وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
موسسه آموزش و ترویج کشاورزی
سرمایه‌گذاری برای تولید

معاونت علمی و فناوری

شبکه دانش کشاورزی

سلسله برنامه‌های ویدیو کنفرانس انتقال دانش به روز در گستره ملی بخش کشاورزی

عنوان:

کنترل تحرک ماسه‌های روان با استفاده از روش های میکروبی

سخنران:

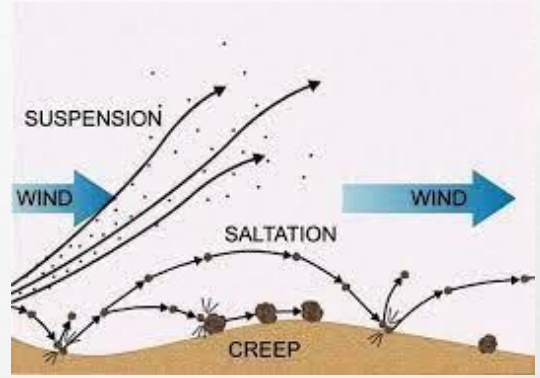
دکتر مریم نعیمی

دانشیار بخش تحقیقات بیابان، موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور

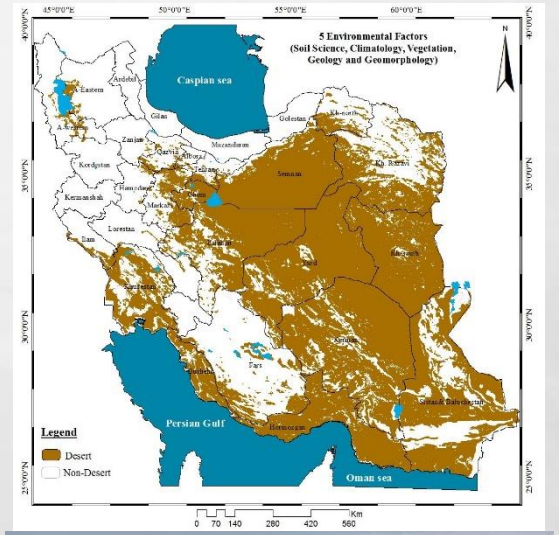
۲۶ بهمن ۱۴۰۴- ساعت: ۱۰

مقدمه

- فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه خشک یک تهدید برای توسعه سرزمین و افزایش کیفیت زندگی در جوامع شهری و روستایی است.
- منابع گردوغبار عبارتند از: زمین های کشاورزی، زمین های بایر رها شده، تپه های ماسه ای ساحلی، خاک های آبرفتی، معادن و راه های دسترسی بدون پوشش.
- دو سوم از ایران در مناطق خشک و نیمه خشک واقع شده که تقریباً نیمی از مردم ایران در مناطقی با مشکل فرسایش بادی مستقر بوده و درگیر مشکلات آن هستند.



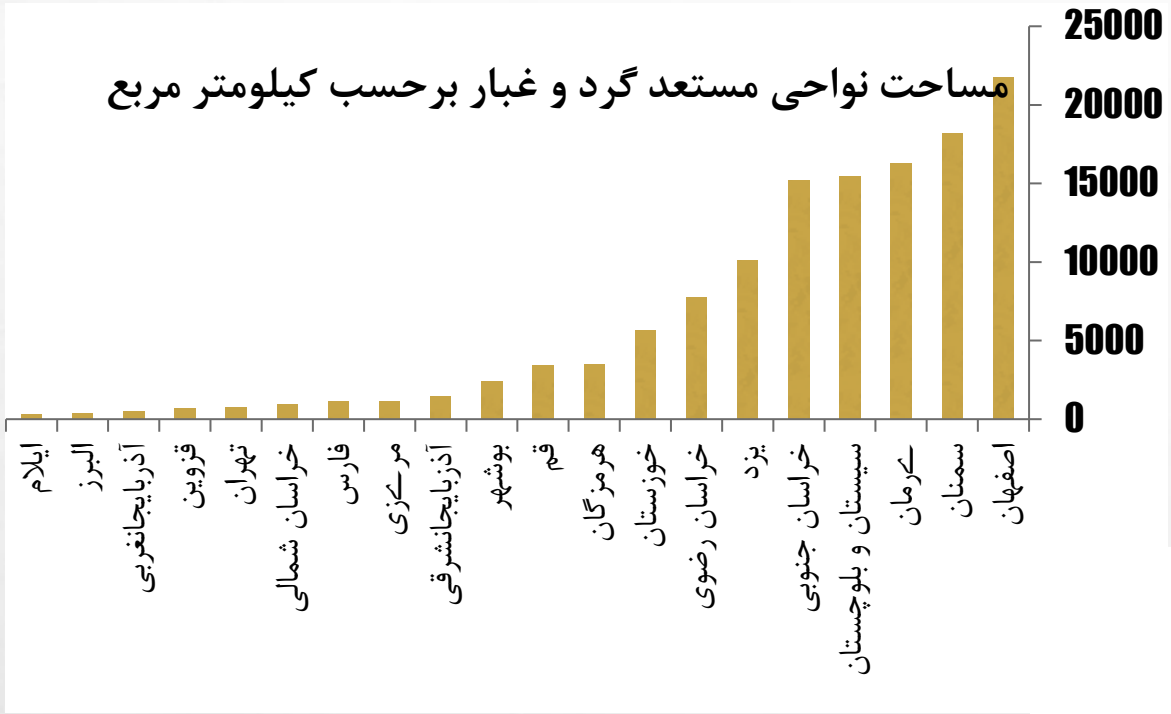
a

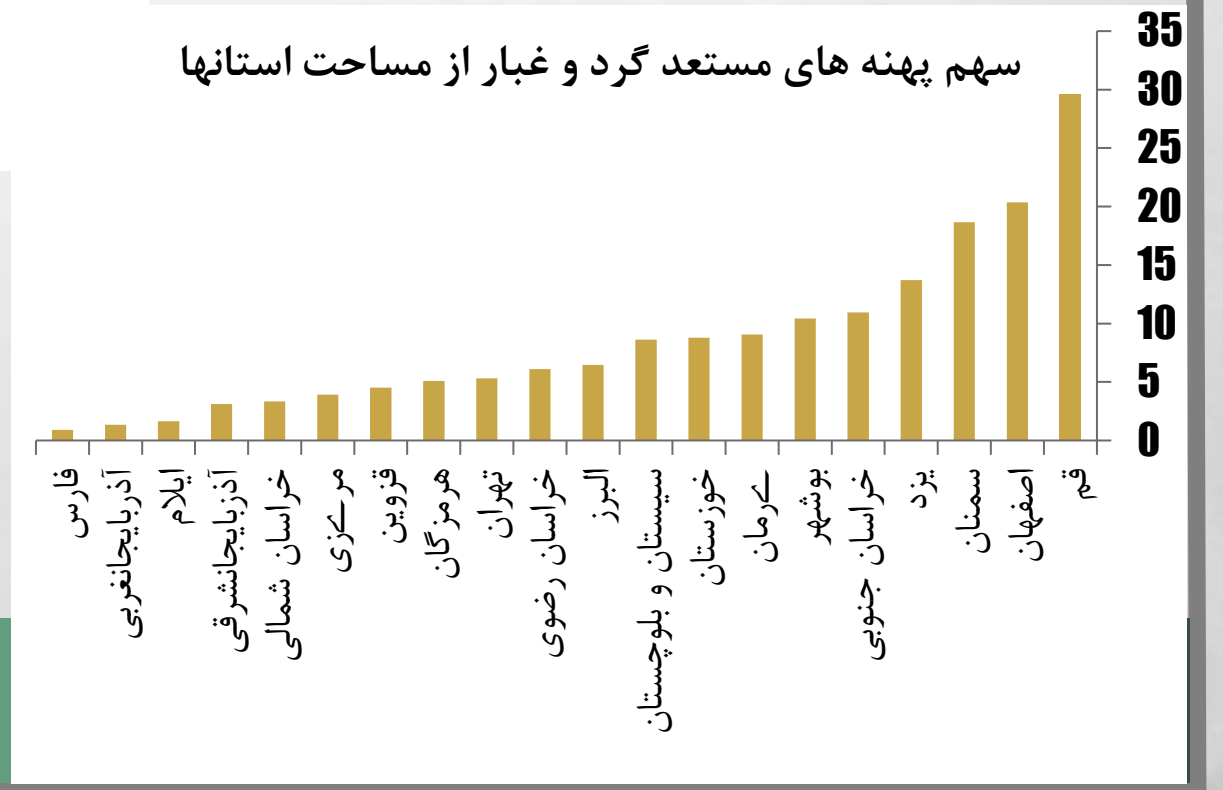


b

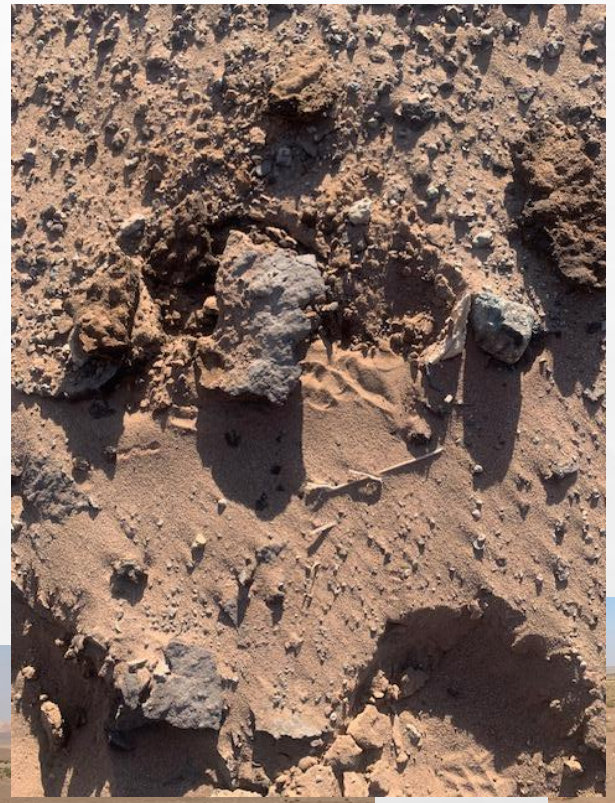
c

سهم پهنه های گرد و غبار

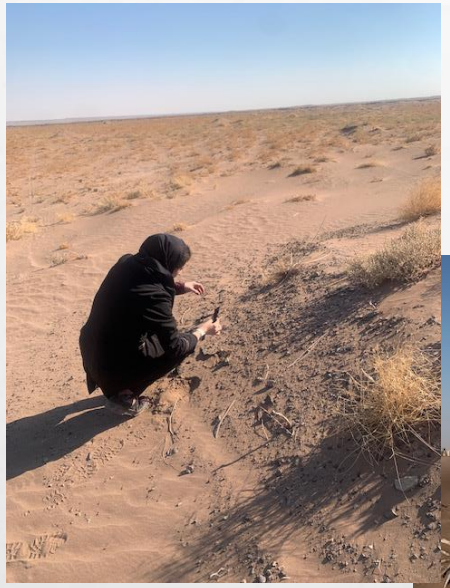




راهکار های پیشین

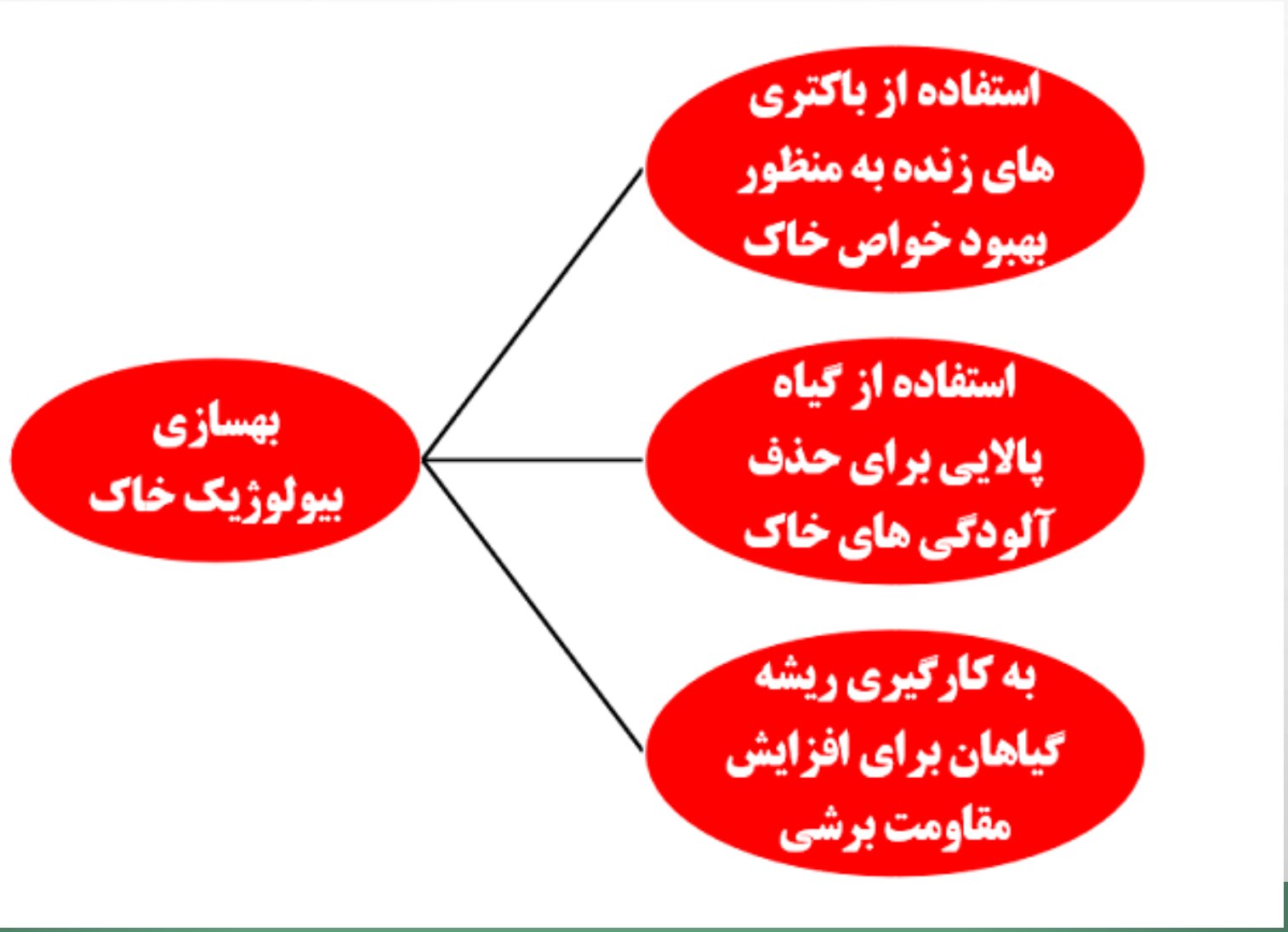


محدودیت روش‌های کلاسیک



- هزینه اجرا
- هزینه نگهداری بالا
- پایداری محدود
- ملاحظات زیست‌محیطی

- اگرچه روش‌های کلاسیک نقش مهمی در پروژه‌های تثبیت ماسه داشته‌اند، اما محدودیت‌های قابل توجهی دارند. علاوه بر این، برخی روش‌های شیمیایی ممکن است منجر به تغییر ویژگی‌های خاک یا ایجاد نگرانی‌های زیست‌محیطی شوند. این مسائل سبب شده است که توسعه گزینه‌های پایدارتر و زیست‌سازگار به یک ضرورت علمی و اجرایی تبدیل شود.


بهسازی
بیولوژیک خاک
استفاده از باکتری
های زنده به منظور
بهبود خواص خاک
استفاده از گیاه
پالایی برای حذف
آلودگی های خاک
به کارگیری ریشه
گیاهان برای افزایش
مقاومت برشی

پوسته‌های زیستی خاک
BIOLOGICAL SOIL CRUSTS

طی دهه‌های گذشته، تمرکز اصلی بر روش‌های مکانیکی و شیمیایی بوده، اما محدودیت‌های زیست‌محیطی و اقتصادی این رویکردها موجب شده است که توجه مطالعات جدید به سمت فناوری‌های زیستی معطوف شود.

رسوب کلسیت القایی میکروبی
MICP

- دو مسیر مهم و نسبتاً نوظهور مورد بحث قرار می‌گیرد؛

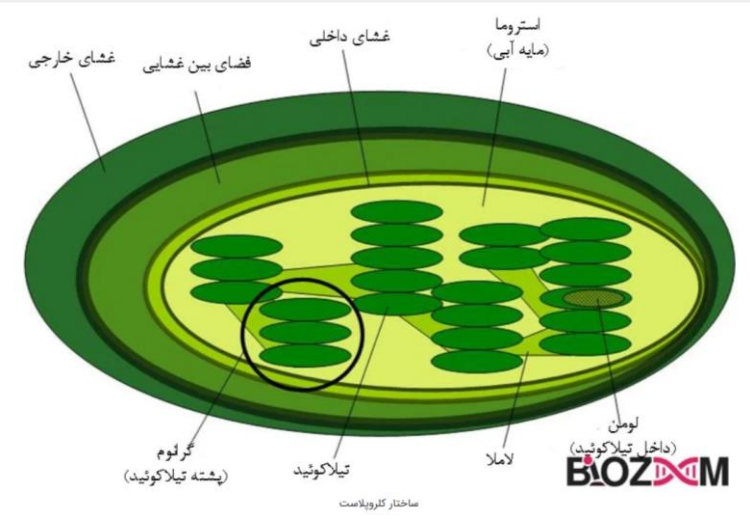
۱- پوسته‌های زیستی خاک و

۲- فناوری رسوب کلسیت القایی میکروبی یا **MICP**

- دو رویکردی که اگرچه از نظر مکانیسم متفاوت‌اند، اما هر دو بر پایه بهره‌گیری از فرآیندهای زیستی برای تثبیت ذرات خاک عمل می‌کنند.

معرفی پوسته‌های زیستی خاک

- ساختار طبیعی سطح خاک
- عامل پایداری در بیابان‌ها
- پوسته‌های زیستی خاک یکی از پدیده‌های طبیعی بسیار مهم در اکوسیستم‌های خشک هستند. این پوسته‌ها از اجتماعات پیچیده‌ای از میکروارگانیسم‌ها تشکیل شده‌اند که سطح خاک را پوشش داده و نقش کلیدی در پایداری آن ایفا می‌کنند. برخلاف تصور رایج، این ساختارها صرفاً یک لایه زیستی ساده نیستند، بلکه اجزای عملکردی مهمی در چرخه‌های هیدرولوژیک و پایداری خاک محسوب می‌شوند.



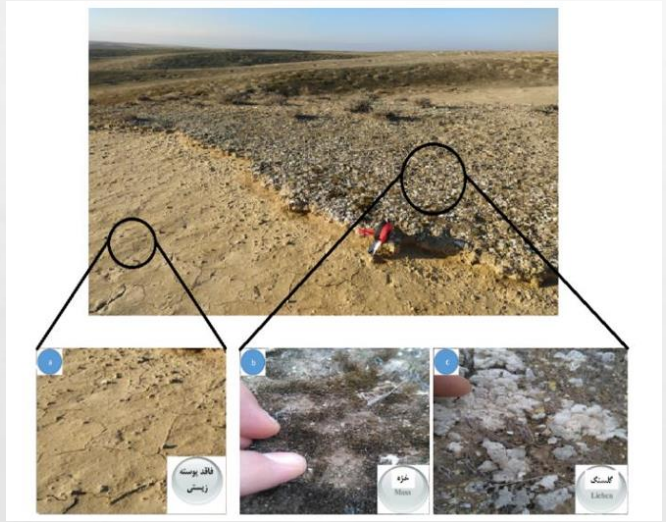
ترکیب زیستی پوسته‌ها

- سیانوباکتری‌ها
- قارچ‌ها و جلبک‌ها
- خزه‌ها و گلسنگ‌ها
- پوسته‌های زیستی متشکل از مجموعه‌ای متنوع از موجودات هستند. سیانوباکتری‌ها معمولاً نخستین گروه‌هایی‌اند که سطح خاک را اشغال می‌کنند. به‌تدریج قارچ‌ها، جلبک‌ها، خزه‌ها و گلسنگ‌ها به این ساختار افزوده می‌شوند. این تنوع زیستی سبب ایجاد شبکه‌ای پیچیده از تعاملات بیولوژیک و فیزیکی می‌شود که نهایتاً پایداری سطح خاک را افزایش می‌دهد.

مکانیسم تثبیت در پوسته زیستی

- تولید **EPS**
- اتصال ذرات ماسه
- افزایش انسجام سطح
- مکانیسم اصلی تثبیت در پوسته‌های زیستی به تولید مواد پلیمری خارج سلولی مربوط است. این مواد همانند یک ماتریس چسبنده عمل کرده و ذرات ماسه را به یکدیگر متصل می‌کنند. نتیجه این فرآیند، تشکیل یک لایه نسبتاً مقاوم در برابر نیروهای برشی ناشی از باد است که به‌طور مستقیم تحرک ماسه را کاهش می‌دهد.

اثر ژئومورفولوژیک پوسته‌ها



همتی دایو و همکاران (۱۴۰۲)

- کاهش فرسایش بادی
- افزایش آستانه حرکت ذرات
- تثبیت سطح خاک

- از منظر فرسایش بادی، پوسته‌های زیستی باعث افزایش آستانه بحرانی حرکت ذرات می‌شوند. به بیان ساده‌تر، انرژی بیشتری برای جداشدگی ذرات از سطح نیاز خواهد بود. این ویژگی نقش مهمی در کاهش انتقال ماسه و گردوغبار دارد.

مزایای اکولوژیک پوسته‌های زیستی خاک

- فقط یک لایه تثبیت‌کننده فیزیکی نیستند، بلکه یک واحد عملکردی اکوسیستم محسوب می‌شوند.

- ایجاد شبکه‌ای از میکروارگانیسم‌ها و پلیمرهای زیستی، باعث افزایش انسجام ذرات خاک و کاهش فرسایش بادی می‌شوند.
- از نظر هیدرولوژیک، موجب کاهش تبخیر مستقیم از سطح خاک و افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت .
- تثبیت کربن و نیتروژن و بهبود تدریجی کیفیت خاک می‌شود.
- تسهیل استقرار گیاهان است؛
- پوسته‌های زیستی بخشی از فرآیند بازسازی طبیعی سرزمین‌های بیابانی هستند.

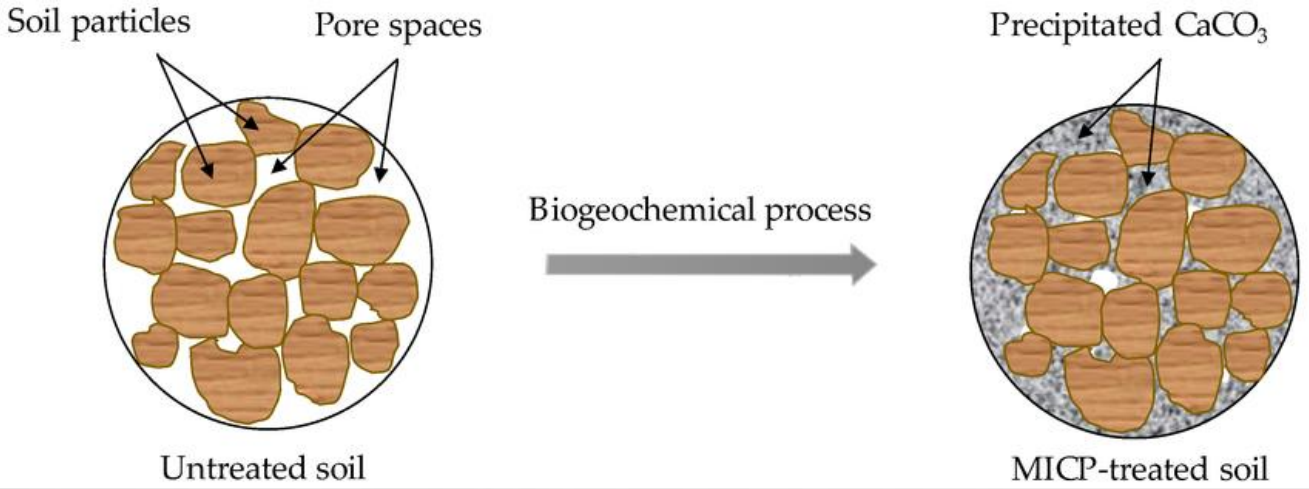
محدودیت‌های توسعه پوسته‌های زیستی

- نرخ رشد پایین
- حساسیت به اختلالات مکانیکی
- وابستگی شدید به شرایط اقلیمی مانند رطوبت و دما
- آسیب‌پذیری در برابر چرای بی‌رویه
- این محدودیت‌ها سبب می‌شود که اتکای صرف به این رویکرد در پروژه‌های فوری یا بزرگ‌مقیاس با چالش همراه باشد.

ضرورت رویکردهای زیستی-مهندسی

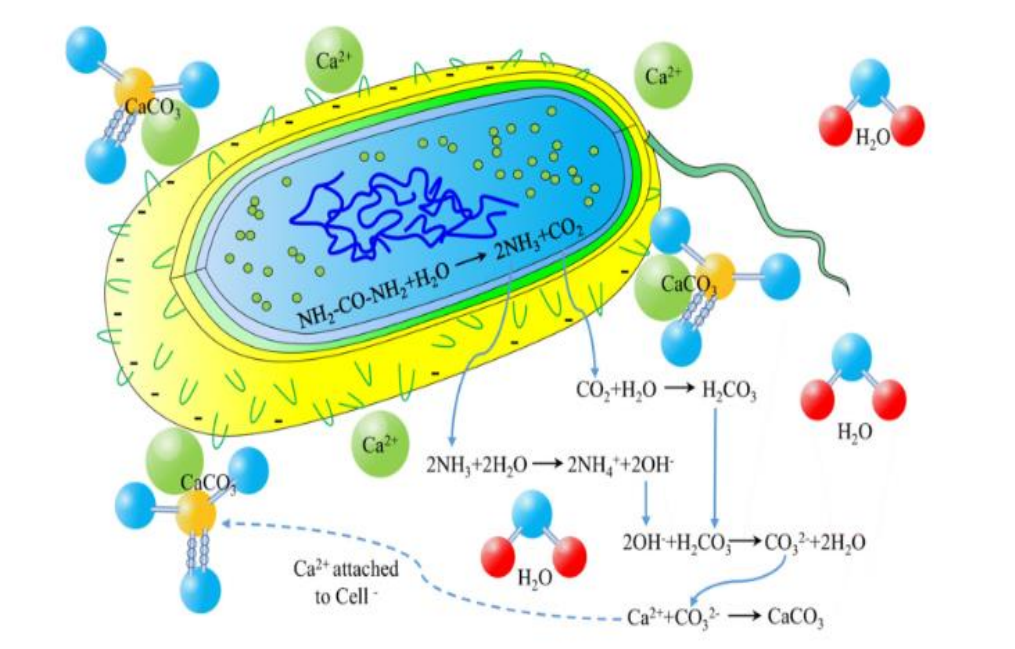
- نیاز به روش‌های سریع‌تر
- افزایش کنترل‌پذیری فرآیند تثبیت
- کاهش وابستگی به رشد طبیعی کند
- توسعه فناوری‌های نوین
- محدودیت‌های ذاتی پوسته‌های زیستی موجب شده است که پژوهشگران به سمت فناوری‌های زیستی-مهندسی حرکت کنند. در این رویکردها، هدف تسریع فرآیند تثبیت خاک از طریق مداخله کنترل‌شده در فعالیت‌های زیستی است. به عبارت دیگر، به‌جای انتظار برای شکل‌گیری طبیعی پوسته، از ظرفیت میکروارگانیسم‌ها به‌صورت هدفمند استفاده می‌شود.

رسوب میکروبی کلسیت



رسوب کلسیت القایی میکروبی یا **MICP** یکی از شناخته‌شده‌ترین فناوری‌های زیستی در تثبیت خاک است. این فناوری بر پایه توانایی برخی باکتری‌ها در ایجاد شرایط شیمیایی مناسب برای رسوب کربنات کلسیم عمل می‌کند. اهمیت این فرآیند در آن است که کلسیت تشکیل‌شده نقش یک عامل سیمانی‌کننده طبیعی را ایفا می‌کند.

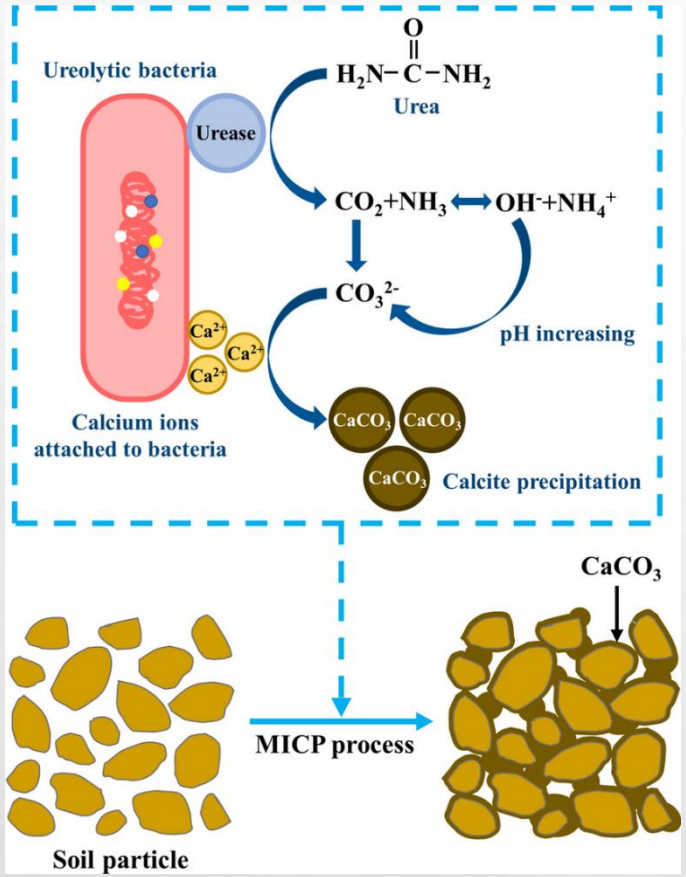
مبنای زیستی فرآیند



شماتیک پروسه رسوب میکروبی کلسیت

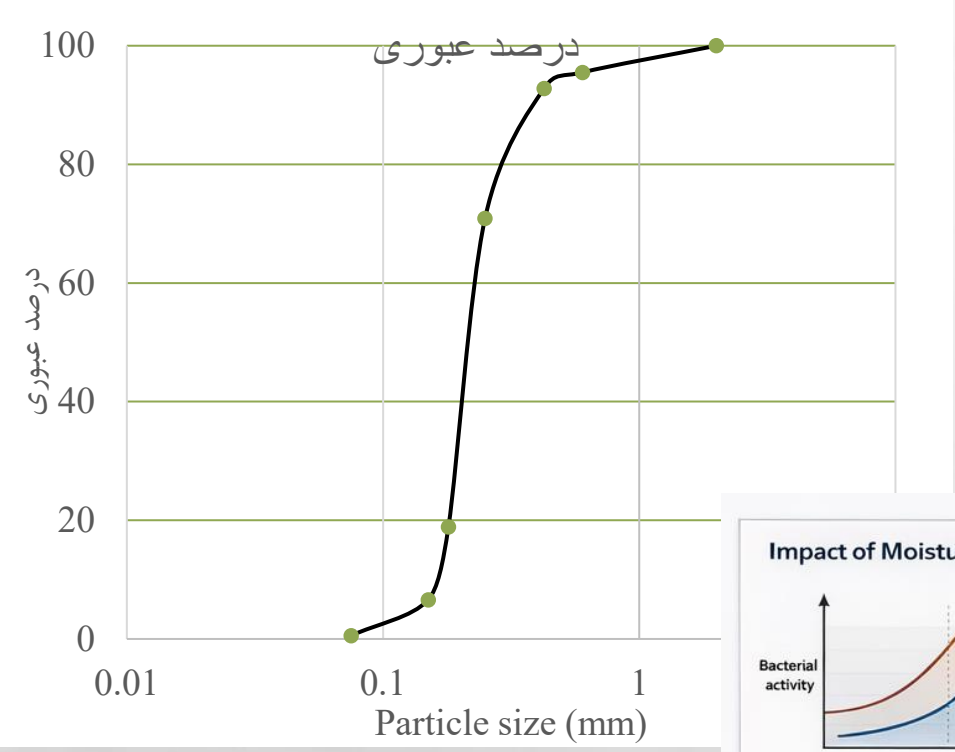
- نقش باکتری‌های تولیدکننده اوره‌آز
- تجزیه اوره
- تولید یون کربنات
- آغاز رسوب کلسیت

نتیجه مهندسی فرآیند

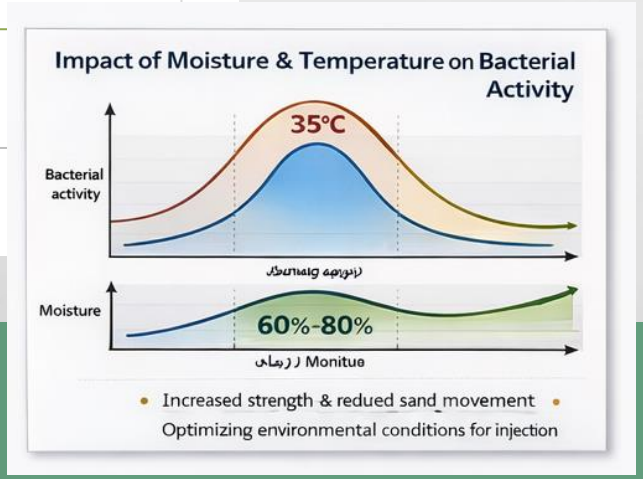


- تشکیل پیوند بین ذرات ماسه
- افزایش استحکام برشی
- کاهش تحرک ذرات
- بهبود پایداری خاک
- رسوب کلسیت در فضای بین ذرات ماسه موجب ایجاد اتصالات معدنی پایدار می‌شود. این اتصالات نقش مشابه سیمان در مصالح ساختمانی را ایفا کرده و باعث افزایش مقاومت مکانیکی محیط دانه‌ای می‌شوند. در نتیجه، تحرک ماسه کاهش می‌یابد.

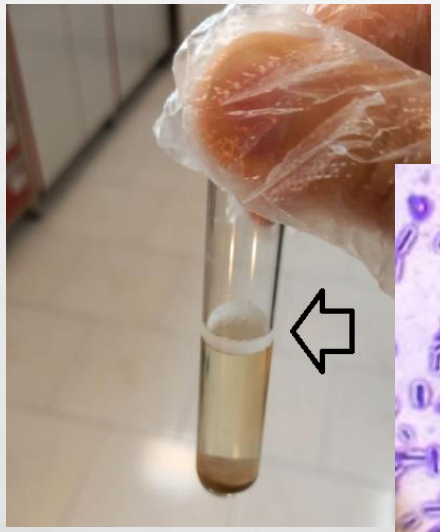
عوامل مؤثر بر کارایی MICP



- کارایی MICPیک پارامتر ثابت نیست
- تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل زیستی و محیطی
- نوع و فعالیت باکتری
- غلظت محلول‌های واکنش‌گر
- شرایط محیطی (PH، دما، رطوبت)
- ویژگی‌های بافت خاک

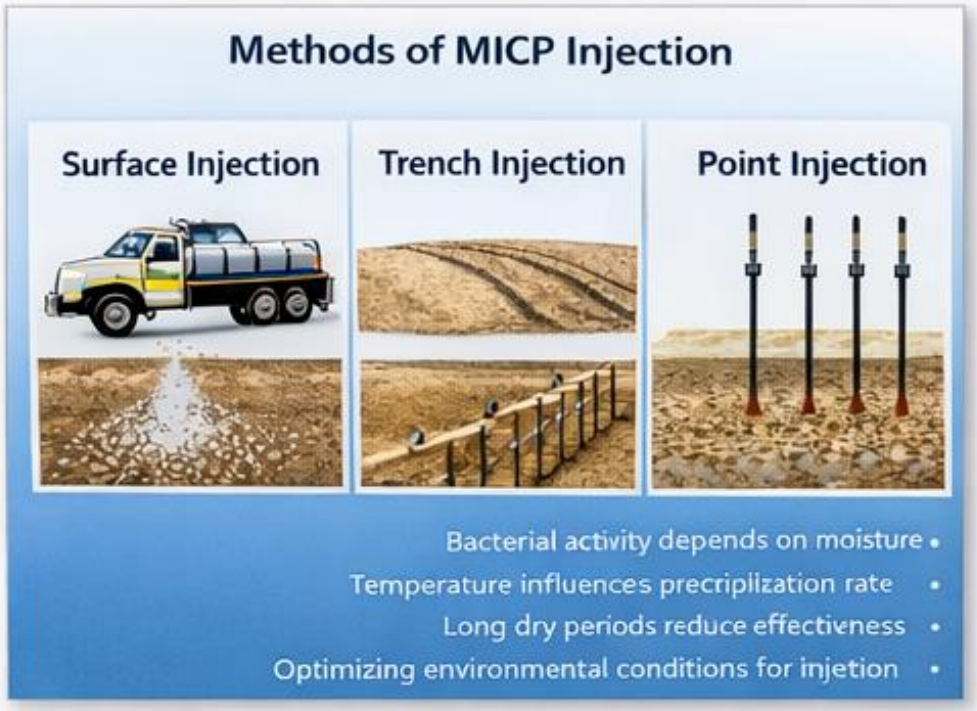


نقش باکتری و انتخاب گونه مناسب



- ***SPOROSARCINA PASTEURII*** رایج‌ترین گونه
- تولید اوره‌آز بالا
- قابلیت بقا در شرایط سخت
- اثر روی سرعت و میزان رسوب
- با این حال، در برخی محیط‌های ویژه ممکن است گونه‌های بومی دیگری عملکرد بهتری نشان دهند، و در این موارد پژوهش‌های بومی‌سازی و انتخاب گونه مناسب ضروری‌اند.

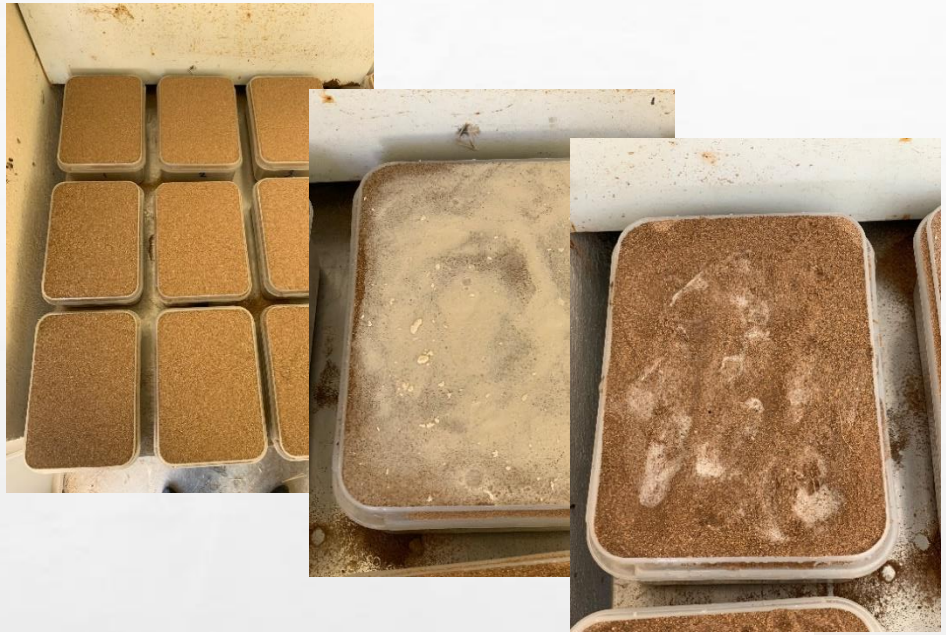
روش‌های تزریق MICP در عرصه

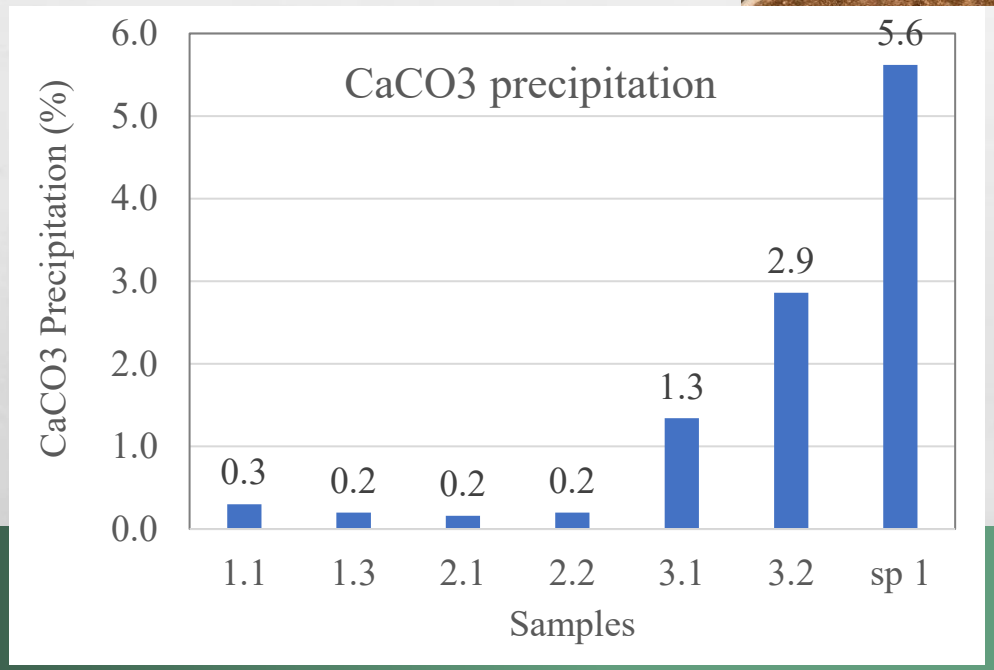


- تزریق سطحی **SPRAY** : برای تثبیت عمومی و پوشش یکنواخت سطح خاک
- تزریق خطی **TRENCH INJECTION**: از طریق ترنچ‌ها باعث ایجاد ردیف‌های پایدار و یکنواخت
- تزریق نقطه‌ای **POINT INJECTION**: برای تمرکز روی نقاط بحرانی
- ترکیبی و تنظیم جریان: توزیع رسوب بهینه و کنترل شده
- مدل‌سازی جریان محلول و پایش نتایج کمک می‌کند تا روش‌ها بهینه شوند و هزینه و ریسک کاهش یابد.

نتایج MICP در آزمایشگاه

- تست‌های تک‌محوره
- تست‌های برشی مستقیم
- اندازه‌گیری نفوذپذیری
- تحلیل میکروسکوپی رسوب
- **نتایج**: میزان مقاومت خاک‌های ماسه‌ای تثبیت‌شده افزایش قابل توجهی یافته است. اندازه‌گیری نفوذپذیری نیز کاهش معنی‌داری را نشان می‌دهد.
- مطالعات میکروسکوپی رسوب در فضای بین‌دانه‌ای به توضیح دقیق مکانیسم عملکرد کمک کرده‌اند. این نتایج نه تنها به درک علمی فرآیند کمک می‌کند، بلکه اساس طراحی پارامترهای عملی را نیز فراهم می‌آورد.



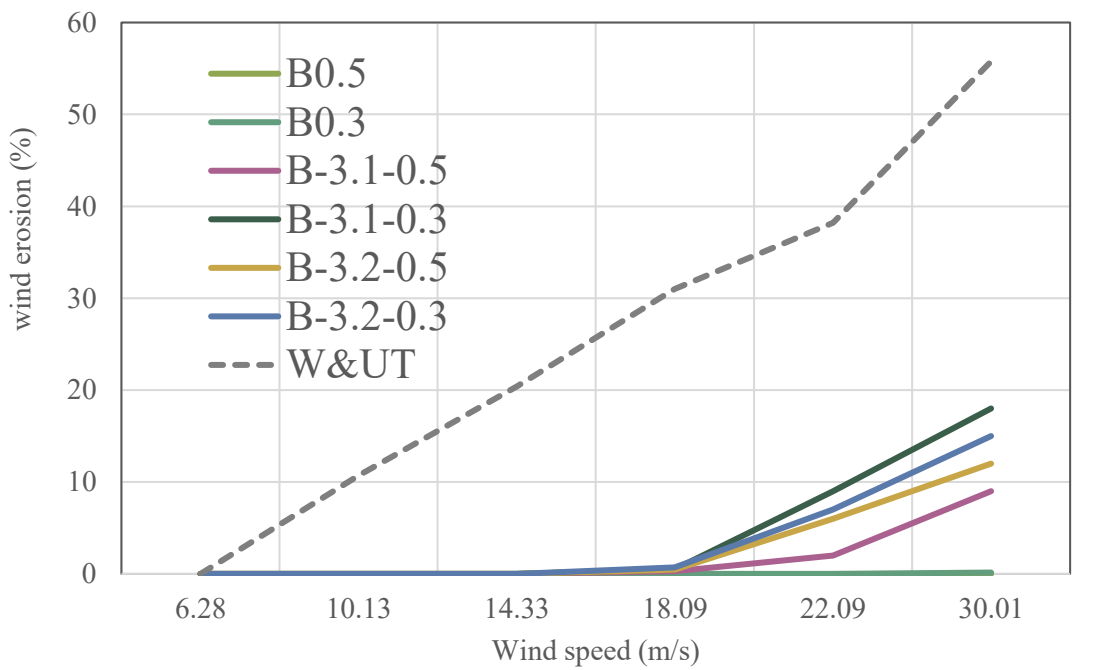


بررسی میزان رسوب کلسیت در خاک حضور سویه های ۱/۳ و ۲/۳ جدا شده از خاک قم و باکتری شاهد

تست جوانه زنی در موسسه

آزمایش جوانه زنی بذر تاغ در حضور تثبیت کننده های میکروبی الف) ۱ مولار با سویه شاهد، ب) ۵/۰ مولار با سویه شاهد ؛ ج) ۳/۰ مولار با سویه شاهد؛ د) جوانه زنی بذر، بدون ریشه دوانی،؛ ه) ۳/۰ مولار با سویه ۱/۳ ؛ و)جوانه زنی در نمونه بدون تثبیت کننده (شاهد)

تست فرسایش بادی در موسسه

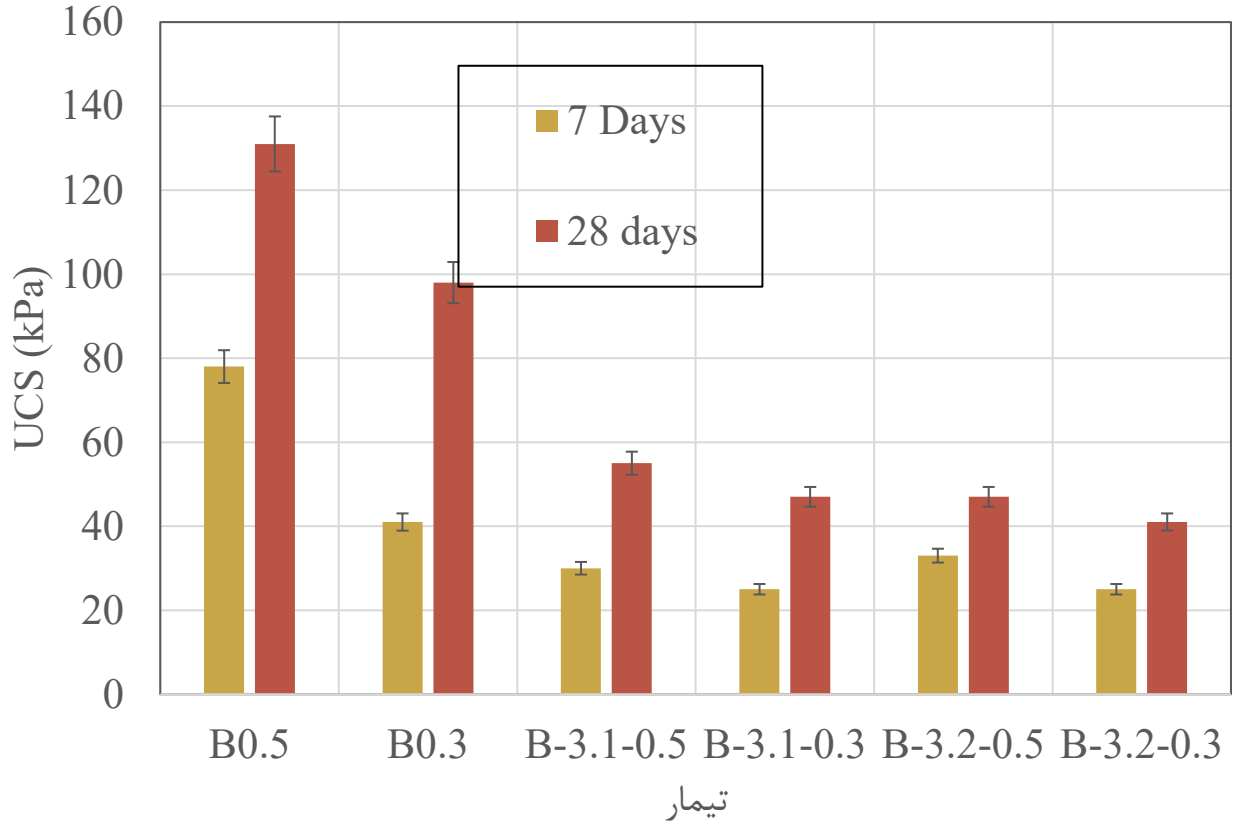


میزان بادبردگی ۲۸روزه نمونه های خاک بهسازی شده با تثبیت کنده های میکروبی با سویه شاهد و دو سویه جداسازی شده از خاک

نمونه های ۲۸روزه بهسازی شده با تثبیت کنده های میکروبی الف) ۳/۰ مولار با سویه ۲/۳ و قبل از تونل باد؛ ب) ۵/۰ مولار با سویه ۲/۳ و بعد از تونل باد، ج) ۵/۰ مولار با سویه شاهد و بعد از تونل باد و بعد از آزمایش مقاومت فشاری

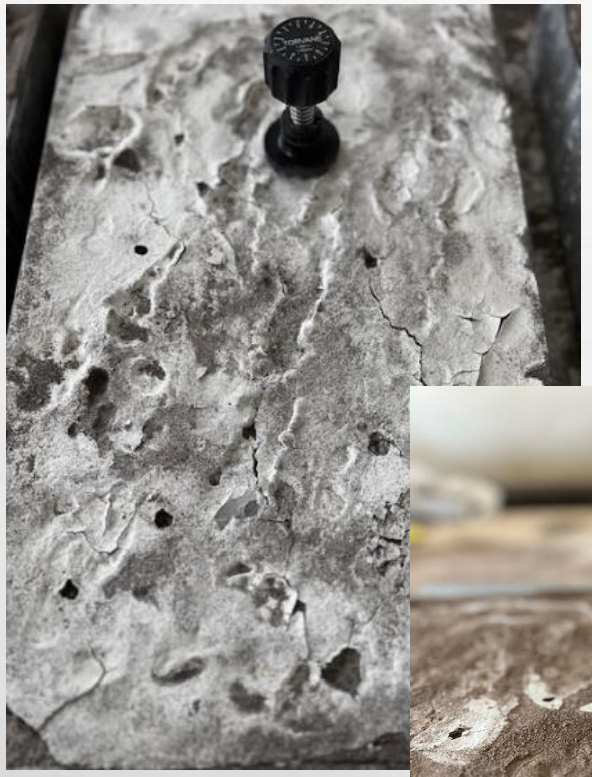
تست مقاومت فشاری

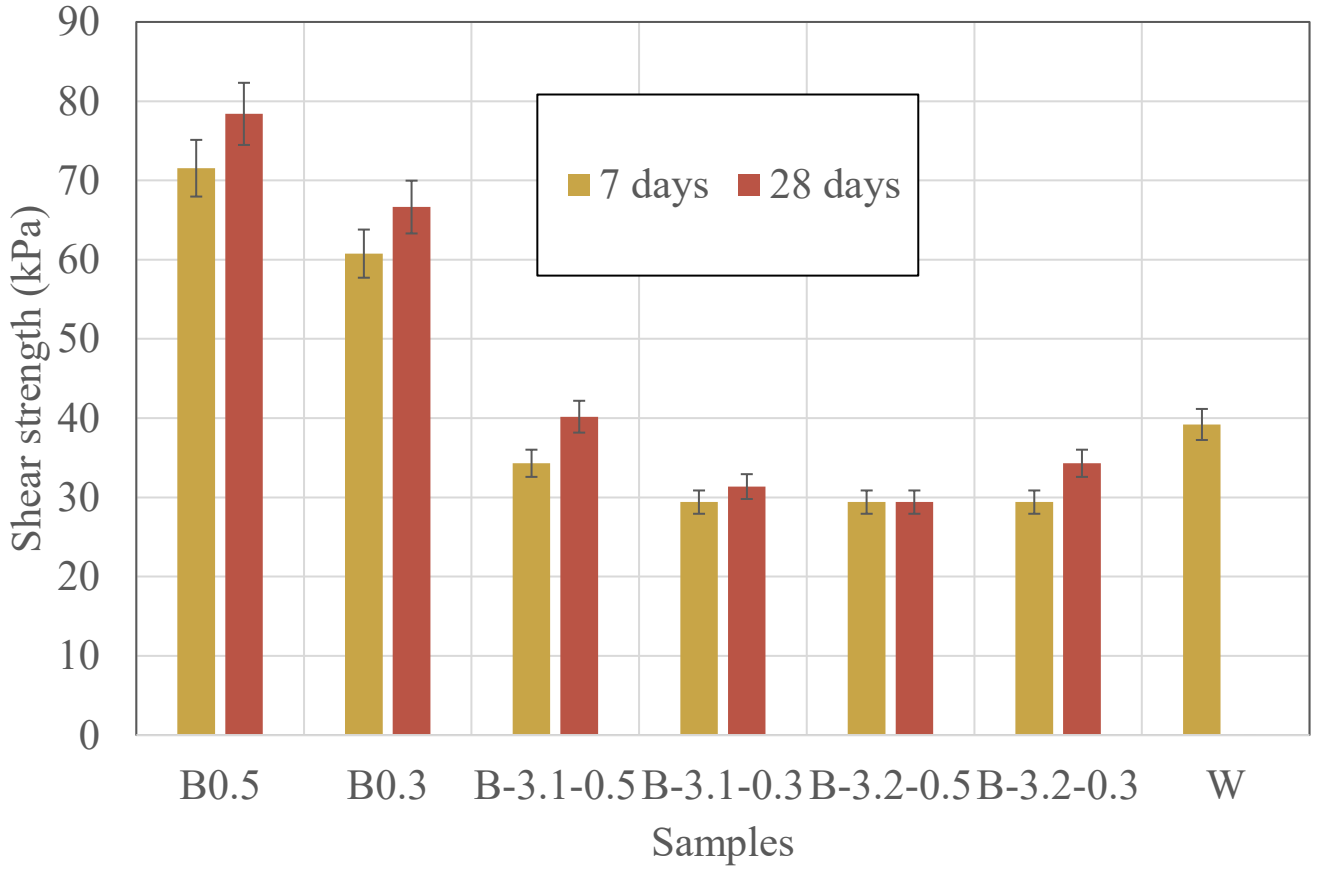
نمونه خاک بهسازی شده بعد از آزمون مقاومت برشی و فشاری، ترک ایجاد شده در سطح خاک تثبیت شده به دلیل جا به جایی بوده، در حالیکه فرسایش بادی قادر به جابه جایی خاک نیست.



مقاومت فشاری ۷ و ۲۸روزه نمونه های خاک بهسازی شده با تثبیت کننده های میکروبی با سویه شاهد و دو سویه جداسازی شده از خاک

تست مقاومت برشی





مقاومت برشی ۷ و ۲۸روزه نمونه های خاک بهسازی شده با تثبیت کننده های میکروبی با سویه شاهد و دو سویه جداسازی شده از خاک

مرور نتایج علمی و پایش میدانی

- افزایش مقاومت فشاری **و برشی خاک تا ۳–۶ برابر**
- کاهش نفوذپذیری تا ۴۰–۷۰٪
- عملکرد بهتر در خاک‌های ماسه‌ای
- عدم یکپارچگی در خاک‌های ریزدانه

طراحی اجرایی پروژه‌های MICP در عرصه

- تعیین هدف تثبیت (مقاومت؟ نفوذپذیری؟ هر دو)
- انتخاب باکتری مناسب
- طراحی محلول‌های واکنش‌گر
- طرح شبکه تزریق و نمونه‌گیری برای ایجاد توزیع یکنواخت طراحی شود.
- طراحی دقیق این مراحل براساس مدل‌های جریان و واکنش، یکی از بخش‌های حیاتی برای دستیابی به نتایج مطلوب در پروژه‌های میدانی است.

کاربردهای واقعی MICP در عرصه

- در سال‌های اخیر،
- تثبیت خاک راه‌ها در بیابان صحرای جنوب غربی ایالات متحده، MICP
- تقویت بستر سازه‌ها
- کاهش فرسایش بادی در کانون‌های فعال
- نتایج: پس از اجرای چند مرحله تزریق، مقاومت سطحی خاک تا ۵ برابر افزایش / کاهش حرکت ذرات ماسه تا حدود ٪۷۰ / اثر معناداری در کاهش فرسایش بادی
- یکی از نکات کلیدی این مطالعه، طراحی بهینه مراحل تزریق و پایش مداوم / منجر به توزیع یکنواخت رسوب

کاربرد MICP در عرصه ۲

- مطالعه بیابان‌های استرالیا
- کنترل تپه‌های ماسه‌ای فعال
- کاهش سرعت پیشروی ماسه
- چالش‌های اقلیمی و تفاوت در بافت خاک
- تنظیم مراحل تزریق
- فناوری MICP برای کنترل تپه‌های ماسه‌ای فعال

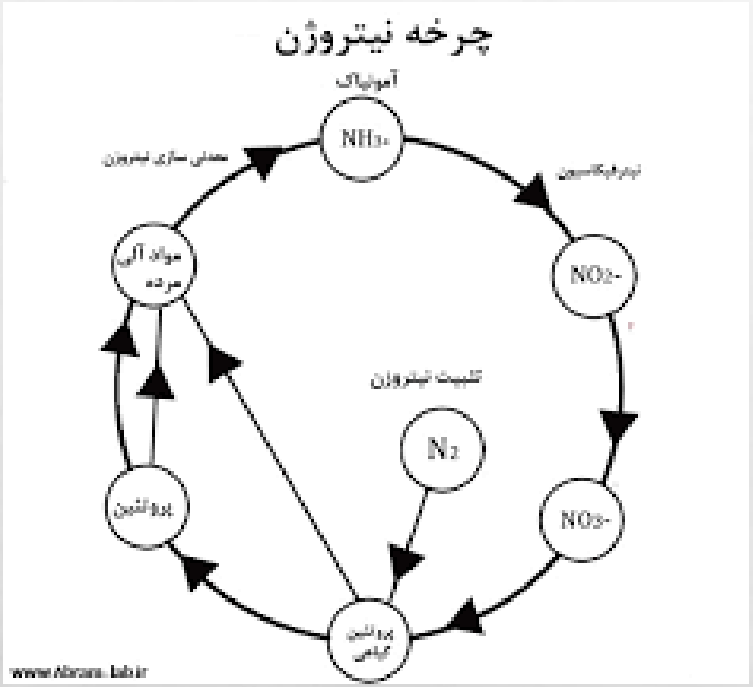
مزایای کلیدی MICP

- سازگار با محیط زیست
- تشکیل سیمان طبیعی
- افزایش مقاومت مکانیکی
- قابلیت کنترل بالا
- یکی از مهم‌ترین مزایای **MICP**، تولید عامل سیمانی معدنی بدون نیاز به مواد شیمیایی سنگین است. محصول نهایی همان کربنات کلسیم طبیعی است. فرآیند در دمای محیط انجام می‌شود و نیاز به انرژی بالا ندارد. همچنین امکان تنظیم شدت واکنش و میزان رسوب وجود دارد. این ویژگی‌ها باعث جذابیت فناوری در پروژه‌های بیابان‌زدایی شده است.

محدودیت‌ها و چالش‌های MICP

- هزینه نسبی مواد و تغذیه میکروبی
- عدم یکنواختی رسوب در میدان
- کنترل کیفیت در مقیاس بزرگ
- اثرات جانبی شیمیایی محیط
- هزینه مقیاس میدانی
- اثرات جانبی شیمیایی مانند افزایش میزان آمونیاک حاصل از تجزیه اوره نیز باید مدیریت شود، زیرا می‌تواند PH خاک را تغییر دهد و روی فرآیندهای دیگر تأثیر بگذارد. بنابراین، مطالعات اخیر بر توسعه سیستم‌های تزریق هوشمند و پایش مستمر تأکید کرده‌اند تا این چالش‌ها کاهش یابد.

ملاحظات زیست‌محیطی و ارزیابی اثرات در عرصه

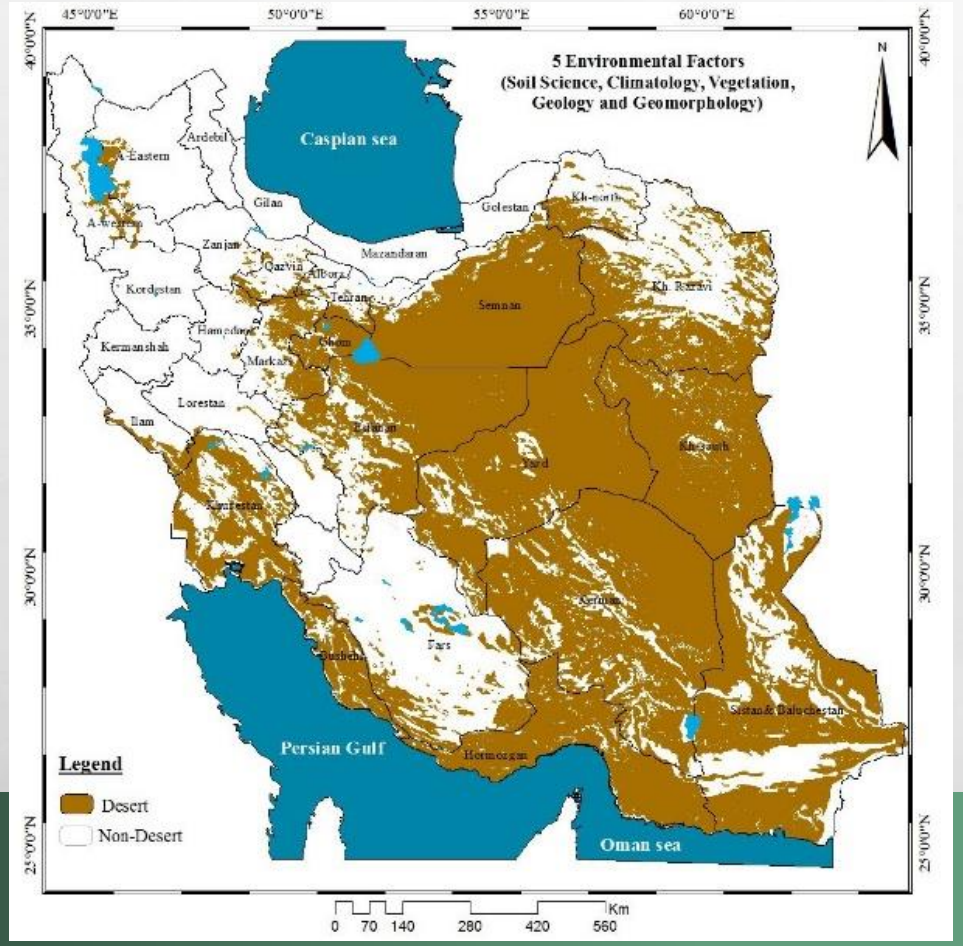


- مدیریت تولید آمونیاک
- تغییر پتانسیل شیمیایی خاک
- تعامل با زیست‌بوم محلی
- تأثیر بر چرخه‌های بیوشیمیایی
- افزایش **PH** خاک بر فعالیت گیاهی و میکروبی بومی اثر منفی.
- بررسی گونه‌های بومی میکروبی و گیاهی: تا تثبیت باعث آسیب به اکوسیستم
- پایش تغییرات طولانی مدت: بر چرخه‌های طبیعی و گیاهان بومی
- کاهش اثرات جانبی با طراحی هوشمند

پایداری بلندمدت خاک تثبیت‌شده در عرصه

- مقاومت در برابر فرسایش باد
- اثر چرخه‌های تر و خشک
- دوام رسوب $CACO_3$
- ارزیابی پس از ۶–۱۲ ماه
- دوام رسوب $CACO_3$ وابسته به تراکم و یکنواختی آن است.
- این داده‌ها برای برنامه‌ریزی نگهداری و بهبود طراحی بسیار مهم هستند.

اجرای پروژه‌های پایلوت در ایران



- شناسایی مناطق بحرانی ماسه‌ای
- طراحی مقیاس کوچک قبل از اجرا
- نظارت مستمر پارامترها
- ثبت داده‌ها برای مدل‌سازی آینده

تحلیل اقتصادی مقدماتی

- هزینه مواد اولیه
- هزینه تزریق و نیروی انسانی
- مقایسه با روش‌های کلاسیک: با این وجود، اگر این فناوری بتواند نیاز به دوره‌های تکراری نگهداری و استفاده از مالچ‌های نفتی را کاهش دهد، در بلندمدت می‌تواند نسبت به روش‌های کلاسیک اقتصادی‌تر باشد.
- پتانسیل بهینه‌سازی
- تحلیل‌های هزینه–فایده دقیق در مطالعات آینده ضروری‌اند.

پیام راهبردی برای تصمیم‌گیران

- استفاده از پروژه‌های پایلوت: قبل از اجرای گستردد
- ارزیابی جامع اقتصادی و محیطی
- تلفیق دانش اکادمیک و اجرایی
- برنامه‌ریزی بلندمدت

مقایسه پایدار میان فناوری‌ها

MICP	پوسته زیستی	ویژگی
مهندسی زیستی	طبیعی	منشاء
سریع‌تر	کند	سرعت اثر
بالا	کم	کنترل‌پذیری
متوسط تا بالا	پایین	هزینه
وابسته به طراحی	وابسته به محافظت	پایداری بلندمدت

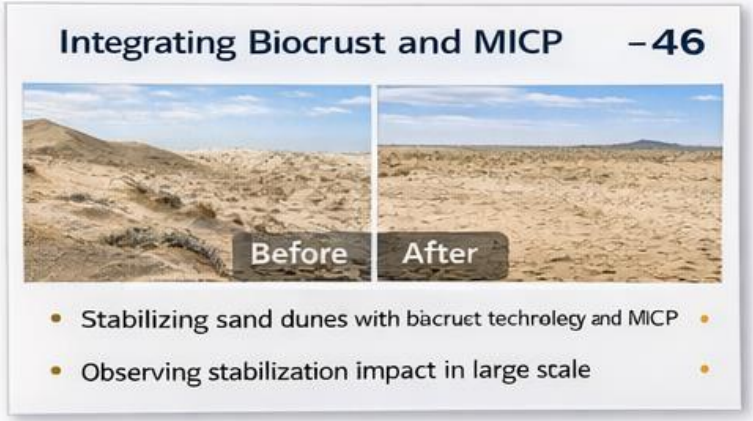
مقایسه با روش‌های سنتی تثبیت ماسه

- مالچ‌های نفتی ← اثر سریع ولی پیامد زیست‌محیطی
- روش‌های مکانیکی ← نیازمند نگهداری
- روش‌های زیستی ← سازگارتر با محیط
- **MICP** ← رویکرد نوین مهندسی زیستی

جمع بندی

- فناوری‌های زیستی جایگزین نوین و پایدار برای کنترل ماسه‌های روان
- پوسته‌های زیستی کند ولی اکولوژیک
- **MICP**سریع و کنترل‌پذیر
- تلفیق روش‌ها بهترین راهکار و کمترین اثرات منفی را در پروژه‌های واقعی.

چشم‌انداز آینده



- توسعه پروژه‌های پایلوت گسترده
- بهینه‌سازی هزینه و مواد
- توسعه مدل‌های پیش‌بینی میدانی
- برنامه‌ریزی ملی برای کنترل ماسه‌های روان

THANKS FOR YOUR ATTENTION