



University Of Qom

Civil Infrastructure Researches

Journal of
Civil Infrastructure
Researches

Online ISSN: 2783-140X
journal homepage: <https://cer.qom.ac.ir/>



Effect of CO₂-Induced Magnesium Carbonate on Improving the Behavior of Genaveh Clay

Saeed Chegini¹ , Hadi Mohamadzadeh Romiani² , Hamed Abdeh Keykha³

1. Department of Civil Engineering, Buin Zahra Technical and Engineering University, Qazvin, Iran. E-mail: saeedchegi-ni37@gmail.com
2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Buin Zahra Technical and Engineering University, Qazvin, Iran. E-mail: mohamadzadeh@bzte.ac.ir
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Buin Zahra Technical and Engineering University, Qazvin, Iran. E-mail: keykha@bzte.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 May 2023
Revised 29 Oct 2023
Accepted 29 Oct 2023

Keywords:
Soft Clay,
Magnesium Carbonate,
CO₂ Absorbing,
Triaxial Compression
Test,
Consolidation.

ABSTRACT

In this study, the effect of CO₂-induced magnesium carbonate on the plasticity index, consolidation behavior and shear strength of natural soft clay was investigated. Magnesium carbonate was produced by absorbing carbon dioxide gas and used as a powder for clay treatment. Different tests including atterberg limits, consolidation, unconfined compression, and triaxial compression tests were conducted on the treated and untreated samples. The triaxial tests were conducted in consolidated undrained (CU) condition. Also, SEM images and XRD analyses were prepared on produced magnesium carbonate and treated and untreated clay samples. The obtained results show that the plasticity index of the treated clay decreased and consolidation behavior was improved as the magnesium carbonate content increased. Regarding the SEM images the magnesium carbonate particles are needle-shaped and cause stronger structure and granular behavior in clay soils. According to the triaxial test results, with increasing confining stress, the shear strength of the treated samples increases compared to untreated clay. The internal friction angle of Genaveh soft clay in both undrained and drained conditions increases significantly, by adding 15 percent magnesium carbonate to the soil.

Cite this article: Chegini S, Mohamadzadeh Romiani H, Abdeh Keykha H. Effect of CO₂-induced Magnesium Carbonate on Improving the Behavior of Genaveh Clay. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 49-66. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9462.1482>



Publisher: University of Qom.
© The Authors.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.9462.1482>



پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی



دانشگاه قم

شاپا الکترونیکی: ۱۴۰۰-۲۷۸۳

صفحه خانگی مجله: <https://cer.qom.ac.ir/>

ارزیابی تأثیر کربنات منیزیم تولید شده از جذب گاز CO_2 بر بهبود رفتار رس بندر گناوه

سعید چگینی^۱، هادی محمدزاده رومیانی^{۲*}، حامد آبده کیخا^۳

۱. گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، قزوین، ایران. رایانامه: saeedchegini37@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، قزوین، ایران. رایانامه: mohamadzadeh@bzte.ac.ir
۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، قزوین، ایران. رایانامه: keykha@bzte.ac.ir

چکیده

احداث پی بر روی خاک‌های رسی نرم معمولاً با مشکلات متعددی از جمله نشتت زیاد و گسیختگی همراه است. اضافه کردن موادی نظیر سیمان و آهک به رس نرم باعث بهبود رفتار آن می‌شود، ولی به دلیل وجود مسائل زیست‌محیطی در فرآیند تولید و به کارگیری این مصالح، محققان به دنبال مصالح نوین نوین جهت استفاده در مصارف عمرانی و بهسازی هستند. در این تحقیق، تأثیر کربنات منیزیم بر رفتار خمیری، مقاومتی و نشتت‌پذیری رس بندر گناوه بررسی شده است. کربنات منیزیم با جذب گاز دی‌اکسید کربن تهیه شده و به صورت پودر جهت بهبود رفتار رس استفاده شده است. آزمایش‌های مختلف شامل حدود خمیری، تحکیم و سه‌محوری فشاری تحکیم‌یافته زهکشی نشده و همچنین تصویربرداری SEM بر روی نمونه‌های رس خالص و مخلوط شده با کربنات منیزیم انجام شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، افزودن کربنات منیزیم به رس گناوه، باعث کاهش ساختار خمیری و بهبود رفتار تحکیمی رس شامل کاهش نشتت تحکیمی و افزایش سرعت تحکیم می‌شود. تصاویر SEM نیز نشان می‌دهد که ذرات کربنات منیزیم سوزنی‌شکل بوده که باعث ایجاد ساختار نسبتاً مقاوم و بروز رفتار دانه‌ای در خاک رس می‌شود. با توجه به نتایج آزمایش سه‌محوری، با افزایش تنش همه‌جانبه، مقاومت برشی و سختی نمونه‌های دارای کربنات منیزیم نسبت به رس خالص افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. با افزودن ۱۵ درصد کربنات منیزیم به رس گناوه، زاویه اصطکاک داخلی خاک در شرایط زهکشی نشده و زهکشی شده به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

کلیدواژه‌ها:

رس نرم،
کربنات منیزیم،
جذب دی‌اکسید کربن،
آزمایش سه‌محوری فشاری،
تحکیم.

استناد: چگینی سعید، محمدزاده رومیانی هادی، آبده کیخا حامد. ارزیابی تأثیر کربنات منیزیم تولید شده از جذب گاز CO_2 بر بهبود رفتار رس بندر گناوه. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۳، ۶۶-۴۹، ۱۰(۱). <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9462.1482>

۱- مقدمه

می‌تواند مخاطرات بسیاری برای محیط‌زیست به همراه داشته باشد [۱۱]. فرآیند تولید آهک می‌تواند ضمن آزادسازی حجم قابل توجهی از گاز دی‌اکسیدکربن اثرات زیست‌محیطی نامطلوب نیز به همراه داشته باشد. به ازای تولید هر تن آهک حدود ۶۸۳ کیلوگرم گاز دی‌اکسیدکربن آزاد می‌شود. فرآیند تولید آهک در کشور چین در سال ۲۰۱۲ باعث آزادسازی ۱۴۱/۷ میلیون تن گاز دی‌اکسیدکربن شد [۱۲]. همچنین تحقیقات گوتیرز^۲ و همکاران، نشان داد که فرآیند تولید آهک در کشور کوبا علاوه‌بر آزادسازی دی‌اکسیدکربن، با مصرف قابل توجه انرژی (سوخت فسیلی و الکتریسیته)، ایجاد ریزگرد و مصرف منابع طبیعی باعث اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌شود [۱۳]. بنابراین در دهه‌های اخیر، استفاده از مصالح جایگزین برای بهبود رفتار خاک که معضلات زیست‌محیطی کمتری نسبت به مصالح رایج داشته باشند مورد توجه محققین قرار گرفته است.

دی‌اکسیدکربن یکی از گازهای گلخانه‌ای و از عوامل اصلی پدیده گرمایش زمین است [۱۴]. یکی از چالش‌های بزرگ جامعه جهانی یافتن راهکارهای مناسب برای کاهش دی‌اکسیدکربن آزاد است. تبدیل دی‌اکسیدکربن به کانی‌های کربناته می‌تواند یک راهکار امیدبخش برای جذب دی‌اکسیدکربن آزاد شده توسط صنایع آلاینده باشد [۱۵]. در این روش از دی‌اکسیدکربن برای تشکیل یون بی‌کربنات (CO_3^{2-}) استفاده می‌شود. یون بی‌کربنات در ترکیب با یون Ca^+ تشکیل کانی کربنات کلسیم (CaCO_3) می‌دهد. این کانی غیرسمی و سازگار با محیط‌زیست بوده و قابلیت چسبانندگی خاک را دارد و در تحقیقات متعدد برای افزایش مقاومت و بهبود رفتار خاک مورد استفاده قرار گرفته است [۱۶-۱۸]. لی^۳، تأثیر کربنات کلسیم تولید شده به روش MICP را بر رفتار خاک‌های ماسه‌ای و رسی مورد مطالعه قرار داد.

با افزایش ساخت‌وسازها و محدودیت زمین، نیاز به احداث پی‌ها بر روی خاک‌های ضعیف و یا مشکل‌دار از جمله خاک‌های رسی نرم و نشست‌پذیر افزایش یافته است. از میان گرینه‌های موجود جهت احداث پی بر روی خاک‌های مسأله‌دار، اگرچه استفاده از شمع‌ها برای پروژه‌های نسبتاً مهم و سنگین متدال است، ولی راه حلی پر هزینه و زمان‌بر و در برخی مواقع توأم با مشکلات اجرایی است. از این‌رو، در بسیاری از پروژه‌های اجرایی، بهسازی خاک‌های مسأله‌دار به عنوان جایگزینی برای احداث شمع مورد توجه مهندسین می‌باشد. بنابراین تحقیق در زمینه بهبود رفتار خاک و یافتن راه حل‌هایی نوین جهت بهبود رفتار خاک‌های رسی از اهمیت زیادی برخوردار است.

تحقیقات گذشته نشان داده است که استفاده از افزودنی‌های مناسب می‌تواند باعث بهبود رفتار خمیری و نشست‌پذیری خاک‌های رسی شود. برای بهسازی و تثبیت خاک، افزودنی‌های مختلف مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی، سرباره کوره ذوب آهن، افزودنی‌های نانو و مصالح شیمیایی مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند [۶-۱۶]. خاک سیمان و آهک از رایج‌ترین افزودنی‌هایی هستند که به کارگیری آنها می‌تواند باعث بهبود رفتار خاک رس از جمله خصوصیات خمیری آن شود [۷]. اما استفاده از این مصالح در تثبیت خاک ممکن است باعث بروز مشکلات زیست‌محیطی شود [۸ و ۴]. سهم قابل توجهی از دی‌اکسیدکربن آزاد شده در صنعت به فرآیند تولید سیمان مربوط می‌شود [۹]. براساس تحقیقات زانگ^۱ و همکاران با تولید هر تن سیمان، مقدار ۱ تن دی‌اکسیدکربن تولید می‌شود [۱۰]. در سال ۲۰۱۳ آلدگی ناشی از فرآیند تولید سیمان حدود ۷٪ از کل آلدگی کره زمین برآورد شده است که این مسأله

²- Gutiérrez

³- Li

¹- Zhang

دی اکسیدکربن، تأثیر آنها را بر رفتار رس بنتونیت بررسی نمودند. نتایج این مطالعات نشان داد که کربنات منیزیم نسبت به سایر کانی‌های کربناته می‌تواند نقش مؤثرتری در بهبود رفتار خاک‌های رسی داشته باشد. این کانی باعث ایجاد رفتار دانه‌ای و کاهش رفتار خمیری رس بنتونیت شده و در نتیجه، باعث بهبود نشت تحکیمی آن می‌شود. همچنین براساس نتایج آزمایش‌های برش مستقیم استفاده از کانی‌های کربناته باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده رس بنتونیت می‌شود. کربنات منیزیم نسبت به سایر کانی‌های کربناته بیشترین افزایش را در زاویه اصطکاک داخلی زهکشی شده رس عمل‌آوری شده نشان داد [۲۲].

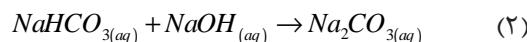
در اکثر تحقیقات گذشته، تأثیر کربنات کلسیم حاصل از روش‌های مختلف بر رفتار خاک مورد مطالعه قرار گرفته است. البته در تحقیقات گذشته از اکسید منیزیم نیز به عنوان افروزنی برای تثبیت خاک استفاده شده است [۲۵ و ۲۶]. در برخی از تحقیقات، این ماده به صورت ترکیبی با سایر افروزنی‌ها به خاک اضافه شده و به منظور کربناته شدن و ایجاد کانی‌های کربنات منیزیم در بین دانه‌های خاک، گاز دی اکسیدکربن به نمونه‌های خاک در حال عمل‌آوری تزریق شده است. در این روش‌ها بخش زیادی از گاز دی اکسیدکربن در عمل، توسط خاک جذب نشده و دوباره به اتمسفر باز می‌گردد. در صورت تهیه کربنات منیزیم به صورت صنعتی و خارج از محیط خاک می‌توان بازدهی جذب دی اکسیدکربن را تا حد زیادی افزایش داد. تحقیقات بسیار محدود انجام شده با کربنات منیزیم حاصل از دی اکسیدکربن نیز بر روی رس صنعتی بنتونیت صورت پذیرفته است. هدف این تحقیق استفاده از کربنات منیزیم تولید شده با جذب دی اکسیدکربن به عنوان مخزن کربن و ذخیره کردن آن در زمین با اختلاط با خاک رس و همچنین بررسی تأثیر کربنات منیزیم بر رفتار خاک رس نرم می‌باشد. در این تحقیق، تأثیر کربنات منیزیم بر رفتار رس طبیعی نرم اخذ

نتایج این تحقیقات نشان داد که تشکیل کربنات کلسیم ناشی از فرآیند MICP در رس کائولین باعث افزایش مقاومت برشی و کاهش نشت تحکیمی خاک می‌شود [۱۹]. محققان نشان دادند که تورم‌پذیری رس‌های مختلف پس از عمل‌آوری با کربنات کلسیم ناشی از فرآیند MICP کاهش می‌یابد [۲۰]. کنان^۴ و همکاران، دو نوع MICP رس مختلف را با کربنات کلسیم به روش عمل‌آوری نمودند و کاهش شاخص خمیری و تراکم‌پذیری و افزایش مقاومت تکمحوری رس‌ها در اثر عمل‌آوری با کربنات کلسیم را گزارش نمودند [۲۱].

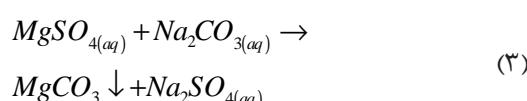
در اکثر تحقیقات گذشته از روش‌های زیستی به کمک باکتری‌های تولیدکننده آنزیم اوره‌آز برای تشکیل کربنات کلسیم در خاک استفاده نمودند. این روش‌ها علاوه‌بر زمانبر بودن و صرف هزینه قابل توجه، معمولاً در فرآیند کشت و تولید کانی، باعث آزاد شدن ترکیبات آمونیوم در محیط می‌شوند که می‌تواند باعث آسیب به محیط‌زیست شود [۱۸]. در تحقیقات اخیر از کانی‌های کربناته تولید شده از جذب دی اکسیدکربن به جای روش‌های زیستی استفاده شده است. همچنین کاربرد کانی‌های کربناته دیگر علاوه‌بر کربنات کلسیم از جمله کربنات آهن (FeCO_3)، کربنات منیزیم (MgCO_3) و مخلوط آنها با کربنات کلسیم در بهبود رفتار خاک‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۲۲ و ۲۳]. کیخا^۵ و همکاران، کانی‌های کربناته مختلف تولید شده با دو روش MICP و جذب دی اکسیدکربن را با هم مقایسه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که با تغییر روش تولید کربنات، ممکن است نوع کانی‌ها، شکل و اندازه ذرات تغییر کند که این مسئله می‌تواند در رفتار خاک بهبودیافته نیز تأثیرگذار باشد [۲۴]. رومیانی^۶ و همکاران، پس از تولید کانی‌های کربناته مختلف با استفاده از

⁴- Kannan⁵- Keykha⁶- Romani

رابطه (۲) باعث تولید محلول کربنات سدیم (Na_2CO_3) شد:



برای تولید رسوب کربنات منیزیم، یون منیزیم به صورت محلول ۱ مولار MgSO_4 با نسبت ۱ به ۱ به محلول کربنات سدیم اضافه شد. با ترکیب این دو محلول مطابق رابطه (۳) رسوب کربنات منیزیم به دست آمد.

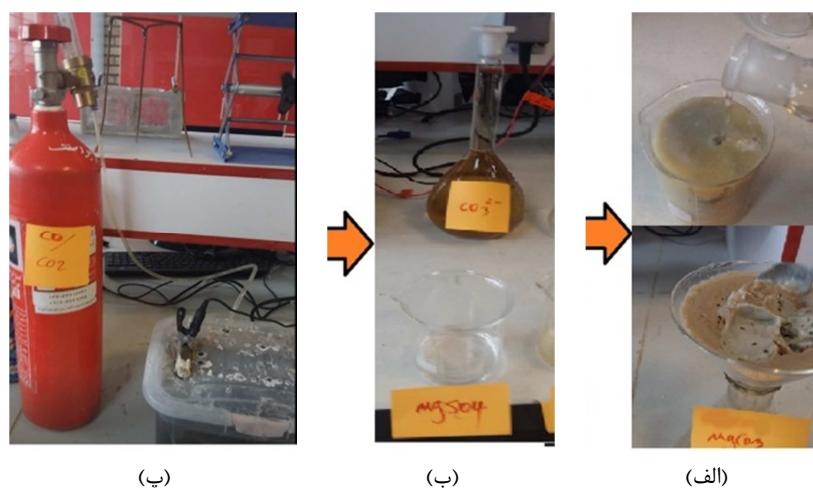


رسوب حاصل با استفاده از کاغذ فیلتر از محلول جدا شده و پس از خشک نمودن به صورت پودر، جهت اختلاط با رس استفاده شد. در نهایت، با مصرف نمودن مواد اولیه شامل ۱ لیتر محلول ۲ مولار هیدروکسید سدیم و ۱ لیتر محلول ۱ مولار MgSO_4 ، حدود ۴۰ گرم پودر کربنات منیزیم تولید شد که در فرآیند تولید به صورت تقریبی حدود ۵۰ درصد وزنی پودر حاصل، گاز CO_2 نیز جذب شد. در شکل ۱ تصاویری از مراحل تولید پودر کربنات منیزیم نشان داده شده است.

شده از بندر گناوه مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر مطالعه رفتار خمیری و تحکیمی رس خالص و رس مخلوط شده با کربنات منیزیم، مقاومت بر شی خاک نیز در هر دو شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده بررسی شده است. کربنات منیزیم مورد استفاده در این تحقیق از یکسو در فرآیند تولید باعث کاهش دی اکسید کربن آزاد در جو شده و از سوی دیگر، نسبت به بسیاری از مصالح رایج مورد استفاده در کارهای عمرانی مانند سیمان و آهک مخاطرات زیست محیطی کمتر داشته و با محیط زیست سازگار است.

۲- تولید کانی های کربناته

برای تولید کربنات منیزیم با جذب دی اکسید کربن از روش پیشنهاد شده توسط رومیانی و همکاران استفاده شده است [۱۸]. مطابق این روش، ابتدا محلول ۲ مولار هیدروکسید سدیم (NaOH) در آب مقطر تهیه شد. سپس گاز دی اکسید کربن با نرخ ۵ میلی لیتر بر دقیقه به مدت ۷۲ ساعت به محلول NaOH تزریق گردید. گاز CO_2 با NaOH مطابق رابطه (۱) واکنش داده و در ادامه، در مجاورت هیدروکسید سدیم موجود در محیط، مطابق



شکل ۱- تصاویری از مراحل تولید پودر کربنات منیزیم؛ (الف) تهیه محلول کربنات سدیم و سولفات منیزیم و (پ) ترکیب دو محلول و رسوب کربنات منیزیم

۱-۳- مصالح مورد آزمایش

۳- روش تحقیق

پارامترهای شاخص خاک رس نمونه برداری شده ارائه شده است. درصد ریزدانه نمونه اخذ شده حدود ۹۱ درصد بوده است. به منظور همگن بودن تمامی نمونه‌ها و یکسان بودن شرایط آنها، دانه‌بندی نمونه خاک اصلاح شده و ذرات درشت‌دانه (مانده روی الک ۲۰۰) حذف شده‌اند. در نهایت، توده خاک عبوری از الک ۲۰۰ کاملاً مخلوط شده تا توده‌ای همگن به دست آید.

در این تحقیق، تأثیر کربنات منیزیم بر رفتار رس نرم بندر گناوه مورد بررسی قرار گرفته است. کربنات منیزیم مورد استفاده براساس روش بیان شده در بخش ۲ تولید شده است. خاک مورد آزمایش رس نرم گناوه است که از عمق ۲ تا ۶ متری اخذ شده است. این رس به صورت طبیعی اشبع بوده و براساس نتایج آزمایش SPT در محل تعداد ضربات SPT ۲ تا ۴ ضربه بوده و در رد نرم طبقه‌بندی می‌شود. در جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و

جدول ۱- خصوصیات خاک رس گناوه

روش تعیین	مقدار	خصوصیات
[۲۷] ASTM D854	۲/۷۸	چگالی ویژه دانه‌ها
[۲۸] ASTM D4318	۳۳	حد روانی (%)
ASTM D4318	۲۱/۵	حد خمیری (%)
ASTM D4318	۱۱/۵	شاخص خمیری (%)
[۲۹] ASTM D422	۹۱	درصد ریزدانه
ASTM D422	۳۹/۵	درصد ذرات لای
ASTM D422	۵۱/۵	درصد ذرات رس
[۳۰] ASTM D2487	CL	طبقه‌بندی متحد
-	۱۵/۰-۱۵/۵	وزن مخصوص خشک طبیعی (kN/m^3)
-	۳۰	درصد رطوبت طبیعی (%)
[۳۱] ASTM D698	۱۶/۲۵	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)
[۳۱] ASTM D698	۲۰	درصد رطوبت بهینه (%)

اطمینان از خلوص کربنات منیزیم تولید شده، آنالیزهای XRD^۸ بر روی نمونه‌هایی از رس و کربنات منیزیم صورت پذیرفت.

۳-۳- برنامه آزمایش‌ها و روش تهیه نمونه

به منظور ارزیابی تأثیر کربنات منیزیم بر رفتار رس، آزمایش‌های دانه‌بندی هیدرومتری، تعیین حدود خمیری، تحکیم و سه‌محوری فشاری CU بر روی نمونه‌های رس خالص و رس مخلوط شده با درصدهای مختلف کربنات منیزیم صورت پذیرفت. آزمایش‌های حدود خمیری در

۲-۳- آنالیز XRD و تصاویر SEM

به منظور بررسی دقیقر ساختار، اندازه و شکل ذرات رس، کربنات منیزیم تولید شده و مخلوط آنها، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی (SEM^۷) از مصالح مورد مطالعه تهیه شد. قبل از تصویربرداری SEM نمونه‌ها به صورت پودر خشک آماده‌سازی شده و با لایه نازکی از طلا پوشانده شدند. همچنین نمونه‌های رس مخلوط شده با کربنات منیزیم، به مدت یک هفته با کنترل دما و رطوبت نگهداری شدند. به منظور تعیین کانی‌های تشکیل‌دهنده رس مورد مطالعه و همچنین برای

⁸- X-ray Diffraction

⁷- Scanning Electron Microscope

مناسب بودن این زمان، حدود خمیری نمونه مخلوط شده با ۱۵ درصد کربنات منیزیم در زمان‌های نگهداری مختلف تعیین و تغییرات حدود خمیری نسبت به زمان نگهداری نمونه نیز بررسی گردید.

۲-۳-۳- آزمایش تحکیم

به منظور بررسی تأثیر کربنات منیزیم بر رفتار تحکیمی خاک رس، آزمایش تحکیم یکبعدی (ائودومتری) مطابق استاندارد ASTM D2435 بر روی نمونه‌های رس خالص و رس مخلوط شده با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد کربنات منیزیم صورت پذیرفت [۳۳]. برای تهیه نمونه‌ها، خاک خشک با درصد وزنی مشخصی از کربنات منیزیم مخلوط شده و سپس آب به مقداری بیشتر از رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم (تقریباً ۲۵ تا ۳۰ درصد) به مخلوط اضافه شد. مخلوط حاصل در قالب استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۶ سانتیمتر به روش کوبیش تر کوبیده شد تا نمونه‌ای همگن با وزن مخصوص حدود ۱۵/۱ تا ۱۵/۳ کیلوتون بر مترمکعب (معادل مقدار وزن مخصوص بر جای رس بnder گناوه) به دست آید [۳۴]. نمونه‌ها با حفظ رطوبت به مدت یک هفته نگهداری شدند. سپس با استفاده از رینگ تحکیم، نمونه مورد آزمایش با قطر ۵ و ارتفاع ۲ سانتیمتر از داخل قالب اخذ شد و در دستگاه تحکیم قرار گرفت. در جدول ۲ مشخصات نمونه‌های مربوط به آزمایش تحکیم ارائه شده است.

زمان‌های ۱ تا ۲۸ روز پس از اختلاط انجام شد و با توجه به نتایج آن و همچنین مطابق تحقیقات گذشته، مدت زمان ۷ روز پس از اختلاط به عنوان زمان مناسب برای انجام سایر آزمایش‌ها مدنظر قرار گرفت [۲۲ و ۲۳]. در ادامه، نحوه تهیه نمونه و انجام آزمایش‌ها توضیح داده است.

۱-۳-۳- آزمایش‌های دانه‌بندی هیدرومتری و حدود خمیری آزمایش هیدرومتری مطابق استاندارد ASTMD422 و آزمایش‌های حدود خمیری مطابق استاندارد ASTM D4318 بر روی نمونه‌های رس خالص و مخلوط شده با کربنات منیزیم انجام شدند. براساس تحقیقات رومیانی و همکاران، افزودن ۵ تا ۱۵ درصد کربنات منیزیم به رس می‌تواند تأثیر قابل توجهی در رفتار آن داشته باشد [۲۲]. با افزایش درصد کانی کربناته به بیش از ۱۵ درصد، تأثیر افزودنی بر رفتار خاک کاهش می‌یابد. بنابراین در این تحقیق نیز نمونه‌های رس با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد کربنات منیزیم و آب مقطر به مقدار ۲۵ درصد وزن مصالح خشک مخلوط شد. برای انجام آزمایش‌های هیدرومتری و حدود خمیری زمان نگهداری نمونه‌ها با کنترل رطوبت مطابق تحقیقات گذشته، ۷ روز در نظر گرفته شد [۲۲، ۲۳ و ۳۲]. با توجه به پایدار بودن کانی منیزیم در معرض آب و عدم وقوع واکنش‌های پوزولانی در نمونه‌های رس مخلوط شده با کربنات منیزیم، مدت زمان ۷ روز برای نگهداری نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش کافی می‌باشد؛ اما به منظور اطمینان از

جدول ۲- خصوصیات نمونه‌های آزمایش تحکیم

عنوان نمونه	درصد افزودنی	وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	مدت زمان هر گام بارگذاری (ساعت)
Clay	صفر	۱۵/۱۰	۷۲
Mg-5	۵	۱۵/۲۲	۲۴
Mg-10	۱۰	۱۵/۲۰	۲۴
Mg-15	۱۵	۱۵/۳۰	۲۴

به منظور ارزیابی تأثیر کربنات منیزیم بر مقاومت برشی رس گناوه، سه محوری فشاری تحکیم یافته زهکشی

۳-۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری سه محوری CU

سانتیمتر به روش کوبیش تر در ۵ لایه کوبیده شد تا نمونه‌ای همگن با وزن مخصوص ۱۵/۱ تا ۱۵/۳ کیلونیوتن بر مترمکعب (معادل مقدار وزن مخصوص برجای رس بندرگناوه) به دست آید [۳۴]. در جدول ۳، مشخصات نمونه‌های مربوط به آزمایش‌های سه‌محوری فشاری ارائه شده است.

نشده (CU) مطابق استاندارد ASTM D4767 بر روی نمونه رس خالص و رس مخلوط شده با ۱۵ درصد کربنات منیزیم صورت پذیرفت [۳۵]. برای تهیه نمونه‌ها، مشابه آزمایش تحکیم، خاک خشک با نسبت وزنی مشخصی از کربنات منیزیم و ۲۵ تا ۳۰ درصد آب مخلوط شد. مخلوط حاصل در قالب استوانه‌ای دو تکه به قطر ۳/۷۵ و ارتفاع ۷

جدول -۳- خصوصیات نمونه‌های آزمایش‌های سه‌محوری

عنوان نمونه	فشار همه جانبی σ_3 (kPa)	درصد افزودنی (%)	وزن مخصوص خشک (kN/m ³)
Clay-50	۵۰	صفر	۱۵/۲۸
Clay-100	۱۰۰	صفر	۱۵/۲۷
Clay-200	۲۰۰	صفر	۱۵/۲۹
Mg-15-50	۵۰	۱۵	۱۵/۱۶
Mg-15-100	۱۰۰	۱۵	۱۵/۱۵
Mg-15-200	۲۰۰	۱۵	۱۵/۱۸

حفره‌ای در دو سر نمونه اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است برای اینکه فشار آب در دو انتهای نمونه بیانگر فشار در داخل نمونه باشد، ضمن استفاده از یک لایه فیلتر مشبك در جدار نمونه، بارگذاری مطابق استاندارد مشبك در شکل ۲ ارائه شده است. با افزایش درصد ASTM D4767 با سرعت کند انجام شد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- دانه‌بندی و حدود خمیری

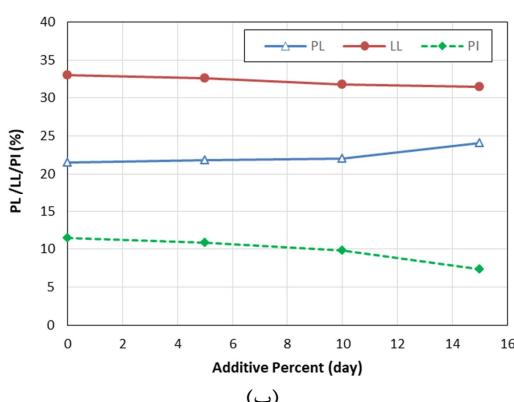
به منظور بررسی تأثیر ذرات کربنات منیزیم بر دانه‌بندی رس، آزمایش هیدرومتری بر روی رس خالص و رس مخلوط شده با کربنات منیزیم صورت پذیرفت. نتایج حاصل در شکل ۲ ارائه شده است. با افزایش درصد کربنات منیزیم، نمودار دانه‌بندی به سمت پایین حرکت می‌کند و ضمن افزایش ابعاد دانه‌های توده خاک درصد رس (ذرات کوچکتر از ۵ میکرومتر) از ۵۱/۵ درصد برای رس خالص به ۳۷ درصد برای رس مخلوط شده با کربنات منیزیم کاهش می‌یابد. این امر می‌تواند ناشی از تجمع ذرات رس بر روی ذرات سوزنی شکل کربنات منیزیم و ایجاد کلوخه‌های میکروونی باشد.

نمونه‌ها پس از یک هفته نگهداری و کنترل رطوبت، به منظور تسريع فرآیند اشباع به مدت ۲۴ ساعت غرقاب شده و سپس از قالب بیرون آورده شده و در سلول سه‌محوری مستقر شدند. اشباع نمونه از سمت پایین با آب هوازدایی شده و تحت فشار ثقلی ۲۵ کیلوپاسکال انجام گردید. همزمان جهت تسريع خروج هوای محبوس در خاک، نمونه از سمت بالا تحت مکش ۱۰ کیلوپاسکال قرار گرفت. پس از ۷ روز اشباع ثقلی، پس فشار ۳۰۰ کیلوپاسکال به صورت مرحله‌ای به نمونه اعمال شد تا ضریب اشباع اسکمپیتون (B) به بیش از ۰/۹۵ برسد. پس از فرآیند اشباع، نمونه‌های رس خالص و نمونه‌های دارای کربنات منیزیم تحت فشارهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال تحکیم شدند. تحکیم نمونه‌ها تا زمانی ادامه یافت که تغییرات حجم نمونه نسبت به زمان تقریباً ثابت شود که در مدت زمان ۲۴ تا ۴۸ ساعت صورت پذیرفت. پس از تحکیم نمونه‌ها بارگذاری قائم به صورت کنترل کرنش با سرعت جابه‌جایی ثابت ۰/۰۲ میلیمتر بر دقیقه و در شرایط زهکشی نشده انجام شد تا نمونه به گسیختگی برسد. همزمان نیروی قائم بسیج شده در نمونه و فشار آب

کربنات منیزیم ارائه شده است. با افزایش درصد کربنات منیزیم، شاخص خمیری رس کاهش یافته و در نتیجه رفتار خاک از رس به سمت لای نزدیکتر می‌شود. مخلوط نمودن رس با ۱۵ درصد کربنات منیزیم باعث کاهش شاخص خمیری خاک از $11/5$ به $7/4$ درصد شده و در نتیجه طبقه‌بندی خاک از رس CL به لای ML تغییر می‌یابد. با توجه به مقادیر درصد رس و شاخص خمیری، ضریب فعالیت رس برای خاک خالص $0/22$ و برای خاک مخلوط شده شده با ۱۵ درصد کربنات منیزیم $0/2$ به دست می‌آید. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزودن ۱۵ درصد کربنات منیزیم به رس گناوه، با وجود کاهش 35 درصدی شاخص خمیری، ضریب فعالیت رس فقط حدود 10 درصد کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد کانی‌های تشکیل‌دهنده رس در حضور کربنات منیزیم دچار تغییر چندانی نشده‌اند و تغییرات ایجاد شده به صورت فیزیکی می‌باشند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که کربنات منیزیم باعث کاهش رفتار خمیری در رس و تغییر رفتار آن به سمت خاک دانه‌ای می‌شود.

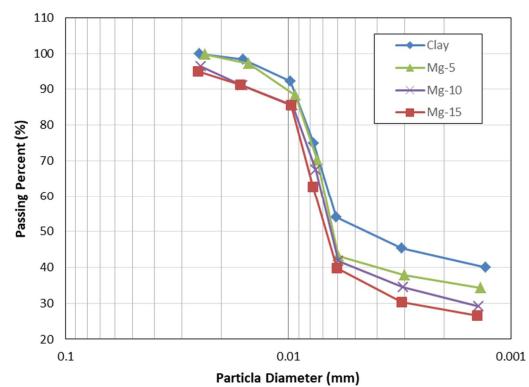
۲-۴- نتایج آزمایش‌های XRD و تصاویر SEM

در شکل ۴، نتایج آنالیز XRD بر روی رس گناوه (شکل ۴- الف) و کربنات منیزیم تولید شده از دی‌اکسیدکربن (شکل ۴- ب) ارائه شده است. براساس نتایج آنالیز XRD، کانی‌های غالب در رس گناوه هیدروکسید سیلیکات منیزیم و دولومیت هستند.



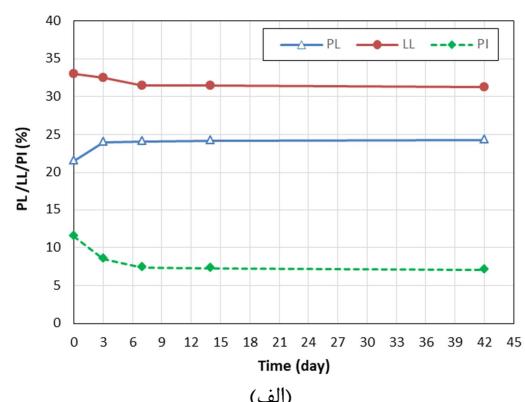
(ب)

شکل ۴- نتایج آنالیز XRD بر روی رس گناوه (الف) و کربنات منیزیم و (ب) درصد کربنات منیزیم



شکل ۲- دانه‌بندی خاک رس خالص و مخلوط شده با درصدهای مختلف کربنات منیزیم

به منظور بررسی تأثیر زمان نگهداری نمونه‌ها بر رفتار خمیری خاک، حدود خمیری رس با ۱۵ درصد کربنات منیزیم در زمان‌های نگهداری مختلف تعیین شد که نتایج حاصل در شکل ۳- الف ارائه شده است. تغییرات حدود خمیری مخلوط رس و کربنات منیزیم با گذشت زمان بخصوص در روزهای اول می‌تواند ناشی از عواملی همچون ریزدانه بودن ذرات کربنات منیزیم و زتا پتانسیل منفی ذرات رس و کربنات منیزیم باشد. با توجه به نتایج به دست آمده تغییرات حدود روانی LL و خمیری PL پس از 3 روز نگهداری تحت شرایط کنترل شده کاهش یافته و پس از 7 روز نگهداری رفتار خمیری تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین همانند تحقیقات گذشته، در تمامی حاضر نیز مدت زمان نگهداری نمونه‌ها در تمامی آزمایش‌ها 7 روز منظور شده است [۲۲]. در شکل ۳- ب، تغییرات حد روانی و خمیری و شاخص خمیری (PI) برای نمونه‌های رس خالص و مخلوط شده با درصدهای مختلف



(الف)

شکل ۳- تغییرات حدود خمیری نسبت به (الف) زمان نگهداری نمونه برای رس با ۱۵ درصد کربنات منیزیم و (ب) درصد کربنات منیزیم

از شکل سوزنی و اندازه ذرات کربنات منیزیم و نحوه قرارگیری آنها بین ذرات رس می‌باشد.

۳-۴- نتایج آزمایش‌های تحکیم

در شکل ۶، نتایج آزمایش تحکیم به صورت نمودارهای تغییرات نسبت منافذ (e) نسبت به تنفس قائم (P) ارائه شده است. با افزایش درصد کربنات منیزیم، نمودار e-log(P) به سمت بالا حرکت کرده و نشست تحکیمی نمونه کاهش می‌یابد. به منظور بررسی دقیق تر رفتار تحکیمی، ضرایب فشردگی (C_c) و تورم (C_s) تعیین و نتایج حاصل در شکل ۷ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد کربنات منیزیم، ضرایب فشردگی کاهش می‌یابد.

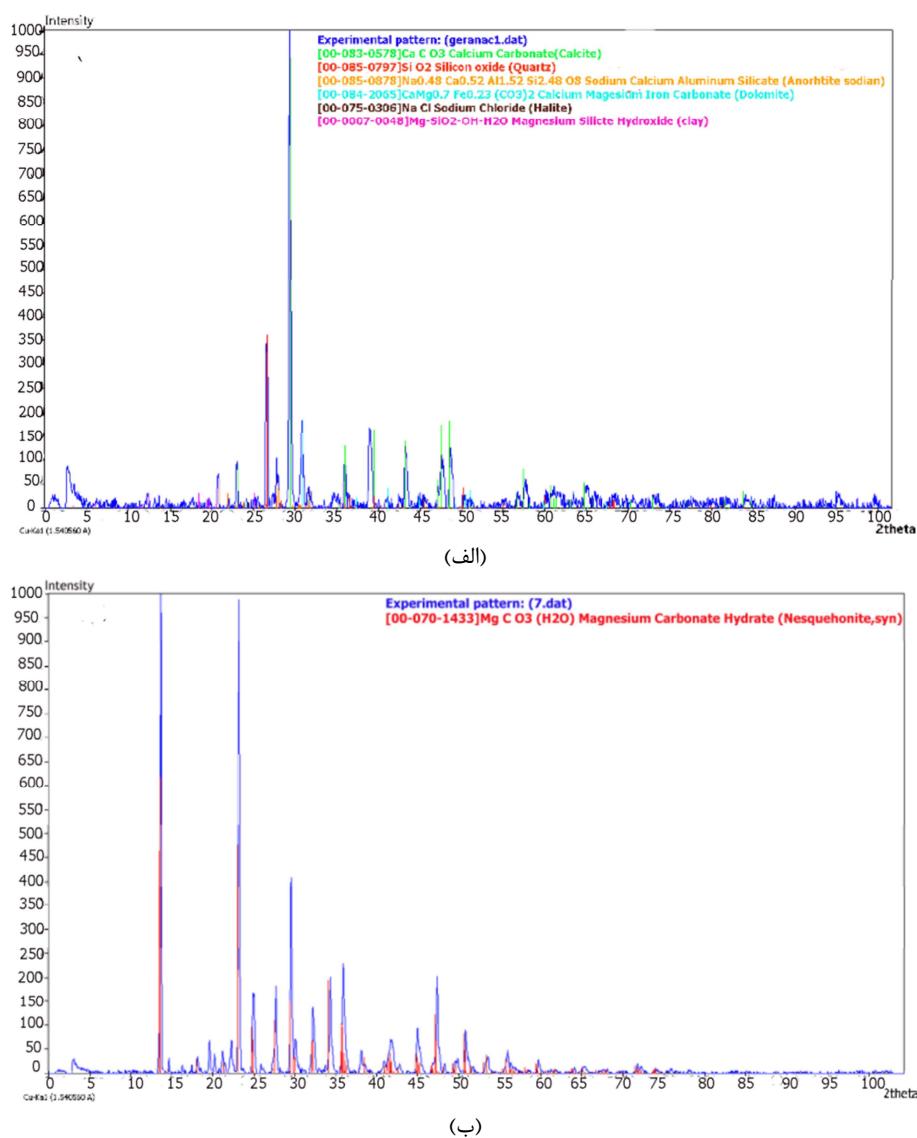
ضرایب تورم برای رس خالص و نمونه‌های تهیه شده با ۱۰ درصد کربنات تقریباً یکسان است؛ اما با افزایش درصد کربنات منیزیم به ۱۵ درصد ضرایب تورم کاهش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. براساس نتایج آزمایش تحکیم با افزودن ۱۵ درصد کربنات منیزیم به رس گناوه، ضرایب فشردگی و تورم به ترتیب ۲۶ و ۲۳ درصد کاهش می‌یابند که می‌تواند باعث کاهش نشست تحکیمی خاک رس شود. همانگونه که در تصاویر SEM نیز مشاهده شد، حضور ذرات سوزنی‌شکل کربنات منیزیم در میان ذرات ورقه‌ای شکل رس، باعث ایجاد ساختاری مقاومتر در رس شده است که این ساختار باعث کاهش تحکیم خاک در مقابل تنש‌های وارد می‌شود.

در شکل ۸، نسبت ضرایب فشردگی رس پس از عمل آوری، $C_c(\text{treated})$ ، به ضرایب فشردگی رس خالص، $C_c(\text{untreated})$ در تحقیقات گذشته ارائه شده و با تحقیق حاضر مقایسه شده است. کانان و همکاران، بر روی نمونه‌های رس مختلف در رده CH و لی، بر روی نمونه رس کائولین در رده MH مطالعه نمودند. در هر دو تحقیق از رسوب کلسیت به روش MICP جهت عمل آوری خاک ریزدانه استفاده شده است [۱۹ و ۲۱].

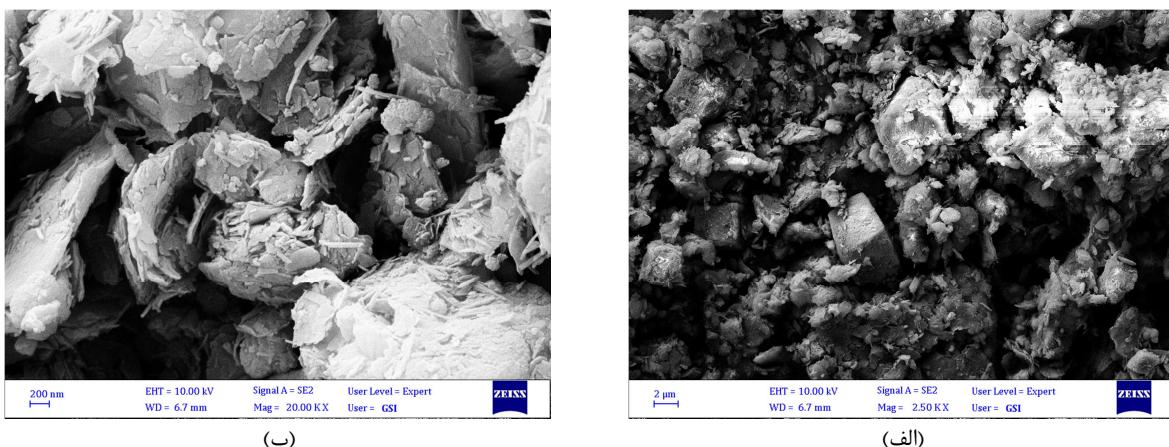
همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، کربنات منیزیم تولید شده به صورت هیدراته بوده که شامل کانی نسکوهانیت^۹ با ترکیب شیمیایی $\text{MgCO}_3(\text{H}_2\text{O})_3$ است. براساس تحقیقات پژوهشگران، این کانی در دمای محیطی حدود ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد تشکیل می‌شود که با فرآیند تولید در تحقیق حاضر نیز مطابقت دارد [۳۶].

در شکل ۵، تصاویر SEM از خاک رس مورد مطالعه (۵-الف و ب)، کربنات منیزیم تولید شده (۵-پ و ت) و رس مخلوط شده با کربنات منیزیم (۵-ث و ج) با بزرگنمایی‌های مختلف مشاهده می‌شود. رس گناوه از ذرات لای بلوکی و رس ورقه‌ای تشکیل شده است. ابعاد ورقه‌های رس عمدتاً کوچکتر از یک میکرومتر است که به هم پیوسته و به صورت کلوخه‌ای با ابعاد بزرگ‌تر و در حدود یک میکرومتر قابل مشاهده می‌باشند. شکل ۵-پ و ت تصاویر SEM از پودر کربنات منیزیم تولید شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این تصاویر، ذرات نسکوهانیت تیغه‌ای و سوزنی‌شکل به وضوح قابل مشاهده است. قطعات بلوکی و تیغه‌ای از ذرات سوزنی در کنار هم تشکیل شده است که براساس تصاویر، اتصال بین آنها چندان مستحکم نبوده و انتظار می‌رود در هنگام نمونه‌سازی، در اثر فشار وارد دوباره خرد شده و به ذرات سوزنی کوچکتر تبدیل شوند. در شکل ۵-ث و ج تصاویر SEM از رس مخلوط شده با کربنات منیزیم نشان داده شده است. ابعاد ذرات کربنات منیزیم بسیار بزرگ‌تر از ذرات خاک بوده و چسبیدن ذرات رس به ذرات سوزنی شکل کربنات منیزیم باعث ایجاد کلوخه‌های بزرگ‌تر و تغییر رفتار خاک از رسی به دانه‌ای می‌شود که با نتایج آزمایش‌های حدود خمیری نیز تطابق دارد. بنابراین SEM براساس نتایج آزمایش‌های شاخص و تصاویر SEM می‌توان گفت که تغییرات رفتار خاک رس در حضور کربنات منیزیم عمدتاً ناشی از عوامل فیزیکی بوده و ناشی

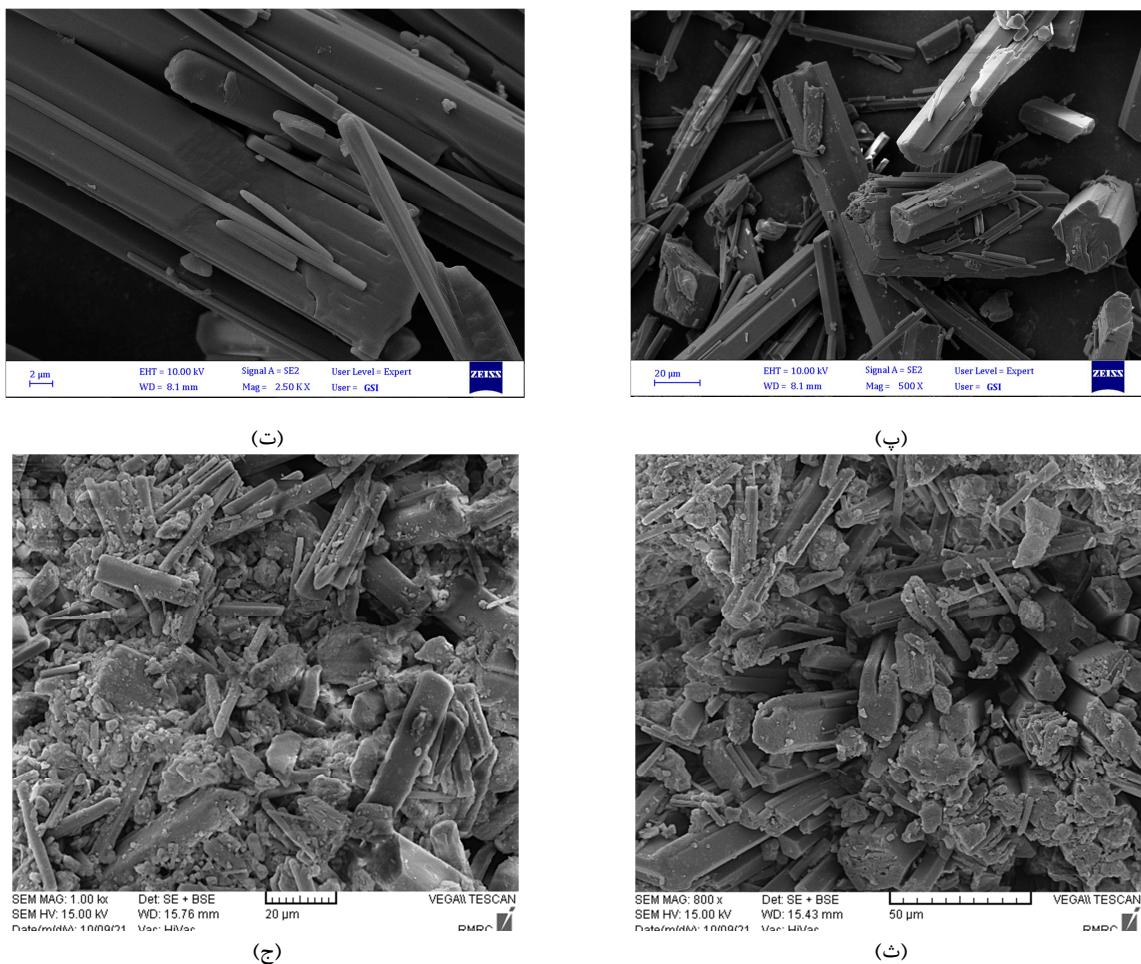
^۹- Nesquehonite



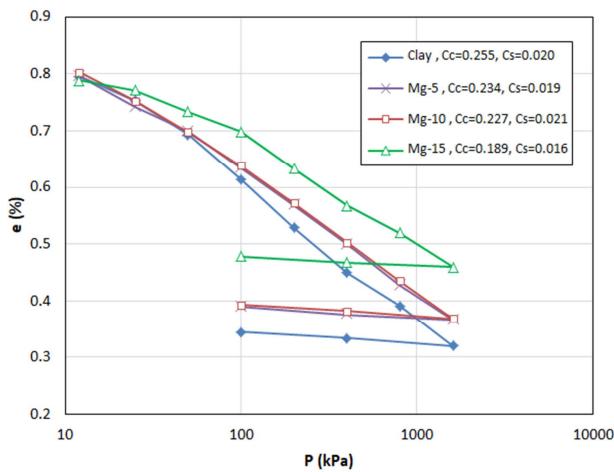
شکل ۴- نتایج آنالیز XRD بر روی (الف) رس گناوه و (ب) کربنات منیزیم تولید شده



شکل ۵- تصاویر SEM (الف) رس گناوه با بزرگنمایی ۲ میکرومتر، (ب) رس گناوه با بزرگنمایی ۲۰۰ نانومتر، (پ) کربنات منیزیم با بزرگنمایی ۲۰ میکرومتر، (ت) کربنات منیزیم با بزرگنمایی ۲ میکرومتر، (ث) رس مخلوط شده با کربنات منیزیم با بزرگنمایی ۵۰ میکرومتر و (ج) رس مخلوط شده با کربنات منیزیم با بزرگنمایی ۲۰ میکرومتر



شکل ۵- ادامه



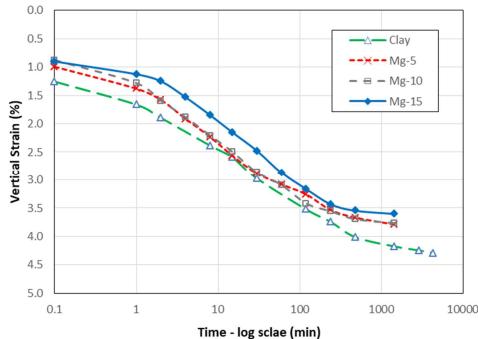
شکل ۶- تغییرات نسبت منافذ نسبت به تنفس قائم در آزمایش‌های تحکیم

همکاران، بر روی رس بنتونیت در رده CH است که نشان می‌دهد ۱۵ درصد کربنات منیزیم تولید شده به روش جذب CO_2 می‌تواند ضریب فشردگی رس CH را به کمتر از نصف کاهش دهد. همچنین مشاهده می‌شود کانی‌های

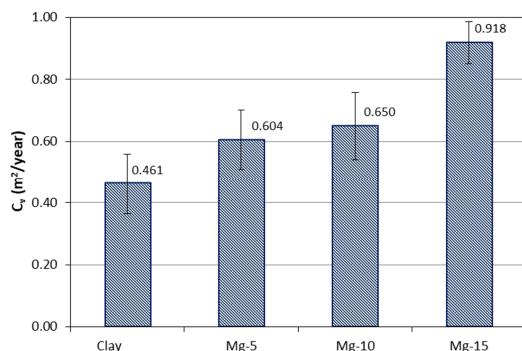
نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر با تحقیقات پژوهشگران دیگر، هم‌استا بوده و نسبت به این دو تحقیق کاهش بیشتری را در ضریب فشردگی رس نشان می‌دهد [۲۱ و ۱۹]. بیشترین تأثیر مربوط به تحقیقات رومیانی و

ارزیابی تأثیر کربنات منیزیم تولید شده از جذب گاز CO_2 بر بهبود رفتار رس بnder گاوه

با افزودن ۱۵ درصد کربنات منیزیم، ضریب تحکیم از 0.461×10^{-6} به 0.918×10^{-6} مترمربع بر سال افزایش یافته است که در نتیجه باعث می‌شود سرعت تحکیم تقریباً به دو برابر افزایش یابد.



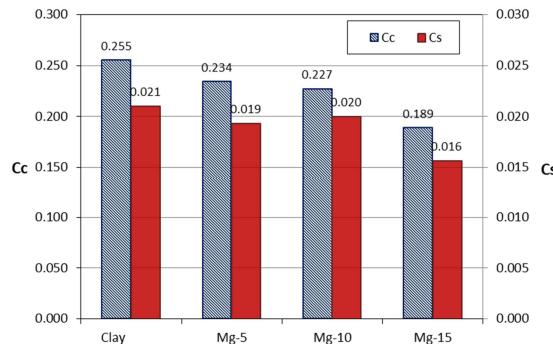
شکل ۹- تغییرات کرنش قائم نسبت به زمان در آزمایش تحکیم برای نمونه‌های تحت تنش 400 کیلوپاسکال



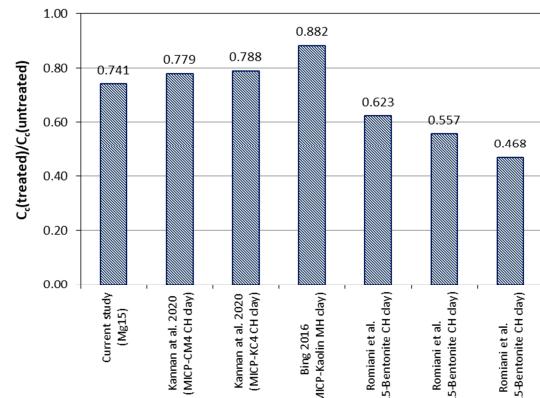
شکل ۱۰- ضریب تحکیم C_v برای نمونه‌های تهیه شده با درصد کربنات مختلف

رومیانی و همکاران، برای رس بنتونیت مخلوط شده با ۱۵ درصد کربنات منیزیم، افزایش ۵ الی ۱۰ برابری در ضریب تحکیم را گزارش نموده‌اند. با توجه به نتایج آنالیز XRD، خاک رس گناوه دارای کانی‌هایی با فعالیت پایین بوده و نتایج آزمایش‌های حدود خمیری نیز نشان‌دهنده خصوصیات خمیری پایین این خاک می‌باشد. در حالی که رس بنتونیت عمدتاً شامل کانی مونت موریلونیت با خصوصیات خمیری بالا است [۲۲]. مقایسه نتایج رومیانی و همکاران و نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که کارآیی کربنات منیزیم و میزان تأثیر آن بر سرعت تحکیم رس، به خصوصیات خمیری رس وابسته است.

سیدریت (Fe-15) و کلسیت (Ca-15) نیز تأثیر چشمگیری داشته‌اند.

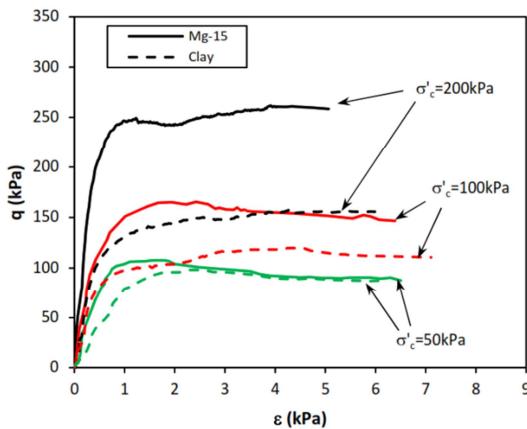


شکل ۷- ضرایب فشردگی و تورم برای نمونه‌های تهیه شده با درصد کربنات مختلف



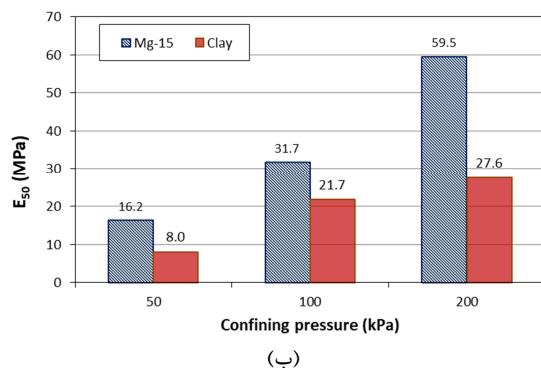
شکل ۸- نسبت ضریب فشردگی رس عمل آوری شده به رس خالص در تحقیقات مختلف

در مسائل مربوط به تحکیم خاک رس علاوه‌بر نشست تحکیم، سرعت تحکیم نیز می‌تواند حائز اهمیت باشد. بنابراین نرخ تحکیم نسبت به زمان برای آزمایش‌های انجام شده تحت تنش‌های مختلف بررسی شد. به عنوان نمونه‌ای از نتایج، در شکل ۹، تغییرات کرنش قائم نسبت به زمان در مقیاس لگاریتمی برای نمونه‌های تحت تنش 400 کیلوپاسکال ارائه شده است. به منظور ارزیابی تأثیر کربنات منیزیم بر نرخ تحکیم، ضریب تحکیم (C_v) که نشان‌دهنده سرعت تحکیم است محاسبه شده است. در شکل ۱۰، میانگین مقادیر C_v برای تنش‌های تحکیمی مختلف نسبت به درصد کربنات منیزیم ارائه شده است.



شکل ۱۱- نمودارهای تنش انحرافی- کرنش محوری

به عبارت دیگر، حضور ذرات سوزنی شکل کربنات منیزیم باعث می‌شود که با افزایش تنش موثر همه‌جانبه، مقاومت برشی و سختی خاک رس در شرایط بارگذاری زهکشی‌نشده نیز افزایش یابد و تحت تنش محوری خاک رفتار تردتر نشان دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر، در شکل ۱۲، تغییرات تنش انحرافی در لحظه گسیختگی و مدول الاستیسیته معادل ۵۰ درصد تنش انحرافی حداکثر (E_{50}) برای نمونه‌های مختلف تحت تنش‌های همه‌جانبه مختلف نشان داده شده است. با افزودن ۱۵ درصد کربنات منیزیم به رس، برای نمونه تحکیم‌یافته با تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال مقاومت فشاری زهکشی‌نشده حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد؛ در حالی که برای نمونه تحت تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال افزایش ۶۷ درصدی مقاومت فشاری زهکشی‌نشده مشاهده می‌شود.



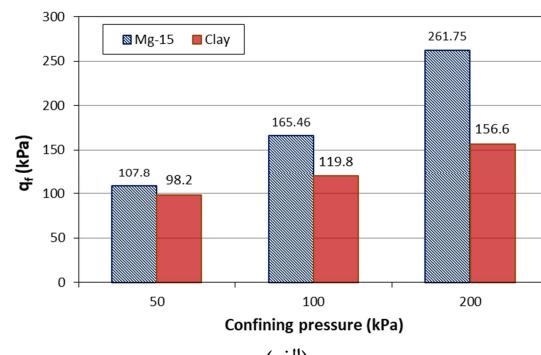
(ب)

شکل ۱۲- (الف) تنش انحرافی در لحظه گسیختگی و (ب) مدول الاستیسیته E_{50} برای نمونه‌های دارای ۱۵ درصد کربنات منیزیم و رس خالص تحت تنش‌های همه‌جانبه مختلف

۴-۴- نتایج آزمایش‌های سه‌محوری

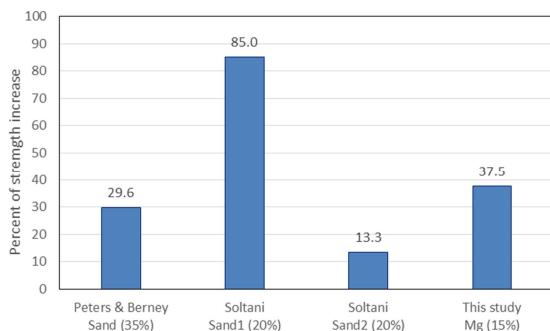
به منظور ارزیابی تأثیر تنش محصور‌کننده بر مقاومت برشی رس مخلوط شده با کربنات منیزیم، آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم‌یافته زهکشی‌نشده (CU) بر روی نمونه‌های رس خالص و رس مخلوط شده با ۱۵ درصد کربنات منیزیم تحت تنش‌های محصور‌کننده همسان ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال صورت پذیرفت. در شکل ۱۱، تغییرات تنش انحرافی نسبت به کرنش محوری برای نمونه‌های رس خالص و رس مخلوط شده با کربنات منیزیم تحت تنش‌های همه‌جانبه مختلف نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌های رس مخلوط شده با کربنات منیزیم نسبت به نمونه‌های رس خالص مقاومت برشی بیشتری نشان می‌دهند. با افزایش تنش همه‌جانبه، تأثیر کربنات منیزیم بر مقاومت برشی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

ذرات سوزنی شکل منیزیم باعث ایجاد رفتار دانه‌ای تر در خاک رس می‌شوند. با افزایش تنش همه‌جانبه در هر رفتگی ذرات سوزنی شکل کربنات منیزیم بیشتر شده که باعث افزایش اصطکاک بین ذرات و در نتیجه، افزایش مقاومت برشی خاک حتی در شرایط زهکشی‌نشده می‌شود. با توجه به شکل ۱۱، با اختلاط رس با ۱۵ درصد کربنات منیزیم، شبیه نمودار تنش- کرنش نیز به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.



(الف)

حالی که در تحقیق حاضر با افزایش تنش همه‌جانبه مقاومت برشی زهکشی نشده مخلوط رس-کربنات منیزیم نسبت به رس خالص افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- درصد افزایش مقاومت برشی نمونه رس- ماسه نسبت به رس خالص تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال

با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد ذرات سوزنی‌شکل کربنات منیزیم نسبت به مصالح معمول دانه‌ای مانند ذرات سیلیسی ماسه و لای رفتار پیچیده‌تری در رس ایجاد می‌کنند؛ به گونه‌ای که با افزایش تنش مؤثر در خاک، مقاومت برشی حتی در شرایط زهکشی نشده نیز به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که در مصالح دانه‌ای دیگر مانند ماسه و لای سیلیسی دور از انتظار می‌باشد. این امر می‌تواند ناشی از شکل سوزنی و درهم‌رفتگی ذرات کربنات منیزیم تحت تنش‌های همه‌جانبه بالاتر باشد که باعث افزایش مقاومت برشی می‌شود. عوامل دیگری همچون زتاپتانسیل منفی و جذب آب قابل توجه ذرات کربنات منیزیم نیز می‌تواند باعث ایجاد تعامل بیشتری با خاک رس در مقایسه با مصالح دانه‌ای سیلیسی شده و در افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده تأثیرگذار باشد.

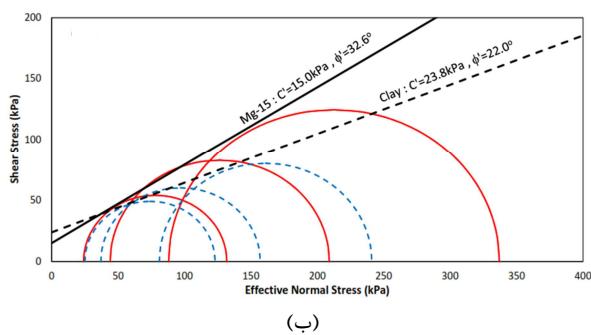
در شکل ۱۴، دواire موهير معادل حداکثر مقاومت برشی به همراه پوش گسیختگی موهير- کولمب در فضای تنش کل (شکل ۱۴-الف) و تنش مؤثر (شکل ۱۴-ب) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در نمونه‌های رس مخلوط شده با کربنات منیزیم، شیب پوش گسیختگی نسبت به رس خالص افزایش می‌یابد. با افزودن ۱۵ درصد کربنات منیزیم زاویه اصطکاک داخلی خاک در شرایط زهکشی نشده (ϕ_{u}) از ۱۰ درجه به ۱۹ درجه و

کربنات منیزیم تأثیر قابل توجهی بر سختی رس در بارگذاری زهکشی نشده داشته و نتایج آزمایش‌های ۲۰۰ سه‌محوری نشان می‌دهد که تحت تنش همه‌جانبه ۱۵ درصد کربنات منیزیم سختی نمونه می‌تواند به بیش از دو برابر افزایش یابد. کانی کربنات منیزیم ترکیبی پایدار بوده و تغییرات ایجاد شده ناشی از افزودن آن به خاک رس از نوع فیزیکی می‌باشد. بنابراین به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر کربنات منیزیم بر مقاومت برشی رس، نتایج حاصل از این تحقیق با تحقیقات سلطانی و پیترز و برنی^{۱۰} که تأثیر درصد ماسه بر رفتار مخلوط رس- ماسه را بررسی نموده‌اند مقایسه شده است [۳۷ و ۳۸]. سلطانی دو نوع ماسه با اندازه دانه‌های ۲/۸ میلیمتر (S1) و ۱/۴۴ میلیمتر (S2) را به رس لای‌دار در رده CL اضافه نمود [۳۷]. پیترز و برنی، هم ماسه رودخانه‌ای با اندازه ذرات ۲ تا ۲/۳۶ میلیمتر را با رس لای‌دار در رده CL مخلوط نمودند [۳۸]. در شکل ۱۳، درصد افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه رس- ماسه نسبت به رس خالص برای مطالعات سلطانی و پیترز و برنی، در مقایسه با تحقیق حاضر براساس نتایج آزمایش سه‌محوری تحت تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال ارائه شده است. مقایسه نتایج مطالعات گذشته نشان می‌دهد که افزودنی‌های سیلیسی مانند ماسه سیلیسی که در اختلاط با رس به صورت فیزیکی عمل می‌کنند، می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر مقاومت برشی رس داشته باشند. شکل و اندازه ذرات افزودنی به میزان تأثیر بر رفتار مقاومتی رس تأثیرگذار است. این مساله در تحقیق حاضر نیز که از ذرات سوزنی‌شکل کربنات منیزیم استفاده شده است قابل توجه می‌باشد.

در آزمایش‌های پیترز و برنی، با افزایش تنش همه‌جانبه به ۳۴۵ کیلوپاسکال مقاومت برشی زهکشی نشده مخلوط رس- ماسه (دارای ۳۵ درصد ماسه) نسبت به رس خالص حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد؛ در

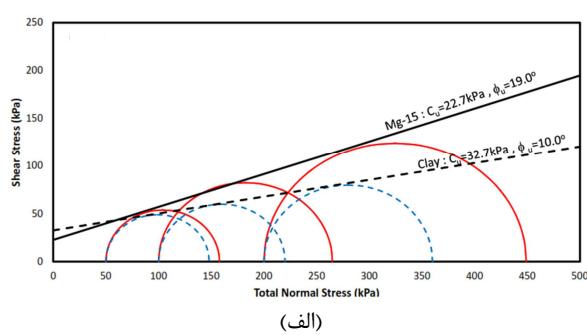
¹⁰- Peters and Berney

تحقیقات انجام شده با روش MICP معمولاً افزایش چسبندگی پس از عمل آوری با کلیست مشهود بوده؛ اما تغییرات زاویه اصطکاک داخلی چندان قابل توجه نمی‌باشد [۱۹]. دلیل این مسئله احتمالاً خرد شدن سیمان ایجاد شده بین دانه‌ها در روش MICP در اثر افزایش تنش همه‌جانبه می‌باشد که باعث می‌شود افزایش مقاومت برشی در تنش‌های همه‌جانبه بالا چندان محسوس نباشد.



(ب)

زاویه اصطکاک داخلی خاک در شرایط زهکشی شده (ϕ) از ۲۲ به ۳۲/۶ درجه افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از آزمایش سه‌محوری نشان می‌دهد که استفاده از کربنات منیزیم به صورت پودر، باعث بروز رفتار دانه‌ای در خاک رس می‌شود که با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های شاخص و تحکیم و تصاویر SEM نیز تطابق دارد. نتایج این تحقیق با نتایج آزمایش‌های برش مستقیم کند انجام شده توسط رومیانی و همکاران تطابق دارد [۲۲]. در



(الف)

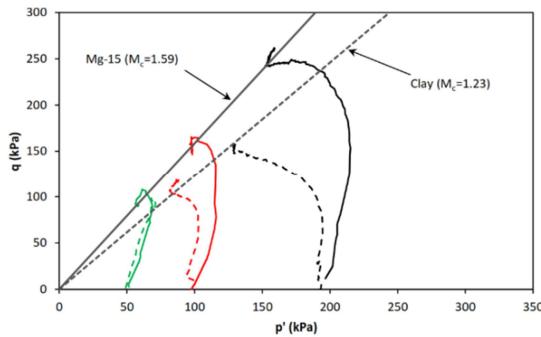
شکل ۱۴- دوایر موهر- کولمب و پوش گسیختگی در شرایط (الف) تنش کل و (ب) تنش مؤثر

منیزیم نشان می‌دهند. مقایسه خطوط بحرانی برای رس خالص و رس عمل آوری شده نشان می‌دهد که شیب خط بحرانی خاک رس گناوه در اثر اختلاط با کربنات منیزیم حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین کربنات منیزیم نه تنها باعث افزایش سختی و مقاومت برشی حداکثر رس می‌شود؛ بلکه می‌تواند رفتار خاک را در محدوده کرنش‌های بزرگ‌تر تا حالت بحرانی نیز بهبود دهد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق کربنات منیزیم تولید شده با جذب دی‌اکسید کربن به عنوان مخزن کربن با هدف ذخیره کردن آن در زمین با خاک رس مخلوط شده و تأثیر کربنات منیزیم بر رفتار خاک رس نرم مورد مطالعه قرار گرفت. تأثیر کربنات منیزیم تولید شده از گاز CO_2 بر بهبود رفتار خاک رس بندر گناوه با انجام آزمایش‌های مختلف شامل آزمایش‌های حدود خمیری، تحکیم و مقاومت فشاری سه‌محوری تحقیم یافته زهکشی نشده مطالعه شد.

شکل ۱۵، مسیر تنش آزمایش‌های انجام شده با شرایط تحکیم همسان را در فضای $q-p'$ نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، مسیر تنش نمونه‌های رس خالص در مقایسه با نمونه‌های دارای کربنات منیزیم به سمت چپ متمایل شده‌اند که نشان‌دهنده کاهش سریع‌تر تنش مؤثر در اثر ایجاد اضافه فشار آب حفره‌ای با افزایش تنش انحرافی می‌باشد.

شکل ۱۵- مسیر تنش مؤثر $q-p'$ برای نمونه‌های رس خالص و مخلوط شده با ۱۵ درصد کربنات منیزیم

بنابراین نمونه‌های رس خالص، رفتار انقباضی بیشتری نسبت به نمونه‌های مخلوط شده با کربنات

می‌تواند علاوه بر بهبود خصوصیات خمیری و نشست تحکیمی، مقاومت برشی رس‌های نرم را نیز بهبود دهد. البته بهبود رفتار رس با افزودنی‌های سیلیسی مانند ماسه نیز قابل دست‌یابی است. اما هدف اصلی این تحقیق اختلاط کربنات منیزیم با خاک رس نرم در محل در راستای کاهش دی‌اکسیدکربن موجود در اتمسفر بوده است. نتایج این تحقیق نشان داد، مخلوط کردن کربنات منیزیم با خاک رس باعث بهبود رفتار خاک رس نیز می‌شود.

محدودیت‌های تحقیق

در این تحقیق، تأثیر کربنات منیزیم تولید شده از گاز CO_2 بر بهبود رفتار خاک رس بnder گناوه و در محدوده مشخصی از وزن مخصوص (۱۵ تا $15/3$ کیلونیوتن بر مترمکعب) مطالعه شده و نتایج بدست آمده نیز محدود به همین جنس خاک رس و در محدوده پارامترهای تعریف شده است. بدیهی است برای تعمیم نتایج به شرایط متفاوت لازم است در ادامه این تحقیق، مطالعات جامع بر روی خاک‌های رس با جنس و خصوصیات مختلف، در دامنه وسیعی از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی و در شرایط مختلف تنש‌های اولیه صورت پذیرد.

این تحقیق با مقیاس آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. جهت ارزیابی اقتصادی و اجرایی روش پیشنهادی در این تحقیق لازم است در آینده مطالعات بزرگ‌مقیاس و تحلیل‌های اقتصادی و آنالیزهای چرخه زندگی صورت پذیرد.

قدرتانی

این پژوهه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

خلاصه‌ای از مهمترین نتایج به دست آمده از این مطالعات به شرح زیر می‌باشد:

۱- با توجه به نتایج آزمایش‌های هیدرومتری و حدود خمیری، کربنات منیزیم باعث افزایش ابعاد دانه‌ها و کاهش شاخص خمیری خاک رس می‌شود. با توجه به تصاویر SEM، ذرات کربنات منیزیم سوزنی‌شکل بوده و ابعاد آنها بزرگ‌تر از ذرات رس است. چسبیدن ذرات و ورقه‌های رس به ذرات کربنات منیزیم باعث کلوخه‌ای شدن خاک شده و از سوی دیگر، توزیع ذرات سوزنی‌شکل در خاک باعث بروز رفتار دانه‌ای در رس می‌شود.

۲- با افزودن کربنات منیزیم به رس گناوه، ضرایب فشردگی C_c و تورم C_s به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابند. ضریب تحکیم C_v نیز می‌تواند بیش از دو برابر افزایش پیدا کند. بنابراین اختلاط رس با کربنات منیزیم از یکسو باعث کاهش نشست تحکیمی رس شده و از سوی دیگر، سرعت وقوع آن را نیز افزایش می‌دهد.

۳- نتایج آزمایش‌های سه‌محوری نشان می‌دهد که نمونه‌های مخلوط شده با کربنات منیزیم پس از تحکیم تحت تنش همه‌جانبه همسان مقاومت برشی بیشتری نسبت به رس خالص نشان می‌دهند و با افزایش تنش همه‌جانبه این اختلاف بیشتر نیز می‌شود. در واقع، با افزایش تنش همه‌جانبه ذرات سوزنی‌شکل کربنات منیزیم در هم فرو رفته و مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد.

۴- با توجه به نتایج آزمایش‌های سه‌محوری، با افزودن ۱۵ درصد کربنات منیزیم به رس نرم گناوه، زاویه اصطکاک داخلی خاک در هر دو شرایط زهکشی‌شده و زهکشی‌نشده افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. بنابراین با افزایش عمق بهسازی و تنش همه‌جانبه، کربنات منیزیم

References

- [1] Khattab SA, Al-Mukhtar M, Fleureau JM. Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. *Journal of materials in civil engineering*. 2007 Apr; 19(4): 358-366. doi: [10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:4\(358\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:4(358))
- [2] Kavak A, Baykal G. Long-term behavior of lime-stabilized kaolinite clay. *Environmental earth sciences*. 2012 Aug; 66: 1943-1955. doi: [10.1007/s12665-011-1419-8](https://doi.org/10.1007/s12665-011-1419-8)
- [3] Tahir AM, Sert S. Effect of Olivine Additive on the Shear Resistance of Fine-Grained Soils: A Sustainable Approach for Risk Mitigation and Environmental Impact Reduction. *Sustainability*. 2023 Jul 6; 15(13): 10683. doi: [10.3390/su151310683h](https://doi.org/10.3390/su151310683h)
- [4] Jha AK, Sivapullaiah PV. Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil. *Engineering Geology*. 2015 Nov 23; 198: 53-64. doi: [10.1016/j.enggeo.2015.08.020](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.020)
- [5] Kazemzadeh M, Zad A, Yazdi M, Chamani A. Stabilization of Lead and Zinc Contaminated Clay Soils with Metakaolin. *Civil Infrastructure Researches*. 2023 Feb 20; 8(2): 69-83. doi: [10.22091/CER.2022.7756.1349](https://doi.org/10.22091/CER.2022.7756.1349) [In Persian]
- [6] Mirzaei K, Ghanizadeh AR, Bakhtiari S. Strength Characteristics of High Plasticity Clay Sub-grade Soil Stabilized with Ground Granulated Blast Furnas Slag, Fly-Ash and Diatomite. *Civil Infrastructure Researches*. 2021 Feb 19; 6(2): 67-78. doi: [10.22091/CER.2021.6858.1241](https://doi.org/10.22091/CER.2021.6858.1241) [In Persian]
- [7] Kılıç R, Küçükali Ö, Ulamiş K. Stabilization of high plasticity clay with lime and gypsum (Ankara, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2016 May; 75: 735-744. doi: [10.1007/s10064-015-0757-2](https://doi.org/10.1007/s10064-015-0757-2)
- [8] Oluwatuyi OE, Ojuri OO, Khoshghalb A. Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020 Feb 1; 12(1): 160-167. doi: [10.1016/j.jrmge.2019.07.010](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.010)
- [9] Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete research*. 2004 Sep 1; 34(9): 1489-1498. doi: [10.1016/j.cemconres.2004.01.021](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021)
- [10] Zhang M, Guo H, El-Korchi T, Zhang G, Tao M. Experimental feasibility study of geopolymers as the next-generation soil stabilizer. *Construction and building materials*. 2013 Oct 1; 47: 1468-1478. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.017)
- [11] Cristelo N, Glendinning S, Fernandes L, Pinto AT. Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. *Acta Geotechnica*. 2013 Aug; 8: 395-405. doi: [10.1007/s11440-012-0200-9](https://doi.org/10.1007/s11440-012-0200-9)
- [12] Shan Y, Liu Z, Guan D. CO₂ emissions from China’s lime industry. *Applied energy*. 2016 Mar 15; 166: 245-252. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.04.091](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.091)
- [13] Gutiérrez AS, Van Caneghem J, Martínez JB, Vandecasteele C. Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba. *Journal of Cleaner production*. 2012 Aug 1; 31: 126-136. doi: [10.1016/j.jclepro.2012.02.035](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.035)
- [14] Mohajan HK. Greenhouse gas emissions, global warming and climate change. InProceedings of the 15th Chittagong Conference on Mathematical Physics, Jamal Nazrul Islam Research Centre for Mathematical and Physical Sciences (JNIRCMPS), Chittagong, Bangladesh 2017 Mar; 16: 1-10.
- [15] Lead C. Mineral carbonation and industrial uses of carbon dioxide. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. 2005 Oct 10; 10: 319.
- [16] Venuleo S, Laloui L, Terzis D, Hueckel T, Hassan M. Microbially induced calcite precipitation effect on soil thermal conductivity. *Géotechnique letters*. 2016 Mar; 6(1): 39-44. doi: [10.1680/jgele.15.00125](https://doi.org/10.1680/jgele.15.00125)
- [17] GGNN A, Kawasaki S. Factors affecting sand solidification using MICP with Pararhodobacter sp. *Materials Transactions*. 2018 Jan 1; 59(1): 72-81. doi: [10.2320/matertrans.M-M2017849](https://doi.org/10.2320/matertrans.M-M2017849)
- [18] Keykha HA, Mohamadzadeh H, Asadi A, Kawasaki S. Ammonium-free carbonate-producing bacteria as an ecofriendly soil biostabilizer. *Geotechnical Testing Journal*. 2019 Jan 2; 42(1): 19-29. doi: [10.1520/GTJ20170353](https://doi.org/10.1520/GTJ20170353)
- [19] Li B. Geotechnical properties of biocement treated sand and clay. Doctoral dissertation, Nanyang Technological University. 2015. doi: [10.32657%2F10356%2F62560](https://doi.org/10.32657%2F10356%2F62560)
- [20] Islam MT, Chittoori BC, Burbank M. Evaluating the applicability of biostimulated calcium carbonate precipitation to stabilize clayey soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020 Mar 1; 32(3): 04019369. doi: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003036](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003036)
- [21] Kannan K, Bindu J, Vinod P. Engineering behaviour of MICP treated marine clays. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2020 Aug 8; 38(7): 761-769. doi: [10.1080/1064119X.2020.1728791](https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1728791)
- [22] Romiani HM, Keykha HA, Talebi M, Asadi A, Kawasaki S. Green soil improvement: using carbon dioxide to enhance the behaviour of clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*. 2021 Feb 19; 176(5): 301-309. doi: [10.1680/jgrim.20.00073](https://doi.org/10.1680/jgrim.20.00073)

- [23] Keykha HA, Romiani HM, Zebardast E, Asadi A, Kawasaki S. CO₂-induced carbonate minerals as soil stabilizing agents for dust suppression. *Aeolian Research*. 2021 Jul 1; 52: 100731. doi: [10.1016/j.aeolia.2021.100731](https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100731)
- [24] Keykha HA, Zangani A, Romiani HM, Asadi A, Kawasaki S, Radmanesh N. Characterizing Microbial and CO₂-Induced Carbonate Minerals: Implications for Soil Stabilization in Sandy Environments. *Minerals*. 2023 Jul 23; 13(7): 976. doi: [10.3390/min13070976](https://doi.org/10.3390/min13070976)
- [25] Onyekwena CC, Li Q, Wang Y, Alvi IH, Li W, Hou Y, Zhang X, Zhang M. Dredged marine soil stabilization using magnesia cement augmented with biochar/slag. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024 Mar 1; 16(3): 1000-1017. doi: [10.1016/j.jrmge.2023.05.005](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.05.005)
- [26] Chen S, Ni P, Sun Z, Yuan K. Geotechnical Properties and Stabilization Mechanism of Nano-MgO Stabilized Loess. *Sustainability*. 2023 Feb 28; 15(5): 4344. doi: [10.3390/su15054344](https://doi.org/10.3390/su15054344)
- [27] ASTM D854. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International, West Conshohocke, 2014.
- [28] ASTM D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, 2017.
- [29] ASTM D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, 2007.
- [30] ASTM D2487. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, 2000.
- [31] ASTM D698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM international, West Conshohocken, 2007.
- [32] Talebi M. (2020). Improvement of clay characteristics using carbonate produced by CO₂. MSc Thesis, Civil Engineering, Buein Zahra Technical University. [In Persian]
- [33] ASTM D2435/D2435M. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. ASTM International, West Conshohocken. 2020.
- [34] Ladd RS. Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical testing journal*. 1978 Mar 1; 1(1): 16-23. doi: [10.1520/GTJ10364J](https://doi.org/10.1520/GTJ10364J)
- [35] ASTM D4767. Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. ASTM International, West Conshohocken. 2011.
- [36] Glasser FP, Jauffret G, Morrison J, Galvez-Martos JL, Patterson N, Imbabi MS. Sequestering CO₂ by mineralization into useful nesquehonite-based products. *Frontiers in Energy Research*. 2016 Feb 11; 4: 3. doi: [10.3389/fenrg.2016.00003](https://doi.org/10.3389/fenrg.2016.00003)
- [37] Soltani-Jigheh H. Behavior of Clay-Sand Mixtures under Undrained Triaxial Conditions. *Journal of civil engineering (Journal of school of engineering)*, [online]. 2018 May 22; 31(1): 21. doi: [10.22067/CIVIL.V31I1.35474](https://doi.org/10.22067/CIVIL.V31I1.35474)
- [38] Peters JF, Berney IV ES. Percolation threshold of sand-clay binary mixtures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2010 Feb; 136(2): 310-318. doi: [10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000211](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000211)