

Investigating the Role of Oxygen in Deep Biological Improvement of Varzaneh Sand Using Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP)

Ahmad Najafabadyan¹, Maysam Bayat^{2*}, Hamid hashem Al hossaini³, Mahshid Jahadi⁴

1- PhD Student, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

4- Associate Professor, Department of Food Science and Technology, Institute of Agriculture, water, Food and Nutraceuticals, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Loose sandy soils in arid regions such as Varzaneh face challenges of high erodibility and low mechanical strength. Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) is a sustainable bio-based solution for soil improvement. However, deep application of this technology faces a major obstacle: the aerobic bacterium *Sporosarcina pasteurii* shows a sharp decline in metabolic activity and carbonate precipitation at depths beyond a few centimeters due to insufficient oxygen availability. In the present study, the controlling role of oxygen was investigated through active gas supply (compressed air containing 21% oxygen and pure oxygen with 99.5% purity). Experiments were conducted on columns of Varzaneh sand (SP, $D_{50} = 0.155$ mm) under three treatment regimes: treatment without gas, treatment with compressed air, and treatment with pure oxygen. The results showed that injection of compressed air increased the unconfined compressive strength (UCS) by up to 50%, and injection of pure oxygen increased it by more than 100% compared to the control group. The average precipitated calcium carbonate content at a depth of 30–45 cm was less than 1% by weight for the no gas treatment, about 4% for the compressed air treatment, and about 7% for the pure oxygen treatment. Scanning electron microscopy (SEM) images revealed that, in the presence of oxygen, spherical and agglomerated calcite crystals formed with effective interparticle bonding, whereas in the absence of oxygen, scattered rhombohedral crystals were observed. The findings confirm that oxygen plays a decisive role in deep bio improvement of soil, and the unsaturated conditions of arid regions offer a strategic advantage for field application of this technology.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 June 2026

Revise Date: 07 July 2026

Accept Date: 17 July 2026

Keywords:

Oxygen supply
Deep soil improvement
Varzaneh sand
Sporosarcina pasteurii
MICP

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2026.587385.4027>

*Corresponding author: Maysam Bayat

Email address: bayat.m@iau.ac.ir

نقش تأمین اکسیژن بر کارایی فرایند بهسازی عمقی خاک ماسه‌ای به روش MICP (مطالعه موردی: ماسه‌ی ورزشه)

احمد نجف آبادیان^۱، میثم بیات^{۲*}، حمید هاشم الحسینی^۳، مهشید جهادی^۴

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۳- دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۴- دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان (اصفهان)، ایران

چکیده

خاک‌های ماسه‌ای سست در مناطق خشک نظیر ورزشه با چالش‌های فرسایش‌پذیری بالا و مقاومت مکانیکی پایین مواجه هستند. روش رسوب‌گذاری کربنات کلسیم ناشی از میکروارگانیزم‌ها (MICP) یک راهکار زیستی پایدار برای بهسازی خاک محسوب می‌شود. اما کاربرد عمقی این فناوری با مانع اساسی روبروست: باکتری هوازی *Sporosarcina pasteurii* در اعماق بیش از چند سانتی‌متر به دلیل عدم دسترسی به اکسیژن کافی، افت شدیدی در فعالیت متابولیکی و ترسیب کربنات نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، نقش تأمین اکسیژن از طریق هوادهی فعال بر کارایی فرایند بهسازی عمقی (هوای فشرده شامل ۲۱ درصد اکسیژن و اکسیژن با خلوص ۹۹/۵ درصد) بررسی شده است. آزمایش‌ها روی ستون‌هایی از ماسه‌ی ورزشه ($D_{50}=0.155\text{ mm}$, SP) در سه رژیم تیماری انجام شد: تیمار بدون گاز، تیمار همراه با هوای فشرده، و تیمار همراه با اکسیژن خالص. نتایج نشان داد تزریق هوای فشرده مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) را تا ۵۰ درصد و تزریق اکسیژن خالص آن را تا بیش از ۱۰۰ درصد نسبت به گروه شاهد افزایش می‌دهد. میانگین کربنات کلسیم رسوب‌کرده در عمق ۳۰-۴۵ سانتی‌متری برای تیمار بدون گاز کمتر از ۱ درصد، برای تیمار هوای فشرده حدود ۴ درصد، و برای تیمار اکسیژن خالص حدود ۷ درصد وزنی بود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان داد در حضور اکسیژن بلورهای کلسیت کروی و آگلومره با اتصال مؤثر بین ذرات و در غیاب اکسیژن بلورهای رومبوه‌درال پراکنده تشکیل می‌شوند. یافته‌ها نشان می‌دهد که اکسیژن نقش مؤثری در بهسازی عمقی زیستی دارد و شرایط غیراشباع مناطق خشک مزیتی راهبردی برای کاربرد میدانی این فناوری است.

کلمات کلیدی: اکسیژن‌رسانی، بهسازی عمقی خاک، ماسه‌ی ورزشه، MICP, *Sporosarcina pasteurii*

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۵/۰۳/۲۸	۱۴۰۴/۰۴/۱۶	۱۴۰۴/۰۴/۲۶	۱۴۰۴/۰۴/۲۶	۱۴۰۴/۰۷/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2026.587385.4027 10.22065/jsce.2026.587385.4027
*نویسنده مسئول:		میثم بیات			
پست الکترونیکی:		bayat.m@iau.ac.ir			

۱- مقدمه

خاک‌های ماسه‌ای سست در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل فقدان چسبندگی ذاتی و حساسیت زیاد به فرسایش بادی و آبی، همواره یکی از چالش‌های اساسی مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود [۱، ۲]. دشت ماسه‌ای ورزنه در استان اصفهان (واقع در فاصله‌ی ۱۳۰ کیلومتری شرق اصفهان) با میانگین بارش سالانه کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر، دمای حداکثر ۴۸ درجه سانتی‌گراد و وزش بادهایی با سرعت متوسط (۶ تا ۸ متر بر ثانیه)، نمونه‌ای بارز از این مناطق به شمار می‌رود. بررسی‌های ژئوتکنیکی نشان می‌دهد که خاک این منطقه به صورت ماسه‌ی یکنواخت (طبقه‌بندی SP بر اساس USCS) با D_{50} حدود ۰/۱۵۵ میلی‌متر، ضریب یکنواختی ۲/۳ و فاقد خاصیت خمیری است. این ویژگی‌ها سبب شده تا خاک یادشده عملکرد ضعیفی در برابر بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی از خود نشان داده و مستعد روانگرایی و نشست‌های زیاد باشد [۲].

در سال‌های اخیر، فرایند رسوب‌گذاری کربنات کلسیم ناشی از میکروارگانیسم‌ها (MICP) به عنوان یک فناوری زیستی پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای بهسازی خاک مورد توجه گسترده قرار گرفته است [۳، ۴]. در این فرایند، باکتری‌های اوره‌آزا نظیر *Sporosarcina pasteurii* با تولید آنزیم اوره‌آز، اوره را هیدرولیز کرده و یون کربنات تولید می‌کنند. یون کربنات حاصل در حضور یون کلسیم، منجر به رسوب کربنات کلسیم (کلسیت) در فضاهای منفذی خاک می‌گردد. این رسوبات به عنوان پل‌های سیمانی بین ذرات خاک عمل کرده و مقاومت فشاری، سختی و مقاومت در برابر فرسایش را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند [۵، ۶]. مطالعات تجربی متعدد، افزایش مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) ماسه‌های سست را از مقادیر کمتر از ۵۰ کیلوپاسکال تا بیش از ۱۰۰۰ کیلوپاسکال گزارش کرده‌اند [۷، ۸].

با وجود موفقیت‌های چشمگیر در مقیاس آزمایشگاهی، کاربرد عمقی و میدانی فناوری MICP با یک مانع اساسی مواجه است: باکتری *Sporosarcina pasteurii* یک میکروارگانیسم هوازی اجباری است [۹]. به عبارت دیگر، این باکتری برای رشد، تکثیر و بیان آنزیم اوره‌آز به حضور اکسیژن مولکولی نیاز مبرم دارد. مارتین و همکاران نشان دادند که در شرایط بی‌هوازی، سنتز آنزیم اوره‌آز متوقف شده و باکتری قادر به ادامه‌ی حیات نیست [۹]. لی و همکاران نیز گزارش کردند که در شرایط هوازی، میزان رسوب کربنات کلسیم به‌طور معناداری بیشتر از شرایط کم‌اکسیژن است [۱۰]. در مطالعه‌ی اخیر Xu و همکاران مشخص گردید که در شرایط هوازی، بلورهای کلسیت به شکل کروی و آگلومره با اتصال مؤثر بین ذرات تشکیل می‌شوند که این امر مقاومت فشاری را تا چهار برابر شرایط بی‌هوازی افزایش می‌دهد. با این حال، در اعماق بیش از چند سانتی‌متری خاک، به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین اکسیژن در آب و محیط اشباع، غلظت اکسیژن به سرعت کاهش یافته و فرایند MICP عملاً متوقف می‌گردد. این پدیده که «موانع اکسیژن» نامیده می‌شود، بزرگترین مانع در راه توسعه‌ی کاربردهای عمقی MICP محسوب می‌گردد [۱۱].

نوآوری پژوهش حاضر در طراحی یک سیستم هوادهی فعال و یکپارچه برای تأمین کنترل‌شده اکسیژن در عمق خاک است که با رویکردی گام به گام برای کاربرد میدانی طراحی شده است. در مقیاس آزمایشگاهی، یک قالب استیل استوانه‌ای سوراخ‌دار (قطر ۵، ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر) درون سلول سه‌محوری قرار می‌گیرد و سلول با گازهای مختلف (هوای فشرده، اکسیژن خالص، آرگون) پر شده و جریان پیوسته‌ی گاز از پایین به بالا برقرار می‌شود. محلول‌های باکتری و سیمان‌کننده به صورت ثقی از بالا تزریق می‌گردند. اما برای توسعه‌ی میدانی این روش، سیستم هوادهی را می‌توان با استفاده از شبکه‌ای از لوله‌های متخلخل (Porous Pipes) در عمق‌های مورد نظر نصب کرد و هوای فشرده را از طریق کمپرسورهای هوای صنعتی با دبی کنترل‌شده به لایه‌های زیرسطحی تزریق نمود. همچنین، زهکش‌های عمودی پیش‌ساخته (PVD) می‌توانند به عنوان سامانه‌ی توزیع چندمنظوره برای تزریق همزمان باکتری، مواد مغذی و هوادهی در مقیاس میدانی مورد استفاده قرار گیرند [۱۱].

در مورد چالش هزینه، پژوهش‌های میدانی اخیر نشان داده‌اند که با جایگزینی مواد شیمیایی با خلوص آزمایشگاهی با مواد درجه‌ی صنعتی و ارزان‌قیمت، هزینه مواد مصرفی در فرایند MICP به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۵۶]. به عنوان مثال، اوره کشاورزی (کود اوره) به جای اوره با خلوص بالا، کلرید کلسیم صنعتی و سایر منابع کلسیم ارزان‌قیمت (مانند پسماندهای صنعتی غنی از کلسیم یا

کودهای کشاورزی کلسیم دار) می‌توانند با هزینه‌ای بسیار کمتر و عملکردی قابل مقایسه مورد استفاده قرار گیرند [۵۸،۵۹]. کار میدانی قاسمی و مونتویا [۱۴] نشان داده است که استفاده از مواد با درجه‌ی صنعتی، ضمن کاهش چشمگیر هزینه‌ها، مقاومت قابل قبولی در شرایط میدانی ایجاد می‌کند.

در خصوص مکانیسم‌های مختلف تثبیت، باید توجه داشت که روش‌های تثبیت زیستی محدود به MICP نبوده و مکانیسم‌های دیگری نظیر محصورسازی زیست‌مواد (Biomaterials Encapsulation) نیز در کاربردهای مختلف مهندسی، از جمله بتن خودترمیم‌شونده، مورد توجه قرار گرفته است [۶۰]. همچنین، پدیده خوردگی میکروبی اسیدی در لوله‌های بتنی فاضلاب [۶۱]. نشان‌دهنده‌ی تأثیر متقابل میکروارگانیسم‌ها و محیط‌های مهندسی است که درک آن می‌تواند به طراحی بهتر سیستم‌های تثبیت کمک کند. با این حال، انتخاب *Sporosarcina pasteurii* در پژوهش حاضر به دلیل فعالیت اوره‌آزی بالا، سرعت رسوب‌گذاری و سازگاری با شرایط محیطی مناطق خشک بوده است.

همچنین، اگرچه استفاده از باکتری‌های بی‌هوازی اوره‌آزدار بر مبنای روش نیتروژن‌زدایی یکی از گزینه‌های جایگزین است، اما پژوهش پاکباز و همکاران [۵۷] نشان داده است که با تحریک باکتری‌های بومی اوره‌آزدار (چه هوازی و چه بی‌هوازی) می‌توان به نتایج مطلوبی در بهسازی خاک دست یافت. بررسی مقایسه‌ای با باکتری‌های بی‌هوازی، می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های آینده باشد. با توجه به شرایط غیراشباع طبیعی مناطق خشک (که نیاز به آب را به شدت کاهش می‌دهد) و مصرف بهینه اوره و کلسیم، این روش می‌تواند از نظر اقتصادی با روش‌های تثبیت شیمیایی نظیر سیمان کاری گسترده رقابت‌پذیر باشد.

هدف اصلی، بررسی اثر تأمین اکسیژن بر مقاومت فشاری (UCS) و میزان رسوب کربنات کلسیم در ماسه‌ی ورزنه است. اهداف: (۱) اعتبارسنجی سیستم هوادهی در مقیاس آزمایشگاهی به عنوان گام اول برای توسعه میدانی، (۲) مقایسه سه رژیم تیماری از نظر UCS، کربنات کلسیم و ریزساختار، (۳) تبیین نقش اکسیژن در بهسازی عمقی و ارائه راهکارهایی برای پیاده‌سازی میدانی با رویکرد کاهش هزینه‌ها می‌باشد [۱۴]، [۵۶-۶۱].

۲- مروری بر ادبیات فنی و پیشینه‌ی پژوهش

مبانی نظری بهسازی زیستی خاک در مطالعات پایه‌ای توسط میچل و سانتامارینا [۱۲] و دی‌جونگ و همکاران [۱۳] شکل گرفت و کارایی عملی آن در مقیاس نیمه‌میدانی به اثبات رسید [۱۴،۱۵]. راندمان بارش کلسیت به شدت به پارامترهای عملیاتی و محیطی وابسته است [۱۶]؛ این فرآیند در گستره وسیعی از شوری [۱۷] و با کاهش حجم تزریق سوسپانسیون باکتری [۱۷] همچنان کارآمد باقی می‌ماند. در حوزه‌ی روش‌های تزریق و افزایش مقیاس به شرایط میدانی، تیمار در درجه‌ی اشباع پایین [۱۵] و روش نفوذ سطحی در مقیاس بزرگ [۱۶] منجر به مقاومت فشاری بسیار بالایی در ماسه درشت تا عمق قابل توجه شدند. تحریک باکتری‌های بومی [۲۰] و کاربردهای میدانی آن [۲۲] بهبود خواص مکانیکی را تأیید کردند. مقایسه رویکردهای تقویت زیستی و تحریک زیستی در مقیاس بزرگ [۲۳] بهبود قابل مقایسه‌ای نشان داد، اما تفاوت در نرخ اورولیز و توزیع سیمان نیز گزارش شد [۲۴]. امکان‌سنجی بیوگروتینگ (Biogrout) در مقیاس واقعی [۲۵]، کاربرد بزرگ مقیاس برای تثبیت شیب [۲۶]، و اثربخشی بیوسیمان (Biocement) میکروبی در کنترل فرسایش سطحی اثبات شده است [۲۷].

کنترل فرسایش یکی از برجسته‌ترین کاربردهای MICP است. ترکیب هوادهی در حین تزریق [۲۸]، افزایش چگالی نوری باکتری [۲۹]، و تیمار MICP [۳۰] همگی منجر به کاهش چشمگیر فرسایش‌پذیری و افزایش چندبرابری تنش برشی بحرانی شده‌اند. آبستتگی در نواحی به شدت سیمان شده عملاً رخ نمی‌دهد [۳۱]. کارایی MICP در کنترل فرسایش داخلی ناشی از نشت [۳۲] و کاهش فرسایش سطحی شیب‌های ماسه‌ای تأیید شده است [۳۳]. هر دو روش MICP و رسوب کربنات کلسیم ناشی از آنزیم (EICP) در کاهش فرسایش تپه‌های ساحلی در شیب‌های ملایم مؤثرند [۳۴]. برای فرسایش بادی [۳۵] و فرسایش ناشی از جت [۳۶] نیز بهبود چشمگیری گزارش شده است. آنزیم‌ها نیز اثر مثبت بر کاهش فرسایش‌پذیری دارند [۳۷]. کانی‌سازی میکروبی برای کنترل گردوغبار [۳۸] و کاربردهای میدانی گسترده در شیب‌های ساحلی بهبود قابل توجهی در سطح و عمق نشان داده‌اند [۳۹، ۴۰].

از نظر رفتار مکانیکی، با افزایش محتوای کلسیت، سختی، مقاومت حداکثر و اتساع افزایش می‌یابد [۴۱]؛ حتی مقادیر کم کربنات کلسیم نیز افزایش مقاومت به همراه دارد [۴۲]. MICP مقاومت در برابر روانگرایی را افزایش و نشست‌های پس از لرزش را کاهش می‌دهد [۴۳]. فشار آب حفره‌ای اضافی را کم کرده و از رفتار جریان جلوگیری می‌کند [۴۴]. پوش شکست دوخطی و غیرخطی برای ماسه‌های بیوسیمان شده پیشنهاد شده است [۴۵]. افزودن الیاف بازالت یا پلی‌وینیل الکل (PVA) نیز مقاومت فشاری و کششی را به شدت افزایش و شکنندگی را کاهش می‌دهد [۴۶، ۴۷]. در خاک‌های خاص، MICP در خاک پیت با محتوای آلی متوسط و بالا باعث افزایش قابل توجه مقاومت می‌شود [۴۸] و به‌طور کلی تثبیت زیستی برای بهبود مقاومت برشی خاک‌های آلی مؤثر است [۴۹]. همچنین در خاک زیرسازی لاتریتی (Laterite)، ترکیب آهک و کربن فعال بهبود قابل توجهی ایجاد می‌کند [۵۰]. در زمینه روش‌های مکمل، زهکش‌های عمودی پیش‌ساخته (PVD) با اعمال خلاء به بازیابی تقریباً کامل جریان پایه [۵۱] و استخراج ترکیبات آروماتیک بنزنی (BTX) شامل بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن [۵۲] کمک می‌کنند؛ فناوری استخراج عمقی تزریق چاهی (WIDE) نیز برای حذف تری‌کلرواتیلن (TCE) موفق بوده است [۵۳]. اصول طراحی این زهکش‌ها نیز تدوین شده است [۵۴]. در نهایت، باکتری‌های بومی قادر به القای بارش کلسیت و افزایش نسبت مقاومت چرخه‌ای هستند [۳۹] و کلسیفیکاسیون زیستی با سلول‌های در حال رشد مؤثرتر از سلول‌های مرده است [۵۵]. ارتباط مستقیم بین مقاومت فشاری و مقدار کربنات کلسیم رسوب شده در ماسه درشت برقرار شده است [۲۶].

بررسی جامع پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که فناوری MICP از یک ایده‌ی آزمایشگاهی به سطح کاربردهای میدانی و حتی تجاری ارتقا یافته است. توانایی این روش در کاهش فرسایش سطحی، افزایش ظرفیت باربری و مقابله با روانگرایی، به ویژه در خاک‌های ماسه‌ای و تا حدودی در برخی خاک‌های مسئله‌دار، به خوبی اثبات شده است. با این حال، مرور دقیق ادبیات فنی، کاستی‌های اساسی زیر را آشکار می‌سازد که انگیزه‌ی اصلی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهند: علیرغم موفقیت‌های چشمگیر در کاربردهای سطحی و نیمه‌عمقی، همه‌ی پژوهش‌های پیشین، نقش تعیین‌کننده‌ی تأمین فعال اکسیژن را برای باکتری‌های هوازی در اعماق بیش از چند ده سانتی‌متر نادیده گرفته‌اند. تقریباً تمام مطالعات میدانی و نیمه‌میدانی به تثبیت لایه‌های سطحی (معمولاً تا عمق ۳۰ سانتی‌متر) محدود شده‌اند و برای اعماق بیشتر، فرض بر این بوده است که اکسیژن محلول در آب تزریقی کافی است؛ فرضی که به دلیل نفوذپذیری بسیار پایین اکسیژن در محیط اشباع، چالش برانگیز است. همچنین، هیچ مطالعه‌ای به طراحی یک سیستم هوادهی فعال و کنترل‌شده برای تأمین اکسیژن در عمق و بررسی کمی تأثیر آن بر مورفولوژی بلورها و مقاومت مکانیکی نپرداخته است. علاوه بر این، در اغلب پژوهش‌ها از مواد شیمیایی با خلوص آزمایشگاهی استفاده شده است که از نظر اقتصادی برای کاربردهای میدانی در مقیاس وسیع توجیه‌پذیر نیست.

پژوهش حاضر با هدف پر کردن خلأهای یادشده، برای اولین بار به طراحی و اعتبارسنجی یک سیستم هوادهی فعال و یکپارچه می‌پردازد که قابلیت توسعه به شرایط میدانی را دارد. نوآوری‌های کلیدی این پژوهش عبارت‌اند از: ارائه‌ی یک راهکار عملی برای تأمین اکسیژن در عمق خاک با استفاده از کمپرسورهای هوای فشرده و شبکه‌های لوله‌های متخلخل [۱۴، ۵۶]. بررسی کمی تأثیر سه رژیم تیماری (بدون گاز، هوای فشرده، اکسیژن خالص) بر مقاومت فشاری و ریزساختار رسوبات در اعماق مختلف، تبیین نقش اکسیژن در تغییر مورفولوژی بلورهای کلسیت از رومبوهدرال به کروی و ارتباط آن با افزایش مقاومت، و ارائه‌ی رویکردی اقتصادی با جایگزینی مواد درجه‌صنعتی به جای مواد با خلوص آزمایشگاهی [۵۶، ۵۸، ۵۹]، که گامی اساسی در جهت کاربردی‌سازی میدانی این فناوری محسوب می‌شود. همچنین، با اشاره به مکانیسم‌های مختلف تثبیت از جمله محصورسازی زیست‌مواد [۶۰] و خوردگی میکروبی اسیدی در لوله‌های بتنی فاضلاب [۶۱]، درک جامع‌تری از تعامل میکروارگانیسم‌ها با محیط‌های مهندسی ارائه شده است. بدین ترتیب، پژوهش حاضر نه تنها به یک چالش اساسی در بهسازی عمقی زیستی پاسخ می‌دهد، بلکه چارچوبی عملیاتی برای اجرای میدانی MICP در مناطق خشک و غیراشباع ارائه می‌کند.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک ورزنه

خاک مورد استفاده در این پژوهش از دشت ماسه‌ای ورزنه (استان اصفهان، فاصله ۱۳۰ کیلومتری شرق اصفهان) برداشت شد. نمونه‌ها از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری تهیه و پس از خشک شدن در هوای آزاد، همگن‌سازی شد. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مطابق با استانداردهای ASTM تعیین گردید که در جدول ۱ خلاصه شده است. همچنین در شکل ۱ محل تقریبی برداشت نشان داده شده است.

همان‌طور که از داده‌های جدول ۱ مشاهده می‌شود، خاک ورزنه دارای دانه‌بندی یکنواخت ($C_u=2/3$) و فاقد خاصیت خمیری است. ضریب خمیدگی ($C_c=1/1$) در محدوده‌ی ماسه‌های یکنواخت قرار دارد. طبقه‌بندی SP نشان‌دهنده حساسیت بالای این خاک به فرسایش بادی و آبی و همچنین استعداد آن برای روان‌گرایی و نشست‌های زیاد در صورت اشباع شدن می‌باشد.

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک ورزنه

پارامتر	مقدار	واحد	روش استاندارد (ASTM)
وزن مخصوص ذرات (Gs)	۲/۶۶	-	D854
حداکثر وزن مخصوص خشک (γ_{dmax})	۱۷/۸	kN/m ³	D4253
رطوبت بهینه (OMC)	۸	%	D4253
قطر مؤثر ۱۰٪ (D_{10})	۰/۰۸۳	mm	D6913
قطر مؤثر ۳۰٪ (D_{30})	۰/۱۳	mm	D6913
قطر مؤثر ۶۰٪ (D_{60})	۰/۱۹	mm	D6913
ضریب یکنواختی ($C_u = D_{60}/D_{10}$)	۲/۳	-	محاسباتی
ضریب خمیدگی ($C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$)	۱/۱	-	محاسباتی
طبقه‌بندی USCS	SP	-	D2487
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ')	≈ ۲۶	درجه	D3080



شکل ۱: محل تقریبی برداشت ماسه ی ورزنه

۳-۲- باکتری، محلول‌ها و روش تزریق و تیمار (اصلاح شده)

باکتری و محیط کشت

در این پژوهش از باکتری *Sporosarcina pasteurii* (سویه ATCC 11859) استفاده گردید. کشت باکتری در محیط مایع حاوی ۲۰ گرم بر لیتر عصاره مخمر، ۱۰ گرم بر لیتر سولفات آمونیوم و ۱۵/۸ گرم بر لیتر بافر تریس (با pH اولیه‌ی ۹) انجام شد. محلول کشت درون ارلن‌های ۵۰۰ میلی‌لیتری ریخته شده و در اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه استریل گردید. سپس ارلن‌ها با یک لوپ از باکتری تلقیح شده و در شیکر انکوباتور با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و دور ۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۴۰ ساعت قرار گرفتند. رشد باکتری با اندازه‌گیری جذب نوری در طول موج ۶۰۰ نانومتر (OD_{600}) پایش شد. هنگامی که OD_{600} به محدوده ۰/۸ تا ۱/۰ رسید (معادل غلظت تقریبی 10^7 سلول در میلی‌لیتر) [۶۲]، کشت به عنوان آماده برای تیمار در نظر گرفته شد. پیش از تزریق، سوسپانسیون باکتری سانتریفیوژ شده و در محیط کشت تازه (بدون اوره) به غلظت نهایی $10^5 \times 7$ سلول در میلی‌لیتر رقیق گردید.

محلول‌های سیمان‌کننده و بیولوژیک

محلول سیمان‌کننده از اوره ۳۰۰ میلی‌مولار و کلرید کلسیم ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$) ۱۰۰ میلی‌مولار در آب مقطر تهیه شد (نسبت مولی ۳:۱). انتخاب این غلظت‌ها بر اساس مطالعه Ghasemi و Montoya [۱۴] انجام شده است که نشان داد نسبت مولی ۳:۱ اوره به کلسیم، بیشترین بازده رسوب کربنات کلسیم را با حداقل اثر منفی بر فعالیت باکتری فراهم می‌آورد. محلول بیولوژیک نیز شامل اوره ۳۰۰ میلی‌مولار و سوسپانسیون باکتری با غلظت نهایی $10^5 \times 7$ سلول در میلی‌لیتر بود. تمامی مواد شیمیایی از درجه‌ی خلوص آزمایشگاهی (شرکت مرک آلمان) تأمین گردیدند.

آماده‌سازی نمونه و سیستم قالب و سلول

نمونه‌ی خاک با چگالی خشک هدف ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مطابق با روش‌های استاندارد تراکم آزمایشگاهی [۶۳]، درون قالب استیل سوراخ‌دار در سه لایه‌ی تقریباً مساوی متراکم گردید. قالب استیل استوانه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر از ورق استیل سوراخ‌دار (قطر سوراخ‌ها ۱ میلی‌متر، فاصله مرکز تا مرکز ۱ سانتی‌متر) ساخته شده و درز طولی آن با بست‌های فلزی بسته می‌شود. ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر قالب به گونه‌ای طراحی شده است که ۰/۵ سانتی‌متر بالای نمونه و ۰/۵ سانتی‌متر پایین نمونه برای تعبیه زهکش‌ها و توزیع یکنواخت جریان گاز و محلول در نظر گرفته شده است. در نتیجه، نمونه‌ی نهایی پس از قالب‌گیری دارای قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر خواهد بود که مطابق استاندارد [۶۴] برای آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) می‌باشد. سپس قالب حاوی نمونه درون سلول سه‌محوری که به عنوان محفظه‌ی گاز عمل می‌کند، قرار داده شد. شکل ۲ نمونه‌ی آماده شده به همراه سلول و قالب استیل را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

سیستم هوادهی

پس از قرارگیری قالب حاوی نمونه درون سلول سه‌محوری، سیستم هوادهی به صورت زیر طراحی و اجرا گردید:

گاز هوای فشرده: شامل ۲۱٪ اکسیژن، از یک کمپرسور هوا با دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه و فشار حداکثر ۱۰ کیلوپاسکال، از طریق یک شیلنگ سیلیکونی به درگاه پایینی سلول متصل شد.

گاز اکسیژن خالص: با خلوص ۹۹/۵٪، از یک کپسول گاز تحت فشار، با استفاده از یک رگولاتور فشار و دبی‌سنج جرمی، با همان دبی و فشار به درگاه پایینی سلول هدایت شد.

گاز آرگون: با خلوص ۹۹/۹۹٪، از یک کپسول گاز تحت فشار، با استفاده از یک رگولاتور فشار و دبی‌سنج جرمی، با دبی و فشار مشابه به درگاه پایینی سلول متصل شد. گاز آرگون به عنوان شاهد منفی (فاقد اکسیژن) در نظر گرفته شد تا اثر حذف اکسیژن بر فرایند MICP بررسی گردد.

در هر سه حالت، گاز از پایین به بالا درون سلول که حاوی قالب استیل سوراخدار بود، جریان یافت و از خروجی بالای سلول به محیط آزاد شد. سوراخ‌های قالب استیل (قطر ۱ میلی‌متر، فاصله مرکز تا مرکز ۱ سانتی‌متر) توزیع یکنواخت گاز را در عمق نمونه ممکن می‌ساخت. برای جلوگیری از ورود رطوبت به کپسول‌های گاز، یک تله رطوبت (Moisture Trap) در مسیر هر گاز تعبیه شد. هوادهی در دوره‌ی استراحت (فاز سوم) انجام می‌گرفت و هدف از آن، تأمین اکسیژن مورد نیاز باکتری‌های هوازی برای فعالیت متابولیکی و افزایش راندمان رسوب‌گذاری کلسیت بود [۹، ۱۰].

روش تزریق و تیمار (عملیات بیوگروتینگ)

پس از استقرار مجموعه‌ی (قالب+نمونه) درون سلول سه‌محوری (شکل ۲)، عملیات تیمار MICP در چرخه‌های سه‌فازی و مطابق با پروتکل اقتباس‌شده از Montoya و DeJong با اصلاحات لازم برای بررسی اثر اکسیژن انجام شد [۸]. هر چرخه‌ی کامل تیمار شامل مراحل زیر به ترتیب بود:

فاز اول – تزریق سوسپانسیون باکتری

حجم سوسپانسیون باکتری تزریقی به هر نمونه، معادل تقریباً ۱-۲ برابر حجم منافذ نمونه‌های آزمایشگاهی (با تخلخل حدود ۴۰٪) در نظر گرفته شد که در محدوده‌ی گزارش‌شده در پژوهش‌های مشابه آزمایشگاهی قرار دارد [۶، ۱۵]. سوسپانسیون باکتری با غلظت 10^7 سلول در میلی‌لیتر، با دبی ثابت ۰/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه و به مدت ۲ ساعت تزریق شد. این دبی بر اساس سرعت ظاهری (دارسی) و با توجه به ابعاد نمونه (قطر ۵ سانتی‌متر، سطح مقطع $19/63$ سانتی‌متر مربع) محاسبه گردید. سرعت ظاهری معادل با دبی ۰/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه، برابر $0/25$ سانتی‌متر بر دقیقه به‌دست آمد که در محدوده‌ی سرعت‌های گزارش‌شده در پژوهش‌های مشابه آزمایشگاهی قرار دارد [۶، ۱۵]. انتخاب دبی پایین تزریق، به منظور افزایش زمان اقامت محلول در محیط متخلخل و افزایش بازده جذب باکتری بر روی ذرات خاک صورت گرفت [۶]. در این مدت، به هر نمونه خاک ۲۰ میلی‌لیتر از سوسپانسیون تزریق گردید. از آنجا که هر گروه تیماری شامل سه نمونه بود، مجموع حجم تزریق شده در این فاز برای هر گروه برابر ۶۰ میلی‌لیتر بود. تزریق به صورت ثقلی و از بالای قالب انجام شد. برای جلوگیری از ته‌نشینی باکتری در مخزن تزریق، سوسپانسیون باکتری به طور مداوم با استفاده از یک همزن مغناطیسی در طول تزریق همگن شد.

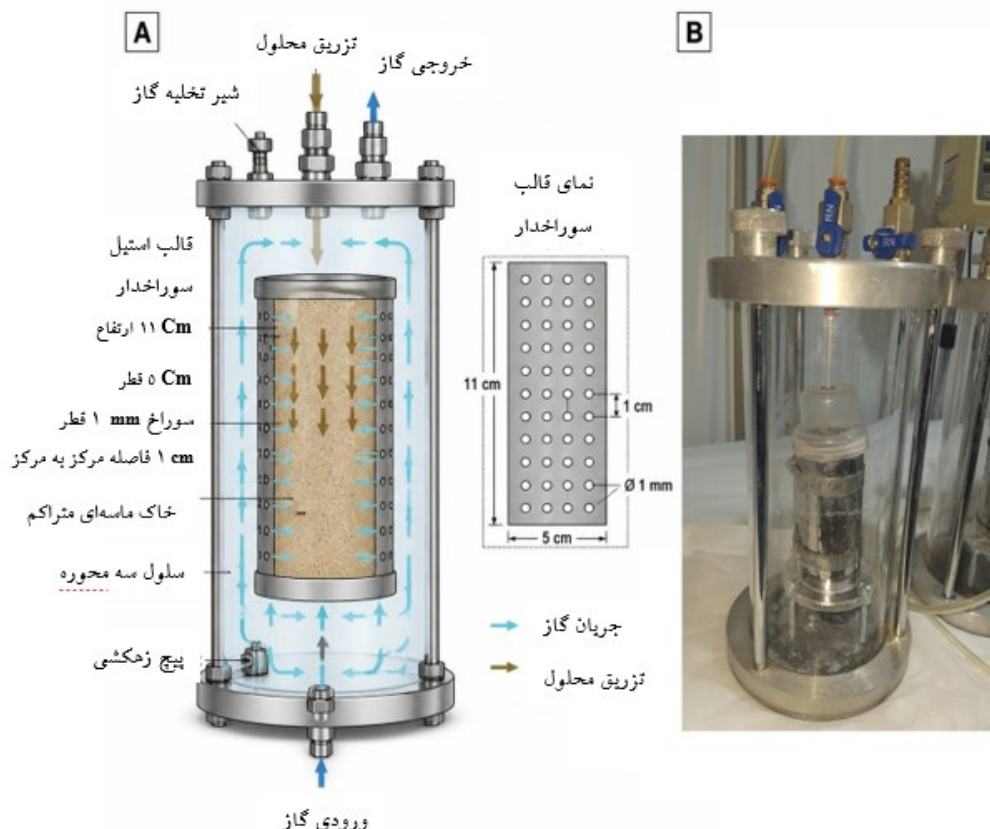
فاز دوم – تزریق محلول سیمان‌کننده

بلافاصله پس از پایان فاز اول، محلول سیمان‌کننده (شامل اوره ۳۰۰ میلی‌مولار و کلرید کلسیم ۱۰۰ میلی‌مولار) با دبی ثابت ۰/۳ میلی‌لیتر بر دقیقه و به مدت ۴ ساعت تزریق گردید. این دبی بر اساس سرعت ظاهری (دارسی) و با توجه به ابعاد نمونه (قطر ۵ سانتی‌متر، سطح مقطع $19/63$ سانتی‌متر مربع) محاسبه شد. سرعت ظاهری معادل با دبی ۰/۳ میلی‌لیتر بر دقیقه، برابر $0/15$ سانتی‌متر بر دقیقه به‌دست آمد که در محدوده‌ی سرعت‌های گزارش‌شده در پژوهش‌های مشابه آزمایشگاهی قرار دارد [۶، ۱۷]. این دبی پایین‌تر نسبت به فاز اول، با هدف افزایش زمان تماس محلول سیمان‌کننده با باکتری‌های جذب‌شده بر روی ذرات خاک و افزایش راندمان رسوب‌گذاری کلسیت انتخاب شد [۶، ۱۷]. در این مدت، به هر نمونه خاک ۲۴ میلی‌لیتر از محلول سیمان‌کننده تزریق شد که معادل حدود $1/5$ -۱ برابر حجم منافذ نمونه بود. بنابراین مجموع حجم تزریق شده در این فاز برای هر گروه (سه نمونه) برابر ۷۲ میلی‌لیتر بود. روش تزریق مشابه فاز اول (ثقلی از بالا) بود. برای جلوگیری از رسوب‌گیری در سوراخ‌های قالب، پس از هر سیکل تزریق، یک سیکل شستشو با آب مقطر (بدون باکتری و مواد سیمان‌کننده) با دبی ۰/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه انجام شد.

فاز سوم – دوره استراحت و هوادهی

پس از اتمام تزریق محلول سیمان‌کننده، نمونه‌ها به مدت ۱۸ ساعت در حالت استراحت قرار گرفتند. این دوره‌ی استراحت برای فراهم آوردن زمان کافی برای تکمیل واکنش‌های بیوشیمیایی و رسوب‌گذاری کلسیت در نظر گرفته شد [۶، ۱۷]. در این دوره، برای گروه‌های هوادهی (گروه‌های تیمار شده با هوای فشرده و اکسیژن خالص)، جریان گاز با دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه و فشار حداکثر ۱۰ کیلوپاسکال از

درگاه پایینی سلول وارد و از درگاه بالایی خارج می‌شد. سوراخ‌های قالب استیل توزیع یکنواخت گاز را در عمق نمونه ممکن می‌ساخت. برای گروه شاهد (بدون گاز)، این مرحله بدون تزریق گاز انجام شد. هوادهی در دوره‌ی استراحت، با هدف تأمین اکسیژن مورد نیاز باکتری‌های هوازی برای فعالیت متابولیکی و افزایش راندمان رسوب‌گذاری کلسیت انجام گردید [۹، ۱۰]. گردید.



شکل ۲: شکل شماتیک نمونه‌ی آماده شده به همراه سلول و قالب استیل

تکرار چرخه‌ها و شرایط محیطی

چرخه‌ی سه‌فازی فوق به مدت ۱۴ روز متوالی، روزانه یک بار در مقیاس آزمایشگاهی تکرار گردید [۱۴]. این تعداد سیکل، بر اساس پژوهش‌های پیشین [۶، ۱۷] و با هدف دستیابی به سیمان‌سازی کافی در نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی انتخاب شد. دمای محیط در تمام مدت 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد حفظ شد [۷]. در طول انجام آزمایش هیچ‌گونه گرفتگی در سوراخ‌های قالب مشاهده نشد که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب سیستم تزریق و انتخاب ابعاد مناسب سوراخ‌ها است. کلیه‌ی تیمارها برای سه نمونه‌ی مجزا (سه تکرار) انجام شد و نتایج به صورت میانگین گزارش گردید. شکل ۳ مراحل انجام کار را نشان می‌دهد، همچنین در شکل ۴ فازهای مختلف عملیات تزریق و تیمار کردن نمونه‌ها به صورت شماتیک آورده شده است.

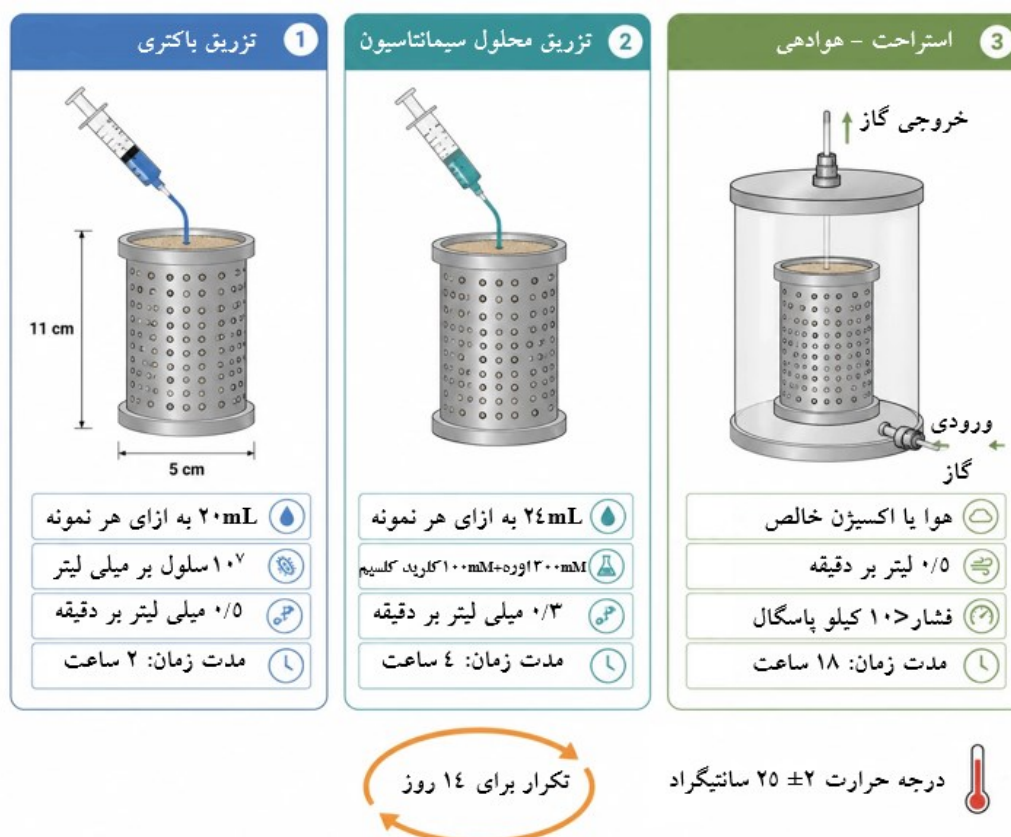
چشم‌انداز کاربرد میدانی و کاهش هزینه‌ها

لازم به توضیح است که تعداد ۱۴ سیکل، صرفاً برای دستیابی به سیمان‌سازی کافی در نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی (با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر) و با استفاده از مواد با خلوص آزمایشگاهی انتخاب شده است. در کاربرد میدانی، با جایگزینی مواد درجه‌صنعتی و بهینه‌سازی غلظت محلول‌ها، تعداد سیکل‌های مورد نیاز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، قاسمی و مونتویا [۱۴] با استفاده از مواد درجه‌صنعتی، تعداد سیکل‌های تیمار را به کمتر از نصف کاهش دادند و موفق به تثبیت شیب‌های ساحلی در

مقیاس میدانی شدند. همچنین، با استفاده از تزریق پیوسته (به جای تزریق روزانه) و سیستم‌های تزریق عمقی، می‌توان فرآیند را در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر (چند روز) به اتمام رساند [۲۵].



شکل ۳: مراحل انجام کار



شکل ۴: فازهای مختلف عملیات تزریق و تیمار کردن نمونه‌ها

در مورد حجم مواد تزریقی، این حجم‌ها بر اساس نسبت حجم تزریق به حجم منافذ (حدود ۱ تا ۲ برابر) انتخاب شده‌اند که در پژوهش‌های متعدد آزمایشگاهی مورد تأیید قرار گرفته است [۶، ۱۵]. برای کاربرد میدانی، با استفاده از شبکه‌های تزریق عمقی و زهکش‌های عمودی پیش‌ساخته (PVD)، می‌توان حجم محلول‌های تزریقی را به‌صورت مرحله‌ای و در بازه‌های زمانی طولانی‌تر به خاک تزریق کرد تا جذب و واکنش بهینه صورت گیرد [۱۴]. همچنین، استفاده از مواد درجه‌صنعتی (به جای مواد با خلوص آزمایشگاهی) و اوره کشاورزی به‌عنوان منابع ارزان‌قیمت، هزینه‌های اجرایی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد [۵۶، ۵۸، ۵۹]. در مورد هوادهی، در شرایط میدانی به جای استفاده از کپسول‌های اکسیژن گران‌قیمت، می‌توان از کمپرسورهای هوای فشرده صنعتی با شبکه‌های لوله‌های متخلخل در عمق‌های مورد نظر استفاده کرد. پژوهش‌های میدانی موفق نظیر کار قاسمی و مونتویا [۱۴] و ون پاسن و همکاران [۲۵] نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی الگوی تزریق و استفاده از مواد صنعتی، می‌توان فرآیند MICP را در مقیاس‌های بزرگ با موفقیت اجرا کرد. بنابراین، اگرچه تعداد ۱۴ سیکل در مقیاس آزمایشگاهی برای نمونه‌های کوچک لازم است، اما با افزایش مقیاس، تغییر نوع مواد و بهینه‌سازی فرآیند، این روش از نظر اقتصادی و عملیاتی برای کاربردهای میدانی کاملاً توجیه‌پذیر خواهد بود.

۳-۳- روش‌های ارزیابی

پس از اتمام ۱۴ روز تیمار، نمونه‌ها از سلول سه‌محوری خارج شده و قالب استیل با باز کردن بست‌های فلزی جدا گردید. نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر (مطابق شکل ۲) بدون هیچگونه تراش اضافی آماده بودند.

۳-۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده (UCS)

آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده مطابق با استاندارد ASTM D2166 و با استفاده از دستگاه تست یونیورسال (UTM) با ظرفیت ۵ کیلو نیوتن انجام شد. نرخ کرنش ثابت ۱ درصد در دقیقه اعمال گردید. برای هر گروه تیماری (بدون گاز، هوای فشرده، اکسیژن خالص) سه نمونه مجزا (سه تکرار) تست شد و میانگین مقاومت فشاری به همراه انحراف معیار محاسبه گردید.

۳-۳-۲- اندازه‌گیری محتوای کربنات کلسیم (CCC)

پس از آزمایش UCS، نمونه‌های شکسته شده در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. محتوای کربنات کلسیم با روش شستشوی اسیدی تعیین شد [۷]. به این ترتیب که هر نمونه در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۱ مولار (HCl) به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد. سپس اسید تخلیه و نمونه با آب مقطر سه بار شستشو گردید. پس از خشک شدن مجدد در آون (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت)، کاهش وزن نمونه به عنوان جرم کربنات کلسیم در نظر گرفته شد. درصد CCC از تقسیم جرم کربنات کلسیم بر جرم اولیه نمونه (پس از کسر اثر شاهد) محاسبه گردید. لازم به ذکر است که روش اسید شویی با کاهش وزن، علی‌رغم سادگی و سرعت اجرا، به دلیل احتمال انحلال سایر ترکیبات معدنی موجود در خاک (مانند اکسیدهای آهن، منیزیم و ...) و همچنین عدم اطمینان از انحلال کامل کلسیت، دارای خطای قابل توجهی است. روش تیتراسیون برگشتی (Back-Titration) به دلیل اندازه‌گیری مستقیم مقدار اسید مصرف‌شده، از دقت و اعتبار بالاتری برخوردار است و در پژوهش‌های معتبر MICP به‌عنوان روش استاندارد توصیه شده است [۷، ۵۶]. با این حال، به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی در دسترسی به تجهیزات تیتراسیون خودکار و همچنین حجم بالای نمونه‌ها، در پژوهش حاضر از روش اسید شویی استفاده گردید. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، جهت افزایش دقت اندازه‌گیری، از روش تیتراسیون برگشتی مطابق با استاندارد ASTM D4373 استفاده شود [۷۰].

۳-۳-۳- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

برای بررسی ریخت‌شناسی و توزیع بلورهای کربنات کلسیم، قطعات کوچکی (حدود ۱ سانتی‌متر مکعب) از بخش میانی نمونه‌های تیمار شده انتخاب گردید. نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پوشش‌دهی طلا به ضخامت تقریبی ۲۰ نانومتر پوشش داده شدند. تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN MIRA3 با ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰ کیلوولت و بزرگنمایی ۳۰۰ برابر انجام شد. از هر نمونه حداقل ۵ ناحیه مختلف تصویربرداری شد.

۳-۴- مدل سازی عددی حمل و نقل اکسیژن و واکنش های زیستی

پیش از مدل سازی انتقال اکسیژن و واکنش های زیستی، لازم است میدان جریان آب در محیط غیراشباع به درستی شبیه سازی شود. معادله ی حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل غیراشباع، معادله ریچاردز [۷۱] است که با در نظر گرفتن فشار گاز به صورت معادله ی (۱) نوشته می شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [k(\theta) \nabla (h + z)] \quad (1)$$

که در آن θ : رطوبت حجمی (بدون واحد)، $K(\theta)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع (m/s)، h فشار مکش (m)، z ارتفاع (m)، t زمان (s) می باشد. در این پژوهش، با توجه به کوچکی ابعاد نمونه و ثابت بودن شرایط تزریق، محتوای آب حجمی (θw) بر اساس اندازه گیری های مقدماتی و با در نظر گرفتن فشار گاز اعمال شده، ثابت و برابر ۰/۲۵ فرض گردید. از این رو، معادله ریچاردز به صورت ساده شده (با فرض $\theta = \theta w$ ثابت) در مدل سازی انتقال اکسیژن اعمال شده است [۷۲، ۷۳].

به منظور درک بهتر پدیده ی انتقال اکسیژن در ستون خاک و تعیین کمی شرایط حد اکسیژن، یک مدل عددی یک بعدی از حمل و نقل واکنشی در محیط متخلخل غیراشباع در نرم افزار کامسول (COMSOL Multiphysics) (نسخه ی ۶/۱، ماژول جریان در محیط متخلخل و ماژول مهندسی واکنش های شیمیایی) پیاده سازی شد. هندسه ی مدل، ستونی به ارتفاع ۴۵ سانتی متر با شرایط مرزی تزریق مایع از بالا و ورود گاز از پایین در نظر گرفته شد. معادله ی حاکم بر انتقال اکسیژن در فاز مایع با در نظر گرفتن تبادل گاز-مایع به صورت معادله ۲ نوشته می شود:

$$\frac{\partial (\theta_w C_{O_2})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_w D_{eff} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial z} \right) - \frac{\partial (q_w C_{O_2})}{\partial z} + k_L a \left(\frac{C_{O_2}^g}{H} - C_{O_2} \right) - r_{O_2} \quad (2)$$

که در آن:

C_{O_2} غلظت اکسیژن محلول در آب θ_w ، (mol/m³)، محتوای آب حجمی، q_w شار آب داری، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر، $k_L a$ ضریب انتقال جرم حجمی گاز-مایع، H ثابت هنری (حدود ۳۰ برای اکسیژن در دمای ۲۵ درجه)، $C_{O_2}^g$ غلظت اکسیژن در فاز گاز، r_{O_2} نرخ مصرف زیستی اکسیژن در واحد حجم خاک می باشد. نرخ مصرف اکسیژن توسط باکتری *Sporosarcina pasteurii* با استفاده از سینتیک مونود دو-سوبسترای (dual-substrate Monod kinetics) (معادله ۳) مدل سازی شد:

$$r_{O_2} = q_{max} \cdot X \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \right) \cdot \left(\frac{C_{urea}}{K_{urea} + C_{urea}} \right) \quad (3)$$

که در آن:

$q_{max} = 1/2 \times 10^{-16} \text{ mol}/(\text{cell} \cdot \text{s})$ حداکثر نرخ ویژه ی مصرف اکسیژن،

$X = 1 \times 10^9 \text{ cell}/\text{mL}$ غلظت زیست توده،

$K_{urea} = 10 \text{ mol}/\text{m}^3$ و $K_{O_2} = 0/002 \text{ mol}/\text{m}^3$ ثوابت نیمه-اشباع برای اکسیژن و اوره می باشند.

$Y_{O_2/urea} = 0/48 \text{ mol } O_2/\text{mol}$ نرخ هیدرولیز اوره نیز از طریق ضریب عملکرد اوره به مصرف اکسیژن مرتبط گردید.

برای تعیین وضعیت کفایت اکسیژن در ستون، عدد هوادهی بدون بعد (An) مطابق رابطه ی (۴) تعریف شد:

$$An = \frac{\dot{V}_g C_{O_2, \text{inlet}} H}{Q_w C_{urea} Y_{O_2/urea}} \quad (4)$$

که در آن:

$\dot{V}_g$ دبی حجمی گاز (L/min)، $C_{O_2, inlet}$ غلظت اکسیژن در گاز ورودی، Q_w دبی تزریق مایع (L/min)، C_{urea} غلظت اوره در محلول سیمان کننده (mol/m^3) می باشند. هنگامی که $An > 1$ باشد، اکسیژن کافی برای تکمیل هیدرولیز تمام اوره تزریق شده در سراسر عمق وجود دارد و شرایط هوازی در کل ستون برقرار می شود.

مدل به صورت گذرا برای ۱۴ چرخه تیمار (هر چرخه شامل ۲ ساعت تزریق باکتری، ۴ ساعت تزریق محلول سیمان کننده و ۱۸ ساعت استراحت همراه با هوادهی) حل شد. نتایج حاصل از مدل شامل پروفایل عمقی غلظت اکسیژن محلول، اوره و کربنات کلسیم رسوب کرده با داده های تجربی اندازه گیری شده در بخش ۴-۲ مقایسه گردید و برای کالیبراسیون ضرایب نفوذ و سینتیک از آن استفاده شد. مقادیر عدد هوادهی An برای تیمارهای هوای فشرده و اکسیژن خالص به ترتیب ۰/۵۲ و ۲/۴۷ محاسبه گردید.

۴- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از آزمایش های مقاومت فشاری محصور نشده (UCS)، توزیع عمقی کربنات کلسیم (CCC) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای سه رژیم تیماری بدون گاز (بی هوازی)، هوای فشرده (۲۱٪ اکسیژن) و اکسیژن خالص (۹۹/۵٪) ارائه می گردد. کلیه نتایج بر اساس میانگین سه تکرار همراه با انحراف معیار گزارش شده اند.

۴-۱- مقاومت فشاری محصور نشده (UCS)

پس از ۱۴ چرخه تیمار، نمونه های ماسه ورزده تحت سه رژیم اکسیژن رسانی شامل بدون گاز (بی هوازی)، هوای فشرده (۲۱٪ اکسیژن) و اکسیژن خالص (۹۹/۵٪) مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. میانگین سه تکرار در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج نشان می دهد که تیمار با اکسیژن خالص نسبت به تیمار بدون گاز افزایش مقاومتی معادل ۱۱۹٪ و نسبت به هوای فشرده افزایشی معادل ۴۴٪ داشته است. بررسی الگوی گسیختگی نمونه ها (شکل ۴) تفاوت بنیادینی بین شرایط هوازی و بی هوازی نشان می دهد. در نمونه های تیمار شده در شرایط بی هوازی، هسته ها دچار خردشدگی کامل شده و صفحات شکست قابل شناسایی نیستند. در مقابل، در نمونه های تیمار شده با هوای فشرده و اکسیژن خالص، ترک های عمودی از سطح فوقانی تا بخش تحتانی گسترش یافته و صفحات شکست برشی به وضوح قابل تشخیص هستند.

جدول ۲: میانگین مقاومت فشاری محصور نشده (سه تکرار)

رژیم تیماری	مقاومت فشاری (kPa)	انحراف معیار	افزایش نسبت به شاهد (%)
بدون گاز	۱۸۲	۱۲	-
هوای فشرده	۲۷۶	۱۶	۵۲
اکسیژن خالص	۳۹۸	۲۲	۱۱۹



پ) نمونه عمل آوری شده در اکسیژن خالص

ب) نمونه عمل آوری شده در هوای معمولی

الف) نمونه عمل آوری شده در شرایط بدون اکسیژن

شکل ۵: نمونه های عمل آوری شده در شرایط اکسیژن رسانی مختلف

۴-۲- توزیع عمقی کربنات کلسیم (CCC)

درصد وزنی کربنات کلسیم رسوب کرده در سه بازه عمقی (بالا: ۰-۱۵، وسط: ۱۵-۳۰، پایین: ۳۰-۴۵ سانتی متر) به روش شستشوی اسیدی اندازه گیری شد. نتایج در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳: میانگین درصد وزنی کربنات کلسیم در اعماق مختلف (سه تکرار)

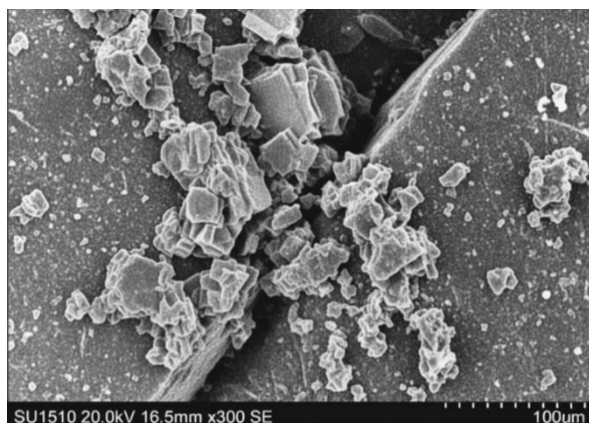
رژیم تیماری	عمق ۰-۱۵ سانتی متر	عمق ۱۵-۳۰ سانتی متر	عمق ۳۰-۴۵ سانتی متر	ضریب تغییرات عمقی (%)
بدون گاز	$2/0 \pm 0/28$	$1/3 \pm 0/21$	$0/7 \pm 0/12$	۴۷/۵
هوای فشرده	$5/9 \pm 0/41$	$4/8 \pm 0/35$	$3/8 \pm 0/27$	۲۳/۲
اکسیژن خالص	$8/1 \pm 0/32$	$7/6 \pm 0/38$	$7/1 \pm 0/45$	۶/۱

در تیمار بدون گاز، CCC به شدت با عمق کاهش می یابد (افت حدود ۶۵٪ از بالا به پایین) که نشان دهنده کمی کربنات کلسیم در اعماق بیش از ۳۰ سانتی متر است. در تیمار هوای فشرده، میانگین CCC بالاتر است ولی همچنان کاهش تدریجی با عمق مشاهده می شود. در مقابل، تیمار اکسیژن خالص توزیعی بسیار یکنواخت در تمام طول ستون ایجاد کرده است (۸/۱٪ در بالا، ۷/۶٪ در وسط، ۷/۱٪ در پایین) با ضریب تغییرات تنها ۶/۱٪. این داده ها تأیید می کند که تأمین فعال اکسیژن خالص می تواند بر سد اکسیژن غلبه کرده و رسوب گذاری همگنی در عمق ایجاد نماید.

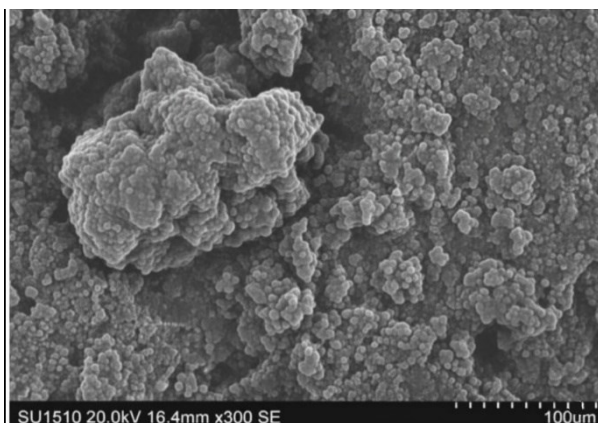
۴-۳- ریز ساختار و ریخت شناسی بلورها (SEM)

بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تفاوت هایی در ریخت شناسی و توزیع بلورهای کربنات کلسیم بین تیمار بدون گاز (شرایط کم اکسیژن) و تیمار اکسیژن خالص نشان داد (شکل ۶). تصاویر SEM در بزرگنمایی های ۳۰۰× و ۱۰۰۰× تهیه شدند. بزرگنمایی

۳۰۰× عمدتاً برای نمایش نمای کلی از توزیع رسوبات بر روی سطوح دانه‌ها مورد استفاده قرار گرفت، در حالی که تشخیص الگوی ریخت‌شناسی بلورها بر اساس تصاویر با بزرگنمایی ۱۰۰۰× انجام شد. بزرگنمایی ۱۰۰۰× برای تشخیص جزئیات دقیق مورفولوژی بلورها در مقیاس نانومتری محدودیت‌هایی دارد و تأیید قطعی نوع بلورها (رومبوهدرال، کروی و ...) نیازمند بزرگنمایی‌های بالاتر (۵۰۰۰× تا ۱۰۰۰۰×) و نیز آنالیزهای مکملی نظیر XRD و EDX می‌باشد. با این وجود، تفاوت‌های قابل تشخیص بین دو تیمار (از نظر تراکم رسوب و الگوی کلی رشد بلورها) تا حدی قابل مشاهده است.



شکل ۶ ب- عکس SEM نمونه در حالت بی‌هوای



شکل ۶ الف: عکس SEM نمونه در حالت هوای

در نمونه‌های تیمار شده در شرایط کم‌اکسیژن (شکل ۶-ب)، میزان رسوب‌گذاری کربنات کلسیم نسبتاً کم بوده و بلورها عمدتاً به شکل رومبوهدرال پراکنده با اندازه‌ی ۵ تا ۱۵ میکرومتر بر روی سطوح دانه‌ها مشاهده می‌شوند. این بلورها به ندرت در نقاط تماس ذرات قرار گرفته و پل‌های سیمانی چندانی ایجاد نکرده‌اند.

در مقابل، در نمونه‌های تیمار شده با اکسیژن خالص (شکل ۶-الف)، رسوب‌گذاری کربنات کلسیم بیشتر و نسبتاً متراکم‌تر است. بلورها به شکل کروی و آگلومره (خوشه‌ای) با ابعاد چند میکرومتر (در محدوده ۱ تا ۱۰ میکرومتر) تشکیل شده‌اند که سطوح دانه‌ها را به‌طور نسبتاً کامل پوشانده و فضاهای خالی بین ذرات را تا حدی پر کرده‌اند. پل‌های سیمانی ضخیم‌تری در نقاط تماس ذرات مشاهده می‌شود که احتمالاً بیانگر اتصال مؤثرتر بین ذرات ماسه می‌باشد. با این حال، همان‌گونه که اشاره شد، تأیید قطعی این مشاهدات و تشخیص دقیق مورفولوژی بلورها، نیازمند بزرگنمایی بالاتر و آنالیزهای تکمیلی مانند XRD و EDX است.

۵- بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دسترسی به اکسیژن مولکولی یکی از عوامل مؤثر در کارایی فرایند بهسازی عمقی خاک به روش MICP است. در غیاب هوادهی فعال (تیمار بدون گاز)، مقاومت فشاری نمونه به میزان قابل‌ملاحظه‌ای پایین بوده و توزیع کربنات کلسیم کاهشی محسوس از سطح به سوی عمق نشان می‌دهد. این مشاهدات با یافته‌های مارتین و همکاران [۹] همخوانی دارد که نشان دادند در شرایط بی‌هوای، بیان آنزیم اوره‌آز در باکتری *Sporosarcina pasteurii* متوقف می‌شود. با تأمین هوای فشرده (۲۱٪ اکسیژن)، اگرچه مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، اما توزیع رسوبات همچنان ناهمگن باقی می‌ماند. در مقابل، استفاده از اکسیژن خالص (۹۹/۵٪) منجر به بالاترین میزان مقاومت فشاری و یکنواخت‌ترین توزیع کربنات کلسیم در تمام طول ستون می‌گردد. این یافته‌ها حاکی از آن است که بین غلظت اکسیژن عرضه‌شده و یکنواختی بهسازی عمقی رابطه‌ای مستقیم و معنادار وجود دارد و کمبود اکسیژن را می‌توان یکی از موانع مهم در کاربرد عمقی MICP به شمار آورد. با این حال، برای تأیید قطعی این موضوع، اندازه‌گیری زیست‌توده باکتری در اعماق مختلف و بررسی رابطه‌ی آن با فعالیت اوره‌آزی در پژوهش‌های آینده توصیه می‌شود.

مطابق با پژوهش‌های پیشین، ریخت‌شناسی غالب بلورهای کلسیت حاصل از باکتری *Sporosarcina pasteurii* به صورت رومبوهدرال گزارش شده است [۷، ۸]. این الگو در نمونه‌های تیمار شده در شرایط کم‌اکسیژن (تیمار بدون گاز) پژوهش حاضر نیز مشاهده گردید. با این حال، در تیمار اکسیژن خالص، بلورهایی با تمایل به شکل کروی تر و آگلومره مشاهده شد. به نظر می‌رسد این پدیده ناشی از تأثیر هم‌زمان دو عامل باشد: (۱) شرایط غیراشباع نمونه‌ها (به دلیل تزریق ثقیل با دبی پایین) که هسته‌زایی کلسیت را در سطح مشترک گاز-مایع تسهیل کرده و منجر به تشکیل بلورهای کروی تر (واتریت) می‌شود [۶]، و (۲) افزایش فعالیت اوره‌آزی در حضور اکسیژن که می‌تواند بر فوق‌اشباع موضعی و سرعت هسته‌زایی تأثیر بگذارد. بنابراین، به نظر می‌رسد که شکل کروی مشاهده‌شده، نتیجه‌ی تعامل شرایط غیراشباع و حضور اکسیژن باشد و نمی‌توان آن را صرفاً به اکسیژن نسبت داد. تأیید قطعی این موضوع، نیازمند آنالیزهای تکمیلی نظیر EDX و XRD است.

مدلسازی عددی انجام‌شده در این پژوهش، تطابق خوبی بین پروفایل عمقی کربنات کلسیم شبیه‌سازی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان می‌دهد که حاکی از صحت پارامترهای سینتیکی و انتقال جرم در نظر گرفته شده است. بر اساس خروجی مدل، در تیمار بدون گاز، غلظت اکسیژن محلول در عمق (کمتر از ۳۰ سانتی‌متر) از سطح به سمت صفر میل می‌کند که منجر به توقف فعالیت اوره‌آزی می‌گردد. در تیمار هوای فشرده، یک‌سوم پایینی ستون با غلظت اکسیژن کمتر از ۲۰٪ اشباع مواجه است که توجیه‌گر توزیع ناهمگن کربنات کلسیم مشاهده‌شده (ضریب تغییرات ۲۳/۳٪) می‌باشد. در مقابل، در تیمار اکسیژن خالص، غلظت اکسیژن محلول در تمام عمق ستون بالای ۸۰٪ اشباع باقی می‌ماند که یکنواختی قابل‌قبولی (ضریب تغییرات ۶/۱٪) را در پی دارد. محاسبه‌ی عدد هوادهی (An) به عنوان شاخص کمی کفایت اکسیژن نشان می‌دهد که در تیمار هوای فشرده $An = ۰/۵۲$ (کمتر از ۱) و در تیمار اکسیژن خالص $An = ۲/۴۷$ (بیشتر از ۱) است. این نتایج نشان می‌دهد که شرط $An > 1$ می‌تواند پیش‌بینی‌کننده‌ی تأمین اکسیژن کافی برای هیدرولیز کامل اوره در عمق می‌باشد. از دیدگاه مهندسی، قابلیت مقیاس‌پذیری این معیار برای طراحی سیستم‌های هوادهی در ابعاد میدانی (با جایگزینی دبی و غلظت‌های مناسب) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نشان می‌دهد که با استفاده از اکسیژن خالص یا غنی‌شده می‌توان اثر سد اکسیژن را در اعماق چند متری به طور قابل توجهی کاهش داد.

با وجود یافته‌های این پژوهش، محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که باید در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرند. طول ستون ۴۵ سانتی‌متری با وجود بهبود قابل توجه نسبت به مطالعات پیشین، هنوز به مراتب کمتر از عمق هدف در کاربردهای میدانی (به عنوان مثال، تثبیت شیب‌های ساحلی یا بهسازی عمقی بسترهای ماسه‌ای تا عمق چند متر) است. اثرات مقیاس، توزیع غیریکنواخت زیست‌توده در محیط متخلخل و رفتار بلندمدت نمونه‌های تثبیت‌شده تحت چرخه‌های تر و خشک و بارگذاری لرزه‌ای نیازمند بررسی در ظروف نفوذپذیری (Lysimeter) با ابعاد بزرگتر و شرایط نزدیک به میدان می‌باشد. همچنین، تأیید دقیق نوع کانی‌های تشکیل‌شده (کلسیت، واتریت یا آرگونیت) نیازمند آنالیزهای تکمیلی نظیر XRD و EDX است که در پژوهش حاضر میسر نبود و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد. با این حال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم هوادهی فعال از طریق قالب استیل سوراخ‌دار، که در این مطالعه با موفقیت به کار گرفته شد، می‌تواند به عنوان یک گام اولیه برای توسعه‌ی روشی کارآمدتر و عملی‌تر در مقیاس واقعی مدنظر قرار گیرد. البته تأیید نهایی کارایی این روش، مستلزم تحلیل اقتصادی مقایسه‌ای با سایر روش‌های تثبیت (شیمیایی، مکانیکی و زیستی) و همچنین بررسی دوام بلندمدت نمونه‌های تیمارشده در شرایط محیطی واقعی است.

در این راستا، استفاده از زهکش‌های عمودی (Prefabricated Vertical Drains - PVD) به عنوان یک راهکار عملی و قابل پیاده‌سازی در مقیاس میدانی مطرح می‌شود. این زهکش‌ها که به‌طور معمول برای تسریع تحکیم خاک‌های رسی به کار می‌روند، قابلیت آن را دارند که به عنوان مجرای توزیع چندمنظوره در پروژه‌های بهسازی زیستی عمقی مورد استفاده قرار گیرند. به این صورت که تزریق سوسپانسیون باکتری و محلول سیمان‌کننده می‌تواند از طریق این زهکش‌ها و با فشار کم، به‌طور یکنواخت در اعماق مختلف خاک توزیع شود. همچنین هوادهی فعال (هوای فشرده یا اکسیژن خالص) نیز می‌تواند از همان مجراها، به صورت دوره‌ای یا پیوسته، به عمق مورد نظر هدایت گردد. این امر به ویژه در خاک‌های غیراشباع مناطق خشک (نظیر ورزشگاه) که فاز گازی با تحرک‌پذیری بالا در منافذ حرکت می‌کند، کارآمد خواهد بود. تلفیق این دو عملکرد (تزریق مایع و گاز) در یک سیستم واحد، نیاز به حفاری و تجهیزات مضاعف را کاهش داده و

اجرای پروژه را از نظر اقتصادی و فنی به صرفه تر می سازد. علاوه بر این، زهکش های عمودی به دلیل سطح تماس زیاد با خاک و ایجاد مسیرهای ترجیحی برای جریان، می توانند یکنواختی توزیع رسوب را بهبود بخشیده و از تشکیل پوسته های سطحی که در روش های مرسوم تزریق سطحی دیده می شود، جلوگیری کنند. بنابراین، پژوهش های آتی می توانند بر روی طراحی، بهینه سازی و اجرای پایلوت میدانی سیستم ترکیبی PVD-MICP با هوادهی فعال متمرکز شوند که گامی مؤثر به سوی کاربرد گسترده ای این فناوری زیستی در پروژه های ژئوتکنیکی خواهد بود.

به طور خاص، پژوهش های آتی باید به سه محور اصلی توجه کنند:

- ۱- **ناهمگنی خاک:** بررسی توزیع اکسیژن و یکنواختی رسوب در ستون های دارای لایه بندی، دانه بندی متغیر و تراکم غیر یکنواخت.
- ۲- **دوام بلندمدت:** ارزیابی پایداری نمونه های تثبیت شده در برابر چرخه های تر و خشک، یخبندان و بارگذاری لرزه ای.
- ۳- **اقتصاد اجرا:** تحلیل هزینه فایده روش های مختلف هوادهی (هوای فشرده، اکسیژن خالص، اکسیژن غنی شده) و ارائه ی طرح اجرایی برای مقیاس میدان.

۶- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی نقش تعیین کننده ی اکسیژن در بهسازی عمقی ماسه ی ورزنه به روش MICP پرداخته و کارآیی یک سیستم هوادهی فعال را در سه رژیم تیماری (بدون گاز، هوای فشرده، اکسیژن خالص) ارزیابی کرده است. بر اساس یافته های تجربی و مدلسازی عددی، نتایج زیر حاصل می شود:

۱. **نقش بحرانی اکسیژن:** در غیاب هوادهی فعال (تیمار بدون گاز)، مقاومت فشاری و توزیع کرنات کلسیم به شدت کاهش یافت که تأییدکننده ی وابستگی مطلق فرایند MICP به حضور اکسیژن مولکولی است.
۲. **برتری اکسیژن خالص نسبت به هوای فشرده:** تیمار با اکسیژن خالص (۹۹/۵٪) در مقایسه با هوای فشرده (۲۱٪ اکسیژن) نه تنها مقاومت فشاری بالاتری (افزایش ۱۱۹٪ نسبت به شاهد) ایجاد کرد، بلکه توزیع عمقی کرنات کلسیم را به طور چشمگیری یکنواخت تر (ضریب تغییرات ۶/۱٪ در مقابل ۲۳/۲٪) نمود.
۳. **تغییر ریزساختار مطلوب:** تصاویر SEM نشان داد که در تیمار اکسیژن خالص، بلورهای کرنات کلسیم به شکل کروی و آگلومره با پوشش پیوسته و پل های سیمانی ضخیم تشکیل می شوند، در حالی که در شرایط بیهوای بلورهای رومبوهدرال پراکنده و بدون اتصال مؤثر دیده می شوند.
۴. **معیار طراحی عدد هوادهی (An):** مدلسازی عددی نشان داد که شرط $An > 1$ (معادل ۲/۴۷ برای اکسیژن خالص) پیش بینی کننده ی تأمین اکسیژن کافی در عمق است و می تواند به عنوان ابزاری عملی برای طراحی سیستم های هوادهی در مقیاس میدانی به کار رود.
۵. **پیشنهاد روش ترکیبی PVD-MICP:** با توجه به موفقیت سیستم هوادهی فعال در این پژوهش، استفاده از زهکش های عمودی (PVD) به عنوان مجرای توزیع همزمان باکتری، مواد مغذی و اکسیژن پیشنهاد می گردد. این روش می تواند یکنواختی بهسازی را در اعماق بیشتر افزایش داده و هزینه های اجرایی را کاهش دهد. پژوهش های آتی باید بر روی پایلوت میدانی این سیستم ترکیبی متمرکز شوند.

۷- تشکر و قدردانی

نگارنده بر خود لازم می‌داند از همکاری و مساعدت تمامی افرادی که در انجام این پژوهش نقش داشتند، سپاسگزاری نماید. بدین وسیله از سرکار خانم دکتر محدثه بهجتی که دستگاه پمپ تزریق (infusion pump) را در اختیار این پژوهش قرار دادند، صمیمانه تشکر می‌شود. همچنین از سرکار خانم مهندس زهرا احمدی که زحمات تهیه و کشت باکتری را بر عهده داشتند و یاری‌های ایشان در مراحل آزمایشگاهی، کمال قدردانی را دارم. لازم به ذکر است که تمامی مراحل اجرای این پژوهش، هزینه‌های آزمایش‌ها و تهیه مواد مصرفی بدون هیچ حامی مالی و صرفاً با هزینه شخصی انجام شده است.

مراجع

- [1] Youd, T.L., and Perkins, D.M. (1978). Mapping liquefaction-induced ground failure potential. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(4), 433-446.
- [2] Pakzad, H., and Ajalloeian, R. (2007). The provenance of the Varzaneh aeolian sand field regarding to lithology and texture, SW Esfahan, Iran. *American Journal of Applied Sciences*, 4, 547-553.
- [3] DeJong, J.T., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., Van Paassen, L., Al Qabany, A., Aydilek, A., Bang, S., Burbank, M., and Caslake, L.F. (2014). Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Budapest, Hungary: Hungarian Geotechnical Society, pp. 1-12.
- [4] DeJong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C., and Nelson, D.C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210.
- [5] Whiffin, V.S., Van Paassen, L.A., and Harkes, M.P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal*, 24(5), 417-423.
- [6] Al Qabany, A., Soga, K., and Santamarina, C. (2012). Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(8), 992-1001.
- [7] Mortensen, B., Haber, M., DeJong, J., Caslake, L., and Nelson, D. (2011). Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation. *Journal of Applied Microbiology*, 111(2), 338-349.
- [8] Montoya, B., and DeJong, J. (2015). Stress-strain behavior of sands cemented by microbially induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(6), 04015019.
- [9] Martin, D., Dodds, K., Ngwenya, B.T., Butler, I.B., and Elphick, S.C. (2012). Inhibition of *Sporosarcina pasteurii* under anoxic conditions: implications for subsurface carbonate precipitation and remediation via ureolysis. *Environmental Science & Technology*, 46(15), 8351-8355.
- [10] Li, M., Wen, K., Li, Y., and Zhu, L. (2018). Impact of oxygen availability on microbially induced calcite precipitation (MICP) treatment. *Geomicrobiology Journal*, 35(1), 15-22.
- [11] Xu, N., Wang, J., Liu, X., and Zhang, X. (2023). Effect of oxygen supply on behavior of microbially induced carbonate precipitation (MICP) cemented soil. In: *International Association for Engineering Geology and the Environment*. Springer, pp. 113-123.
- [12] Mitchell, J.K., and Santamarina, J.C. (2005). Biological considerations in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10), 1222-1233.
- [13] DeJong, J.T., Fritzges, M.B., and Nüsslein, K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), 1381-1392.
- [14] Ghasemi, P., and Montoya, B.M. (2022). Field implementation of microbially induced calcium carbonate precipitation for surface erosion reduction of a coastal plain sandy slope. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(9), 04022071.
- [15] Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., and Shahin, M.A. (2013). Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1), 81-90.
- [16] Cheng, L., and Cord-Ruwisch, R. (2014). Upscaling effects of soil improvement by microbially induced calcite precipitation by surface percolation. *Geomicrobiology Journal*, 31(5), 396-406.
- [17] Rowshanbakht, K., Khomehchiyan, M., Sajedi, R.H., and Nikudel, M.R. (2016). Effect of injected bacterial suspension volume and relative density on carbonate precipitation resulting from microbial treatment. *Ecological Engineering*, 89, 49-55.
- [18] Lin, H., Suleiman, M.T., Brown, D.G., and Kavazanjian Jr, E. (2016). Mechanical behavior of sands treated by microbially induced carbonate precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015066.
- [19] Feng, K., and Montoya, B. (2016). Influence of confinement and cementation level on the behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

Engineering, 142(1), 04015057.

- [20] Gomez, M.G., Anderson, C.M., DeJong, J.T., Nelson, D.C., and Lau, X.H. (2014). Stimulating in situ soil bacteria for bio-cementation of sands. In: *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and modeling for sustainability*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 1674-1682.
- [21] Gomez, M.G., Martinez, B.C., DeJong, J.T., Hunt, C.E., deVlaming, L.A., Major, D.W., and Dworatzek, S.M. (2015). Field-scale bio-cementation tests to improve sands. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 168(3), 206-216.
- [22] Gomez, M.G., Anderson, C.M., Graddy, C.M., DeJong, J.T., Nelson, D.C., and Ginn, T.R. (2017). Large-scale comparison of bioaugmentation and biostimulation approaches for biocementation of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(5), 04016124.
- [23] Gomez, M.G., Graddy, C.M., DeJong, J.T., and Nelson, D.C. (2019). Biogeochemical changes during bio-cementation mediated by stimulated and augmented ureolytic microorganisms. *Scientific Reports*, 9(1), 11517.
- [24] van Paassen, L.A., Ghose, R., van der Linden, T.J., van der Star, W.R., and van Loosdrecht, M.C. (2010). Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogROUT experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(12), 1721-1728.
- [25] Terzis, D., Laloui, L., Dornberger, S., and Harran, R. (2020). A full-scale application of slope stabilization via calcite bio-mineralization followed by long-term GIS surveillance. In: *Geo-Congress 2020*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 65-73.
- [26] Hodges, T.M., and Lingwall, B.N. (2020). Case histories of full-scale microbial bio-cement application for surface erosion control. In: *Geo-Congress 2020*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 9-19.
- [27] Amin, M., Zomorodian, S.M.A., and O'Kelly, B.C. (2017). Reducing the hydraulic erosion of sand using microbial-induced carbonate precipitation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 170(2), 112-122.
- [28] Chek, A., Crowley, R., Ellis, T.N., Durnin, M., and Wingender, B. (2021). Evaluation of factors affecting erodibility improvement for MICP-treated beach sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(3), 04021001.
- [29] Do, J., Montoya, B.M., and Gabr, M.A. (2019). Debonding of microbially induced carbonate precipitation-stabilized sand by shearing and erosion. *Geomechanics and Engineering*, 17(5), 429-438.
- [30] Do, J., Montoya, B.M., and Gabr, M.A. (2021). Scour mitigation and erodibility improvement using microbially induced carbonate precipitation. *Geotechnical Testing Journal*, 44(5), 1467-1483.
- [31] Jiang, N.-J., Soga, K., and Kuo, M. (2017). Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-clay mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(3), 04016100.
- [32] Jiang, N.-J., Tang, C.-S., Yin, L.-Y., Xie, Y.-H., and Shi, B. (2019). Applicability of microbial calcification method for sandy-slope surface erosion control. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(11), 04019250.
- [33] Liu, K.-W., Jiang, N.-J., Qin, J.-D., Wang, Y.-J., Tang, C.-S., and Han, X.-L. (2021). An experimental study of mitigating coastal sand dune erosion by microbial-and enzymatic-induced carbonate precipitation. *Acta Geotechnica*, 16(2), 467-480.
- [34] Maleki, M., Ebrahimi, S., Asadzadeh, F., and Emami Tabrizi, M. (2016). Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(3), 937-944.
- [35] Montoya, B.M., Do, J., and Gabr, M.M. (2018). Erodibility of microbial induced carbonate precipitation-stabilized sand under submerged impinging jet. In: *IFCEE 2018*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 19-28.
- [36] Shafii, I., Shidlovskaya, A., and Briaud, J.-L. (2019). Investigation into the effect of enzymes on the erodibility of a low-plasticity silt and a silty sand by EFA testing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(3), 04019001.
- [37] Zhan, Q., Qian, C., and Yi, H. (2016). Microbial-induced mineralization and cementation of fugitive dust and engineering application. *Construction and Building Materials*, 121, 437-444.
- [38] Ghasemi, P., and Montoya, B.M. (2020). Field application of the microbially induced calcium carbonate precipitation on a coastal sandy slope. In: *Geo-Congress 2020*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 141-149.
- [39] Ghasemi, P. (2023). Field and large-scale implementation of microbially induced carbonate precipitation (MICP) to reduce erodibility of coastal deposits. Doctoral dissertation. North Carolina State University.
- [40] Montoya, B.M., DeJong, J.T., and Boulanger, R.W. (2014). Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation. In: *Geotechnical Special Publication No. 234*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 89-98.
- [41] Zamani, A., and Montoya, B. (2018). Undrained monotonic shear response of MICP-treated silty sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(6), 04018029.
- [42] Nafisi, A., Montoya, B.M., and Evans, T.M. (2020). Shear strength envelopes of biocemented sands with varying particle size and cementation level. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(3), 04020002.
- [43] Xiao, Y., He, X., Evans, T.M., Stuedlein, A.W., and Liu, H. (2019). Unconfined compressive and splitting tensile

- strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(9), 04019048.
- [44] Choi, S.-G., Wang, K., and Chu, J. (2016). Properties of biocemented, fiber reinforced sand. *Construction and Building Materials*, 120, 623-629.
- [45] Oktafiani, P.G., Putra, H., and Yanto, D.H.Y. (2022). Application of technical grade reagent in soybean-crude urease calcite precipitation (SCU-CP) method for soil improvement technique. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103292.
- [46] Rasheed, R.M., and Moghal, A.A.B. (2022). Critical appraisal of the behavioral geo-mechanisms of peats/organic soils. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(12), 1123.
- [47] Tamassoki, S., Nik Daud, N.N., Jakarni, F.M., Mohd Kusin, F., Rashid, A.S.A., and Roshan, M.J. (2022). Performance evaluation of lateritic subgrade soil treated with lime and coir fibre-activated carbon. *Applied Sciences*, 12(16), 8279.
- [48] Hansbo, S. (1979). Consolidation of clay by bandshaped prefabricated drains. *Ground Engineering*, 12(5).
- [49] Gabr, M., Bowders, J., Wang, J., and Quaranta, J. (1996). In situ soil flushing using prefabricated vertical drains. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(1), 97-105.
- [50] Gabr, M., Sabodish, M., Williamson, A., and Bowders, J.J. (1999). BTEX extraction from clay soil using prefabricated vertical drains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(7), 615-618.
- [51] Warren, K., Gabr, M., and Quaranta, J. (2006). Field study to investigate WIDE technology for TCE extraction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(9), 1111-1120.
- [52] Burbank, M., Weaver, T., Lewis, R., Williams, T., Williams, B., and Crawford, R. (2013). Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(6), 928-936.
- [53] Chou, C.-W., Seagren, E.A., Aydilek, A.H., and Lai, M. (2011). Biocalcification of sand through ureolysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12), 1179-1189.
- [54] Mahawish, A., Bouazza, A., and Gates, W.P. (2018). Improvement of coarse sand engineering properties by microbially induced calcite precipitation. *Geomicrobiology Journal*, 35(10), 887-897.
- [55] Wang, K., Wu, S., and Chu, J. (2023). Mitigation of soil liquefaction using microbial technology: an overview. *Biogeotechnics*, 1(1), 100005.
- [56] Ghasemi, P., and Montoya, B.M. (2019). The effect of chemical concentration on the strength and erodibility of MICP treated sands. In: *Geo-Congress 2019: Soil Improvement (GSP 309)*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, pp. 241-249.
- [57] Amini Kiasari, M., Pakbaz, M.S., and Ghezelbash, G.R. (2018). Increasing of soil urease activity by stimulation of indigenous bacteria and investigation of their role on shear strength. *Geomicrobiology Journal*, 35(10).
- [58] (2025). Evaluation of low-cost calcium sources for microbially induced calcite precipitation (MICP): Implications for sustainable bio-cementation. *Results in Engineering*, 28, 107638.
- [59] (2025). Implementation of poultry waste as a calcium source for microbial-induced calcite precipitation (MICP) treatment of Ganga River sand. In: *Proceedings of GeoMandu 2024, Lecture Notes in Civil Engineering*, 659, 25-35
- [60] Adresi, M., and Khoshoo, M. (2025). Various Methods of Encapsulation Biomaterials in Self-Healing Concrete: A Review. *Engineering Reports*, 7(9), e70276. <https://doi.org/10.1002/eng2.70276>
- [61] Adresi, M., Ali Karami, H., and Yosefi, H. (2024). The Effect of Microbial Acidic Corrosion of Concrete Sewer Pipes. *Road*, 32(120), 441-454. <https://doi.org/10.22034/road.2023.363119.2093>
- [62] American Type Culture Collection (ATCC). (2026). *Sporosarcina pasteurii* (Miquel) Yoon et al. ATCC® 11859™. [online] Available at: <https://www.atcc.org/products/11859> [Accessed 4 Jul. 2026].
- [63] ASTM D698-12(2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [64] ASTM D2166/D2166M-16. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [65] ASTM D854-23. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [66] ASTM D4253-16e1. Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [67] ASTM D6913/D6913M-17. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [68] ASTM D2487-17(2025). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [69] ASTM D3080-04. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [70] ASTM D4373-21. Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils. ASTM International,

West Conshohocken, PA.

[71] Richards, L.A. (1931). Capillary Conduction of Liquids Through Porous Mediums. *Physics*, 1, 318-333.

[72] Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Elsevier Scientific Publishing.

[73] van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.