



Semnan University



Research Article

Optimization of Bitumen-Cement Emulsion for Stabilizing Selected Sandy Soils in Central Iran Based on Compressive and Shear Strength

Fateme Karimi^a, Reza Pourhosseini^b, Mohammad Mehdi Khabiri^{b*}

^a M.Sc. of Highway and Transportation, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, I. R. Iran.

^b Associate Professor, Geotechnical and Road Department, Faculty of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-03-18

Revised: 2025-07-11

Accepted: 2025-07-12

Keywords:

Sand dunes,

Emulsion bitumen,

Cement stabilization,

Geotechnical engineering,

Road engineering.

ABSTRACT

Aeolian sand poses significant challenges to civil engineering projects due to its inherent properties. In this research, a comprehensive experimental program was conducted to investigate the effectiveness of bitumen emulsion and cement in stabilizing aeolian sand. For this purpose, samples were collected from three distinct regions (Northern, Central, and Southern) within the central desert areas of Iran and stabilized with varying percentages of bitumen and cement. After 24 hours of curing in a 60 °C oven, the mechanical properties of these samples, including compressive strength, shear strength parameters, and unconfined compressive strength (UCS), were rigorously evaluated. Results demonstrated that optimal mixture in the Northern region, comprising 6% cement and 10% bitumen, yielded a 130% improvement in compressive strength. For the Central region samples, 6% cement and 6% bitumen resulted in a 57% increase in compressive strength. In the Southern region samples, combination of 6% cement and 8% bitumen provided a 121% enhancement in compressive strength. Direct shear tests indicated significant improvements in shear parameters for the optimal mixtures: A 49% increase in the angle of internal friction and a 125% increase in cohesion. The mixture containing 6% cement and 6% bitumen proved most effective in enhancing the internal friction angle, achieving a 29% improvement. Evaluation of UCS results revealed the greatest increases in this parameter occurred in the Northern and Southern regions for samples containing 6% cement and 10% bitumen, with improvements of 79% and 80%, respectively. In the Central region samples, maximum UCS increase (51%) was observed in samples containing 4% bitumen (alongside the optimal cement content).

* Corresponding author.

E-mail address: mkhabiri@yazd.ac.ir

How to cite this article: Karimi, F. , porhoseini, R. and Khabiri, M. M. (2025). Optimization of Bitumen-Cement Emulsion for Stabilizing Selected Sandy Soils in Central Iran Based on Compressive and Shear Strength. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(2), 1-20. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.37188.1719>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Semnan University

مجله زیر ساخت‌های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی امولسیون قیری- سیمانی در تثبیت ماسه‌های بادی منتخب اقلیم مرکزی ایران

بر مبنای مقاومت فشاری و برشی

فاطمه کریمی^۱، رضا پورحسینی^۲، محمد مهدی خبیری^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

^۲ دانشیار بخش ژئوتکنیک و راه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

چکیده

ماسه‌بادی به دلیل ویژگی‌های ذاتی آن، همواره چالش‌های جدی برای پروژه‌های عمرانی ایجاد می‌کند. در این تحقیق، یک برنامه آزمایشی جامع برای بررسی اثربخشی امولسیون قیر و سیمان در تثبیت ماسه‌بادی انجام شد. بدین منظور، نمونه‌هایی از سه ناحیه متمایز (شمالی، مرکزی و جنوبی) مناطق بیابانی مرکزی کشور جمع‌آوری و با درصد‌های مختلف قیر و سیمان تثبیت شدند. پس از ۲۴ ساعت عمل‌آوری در گرمخانه ۶۰ درجه سلسیوس، ویژگی‌های مکانیکی این نمونه‌ها شامل مقاومت فشاری و برشی و مقاومت فشاری تک‌محوری، به دقت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ترکیب بهینه در ناحیه شمالی با ۶٪ سیمان و ۱۰٪ قیر، بهبود ۱۳۰٪ در مقاومت فشاری را ایجاد کرد. برای نمونه مرکزی، ۶٪ سیمان و ۶٪ قیر، ۵۷٪ افزایش مقاومت فشاری را به همراه داشت و در نمونه ناحیه جنوبی، ترکیب ۶٪ سیمان و ۸٪ قیر، ۱۲۱٪ بهبود در مقاومت فشاری را فراهم کرد. همچنین، آزمایش برش مستقیم نشان‌دهنده افزایش ۴۹٪ زاویه اصطکاک و ۱۲۵٪ ضریب چسبندگی در نمونه‌های بهینه بود. نمونه‌های حاوی ۶٪ سیمان و ۶٪ قیر بهترین اثربخشی در افزایش زاویه اصطکاک داخلی را با ۲۹٪ بهبود عملکرد دارا است. بررسی نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نشان داد که بیشترین افزایش این پارامتر در نمونه‌های شمالی و جنوبی در نمونه حاوی ۶٪ سیمان و ۱۰٪ قیر با افزایش ۷۹٪ و ۸۰٪ و در نمونه ناحیه مرکزی در نمونه دارای ۴٪ قیر با افزایش ۵۱٪ رخ داده است.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱

واژگان کلیدی:

ماسه‌بادی،

امولسیون قیر،

تثبیت با سیمان،

مهندسی ژئوتکنیک،

مهندسی راه.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

استناد به این مقاله: کریمی، فاطمه، پورحسینی، رضا و خبیری، محمد مهدی. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی امولسیون قیری- سیمانی در تثبیت ماسه‌های بادی منتخب اقلیم مرکزی ایران بر مبنای مقاومت فشاری و برشی. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۱۱(۲)، ۱-۲۰.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2025.37188.1719>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

از گذشته‌های دور، افزودن قیر امولسیون و سیمان به‌عنوان راه‌حلی برای ارتقای ویژگی‌های لایه‌های روسازی و بستر خاک در پروژه‌های عمرانی به‌کار گرفته شده است. با وجود پژوهش‌های فراوان در حوزه بهبود مصالح سنگی با استفاده از این دو ماده، مطالعات محدودی به ارزیابی اثرات هم‌افزایی این ترکیب بر پارامترهای گوناگون مخلوط‌ها، به‌ویژه خاک‌های حساس مانند ماسه‌بادی در ایران، پرداخته‌اند. در این پژوهش، به‌منظور تحلیل تأثیر قیر امولسیون بر تثبیت ماسه‌بادی، از سیمان به‌عنوان یک عامل تثبیت‌کننده مکمل بهره‌برده شده است. این ترکیب اگرچه تفسیر نتایج را با چالش‌هایی مواجه می‌کند، اما استفاده از سیمان با ایجاد پیوستگی میان ذرات ماسه، انجام آزمایش‌های مکانیک خاک را تسهیل می‌کند؛ زیرا بافت ریز ماسه‌بادی، اجرای برخی آزمایش‌های استاندارد را دشوار می‌سازد. سیمان، با افزایش مقاومت فشاری و برشی و همچنین پر کردن فضاهای خالی میان ذرات، دوام و پایداری مخلوط را در برابر شرایط محیطی بهبود می‌بخشد (اسپاگنولی، ۲۰۲۱). همچنین، تعاملات پیچیده در ماتریس قیر-سیمان که منجر به بهبود عملکرد می‌شود، شامل ایجاد پیوندهای چسبنده توسط قیر و تشکیل فاز C-S-H و شبکه‌ای منسجم توسط هیدراسیون سیمان است که هر دو به سطح ماسه متصل می‌گردند. تفاوت در چسبندگی مناطق مختلف به توزیع قیر و ویژگی‌های سطحی ماسه سیلیسی بستگی دارد.

هدف این مطالعه، بررسی تأثیرات قیر امولسیون و سیمان بر ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی خاک تثبیت‌شده و ارائه یک رابطه ریاضی برای تعیین درصد بهینه افزودنی‌ها است. تثبیت ماسه‌بادی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و پژوهش‌های متعددی به بررسی روش‌های بهبود خواص مکانیکی آن اختصاص یافته‌اند. در این میان، قیر

امولسیونی به دلیل خاصیت چسبندگی و قابلیت آب‌بندی، به‌عنوان یک عامل تثبیت‌کننده مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، عملکرد ماسه‌بادی تثبیت‌شده با قیر امولسیونی تحت تأثیر عواملی نظیر نوع قیر، مقدار قیر، دانه‌بندی ماسه و شرایط محیطی قرار دارد (مازیبوکو، ۲۰۲۰). از این‌رو، پژوهش‌ها برای بهینه‌سازی این فرآیند و دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب ادامه دارند.

این مطالعه، با هدف تحلیل جامع تحقیقات اخیر در زمینه بهینه‌سازی خواص مکانیکی ماسه‌بادی تثبیت‌شده با قیر امولسیونی انجام شده و بر مقاومت فشاری و برشی تمرکز دارد. این پژوهش، با تکیه بر منابع معتبر و به‌روز، چالش‌ها و فرصت‌های موجود در این حوزه را شناسایی کرده و راهکارهایی برای بهره‌گیری از این روش در پروژه‌های عمرانی ارائه می‌دهد. در این راستا، پارامترهای مؤثر بر مقاومت فشاری و برشی ماسه‌بادی تثبیت‌شده، از جمله نوع و مقدار قیر امولسیونی، درصد سیمان، روش اختلاط، شرایط عمل‌آوری و نوع ماسه‌بادی، به‌دقت بررسی شده‌اند.

مطالعات نشان داده‌اند که افزودن سیمان به ترکیب ماسه‌بادی و قیر امولسیونی، مقاومت فشاری و برشی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (نیو و همکاران، ۲۰۲۴). سیمان با ایجاد پیوندهای مستحکم میان ذرات، از تغییرشکل دائمی جلوگیری کرده و مقاومت مصالح را بهبود می‌بخشد. با این حال، استفاده از سیمان به تنهایی ممکن است به ایجاد ترک‌های حرارتی در مصالح منجر شود. به همین دلیل، ترکیب قیر امولسیونی و سیمان می‌تواند این مشکل را کاهش دهد (لیو و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، بررسی مکانیزم‌های پیچیده تثبیت ماسه‌بادی با این ترکیب، نیازمند تحلیل عمیق‌تر جنبه‌های مختلف از جمله نقش سیمان در ایجاد محیط قلیایی و فعال‌سازی قیر امولسیونی، تأثیر دانه‌بندی ماسه بر توزیع تنش و اثر شرایط عمل‌آوری بر ساختار داخلی مصالح است.

انعطاف‌پذیری را افزایش می‌دهد و سیمان استحکام و دوام را فراهم می‌کند (اندوان و کومار، ۲). علاوه بر این، این روش از منظر زیست‌محیطی نیز مزیت دارد، زیرا قیر امولسیون می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از روش‌های سنتی تثبیت خاک را کاهش دهد، که با اهداف توسعه پایدار هم‌خوانی دارد.

این هم‌افزایی همچنین در شرایط مختلف خاکی، به‌ویژه در مناطق با رطوبت بالا و خاک‌های متسع، نتایج بهتری به همراه دارد و به مهندسان امکان می‌دهد رویکرد خود را با شرایط محلی تطبیق دهند (اندوان و کومار، ۲۰۲۰۲۲). از منظر اقتصادی نیز استفاده از این ترکیب هزینه‌های نگهداری را کاهش داده و طول عمر زیرساخت‌ها را افزایش می‌دهد، که دلیلی قانع‌کننده برای استفاده از این روش در پروژه‌های تثبیت پایدار خاک است (اندوان و کومار، ۲۰۲۰).

۱-۲. اهداف و نوآوری پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی جامع تأثیر افزودن قیر امولسیونی و سیمان بر مقاومت فشاری تک‌محوره و برشی ماسه‌بادی است. با وجود مطالعات پیشین در این حوزه، بیشتر پژوهش‌ها به بررسی اثرات سیمان به‌تنهایی یا ترکیبات دیگر پرداخته‌اند. از این‌رو، این مطالعه با تمرکز بر اثرات هم‌افزای قیر امولسیونی و سیمان، رویکردی نوآورانه ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند دستورالعمل‌های عملی برای استفاده از ماسه‌بادی تثبیت‌شده در پروژه‌های راه‌سازی، ساخت‌وساز و تثبیت خاک فراهم کند. همچنین، ارائه منحنی‌های ریاضی تجربی برای پیش‌بینی درصد بهینه افزودنی‌ها، از دیگر نوآوری‌های این تحقیق است که می‌تواند به طراحی دقیق‌تر و کارآمدتر مخلوط‌های تثبیت‌شده کمک کند.

افزودن موادی مانند الیاف (مانند پلی‌پروپیلن یا الیاف طبیعی) نیز می‌تواند مقاومت کششی و چقرمگی مصالح را در برابر بارهای دینامیک و ضربه‌ای بهبود بخشد (گیو و همکاران، ۲۰۲۴). علاوه بر این، پژوهش‌های اخیر به دنبال جایگزین‌های پایدارتر و سازگار با محیط‌زیست برای سیمان و قیر امولسیونی هستند. برای مثال، استفاده از مواد سیمانی مکمل (SCMs) مانند خاکستر بادی، سرباره کوره بلند و پوزولان‌های طبیعی به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان، می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش داده و دوام مصالح را افزایش دهد (ژو و شی، ۲۰۱۸). همچنین، بهره‌گیری از قیرهای امولسیونی اصلاح‌شده با پلیمر و بیوقیرها می‌تواند خواص مکانیکی و رئولوژیک قیر را بهبود بخشیده و وابستگی به منابع نفتی را کاهش دهد. استفاده از نانومواد، مانند نانوذرات سیلیس و نانورس‌ها، نیز به‌عنوان روشی نوین برای ارتقای عملکرد ماسه‌بادی تثبیت‌شده مورد توجه قرار گرفته است (روست و همکاران، ۲۰۲۲).

افزودن پلی‌وینیل الکل (PVA) به سیمان، مقاومت مکانیکی ماسه‌بادی تثبیت‌شده را به‌طور قابل توجهی افزایش داده و مقاومت فشاری را بهبود می‌بخشد (رمضانی و همکاران، ۲۰۲۵). همچنین، ترکیب سیمان و قیر امولسیونی همراه با پلیمرهای خاص، تخلخل و نفوذپذیری ماسه‌بادی را کاهش داده و خواص آن را بهبود می‌بخشد (چن و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، استفاده از پلیمرهای طبیعی به‌عنوان افزودنی مکمل در سیمان می‌تواند پایداری و مقاومت ماسه‌بادی را در برابر عوامل محیطی افزایش دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

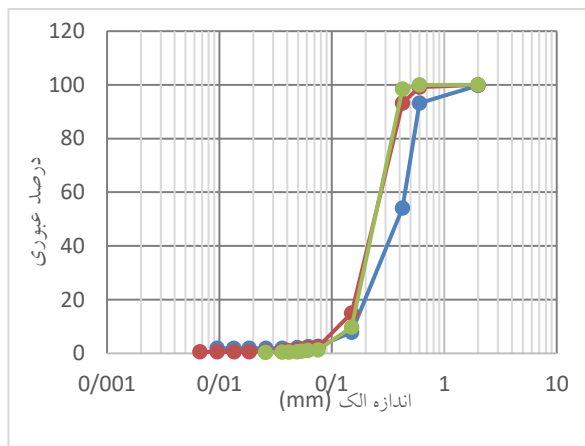
۱-۱. بررسی عملکرد تثبیت خاک با قیر و سیمان

اخیراً، استفاده هم‌زمان از قیر امولسیونی و سیمان برای تثبیت خاک توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. این ترکیب، عملکرد مکانیکی خاک را بهبود می‌بخشد؛ زیرا قیر امولسیونی مقاومت در برابر آب و

۲. روش تحقیق و برنامه آزمایشگاهی

این پژوهش به بررسی تأثیر افزودن قیر امولسیون و سیمان در درصد‌های مختلف بر پارامترهای ژئومکانیک

و عملکردی مخلوط ماسه‌بادی، با تأکید بر مقاومت فشاری و برشی، می‌پردازد. برای این منظور، سه نمونه ماسه‌بادی از مناطق مختلف مرکزی ایران (ناحیه شمالی، ناحیه مرکزی و ناحیه جنوبی) جمع‌آوری شد (شکل ۱).



شکل ۱. دانه‌بندی و فرآیند برداشت مصالح در این پژوهش جهت ساخت نمونه‌های تثبیت شده

(شامل توزیع اندازه ذرات و مورفولوژی)، ترکیب کانی‌شناسی و همچنین میزان ناخالصی‌های آلی، تفاوت‌های چشمگیری نشان دهند. علاوه بر این، هر منطقه می‌تواند بازتاب‌دهنده شرایط پیچیده محیطی و فرآیندهای رسوب‌گذاری منحصربه‌فردی باشد. برای مثال، نمونه‌های نزدیک به مناطق شهری اغلب حاوی آلاینده‌ها و کسر ریزدانه بیشتری هستند، در حالی که ماسه‌های جمع‌آوری شده از نواحی دورتر معمولاً خلوص بالاتر و یکنواختی بیشتری از خود بروز می‌دهند. این استراتژی نمونه‌برداری چندگانه، امکان اعتباربخشی و تعمیم‌پذیری نتایج حاصل از مطالعات تثبیت را به طیف وسیع‌تری از مناطق مشابه در ایران و سایر اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک جهانی فراهم می‌سازد.

بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید وبا توجه به اینکه مقدار خاک باقی‌مانده روی الک شماره ۲۰۰ بیش از ۵۰ درصد وزن خشک اولیه و نیز بیش از ۵۰ درصد آن از الک شماره ۴ عبور کرده است، هر سه نمونه مصالح در رده درشت‌دانه و از نوع ماسه قرار گرفت. میزان رد شده از

مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری در جدول ۱ ارائه شده است. نمونه‌ها پس از جمع‌آوری در ظروف مناسب قرار گرفته و به آزمایشگاه منتقل شدند.

جدول ۱. مختصات محل برداشت مصالح سنگی مصرفی

منطقه برداشت	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
ناحیه شمالی (A)	۵۴°۹'۴۹"	۳۲°۱'۳۲"
ناحیه مرکزی (D)	۵۴°۲۳'۴۸"	۳۲°۱'۲۶"
ناحیه جنوبی (M)	۵۴°۲۴'۱۹"	۳۱°۳۴'۱۹"

مناطق مرکزی ایران، به دلیل قرارگیری در اقلیم خشک و نیمه‌خشک بیابانی، گستره‌ای وسیع از ذخایر ماسه‌های بادی و دشت‌های ریگی را در بر می‌گیرد. انتخاب سه منطقه جغرافیایی متمایز با هدف پوشش حداکثری ناهمگنی‌های ژئوتکنیک این رسوبات صورت پذیرفت. این ماسه‌های بادی می‌توانند از نظر بافت‌شناسی

۳. مصالح مصرفی و ساخت نمونه

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مصالح مورد استفاده در این پژوهش، به ویژه ماسه بادی، قیر امولسیون و سیمان، با دقت فراوان کنترل و تأیید شد. این کنترل دقیق برای اطمینان از کیفیت و عملکرد یکنواخت آن‌ها در طول آزمایش‌ها و تضمین اعتبار نتایج به دست آمده، ضروری بود. به همین منظور، قیر امولسیون با گرید مناسب (CRS-1) جهت اختلاط با ماسه بادی انتخاب گردید. همچنین، سیمان پرتلند نوع II به دلیل مقاومت بالاتر در برابر حملات سولفاتی و تولید گرمای هیدراتاسیون کمتر (مناسب برای سازه‌های حجیم)، به کار گرفته شد. قبل از شروع آزمایش‌های مخلوط، ماسه بادی از نظر دانه بندی، درصد رطوبت اولیه (w)، و خصوصیات تراکمی (شامل درصد رطوبت بهینه (w_{OPT}))، حداکثر چگالی خشک (γ_d) و چگالی ویژه (G_s) مورد آزمایش قرار گرفت. اهمیت پارامترهای رطوبتی در فرآیند تثبیت، به ویژه در خاک‌های دانه‌ای، بسیار حیاتی است، زیرا رطوبت نقش کلیدی در فعال‌سازی سیمان از طریق هیدراتاسیون و همچنین پخش یکنواخت قیر امولسیون ایفا می‌کند. در این زمینه، نتایج پژوهش خبیری و محمدی انائی (۲۰۱۸) که به ارزیابی اثر میزان رطوبت اولیه بستر ماسه‌ای بر تغییر شکل نهایی و مقاومت روسازی تقویت‌شده پرداختند، به وضوح نشان داد که رطوبت اولیه تأثیری کلیدی بر مشخصات نهایی و عملکرد مقاومتی نمونه‌های تقویت شده دارد. از این رو، دقت در اندازه‌گیری و کنترل پارامترهای مربوط به رطوبت اولیه و درصد رطوبت بهینه در ساخت نمونه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

منطقه برداشت	γ_d	w_{OPT}	w	G_s
ناحیه شمالی	۱/۷۶۹	۱۳/۹۶	۰/۵	۲/۶۱۷
ناحیه مرکزی	۱/۶۵۸	۱۳/۳۳	۰/۲	۲/۶۳۹
ناحیه جنوبی	۱/۷۰۴	۱۶/۸۱	۰/۳	۲/۵۹۳

الک ۲۰۰ کمتر از ۱۲ درصد بوده و ضریب یکنواختی ماسه کمتر از ۶ بود. لذا این نمونه‌ها در رده خاک‌های ماسه‌ای بد دانه بندی شده (SP) و از نوع ماسه تمیز هستند. انتخاب آزمایش‌های مقاومت فشاری و برشی برای بررسی عملکرد مکانیکی ماسه بادی تثبیت شده با امولسیون قیری، مبتنی بر اهمیت این دو پارامتر در تعیین رفتار و پایداری مصالح ساختمانی و ژئوتکنیک است. مقاومت فشاری، توانایی یک ماده را در تحمل بارهای عمودی و فشاری نشان می‌دهد. مقاومت فشاری یک شاخص مهم برای ارزیابی ظرفیت باربری و پایداری ماسه بادی تثبیت شده است. افزایش مقاومت فشاری نشان‌دهنده افزایش ظرفیت باربری و استحکام مخلوط است. ماسه‌های بادی به دلیل ماهیت دانه‌ای خود، مستعد نشست و تغییر حجم هستند. امولسیون قیری و سیمان با پر کردن فضای خالی بین ذرات و ایجاد یک ساختار متراکم‌تر، نشست را کاهش می‌دهد. مقاومت فشاری به عنوان معیاری برای ارزیابی میزان کاهش نشست به کار می‌رود. مقاومت فشاری با سایر خواص مکانیکی مانند مقاومت برشی، مدول الاستیسیته، و مدول الاستیک ارتباط مستقیم دارد.

در بسیاری از کاربردهای ژئوتکنیک، مانند شیب‌بندی‌ها و خاکریزها، مقاومت برشی ماسه بادی تعیین‌کننده پایداری شیب و جلوگیری از لغزش است. افزودن امولسیون قیری و سیمان با افزایش مقاومت برشی، پایداری شیب را بهبود می‌بخشد.

همچنین، ماسه بادی تثبیت نشده در برابر تنش‌های برشی ضعیف است. امولسیون قیری و سیمان با افزایش چسبندگی بین ذرات و ایجاد یک ساختار قوی‌تر، مقاومت برشی را افزایش می‌دهند. مقاومت برشی، رفتار ماسه بادی را در شرایط مختلف بارگذاری، مانند بارگذاری قائم و بارگذاری جانبی، نشان می‌دهد. این پارامتر برای ارزیابی عملکرد مصالح در شرایط بارگذاری واقعی بسیار حیاتی است.

سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) می‌شود که شبکه‌ای معدنی سه‌بعدی با مقاومت بالا در بین ذرات ماسه ایجاد می‌کند. این شبکه سیمانی، همگام با خاصیت چسبندگی قیر که ذرات ماسه را به یکدیگر و به شبکه سیمانی متصل می‌کند، یک ماتریس کامپوزیت مستحکم و انعطاف‌پذیر در ساختار تثبیت‌شده شکل می‌دهد. این ترکیب دوگانه، پیوستگی بین ذره‌ای و مقاومت مکانیکی خاک را ارتقا داده و همزمان مقاومت در برابر آب و ترک‌خوردگی را بهبود می‌بخشد. نمونه قیر مورد استفاده مستقیماً از کارخانجات آسفالت تهیه شد و مشخصات آن طبق نتایج آزمایشگاه مرجع در جدول ۳ ذکر شده است.

قیر امولسیون مورد استفاده در این پژوهش از نوع CRS-1، گرید کاتیونی با گیرش سریع، انتخاب گردید. انتخاب آن به دلیل سرعت بالای شکست و گیرش اولیه که بهره‌برداری سریع‌تر و کارایی عملیاتی پروژه‌ها را به نحو چشمگیری افزایش می‌دهد، است. ماهیت امولسیونی و کاتیونی CRS-1 توزیع آسان و یکنواخت آن را با ماسه‌بادی، حتی در شرایط میدانی با تجهیزات محدود، تضمین می‌کند و جلوگیری از تشکیل گلوله‌های قیر و تضمین پیوستگی مطلوب مخلوط را نیز در پی دارد. علاوه بر آن، حضور سیمان در کنار قیر امولسیونی، برهمکنش شیمیایی- فیزیکی پیچیده‌ای را فعال می‌کند. هیدراتاسیون سیمان منجر به تشکیل فازهای پایدار

جدول ۳. مشخصات قیر مورد استفاده در تثبیت مصالح در این پژوهش

مشخصات قیر	روش آزمایش	نتایج	حدود مجاز
کندروانی سی بولت فیورل در ۵۰ درجه سلسیوس (ثانیه)	ASTM D7496	۲۰	۲۰-۱۰۰ ثانیه
درصد قیر	ASTM D244	۶۳	۵۰-۷۰
پایداری در برابر ته‌نشینی (ساعت)	ASTM D6930	۰/۴	۱ ساعت
مانده روی الک (درصد)	ASTM D6933	۰/۰۳	کمتر از ۰/۱٪
درصد حجمی روغن امولسیون در آزمایش تقطیر	INSO13580	۰/۲	کمتر از ۰/۳٪

می‌دهد.

در نهایت، برای تعیین درصد بهینه سیمان و محدوده مناسب درصد قیر امولسیون، از روش سطح پاسخ (RSM) و نرم‌افزار Design-Expert استفاده شد. این نرم‌افزار با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA) و معیارهای آماری (مانند R-squared)، مدل ریاضی مناسبی را برای داده‌ها برازش داده و بهینه‌سازی ترکیبات انجام می‌دهد. ابتدا آزمایش‌های مقدماتی با درصد‌های مختلف سیمان (صفر، ۲، ۴، ۶ درصد) و قیر امولسیون (صفر تا ۲۰ درصد) انجام شد (شکل ۳- الف). نتایج اولیه و تصاویر میکروسکوپی سطح مخلوط‌ها (شکل ۳-

سیمان مصرفی از نوع تیپ II است که از یکی از کارخانجات مرکز کشور تهیه شد. دلیل انتخاب تیپ II در مقابل تیپ I این موضوع است که سیمان تیپ II در مقایسه با تیپ I مقاومت بیشتری در برابر حملات سولفاتی دارد و برای استفاده در محیط‌های حاوی سولفات‌های متوسط مناسب است. دلیل انتخاب تیپ II در مقابل تیپ III این موضوع است که سیمان تیپ II گرمای کمتری در طی فرآیند هیدراتاسیون تولید می‌کند، که آن را برای سازه‌های حجیم مانند سدها و فونداسیون‌های بزرگ نظیر زیرسازی راه مناسب می‌سازد، زیرا خطر ترک‌خوردگی ناشی از افزایش دما را کاهش

و پیوندهای میانی آنها نیز با رنگ‌های مختلف در شکل ۳-ج نشان داده شده است.

الف) نشان‌دهنده عدم اختلاط مناسب در برخی از نمونه‌ها بود. لذا، روش ساخت نمونه‌ها اصلاح شد (شکل ۳-ب). تصویری شماتیک از ذرات ماسه و سیمان و قیر



ج

ب

الف

شکل ۳. تصویر میکروسکوپ الکترونیک سطح نمونه‌های مکعبی ساخته شده به دو روش: الف) اختلاط اولیه و ب) اختلاط اصلاح شده و ج) شماتیک برهمکنش ریزساختار ماسه و سیمان-امولسیون

فرآیندهای هیدراسیون و پخت اولیه مصالح، بهینه‌سازی خواص مکانیکی و اطمینان از ثبات ساختاری، تمامی این نمونه‌ها به مدت یک روز کامل در دمای ۶۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری حرارتی شدند. در مرحله بعد، جهت اجرای آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی تحت بارگذاری فشاری محوری و کنترل‌شده قرار گرفتند تا مقاومت نهایی آنها در برابر اعمال نیروهای تراکمی تعیین گردد. الزامی بود که زمان دقیق شکستن هر نمونه بر اساس سن آن، طبق جدول ۴، به دقت پایش و کنترل شود تا داده‌های به دست آمده از صحت و قابلیت اطمینان کافی برخوردار باشند.

پس از تعیین درصد بهینه سیمان (۶ درصد) و محدوده مناسب قیر امولسیون (۴ تا ۱۰ درصد) که بر اساس یک روش بهینه‌سازی آماری قدرتمند، یعنی روش سطح پاسخ (RSM)، و با هدف ارزیابی دقیق اثرات متقابل متغیرها حاصل شد، اقدام به ساخت انواع نمونه‌های آزمایشی گردید. نمونه‌های مکعبی با ابعاد دقیق ۵۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری (ASTM C109)، نمونه‌های مکعب مستطیلی با ابعاد مشخص و استاندارد برای آزمایش برش مستقیم (ASTM D1633)، و همچنین نمونه‌های استوانه‌ای به منظور ارزیابی پارامتر حیاتی مقاومت فشاری تک‌محوری (ASTM D2166) تهیه و ساخته شدند. جهت تسریع

جدول ۴. زمان مجاز شکستن نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری

خطای مجاز	سن نمونه
±۰/۵ ساعت	۲۴ ساعت
±۱ ساعت	۳ روز
±۳ ساعت	۷ روز
±۱۲ ساعت	۲۸ روز

شد تا از تخریب نمونه‌ها در زمان خارج کردن از قالب جلوگیری شود (شکل ۴- الف و ۴- ب).

آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌ها مطابق شکل ۴- ب انجام شد. قالب‌های خاصی برای ساخت نمونه‌های برش مستقیم و مقاومت فشاری تک‌محوری طراحی و ساخته



شکل ۴. تصاویری از الف) دستگاه‌های طراحی و ساخته شده ب) ساخت نمونه قالب و نمونه خاک

خاک‌ها، از جمله خاک‌های رسی، شنی و گل‌ولای، کاربرد حیاتی دارد. هدف محوری از انجام این آزمون، تعیین ظرفیت باربری نهایی و اطمینان از پایداری خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان در برابر نیروهای خارجی وارده می‌باشد.

مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با سیمان، دیدگاه‌های ارزشمندی در خصوص تغییرات میکروساختاری و ماکروسکوپیکی ویژگی‌های مکانیکی خاک در اثر افزودن سیمان ارائه می‌دهد. سیمان، از طریق تشکیل پیوندهای شیمیایی مستحکم بین ذرات خاک، ساختار داخلی را به نحو چشمگیری بهبود بخشیده و در نتیجه، استحکام و مقاومت خاک را در برابر نیروهای اعمالی افزایش می‌دهد. این دگرگونی‌های ساختاری، مهندسان را قادر می‌سازد تا در طراحی و اجرای پروژه‌های بهسازی خاک، تصمیم‌گیری‌های بهینه‌تری اتخاذ نمایند.

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و برش مستقیم و مقاومت فشاری تک‌محوری نشان داد که افزودن سیمان و قیر به خاک‌های تثبیت‌شده، به‌طور قابل توجهی موجب بهبود خواص مکانیکی آن‌ها می‌شود. در ادامه، برخی از یافته‌های این پژوهش با جزئیات بیشتر مورد بررسی قرار گرفته و عوامل مؤثر بر تغییرات مشخصات مکانیکی خاک تحلیل شده است.

۴. بررسی و تحلیل نتایج

۴-۱. بررسی تغییرات مقاومت فشاری برای تعیین

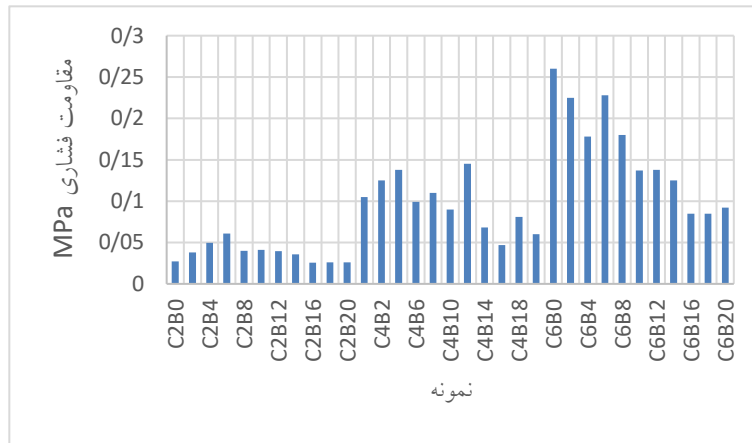
درصد بهینه سیمان و محدوده قیر امولسیونی

آزمایش مقاومت فشاری یکی از بنیادی‌ترین و اساسی‌ترین آزمون‌ها در مهندسی ژئومکانیک است که به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی تأثیر سیمان بر ویژگی‌های مکانیکی خاک و سنجش مقاومت فشاری آن تحت بارگذاری‌های گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش، به‌ویژه در پروژه‌های بهسازی و تقویت انواع

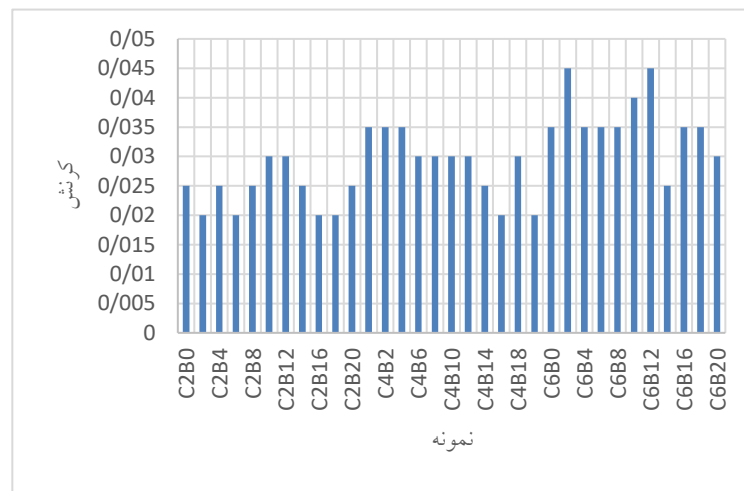
مشخصات مکانیکی خاک) برای سه نمونه منتخب جغرافیایی ساخته شدند. نمونه‌های ناحیه جنوبی، به دلیل دارا بودن بحرانی‌ترین خصوصیات مصالح اولیه (بر اساس نتایج آزمایش‌های مقدماتی)، به عنوان گروه مرجع یا پایه ارزیابی‌های بیشتر انتخاب گردیدند. آزمایش مقاومت فشاری روی تمامی این نمونه‌ها انجام شد. خلاصه نتایج و روند تغییرات پارامترهای مورد بررسی به صورت کدگذاری شده در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. در این کدگذاری، عدد پس از C نشان‌دهنده درصد سیمان و عدد پس از B بیانگر درصد قیر امولسیون به کار رفته در مخلوط می‌باشد.

آزمایش‌های فشاری، نقش محوری در تعیین نسبت بهینه سیمان به خاک ایفا می‌کنند. هرچند افزایش مقدار سیمان معمولاً به افزایش مقاومت فشاری منجر می‌شود، اما این امر می‌تواند هزینه‌های اجرایی پروژه را نیز به نحو چشمگیری بالا ببرد. از این رو، انجام این آزمایش‌ها به مهندسان کمک می‌کند تا نسبت بهینه سیمان را، که هم ارتقای ویژگی‌های مکانیکی را تضمین می‌کند و هم مدیریت بهینه هزینه‌های پروژه را ممکن می‌سازد، مشخص کنند (لمب و ویتمن، ۱۹۷۹).

مطابق با روش‌شناسی تعیین شده در بخش ۳، نمونه‌های مورد نیاز برای تعیین مقدار بهینه سیمان و محدوده مناسب قیر امولسیون (با هدف بررسی تغییرات



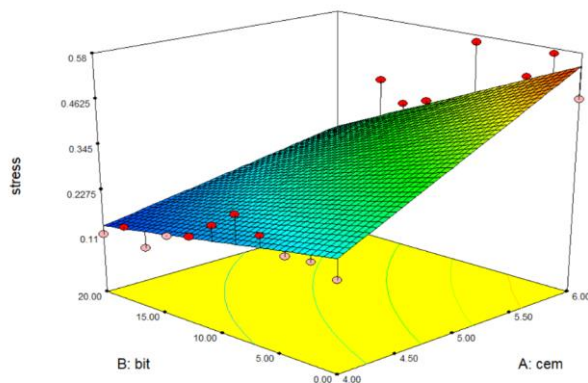
شکل ۵. نمودار تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی



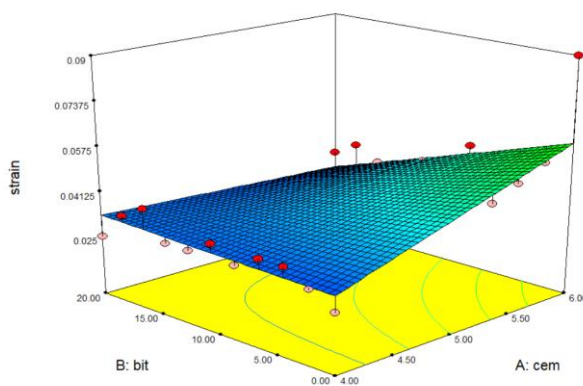
شکل ۶. نمودار تغییرات کرنش نمونه‌های مکعبی

گردید. این تحلیل منجر به تعیین مقادیر بهینه قیر امولسیونی و سیمان شد که حداکثر بهبود در ویژگی‌های مکانیکی خاک را فراهم می‌کند.

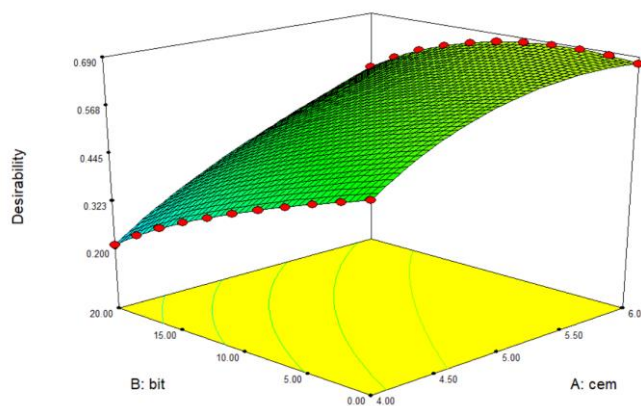
با استفاده از داده‌های فوق و روش تحلیل سطح پاسخ در نرم‌افزار Design Expert، رابطه میان پارامترهای درصد قیر، درصد سیمان، تنش نهایی و کرنش استخراج



شکل ۷. نمودار ارتباط بین تنش نهایی و مقادیر قیر و سیمان



شکل ۸. نمودار ارتباط بین کرنش و مقادیر قیر و سیمان



شکل ۹. نمودار ارتباط بین تابع مطلوبیت و مقادیر قیر و سیمان

خاک و امکان طراحی ایمن تر سازه‌ها است (داس، ۲۰۱۰). پارامتر کلیدی دیگر، چسبندگی خاک (C) است که به قدرت پیوندهای میان ذرات خاک مرتبط است. این ویژگی در خاک‌های رسی و چسبنده نقش بیشتری ایفا می‌کند و تأثیر مستقیمی بر مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک دارد. افزایش چسبندگی، به طور معمول، منجر به بهبود پایداری سازه‌های مهندسی و کاهش احتمال گسیختگی می‌شود. این ویژگی در پروژه‌های طراحی پی‌های عمیق و پایداری شیب‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد (هانسن و همکاران، ۲۰۲۲).

علاوه بر این، آزمایش برش مستقیم رابطه میان تنش برشی و تنش عمودی را مشخص می‌کند که از طریق آن می‌توان خط گسیختگی خاک را به دست آورد. این خط نشان‌دهنده حداکثر مقاومت خاک تحت شرایط بارگذاری مختلف است و در تحلیل‌های پایداری شیب‌ها و سازه‌های نگهدارنده اهمیت به‌سزایی دارد (ترزاقی و همکاران، ۱۹۹۶).

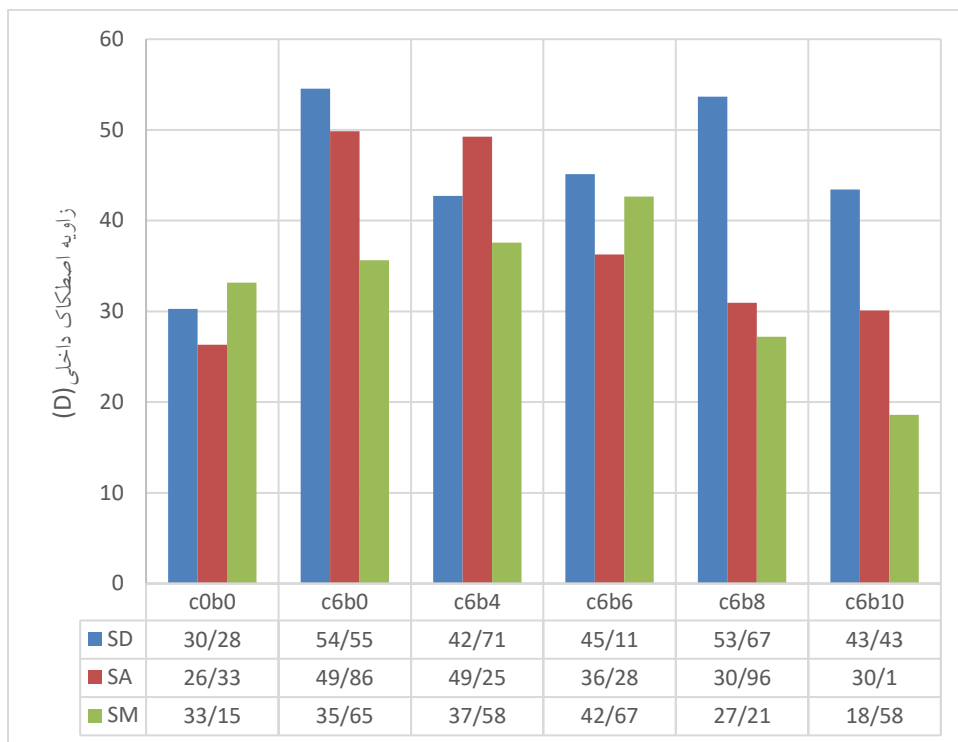
به‌طور کلی، آزمایش برش مستقیم و پارامترهای حاصل از آن، ابزاری ضروری برای طراحی ایمن سازه‌های ژئومکانیک، ارزیابی پایداری خاک و پیش‌بینی رفتار آن تحت بارگذاری‌های مختلف است. این داده‌ها، مبنای تصمیم‌گیری‌های دقیق مهندسی و اجرای موفق پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شوند.

آزمایش برش مستقیم، همان‌گونه که در بخش ۳ ذکر گردید، انجام شده و نتایج آزمایش‌ها روی نمونه‌های شاهد هر منطقه (بدون افزودنی) و نمونه‌های تثبیت شده در نمودارهای شکل ۱۰- الف و ب آورده شده است.

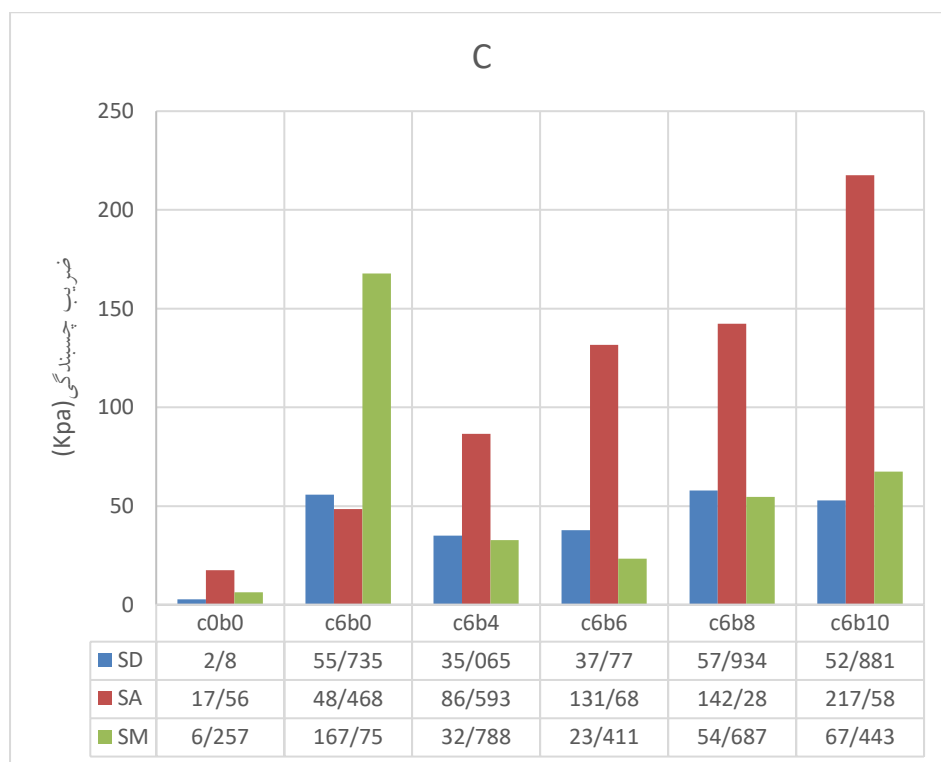
مطابق شکل ۹ و تحلیل‌های نرم‌افزار که در آن مطلوبیت بیشتر را در ازای دارا بودن درصد قیر کمتر به سبب مسائل مالی و زیست‌محیطی و مقدار بیشتر تنش قابل تحمل نمونه‌ها و مقادیر کمتر مقدار کرنش نمونه‌ها در اثر اعمال بارگذاری تعریف شد، مقدار سیمان ۶ درصد و قیر ۴/۵۵ درصد با مقدار تنش برابر با ۰/۴۸ مگاپاسکال و کرنش نهایی مقدار ۰/۰۵۲۲، حالت بهینه ترکیب به- دست آمد. بنابراین، برای ساخت نمونه‌های اصلی از مقدار سیمان بهینه ۶ درصد و محدوده قیر امولسیون ۴ تا ۱۰ درصد برای بررسی بهتر همه احتمالات استفاده گردید.

۴-۲. تغییرات مقاومت برشی مستقیم

آزمایش برش مستقیم یکی از مهم‌ترین روش‌های تعیین مقاومت برشی خاک در مهندسی ژئومکانیک است. این آزمایش امکان ارزیابی دو پارامتر کلیدی خاک، شامل زاویه اصطکاک داخلی (θ) و چسبندگی (C) را فراهم می‌کند. این پارامترها نقش اساسی در طراحی و تحلیل پایداری سازه‌های ژئومکانیک مانند دیوارهای حائل، شیب‌ها و پی‌ها دارند و رفتار خاک را در برابر تنش‌های اعمالی مشخص می‌کنند. یکی از مهم‌ترین نتایج آزمایش برش مستقیم، تعیین زاویه اصطکاک داخلی خاک است که بیانگر میزان مقاومت ذرات خاک در برابر لغزش و حرکت نسبی است. این پارامتر به‌ویژه در خاک‌های دانه‌ای اهمیت زیادی دارد و مقاومت برشی خاک را در برابر بارهای وارد شده به‌خوبی نمایان می‌سازد. مقدار بالای زاویه اصطکاک داخلی به معنای پایداری بیشتر



الف. تغییرات زاویه اصطکاک داخلی



ب. تغییرات ضریب چسبندگی

شکل ۱۰. نتایج آزمایش برش مستقیم

۴-۲-۱. نمونه ناحیه شمالی (A)

نتایج آزمایش برش مستقیم روی نمونه ناحیه شمالی (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که نمونه cOb0 (نمونه شاهد) دارای زاویه اصطکاک داخلی ۲۶/۳۳ درجه و چسبندگی ۱۷/۱۴ کیلوپاسکال است. با بررسی نتایج مشخص گردید که با افزودن سیمان به مخلوط، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی افزایش یافته است. همچنین، با افزایش درصد قیر امولسیون روند افزایشی مقدار ضریب چسبندگی مشهود بود؛ ولی زاویه اصطکاک داخلی روند کاهشی داشت. این رفتار در ماسه ناحیه شمالی که دارای درصد ریزدانه بیشتری است، منطقی به نظر می‌رسد. قیر به عنوان یک ماده چسباننده، با افزایش پیوندهای بین‌ذره‌ای (به ویژه با پوشش سطوح ریزدانه‌ها)، به طور مستقیم چسبندگی خاک را افزایش می‌دهد. اما، همین پوشش قیر روی ذرات ماسه باعث کاهش تماس مستقیم بین ذرات و در نتیجه کاهش اصطکاک متقابل آن‌ها می‌شود که به افت زاویه اصطکاک داخلی منجر می‌گردد. این پدیده نشان‌دهنده غالب شدن مکانیزم چسبندگی بر اصطکاک در این نوع ماسه‌ها با افزودن قیر است.

۴-۲-۲. نمونه ناحیه مرکزی (D)

در نمونه ناحیه مرکزی، نمونه cOb0 دارای زاویه اصطکاک داخلی ۳۰/۲۸ درجه و چسبندگی ۲/۸ کیلوپاسکال است. در این مصالح نیز با افزودن سیمان به مخلوط زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی افزایش یافت و با افزودن قیر امولسیون مقدار ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در ابتدا افت موضعی نشان دادند؛ اما با افزایش درصد قیر امولسیون تا ۸ درصد، سیر صعودی گرفتند و پس از آن مجدداً کاهشی شدند. این رفتار پیچیده می‌تواند ناشی از ترکیب بهینه اولیه و مورفولوژی خاص ذرات ماسه ناحیه مرکزی باشد. در درصدهای کم قیر، ممکن است قیر به صورت ناهمگن توزیع شده و مانع از تماس کافی ذرات سیمان با آب و

یا ذرات ماسه با یکدیگر شود که به کاهش اولیه مقاومت منجر می‌گردد. با افزایش قیر تا حد بهینه، یک شبکه سه-بعدی از قیر و سیمان تشکیل می‌شود که هم چسبندگی و هم درگیری ذرات را بهینه می‌کند. اما فراتر از این حد، تجمع بیش از حد قیر می‌تواند دوباره باعث کاهش اصطکاک داخلی و حتی افت مقاومت برشی کلی شود، زیرا لایه‌های ضخیم قیر مانند یک روان‌کننده عمل می‌کنند.

۴-۲-۳. نمونه ناحیه جنوبی (M)

نتایج ناحیه جنوبی نشان داد که نمونه cOb0 دارای زاویه اصطکاک داخلی ۳۳/۱۵ درجه و چسبندگی ۶/۲۵ کیلوپاسکال است. در مصالح ناحیه جنوبی نیز با افزودن سیمان، رفتاری مشابه دو مصالح دیگر رؤیت شد و افزودن سیمان به مخلوط موجب افزایش ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی شد. افزودن قیر امولسیون تا ۶ درصد موجب افزایش زاویه اصطکاک داخلی شد؛ در حالی که ضریب چسبندگی کاهش یافت و پس از آن روند معکوس پیدا کرد. این رفتار خاص در ماسه ناحیه جنوبی، که مشخصاً دارای دانه‌بندی درشت‌تر و احتمالاً زاویه‌دارتر است، قابل توجیه می‌باشد. در این نوع ماسه، مکانیزم اصطکاک بین ذرات نقش غالب‌تری دارد. افزودن مقادیر کمی از قیر می‌تواند با پر کردن فضاهای خالی جزئی و افزایش تراکم نسبی، درگیری و قفل شوندهایی بین ذرات را بهبود بخشد و در نتیجه زاویه اصطکاک داخلی را افزایش دهد. اما در عین حال، ممکن است این میزان قیر برای ایجاد چسبندگی قوی کافی نبوده و حتی با کاهش تماس مستقیم ذرات خاک با یکدیگر، باعث کاهش جزئی در چسبندگی ذاتی شود. پس از ۶ درصد، احتمالاً با افزایش ضخامت لایه‌های قیر، تأثیر روان‌کنندگی قیر بر اصطکاک غالب شده و زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد، در حالی که چسبندگی به دلیل افزایش پوشش و ایجاد پیوندهای قوی‌تر قیر-

خاک شروع به افزایش می‌کند.

مشاهده می‌شود، این اختلاف می‌تواند ناشی از وجود درصد بالاتری از ریزدانه‌ها (ذرات سیلت و رس) در بافت ماسه ناحیه شمالی باشد. ریزدانه‌ها با افزایش سطح ویژه و فعال‌سازی نیروهای واندروالسی و پیوندهای الکترواستاتیک سطحی، به طور طبیعی چسبندگی ذاتی خاک را بالا می‌برند.

برای مقایسه کمی و دقیق‌تر میزان پایداری برشی این سه نوع خاک تحت شرایط بارگذاری مشخص، مقدار مقاومت برشی نهایی برای هر نمونه، با استفاده از معیار گسیختگی موهر-کلمب و با فرض یک تنش قائم معادل ۲۰۸ کیلوپاسکال، محاسبه شده است. نتایج این محاسبات به تفکیک برای هر نمونه در جدول ۵ ارائه گردیده که پایداری برشی کلی هر خاک را تحت تنش‌های نرمال استاندارد به تصویر می‌کشد.

بررسی نمودارهای شکل ۱۰ به وضوح نشان‌دهنده آن است که زاویه اصطکاک داخلی نمونه ماسه‌بادی ناحیه جنوبی، در مقایسه با سایر نمونه‌ها، مقادیر بالاتری را به خود اختصاص داده است. این تفاوت قابل توجه، با استناد به شکل ۱، به دانه‌بندی درشت‌تر و شکل ذرات زاویه‌دارتر در نمونه‌های این ناحیه نسبت داده می‌شود. ذرات درشت‌تر و غیرکروی، سطح تماس بین ذره‌ای و درگیری مکانیکی بیشتری را فراهم می‌کنند که مستقیماً به افزایش مقاومت برشی از طریق مکانیزم اصطکاک منجر می‌شود.

علاوه بر این، مقادیر ضریب چسبندگی در نمونه ناحیه شمالی، در مقایسه با دو نمونه دیگر، تفاوت چشمگیری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱

جدول ۵. مشخصات مکانیکی نمونه‌ها (زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت برشی)

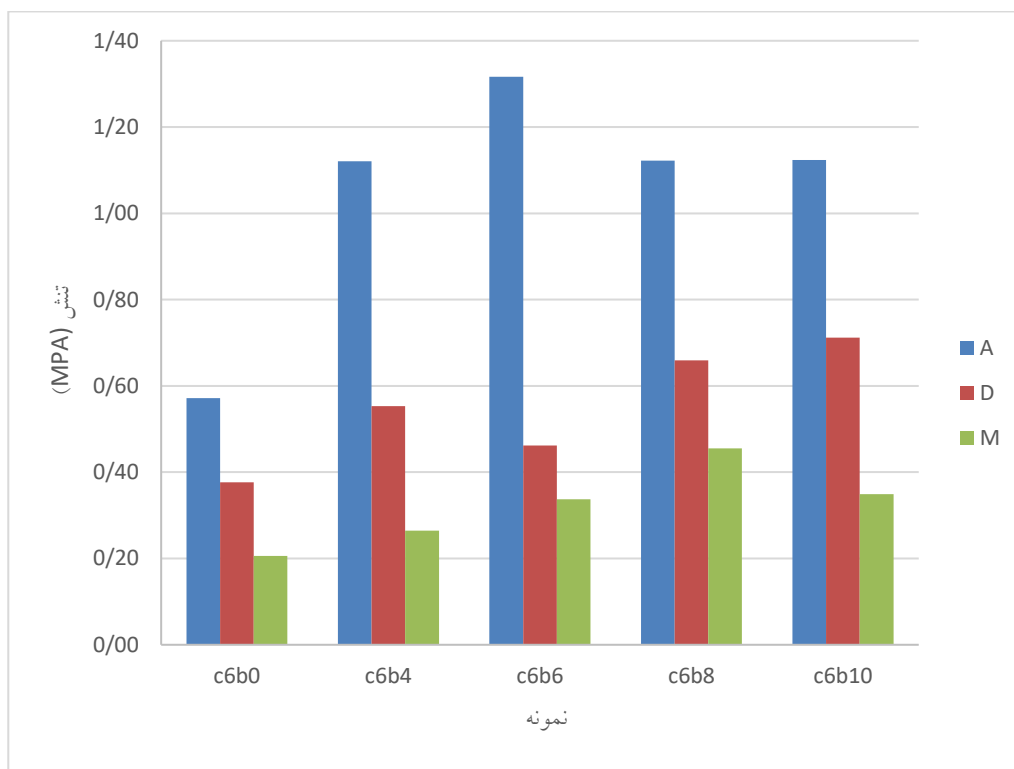
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	ضریب اصطکاک برشی (C) (Kpa)	نمونه	
26.33	17.56	c0b0	A
49.86	48.468	c6b0	
49.25	86.593	c6b4	
36.28	131.68	c6b6	
30.96	142.28	c6b8	
31.1	217.58	c6b10	
30.28	2.8	c0b0	D
54.55	55.735	c6b0	
42.71	35.065	c6b4	
45.11	37.77	c6b6	
53.67	57.934	c6b8	
43.43	52.881	c6b10	
33.15	6.257	c0b0	M
35.65	167.75	c6b0	
37.58	32.788	c6b4	
42.67	23.411	c6b6	
27.21	54.687	c6b8	
18.58	67.443	c6b10	

نمونه‌های تثبیت‌شده ماسه‌بادی با ترکیبات مختلف قیر امولسیون و سیمان، داده‌های کمی حاصله که به روشنی نشان‌دهنده ظرفیت باربری نهایی و مقاومت این مصالح تحت بارگذاری فشاری محوری هستند، به دقت گردآوری و تحلیل گردیدند. این نتایج، به عنوان شاخصی کلیدی برای ارزیابی اثربخشی فرآیند تثبیت، درک رفتار مکانیکی مواد کامپوزیت حاصل و تعیین بهینه‌ترین طرح اختلاط برای کاربردهای مهندسی، اهمیت به‌سزایی دارند. نتایج آزمایش نمونه‌ها در شکل ۱۱ به تصویر کشیده شده‌اند.

با توجه به نتایج جدول ۴، نمونه ناحیه‌جنوبی دارای مقاومت برشی بیشتر و به تبع آن پایداری بیشتری در مقابل دو نمونه مصالح دیگر در حالت بدون افزودنی است. نمونه مصالح شمالی بیشترین پایداری را در ترکیب ۱۰ درصد قیر و ۶ درصد سیمان و دو نمونه ناحیه مرکزی و جنوبی در نمونه دارای ۶ درصد سیمان و فاقد قیر دارا هستند.

۳-۴. تغییرات مقاومت فشاری

پس از انجام دقیق آزمایش‌های مقاومت فشاری روی



شکل ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

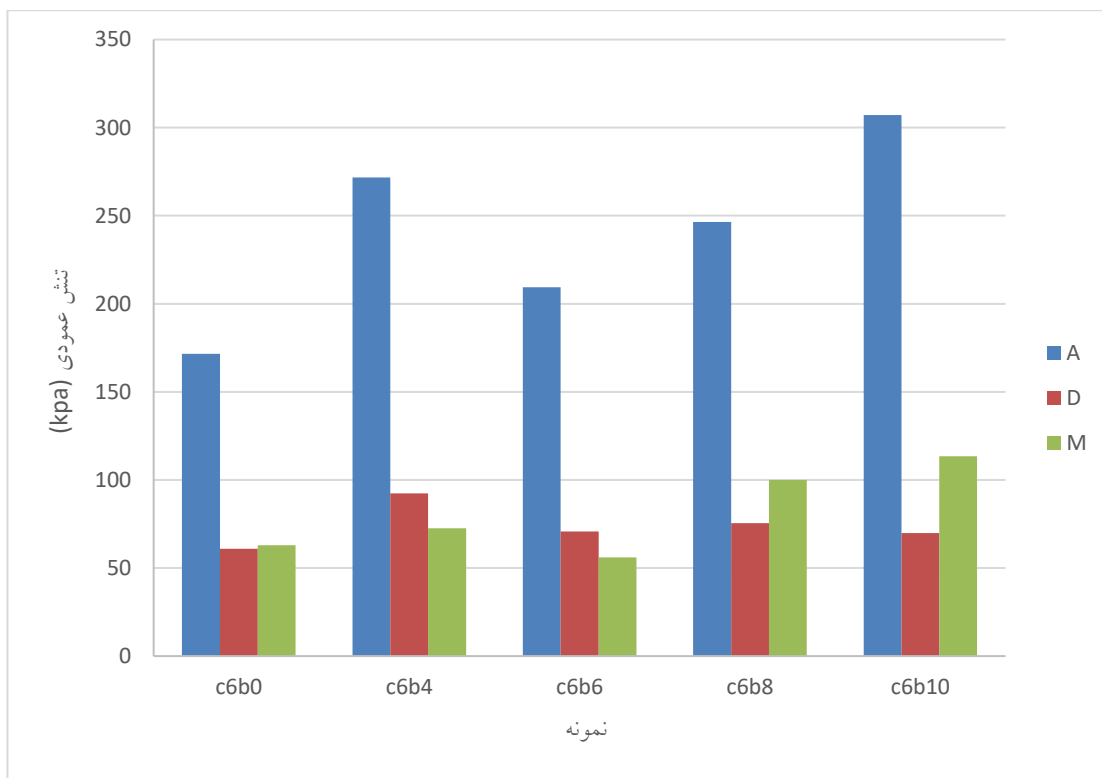
درصد بهبود عملکرد را نسبت به نمونه‌های فاقد قیر دارد. در نمونه ناحیه مرکزی، بیشترین تأثیر را نمونه حاوی ۱۰ درصد قیر با ۱۵۰ درصد افزایش مقاومت و نمونه ناحیه جنوبی دارای ۸ درصد قیر امولسیون با ۱۲۱ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان دارد.

بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری طبق شکل ۱۱ نشان داد که افزودن قیر امولسیون به نمونه ناحیه مرکزی با مقاومت فشاری نمونه‌ها رابطه مستقیم دارد؛ ولی در نمونه ناحیه شمالی و جنوبی ابتدا موجب افزایش و سپس کاهش شدن روند تغییرات می‌شود. در نمونه ناحیه شمالی، نمونه حاوی ۶ درصد سیمان و ۶ درصد قیر بهترین اثربخشی در افزایش مقاومت فشاری با ۱۳۰

۴-۴. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های مهندسی ژئومکانیک است که برای تعیین ظرفیت باربری خاک‌های تثبیت‌شده و طبیعی بدون اثر تنش‌های جانبی طراحی شده است. این آزمایش که

به‌ویژه برای خاک‌های چسبنده مناسب است، به ارزیابی مستقیم مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده در برابر بارگذاری محوری کمک می‌کند و نقش کلیدی در طراحی سازه‌های خاکی و لایه‌های زیرسازی روسازی‌ها ایفا می‌کند (ASTM D2166، ۲۰۲۰). نتایج این آزمایش روی نمونه‌های این مطالعه در شکل ۱۲ ارائه شده است.



شکل ۱۲. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

ساختاری ناشی از قیر باشد. افزون بر این، جابه‌جایی‌های کمتری در نمونه‌های با قیر بالاتر مشاهده شد که نشان‌دهنده مقاومت بیشتر این ترکیب‌ها به تغییرات طولی ناشی از بارهای فشاری است. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهند که افزایش درصد قیر باعث افزایش مقاومت فشاری و کاهش جابه‌جایی‌ها در ترکیب‌های خاک و قیر می‌شود. این ویژگی‌ها بهبود عملکرد مکانیکی این مواد در برابر بارهای اعمالی را نشان می‌دهند و آن‌ها را در برابر شرایط فشاری سخت پایدارتر می‌سازند.

نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری نشان داد که افزایش درصد قیر در ترکیب‌های نمونه‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط دارد. در هر سه نمونه، رفتار مشابهی دیده شد که نمونه‌ها با افزودن قیر عملکرد بهتری در برابر نیروهای فشاری از خود نشان دادند؛ ولی با افزایش درصد قیر تا ۶ درصد ابتدا روند نزولی و سپس روند صعودی داشتند. افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری با افزایش درصد قیر می‌تواند به دلیل بهبود پیوستگی ذرات و افزایش پایداری

۵. نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی اثر افزودن امولسیون قیری و سیمان بر عملکرد مکانیکی ماسه‌های بادی مناطق مرکزی کشور با تأکید بر مقاومت فشاری و برشی و مقاومت فشاری تک‌محوری پرداخت. نتایج این مطالعه با مطالعات گذشته مطابقت دارد. پژوهش‌های مشابه گزارش کرده‌اند که افزودن سیمان به ماسه‌های تثبیت‌شده با قیر امولسیون، مقاومت فشاری و برشی را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. (نیو و همکاران، ۲۰۲۴).

نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده بهبود قابل توجه خواص مکانیکی ماسه‌های بادی تثبیت‌شده بود. در ادامه، مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق به صورت بند به بند ارائه می‌شود:

- بررسی نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که عمل‌آوری نمونه‌ها به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب مخلوط‌های تثبیت‌شده امری ضروری است. این فرآیند ضمن بهینه‌سازی ترکیب مواد، موجب تقویت چسبندگی و افزایش مقاومت برشی می‌شود. از نظر مکانیکی، عمل‌آوری باعث می‌گردد که ذرات ماسه به‌طور بهتری در کنار یکدیگر قرار گیرند و پیوندهای بین آن‌ها مستحکم‌تر شوند. این امر نه تنها به افزایش استحکام ساختاری کمک می‌کند بلکه توانایی مصالح در برابر بارهای دینامیک و استاتیک را نیز بهبود می‌بخشد.

- در نمونه‌های ناحیه شمالی، نمونه حاوی ۶ درصد سیمان و فاقد قیر، بهترین اثربخشی در افزایش زاویه اصطکاک داخلی را با ۳۷/۷۷ درصد بهبود عملکرد نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده نشان داد. همچنین، نمونه حاوی ۱۰ درصد قیر بیشترین تأثیر را در بهبود ضریب چسبندگی با افزایش ۲/۱۵ برابری داشت. در درصد بهینه قیر (۱۰ درصد) برای مصالح ناحیه شمالی، افزایش مقادیر

زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی به ترتیب برابر با ۶۴/۱۰ و ۱۴۲۰ درصد بود. همچنین، مقاومت برشی نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده ۸/۱۰ برابر افزایش یافت.

- در نمونه‌های ناحیه مرکزی، نمونه‌های حاوی سیمان و قیر بهینه، افزایش ۴۹ درصدی در زاویه اصطکاک داخلی، افزایش ۱۲۵۰ درصدی در ضریب چسبندگی، و بهبود ۹/۹ برابری در مقاومت برشی نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده را نشان دادند. در نمونه‌های جنوبی، نمونه حاوی ۶ درصد سیمان و ۶ درصد قیر بهترین اثربخشی در افزایش زاویه اصطکاک داخلی را با ۲۹ درصد بهبود عملکرد نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده داشت. همچنین، نمونه حاوی ۱۰ درصد قیر بیشترین تأثیر را در بهبود ضریب چسبندگی با افزایش ۸/۱۰ برابری نشان داد.

- در نمونه‌های ناحیه شمالی، نمونه حاوی ۶ درصد سیمان و ۶ درصد قیر بهترین اثربخشی در افزایش مقاومت فشاری را با ۱۳۰ درصد بهبود عملکرد نسبت به نمونه‌های فاقد قیر داشت. در درصد بهینه قیر، افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های تثبیت‌شده فاقد قیر برابر با ۵۷/۹۶ درصد بود. در درصد بهینه قیر محاسباتی برای مصالح ناحیه مرکزی، افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های تثبیت‌شده فاقد قیر برابر با ۵۷/۲۲ درصد بود. در نمونه‌های جنوبی، نمونه حاوی ۶ درصد سیمان و ۸ درصد قیر بهترین اثربخشی در افزایش مقاومت فشاری را با ۱۲۱ درصد بهبود عملکرد نسبت به نمونه‌های فاقد قیر نشان داد.

- با بررسی مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها مشاهده شد که در نمونه ناحیه مرکزی نمونه حاوی ۴ درصد قیر بیشترین افزایش در مقدار مقاومت داشته است که نسبت به نمونه تثبیت شده با سیمان افزایش تقریباً ۵۱ درصدی داشته است. در نمونه‌های ناحیه شمالی و جنوبی نیز نمونه حاوی ۱۰ درصد قیر بیشترین افزایش در مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به نمونه تثبیت شده

پژوهش می‌تواند در پروژه‌های عمرانی مانند ساخت جاده‌ها، فرودگاه‌ها و پی‌های ساختمانی در مناطق دارای ماسه‌های بادی به کار گرفته شود. به کارگیری ترکیبات بهینه (شامل ۶ درصد سیمان و ۶ تا ۱۰ درصد قیر) در مناطق مختلف مناطق مرکزی کشور و سایر مناطق مشابه توصیه می‌شود تا بهبودی در عملکرد مکانیکی این مصالح حاصل گردد و از این رو، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای مهندسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم نماید.

با سیمان داشته است. این مقدار افزایش برای نمونه نواحی شمالی و جنوبی به ترتیب برابر با ۷۹ و ۸۰ درصد بود.

تحقیقات آینده می‌تواند به انجام مطالعات بلندمدت برای ارزیابی دوام و پایداری مخلوط‌های تثبیت‌شده در شرایط محیطی مختلف، از جمله تغییرات دما، رطوبت و تابش UV، معطوف شوند. همچنین، بررسی اثر افزودنی‌های دیگر نظیر الیاف، پلیمرها و نانومواد بر عملکرد مکانیکی ماسه‌های بادی تثبیت‌شده می‌تواند به غنای دانش موجود در این حوزه کمک کند. نتایج این

۶. مراجع

- Andavan, S. M. K. B., & Kumar, B. M. (2020). Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions— A review. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1200-1202. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.121>
- ASTM C109-90. 1990. "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars". ASTM International.
- ASTM D1633. 2019. "Standard test method for compressive strength of molded soil-cement cylinders". ASTM International.
- ASTM D2166. 2020. "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil". ASTM International.
- Chen, L., et al. 2020. "Effect of polymer-modified emulsified asphalt and cement on sand stabilization". *J. Mater. Civ. Eng.*, 32(5): 04020385.
- Das, B. M. 2010. "Principles of Geotechnical Engineering". Cengage Learning.
- Giew, H., et al. 2024. "The role of fibers in enhancing the tensile strength and toughness of stabilized sands under dynamic and impact loads". *J. Eng. Mater.*, 60(3): 204-215. <https://doi.org/10.1002/jem.2024.00345>
- Hassan, W., Alshameri, B., Nawaz, M. N., & Qamar, S. U. (2022). Experimental study on shear strength behavior and numerical study on geosynthetic-reinforced cohesive soil slope. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(6), 349. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00945-2>
- Khabiri, M. M. and Mohammadi Anaei, H. 2018. "Evaluation of the effect of initial moisture content of sandy subgrade and emulsion bitumen percentage on the final deformation and strength of fiber- and cement-reinforced pavement". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 4(14): 61-76.
- Liu, X., et al. 2023. "The impact of cement and emulsion bitumen on the mitigation of thermal cracking in stabilized sands". *Constr. Mater. J.*, 48(1); 55-67. <https://doi.org/10.1016/cmj.2023.00123>
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V. 1979. *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Mazibuko, J. 2020. "Influence of emulsion bitumen on the stabilization of sandy soils". *J. Geotech. Eng.*, 42(3): 215-228. <https://doi.org/10.1002/geot.10001>
- New, R., et. al. 2024. "The effect of cement addition on the compressive and shear strength of emulsion bitumen stabilized sands". *Int. J. Civ. Eng.*, 35(2): 112-125. <https://doi.org/10.1002/ijce.12345>
- Ramezani, M., Soleimani Kutanaei, S., Seyedkazemi, A., & Esfandiari Fard, A. (2025). Enhancing the Durability of Cement-Stabilized Clayey Sand with Zeolite and PVA Fibers Under Wet–Dry and Freeze–Thaw Cycles. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(5), 162. <https://doi.org/10.1007/s40515-025-00611-x>
- Rust, F. C., Smit, M. A., Akhalwaya, I., Jordaan, G. J., & Du Plessis, L. (2022). Evaluation of two nano-silane-modified emulsion stabilised pavements using accelerated pavement testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 1339-1352. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1799210>
- Spagnoli, G. 2021. "A review of soil improvement with non-conventional grouts". *Int. J. Geotech. Eng.*, 15(3):

273-287.

- Terzaghi, K., Peck, R. B. and Mesri, G. 1996. "Soil Mechanics in Engineering Practice". John Wiley and Sons.
- Wang, J., et al. 2024. "Effect of natural polymers as additives in cement and emulsified asphalt stabilized sands". *J. Build. Mater.*, 68: 63-74.
- Zhou, Y. and Shi, C. 2018. "Supplementary cementitious materials (SCMs) in concrete: Their impact on greenhouse gas emissions and durability". *Constr. Build. Mater.*, 191: 292-303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.009>