



Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research (Soil and Water Sci.)

<https://srjournal.areeo.ir/>


Enzyme-Induced Carbonate Precipitation for Soil Stabilization and Dust Control: An Analytical Review

Maryam Naeimi^{a*}

^a Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

Article Info	Extended Abstract
Article Type Review Article	Background and Objectives: Fugitive dust emissions and dust storms represent a critical environmental and land-management problem in arid and semi-arid regions, where sparse vegetation, surface disturbance, drought, and salinity accelerate wind erosion and soil degradation. Conventional dust suppression and stabilization practices often face limitations such as short service life, high water consumption, recurring maintenance, or ecological incompatibility. Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) has emerged as a bio-mediated alternative that can improve soil structure through calcium carbonate bonding without the operational complexity of handling living microorganisms. This study aims to (i) explain the fundamental mechanism of EICP and its relevance to dust control, (ii) identify the key operational and soil-related parameters governing treatment efficiency, (iii) assess the suitability of different urease sources—particularly plant-derived urease—for large-scale applications, and (iv) summarize the principal technical, environmental, and research challenges that must be addressed to enable reliable field deployment in critical dust hotspots.
Received June 07, 2026	
Revised August 05, 2026	
Accepted August 11, 2026	
Published online September 06, 2026	
Keywords Biological soil stabilization Plant-Derived Urease Wind erosion Dust Urease activity	Methodology: An analytical narrative review was conducted by synthesizing research on urease-driven carbonate precipitation, EICP-based soil improvement, and surface stabilization for wind erosion mitigation. The literature was examined with emphasis on: reaction chemistry (urea hydrolysis and carbonate generation), precipitation behavior (CaCO ₃ content, crystal morphology, and spatial distribution), treatment implementation (spraying, percolation, shallow injection, and multi-cycle application), and field-relevant performance indicators (crust formation, strength improvement, permeability variation, and erosion resistance). The review also compared urease sources (commercial/purified, microbial, and plant-derived) in terms of availability, cost, activity stability, and environmental compatibility, and compiled reported limitations including non-uniform cementation, pore clogging risk, by-product management, and durability under weathering.
*Corresponding author's email naeimi@rifr-ac.ir	
	Results: The reviewed evidence indicates that EICP can significantly enhance near-surface cohesion by precipitating calcium carbonate within pore spaces and at grain contacts, thereby promoting interparticle bonding and forming a protective crust. Such crusting can increase surface resistance to aerodynamic forces and reduce particle detachment, supporting the potential use of EICP as a dust suppression measure in loose sandy and silty soils commonly associated with active dust sources. Treatment performance is strongly controlled by temperature and pH (which affect urease kinetics and carbonate availability), enzyme activity and dosage, urea and calcium concentrations and their molar balance, and the choice of calcium salt. Soil texture and pore structure influence reagent transport and precipitation uniformity; coarse materials may allow deeper penetration but require repeated cycles to achieve adequate crust integrity, whereas finer materials can produce stronger surface sealing but may exhibit localized clogging and heterogeneity. Application strategy is likewise decisive: surface spraying is practical for large areas but tends to create depth gradients in CaCO ₃ , while percolation or shallow injection can improve penetration at the cost of higher operational complexity. Plant-derived urease is highlighted as a promising route for scaling EICP, since it may reduce costs and improve accessibility for extensive treatment in remote drylands; however, variability in extraction protocols, enzyme stability, and activity quantification can limit reproducibility unless standardized

procedures are adopted. Across studies, persistent constraints include uneven precipitation distribution, uncertain long-term performance under wetting–drying and salt cycles, and environmental concerns related to ammonium generation and potential salinity impacts.

Conclusion: EICP is a developing yet highly promising technology for environmentally compatible soil stabilization and dust control. By enabling carbonate-based cementation without reliance on viable microbial cultures, it offers practical advantages for deployment under harsh field conditions. The literature supports its capacity to form erosion-resistant surface crusts and improve mechanical properties relevant to wind erosion mitigation, but translation to routine field practice requires targeted optimization. Future progress depends on establishing performance-based design criteria linked to dust-control outcomes, improving treatment uniformity through refined delivery protocols, standardizing plant-urease extraction and activity reporting, and implementing effective management strategies for ammonium and salinity risks. Well-designed pilot and long-term field trials in representative dust hotspots are essential to validate durability, quantify environmental trade-offs, and define robust guidelines for large-scale application.

Cite this article: Naeimi, M., 2026. Enzyme-Induced Carbonate Precipitation for Soil Stabilization and Dust Control: An Analytical Review. Review Article, *Journal of Soil Research*, 40 (2), pp 263-281.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372984.821>

Publisher: Soil Science Society of Iran



نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

<https://srjournal.areeo.ir/>



مروری تحلیلی بر کاربرد فناوری رسوب‌گذاری کربنات القاشده توسط آنزیم در تثبیت خاک و کنترل گردوغبار

مریم نعیمی*

^۱ بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

واژه‌های کلیدی

تثبیت بیولوژیکی خاک

اوره‌آز گیاهی

کنترل فرسایش بادی

گرد و غبار

فعالیت اوره‌آز

* ایمیل نویسنده مسئول

naeimi@rifr-ac.ir

گردوغبار یکی از چالش‌های اصلی محیط‌زیستی در نواحی خشک و نیمه‌خشک (از جمله ایران) است و بر سلامت، زیرساخت‌ها و کیفیت محیط زیست اثر منفی دارد. محدودیت روش‌های رایج کنترل فرسایش بادی و تثبیت سطح خاک، نیاز به راهکارهای نوین، سازگار با محیط‌زیست و قابل کاربرد در مقیاس وسیع را افزایش داده است. در این رابطه، رسوب‌گذاری کربنات القاشده توسط آنزیم (EICP) به‌عنوان فناوری نوظهور، بر پایه هیدرولیز اوره توسط آنزیم اوره‌آز و تشکیل کربنات کلسیم در فضای بین‌دانه‌ای عمل می‌کند. این فرایند با ایجاد پیوند بین ذرات و تشکیل پوسته سطحی می‌تواند مقاومت خاک را افزایش داده و فرسایش‌پذیری بادی را کاهش دهد. مطالعه حاضر، با رویکردی مروری-تحلیلی، سازوکار EICP، عوامل مؤثر بر کارایی آن، منابع مختلف اوره‌آز (به‌ویژه منابع گیاهی) و کاربردها و چالش‌های این فناوری در کنترل گردوغبار را بررسی می‌کند. نتایج نشان داد که کارایی EICP به دما، pH، غلظت اوره و کلسیم، نوع خاک، روش اجرا (تزریق/پاشش)، منشأ و فعالیت آنزیم و شرایط محیطی وابسته است. با وجود نتایج امیدوارکننده آزمایشگاهی و نیمه‌میدانی، چالش‌هایی مانند یکنواختی رسوب، مدیریت آمونیم، دوام بلندمدت، شوری و استانداردسازی منابع آنزیمی همچنان پابرجاست. منابع گیاهی اوره‌آز به دلیل قابلیت دسترسی بیشتر، هزینه کمتر و سازگاری محیط زیستی، گزینه‌ای امیدبخش برای کاربردهای گسترده در کانون‌های بحرانی گردوغبار هستند؛ اما نیازمند بهینه‌سازی فرایند و آزمون‌های میدانی بلندمدت‌اند.

استناد: نعیمی، م.، ۱۴۰۵ مروری تحلیلی بر کاربرد فناوری رسوب‌گذاری کربنات القاشده توسط آنزیم در تثبیت خاک و کنترل گردوغبار. مقاله مروری، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲)، ۴۰، ص ۲۶۳-۲۸۱.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372984.821>



مقدمه

پدیده گردوغبار و فرسایش بادی در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی و سرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان تبدیل شده است و پیامدهای آن از کاهش کیفیت هوا و تهدید سلامت عمومی تا اختلال در حمل‌ونقل، کاهش بهره‌وری کشاورزی و تخریب زیرساخت‌ها گسترده است (Tegen, 2003; Shao et al., 2011; Kok et al., 2021; Al Dousari et al., 2025). در ایران (Jahangir et al., 2021) نیز به‌واسطه ویژگی‌های اقلیمی، گسترش خشکسالی‌های پی‌درپی، افت سطح آب‌های زیرزمینی، تغییر کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی و فشارهای انسانی، شدت و فراوانی رخدادهای گردوغبار افزایش یافته و کانون‌های بحرانی در استان‌هایی نظیر خراسان، خوزستان، سیستان و بلوچستان، کرمان، یزد و ایلام گزارش شده است (Sehatkashani et al., 2015; Vatanparast et al., 2025). بر همین اساس، کنترل کانون‌های تولید گردوغبار و تثبیت خاک‌های مستعد فرسایش به‌عنوان یک اولویت در برنامه‌ریزی و مدیریت سرزمین مطرح است.

روش‌های متداول کنترل گردوغبار معمولاً شامل آب‌پاشی، پاشش محلول‌های نمکی، استفاده از تثبیت‌کننده‌های شیمیایی و در برخی موارد مواد نفتی است (Naeimi & Chu, 2017). هرچند این راهکارها در کوتاه‌مدت می‌توانند از برخاست گردوخاک بکاهند، اما غالباً با محدودیت‌هایی مانند اثرگذاری کوتاه‌مدت، نیاز به تکرارپذیری بالا، هزینه اجرایی قابل توجه در مقیاس وسیع، وابستگی به شرایط اقلیمی (به‌ویژه دسترسی به آب) و نگرانی‌های محیط زیستی از جمله شوری‌زایی و آلودگی خاک و آب همراه هستند (Naeimi et al., 2023; Toufigh & Ghassemi, 2020; Wang et al., 2024). از این رو، توسعه راهکارهای پایدارتر، کم‌اثرتر بر محیط‌زیست و قابل اجرا در مقیاس میدانی، به‌ویژه برای پهنه‌های وسیع کانون‌های گردوغبار، ضرورتی انکارناپذیر است.

در سال‌های اخیر، فناوری‌های زیستی و زیست‌معدنی‌سازی^۱ به‌عنوان رویکردهایی نوین برای بهسازی خاک و کنترل فرسایش مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از شناخته‌شده‌ترین این روش‌ها «رسوب‌گذاری کربنات القاشده توسط میکروارگانیسم‌ها» یا MICP است که در آن با فعالیت میکروبی (معمولاً باکتری‌های اوره‌آز^۲)، هیدرولیز اوره انجام شده و در حضور

یون کلسیم، کربنات کلسیم^۳ رسوب می‌کند؛ این رسوب می‌تواند موجب چسبندگی بین ذرات، افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری خاک شود (DeJong et al., 2013; Ivanov & Chu, 2008). با وجود کارایی گزارش‌شده برای MICP، چالش‌هایی نظیر حساسیت به شرایط محیطی، پیچیدگی مدیریت زیستی (رشد و بقای میکروبی‌ها)، ریسک گرفتگی منافذ و ملاحظات اجرایی در مقیاس بزرگ سبب شده است که توجه پژوهشگران به رویکردهای جایگزین معطوف شود (Almajed et al., 2020).

در این راستا، «رسوب‌گذاری کربنات القاشده توسط آنزیم^۴» یا EICP به‌عنوان روشی نسبتاً ساده‌تر و قابل کنترل‌تر مطرح شده است. در EICP، به جای استفاده از سلول زنده، از آنزیم اوره‌آز برای کاتالیز هیدرولیز اوره استفاده می‌شود و در نتیجه یون‌های آمونیوم و کربنات تولید می‌گردد؛ سپس در حضور منبع کلسیم، رسوب CaCO_3 تشکیل شده و با ایجاد پیوند بین ذرات خاک یا تشکیل پوسته سطحی^۵، مقاومت خاک افزایش یافته و پتانسیل فرسایش بادی کاهش می‌یابد (Hamdan & Kavazanjian, 2016). حذف نیاز به نگهداری جمعیت میکروبی و امکان کنترل بهتر پارامترهای واکنش از جمله مزیت‌های EICP در مقایسه با MICP گزارش شده است (Arab et al., 2021; Saif et al., 2022).

با این حال، به‌کارگیری گسترده EICP نیز با ملاحظات همراه است. از یک سو، هزینه تأمین آنزیم اوره‌آز تجاری می‌تواند مانعی برای استفاده در مقیاس میدانی باشد (Dilrukshi & Kawasaki, 2016)؛ از سوی دیگر، تولید آمونیوم/آمونیاک در فرآیند هیدرولیز اوره نیازمند مدیریت و ارزیابی محیط زیستی است (Ghasemi et al., 2022). در پاسخ به این چالش‌ها، پژوهش‌ها به سمت استفاده از منابع طبیعی و کم‌هزینه اوره‌آز (به‌ویژه منابع گیاهی مانند برخی دانه‌ها) و نیز بهینه‌سازی فرمولاسیون محلول تزریق/پاشش، شرایط pH و دما، نوع منبع کلسیم و روش اجرا در خاک‌های مختلف حرکت کرده‌اند (Liu et al., 2020). تمرکز بر منابع طبیعی و سازگار با محیط‌زیست، به‌خصوص برای کاربرد در عرصه‌های بیابانی و کانون‌های گردوغبار، می‌تواند همزمان دو هدف «پایداری محیط زیستی» و «امکان‌پذیری اقتصادی» را تقویت کند. با توجه به نیازهای مدیریتی کشور در حوزه مهار کانون‌های بحرانی گردوغبار و نیز رشد سریع ادبیات پژوهشی EICP، هدف این مقاله ارائه یک مرور تحلیلی از: (۱) سازوکارهای

³ CaCO_3 ⁴ EICP (Enzyme-Induced Carbonate Precipitation)⁵ Crust¹ Biomineralization² Urease

خاک‌های مستعد گردوغبار پرداخته‌اند. افزون بر این، مطالعات مرتبط با منابع طبیعی و سازگار با محیط‌زیستِ اوره‌آز نیز بررسی شدند، زیرا یکی از الزامات توسعه این فناوری، امکان‌پذیری اقتصادی و زیست‌محیطی آن در مقیاس میدانی است.

در انتخاب منابع، اولویت با پژوهش‌هایی بود که به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم به یکی از محورهای زیر پرداخته باشند: (۱) سازوکار واکنش EICP و تشکیل رسوب کربنات کلسیم؛ (۲) اثر EICP بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک، به‌ویژه در ارتباط با پایداری سطحی و کاهش فرسایش بادی؛ (۳) مقایسه EICP با روش‌های مشابه مانند MICP؛ (۴) بررسی منابع مختلف اوره‌آز، به ویژه منابع طبیعی و گیاهی؛ و (۵) چالش‌های محیط‌زیستی، اقتصادی و اجرایی در کاربرد میدانی این فناوری.

به‌منظور افزایش شفافیت و قابلیت ردیابی مرور، جست‌وجوی منابع در پایگاه‌های علمی Scopus، Web of Science و Google Scholar انجام شد. جزئیات دقیق پارامترهای جست‌وجو، معیارهای ورود و خروج و خلاصه‌ای از روند غربالگری در (جدول ۱) ارائه شده است.

جدول ۱- پارامترهای جست‌وجو و معیارهای انتخاب مطالعات در مرور منابع.

Table 1. Search Parameters and Study Selection Criteria in the Literature Review.

شرح Description	پارامتر Parameter
Scopus, Web of Science, Google Scholar	پایگاه‌های جست‌وجو Search Databases
رسوب‌گذاری کربنات القاشده توسط آنزیم، زیست‌سیمان‌شدگی، تثبیت خاک، کنترل گردوغبار، فرسایش بادی و اوره‌آز Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP), Biocementation, Soil Stabilization, Dust Control, Wind Erosion, Urease	کلیدواژه‌های اصلی Main Keywords
۲۰۱۰-۲۰۲۵ 2010-2025	بازه زمانی Time Period
عمدتاً انگلیسی، در کنار منابع فارسی مرتبط در صورت ارتباط مستقیم با موضوع Mainly English, along with relevant Persian publications directly related to the topic	زبان منابع Language of Sources
ارتباط مستقیم با سازوکار EICP، منابع اوره‌آز، تثبیت خاک، کنترل گردوغبار یا کاربردهای محیط‌زیستی مرتبط Direct relevance to EICP mechanisms, urease sources, soil stabilization, dust control, or related environmental applications	معیارهای ورود Inclusion Criteria
منابع تکراری، مقالات فاقد داده یا تحلیل مرتبط، مطالعات خارج از موضوع مرور Duplicate records, articles lacking relevant data or analysis, studies outside the review scope	معیارهای خروج Exclusion Criteria
بررسی عنوان و چکیده، سپس ارزیابی متن کامل منابع منتخب Title and abstract screening, followed by full-text evaluation of selected studies	مراحل غربالگری Screening Stages
۵۰ مطالعه کلیدی 50 key studies	تعداد مطالعات نهایی Final Number of Studies
نوع خاک، منبع اوره‌آز، غلظت مواد، روش اعمال، شرایط محیطی، آزمون‌های ارزیابی و نتایج عملکردی Soil type, urease source, chemical concentrations, application method, environmental conditions, evaluation tests, and performance outcomes	داده‌های استخراج‌شده Extracted Data

اصلی EICP و عوامل کنترل‌کننده تشکیل رسوب کربنات کلسیم، (۲) مقایسه کلی EICP و MICP از منظر قابلیت اجرا و پیامدهای محیط زیستی، (۳) منابع مختلف اوره‌آز به‌ویژه منابع طبیعی/گیاهی و ظرفیت آن‌ها برای کاهش هزینه‌ها، (۴) شواهد پژوهشی موجود درباره کاربرد EICP در تثبیت خاک و کنترل فرسایش بادی و (۵) چالش‌ها و شکاف‌های پژوهشی برای توسعه دستورالعمل‌های طراحی و ارزیابی دوام بلندمدت در شرایط واقعی اقلیمی ایران است. انتظار می‌رود جمع‌بندی ارائه‌شده بتواند به جهت‌دهی پژوهش‌های آینده و نیز تصمیم‌سازی در مدیریت سرزمین و کنترل گردوغبار کمک کند.

روش‌شناسی مرور منابع

این مقاله با رویکرد مرور روایتی-تحلیلی و با هدف تبیین ظرفیت فناوری EICP در تثبیت خاک و کنترل گردوغبار تدوین شده است. تمرکز اصلی مرور بر شناسایی و تحلیل مطالعاتی بوده است که به کاربرد EICP در کاهش فرسایش بادی، تشکیل پوسته سطحی مقاوم، بهبود پیوستگی بین ذرات خاک و افزایش پایداری

همچنین، مطالعات کلیدی که پس از غربالگری برای تحلیل نهایی انتخاب شدند، همراه با محورهای اصلی تمرکز هر مطالعه در (جدول ۲) فهرست شده‌اند.

جدول ۲- برخی مطالعات منتخب درباره کاربرد EICP در تثبیت خاک و کنترل گردوغبار.

Table 2. Selected Studies on the Application of EICP in Soil Stabilization and Dust Control.

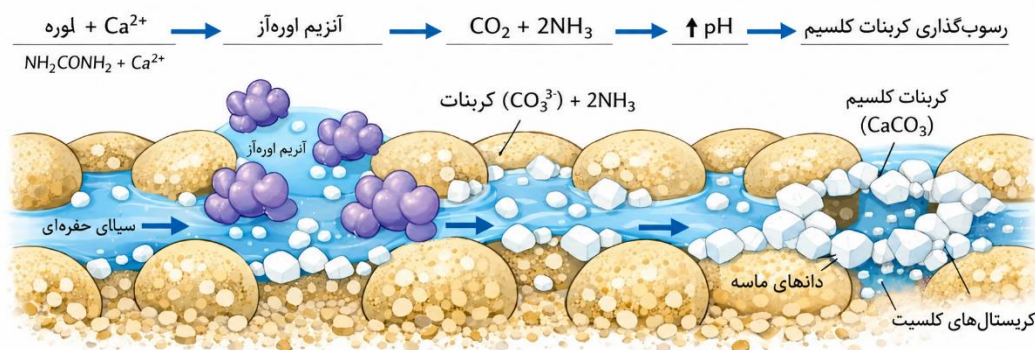
ردیف No.	نویسنده-سال Author-Year	نوع مطالعه Study Type	منبع آورده‌از Urease Source	نوع خاک Soil Type	پارامترهای عملکردی Performance Parameters
1	Hamdan & Kavazanjian, 2016	آزمایشگاهی Laboratory	تجاری Commercial	ماسه Sand	دستیابی به UCS تا ۵۰۰ کیلوپاسکال Achieving UCS up to 500 kPa
2	Guan et al., 2023	آزمایشگاهی Laboratory	گیاهی Plant-based	ماسه Sand	حفظ ۸۵-۹۰ درصد فعالیت آنزیمی نسبت به نمونه تجاری Retaining 85-90% enzyme activity vs. commercial sample
3	Ehsasi et al., 2025	آزمایشگاهی Laboratory	آنزیم خالص Pure Enzyme	ماسه Sand	کاهش ۹۰ درصد در نرخ فرسایش بادی 90% reduction in wind erosion rate
4	Almajed et al., 2020	آزمایشگاهی Laboratory	آنزیم خالص Pure Enzyme	ماسه Sand	افزایش ۳۰-۴۰ درصد در مدول الاستیسیته 30-40-% increase in elastic modulus
5	Cui et al., 2025	آزمایشگاهی Laboratory	آنزیم خالص Pure Enzyme	ماسه Sand	رسوب ۴۰-۶۰ میلی‌گرم کربنات در هر گرم خاک Precipitation of 40-60 mg carbonate per gram of soil
6	Ihsani et al., 2024	آزمایشگاهی Laboratory	گیاهی Plant-based	ماسه Sand	افزایش مقاومت فشاری تا ۱۷۹ کیلوپاسکال Increase in compressive strength up to 179 kPa
7	Li et al., 2025	آزمایشگاهی Laboratory	گیاهی Plant-based	ماسه Sand	کاهش ۸۸ درصد در نرخ فرسایش بادی 88% reduction in wind erosion rate
8	Saif et al., 2022	مروری Review	-	-	مقایسه هزینه: ۲۵ درصد کمتر از پلیمرهای شیمیایی Cost comparison: 25% lower than chemical polymers
9	Liu et al., 2020	مروری Review	-	کلی General	کاهش ۵۰-۷۰ درصد نرخ فرسایش خاک در شرایط میدانی 50-70% reduction in soil erosion rate under field conditions
10	Arab et al., 2021	مروری Review	-	خاک دانه‌ای Granular Soil	بررسی تأثیر اسیدیته (بهینه در ۸/۵) بر راندمان رسوب Investigation of pH effect (optimal at 8.5) on precipitation efficiency

مبانی نظری و سازوکار EICP

فناوری EICP یکی از روش‌های نوین زیست‌معدنی‌سازی برای تثبیت خاک و کاهش فرسایش بادی/گردوغبار است که در آن، به‌جای استفاده از میکروارگانیسم زنده (همانند MICP)، از آنزیم اوره‌آز به‌عنوان کاتالیزور زیستی برای تسریع هیدرولیز اوره استفاده می‌شود (Hamdan & Kavazanjian, 2016). خروجی این

واکنش، تولید یون‌های کربناتی و افزایش قلیائیت محیط است که در حضور یون کلسیم به تشکیل و رسوب کربنات کلسیم منجر می‌شود؛ رسوب حاصل می‌تواند با ایجاد پل‌های معدنی میان دانه‌ها و تشکیل پوسته سطحی، ساختار خاک را پایدارتر کرده و امکان کنده‌شدن و انتقال ذرات توسط باد را کاهش دهد (Hamdan & Kavazanjian, 2016). شکل ۱، نشان دهنده شماتیک فرایند EICP و تشکیل کلسیت است.

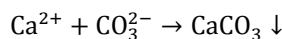
رسوب‌گذاری کربنات کلسیم القاشده توسط آنزیم (EICP)



شکل ۱- شماتیک فرایند EICP و تشکیل کلسیت.

Figure 1. Schematic of the EICP Process and Calcite Formation.

۲. تأمین یون کلسیم (از منبعی مانند CaCl_2 یا $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) و رسوب‌گذاری:



افزایش pH موجب تغییر تعادل گونه‌های کربناتی به سمت گونه‌های مناسب‌تر برای رسوب‌گذاری و در نتیجه افزایش تمایل به تشکیل CaCO_3 می‌شود (Stocks-Fischer et al., 1999). در عمل، شکل غالب گونه‌های کربناتی (CO_3^{2-} در برابر HCO_3^-) و ظرفیت رسوب‌گذاری، به pH و شرایط یونی محیط وابسته است و همین موضوع دلیل اهمیت کنترل pH و قدرت بافری در طراحی فرمولاسیون EICP است (Hamdan & Kavazanjian, 2016).

ج- مراحل مکانیکی-ریز ساختمانی: هسته‌زایی، رشد بلور و سیمان‌زایی

فرآیند رسوب CaCO_3 در محیط متخلخل خاک معمولاً در سه گام مفهومی قابل توصیف است:

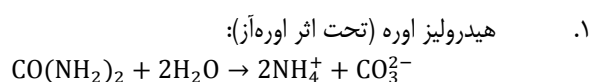
۱. فوق‌اشباع شدن محلول نسبت به کربنات کلسیم؛
 ۲. هسته‌زایی^۲ روی سطوح مناسب؛
 ۳. رشد بلور و ایجاد اتصال بین دانه‌ها.
- محل هسته‌زایی می‌تواند سطح ذرات خاک، نقاط تماس دانه‌ها، سطوح ناهموار، یا حتی نواحی دارای مواد آلی و ذرات ریز باشد؛ این موضوع بر یکنواختی رسوب، نوع اتصال‌ها و در نهایت کارایی تثبیت اثر می‌گذارد (DeJong et al., 2013). با رشد بلورها و کلسیم کربنات می‌تواند به صورت «پل‌های معدنی» بین ذرات عمل کرده و به‌ویژه در خاک‌های دانه‌ای، افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری یا

الف-منطق زیست‌معدنی‌سازی در تثبیت خاک و کنترل گردوغبار

کنترل گردوغبار در کانون‌های بحرانی، بیش از هر چیز به افزایش پایداری لایه سطحی خاک وابسته است؛ زیرا آغاز فرسایش بادی معمولاً با جدا شدن ذرات ریز از سطح و سپس وقوع جهش^۱ و برخورد های پی‌درپی رخ می‌دهد (Middleton, 2019). در این میان، تشکیل یک پوسته سطحی مقاوم یا افزایش پیوستگی و چسبندگی بین ذرات می‌تواند انرژی لازم برای جدا شدن ذرات را افزایش داده و آستانه شروع فرسایش بادی را بالا ببرد (Naeimi et al., 2023). فناوری EICP از طریق تولید و رسوب کلسیت، سازوکاری مشابه سیمان‌زایی در مقیاس ریزدانه ایجاد می‌کند و به همین دلیل در سال‌های اخیر به‌عنوان گزینه‌ای امیدبخش برای تثبیت سطح خاک و کاهش گردوغبار مطرح شده است (Hamdan & Kavazanjian, 2016).

ب- واکنش‌های شیمیایی کلیدی در فرآیند EICP

پایه شیمیایی EICP بر هیدرولیز اوره تحت کاتالیز آنزیم اوره‌آز استوار است. اوره‌آز، اوره را به آمونیوم و کربنات/بی‌کربنات تبدیل می‌کند و هم‌زمان موجب افزایش pH محیط واکنش می‌شود (Hamdan & Kavazanjian, 2016). به صورت ساده‌شده، مسیر واکنش را می‌توان چنین بیان کرد:



² Nucleation

¹ Saltation

با این حال، EICP همچنان به مدیریت سینتیک واکنش، یکنواختی توزیع رسوب و پیامدهای تولید آمونیوم نیاز دارد؛ در نتیجه، طراحی محلول‌ها و روش اعمال (پاشش سطحی، تزریق، یا روش‌های ترکیبی) بخش مهمی از مهندسی این فناوری است. با توجه به مبانی فوق، در ادامه مطالعات منتخب مرتبط با کاربرد EICP در تثبیت خاک و کاهش فرسایش بادی/گردوغبار مرور و مقایسه می‌شوند.

مکانیسم‌های فیزیکی فرسایش بادی و اصلاح آن‌ها توسط EICP

فرسایش بادی زمانی رخ می‌دهد که نیروهای آیرودینامیکی وارد بر ذرات سطحی، به‌ویژه نیروی درگ و لیفت، بر نیروهای مقاوم شامل وزن ذره و چسبندگی بین‌ذره‌ای غلبه کنند (Shao, 2008). از نظر مکانیکی، ذرات درشت‌تر عمدتاً از طریق جهش و خزش سطحی جابه‌جا می‌شوند، در حالی که ذرات بسیار ریز پس از جدا شدن از سطح می‌توانند وارد فاز تعلیق شده و در تشکیل گردوغبار اتمسفری مشارکت کنند (Bagnold, 1941; Shao, 2008).

الف- تحلیل مکانیکی آستانه حرکت ذرات

بر اساس نظریه کلاسیک بگنولد، آغاز حرکت ذرات زمانی رخ می‌دهد که سرعت اصطکاکی باد (u_*) از سرعت اصطکاکی آستانه (u_{*t}) فراتر رود (Bagnold, 1941). با این حال، در خاک‌های ریزدانه، تعیین آستانه حرکت فقط تابع وزن ذره نیست، بلکه نیروهای چسبندگی بین‌ذره‌ای نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. Shao و Lu (۲۰۰۰) نشان دادند که برای ذرات ریز، سهم مؤلفه چسبندگی در تعیین (u_{*t}) به‌طور معناداری افزایش می‌یابد؛ بنابراین هر فرایندی که پیوندهای سطحی و بین‌ذره‌ای را تقویت کند، می‌تواند آستانه فرسایش بادی را افزایش دهد.

به‌صورت مفهومی، این رفتار نشان می‌دهد که در ذرات درشت‌تر، مقاومت در برابر فرسایش عمدتاً تحت کنترل اثر گرانش است، اما در ذرات ریزتر، نیروهای چسبندگی سطحی، از جمله نیروهای فیزیکی و شیمیایی بین ذرات، عامل غالب در کنترل جداشدگی و آغاز حرکت خواهند بود (Shao & Lu, 2000). این تمایز برای تحلیل پاسخ خاک‌های مستعد گردوغبار به روش‌های تثبیت زیستی اهمیت بنیادی دارد.

هدایت هیدرولیکی را به همراه داشته باشد. با این حال، کاهش نفوذپذیری/هدایت هیدرولیکی همواره به‌خودی‌خود یک مزیت محسوب نمی‌شود و باید در چارچوب نوع کاربرد تفسیر شود. در کاربردهای سطحی، مانند کنترل فرسایش بادی و مهار گردوغبار، این کاهش می‌تواند با تقویت پیوستگی سطح و کاهش جداشدگی ذرات مفید باشد؛ اما در برخی کاربردهای ژئوتکنیکی یا در بسترهایی که حفظ تبادل آب، زهکشی، یا عبور کنترل‌شده سیال اهمیت دارد، کاهش بیش‌ازحد آن ممکن است نامطلوب باشد؛ بنابراین، اثر EICP بر نفوذپذیری به نوع و بافت خاک، مقدار و محل رسوب کربنات و هدف مهندسی از بهسازی بستگی دارد و باید به‌صورت موردی ارزیابی شود. همچنین، در لایه سطحی خاک‌های مستعد گردوغبار، شکل‌گیری شبکه‌ای پیوسته‌تر از رسوبات می‌تواند به تشکیل پوسته و افزایش مقاومت سطح در برابر تنش برشی باد کمک کند (Hamdan & Kavazanjian, 2016).

د- فازهای کانی‌شناسی CaCO_3 و اهمیت آن‌ها در عملکرد تثبیت

کربنات کلسیم می‌تواند در فازهای مختلفی نظیر کلسیت^۱، آراگونیت^۲ و وترایت^۳ تشکیل شود. از دیدگاه مهندسی، تفاوت فازها می‌تواند بر پایداری، شکل بلور، چسبندگی و دوام رسوب اثرگذار باشد (Liu et al., 2020). بسیاری از مطالعات، کلسیت را به‌عنوان فاز پایدارتر معرفی می‌کنند و کنترل شرایط واکنش (pH، دما، غلظت‌ها و نسبت یون‌ها) را برای افزایش سهم فاز پایدارتر مهم می‌دانند (Ghasemi et al., 2022). در کاربردهای کنترل گردوغبار، علاوه بر نوع فاز، نحوه توزیع مکانی رسوب (سطحی یا در عمق) و پیوستگی پوسته تشکیل‌شده نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری عملکرد آن دارد (Almajed et al., 2020).

ه- تفاوت مفهومی EICP با MICP و پیامدهای اجرایی

در MICP، فعالیت میکروبی علاوه بر تولید اوره‌آز، با موضوعاتی مانند رشد، زنده‌مانی، نیازهای تغذیه‌ای و حساسیت به شرایط محیطی همراه است؛ بنابراین کنترل فرآیند می‌تواند پیچیده‌تر شود (DeJong et al., 2013). در مقابل، EICP با تکیه بر آنزیم (بدون سلول زنده) از نظر اجرایی در برخی سناریوها قابل کنترل‌تر ارزیابی می‌شود و می‌تواند محدودیت‌های زیستی مرتبط با کشت و تزریق میکروب را کاهش دهد (Dilrukshi & Kawasaki, 2016).

³ Vaterite

¹ Calcite

² Aragonite

بین‌دانه‌ای، افزایش درگیری مکانیکی ذرات و تقویت مقاومت سطحی بروز می‌کند؛ در نتیجه، جابه‌جایی ذرات در اثر باد کاهش می‌یابد. در مقابل، در خاک‌های ریزدانه، نقش اصلی EICP بیشتر در تشکیل پوسته سطحی، کاهش آزادسازی ذرات ریز و افزایش انسجام لایه سطحی ظاهر می‌شود؛ بنابراین، طراحی محلول، مقدار تزریق و روش اجرا باید متناسب با نوع بستر تنظیم شود، زیرا راهبرد مؤثر برای تثبیت ماسه لزوماً با راهبرد مناسب برای کنترل فرسایش در خاک‌های ریزدانه یکسان نیست.

عوامل کلیدی کنترل‌کننده کارایی واکنش

عملکرد EICP تابع برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل شیمیایی، زیستی/آنزیمی، ویژگی‌های خاک و محیط متخلخل و نیز متغیرهای اجرایی (با توجه به جدول ۳) است و نمی‌توان آن را به اثر یک پارامتر منفرد تقلیل داد (Dilrukshi & Kawasaki, 2016). این عوامل به‌طور هم‌زمان بر سینتیک واکنش، نحوه و محل رسوب‌گذاری کربنات کلسیم، یکنواختی تیمار و کارایی نهایی فرایند در تثبیت سطح اثر می‌گذارند (Hamdan & Kavazanjian, 2016). از این‌رو، ارزیابی ظرفیت EICP برای کنترل گردوغبار مستلزم نگاهی یکپارچه به این مؤلفه‌هاست. به بیان دیگر، EICP صرفاً یک واکنش شیمیایی ساده نیست، بلکه سامانه‌ای چندمتغیره و وابسته به شرایط است که در آن تنظیم دقیق پارامترها می‌تواند تفاوت چشمگیری در کیفیت تثبیت خاک، یکپارچگی پیوندهای بین‌دانه‌ای و دوام پوسته سطحی ایجاد کند (Joshi et al., 2026)؛ بنابراین، شناخت عوامل مؤثر بر این فرایند، پیش‌شرط طراحی مؤثر آن برای کاربردهای میدانی، به‌ویژه در کانون‌های بحرانی گردوغبار، به‌شمار می‌رود.

ب- نقش EICP در افزایش مقاومت سطحی و کاهش فرسایش‌پذیری

فناوری EICP از طریق القای رسوب کربنات کلسیم در تماس‌های بین‌ذره‌ای و بر سطح خاک، موجب افزایش چسبندگی ظاهری، انسجام سطحی و مقاومت لایه در معرض باد می‌شود. این فرایند بسته به بافت خاک و توزیع اندازه ذرات، می‌تواند به دو شکل اصلی بروز کند: ایجاد پیوندهای معدنی بین ذرات در خاک‌های دانه‌ای و تشکیل پوسته سطحی نسبتاً پیوسته در خاک‌های مستعد تولید گردوغبار (Hamdan & Kavazanjian, 2016; Almajed et al., 2018).

در خاک‌های ماسه‌ای و تپه‌های شنی، رسوب کربنات کلسیم در نواحی تماس و گلوله‌های حفره‌ای می‌تواند درگیری مکانیکی ذرات را افزایش داده و جدایش آن‌ها تحت تنش برشی باد را دشوارتر کند. در نتیجه، نه تنها تحرک ذرات سطحی کاهش می‌یابد، بلکه آستانه لازم برای شروع جهش نیز افزایش پیدا می‌کند. از این منظر، EICP مانند یک مکانیسم تقویت‌کننده پیوندهای بین‌دانه‌ای عمل می‌کند که مقاومت مکانیکی لایه سطحی را در برابر برداشت بادی ارتقا می‌دهد.

در مقابل، در خاک‌های ریزدانه و کانون‌های گردوغبار، اثر غالب EICP بیشتر به‌صورت تشکیل یک پوسته سطحی منسجم ظاهر می‌شود. این پوسته می‌تواند خروج ذرات ریز از سطح خاک را محدود کرده، پیوستگی ساختار سطحی را افزایش دهد و ظرفیت جداسازی ذرات تحت اثر تنش‌های برشی باد را کاهش دهد. نتایج پیشین (Hamdan & Kavazanjian, 2016) نشان دادند که EICP در کاربردهای کنترل گردوغبار می‌تواند از طریق همین سازوکار، آزادسازی ذرات قابل تعلیق را به‌طور مؤثر محدود کند؛ بنابراین، در ریزدانه‌ها، عملکرد EICP صرفاً به افزایش مقاومت نقطه‌ای بین ذرات محدود نیست، بلکه به تغییر کل رفتار سطحی خاک از یک بستر فرسایش‌پذیر به یک سطح crusted و مقاوم منجر می‌شود.

ج- تفاوت مکانیزم عملکرد در خاک درشت دانه و ریزدانه

مکانیزم عملکرد EICP در خاک‌های درشت دانه و ریزدانه یکسان نیست و به بافت خاک، اندازه ذرات و نحوه توزیع رسوب کربنات کلسیم بستگی دارد. در ماسه و توده‌های شنی، عملکرد اصلی EICP بیشتر از طریق ایجاد پیوند در نقاط تماس

جدول ۳- پارامترهای کنترل‌کننده در EICP و اثر آن‌ها بر کنترل گردوغبار.
Table 3. Controlling Parameters in EICP and Their Effects on Dust Control.

ردیف Row	عامل Factor	نقش/مکانیسم اصلی در EICP Main role/mechanism in EICP	اثر بر کنترل گردوغبار و پوسته سطحی Effect on dust control and surface crust	بازه/مقدار بهینه Optimal range/value	ملاحظه اجرایی در میدان Field operational note	منابع References
1	دما Temperature	تنظیم فعالیت اوره‌آز و نرخ رسوب CaCO_3 Regulating urease activity and CaCO_3 precipitation rate	دمای پایین باعث کندی واکنش و دمای بالا باعث ناپایداری آنزیم می‌شود Low temp slows reaction; high temp reduces enzyme stability	مقدار دقیقی در فایل‌ها نیست؛ دمای معتدل توصیه می‌شود No specific value; moderate temp is recommended	در اقلیم‌های گرم، دما هم محرک و هم محدودکننده است In hot climates, temp is both a driver and a limiter	Joshi et al., 2026
2	pH محیط pH level	کنترل تعادل گونه‌های کربناتی Controlling carbonate species balance	pH نامناسب باعث کاهش راندمان یا تشکیل فازهای نامطلوب می‌شود Unsuitable pH reduces efficiency or forms undesirable phases	خنثی تا قلیایی ملایم ($\text{pH} > 7$) Neutral to mild ($\text{pH} < 7$) alkaline	پایش pH برای تشکیل crust پایدار ضروری است pH monitoring is essential for stable crust formation	Almajed et al., 2018; Putra et al., 2020
3	غلظت اوره و کلسیم Urea & Calcium	تعیین میزان فوق‌اشباع Determining supersaturation	غلظت زیاد باعث clogging و غلظت کم باعث رسوب ناکافی می‌شود High conc. leads to clogging; low conc. causes insufficient precipitation	بازه ۰٫۳ تا ۰٫۵ مولار ۰٫۳ - ۰٫۵M range	تعادل بین مقدار رسوب، یکنواختی و نفوذپذیری مهم است Balance between precipitation, uniformity, and permeability is key	Almajed et al., 2018; Gao et al., 2019
4	فعالیت اوره‌آز Urease activity	تعیین سرعت هیدرولیز اوره Determining urea hydrolysis rate	فعالیت زیاد باعث انسداد سطحی و فعالیت کم باعث تثبیت ناکافی می‌شود High activity causes surface clogging; low activity leads to insufficient stabilization	بازه ۰٫۵ تا ۵ واحد بر میلی‌لیتر (U/mL) U/mL range ۵ - ۰٫۵	منبع آنزیم باید با رفتار خاک واقعی سازگار باشد Enzyme source must be compatible with real soil behavior	Putra et al., 2020; Almajed et al., 2020
5	نوع و بافت خاک Soil type/texture	کنترل نفوذ و تشکیل پل‌های معدنی Controlling infiltration and mineral bridge formation	خاک‌های ریزدانه ممکن است توزیع رسوب را مختل کنند Fine-grained soils may disrupt precipitation distribution	وابسته به توزیع اندازه ذرات و نفوذپذیری Depends on particle size distribution and permeability	راهبرد اعمال باید با بافت خاک هماهنگ شود Application strategy must match soil texture	Joshi et al., 2026
6	روش اعمال Application method	تعیین الگوی انتقال محلول Determining solution transmission pattern	پاشش سطحی ساده‌تر است اما ممکن است موجب تجمع سطحی شود Surface spraying is easier but may cause surface accumulation	پاشش سطحی و عمل‌آوری در دمای محیط Surface spraying and ambient temp curing	توازن بین سهولت اجرا و یکنواختی توزیع Balance between ease of execution and distribution uniformity	Xiao et al., 2025; & Hamdan Kavazanjian, 2016; Moghal et al., 2020
7	رطوبت Moisture	تأمین فاز آبی برای واکنش Providing aqueous phase for reaction	خشکی شدید باعث رسوب زودرس و ناهمگنی می‌شود Severe drought causes premature precipitation and heterogeneity	رطوبت کافی برای تداوم واکنش Sufficient moisture for reaction continuity	پایداری در برابر خشک‌شدن و تغییرات اقلیمی مهم است Stability against drying and climate changes is important	Almajed et al., 2020

* مقادیر ارائه‌شده در این جدول، بازه‌های متداول گزارش‌شده در ادبیات فنی برای دستیابی به تثبیت کارآمد هستند. با این حال، این مقادیر به نوع خاک، کانی‌شناسی، pH ذاتی، ترکیب محلول، روش اعمال و شرایط محیطی وابسته‌اند و نباید به‌عنوان مقادیر جهان‌شمول تفسیر شوند. از این‌رو، برای پروژه‌های میدانی در کانون‌های بحرانی گردوغبار، انجام یک مرحله بهینه‌سازی مقدماتی (bench-scale optimization) با استفاده از نمونه خاک واقعی منطقه، پیش از اجرای مقیاس کامل، ضروری است.

واکنشی، زیستی، بافتی و محیطی است. در میان این عوامل، دما، pH، غلظت واکنش‌دهنده‌ها، فعالیت اوره‌آز، ویژگی‌های خاک، روش

همان‌گونه که در (جدول ۳) ارائه شده است، عملکرد EICP در کنترل گردوغبار تابع برهم‌کنش هم‌زمان چندین عامل

اقتصادی پروژه را تضعیف کند (Martin et al., 2021). دوم آنکه پایداری فعالیت آنزیم در شرایط محیطی متغیر، از جمله دمای بالا، تابش شدید و نوسانات رطوبتی که در بسیاری از مناطق گردوغبارخیز رایج‌اند، همواره مطلوب نیست؛ بنابراین، اگرچه آنزیم تجاری برای استانداردسازی و پژوهش پایه اهمیت بالایی دارد، اما برای توسعه راهکارهای وسیع‌مقیاس و کم‌هزینه، جست‌وجوی منابع جایگزین ضروری به نظر می‌رسد.

ب- منابع میکروبی: پیوند مفهومی با MICP و محدودیت‌های عملیاتی

منابع میکروبی اوره‌آز، اگرچه بیشتر در قالب فناوری MICP شناخته می‌شوند، از نظر مفهومی در توسعه برخی سامانه‌های آنزیمی نیز اهمیت دارند؛ زیرا پایه زیستی هیدرولیز اوره را تشکیل می‌دهند (Chu et al., 2014). در این رویکرد، فعالیت آنزیمی وابسته به حضور یا استخراج از میکروارگانیسم‌های مولد اوره‌آز است (Hoang et al., 2019). مزیت اصلی این سامانه‌ها، امکان تولید درجا یا بهره‌گیری از سامانه‌های زیستی با ظرفیت بالای فعالیت اوره‌آزی است. با این حال، در کاربردهای میدانی مرتبط با کنترل گردوغبار، رویکردهای مبتنی بر میکروب با موانعی مانند حساسیت به شرایط محیطی، نیاز به حفظ زنده‌مانی، وابستگی به مواد مغذی و پیچیدگی‌های اجرایی مواجه هستند (Almajed et al., 2020).

از دیدگاه اجرایی، یکی از تفاوت‌های اصلی میان MICP و EICP در همین نکته نهفته است که EICP می‌کوشد کارکرد آنزیمی را از الزامات زیستی سلول زنده جدا کند. این جداسازی، به‌ویژه در خاک‌های سطحی خشک و ناپایدار که شرایط مطلوبی برای فعالیت میکروبی پایدار ندارند، یک مزیت مهم به‌شمار می‌رود. در نتیجه، اگر هدف اصلی تثبیت سریع سطح خاک و کاهش گردوغبار باشد، سامانه‌های مبتنی بر آنزیم استخراجی یا طبیعی، در بسیاری از موارد عملی‌تر از سامانه‌های میکروبی کامل ارزیابی می‌شوند.

ج- منابع گیاهی اوره‌آز: گزینه‌ای امیدبخش برای کاربردهای وسیع‌مقیاس

در سال‌های اخیر، توجه فزاینده‌ای به استفاده از منابع گیاهی اوره‌آز در فناوری EICP معطوف شده است. عصاره‌های گیاهی حاوی اوره‌آز، از موادی مانند سویا، لوبیای شمشیری، خربزه، هندوانه و برخی دانه‌ها و گیاهان بومی قابل استخراج‌اند و می‌توانند

اعمال و رطوبت محیط بیشترین تأثیر را بر سرعت رسوب‌گذاری، یکنواختی تشکیل پوسته سطحی و دوام عملکرد دارند؛ بنابراین، طراحی کاربرد میدانی EICP باید بر پایه تنظیم هم‌زمان این پارامترها و نه صرفاً بهینه‌سازی یک متغیر منفرد، انجام شود.

منابع اوره‌آز در فناوری EICP و جایگاه منابع گیاهی در تثبیت خاک و کنترل گردوغبار

یکی از مؤلفه‌های بنیادی در کارایی فناوری EICP، منبع آنزیم اوره‌آز است؛ زیرا منشأ آنزیم نه تنها بر سرعت هیدرولیز اوره و راندمان رسوب‌گذاری کربنات کلسیم اثر می‌گذارد، بلکه از نظر هزینه، دسترسی‌پذیری، پایداری، ملاحظات محیط زیستی و امکان کاربرد در مقیاس وسیع نیز تعیین‌کننده است. در کاربردهایی مانند کنترل گردوغبار در کانون‌های بحرانی که معمولاً نیازمند پوشش سطوح وسیع، سادگی اجرا، هزینه پایین و حداقل‌سازی اثرات جانبی محیطی هستند، انتخاب منبع مناسب اوره‌آز حتی از کاربردهای ژئوتکنیکی متعارف نیز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. از این منظر، منابع اوره‌آز را می‌توان به‌طور کلی در سه دسته اصلی بررسی کرد: منابع تجاری خالص یا نیمه‌خالص، منابع میکروبی و منابع طبیعی به‌ویژه گیاهی.

الف- اوره‌آز تجاری: مزیت کنترل‌پذیری، محدودیت هزینه

در بسیاری از مطالعات اولیه EICP، از اوره‌آز تجاری، غالباً استخراج‌شده از دانه‌های لوبیای شمشیری^۱، استفاده شده است؛ زیرا این نوع آنزیم از فعالیت شناخته‌شده، خلوص نسبتاً بالا و قابلیت تکرارپذیری مناسب برخوردار است و برای مطالعات بنیادی و آزمایشگاهی گزینه‌ای مناسب به‌شمار می‌رود. استفاده از آنزیم تجاری امکان کنترل بهتر متغیرهای واکنش را فراهم می‌کند و به پژوهشگر اجازه می‌دهد اثر عوامل دیگر مانند غلظت اوره، منبع کلسیم، pH و شرایط عمل‌آوری را با مداخله کمتر از سوی ناخالصی‌های طبیعی بررسی کند.

با وجود این مزایا، اتکای کامل به اوره‌آز تجاری در کاربردهای میدانی، به‌ویژه برای تثبیت سطح خاک در وسعت‌های زیاد، با چالش‌هایی جدی همراه است. نخست آنکه هزینه تهیه و مصرف آنزیم تجاری در مقیاس وسیع می‌تواند بالا باشد و توجه

¹ Jack bean

بدون نیاز به فرآیندهای پیچیده تخلیص، فعالیت آنزیمی کافی برای القای هیدرولیز اوره و رسوب CaCO_3 فراهم کنند (Dilrukshi & Kawasaki, 2016; Raymond et al., 2019; Lee & Kim, 2020). اهمیت این گروه از منابع در آن است که از یک سو به طور بالقوه کم‌هزینه‌تر و در دسترس‌تر از آنزیم‌های تجاری هستند و از سوی دیگر، با چارچوب توسعه فناوری‌های سازگار با محیط‌زیست همخوانی بیشتری دارند.

برای کاربرد در کنترل گردوغبار، منابع گیاهی چند مزیت برجسته دارند. نخست، امکان تأمین آن‌ها از منابع کشاورزی یا بقایای زیستی می‌تواند هزینه ماده اولیه را کاهش دهد و وابستگی به محصولات تجاری خاص را کم کند. دوم، فرآوری ساده‌تر این منابع، امکان آماده‌سازی محلول‌های EICP را در مقیاس نیمه‌صنعتی و میدانی افزایش می‌دهد. سوم، استفاده از منابع طبیعی در پروژه‌های تثبیت خاک در محیط‌های حساس، از منظر پذیرش محیط‌زیستی و اجتماعی نیز می‌تواند مطلوب‌تر باشد (Moghal et al., 2020). به‌ویژه در کشورهایی مانند ایران که هم با بحران گردوغبار و هم با محدودیت منابع مالی برای تثبیت وسیع عرصه‌های بحرانی مواجه‌اند، این ویژگی‌ها اهمیت راهبردی پیدا می‌کنند.

با این حال، باید توجه داشت که منابع گیاهی معمولاً نسبت به آنزیم‌های تجاری ناهمگنی بیشتری دارند. ترکیب شیمیایی عصاره‌های گیاهی می‌تواند بسته به رقم گیاه، شرایط کشت، زمان برداشت، روش نگهداری و شیوه استخراج تغییر کند؛ در نتیجه، تکرارپذیری نتایج ممکن است کاهش یابد. افزون بر این، وجود ترکیبات همراه در عصاره‌های خام می‌تواند هم اثرات مثبت، مانند کمک به هسته‌زایی یا چسبندگی و هم اثرات منفی، مانند اختلال در انتقال محلول یا تغییر سینتیک واکنش، ایجاد کند؛ بنابراین، اگرچه منابع گیاهی بسیار امیدبخش‌اند، توسعه آن‌ها برای کاربرد حرفه‌ای نیازمند استانداردسازی نسبی فرآیند استخراج و ارزیابی فعالیت آنزیمی است (Almajed et al., 2020; Moghal et al., 2020). از منظر مهندسی کنترل گردوغبار، هدف صرفاً افزایش مقاومت خاک نیست، بلکه دستیابی به ترکیبی از ویژگی‌ها مدنظر است: ایجاد پوسته سطحی مؤثر، حفظ دوام در برابر چرخه‌های خشک و مرطوب، قابلیت اجرا در وسعت زیاد، هزینه قابل قبول و حداقل‌سازی اثرات محیطی. منابع گیاهی اوره‌آز در این چارچوب، یک گزینه راهبردی محسوب می‌شوند؛ زیرا می‌توانند بستر توسعه فرمولاسیون‌هایی را فراهم کنند که هم از نظر اقتصادی برای عرصه‌های بزرگ امکان‌پذیر باشند و هم با الزامات محیط زیستی سازگاری بیشتری داشته باشند.

افزون بر این، در مناطق خشک و نیمه‌خشک که کانون‌های گردوغبار عمدتاً در آن‌ها قرار دارند، استفاده از مصالح و ترکیباتی که نیازمند زیرساخت پیچیده، زنجیره تأمین تخصصی یا فناوری پرهزینه نباشند، یک مزیت تعیین‌کننده است. در چنین بستری، منابع گیاهی نه فقط یک جایگزین آزمایشگاهی، بلکه مسیر انتقال EICP از آزمایشگاه به میدان تلقی می‌شوند. به بیان دیگر، اگر EICP بخواهد از سطح یک فناوری جدی و جایگزین به یک راهکار اجرایی برای مدیریت گردوغبار تبدیل شود، منابع طبیعی و به‌ویژه گیاهی احتمالاً نقش محوری در این گذار ایفا خواهند کرد.

د- محدودیت‌ها و الزامات پژوهشی در استفاده از منابع گیاهی

با وجود مزایای قابل توجه، استفاده از منابع گیاهی اوره‌آز با چند چالش اساسی همراه است. نخست، لازم است فعالیت اوره‌آزی هر منبع به‌صورت کمی اندازه‌گیری و با عملکرد واقعی رسوب‌گذاری مرتبط شود (Saif et al., 2022)؛ زیرا صرف منشأ گیاهی بودن، تضمینی برای کارایی کافی نیست. دوم، باید پایداری عصاره در زمان نگهداری، حساسیت آن به دما و شرایط محیطی و تغییرپذیری بین دسته‌های مختلف ماده اولیه بررسی شود. سوم، از آنجا که کاربرد نهایی در کنترل گردوغبار است، ارزیابی منابع گیاهی نباید تنها به آزمون‌های مقاومت محدود شود، بلکه باید شاخص‌هایی مانند مقاومت به فرسایش بادی، دوام پوسته سطحی، رفتار در برابر چرخه‌های تر و خشک و احتمال ترک‌خوردگی سطحی نیز در نظر گرفته شوند (Ehsasi et al., 2025).

از منظر توسعه دانش، یکی از خلأهای مهم آن است که بسیاری از مطالعات موجود هنوز در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده‌اند و داده‌های کافی درباره عملکرد بلندمدت عصاره‌های گیاهی در شرایط واقعی میدان محدود است. همچنین هنوز روشن نیست که کدام منابع گیاهی، تحت چه شرایطی، برای چه نوع خاکی و با چه فرمولاسیونی بهترین عملکرد را ارائه می‌دهند؛ بنابراین، هرچند ادبیات موجود به‌وضوح از پتانسیل بالای این منابع حمایت می‌کند، تبدیل این پتانسیل به دستورالعمل اجرایی مستلزم پژوهش‌های نظام‌مندتر و میدانی‌تر است.

کاربردهای EICP در تثبیت خاک و کنترل گردوغبار

الف- کاربرد ژئوتکنیکی

فناوری EICP در سال‌های اخیر از یک ایده آزمایشگاهی صرف، به یکی از گزینه‌های جدی در حوزه بهسازی زیستی خاک

سطحی، پیوستگی پوسته و پایداری در برابر تنش باد نیز ارزیابی شوند. هنگامی که رسوب‌گذاری به‌صورت یکنواخت و در عمق مناسب رخ دهد، امکان تشکیل پوسته‌ای مقاوم و پایدار فراهم می‌شود (Naeimi et al., 2023) که در برابر تنش باد، خشک‌شدن مجدد و نوسانات محیطی مقاومت بیشتری دارد. در مقابل، اگر رسوب‌گذاری به نواحی محدود یا لایه‌ای بسیار سطحی منحصر شود، پوسته‌ای شکننده و کم‌دوام شکل می‌گیرد که ممکن است تحت چرخه‌های محیطی یا بارگذاری آیرودینامیکی به‌سرعت تخریب شود. جدول ۴، کاربردهای EICP در تثبیت خاک و کنترل گردوغبار، با تأکید بر تغییرات القاشده در خواص خاک و پیامدهای آن برای مدیریت گردوغبار را ارائه می‌کند.

تبدیل شده است. علت این توجه فزاینده آن است که EICP می‌تواند بدون اتکا به سیمان‌زایی پرکربن یا پایدارسازهای شیمیایی متعارف، از طریق تشکیل کربنات کلسیم در محیط خاک، پیوستگی بین ذرات را افزایش داده و رفتار مکانیکی و هیدرولیکی خاک را اصلاح کند. مطالعات نشان داده‌اند که رسوب CaCO_3 در منافذ و بین دانه‌های خاک می‌تواند به افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری^۱، کاهش نفوذپذیری، افزایش زاویه اصطکاک داخلی و کاهش فرسایش‌پذیری سطحی منجر شود (Chandra & Ravi, 2020; Nafisi et al., 2020; Ahenkorah et al., 2019). بر اساس گزارش‌های موجود، افزایش مقاومت می‌تواند در برخی موارد تا چند برابر مقدار اولیه باشد و در عین حال، نرخ فرسایش سطحی به‌طور معناداری کاهش یابد.

ب- کنترل گردوغبار

در مسئله کنترل گردوغبار، هدف نهایی صرفاً افزایش مقاومت مکانیکی نیست، بلکه جلوگیری از جداشدن ذرات ریز از سطح خاک و مهار آغاز فرایند فرسایش بادی است (Shao et al., 2020; Chandra & Ravi, 2011). بر این اساس، عوامل مؤثر بر EICP باید نه فقط از منظر آزمایشگاهی، بلکه از دیدگاه عملکرد

جدول ۴- کاربردهای EICP در تثبیت خاک و کنترل گردوغبار، با تأکید بر تغییرات القاشده در خواص خاک و پیامدهای آن برای مدیریت گردوغبار

Table 4. Applications of EICP in Soil Stabilization and Dust Control, with Emphasis on EICP-Induced Changes in Soil Properties and Their Implications for Dust Management.

ردیف Row	کاربرد Application	سازوکار اصلاح خاک Soil improvement mechanism	پیامد/شاخص عملکرد Performance index	نتیجه مرتبط با گردوغبار Dust-related result	منابع References
1	کنترل گردوغبار Dust control	تشکیل پوسته سطحی Surface crust formation	شار جرمی گردوغبار Dust mass flux	کاهش ۷۰ تا ۹۰ درصدی 70-90% reduction	Zhang et al., 2026; Ehsasi et al., 2025
2	تثبیت سطحی Surface stabilization	افزایش انسجام ذرات Increasing particle cohesion	افزایش مقاومت در برابر فرسایش بادی Increase resistance to wind erosion	افزایش آستانه فرسایش Increasing erosion threshold	Hamdan & Kavazanjian, 2016
3	اقلیم‌های سخت Harsh climates	پایداری در دمای بالا و شوری Stability at high temp and salinity	پایداری در شرایط بیابانی Desert condition stability	مناسب برای مناطق مستعد گردوغبار Suitable for dust-prone regions	Li et al., 2025
4	کاهش هزینه Cost reduction	استفاده از منابع گیاهی اوره‌آز Using plant-based urease	کاهش هزینه عملیاتی Reducing operational cost	تسهیل توسعه در مقیاس وسیع Facilitating large-scale development	Guan et al., 2023
5	تثبیت ترکیبی Hybrid stabilization	هم‌افزایی با مواد زیستی Synergy with bio-materials	افزایش دوام پوسته Increasing crust durability	بهبود ماندگاری کنترل گردوغبار Improving dust control longevity	Ihsani et al., 2024; Li et al., 2025; Xu et al., 2025

¹ Unconfined compressive strength (UCS)

چالش‌ها، محدودیت‌ها و شکاف‌های پژوهشی در کنترل گردوغبار

الف- چالش‌ها

با وجود آن که فناوری EICP در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از رویکردهای امیدبخش برای تثبیت خاک و کاهش فرسایش بادی مطرح شده است، توسعه آن برای کاربرد وسیع در کانون‌های گردوغبار همچنان با محدودیت‌های مهمی مواجه است. با توجه به جدول ۵، مطالعات نشان می‌دهند که عملکرد این فناوری به‌شدت به شرایط شیمیایی، زیستی و محیطی وابسته است و همین وابستگی، انتقال آن از مقیاس آزمایشگاهی به مقیاس میدانی را با عدم قطعیت همراه می‌سازد.

ج- کاربرد در تثبیت موقت یا نیمه‌پایدار سطوح بحرانی
در بسیاری از سناریوهای مدیریت گردوغبار، هدف لزوماً ایجاد یک تثبیت دائمی و بسیار سخت نیست، بلکه گاهی تثبیت موقت یا نیمه‌پایدار برای عبور از یک دوره بحرانی، مثلاً فصل بادخیز، دوره خشکسالی، یا مرحله استقرار پوشش گیاهی، کفایت می‌کند. EICP در چنین شرایطی نیز می‌تواند کاربرد داشته باشد. اگر فرمولاسیون و روش اجرا به‌درستی انتخاب شود، لایه تثبیت‌شده ممکن است از چند ماه تا بازه‌های طولانی‌تر، عملکرد قابل قبولی در کاهش کنده‌شدن ذرات ارائه دهد. این ویژگی برای برنامه‌های مدیریت تطبیقی گردوغبار اهمیت دارد، زیرا امکان ترکیب EICP با سایر راهکارها مانند مالچ‌های زیستی، اصلاح پوشش گیاهی یا مدیریت رطوبت را فراهم می‌سازد.

د- امکان ترکیب EICP با سایر راهبردهای تثبیت

یکی دیگر از کاربردهای مهم و آینده‌دار EICP، استفاده از آن در قالب رویکردهای ترکیبی است. در این حالت، EICP می‌تواند همراه با مواد طبیعی، پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر، فیبرهای گیاهی، یا راهبردهای احیای پوشش گیاهی به‌کار رود تا هم پایداری اولیه سطح خاک را افزایش دهد و هم دوام بلندمدت بهبود یابد (Xu et al., 2025; Ihsani et al., 2024; Li et al., 2025). به‌ویژه در عرصه‌های گردوغبارخیز، ترکیب EICP با مواد آلی یا زیستی ممکن است مزیت دوگانه‌ای ایجاد کند: از یک‌سو پوسته اولیه برای کاهش فرسایش ایجاد می‌شود و از سوی دیگر، زمینه برای تثبیت پایدارتر از طریق فرایندهای اکولوژیک فراهم می‌شود. این مسیر، از نظر توسعه کاربردی، یکی از امیدوارکننده‌ترین افق‌های پژوهش به‌شمار می‌رود.

جدول ۵- محدودیت‌ها و چالش‌های کلیدی فناوری EICP در کنترل گردوغبار.

Table 5. Key Limitations and Challenges of EICP Technology in Dust Control.

ردیف Row	محور چالشی Challenge axis	شرح فنی مسئله Technical description	پیامد در کنترل گردوغبار Impact on dust control	منابع References
1	حساسیت محیطی Environmental sensitivity	وابستگی سینتیک به pH، دما و غلظت Dependence of kinetics on pH, temp, and concentration	کاهش تکرارپذیری عملکرد Reduced performance reproducibility	Joshi et al., 2026
2	عدم یکنواختی Non-uniformity	تمرکز رسوب به دلیل واکنش سریع Precipitation concentration due to fast reaction	ایجاد پوسته گسسته و ضعیف Formation of discontinuous/weak crust	Chandra & Ravi, 2020
3	انسداد منافذ Pore clogging	رسوب نزدیک محل اعمال Precipitation near application point	تثبیت کم عمق و شکنندگی پوسته Shallow stabilization and crust brittleness	Arab et al., 2021
4	محصولات جانبی Byproducts	تولید آمونیوم Ammonium production	محدودیت‌های محیط زیستی Environmental restrictions	Raymond et al., 2019
5	افزایش شوری Salinity increase	افزایش بار یونی با کلرید کلسیم Ion loading with CaCl ₂	ریسک پوسته‌های نمکی ناپایدار Risk of unstable salt crusts	Almajed et al., 2020; Cui et al., 2025
6	کمبود داده دوام Durability data	کمبود پایش میدانی بلندمدت Lack of long-term field monitoring	نامشخص بودن عمر سرویس Uncertainty in service life	Almajed et al., 2020
7	چالش منبع آنزیم Enzyme source challenge	هزینه بالای تجاری و نوسان منابع گیاهی High commercial cost and plant source fluctuation	دشواری استانداردسازی اجرا Difficulty in execution standardization	Dilrukshi & Kawasaki, 2016
8	محدودیت مدل‌سازی Modeling limits	کمبود مدل‌های یکپارچه واکنش-انتقال Lack of integrated reaction-transport models	دشواری در پیش‌بینی و طراحی Difficulty in prediction and design	Saif et al., 2022

2020). افزون بر این، بسیاری از شواهد موجود هنوز از مقیاس آزمایشگاهی یا نیمه‌میدانی حاصل شده‌اند و داده‌های بلندمدت در شرایط واقعی اقلیمی محدود است؛ بنابراین، هرچند کاربردهای بالقوه EICP روشن و امیدوارکننده‌اند، اما گذار از مرحله پژوهش به اجرا نیازمند ارزیابی میدانی، استانداردسازی و تحلیل هزینه-فایده دقیق است.

ج- مدیریت محصولات جانبی واکنش

در کنار مزایای تثبیت خاک با EICP، مدیریت محصولات جانبی حاصل از هیدرولیز اوره نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. مهم‌ترین محصول جانبی این فرایند، یون آمونیوم است که در صورت تجمع می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوبی ایجاد کند و محدودیت‌هایی برای کاربرد میدانی فناوری به همراه داشته باشد (Hamdan & Kavazanjian, 2016; Ghasemi et al., 2022). برای کاهش این اثرات، استفاده از ژئولیت (Naeimi et al., 2026) به‌عنوان جاذب و تبادل‌گر یونی، بیوجار به‌عنوان ماده جاذب با تخلخل بالا و همچنین راهکارهای زیستی مبتنی بر گیاهان برای جذب یا تثبیت نیتروژن (Naeimi et

al., 2020) ارزیابی چالش‌های موجود با توجه به (جدول ۵)، نشان می‌دهد که گذار فناوری EICP از مقیاس آزمایشگاهی به کاربرد عملی در کانون‌های گردوغبار، با محدودیت‌های فنی و عملیاتی متعددی روبه‌رو است. مطابق با جدول ۵، این چالش‌ها در چهار دسته کلی شامل حساسیت‌های فرآیندی (فرمولاسیون و شرایط اقلیمی)، محدودیت‌های فیزیکی (یکنواختی و عمق تثبیت)، ملاحظات محیط زیستی (محصولات جانبی و شوری) و شکاف‌های دانشی (دوام بلندمدت و مدل‌سازی) طبقه‌بندی می‌شوند. شناخت دقیق این محدودیت‌ها نه تنها برای تفسیر صحیح نتایج مطالعات فعلی، بلکه برای تدوین استانداردهای طراحی و پروتکل‌های اجرایی در پروژه‌های تثبیت خاک در مقیاس وسیع ضرورت دارد.

ب- محدودیت‌های کاربردی در میدان

با وجود ظرفیت‌های قابل توجه، کاربرد میدانی EICP هنوز با چالش‌هایی روبه‌رو است. مهم‌ترین آن‌ها شامل توزیع یکنواخت محلول در سطح، کنترل سرعت واکنش، دوام پوسته در برابر بارش و چرخه‌های تر و خشک و مدیریت محصولات جانبی مانند آمونیوم است (Almajed et al., 2020; Moghal et al.,

محور توسعه آینده EICP تبدیل شوند. با این حال، بهره‌برداری مؤثر از این ظرفیت، مستلزم استانداردسازی، کنترل کیفیت و ارزیابی نظام‌مند عملکرد آن‌هاست؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که EICP در وضعیت کنونی یک فناوری در حال بلوغ است که پتانسیل بالایی برای استفاده در مدیریت گردوغبار دارد، اما تحقق این پتانسیل به تکمیل دانش فنی، آزمون‌های میدانی و توسعه چارچوب‌های اجرایی وابسته است.

پیشنهادهای

با توجه به نتایج این مرور، پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده بر طراحی آزمون‌های میدانی بلندمدت، توسعه منابع ارزان و پایدار اوره‌آز، کاهش پیامدهای محیط زیستی واکنش و بهینه‌سازی فرمولاسیون برای خاک‌ها و اقلیم‌های مختلف متمرکز شوند. همچنین، تدوین شاخص‌های استاندارد برای ارزیابی عملکرد و بررسی امکان تلفیق EICP با سایر روش‌های زیستی و اکولوژیک می‌تواند مسیر کاربردپذیری این فناوری را هموارتر سازد.

تشکر و قدردانی

این اثر برگرفته از بخشی از پروژه تحقیقاتی با حمایت بنیاد ملی علم ایران با کد طرح ۴۰۴۶۷۹۱ با عنوان «بهبود پارامترهای مقاومتی خاک کانون‌های بحرانی گرد و غبار با استفاده از مواد طبیعی و سازگار با محیط‌زیست» است.

al., 2023)، از جمله گزینه‌های مؤثر به شمار می‌روند. به‌کارگیری این رویکردهای مکمل می‌تواند به ارتقای پایداری زیست‌محیطی و افزایش قابلیت اجرای فناوری EICP در مقیاس واقعی کمک کند.

د- شکاف‌های پژوهشی اولویت‌دار

بر پایه مرور منابع، مهم‌ترین شکاف‌های پژوهشی در توسعه EICP برای کنترل گردوغبار را می‌توان در چند محور خلاصه کرد:

۱. بهینه‌سازی فرمولاسیون برای خاک‌های مختلف و شرایط اقلیمی متفاوت؛
۲. ارزیابی میدانی بلندمدت دوام و عملکرد پسته‌های EICP؛
۳. کاهش پیامدهای محیط زیستی ناشی از آمونیوم و شوری؛
۴. استانداردسازی منابع گیاهی اوره‌آز و کمی‌سازی فعالیت آن‌ها؛
۵. تدوین مدل‌ها و دستورالعمل‌های طراحی برای مقیاس‌پذیری و اجرای میدانی؛
۶. بررسی تلفیق EICP با سایر رویکردهای تثبیت زیستی و اکولوژیک برای افزایش دوام و کارایی.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه‌گیری

فناوری EICP را می‌توان یکی از رویکردهای نوین و امیدبخش در تثبیت زیستی خاک برای کنترل گردوغبار دانست. این فناوری از طریق ایجاد رسوبات کربنات کلسیم و تقویت پیوند میان ذرات خاک، می‌تواند موجب افزایش مقاومت سطحی، تشکیل پوسته مقاوم و کاهش حساسیت خاک به فرسایش بادی شود. با این حال، کارایی آن تابعی از شرایط واکنش، ویژگی‌های خاک، نوع منبع آنزیم و نحوه اعمال در میدان است.

مرور انجام‌شده نشان داد که اگرچه EICP در مقیاس آزمایشگاهی نتایج قابل قبولی در بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک و کاهش فرسایش سطحی ارائه کرده است، اما برای تبدیل شدن به یک راهکار اجرایی فراگیر در کانون‌های گردوغبار، هنوز با چالش‌های مهمی روبه‌رو است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به یکنواختی رسوب‌گذاری، خطر گرفتگی منافذ، دوام بلندمدت پوسته، پیامدهای محیط زیستی محصولات جانبی و محدودیت‌های اقتصادی و اجرایی اشاره کرد.

در این میان، منابع گیاهی اوره‌آز به دلیل دسترس‌پذیری، هزینه کمتر و سازگاری بیشتر با الزامات محیط‌زیستی، ظرفیت آن را دارند که به

References

1. Ahenkorah, I., Rahman, M.M., Karim, M.R., & Teasdale, P.R. (2020). A comparison of mechanical responses for microbial- and enzyme-induced cemented sand. *Géotechnique Letters*, 10(4), 559–567. <https://doi.org/10.1680/jgele.20.00061>
2. Al-Dousari, A., Al-Khalaifah, H., Abbas, S., Alahmad, B., Omar, A., Koutrakis, P., Al-Enezi, D., Al-Dousari, N., Al-Ateeqi, A., Alshareedah, A., Al-Nassar, W., & Alsayegh, M. (2025). Integrating health and economic perspectives: A comprehensive review of dust mitigation policies. *Earth Systems and Environment*, 10(2), 2305–2324. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00650-x>
3. Almajed, A.A., Khodadadi Tirkolaei, H., & Kavazanjian, E., Jr. (2018). Baseline investigation on enzyme-induced calcium carbonate precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(11), 04018081. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001973](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001973)
4. Almajed, A., Lemboye, K., Arab, M.G., & Alnuaim, A. (2020). Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique. *Soils and Foundations*, 60(2), 356–371. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.011>
5. Arab, M.G., Alsodi, R., Almajed, A., Yasuhara, H., Zeiada, W., & Shahin, M.A. (2021). State-of-the-art review of enzyme-induced calcite precipitation (EICP) for ground improvement: Applications and prospects. *Geosciences*, 11(12), 492. <https://doi.org/10.3390/geosciences11120492>
6. Bagnold, R.A. (1941). *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen and Company Limited. (book — no DOI)
7. Chandra, A., & Ravi, K. (2020/2021). Application of enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) to improve the shear strength of different type of soils. In *Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns: Proceedings of IGC 2018* (pp. 617–632). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6237-2_52
8. Chu, J., Ivanov, V., Naeimi, M., Stabnikov, V., & Liu, H.L. (2014). Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand. *Acta Geotechnica*, 9(2), 277–285. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0278-8>
9. Cui, M.J., Wu, J.B., Lai, H.J., Huang, M., Zheng, J.J., Hu, X., & Peng, J.Z. (2025). Seawater-based bacterial enzyme induced carbonate precipitation for biomineralization of calcareous sand. *Acta Geotechnica*, 20(12), 6425–6437. <https://doi.org/10.1007/s11440-025-02738-0>
10. DeJong, J.T., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S., van Paassen, L., Al Qabany, A., Aydilek, A., Bang, S.S., Burbank, M., Caslake, L.F., Chen, C.Y., Cheng, X., Chu, J., Ciurli, S., Esnault-Filet, A., Fauriel, S., Hamdan, N., Hata, T., Inagaki, Y., Jefferis, S., ... Weaver, T. (2013). Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges. *Géotechnique*, 63(4), 287–301. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.017>
11. Dilrukshi, R.A.N., & Kawasaki, S. (2016). Effective use of plant-derived urease in the field of geoenvironmental geotechnical engineering. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 6(207). <https://doi.org/10.4172/2165-784X.1000207>
12. Ehsasi, F., Kavazanjian, E., Jr., van Paassen, L., & Gutierrez, A. (2025). Laboratory studies on enzyme and microbially induced carbonate precipitation for mitigation of fugitive dust from saline soil. In *Geo-EnvironMeet 2025* (pp. 20–28). (no DOI located — conference paper)
13. Gao, Y., He, J., Tang, X., & Chu, J. (2019). Calcium carbonate precipitation catalyzed by soybean urease as an improvement method for fine-grained soil. *Soils and Foundations*, 59(5), 1631–1637. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.03.014>
14. Ghasemi, H., Hatam-Lee, S.M., Tirkolaei, H.K., & Yazdani, H. (2022). Biocementation of soils of different surface chemistries via enzyme induced carbonate precipitation (EICP): An integrated laboratory and molecular dynamics study. *Biophysical Chemistry*, 284, 106793. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2022.106793>
15. Guan, D., Zhou, Y., Shahin, M.A., Khodadadi Tirkolaei, H., & Cheng, L. (2022). Assessment of urease enzyme extraction for superior and economic bio-cementation of granular materials using enzyme-induced carbonate precipitation. *Acta Geotechnica*, 18(4), 2263–2279. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01727-x>

16. Hamdan, N., & Kavazanjian, E., Jr. (2016). Enzyme-induced carbonate mineral precipitation for fugitive dust control. *Géotechnique*, 66(7), 546–555. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.168>
17. Hoang, T., Alleman, J., Cetin, B., Ikuma, K., & Choi, S.G. (2019). Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzyme-induced calcite precipitation (BEICP). *Canadian Geotechnical Journal*, 56(6), 808–822. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0191>
18. Ihsani, Z.M., Kinoshita, N., Yasuhara, H., & Putra, H. (2024/2025). Polymer-assisted soybean crude urease carbonate precipitation technique for soil improvement. *Biogeotechnics*, 3(4), 100147. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100147>
19. Ivanov, V., & Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2), 139–153. <https://doi.org/10.1007/s11157-007-9126-3>
20. Jahangir, M.H., Khashei Siuki, A., & Shahidi, A. (2021). Mapping dust storm susceptibility in Iran using machine learning models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1–19. (DOI not confirmed — could not verify)
21. Joshi, P., Khosravi, M., Phillips, A., Cunningham, A., Rahn, J., Olds, S., Carter, M., & Gupta, M. (2026). Influence of particle size and curing temperature on the strength of sand treated with enzyme-induced carbonate precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 152(2), 04025187. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-13574>
22. Kok, J.F., Adebisi, A.A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., Colarco, P.R., Hamilton, D.S., Huang, Y., Ito, A., & Klose, M. (2021). Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(10), 8169–8193. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>
23. Lee, S., & Kim, J. (2020). An experimental study on enzymatic-induced carbonate precipitation using yellow soybeans for soil stabilization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(7), 2026–2037. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1659-9>
24. Li, L., Zhu, J., Peng, J., Wei, R., Dai, D., Liu, L., He, J., & Gao, Y. (2025). Sustainable wind erosion control in arid regions: Enhancing soil stability using aluminum chloride-modified soybean urease-induced carbonate precipitation technology. *Sustainability*, 17(13), 5753. <https://doi.org/10.3390/su17135753>
25. Liu, L., Liu, H., & Xiao, Y. (2020). Dust suppression with bio cementation: A review. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122253. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122253> (DOI inferred from page number/volume match — not independently confirmed by full-text)
26. Martin, K.K., Tirkolaei, H.K., & Kavazanjian, E., Jr. (2021). Mid-scale biocemented soil columns via enzyme-induced carbonate precipitation (EICP). *Soils and Foundations*, 61(6), 1529–1542. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2021.09.001>
27. Middleton, N.J. (2019). Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. *Geosciences*, 9(6), 261. <https://doi.org/10.3390/geosciences9060261>
28. Moghal, A.A.B., Lateef, M.A., Abu Sayeed Mohammed, S., Ahmad, M., Usman, A.R., & Almajed, A. (2020). Heavy metal immobilization studies and geotechnical properties of cohesive soils by EICP technique. *Applied Sciences*, 10(21), 7568. <https://doi.org/10.3390/app10217568>
29. Nafisi, A., Safavizadeh, S., & Montoya, B.M. (2019). Influence of microbe and enzyme-induced treatments on cemented sand shear response. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(9), 06019008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002111](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002111)
30. Naeimi, M., & Chu, J. (2017). Comparison of conventional and bio-treated methods as dust suppressants. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29), 23341–23350. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9889-1>
31. Naeimi, M., & Haddad, A. (2020). Environmental impacts of chemical and microbial grouting. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 2264–2272. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06614-9>
32. Naeimi, M., Chu, J., Khosroshahi, M., & Zenouzi, L.K. (2023). Soil stabilization for dunes fixation using microbially induced calcium carbonate precipitation. *Geoderma*, 429, 116183. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116183>

33. Naeimi, M., Chu, J., & Shams, S. (2026). Multi-criteria evaluation of zeolite-enhanced MICP for wind erosion control: Balancing mechanical strength, ammonium removal, and seed germination. *Aeolian Research*, 77, 101068. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2026.101068>
34. Putra, H., Yasuhara, H., Erizal, Sutoyo, & Fauzan, M. (2020). Review of enzyme-induced calcite precipitation as a ground-improvement technique. *Infrastructures*, 5(8), 66. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5080066>
35. Raymond, A.J., Purdy, C., Fox, T., Kendall, A., DeJong, J.T., Kavazanjian, E., Jr., Woolley, M., & Martin, K. (2019). Life cycle sustainability assessment of enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) for fugitive dust control. *Academic Journal of Civil Engineering*, 37(2), 600–607. <https://doi.org/10.26168/icbbm2019.87>
36. Saif, A., Cuccurullo, A., Gallipoli, D., Perlot, C., & Bruno, A.W. (2022). Advances in enzyme induced carbonate precipitation and application to soil improvement: A review. *Materials*, 15(3), 950. <https://doi.org/10.3390/ma15030950>
37. Sehatkashani, S., VazifeDoust, M., Kamali, G., & Bidokhti, A.A. (2015). Synoptic analysis and pressure patterns of dust events in the West and South West of Iran. *Journal of Climate Research*, 1394(21), 9–20. (In Persian). (no DOI located)
38. Shao, Y., & Lu, H. (2000). A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D17), 22437–22443. <https://doi.org/10.1029/2000JD900304>
39. Shao, Y. (2008). *Physics and modelling of wind erosion*. Springer. (book — no DOI)
40. Shao, Y., Wyrwoll, K.H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G.H., Mikami, M., Tanaka, T.Y., & Wang, X. (2011). Dust cycle: An emerging core of the earth system. *Aeolian Research*, 2(4), 181–204. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001> (Note: this paper is in *Aeolian Research**, not *Journal of Geodynamics* as originally listed — please verify against your source, as this appears to be a journal-name mismatch in the original list.)*
41. Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K., & Bang, S.S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), 1563–1571. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6)
42. Tegen, I. (2003). Modeling the mineral dust aerosol cycle in the climate system. *Quaternary Science Reviews*, 22(18–19), 1821–1834. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00163-X)
43. Toufigh, V., & Ghassemi, P. (2020). Control and stabilization of fugitive dust: Using eco-friendly and sustainable materials. *International Journal of Geomechanics*, 20(9), 04020140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001762](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001762)
44. Vatanparast Galeh Juq, F., Salahi, B., & Zeinali, B. (2025). Forecasting the occurrence of dust storms using the accuracy assessment of artificial neural networks in selected stations in the western half of Iran. *Geography*, 23(84), 21–39. (In Persian). (no DOI located)
45. Wani, K.S., Ali, A., Muzafar, Z., Kashani, S.N.F., Jan, A., Showkat, R., & Kumar, R. (2026). Bio-stabilisation of soils using crude urease enzymes: Mechanisms, applications and challenges. *Geomechanics and Geoengineering*, 1–28. <https://doi.org/10.1080/17486025.2025.2612039>
46. Wang, X., Chen, H., Shi, Y., Lin, Y., Yang, J., & Li, X. (2024). Development of an eco-friendly dust suppressant based on modified guar gum: Performance and mechanism analysis. *Powder Technology*, 439, 119681. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119681>
47. Xiao, L., Zhang, J., Luo, Y., Wang, X., Qi, X., Hu, Z., Hussain, J., & Jiang, G. (2025). Evaluating the efficacy of enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) for aeolian sand fixation. *Buildings*, 15(12), 1984. <https://doi.org/10.3390/buildings15121984>
48. Xu, W., Zheng, J., Cui, M. and Lai, H., 2025. Enzyme-induced carbonate precipitation for the stabilization of heavy metal-contaminated landfill soils: A sustainable approach to resource recovery and environmental remediation. *Sustainability*, 17(10), p. 4630. <https://doi.org/10.3390/su17104630>
49. Zhang, Z., Wang, K., Cui, C. and Yu, L., 2026. Performance and mechanism of enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) for fine-grained saline soil stabilization. *Applied Sciences*, 16(2), p. 1057. <https://doi.org/10.3390/app16021057>