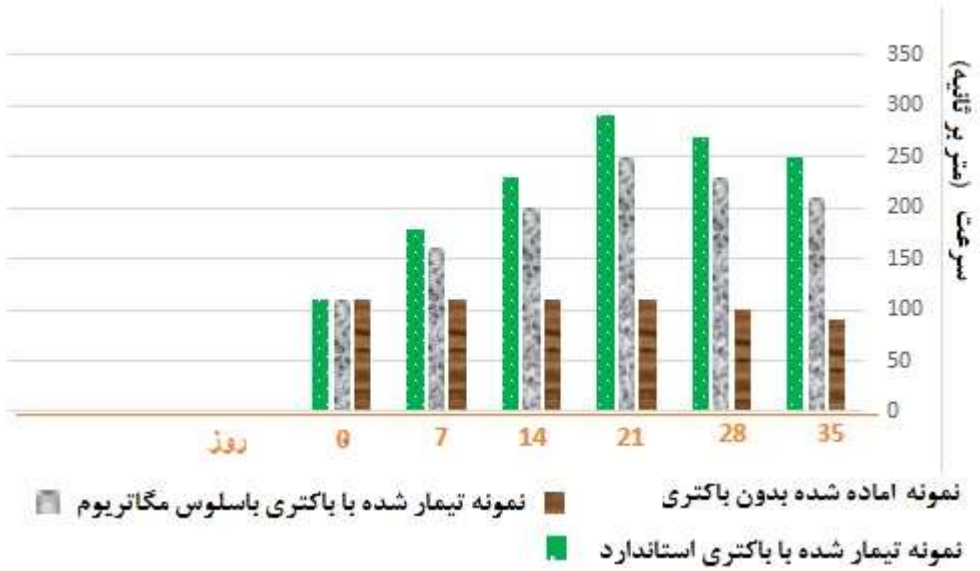
شکل ۶: طرح کلی از نحوهٔ عملکرد دستگاه اولتراسونیک و دورنمای دستگاه

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

در این مطالعه همزمان مطابق جدول زمان‌بندی، نمونه‌های تیمار شده با استفاده از دستگاه اولتراسونیک با تراکم مشخص به صورت مستقیم در معرض امواج فشاری قرار گرفت. در هر نمونه، حداقل ده بار قرائت‌های لازم از سرعت توسط دستگاه ثبت شد؛ همان طوری که هم زمان در نمونه‌ها، زمان عبور امواج (t) و سرعت عبور آنها (v) در دستگاه مشخص و ثبت شد. برای عدم ایجاد پراکندگی و خطای امواج فرستنده و گیرنده در سطوح مرزی نمونه‌ها ــ که در تماس با پروب‌های فرستنده و گیرندهٔ دستگاه است ــ از ژل استاندارد دستگاه استفاده شد. نتایج سرعت امواج در نمونه‌های مختلف مورد آزمایش در جدول ۳ ثبت شده‌است.

جدول ۳: سرعت امواج فشاری (m/s) در نمونه‌های مختلف

زمان بر حسب روز	۰	۷	۱۴	۲۱	۲۸	۳۵
سرعت امواج	متر بر ثانیه (m/s)					
حاوی باکتری استاندارد	۱۱۰	۱۷۸	۲۳۰	۲۹۰	۲۷۰	۲۵۰
حاوی باکتری باسیلوس مگاتریوم	۱۱۰	۱۶۲	۲۰۰	۲۵۰	۲۳۰	۲۱۰
Free Bacteria	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۰۰	۱۰۰



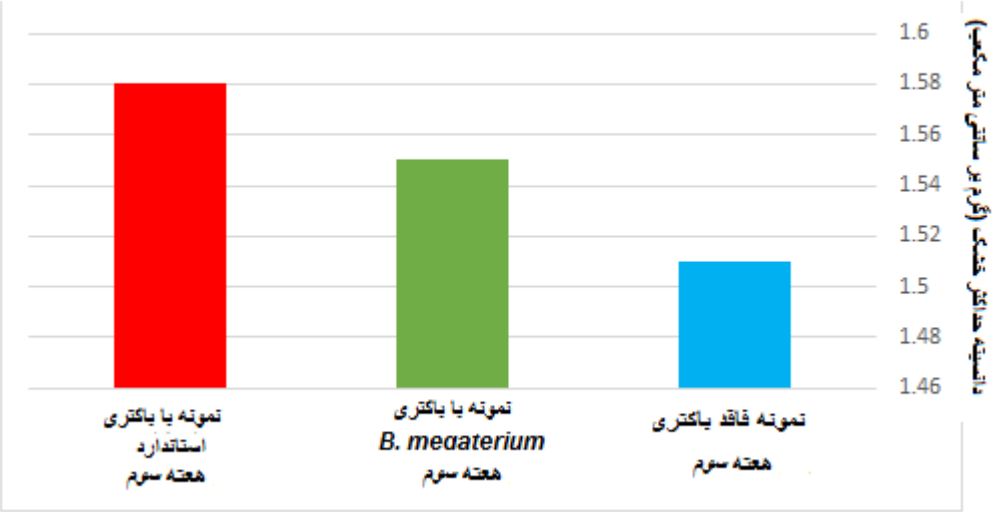
شکل ۱۱: نمودار سرعت امواج در نمونه‌های دارای باکتری و بدون باکتری، محور افقی

در شکل ۱۱، مدت زمان بر حسب روز، محور قائم سرعت عبور امواج، ستون قهوه‌ای نمونهٔ فاقد باکتری، ستون خاکستری نمونهٔ حاوی باکتری باسیلوس مگاتریوم و ستون سبز، بیانگر نمونه‌های دارای باکتری‌های استاندارد است. با توجه به این شکل، سرعت امواج فشاری در نمونه‌های تیمارشده حاوی باکتری‌های استاندارد اسپوروسارسینا، باسیلوس مگاتریوم و فاقد باکتری بررسی و مقایسه شد. در ستون‌هایی که با رنگ سبز

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

مشخص شده، سرعت امواج در مقایسه با باکتری باسیلوس مگاتریوم در تمام دوره‌های زمانی بیشتر است و روند تغییرات سرعت تا هفتهٔ سوم، به طور پیوسته افزایشی سپس کاهشی است.

همزمان با آزمایش‌های برش مستقیم و سرعت امواج، ارزیابی تغییرات دانسیته در نمونه‌های تیمار شده انجام شد. در شکل ۱۲، تغییرات دانسیتهٔ خشک نمونه‌ها ــ که بیانگر شدت کلسیت‌زایی است ــ در آخر هفتهٔ سوم مشخص شد. ضمن آنکه دانسیتهٔ نمونه‌ها از هفتهٔ سوم تا هشتم تغییری نداشت. در نمونه‌های فاقد باکتری مطابق پیش‌بینی، مقدار دانسیتهٔ خشک حداکثر افزایشی نداشت اما در نمونهٔ حاوی باکتری‌های باسیلوس مگاتریوم و استاندارد دانسیتهٔ خشک، حداکثر به ترتیب حدود دو و پنج درصد افزایش داشت.



شکل ۱۲: مقایسهٔ دانسیتهٔ خشک حداکثر (MDD)[1] نمونه‌های دارای باکتری در هفتهٔ سوم

۵ـ بحث و نتیجه‌گیری

تا کنون مدل‌ها و راهکارهای مختلف صحرایی و آزمایشگاهی برای تثبیت ریزگردها در نقاط مختلف دنیا ارائه شده‌است. این پژوهش آزمایشگاهی، تأثیر پتانسیل کلسیت‌زایی در باکتری باسیلوس‌مگاتریوم برای تثبیت بیوزیستی خاک‌های ریز دانهٔ دشت سیستان را ارزیابی می‌کند. تحلیل این داده‌ها برای مقابله با ریزگردهای مهاجم و فرسایش بادی به سکونتگاه‌های شهری و روستایی می‌تواند به امکان‌سنجی بسط نتایج آزمایشگاهی به صحرایی کمک مؤثری کند. برای مدل‌سازی بهینه، نمونه‌برداری از خاک‌های ریز دانه از اطراف یکی از منابع و گذرگاه‌های مهم تولید ریز گرد و عبور بادهای ۱۲۰ روزهٔ سیستان (روستای محمد شاه محمد کرم) انجام شد. سپس نمونه‌ها به کمک فناوری زیستی در آزمایشگاه مقاوم‌سازی شد. بدین منظور برای ارزیابی افزایش مقاومت خاک در اثر رسوب کردن سیمان‌های زیستی، از آزمایش‌های مختلف تراکم، برش مستقیم و سرعت امواج استفاده شد. محققان مختلفی در پژوهش‌های مشابه آزمایشگاهی به وضوح تأیید کرده‌اند که افزایش دانسیته و مقاومت برشی خاک یا افزایش سرعت امواج در نمونه‌های خاک، به کاهش

[1] Maximum Dry Density

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

میزان ریزگردها و کاهش فرسایش بادی هنگام افزایش سرعت باد منجر می‌شود (Dervani et al, 2021). در این مطالعه مشخص شد که تثبیت زیستی با کمک باکتری مورد استفاده می‌تواند در پژوهش‌های صحرایی هم ارزیابی شود.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که سرعت رشد باکتری باسیلوس مگاتریوم در دقایق اولیه نسبت به باکتری استاندارد کندتر است؛ باکتری استاندارد بیشترین تعداد زنده را در روز پنجم دارد، اما باکتری باسیلوس مگاتریوم از روز هفتم بیشترین تعداد زنده را دارد. شمارش باکتری‌ها، در آزمایشگاه تشخیص طبی انجام شده-است. با افزایش تراکم خاک، خلل و فرج نیز کاهش می‌یابد و بنابراین ممکن است با کاهش تخلخل، روند کلسیت‌زایی باکتری در حالت تیمار شده کاهش یابد. افزایش تعداد باکتری‌های کلسیت‌زا به خصوص در سه هفتهٔ اول، به رسوب کربنات‌کلسیم در خلل و فرج خاک منجر می‌شود و هم زمان، وزن حجمی خاک افزایش می‌یابد و تخلخل خاک کاهش. افزایش مقاومت برشی خاک در فشارهای عمودی مختلف آن بین ۲۵ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال (در آزمایش‌های انجام شده)، ارتباط مستقیم افزایش وزن حجمی خاک را با افزایش مقاومت برشی آن نشان می‌دهد. مطابق پیش‌بینی و بر اساس اصول و قوانین اثبات شده، هر چه تخلخل خاک افزایش یابد سرعت عبور امواج در آن نیز بیشتر می‌شود که افزایش مقاومت برشی خاک را نیز نشان می‌دهد (Sharma et al, 2003).

یافته‌های حاصل از این مطالعه با نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران مانند Mukherjee و همکاران (2020)، Burbank و همکاران (2012)، Park و همکاران (2017) و Whitaker و همکاران (2018) تطابق قابل توجهی دارد. ارزیابی یافته‌های آزمایشگاهی به کمک نمودارهای تحلیلی آزمایش سرعت امواج، تغییرات افزایشی سرعت امواج در یک دورهٔ زمانی ۳۵ روزهٔ مرتبط با باکتری باسلوس مگاتریوم (ستون‌های خاکستری، شکل ۱۰) را نشان می‌دهد. ابتدا سرعت امواج به علت کلسیت‌زایی افزایش می‌یابد، ولی این روند افزایشی همانند نمونه‌های باکتری اسپوروسارسینا یا استاندارد نیست؛ کاهش سرعت امواج و کاهش مقاومت برشی خاک (شکل ۱۰) در نمونه‌های مطالعه شده، پس از سه هفته می‌تواند مربوط به بازشدگی پیوندهای کلسیتی باشد. این نتایج با نتایج سایر محققان همانند Mukherjee و همکاران (2022) و Sharma و همکاران (2003) تشابه زیادی دارد.

افزایش دانسیتهٔ ناشی از رسوب کربنات‌کلسیم در این تحقیقات، با پژوهش‌های Cheng و همکاران (2014)، Gomez و همکاران (2018) و Mukherjee و همکاران (2021) تطابق بالایی دارد.

این پژوهشگران، افزایش مقاومت ناشی از تأثیر کلسیت‌زایی باکتری باسیلوس مگاتریوم یا هالمونوس را در آزمایش‌های تک‌محوری و تغییرات سرعت امواج در دوره‌های زمانی مشابه بررسی کردند.

مطابق انتظار، در طول دورهٔ آزمایش در نمونه‌های عاری از باکتری تغییرات مقاومتی وجود نداشت. این وضعیت در شکل (ستون‌های قهوه‌ای) مشخص است و نشان می‌دهد که تغییرات سرعت امواج در خاک‌های فاقد باکتری بسیار ناچیز است. همچنین در طی دورهٔ آزمایشی در سرعت امواج فشاری نمونه‌های فاقد باکتری، تغییر قابل توجهی مشاهده نشد.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد که:

۱ـ بررسی کلسیت‌زایی به روش MICP در تثبیت خاک‌های سیلتی، می‌تواند روش مؤثری محسوب شود. در ضمن، میزان بهبود مقاومت خاک به شرایط محیطی وابستگی زیادی دارد. همچنین زمان عمل‌آوری و مراقبت نمونه‌ها، در افزایش مقاومت خاک اهمیت فراوانی دارد.

۲ـ دانسیته یا وزن حجمی نمونه‌های مورد بررسی نیز در این روشِ مقاوم‌سازی نقش مؤثری دارد؛ زیرا فضاهای بهینهٔ بین ذرات خاک برای کلسیت‌زایی باکتریایی ضروری است. فضای لازم و مناسب در چنین خاک‌هایی با نود درصد دانسیتهٔ خشک حداکثر مهیا می‌شود.

۳ـ در طی دورهٔ نگهداری نمونه‌های خاک، کاهش مقاومت برشی خاک تیمار شده با باکتری‌های کلسیت‌زا پس از افزایش اولیه مشاهده می‌شود. این کاهش ممکن است به دلیل انحلال بعضی از پل‌های کلسیتی بین دانه‌های خاک باشد. در این پژوهش، حداکثر مقاومت برشی خاک در ابتدای هفتهٔ چهارم به دست آمد.

۴ـ نتایج آزمایش‌های برش مستقیم و سرعت امواج فشاری، افزایش مقاومت خاک‌های سیلتی را به روش زیستی به کمک باکتری‌های کلسیت‌زا تأیید می‌کند. اگرچه مقاومت خاک‌های سیلتی تیمار شده با باکتری باسیلوس‌مگاتریوم، با خاک‌های تیمار شده با باکتری استاندارد همطراز نیست، اما تثبیت بیوزیستی خاک به کمک این باکتری کلسیت‌زا در دشت سیستان می‌تواند قابل توجه قرار گیرد.

نتایج به دست آمده، بر اساس بررسی بر روی خاک‌های سیلتی با دانه‌بندی و دانسیته مشخص است. اما نتایج واقعی رفتار باکتری‌های کلسیت‌زا در مقیاس میدانی ممکن است با نتایج آزمایشگاهی به دلایلی همچون اثر مقیاس، غیریکنواختی دانسیته و نوع خاک (تغییرات دما، سرعت جریان باد و ....) متفاوت باشد. بنابراین، ارزیابی کاربرد داده‌های موجود به مطالعات میدانی گسترده نیاز دارد.

۶ـ سپاس‌گزاری

از داوران محترم که با نظرات بسیار ارزنده در بهبود کیفیت این مقاله نقش مؤثری داشتند، صمیمانه قدردانی می‌شود. در پایان بر خود لازم می‌دانیم از دکتر رسول شفیعی (گروه میکروبیولوژی دانشگاه اصفهان) و دکتر علی رحیمی از دانشگاه ولور هند (VIT) ــ که در این پژوهش به ما یاری رسانده‌اند ــ سپاس‌گزاری می‌کنیم.

منابع

1. Afrin, H., 2017. A review on different types soil stabilization techniques, *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(2), 9-24. doi: 10.11648/j.ijtet.20170302.12.

2. Akyol, E.; Bozkaya, Ö.; & N. M. Dogan, 2017. Strengthening sandy soils by microbial methods, *Arabian Journal of Geoscience,* 10(15), 327 P . https://doi.org/10.1007/s12517-017-3123-9.

3. ASTM, 2012. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Classification System). ASTM Standard D 2487-11; ASTM International, West Conshohocken. https://www.studocu.com/row/document/ege-universitesi/electronics-

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

ii/astm-d-2487-classification-of-soils-for-engineering-purposes-unified-soil-classification-system/8266235
4. ASTM, (2021 D 698-78). Standard Test Methods for a laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)). https://www.astm.org/Standards/D698
5. Azimzadeh, H.; Ekhtesasi, M.; Refahi, H.; Rohipour, H.; & M. Gorji, 2008. Wind erosion measurement on fallow lands of Yazd-Ardakan plain, Iran, *Desert*, 13(2), 167-174. doi: 10.22059/jdesert.2008.36300
6. Bagi, H.; Atesampour, A.; & A. Rahimi, 2021. Environmental significance of benthic foraminifera and microfacies of central Tethyan Upper Triassic strata, *central Iran* . Stratigraphy, 18(2), 89-102. https: //www.micropress.org /microaccess /stratigraphy /issue-369/article-2230
7. Batanouny, K. H., 2001. Deserts of the Middle East. In: Plants in the Deserts of the Middle East. Adaptations of Desert Organisms. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 5-10. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04480-3_2.
8. Burbank, M.; Weaver, T.; Lewis, R.; Williams, T.; Williams, B.; & R. Crawford, 2012. Geotechnical tests of sands following bio induced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(6), 928-936. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000781
9. Cheng, L.; Shahin, M. A.; & R. Cord-Ruwisch, 2014. Bio-cementation of sandy soil using microbially induced carbonate precipitation for marine environments, *Géotechnique*, 64(12), 1010-1013. https://doi: 10.1680/geot.14.T.025
10. Chou, C. W.; Seagren, E. A.; Aydilek, A. H.; & M. Lai, 2011. Biocalcification of sand through ureolysis, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12), 1179-1189. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000532
11. Cui, M. J.; Zheng, J. J.; Zhang, R. J.; & H. J. Lai, 2020. Soil bio-cementation using an improved 2-step injection method, *Arabian Journal of Geosciences*, 13(23), 1-9. https://doi.org /10.1007/s12517-020-06168-y.
12. Devrani, R.; Dubey, A. A.; Ravi, K.; & L. Sahoo, 2021. Applications of bio-cementation and bio-polymerization for aeolian erosion control, *Journal of Arid Environments*, 187, 104433. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104433.
13. Gomez, M. G.; Graddy, C. M.; DeJong, J. T.; Nelson, D. C.; & M. Tsesarsky, 2018. Stimulation of native microorganisms for biocementation in samples recovered from field-scale treatment depths, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(1), 04017098. https://doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001804
14. Hoffmann, T. D.; Paine, K.; & S. Gebhard, 2021. Genetic optimisation of bacteria-induced calcite precipitation in Bacillus subtilis, *Microbial cell factories*, 20(1), 1-19. https:// doi.org/10.1186/s12934-021-01704-1.
15. Jiang, N., & K. Soga., (2016). The applicability of microbially induced calcite precipitation (MICP) for internal erosion control in gravel–sand Mixtures, *Geotechnique*, 67(1), 42-55. https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.182
16. Kano, S.; Moriwaki, T.; & K. Ochi, 2017. A study on the bio-treatment technique of ground improvement with urease microorganisms which live in Japan, Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy ainfalls, Springer Tokyo, pp 441-448. https: //doi.org/10.1007/978-4-431-56205-4_41
17. karegar, M. E.; Bodagh Jamali, J.; Ranjbar Saadat Abadi, A.; Moeenoddini, M.; & H. Goshtasb, 2017. Simulation and Numerical Analysis of severe dust storms Iran East, *Journal of Natural Environmental Hazards*, 3(4), 101-119. https:// doi.org /10. 18869/acadpub.jsaeh.3.4.101

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

18. Kucharski, E. S.; Cord-ruwisch, R.; Whiffin, V.; & S. M. Al-thawadi, 2006. Microbial Biocementation. United States Patent. World Patent WO/2006/ 066326.
19. Lowenstam, H. A., & S. Weiner., (1989). On biomineralization. Oxford University Press.https://oxford.universitypressscholarship.com/view/10.1093/oso/9780195049770.001.0001/isbn-9780195049770
20. Manav, Y.; Toprak, S.; Karakaplan, E.; & M. Inel, 2019. Soil improvement to counter liquefaction using colloidal silica grout injection, *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 20(1), 135-145. https:// www.researchgate. net/project /2012 FBE001.
21. Miturski, M.; Sas, W.; Radzevičius, A.; Šadzevičius, R.; Skominas, R.; Stelmaszczyk, M.; & A. Głuchowski, 2021. Effect of dispersed reinforcement on ultrasonic pulse velocity in stabilized soil, *Materials*, 14(22), 6951p. https://doi.org /10.3390/ ma14226951.
22. Mukherjee, S.; Sahu, R. B.; & J. Mukherjee, 2022. Effect of Biologically Induced Cementation via Ureolysis in Stabilization of Silty Soil, *Geomicrobiology Journal*, 39(1), 66-82. doi: 10.1080/01490451.2021.2005188
23. Park, P., & Y. Son., (2017). Ultrasonic and mechanical soil washing processes for the removal of heavy metals from soils, *Ultrasonics sonochemistry*. 35, 640-645. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.02.002
24. Rahman, M. M.; Hora, R. N.; Ahenkorah, I.; Beecham, S.; Karim, M. R.; & A. Iqbal, 2020. State-of-the-art review of microbial-induced calcite precipitation and its sustainability in engineering applications, *Sustainability*, 12(15), 6281p. https:// doi.org/ 10.3390/su12156281.
25. Rashki, A., 2012. Seasonality and mineral, chemical and optical properties of dust storms in the Sistan region of Iran, and their influence on human health (Doctoral dissertation, University of Pretoria).
26. Sahebzadeh, B.; Shabani-Goraji, K.; Shoaei, Z.; & M. Afshari, 2019. Statistical study of eolian sediment distribution risk in human ecosystems on the health of respiratory system and the eyes of inhabitants of Sistan, East Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 12(7), 1-12. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4324-1
27. Sharma, S. S., & M. Fahey., (2003). Degradation of stiffness of cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 129(7), 619-629. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:7(619)
28. Shivakumar, S.; Karmali, A. N.; & C. Ruhimbana, 2014. Partial purification, characterization, and kinetic studies of a low-molecular-weight, alkali-tolerant chitinase enzyme from Bacillus subtilis JN032305, a potential biocontrol strain, *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, 44(6), 617-632. doi: 10.1080/10826068.2013.844708
29. Szabo, T. L., & J. Wu., (2000). A model for longitudinal and shear wave propagation in viscoelastic media, *The Journal of the acoustical society of America*, 107(5), 2437-2446. https://doi.org/10.1121/1.428630
30. Van Paassen, L. A., 2009. Biogrout-ground improvement by microbially induced carbonate precipitation.Delft, the Netherlands, Delft University of Technology, 195p. http://resolver.tudelft.nl/uuid:5f3384c4-33bd-4f2a-8641-7c665433b57b
31. Velayatzadeh, M., 2020. Introducing the causes, origins and effects of dust in Iran, *Journal of Air Pollution and Health*, 5(1), 63-70. doi: 10.18502/japh.v5i1.2860
32. Whitaker, J. S.; Vanapalli, S.; & D. Fortin, 2018. Improving the strength of sandy soils via ureolytic CaCO 3 solidification by Sporosarcina ureae, *Environmental Science*, 15, 4367-4380. https://doi.org/10.5194/bg-2017-517
33. Whitney, J. W., 2007. Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghanistan. Scientific Investigations Report 2006–5182. USGS, Virginia, 40p.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

34. Yang, J.; Kim, E. K.; Park, H. J.; McDowell, A.; & Y. K. Kim, 2020. The impact of bacteria-derived ultrafine dust particles on pulmonary diseases, *Experimental and molecular medicine*, 52(3), 338-347.

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

Assessing Feasibility of Hazard Reductions of Fine Grain Soil Using Biocementation in Sistan Plain

Hoseinali Bagi[1]: *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran*
Sirous Ghanbari**:** *Associate Professor in geography and rural planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran*

Article History (Received: 2022/06/6 Accepted: 2022/11/4)



Extended abstract

1- Introduction

Biocement is a method that stimulates native soil bacteria to connect soil grains through a procedure known as microbially-induced calcite precipitation (MICP). It can use microorganisms to produce a tough and renewable building material with the slightest impact on the environment. MICP has been exhaustively explored using different types of bacterial species *to* enhance the compressive strength of cement composites such as mortar. *Sporosarcina pasteurii* is the most studied species of Bacillus bacteria for MICP utilizations on cement composites. *S. pasteurii* are urease-creating bacteria that have the prowess to induce sufficient calcium carbonate precipitation for bio-cementation to materialize in concrete structure. The mechanism of bio-cementation of the bacteria is regulated by urea hydrolysis.

2- Methodology

Bacillus megaterium and *Sporosarcina pasteurii* bacteria were chosen *in* in this research study with a focus on the Sistan silt soil area *(*South East of Iran*)*. Bacterial solution consists of Nutrient broth and bacteria. Nutrient broth consists of Peptone, Yeast extract and sodium chloride. In this method, the *temperature* to be maintained in the *oven* is 37 for 24 hours for the solution and then the experiment was conducted at a temperature of 17°-20°c atmospheric pressure. This study aimed at achieving a more realistic environmental condition for the application of MICPA *control* specimen containing commercially bought *Bacillus megaterium* which was used to compare the MICP efficiency of the indigenous bacteria. A blank specimen (without any bacteria) was subjected to the same temperature, pH and the cementation solutions.
Initially, bacteria was added to the fine soil and was mixed properly, which was followed by addition of the cementation reagent. The amount of bacteria and cementation reagent to be added. Direct shear and ultrasonic tests were performed on the silty soil. Proper mixing was ensured for proper fixation and distribution of bacteria in the soil. Fine Soil was compacted and was tested. Since the treatment duration was a parameter, soil samples of given bacterial and molar concentrations were allowed for curing or treatment duration of 8 weeks. The treatment duration was managed in order to provide sufficient time period for the chemicals to react and further allow CaCO3 precipitates to develop.

[1] **Corresponding Author: hoseinbagi@yahoo.com**

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]

3- Results

Two microorganisms (*S. pasteurii* and *B. megatarium*) were proposed for soil improvement by MICP technique. In this particular treatment, fine soil as clayey sandy silt or loam in Sistan plain, *S. pasteurii* was evidenced to be the most effective microorganism for MICP treatment.
The MICP-treated soil specimen exhibited moderate improvement in shear strength. This improvement is estimated for a specified density of soil specimen. Density on strength improvement by MICP indicated little increase.
The maximum amount was observed for the soil specimens treated with the microorganism *S. pasteurii* and *B. megatarium* after the biocementation; the velocity of ultrasonic waves increased and the internal angle of friction in bacterial sandy samples increased as well. Tests were conducted to evaluate the feasibility of using ultrasonic testing for stabilization applications. The results indicated the fact that some calcite forming microorganisms were present in the original soil.

4- Discussion & Conclusions

A series of direct shear and ultrasonic tests were conducted to examine the behavior of the biocemented silt specimens of Sistan plain. The tests were directed towards the stiffness of biocemented silty specimens with different agents. The specimens cemented by two different microbial products and non-bacterial soil were prepared and tested under 25, 50 and 100 kPa vertical stresses. The variation of the deviatoric stress with the local vertical stress was registered.
The shear stress behavior of the specimens significantly changed with different times of microbial products for cementation from the starting point of samples preparation. A significant increase in the shear stress values velocity of Ultrasonic Waves was observed as the duration of biological treatment increased.
The researchers consider that the biological treatment of the specimens under confining pressure plays an important role in increasing the strength and internal angle of friction. The fact is that an increase in the duration of the biological treatment process, which corresponds to the number of urea-calcium chloride cycles, resulted in an increase in the amount of calcite precipitating on the soils grains. These results were verified via increasing velocity of Ultrasonic wave. It seems that the amount of Ca increases in the treated samples as the treatment period increases.
A slight decrease followed by a sharp decrease in the stiffness of biocemented specimen was observed, while a gradual decrease in the stiffness of grain soil was observed. The sharp decrease, due to the bonding breakage, is a distinctive behavior of a typical artificially-cemented silt.

In general, velocities increased with curing time, and the increase from the day of compaction to 7 days was more significant than the increase from 7 days to 21 days. As the curing progresses, further reactions occur between the soils and the stabilizing agents. These reactions generally result in increases in the stiffness of the soils. The velocity of wave propagation increases with the increased stiffness of the soils. Therefore, MIBC can be an effective method for the stabilization of silt soil in Sistan plain.

Key Words: Fine grain soils, Hazard reductions, Bio-cementation, **Sistan Plain.**

[DOR: 20.1001.1.22517812.1402.13.2.6.0]