



## تثبیت ماسه بادی با استفاده از متاکائولن و پسماند کاربرد کلسیم به عنوان فعالساز قلیایی

محمد کیانی نژاد<sup>۱</sup>، محمدمحسن توفیق<sup>۱</sup>، وحید توفیق<sup>۲\*</sup>

۱-دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران  
۲-دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶

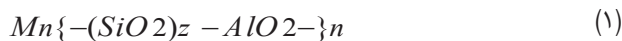
### کلمات کلیدی:

متاکائولن  
پسماند کاربرد کلسیم  
تثبیت خاک  
فعال سازی قلیایی  
ماسه بادی

**خلاصه:** تثبیت خاک‌های ضعیف و بددانه بندی شده در پروژه‌های مهندسی اغلب با استفاده از آهک و سیمان انجام می‌پذیرد. مقادیر قابل ملاحظه انرژی حرارتی مورد نیاز در فرآیند تولید سیمان و همچنین حجم دی‌اکسیدکربن تولید شده در این صنعت، مخاطرات زیست‌محیطی قابل ملاحظه‌ای را به همراه داشته است. آلومینوسیلیکات‌های فعال شده قلیایی به عنوان یک گزینه ارزان قیمت و سازگار با محیط زیست یکی از جدی‌ترین جایگزین‌های شناخته شده برای سیمان و آهک به شمار می‌روند. هدف از این مطالعه بررسی امکان‌پذیری استفاده از متاکائولن در فرآیند تثبیت ماسه بادی به همراه استفاده از پسماند کاربرد کلسیم به عنوان فعالساز قلیایی است. مواردی همچون میزان متاکائولن، غلظت فعالساز قلیایی، زمان و حرارت عمل‌آوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج با نمونه ماسه بادی تثبیت شده با سیمان پرتلند مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی ریزساختارهای شکل گرفته در فرآیند تثبیت خاک با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌نگاری پراش انرژی پرتوایکس (EDX) انجام پذیرفته است. نتایج به دست آمده موید افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری و کرنش پذیری نمونه‌های خاک تثبیت شده است. علاوه بر این، تحلیل ریزساختارهای پدید آمده در نمونه‌های خاک تثبیت شده چسبندگی قابل ملاحظه میان ژل چسباننده C-A-S-H و ذرات ماسه و همچنین پرشدن فضای میان‌دانه‌ای با ژل حاصل از فعالسازی متاکائولن را نشان می‌دهد. برآیند نتایج حاصل از این مطالعه بیانگر قابلیت قابل ملاحظه ژل چسباننده معرفی شده به عنوان یک عامل تثبیت کننده سازگار با محیط زیست در فرآیند تثبیت خاک‌های ماسه‌ای می‌باشد.

### ۱- مقدمه

برای سیمان پرتلند در سالیان اخیر می‌توان از مواد فعال شده قلیایی نام برد. مواد فعال شده قلیایی عمدتاً به ژل‌های چسباننده‌ای اطلاق می‌گردد که از واکنش محلول‌های فلزی قلیایی با پودرهای آلومینوسیلیکاتی پدید می‌آیند [۶,۷]. ساختار عمومی ماکرومولکول‌های پدید آمده از این واکنش‌ها اغلب به شکل زیر تعریف می‌شود [۷]:



به طوری که M نشانگر یون‌های فلزی محلول قلیایی مانند  $Na^+$ ,  $K^+$  و  $Li^+$  و  $Ca^{++}$  بوده، مقدار n برابر با درجه پلیمرایزیسیون و Z نیز نشانگر نسبت سیلیس به آلومینیوم<sup>۱</sup> می‌باشد. نسبت سیلیس به آلومینیوم یکی از نسبت‌های چندگانه‌ای است که می‌تواند معرف رفتار زنجیره ماکرومولکولی شکل گرفته

توسعه روزافزون زیرساخت‌های مهندسی و افزایش مواجهه با خاک‌های سست، نیاز به فرآیندهای بهسازی زمین را بیش از پیش برجسته ساخته است. سیمان پرتلند به عنوان پرمصرف‌ترین افزودنی شناخته شده در فرآیندهای ژئوتکنیکی مرتبط با تثبیت خاک و اصلاح بستر فنداسیون‌ها مطرح گردیده است [۱]. فرآیند تولید سیمان مستلزم صرف انرژی حرارتی فراوان بوده و همچنین مقادیر قابل ملاحظه‌ای از گازهای گلخانه‌ای را در فضا رها می‌کند [۲,۳]. صنعت تولید سیمان با تولید بیش از ۵٪ از کل دی‌اکسید کربن رها شده در اتمسفر، به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار بر گرمایش زمین به شمار می‌رود [۴,۵]. محدودیت‌های اقتصادی و مخاطرات زیست‌محیطی همواره محققان را برآن داشته است که در پی شناسایی مواد جایگزین برای سیمان پرتلند در فرآیندهای سمناسیون باشند. از میان جایگزین‌های معرفی شده

1 Si/Al

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: vahiddavis@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



همکاران<sup>۴</sup> در سال ۲۰۲۰، در جهت کنترل رفتار تورمی خاک‌های رسی مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. بررسی رفتار تورمی خاک تثبیت شده با روش فعالسازی قلیایی، حکایت از بهبود رفتار تورمی خاک رس تثبیت شده دارد، به گونه‌ای که خاک تثبیت شده به روش فعالسازی قلیایی در مقایسه با خاک تثبیت شده با سیمان پرتلند، عملکرد تورمی بهتری را به نمایش گذاشته است. البته، ریزساختار پدید آمده از سرباره آهن گدازی، از یکنواختی کمتری برخوردار بوده که این امر منجر به کاهش برخی از شاخص‌های مکانیکی خاک تثبیت شده گردیده است.

روش‌های بهسازی خاک با استفاده از فرآیندهای فعالسازی قلیایی در مطالعات فوق‌الذکر اگر چه از برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به سیمان پرتلند در حوزه زیست محیطی برخوردارند، اما هزینه بالای استفاده از هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم به عنوان دو فعالساز اصلی قلیایی به کار گرفته شده در مطالعات پیشین، امکان‌پذیری اقتصادی فرآیندهای تثبیت خاک به روش فعالسازی قلیایی را با چالش مواجه می‌کند. علاوه بر این استفاده از پسماندهای مواد شوینده به عنوان فعالساز قلیایی نیز امکان تولید انبوه نداشته و قابل رقابت با صنعت سیمان پرتلند نیست. استفاده از پسماندهای قلیایی که در حجم بالا و به شکل انبوه تولید می‌گردند، به عنوان عامل فعالسازی قلیایی آلومینوسیلیکات‌ها و جایگزینی برای فرآورده‌هایی همچون هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم، می‌تواند اقبال عمومی را هم از منظر زیست محیطی و هم از منظر اقتصادی نسبت به فرآیندهای فعالسازی قلیایی افزایش دهد.

پسماند کاربید کلسیم<sup>۵</sup> به عنوان یک ماده زائد جانبی در فرآیندهای تولید صنعتی گاز استیلن و الیاف پلی وینیل کلراید<sup>۶</sup> به شمار می‌رود [۱۳]. حجم انبوه پسماند کاربید کلسیم پدیدآمده در صنایع پتروشیمی مرتبط با الیاف مصنوعی، بازیافت و مدیریت این پسماند را به یکی از چالش‌های این صنعت بدل ساخته است. PH بسیار بالا و رفتار شدیداً قلیایی این پسماند صنعتی، ملاحظات زیست محیطی پیرامون پسماند کاربید کلسیم را افزایش داده است. از دست رفتن قابلیت باروری و رشد گیاه در خاک و همچنین تهدید جدی منابع آب جاری و زیرزمینی، مدیریت دفع این پسماند صنعتی را دشوار ساخته است. غلظت بالای هیدروکسید کلسیم در پسماند کاربید کلسیم، برخی محققان را بر آن داشته است تا از پسماند کاربید کلسیم به عنوان یک عامل فعالساز قلیایی بهره ببرند. به طور مثال در مطالعه به عمل آمده

باشد [۶]. این نسبت می‌تواند از ۱/۱۵ تا ۳۰۰ متغیر بوده و تغییرات آن اثر قابل توجهی بر مواردی همچون مقاومت فشاری، کرنش‌پذیری و دوام ژل چسباننده دارد [۸].

وجود قابل ملاحظه ترکیبات سیلیس و آلومینیوم در خاک، پتانسیل استفاده از شیوه‌های فعالسازی قلیایی را در خاک‌ها را فراهم آورده است. از این رو در سالیان اخیر استفاده از روش‌های فعال سازی قلیایی در جهت بهبود پارامترهای مهندسی خاک در مطالعات متعددی مورد بررسی و کنکاش قرار گرفته است. در نخستین گام، ژانگ و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۳ امکان‌پذیری استفاده از هیدروکسید سدیم به عنوان فعالساز قلیایی و متاکائولن به عنوان ماده پایه را در تثبیت خاک‌های رسی با درجه فعالیت بالا را مورد بررسی قرار دادند [۹]. نتایج به دست آمده از این پژوهش، موید اثربخشی قابل ملاحظه فعالسازی قلیایی در بهبود شاخص‌های مکانیکی خاک در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ سیمان پرتلند بوده است. در کنار استفاده از متاکائولن، استفاده از سایر مواد به عنوان ماده پایه در فرآیند فعالسازی قلیایی نیز مورد توجه قرار گرفته است. ریورا و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۲۰ از خاکستر بادی به عنوان ماده پایه و فاضلاب قلیایی حاصل از برخی شوینده‌های خاص را به عنوان عامل فعالساز قلیایی در فرآیند فعالسازی قلیایی در جهت تثبیت خاک‌های (A-4, A7-5) استفاده نمودند [۱۰]. هر چند که نتایج به دست آمده نشانگر کارایی محلول مورد اشاره در جهت بهبود پارامترهای مکانیکی خاک است، اما حجم تولید موادی از این دست به عنوان فعالساز قلیایی محدود بوده و قابلیت رقابت با صنعت سیمان پرتلند را ندارد. در کنار این موضوع، استحصال پسماندهای خاص از سایر پسماندهای شهری و صنعتی نیز دشوار می‌نماید. استفاده از خاکستر آتشفشانی در کنار هیدروکسید سدیم به منظور تثبیت خاک ماسه‌ای (ماسه فیروزکوه) توسط شریعتمداری و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۲۰۲۱ مورد توجه قرار گرفته است [۱۱]. نتایج به دست آمده، نشان از افزایش قابل ملاحظه باربری خاک مورد نظر دارد، هرچند استفاده از محلول‌های هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به عنوان فعالساز قلیایی از برتری اقتصادی تثبیت به روش فعالسازی قلیایی در مقایسه با سیمان پرتلند می‌کاهد. علاوه بر این، محدودیت تعداد نمونه‌های مورد مطالعه و تمرکز بر غلظت‌های پایین از فعالساز قلیایی مورد نظر (هیدروکسید سدیم) امکان تحلیل در مورد مقدار بهینه از غلظت فعالساز را فراهم نیاورده است. استفاده از سرباره‌های صنایع فولاد در کنار محلول هیدروکسید سدیم توسط سیلوا و

4 M. Corrêa-Silva et al.

5 Calcium Carbide Residue - CCR

6 PVC

1 RM. Zhang et al.

2 JF. Rivera et al.

3 N. Shariatmadari et al.

و لزوم فزاینده تثبیت ماسه بادی در جغرافیای ایران، استفاده از این فعالساز قلیایی در جهت تثبیت ماسه بادی را برجسته نموده است. با عنایت به موارد ذکر شده، هدف از مطالعه حاضر بررسی امکان‌پذیری استفاده از مخلوط متاکائولن-پسماند کاربرد کلسیم به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده در جهت ارتقای عملکرد مهندسی ماسه بادی و همچنین مقایسه عملکرد تثبیت ناشی از فعالسازی قلیایی با نمونه خاک تثبیت شده با سیمان پرتلند می باشد. مطالعات گذشته در جهت بهبود رفتار ماسه بادی متمرکز بر مواردی مانند سیمان، آهک و قیر بوده است. استفاده از فعالسازهای قلیایی به عنوان یک گزینه اقتصادی و سازگار با محیط زیست دارای پتانسیل قابل ملاحظه‌ای جهت مطرح شدن به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده برای این دسته از خاک‌ها می‌باشد.

در مطالعه حاضر ابتدا شاخص‌های ژئوتکنیکی ماسه بادی شامل دانه‌بندی، وزن مخصوص و تراکم استاندارد به دست آمده و ترکیب عناصر موجود در ماسه بادی، متاکائولن و پسماند کاربرد کلسیم با استفاده از آزمایش فلورسان اشعه ایکس (XRF) مشخص گردیده است. از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری محدود نشده و نسبت باربری کالیفرنیا جهت بررسی عواملی همچون درصد متاکائولن، درصد فعالساز قلیایی، حرارت و زمان عمل‌آوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با متاکائولن-پسماند کاربرد کلسیم استفاده گردیده است. همچنین به منظور مقایسه روش‌های مختلف تثبیت، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند نیز مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تحلیل ریزساختارهای شکل گرفته و بررسی ساختار انواع زل‌های پدیدآمده از تصاویر SEM و آنالیز نقطه‌ای EDX استفاده گردیده است.

## ۲- مواد و مصالح:

### ۲-۱- ماسه بادی:

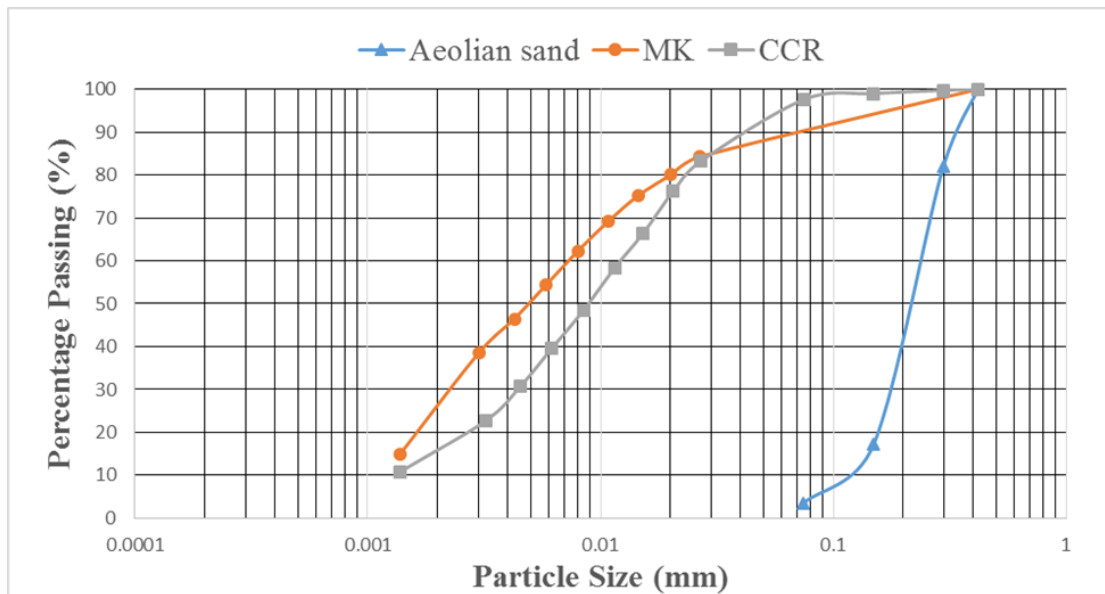
نمونه ماسه بادی مورد استفاده از دشت جوپار کرمان واقع در ۲۰ کیلومتری شهر کرمان جمع‌آوری شده است. ماسه دشت جوپاری دارای دانه‌بندی کاملاً یکنواخت و فاقد چسبندگی بوده (شکل شماره ۱) و بر پایه سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) این نوع خاک به عنوان ماسه بدانه‌بندی شده طبقه بندی شده است [۲۲]. بر اساس نتایج آزمایش تراکم استاندارد مطابق با ASTM D698 مقدار رطوبت بهینه و دانسیته خشک ماکزیمم ( $\gamma_{dmax}$ ) به ترتیب برابر با ۹٪ و  $1/61 \text{ gr/cm}^3$  به دست آمده است [۲۳]. از آنجا که در ترکیب‌های فعال شده قلیایی، آب مشارکت شیمیایی نداشته و صرفاً در جهت یکدست‌سازی مخلوط و رسیدن به کارایی مورد نظر نقش دارد، در ساخت

توسط هوریببولزاک و همکاران<sup>۱</sup> و همچنین فتچوای و همکاران<sup>۲</sup>، به بررسی امکان‌پذیری استفاده از پسماند کاربرد کلسیم به عنوان فعالساز قلیایی در کنارخاکستر بادی به عنوان ماده پایه در جهت تثبیت رس‌ها پرداخته شده است [۱۴، ۱۵]. برآیند حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که پسماند کاربرد کلسیم می‌تواند به عنوان یک جایگزین اقتصادی برای موادی مانند هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم مطرح گشته و به کارگیری آن می‌تواند از هزینه‌ها و آسیب‌های زیست محیطی مرتبط با مدیریت و دفع این پسماند صنعتی بکاهد. بر همین اساس در مطالعه حاضر، به کارگیری پسماند کاربرد کلسیم به عنوان عامل فعالساز قلیایی در جهت تثبیت ماسه بادی مورد توجه قرار گرفته است.

تثبیت توده‌های ماسه بادی چالش دیرپای سرزمین‌های با آب و هوای گرم و خشک بوده است. حرکت تدریجی ذرات ماسه تهدید همیشگی جغرافیای این سرزمین‌ها بر علیه مناطق مسکونی، راه‌ها، مزارع، خطوط انتقال نیرو و سایر دستاوردهای تمدن بشری بوده است. ذرات خاک گردگوشه و با دانه‌بندی یکنواخت، تراکم ماسه بادی را دشوار می‌کند و فقدان چسبندگی، کارکردهای مهندسی ماسه بادی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در دهه‌های گذشته، طیف گسترده‌ای از انواع تثبیت‌کننده‌ها در جهت تثبیت و بهبود رفتار مهندسی ماسه بادی به کار گرفته شده است [۱۸-۱۶]. سیمان پرتلند و قیر، دو نمونه از معمولترین افزودنی‌ها در جهت تثبیت این خاک‌ها به شمار می‌روند که استفاده از آنها همواره باعث افزایش نگرانی‌های زیست محیطی و ملاحظات اقتصادی بوده است [۱۷]. علاوه بر این، عمل‌آوری و آبرسانی به مخلوط سیمانی پدیدآمده در سایت‌های خشک صحرائی عملاً غیرممکن است. از آنجا که آب در واکنش‌های فعالسازی قلیایی مشارکت شیمیایی ندارد [۱۹]، آلومینوسیلیکات‌های فعال شده قلیایی می‌توانند به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده سازگار با محیط زیست برای تثبیت ماسه بادی به ویژه در مناطق گرم و خشک به کار گرفته شوند.

در اغلب مطالعات پیشین مانند مارش و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۹ و یا پژوهش انجام شده توسط پورعباس و همکاران<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۸، تمرکز اصلی بر تثبیت خاک‌های رسی با استفاده از هیدروکسید سدیم به عنوان فعالساز قلیایی بوده است [۲۰، ۲۱]. پتانسیل استفاده از پسماند کاربرد کلسیم به عنوان یه فعالساز اقتصادی ارزان قیمت در مقایسه با هیدروکسید سدیم

- 1 S. Horpibulsuk et al.
- 2 C. Phetchuay et al.
- 3 A. Marsh et al.
- 4 M. Pourabbas et al.



شکل ۱. دانه بندی ماسه بادی، متاکائولن و پسماند کاربرد کلسیم

Fig. 1. Particle size distribution of sand, metakaolin and CCR

فرآیندهای تحقیقاتی شناخته می‌شود [۹]. استفاده از متاکائولن در بهبود رفتار مهندسی خاک‌ها از دو جهت قابل بررسی است. نخست، استفاده از متاکائولن در کنار سیمان پرتلند به عنوان یک افزودنی مکمل که باعث ارتقای برخی پارامترهای مهندسی خاک تثبیت شده همچون مقاومت فشاری، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری گردیده است [۲۹-۳۱]. کاربرد دوم متاکائولن در تثبیت خاک‌ها، به کارگیری متاکائولن در کنار یک فعالساز قلیایی بدون استفاده از هر نوع سیمان پرتلند می‌باشد. در این روش ژل سخت تشکیل شده ناشی از واکنش ذرات متاکائولن با یون هیدروکسید و کاتیون فلزی موجود در فعالساز قلیایی و تشکیل زنجیره ماکرومولکولی می‌باشد [۳]. در این مطالعه، از نمونه متاکائولن تجاری موجود در بازار به عنوان ماده پایه ژل آلومینوسیلیکاتی استفاده گردید. دانه بندی و ترکیب عناصر متاکائولن به ترتیب در شکل شماره ۱ و جدول ۱ نمایش داده شده است.

#### ۲-۳- پسماند کاربرد کلسیم:

پسماند کاربرد کلسیم از پسماند خروجی واحدهای صنعتی جمع‌آوری گردیده و در اوون به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس کاملاً خشک گردیده است. پس از خارج کردن نمونه پسماند از اوون، با کمک دستگاه لس آنجلس کلوخه های خارج شده از اوون مجدداً تبدیل به پودر

همه نمونه‌ها از رطوبت برابر با رطوبت بهینه استفاده گردیده است [۲۴،۲۵]. ترکیب عناصر ماسه بادی با استفاده از آزمایش XRF به دست آمده و در جدول شماره ۱ نمایش داده شده است.

#### ۲-۲- متاکائولن:

متاکائولن یک منبع آلومینوسیلیکات طبیعی است که از حرارت دادن خاک رس کائولن در بازه حرارتی ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس به دست می‌آید [۲۶]. در این فرآیند بخشی از مولکول‌های آب شیمیایی موجود در ساختار خاک رس کائولن جدا شده و ترکیب متاکائولن شکل می‌گیرد. مولکول حاصل بر خلاف خاک رس کائولن واکنش‌پذیری بالایی داشته و در حضور یون‌های هیدروکسیدهای فلزی می‌تواند زنجیره‌های ماکرومولکولی را شکل دهد [۲۷]. فرآیند تولید متاکائولن به انرژی حرارتی بسیار کمتری نسبت به سیمان پرتلند نیاز دارد و ماده اولیه آن به فراوانی در طبیعت موجود می‌باشد. بر خلاف سایر منابع آلومینوسیلیکاتی مانند سرباره‌ها یا خاکستر بادی، متاکائولن ناخالصی‌های بسیار کمی دارد. ناخالصی‌های موجود در مواد پایه می‌تواند منجر به بروز واکنش‌های ناخواسته گردیده [۲۸] و بر ریزساختارهای پدید آمده اثر بگذارد. از آنجا که متاکائولن ساختار شیمیایی پایداری داشته و فاقد ناخالصی می‌باشد، به عنوان یک ماده پایه ایده‌آل در

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی ماسه بادی، متاکائولن و پسماند کاربرد کلسیم

Table 1. Chemical components of sand, metakaolin and CCR

Chemical composition (%)	Aeolian sand	MK	CCR
SiO <sub>2</sub>	۶۱/۳۱	۷۶/۴۷	۲/۹۶
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۲/۷۳	۱۴/۵۸	۱/۳۹
BaO	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳
CaO	۷/۳۵	۱/۵۳	۶۳/۴۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۰۱	۰/۸۳	۰/۲۳
K <sub>2</sub> O	۲/۰۹	۱/۱۱	۰/۰۲
MgO	۱/۵۸	۰/۹۷	۰/۲۲
MnO	۰/۱	۰/۰۱	۰/۰۲
Na <sub>2</sub> O	۲/۸۱	۱/۶۳	۰/۳۴
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۰۸	۰/۰۳	N.D
SO <sub>3</sub>	۰/۱	۰/۱۶	۰/۴۶
TiO <sub>2</sub>	۰/۵۵	۰/۱۱	N.D
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲
Cu	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱
Pb	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱
Zn	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱
LOI	۶/۲۱	۲/۴۹	۳۰/۸۶

NOTE: N.D. = Not Detected.

کلسیم، نمونه حاصل به تدریج مخلوط شده و فرآیند اختلاط تا رسیدن به یک خمیر یکدست ادامه پیدا کرده است. برای تراکم مخلوط همگن فراهم آمده، قالب استوانه‌ای با قطر ۳۷mm و ارتفاع ۷۴mm به کار گرفته شد. مخلوط داخل قالب ریخته شده و در سه لایه تقریباً مساوی کوبیده شده تا به مقدار  $\gamma_{dmax}$  توصیف شده برسد.

برای مقایسه دقیق‌تر اثر روش‌های مختلف بهسازی، از نمونه‌های تثبیت شده به وسیله سیمان پرتلند ۳٪ به عنوان نمونه کنترل استفاده گردیده است. از آنجا که پایداری ذاتی ماسه بادی در حالت غیرمحصور برابر با صفر بوده و عملاً امکان خارج کردن نمونه سالم ماسه بادی از قالب وجود ندارد، در نتیجه مقاومت فشاری محدود نشده ماسه بادی صفر منظور شده است. پس از متراکم کردن نمونه‌ها، قالب باز شده و نمونه‌های خارج شده جهت ثابت نگاه داشتن رطوبت در پلاستیک نگهداری شدند. با پایان یافتن زمان عمل آوری

گردید. با عبور دادن پودر حاصل آمده از الک نمره ۴۰، ذرات ریزتر از ۴۲۵  $\mu\text{m}$  جمع‌آوری شدند. منحنی دانه بندی ذرات CCR و ساختار شیمیایی آن به ترتیب در شکل شماره ۱ و جدول شماره ۱ نمایش داده شده است.

### ۳- فرآیند آزمایش

#### ۳-۱- آزمایش تک محوری محدود نشده

چنانچه که پیش از این اشاره گردید، هدف اصلی از مطالعه حاضر بررسی امکانپذیری استفاده از متاکائولن فعال شده در جهت تثبیت ماسه بادی می‌باشد. پس از حرارت دادن ماسه بادی در اوون به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، مخلوط‌های متفاوتی از خاک، با درصد‌های گوناگون از خاک/متاکائولن و خاک/پسماند کاربرد کلسیم آماده شدند. پس از آن با افزودن تدریجی آب به مخلوط خاک، متاکائولن و پسماند کاربرد

جدول ۲. طرح کلی مخلوطها

Table 2. Mix proportions of samples

Mix code	OPC (%)	MK (%)	CCR (%)	Initial synthesis temperature (°C)	Curing time (day)
OPC	3	0	0	25	7, 14, 28, 54
SOIL	0	0	0	25	7, 14, 28, 54
C2M6	0	6	2	25	7, 14, 28, 54
C5M6	0	6	5	25	7, 14, 28, 54
C8M6	0	6	8	25	7, 14, 28, 54
C11M6	0	6	11	25	7, 14, 28, 54
C5M3	0	3	5	25	7, 14, 28, 54
C5M6	0	6	5	25	7, 14, 28, 54
C5M9	0	9	5	25	7, 14, 28, 54
C5M12	0	12	5	25	7, 14, 28, 54
C2M6-60	0	6	2	60	7
C5M6-60	0	6	5	60	7
C8M6-60	0	6	8	60	7
C11M6-60	0	6	11	60	7

متراکم گشته و تا زمان فرارسیدن موعد آزمایش در زیپ بگ نگهداری شدند. همچنین با توجه به فقدان چسبندگی در ماسه بادی، از مرحله اشباع سازی صرف نظر گردید. در هنگام آزمایش، نمونه‌ها با سربار ۴/۵۴ کیلوگرم و نرخ کرنش ۱/۲۵ میلیمتر بر دقیقه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل بر اساس میانگین مقدار CBR از سه نمونه مختلف (مجموع ۶۰ نمونه) ثبت گردید.

### ۳-۳- کنترل ابعادی و تکرارپذیری نمونه‌ها:

پس از خروج نمونه‌ها از قالب، نمونه‌ها با دقت وزنی ۰/۰۱ گرم و دقت ابعادی ۱ میلیمتر در هر جهت کنترل گردید. برای کاهش خطای حاصل از آزمایش سه نمونه همسان از هر مخلوط در هر سن تهیه گردید. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، چنانچه نتایج هر یک از نمونه‌ها بیش از ۲۰٪ با میانگین به دست آمده از سه نمونه مورد بحث اختلاف داشته است، نتایج حاصل از آن نمونه حذف و نمونه جدیدی جایگزین گشته است. این روند تا حصول نتیجه نهایی ادامه داشته است.

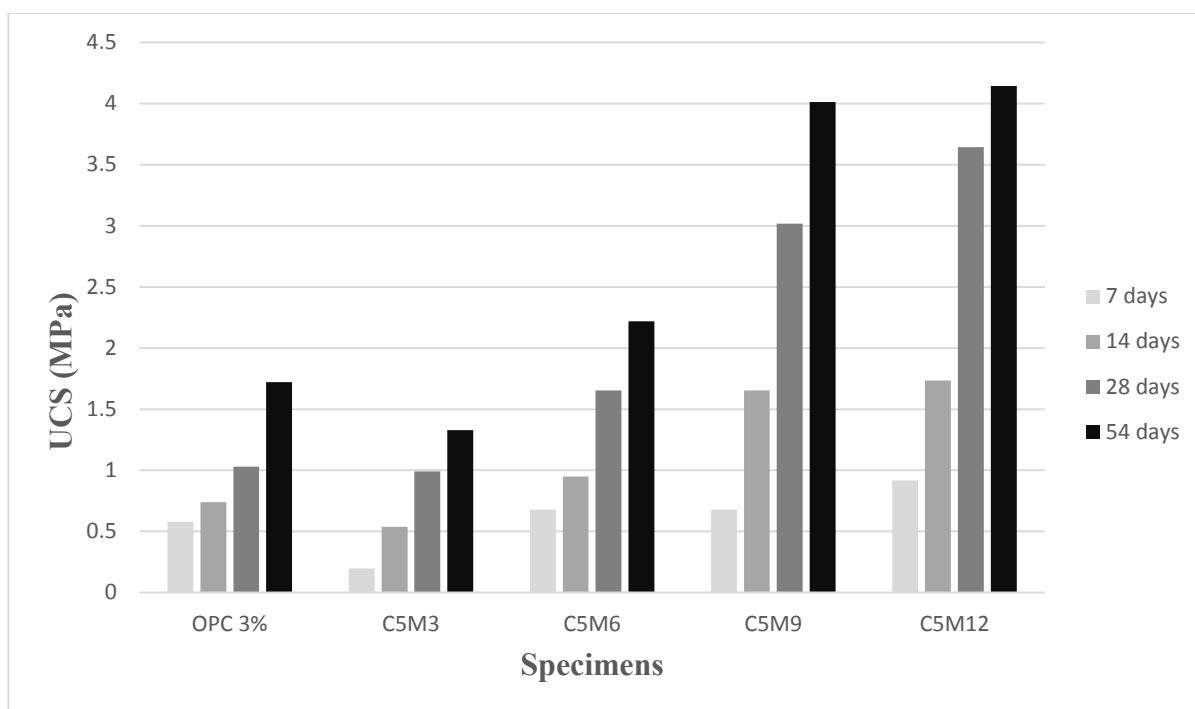
نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری (UCS) جهت بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها و همچنین مقدار کرنش نمونه‌ها در زمان گسیختگی در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۴ روزه بر اساس ASTM D2166-87 انجام گردید [۳۲]. مقدار هر یک از افزودنی‌ها در طرح مخلوط نمونه‌ها بر اساس درصدی از وزن خاک خشک مورد استفاده در مخلوط محاسبه شده و در جدول شماره ۲ نمایش داده شده است. همچنین از سطوح شکسته حاصل از گسیختگی نمونه‌ها در آزمایش UCS جهت تصویربرداری SEM و تحلیل نقطه‌ای EDX استفاده گردید.

### ۳-۲- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا در حالت غیر اشباع بر روی نمونه‌هاک ماسه بادی و نمونه‌های خاک تثبیت شده برای سنین ۷ و ۲۸ روزه مطابق با ASTM D1883-07 انجام گردید [33]. نمونه‌های CBR در قالب با ارتفاع استاندارد ۱۷،۵ سانتیمتر و قطر ۱۵ سانتیمتر با رطوبت بهینه

1 California Bearing Ratio





شکل ۲. مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت شده برای مقادیر مختلف متاکائولن و مقدار پسماند کاربید کلسیم برابر با ۵٪

Fig. 2. UCS of samples at various metakaolin contents

#### ۴-۱-۱- درصد متاکائولن:

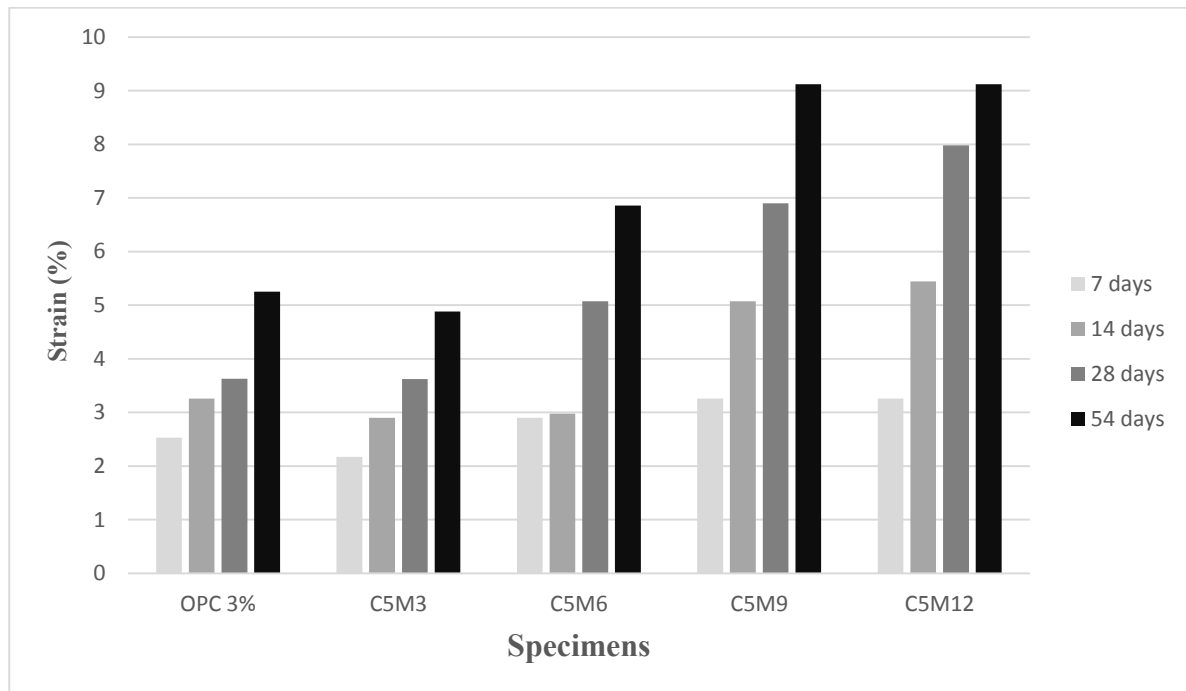
متاکائولن به عنوان ماده پایه در فعالسازی قلیایی جهت تثبیت ماسه بادی به کار گرفته شده است. شکل‌های شماره ۲ و ۳ به ترتیب نمایشگر اثر افزایش تدریجی مقدار متاکائولن (۳٪، ۶٪، ۹٪، ۱۲٪) بر مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه ماسه تثبیت شده برای یک مقدار ثابت از CCR (۵٪) می‌باشد. نمونه C5M12 شامل ۵٪ از پسماند کاربید کلسیم و ۱۲٪ متاکائولن بالاترین مقاومت فشاری را در همه سنین داشته است. نتایج به دست آمده نشانگر افزایش سریع مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش مقدار متاکائولن از ۳ تا ۹ درصد بوده، هر چند با افزایش مقدار متاکائولن نمونه‌ها از ۹ تا ۱۲ درصد از سرعت رشد مقاومت فشاری نمونه‌ها و همچنین کرنش گسیختگی اندکی کاسته شده است. برآیند نتایج پیرامون شکل‌های شماره ۲ و ۳ بیانگر اثر مثبت ناشی از افزودن متاکائولن بر مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های ماسه بادی تثبیت شده می‌باشد. اثرگذاری متاکائولن بر تثبیت ماسه بادی را می‌توان از دو زاویه متفاوت بررسی نمود. نخست

همچنین نمونه‌های دارای الگوی شکست غیر متعارف، مانند شکستگی و جدا شدن بخش کوچکی از نمونه و سپس صفر شدن گنج کرنش، از نتایج به دست آمده حذف گردیده اند و آزمایش تکرار گردیده است. بر پایه توضیحات بالا، با حذف نمونه‌های غیرمرتبط، تعداد ۱۰۸ نمونه همسان و با دقت مشابه برای تحلیل و بررسی نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده به کار گرفته شده است.

#### ۴- بحث پیرامون نتایج

##### ۴-۱- مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی:

اثر پارامترهای گوناگون بر مقاومت فشاری نمونه‌ها شامل درصد متاکائولن، درصد CCR، زمان و حرارت عمل‌آوری با آزمایش مقاومت فشاری سنجیده شد. نتایج حاصل از مقاومت فشاری محدود نشده و کرنش گسیختگی در نمونه‌های تثبیت شده با متاکائولن فعال شده و همچنین نمونه تثبیت شده با ۳٪ سیمان پرتلند ارائه گردیده است.



شکل ۳. کرنش گسیختگی نمونه خاک تثبیت شده برای مقادیر مختلف متاکائولن و مقدار پسماند کاربرد کلسیم برابر با ۵٪

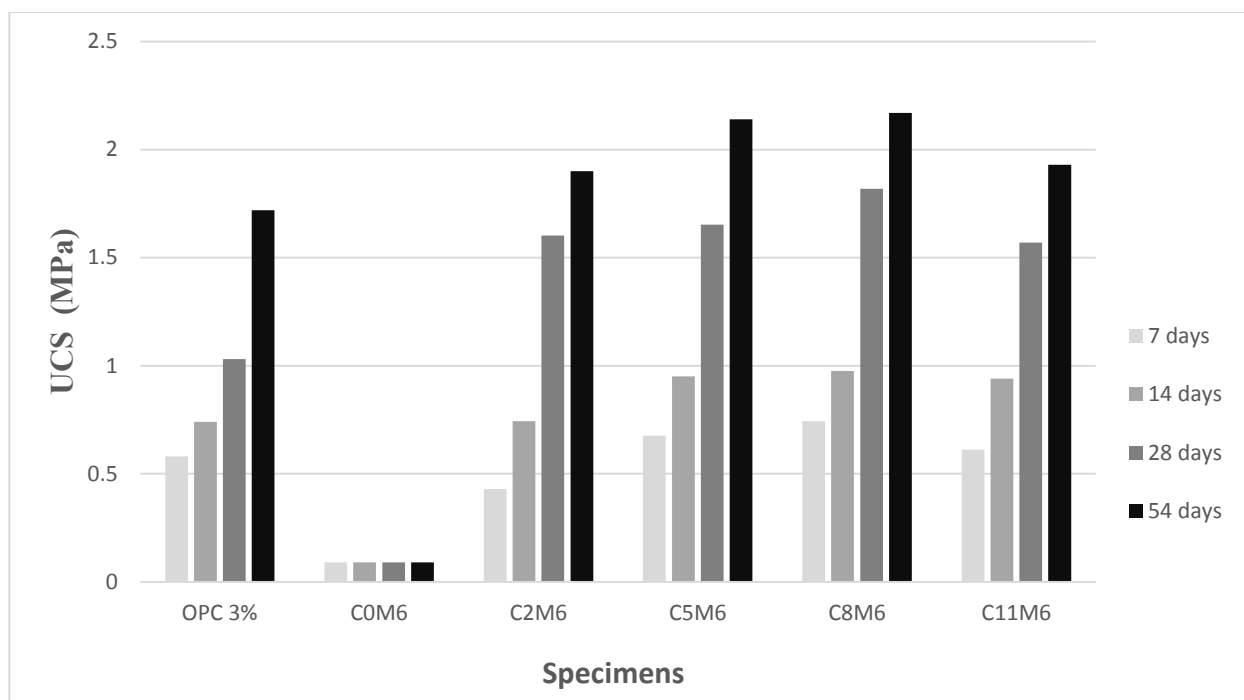
Fig. 3. Failure strain of samples at various metakaolin contents

بخشی از متاکائولن به صورت غیرفعال باقی مانده و در فرآیند انحلال شرکت نکند. حضور غیرفعال ذرات متاکائولن در میان ذرات رسی باعث به هم خوردگی ساختار خاک شده و از مقاومت فشاری خاک می‌کاهد. علاوه بر این مطالعات پورعباس و همکاران پیرامون فعالسازی پودر شیشه در خاک، موید این نکته است که با غلظت ثابت فعالساز قلیایی و افزایش مقدار ماده پایه (پودر شیشه)، با گذر از میزان ۱۵٪ ماده پایه به وزن خاک نمونه، مقاومت فشاری محدود نشده کاهش می‌یابد [۲۱]. این امر را می‌توان به عدم تجانس ذرات رسی در خاک مورد اشاره با ذرات پودر شیشه مرتبط دانست. اما در خاک‌های ماسه‌ای بدانه‌بندی شده مانند ماسه بادی، با توجه به اندازه ریزتر ذرات متاکائولن و دانه‌بندی یکنواخت ماسه بادی، ذرات متاکائولن که در فرآیند تشکیل زنجیره‌های ماکرومولکولی حل نشده‌اند، این قابلیت را دارند که با اصلاح ساختار دانه‌بندی ماسه، همچنان باعث بهبود رفتار فیزیکی خاک گردند.

همچنین، در مقایسه میان مطالعات پیشین در حوزه تثبیت خاک به شیوه فعالسازی قلیایی، عملکرد بهتر متاکائولن را در مقایسه با موادی همچون خاکستر بادی (ریورا و همکاران) و خاکستر آتش فشانی (شریعتمداری و

این که متاکائولن به عنوان ماده پایه در ژل چسباننده شرایط جهت پیوستن ذرات خاک به یکدیگر و تشکیل ماتریس ژل-ماسه را فراهم آورده است. توسعه ژل حاصل از برهم کنش متاکائولن و فعالساز قلیایی، با چسباندن هر چه بیشتر ذرات ماسه، استحکام بیشتر ماتریس پدیدآمده را فراهم می‌آورد. مکانیسم دوم ناشی از افزایش تراکم‌پذیری نمونه خاک ماسه بادی ناشی از افزودن ذرات متاکائولن به ماسه بادی است. ذرات ریزدانه متاکائولن با قرارگیری در میان ذرات یکنواخت ماسه بادی، با اصلاح ساختار دانه‌بندی یکنواخت ماسه بادی شرایط لازم برای تراکم‌پذیری خاک و در نتیجه دانسیته بالاتر را فراهم می‌آورند. در نتیجه با افزایش مقدار ماده پایه، مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نیز افزایش یافته است. این نکته می‌تواند یک تفاوت آشکار در فرآیند تثبیت رس‌ها با ماسه بدانه‌بندی شده باشد. نتایج به دست آمده توسط ژانگ و همکاران پیرامون استفاده از ژل چسباننده حاصل از برهم کنش متاکائولن و هیدروکسید سدیم در تثبیت خاک‌های رسی نشان می‌دهد با افزایش مقدار متاکائولن تا سقف مشخصی، مقدار مقاومت فشاری نمونه خاک رسی تثبیت شده افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد [۹]. افزایش مقدار متاکائولن در برابر مقدار ثابت فعالساز قلیایی، باعث می‌شود





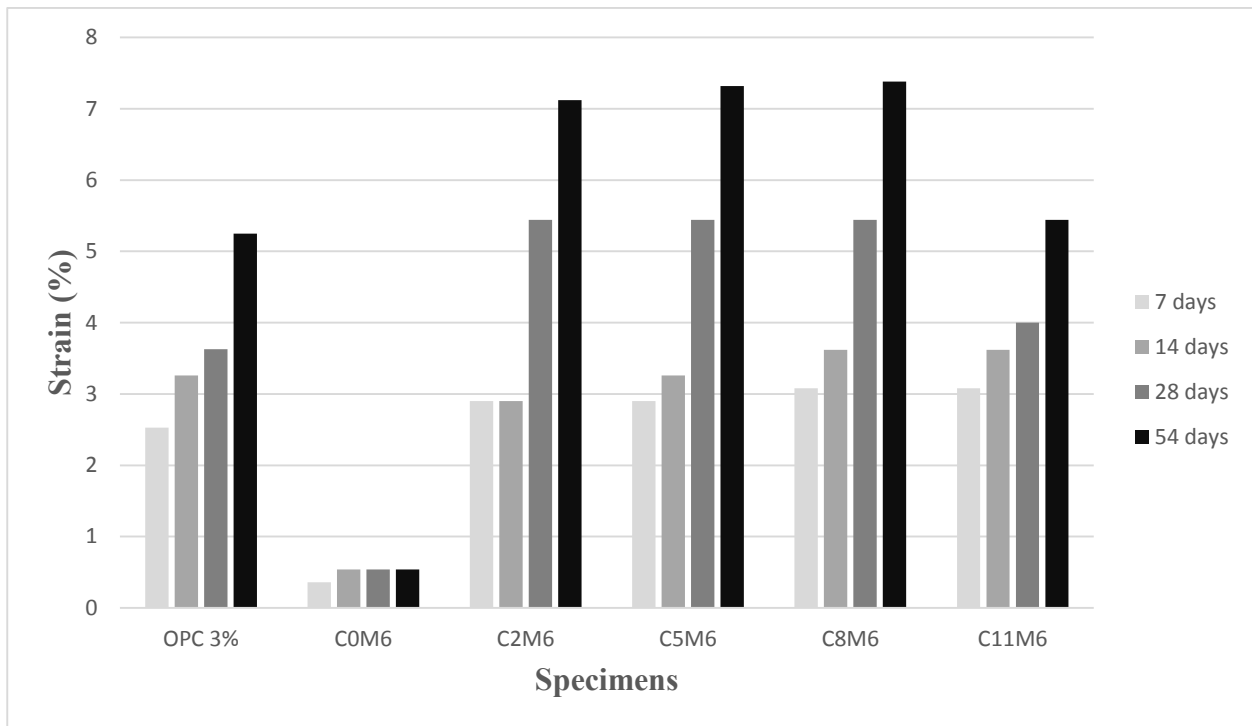
شکل ۴. مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف پسماند کاربرد کلسیم و مقدار متاکائولن برابر با ۶٪

Fig. 4. UCS of stabilized soil at various CCR contents and fixed metakaolin = 6%

#### ۴-۱-۲- اثر غلظت فعالساز قلیایی:

شکل‌های شماره ۴ و ۵ نشانگر اثر افزایش غلظت فعالساز قلیایی (۲٪، ۵٪، ۸٪، ۱۱٪) برای یک مقدار ثابت از متاکائولن (۶٪) در سنین مختلف عمل‌آوری می‌باشد. عموماً در ژئوپلیمرها از موادی مانند هیدروکسید پتاسیم و هیدروکسید سدیم به عنوان عامل فعالساز استفاده می‌گردد. پسماند کاربرد کلسیم با توجه به خاصیت قلیایی بالای آن می‌تواند به عنوان یک جایگزین اقتصادی برای هیدروکسیدهای سدیم و پتاسیم، هزینه تمام شده این محصولات را تا حد زیادی کاهش دهد. شکل شماره ۴ مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف را تحت تاثیر تغییرات درصد فعالساز قلیایی و مقدار متاکائولن ثابت نشان می‌دهد. مطابق تصاویر، نمونه‌ای که شامل ۸۰٪ پسماند کاربرد کلسیم و ۶٪ متاکائولن بوده است، بالاترین مقدار مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی را در تمام سنین داشته است. نتایج حاکی از اثر مثبت افزایش تدریجی مقدار CCR بر مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه‌های دارای درصد پسماند کاربرد کلسیم برابر با ۸٪ و کمتر می‌باشد. از سوی دیگر، با افزایش درصد CCR به ۱۱٪، مقاومت فشاری نمونه افت قابل ملاحظه‌ای را در همه سنین به همراه داشته است. بنابراین می‌توان

همکاران) می‌توان مشاهده نمود [۱۱، ۱۰]. به گونه‌ای که مقاومت فشاری ناشی از فعالسازی متاکائولن در برخی موارد تا دو برابر بیشتر از فعالسازی با مواد پایه ذکر شده می‌باشد. این امر، با توجه به این که عامل فعالسازی یک ماده دورریز بوده است، قابل توجه به نظر می‌رسد. شکل شماره ۳، نمایشگر تغییرات کرنش در زمان گسیختگی برای انواع نمونه‌های خاک تثبیت شده با ژل فعال قلیایی می‌باشد. مطابق تصویر، با افزایش مقدار متاکائولن و سن نمونه‌ها، مقدار کرنش‌پذیری نمونه خاک تثبیت شده افزایش قابل ملاحظه‌ای را یافته است که مشابه الگوی مقدار مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها می‌باشد. در مقام مقایسه کرنش‌پذیری نمونه‌های پدیدآمده با مطالعات پیشین، می‌توان مطالعات ژانگ و همکاران را مورد بررسی قرار داد. در یک مقایسه کلی، اگر چه بتن حاصل از مواد فعال شده قلیایی در مقایسه با سیمان پرتلند رفتار تردتری دارد، اما کاربرد این مواد در خاک بر کرنش‌پذیری نمونه‌ها می‌افزاید. علت این امر را می‌توان در کاهش سرعت تبخیر آب حفره‌ای در نمونه‌های خاک قلیایی و در نتیجه انقباض کمتر خاک جستجو کرد که به کاهش ترک خوردگی و در نتیجه افزایش کرنش گسیختگی منجر می‌شود [۹].



شکل ۵. کرنش گسیختگی نمونه خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف پسماند کاربرد کلسیم و مقدار متاکائولن برابر با ۶٪

Fig. 5. Failure strain of stabilized soil at various CCR contents and fixed metakaolin = 6%

بیشتر بر پایه به کارگیری روش‌های عددی مانند پاسخ سطح یا شبکه‌های عصبی بر پایه تعداد معدودی از آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده استوار شده‌اند، با افزایش مقدار فعالساز قلیایی در نمونه خاک تثبیت شده، مقاومت فشاری همواره افزایش یافته و حد بهینه‌ای برای آن وجود ندارد [۱۱]. نتایج حاصل از پژوهش شریعتمداری و همکاران و همچنین سیلوا و همکاران موید این نکته می‌باشد [۱۱، ۱۲]. به طور مثال، در پژوهش به عمل آمده توسط سیلوا و همکاران، بهبود رفتار تورمی خاک تثبیت شده با روش فعالسازی قلیایی عمدتاً بر پایه فاکتور زمان است و مقدار بهینه‌ای برای فعالساز قلیایی لحاظ نگردیده است [۱۲]. بنا بر این لزوم انجام آزمایش‌های مکرر مقاومت فشاری محدود نشده با افزایش تدریجی مقدار فعالساز قلیایی، تا حصول نسبت بهینه فعالساز قلیایی به ماده پایه ضروری است.

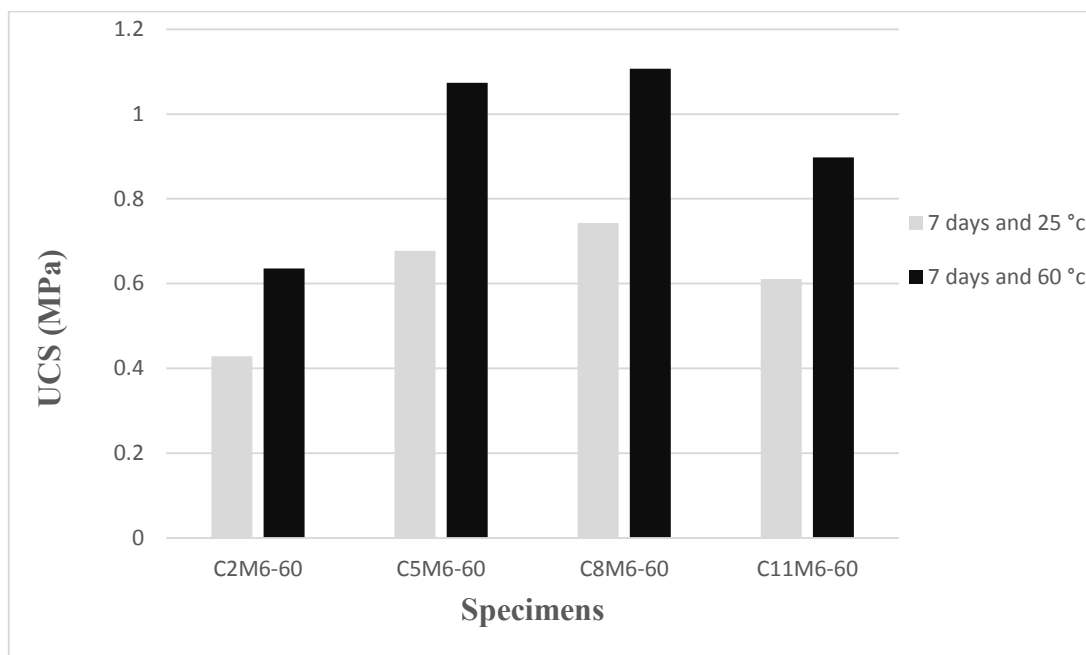
نتایج حاصل از شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که مقدار بهینه فعالساز قلیایی برای مقدار ثابت متاکائولن برابر با ۶٪ و ماسه بادی دشت جوپار، در حدود ۸٪ باشد. در تحلیل اثر مخرب مقادیر بالای کاربرد کلسیم بر ماتریس حاصل، می‌توان موارد ذیل را مد نظر داشت:

۱- مقادیر بالای فعالساز قلیایی با اثرگذاری بر ویسکوزیته مخلوط

نتیجه گرفت که با افزایش مقدار پسماند کاربرد کلسیم تا مقدار مشخصی، مقاومت فشاری افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد.

بررسی کرنش حاصل از گسیختگی نمونه‌ها بر اثر افزایش درصد فعالساز قلیایی در شکل شماره ۵ نیز حاکی از کاهش قابل ملاحظه کرنش‌پذیری نمونه‌های خاک تثبیت شده در اثر افزایش مقدار CCR از ۸ تا ۱۱ درصد می‌باشد. این مقدار کاهش در کرنش گسیختگی، در سنین بالاتر عمل‌آوری قابل ملاحظه می‌باشد، هر چند که در سنین ابتدایی افزایش مقدار فعالساز قلیایی اثر چندانی بر کرنش‌پذیری نمونه‌ها نداشته است.

بررسی مطالعات پیشین پیرامون اثر مقدار فعالساز قلیایی بر ژل چسباننده نشان می‌دهد مقدار یون‌های اضافه کلسیم و هیدروکسید که در فرآیندهای شیمیایی مشارکت نداشته‌اند، می‌توانند اثرات مخربی را بر ساختار ژل چسباننده به جای گذاشته و باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها گردند [۱۳، ۲۵]. به طور مثال، مطالعات ریورا و همکاران نشان می‌دهد که با عبور میزان فعالساز قلیایی از ۵۰٪ وزن ماده پایه، مقاومت فشاری نمونه‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. بنا بر این می‌توان برای مقداری ثابت از ماده پایه، یک مقدار بهینه از فعالساز قلیایی تعریف کرد [۱۰]. از سوی دیگر در مطالعاتی که



شکل ۶. اثر افزایش حرارت عمل‌آوری بر رشد مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت شده به روش فعالسازی قلیایی

Fig. 6. Effect of curing temperature on compressive strength of stabilized samples

۴-۱-۳- مقایسه نتایج تثبیت خاک به وسیله متاکائولن فعال شده با سیمان پرتلند:

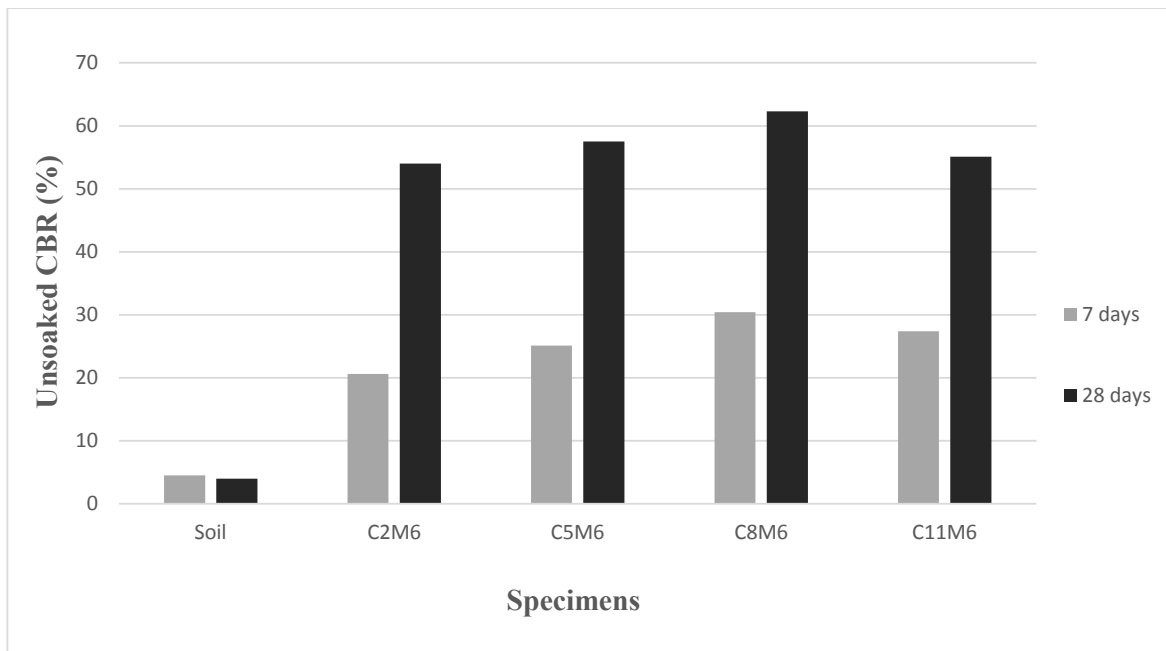
از آنجا که سیمان پرتلند پرمصرف‌ترین عامل تثبیت مورد استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیکی می‌باشد، نتایج حاصل از به کارگیری ۳٪ سیمان پرتلند در تثبیت ماسه بادی در مقایسه با تعدادی از مخلوط‌های فعال شده قلیایی در شکل‌های شماره ۲ تا ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که به جز نمونه C5M3 که شامل ۳ درصد متاکائولن و ۵ درصد فعالساز قلیایی بوده است، در سایر نمونه‌های فعال شده قلیایی، مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه سیمان پرتلند به دست آمده است. به طور مثال، نمونه C5M9 در سن ۲۸ روز دارای مقاومت فشاری بیش از ۳ برابر بیشتر از نمونه تثبیت شده با سیمان پرتلند می‌باشد. اما نکته منفی پیرامون نمونه‌های فعال شده قلیایی در شکل شماره ۶، کاهش سرعت رشد این نمونه‌ها در سنین بالاتر از ۲۸ روز می‌باشد. در سنین کمتر از ۲۸ روز، سرعت رشد مقاومت فشاری محدود نشده در نمونه‌های فعال شده قلیایی بیش از نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پرتلند است اما در سنین بالاتر از ۲۸ روز از سرعت رشد نمونه‌های

حاصل، از میزان حل شدن ماده پایه آلومینوسیلیکاتی می‌کاهند [۱۳].

۲- یون‌های هیدروکسید آزاد موجود در مخلوط که در فرآیند شکل‌گیری زنجیره‌های ماکرومولکولی شرکت نداشته‌اند، در واکنش با عناصر فلزی موجود در خاک هیدروکسیدهای فلزی را تشکیل می‌دهند که باعث افزایش حجم و آسیب به ژل سخت شکل گرفته می‌گردد [۳۴].

۳- تجمع یون‌های کلسیم باعث پدید آمدن ژل‌های با ساختار ناهمگن می‌شود که باعث افت کیفیت و یکنواختی ریزساختار پدیدآمده می‌گردد. در بحث ریزساختارها در ادامه این مطالعه، به بررسی چرایی کاهش مقاومت در ژل حاصل از فعالسازی قلیایی بر اثر افزایش بیش از حد غلظت فعالساز قلیایی پرداخته شده است.

درک مناسب از مقدار نسبت بهینه میان ماده پایه آلومینوسیلیکاتی و فعالساز قلیایی، بستر مناسبی را برای انتخاب موثر مواد پایه و در طرح مخلوط ژل‌های چسباننده قلیایی پدید می‌آورد که منجر به افزایش کارایی و بهبود خواص مهندسی در فرآیند تثبیت خاک می‌گردد.



شکل ۷. اثر افزایش غلظت فعالساز قلیایی بر CBR نمونه خاک‌های تثبیت شده

Fig. 7. Effect of alkali activator concentration on CBR values

واکنش‌های قلیایی سرعت گرفته و ژل چسباننده بیشتری تولید می‌گردد. دوم آنکه با افزایش درجه حرارت، سرعت حل شدن ذرات آلومینوسیلیکات ماده پایه افزایش می‌یابد که خود باعث رشد سریع‌تر ژل چسباننده می‌گردد. بر پایه نتایج به دست آمده، افزایش درجه حرارت باعث رسیدن مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت شده با فعالساز قلیایی از  $0.74 \text{ MPa}$  به  $1 \text{ MPa}$  گردیده است. هرچند که افزایش درجه حرارت عمل‌آوری در پروژه‌های ژئوتکنیکی عملاً امکان‌پذیر نیست، اما می‌تواند تصویر روشنی از رفتار و اثرپذیری ژل چسباننده قلیایی از عوامل بیرونی را فراهم آورد که در درک رفتار زنجیره‌های مولکولی نقش کلیدی دارد.

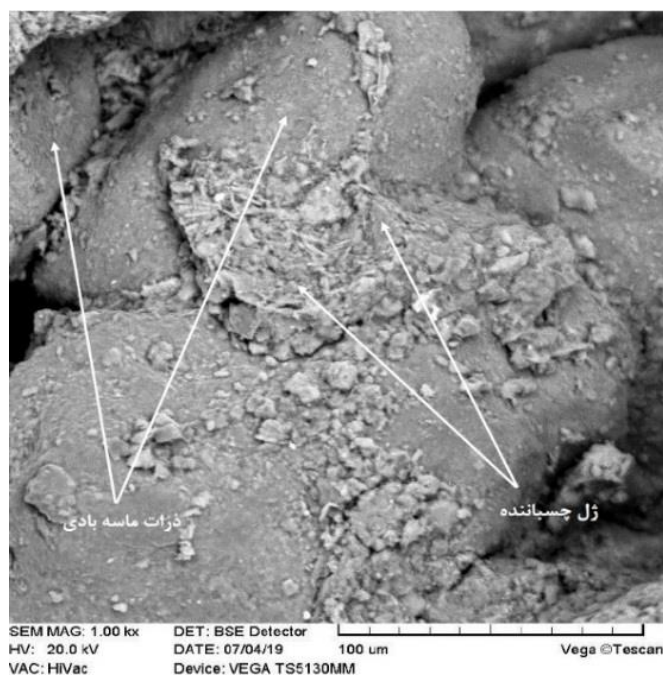
#### ۴-۲- نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

از آنجا که آزمایش CBR یک شاخص کاربردی در طرح روسازی راه به شمار می‌رود، از این آزمایش در جهت بررسی افزایش ظرفیت باربری ماسه بادی در اثر تثبیت با استفاده از شیوه فعالسازی قلیایی استفاده گردید. بر خلاف آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده که امکان بررسی مقاومت فشاری ماسه بادی به علت ناپایداری ماسه بادی در حالت محدود نشده امکان‌پذیر نبوده است، در آزمایش CBR امکان بررسی دقیق درصد CBR ماسه بادی فراهم گردیده است. با مراجعه به شکل شماره ۷ می‌توان

فعال شده قلیایی در مقایسه با سیمان پرتلند کاسته می‌شود. مطالعات پیشین در حوزه ژئوپلیمرها، افزایش سریع‌تر مقاومت فشاری در سنین ابتدایی را در ژئوپلیمرهای پایه متاکائولن نسبت به سیمان پرتلند تأیید می‌کند [۲۵]. افزایش سریع‌تر مقاومت فشاری نمونه‌های فعال شده قلیایی نسبت به سیمان پرتلند در سنین اولیه، یکی از نکاتی است که می‌تواند استفاده از این مواد را در فرآیندهای مرتبط با تثبیت لایه‌های خاک در پروژه‌های راهسازی مورد توجه قرار دهد.

#### ۴-۱-۴ اثر درجه حرارت بر عمل‌آوری ژئوپلیمر:

نتایج نشان داده شده در شکل شماره ۶ نشانگر اثر افزایش درجه حرارت عمل‌آوری بر مقاومت فشاری نمونه‌های خاک تثبیت شده با فعالساز قلیایی است. در مطالعه حاضر گروه اول از نمونه‌ها در دمای محیط نگهداری شده و دسته دوم ابتدا در اوون به مدت ۴ ساعت در دمای  $60^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس نگهداری شده و سپس تا موعد انجام آزمایش در دمای محیط نگهداری شده‌اند. نتایج حاکی از افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری نمونه‌ها در اثر حرارت است. اثر حرارت بر افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها را می‌توان از دو منظر بررسی کرد. نخست، بالاتر رفتن درجه قلیایی مخلوط حاصل بر اثر تبخیر آب اضافه می‌باشد. با افزایش درجه قلیایی محیط، زنجیره



شکل ۸. تصویر SEM ژل فعال شده قلیایی و ذرات ماسه بادی

Fig. 8. SEM image of alkali activated gel and soil particles

بهینه فعالساز قلیایی به کار گرفته شود. همچنین نتایج CBR به دست آمده برای نمونه‌های C5M6 و C8M6 بیانگر اثربخشی مقدار مواد پایه افزوده شده، جهت به کارگیری خاک تثبیت شده در پروژه‌های راهسازی است، هرچند حصول مقادیر بالاتر CBR با افزایش مقدار متاکائولن و فعالساز قلیایی همچنان قابل دستیابی است.

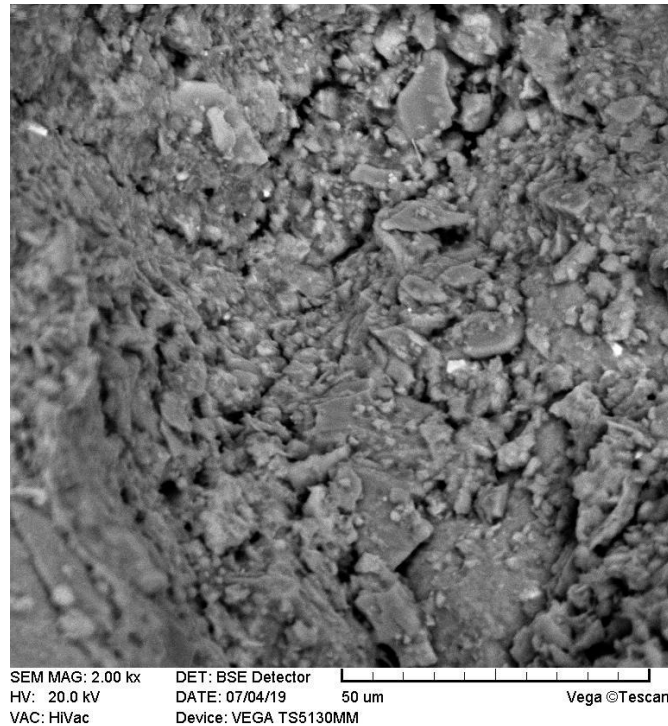
#### ۳-۴- تحلیل ریزساختاری:

#### ۳-۴-۱- تصاویر SEM:

تحلیل ریزساختارها با استفاده از سطوح شکسته شده نمونه‌های آزمایش شده در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده انجام گردید. برای بررسی تصاویر SEM از میکروسکوپ الکترونی روبشی مستقر در دانشگاه شهید باهنر کرمان استفاده شد. شکل شماره ۸ نشانگر ذرات ماسه بادی و اتصال سنگدانه‌ها از طریق ژل تشکیل یافته در نمونه با سن ۲۸ روز می‌باشد. مطابق تصویر ذرات گردگوشه ماسه بادی و ژل چسباننده به خوبی از یکدیگر قابل تفکیک هستند. آغشته شدن کامل سطوح خارجی ذرات ماسه بادی به ژل چسباننده نشان از اتصال مناسب میان ژل و سنگدانه‌ها دارد. همچنین نفوذ ژل‌های چسباننده C-S-H و C-A-S-H به درون ساختار میان دانه‌ای

مقدار درصد CBR را برای ماسه بادی و نمونه‌های تثبیت شده خاک با درصد غلظت فعالساز قلیایی (2%, 5%, 8%, 11%) برای یک مقدار ثابت از متاکائولن (6%) در سنین ۷ و ۲۸ روز را مشاهده نمود. درصد CBR ماسه بادی در حالت تثبیت نشده در حدود ۴/۵ می‌باشد که نشانگر ناکارآمدی خاک مورد نظر در جهت کاربردهای مهندسی بوده و لزوم تثبیت این نمونه از خاک‌ها را بیان می‌دارد. در نمونه‌های تثبیت یافته، بالاترین مقدار CBR مربوط به نمونه C8M6 در سن ۲۸ روزه با درصد CBR برابر با ۶۲ می‌باشد. الگوی کلی حاکم بر رفتار نمونه خاک‌های تثبیت شده قلیایی مشابه آزمایش تک محوری محدود نشده می‌باشد. در اینجا نیز با افزایش تدریجی مقدار پسماند کاربید کلسیم ابتدا مقادیر CBR نمونه‌ها افزایش یافته، سپس با عبور مقدار پسماند کاربید کلسیم از مقدار بهینه، درصد CBR نمونه‌ها کاهش یافته است. بنابراین در اینجا نیز می‌توان اثر مخرب ناشی از یون‌های آزاد هیدروکسید و کلسیم را که در فرآیند فعالسازی قلیایی مشارکت نداشته‌اند را مشاهده نمود.

نکته قابل تامل دیگر، یکسان بودن مقدار بهینه پسماند کاربید کلسیم در هر دو آزمایش تک محوری محدود نشده و CBR است. بدین معنا، آزمایش CBR نیز مانند آزمایش تک محوری محدود نشده می‌تواند در تعیین مقدار



شکل ۹. حفره‌ها و ریزترک‌ها روی سطح خارجی ژل چسباننده

Fig. 9. Voids and microcracks on the surface of binding gel

ژل چسباننده رسوب کنند [۲۸]. علاوه بر این، میکروکریستال‌های کربنات کلسیم<sup>۳</sup> می‌توانند از واکنش میان هیدروکسید کلسیم و گاز کربنیک موجود در هوا پدید آیند. بنابراین، بر پایه خاصیت قلیایی بالای نمونه C11M6 به نظر می‌رسد رشته‌های سفیدرنگ در تصویر ۱۰، هیدروکسید کلسیم یا کربنات کلسیم باشند. با این حال، شناخت بهتر مکانیسم رسوب‌گذاری بخش‌هایی از ماده فعال‌ساز قلیایی که در فرآیند انحلال شرکت نداشته‌اند نیازمند مطالعه و بررسی دقیق‌تر می‌باشد.

#### ۴-۳-۲- تحلیل و مقایسه ریزساختارها با مطالعات پیشین:

در مقایسه با موادی همچون خاکستر آتشفشانی [۱۱] و سرباره آهن گدازی [۱۲]، ژل پدید آمده از ترکیب متاکائولن و پسماند کاربرد کلسیم از همگنی و یکنواختی بیشتری برخوردار است و ریزترک‌های کمتری در ژل سه بعدی پدید آمده است. ژل حاصل از سرباره آهن گدازی عمدتاً متورق بوده و در محل اتصال با سنگدانه‌ها نیز از انسجام کافی برخوردار نبوده است. علت این امر را می‌توان در ناخالصی‌های موجود در سرباره آهن و خاکستر آتشفشانی جستجو کرد. ساختار شیمیایی یکدست و یکنواخت

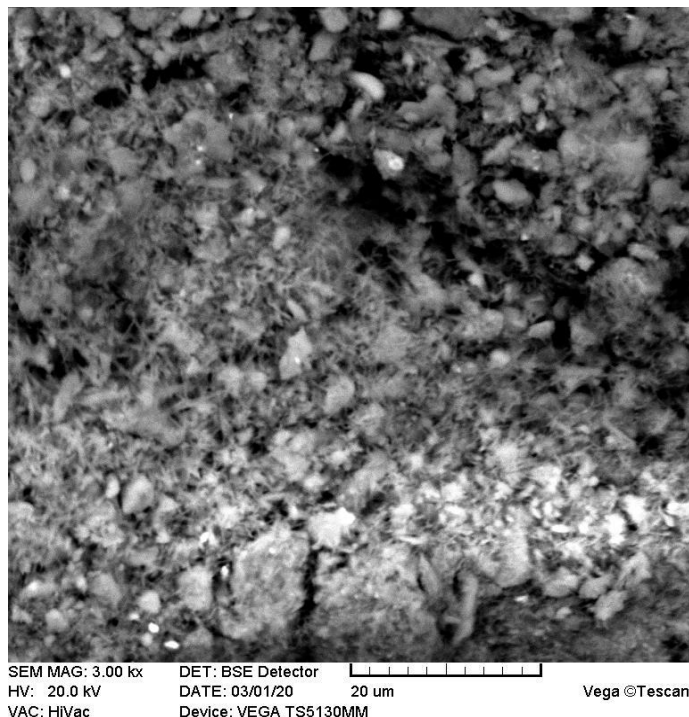
ذرات ماسه بادی به خوبی مشهود است. بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر از سطح خارجی ژل چسباننده در شکل شماره ۹، نمایانگر حفره‌ها، ریزترک‌ها و مواد پایه حل نشده در فرآیند انحلال بر روی سطح ژل فعال شده قلیایی می‌باشد. از آنجا که در فرآیند انحلال ماده پایه آلومینوسیلیکاتی، ژل‌های C-A-S-H با نسبت‌های سیلیس بر آلومینیوم و کلسیم بر آلومینیوم<sup>۱</sup> متفاوتی شکل می‌گیرد، ژل‌هایی با ماتریس‌های مولکولی دو یا سه بعدی و ظاهر فیزیکی متفاوت پدید می‌آیند. مجموعه این عوامل باعث بروز ساختار ناهمگن در سطح خارجی ژل چسباننده قلیایی می‌شوند.

شکل ۱۰ نمایشگر سطح خارجی ژل چسباننده در نمونه C11M6 شامل ۶٪ متاکائولن و ۱۱٪ پسماند کاربرد کلسیم در بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر می‌باشد. تصویر SEM نشانگر تجمع نوارهای سفیدرنگ متعدد بر روی سطح خارجی ژل شکل گرفته است. چنانچه که پیش‌تر اشاره گردید، مقدار اضافه پسماند کاربرد کلسیم موجب کاهش کیفی کارکرد مکانیکی نمونه C11M8 نسبت به نمونه C8M6 شده بود. با افزایش سطح قلیایی مخلوط، ذرات حل نشده هیدروکسید کلسیم<sup>۲</sup> می‌توانند در پیرامون سطوح

- 1 Ca/Al
- 2 Ca(OH<sub>2</sub>)

3 CaCO<sub>3</sub>





شکل ۱۰. رشته‌های رسوب شکل گرفته در نمونه با ۱۱٪ پسماند کاربرد کلسیم

Fig. 10. SEM micrograph of dissolved contents of alkali activator

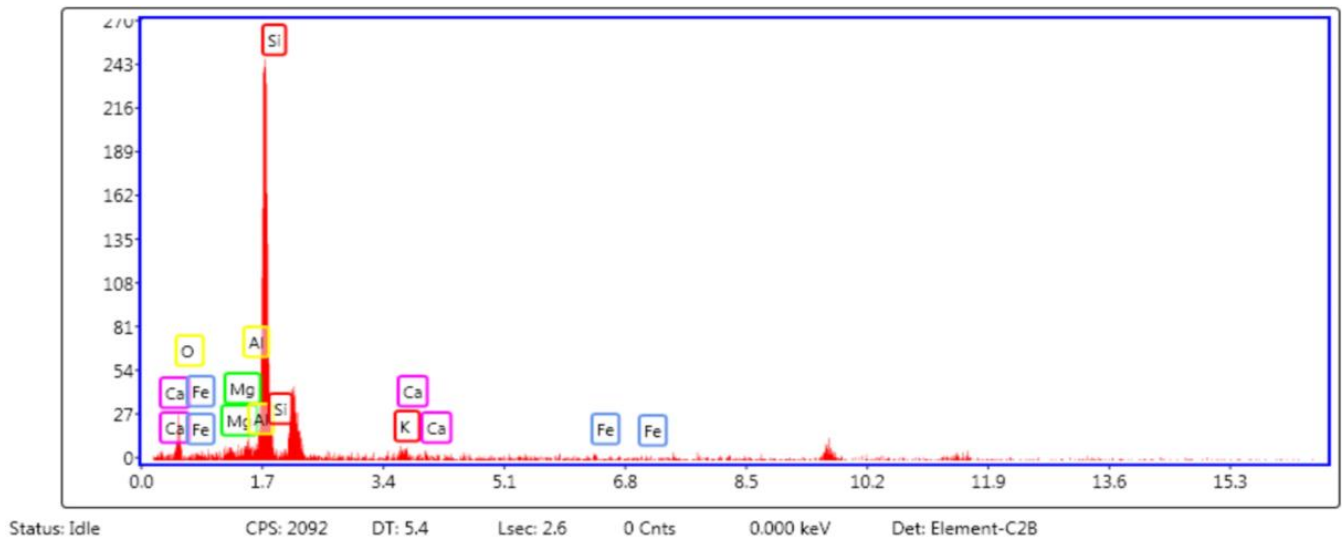
بیشتر و دقیق‌تر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی FEI ESEM Quan-ta200 موسسه تحقیقاتی رستاک استفاده گردید. تحلیل بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه انجام گرفته و شامل نتایج طولانی مدت مربوط به توسعه ژل سخت کننده نمی باشد. همچنین از واکنش های جانبی ناشی از ناخالصی های احتمالی موجود در پسماند کاربرد کلسیم به علت ناشناختگی و عدم امکان کنترل تمامی ریز ساختارهای پدید آمده صرف نظر گردیده و نمونه با بزرگنمایی ۲۵۰۰۰ برابر جهت تحلیل ساختاری مورد استفاده قرار گرفت. ساختار شیمیایی ذرات ماسه بادی و ژل قلیایی شکل گرفته در شکل های شماره ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. مطابق انتظار، عناصر اصلی در ماسه، سیلیس و اکسیژن به همراه مقادیر محدودی از آلومینیوم و کلسیم بوده است. تحلیل نقطه‌ای EDX بر روی ژل حاصل از فعالسازی قلیایی نشان از مقادیر قابل ملاحظه از کلسیم، سیلیس و آلومینیوم دارد که بیانگر تشکیل ژل های C-S-H و C-A-S-H در ساختار میان دانه‌ای خاک است. نکته قابل تامل در ساختار ژل چسباننده، حضور عنصر آهن در ترکیب ژل قلیایی می باشد. با مراجعه به جدول شماره ۱ می توان دریافت که حضور عنصر آهن در متاکائولن و پسماند کاربرد کلسیم بسیار ناچیز است، اما ماسه بادی مورد استفاده مقادیر قابل ملاحظه‌ای از آهن را به همراه دارد. مطالعات

متاکائولن در مطالعه حال حاضر، منجر به شکل گیری ژل میان دانه ای با حداقل ریزترک ها گردیده است. در مقایسه با مطالعات ژانگ و همکاران [۹] که از متاکائولن و محلول هیدروکسید سدیم در جهت تثبیت خاک رسی بهره برده شده است نیز سطح خارجی ژل شکل گرفته تحت تاثیر حل شدن ذرات ریزدانه رسی در محلول قلیایی قرار گرفته است که این امر خود منجر به کاهش عملکرد مکانیکی ژل چسباننده گردیده است. هر چند، انحلال نسبی ذرات رس در محلول قلیایی منجر به اتصال بهتر ذرات با ژل چسباننده گردیده است. نتایج تحلیل نقطه ای EDX نشان می دهد در مورد ذرات ماسه بادی نیز انحلال ذرات ریزتر ماسه بادی در محلول قلیایی صورت گرفته است. البته باید توجه داشت، به علت تفاوت قابل ملاحظه اندازه ذرات ماسه بادی با ذرات رس و سطح مخصوص بسیار کمتر ذرات ماسه بادی، مقدار انحلال به مراتب کمتر از ذرات رسی است.

#### ۳-۳-۴- تحلیل EDX :

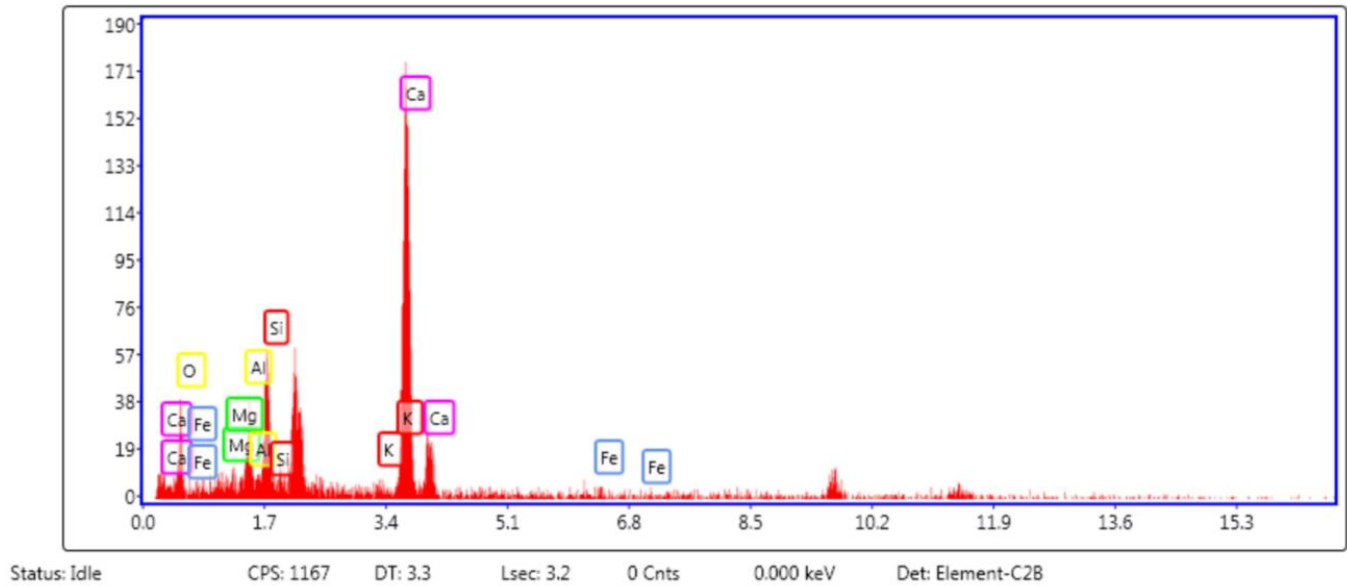
برای بررسی گوناگونی انواع ژل های C-A-S-H پدید آمده و تحلیل ساختار شیمیایی (EDX) هر کدام از این ژل ها، با توجه به نیاز به بزرگنمایی





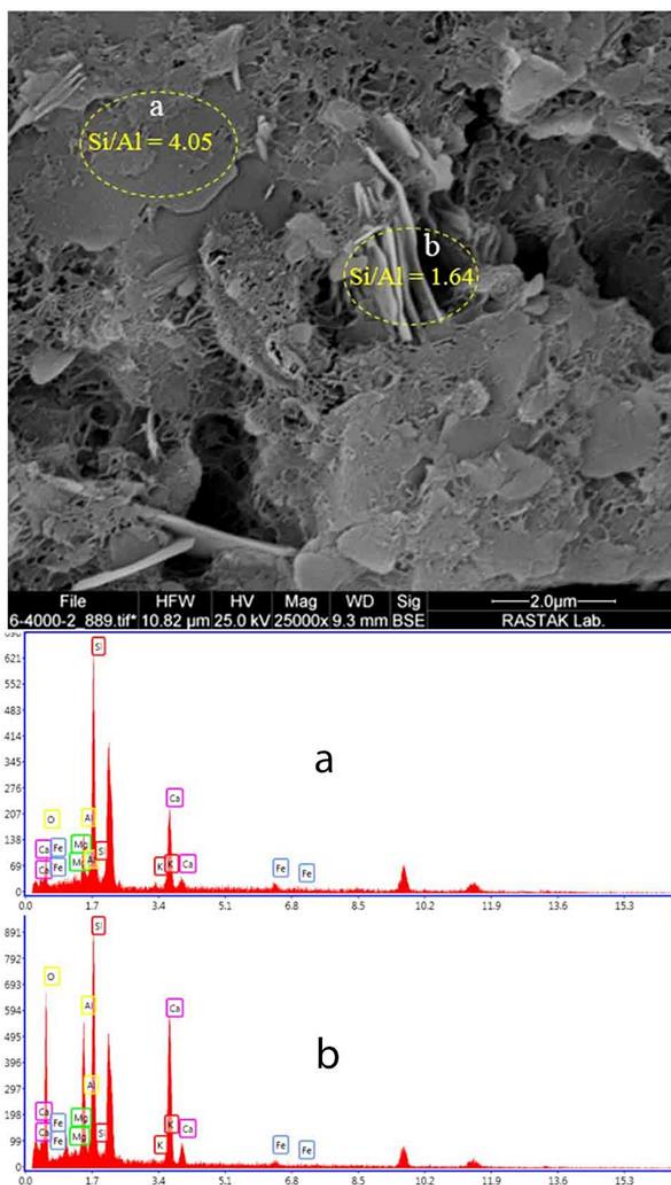
شکل ۱۱. آنالیز EDX از سطح خارجی ذرات ماسه بادی

Fig. 11. EDX analysis of soil particles



شکل ۱۲. آنالیز EDX از سطح خارجی ژل فعال شده قلیایی

Fig. 12. EDX analysis of alkali activated binding gel



شکل ۱۳. آنالیز نسبت سیلیس بر آلومینیوم برای نواحی مختلف از سطح ژل چسباننده: ژل گسترده با سطح یکنواخت (a)، صفحات صلب سفید رنگ بشقابی شکل (b).

Fig. 13. Si/Al analysis of alkali activated products: (a) the intact area, (b) the discrete objects

بزرگنمایی ۲۵۰۰۰ جهت مشخص کردن نسبت سیلیس بر آلومینیوم ژل‌های شکل گرفته استفاده گردید. مقادیر نسبت سیلیس بر آلومینیوم کمتر از ۳ واحد اغلب منجر به شکل گیری ماتریس‌های صلب سه‌بعدی می‌گردند، حال آنکه مقادیر بالاتر سیلیس بر آلومینیوم به شکل گیری شبکه‌های دوبعدی با رفتار چسبنده و شکل‌پذیری بالاتر می‌انجامد [۳۵].

مطابق با شکل ۱۳، دو فاز کاملاً متفاوت از ژل‌های چسباننده قابل مشاهده می‌باشد. فاز اول یک منطقه پیوسته و گسترده شامل حفره‌ها و

پیشین در حوزه ماکرومولکول‌های قلیایی حاکی از آن است که در صورت وجود اتم‌های فلزی سنگین در هنگام انحلال ماده پایه آلومینوسیلیکاتی، امکان مشارکت این اتم‌ها در ماتریس مولکولی ژل پدیدآمده فراهم می‌باشد [۶]. بنابراین، حضور ذرات آهن در ژل قلیایی پدید آمده نشان از حل شدن ذرات ریزتر ماسه بادی در فرآیند انحلال و تشکیل ژل قلیایی می‌باشد.

از آنجا که ژل‌های فعال شده قلیایی با تغییر نسبت سیلیس بر آلومینیوم رفتارهای مکانیکی متفاوتی را بروز می‌دهند، از آنالیز نقطه‌ای EDX در

بر سیلیس منجر به شکل گیری جداگانه ژل های A-S-H و C-S-H می گردد، حال آنکه مقادیر کمتر نسبت کلسیم بر سیلیس منجر به شکل گیری ژل C-A-S-H می گردد [۳۶،۳۷]. چرایی این پدیده را می توان در برقراری توازن یونی در نقاط با نسبت کلسیم بر سیلیس پایین تر دانست که منجر به مشارکت یون های کلسیم در شبکه C-A-S-H می گردد. این پدیده می تواند ناهمگنی موجود در پهنه ژل چسباننده در شکل ۱۳ را به خوبی توضیح دهد. در پیرامون اشکال صلب سفیدرنگ، مقدار بالای نسبت کلسیم بر سیلیس نشانگر تجمع یون های کلسیم است که خود به شکل گیری جداگانه ژل های A-S-H و C-S-H انجامیده است، در حالی که در نقاط با نسبت کلسیم بر سیلیس کمتر، ژل C-A-S-H پدید آمده است. بررسی مقدار آلومینیوم از آنالیز نقطه ای EDX، تمرکز بالای آلومینیوم در صفحات صلب سفیدرنگ را نشان می دهد که موید شکل گیری ژل A-S-H در این نقاط است. چنانچه پیشتر اشاره گردید، افزایش مقدار پسماند کاربید کلسیم در مقادیر بالاتر از ۸٪ منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه های خاک تثبیت شده با فعال سازی قلیایی برای مقدار ثابت متاکائولن می گردد. بنابراین، می توان یکی از عوامل کلیدی این کاهش مقاومت را در بالا رفتن نسبت کلسیم بر سیلیس دانست که خود باعث بروز ناهمگنی در صفحات ژل های چسباننده C-A-S-H می گردد. با بالا رفتن نسبت پسماند کاربید کلسیم، مقدار یون کلسیم اضافه باعث بر هم خوردن توازن یونی موجود و در نتیجه تشکیل هر چه بیشتر ژل های A-S-H و C-S-H می گردد. با افزایش نقاطی که ژل های جداگانه A-S-H و C-S-H در آنها شکل یافته اند، گسستگی ها و ریزترک های بیشتری در پهنه ژل قلیایی پدید آمده و از مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت شده می کاهد. بر پایه نتایج به دست آمده از مطالعه ریزساختارهای ژل فعال شده قلیایی به نظر می رسد که کنترل مقادیر نسبت کلسیم بر سیلیس و سیلیس بر آلومینیوم در محدوده های مشخص، در کنار توزیع همسان و متوازن کاتیون فلزی، منجر به افزایش یکپارچگی و در نتیجه بهبود ساختار فیزیکی و کارکرد مهندسی ژل C-A-S-H می گردد.

## ۵- نتایج

بررسی های آزمایشگاهی انجام شده در مطالعه حاضر، در کنار تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده، امکان پذیری استفاده از ژل چسباننده متاکائولن/ پسماند کاربید کلسیم را در تثبیت خاک های ماسه ای بد دانه بندی شده را مد نظر داشته است. بر پایه مطالعات آزمایشگاهی و آنالیز نتایج آن، موارد ذیل

ریزترک ها می باشد و نسبت سیلیس بر آلومینیوم آن از ۴/۰۵ تا ۸ متغیر می باشد. فاز دوم، متشکل از صفحات صلب سفید رنگ با نسبت سیلیس بر آلومینیوم در حدود ۱/۶۴ می باشد. فاز نخست همچنان که دارای قسمت های پیوسته و بکر است، دارای بخش های مشبک و متخلخل نیز می باشد. در بخش های پیوسته و متراکم، نسبت سیلیس بر آلومینیوم در حدود ۴ و نسبت کلسیم بر آلومینیوم در حدود ۱/۶ می باشد. در مناطق مشبک و ترک خورده، نسبت های سیلیس بر آلومینیوم و کلسیم بر آلومینیوم به ترتیب برابر با ۸ و ۲/۵۳ می باشد.

نسبت های به دست آمده از تحلیل نقطه ای EDX بیانگر نقش کلیدی اتم های آلومینیوم در کیفیت فیزیکی ریزساختارهای پدید آمده است. نسبت های بالای سیلیس بر آلومینیوم (بیش از ۴) منجر به شکل گیری ساختارهای مشبک و حفره های متعدد در سطح ژل گردیده، حال آنکه در نواحی با فراوانی بالاتر اتم های آلومینیوم، نسبت های پایین سیلیس بر آلومینیوم باعث پدید آمدن ساختار منسجم تر و یکدست گردیده است. با وجود کارایی نسبت سیلیس بر آلومینیوم در توضیح حفره ها و ریزترک های پدید آمده در سطح ژل چسباننده، استفاده از این نسبت نمی تواند چگونگی پدید آمدن فازهای مختلف از ژل ها و ناهمگنی موجود در پیرامون صفحات صلب سفیدرنگ موجود در شکل شماره ۱۳ را توضیح دهد.

با مشخص کردن نسبت های کلسیم بر سیلیس<sup>۱</sup> برای فازهای مختلف موجود در تصویر ۱۳، به خوبی می توان دریافت که بالاترین نسبت کلسیم بر سیلیس در پیرامون صفحات صلب سفید رنگ بوده (Ca/Si = 0/6) و کمترین مقدار از این نسبت در ژل گسترده و یکپارچه می باشد (Ca/Si = 0/31). در پیرامون صفحات صلب اگرچه مقدار سیلیس بر آلومینیوم بسیار کم بوده است، اما برخلاف انتظار نه تنها ژل توسعه یافته و همگن پدید نیامده است، بلکه ناهمگنی قابل ملاحظه ای نیز به وجود آمده است.

با مقایسه نتایج حاصل از نسبت کلسیم بر سیلیس می توان دریافت که تجمع یون های کلسیم در پیرامون صفحات صلب سفید رنگ دو برابر بیش از ژل گسترده و یکنواخت می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که توزیع نامتوازن یون های کلسیم باعث ناهمگن شدن صفحات و پدید آمدن فازهای مختلف در میان این صفحات شده است. مطالعات به عمل آمده پیشین توسط یپ و همکاران<sup>۲</sup> و همچنین لکومته و همکاران<sup>۳</sup> پیرامون مکانیسم شکل گیری ژل C-A-S-H، نشان می دهد که مقادیر بالای نسبت کلسیم

- 1 Ca/Si
- 2 C. Yip et al.
- 3 I. Lecomte et al.

## منابع

قابل استنتاج است:

- [1] C.A. Anagnostopoulos, Strength properties of an epoxy resin and cementstabilized silty clay soil, *Applied Clay Science*, 114 (2015) 517–529.
- [2] A. Mosallanejad, H. Taghvaei, S.M. Mirsoleimani-azizi, A. Mohammadi, M.R. Rahimpour, Plasma upgrading of 4methylanisole: a novel approach for hydrodeoxygenation of bio oil without using a hydrogen source, *Chemical Engineering Research and Design*, 121 (2017) 113–124.
- [3] GP. Zhang, JA. He, RP. Gambrell, Synthesis, characterization, and mechanical properties of red mudbased geopolymers, *Transportation Research Record*, 2167 (2010) 1–9.
- [4] A. Bosoaga, O. Masek, J.E. Oakey, CO2 capture technologies for cement industry, *Energy Procedia* 1 (1) (2009) 133–140.
- [5] H. Fatehi, S.M. Abtahi, H. Hashemolhosseini, S.M. Hejazi, A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening, *Construction and Building Materials*, 167 (2018) 813–821.
- [6] J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Application*, Institut Geopolymere, France, 2008.
- [7] C. Shi, P.V. Krivenko, DM. Roy, *Alkali-activated Cements and Concretes*, Taylor & Francis, London, New York, 2006.
- [8] D. Hardjito, SE. Wallah, DMJ. Sumajouw, BV Rangan, On the development of fly ash-based geopolymer concrete, *ACI Materials Journal*, 101(6) (2004) 467–72.
- [9] M. Zhang, H. Guo, T. El-Korchi, G. Zhang, M. Tao, Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1468–1478.
- [10] JF. Rivera, R. Mejía de Gutiérrez, S. Ramirez-Benavides, A. Orobio, Compressed and stabilized soil blocks with fly ash-based alkali-activated cements, *Construction and Building Materials*, 264 (2020) 120285.
- [11] N. Shariatmadari, H. Hasanzadehshooiili, P. Ghadir, F. Saeidi, F. Moharami, Compressive Strength of Sandy
- مقادیر مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی نمونه خاک با استفاده از مخلوط تثبیت کننده قلیایی افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان داده‌اند. علاوه بر این، مقایسه نتایج حاصل از ژل متاکائولن/ پسماند کاربرد کلسیم با نمونه‌های تثبیت شده با ۳٪ سیمان پرتلند، حاکی از کارآمدی ژل قلیایی ارائه شده در فرآیند تثبیت خاک است.
- مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با متاکائولن فعال شده با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش یافته است. نرخ افزایش مقاومت در ۲۸ روز نخست پررنگ‌تر می‌باشد.
- افزایش مقدار متاکائولن اثر مستقیم بر مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت شده دارد، هرچند در مقادیر بالاتر متاکائولن از سرعت این افزایش کاسته شده است.
- مقدار بهینه پسماند کاربرد کلسیم به عنوان فعالساز قلیایی در حدود ۸٪ می‌باشد که این مقدار با توجه به مقدار ثابت متاکائولن (۶٪) به دست آمده است. مقادیر بالاتر فعالساز قلیایی عملاً منجر به تخریب ماتریس ژل قلیایی گشته و اثر منفی بر رفتار مهندسی نمونه‌ها می‌گذارد.
- نتایج حاصل از آزمایش CBR در نمونه‌های فعال شده قلیایی از الگوی مشابه با آزمایش تک محوری محدود نشده تبعیت می‌کند. علاوه بر این اثر مخرب یون‌های پسماند کاربرد کلسیم که در فرآیند فعالسازی قلیایی مشارکت نداشته‌اند در آزمایش CBR نیز مشخص است.
- پسماند کاربرد کلسیم این قابلیت را دارد که به عنوان یک فعالساز قلیایی ارزان قیمت، جایگزین فرآورده‌های قلیایی صنعتی مانند هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم گشته و از نگرانی‌های زیست محیطی پیرامون انباشت این زباله صنعتی بکاهد.
- تجزیه و تحلیل نتایج SEM/EDX نشان از اثر بنیادی اتم‌های آلومینیوم در بهبود ریزساختار پدید آمده دارد. مقادیر نسبت سیلیس بر آلومینیوم کمتر از ۴ واحد منجر به حذف ترک‌ها و حفره‌ها در ژل چسباننده می‌گردد. همچنین بررسی اثر نسبت کلسیم بر سیلیس نشان از اهمیت کلیدی توزیع متوازن یون‌های فلزی کلسیم بر شکل‌گیری ساختار یکپارچه ژل C-A-S-H و جلوگیری از تشکیل فصول گسسته و غیرهمگن در پهنای ریزساختار دارد.
- نتایج به دست آمده از تصاویر SEM همچنین نشان از چسبندگی مناسب میان ذرات ماسه بادی به وسیله ژل پدید آمده و پر شدن فضای میان دانه‌ای توسط ژل C-A-S-H دارد.

- alkali activation of soils, *Construction and Building Materials*, 229 (2019) 116816.
- [21] M. Pourabbas Bilondi, MM. Toufigh, V. Toufigh, Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils, *Construction and Building Materials*, 170 (2018) 302–313.
- [22] ASTM D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, 2011.
- [23] ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort, ASTM International, 2007.
- [24] S.M. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, Y. Raksachon, A. Suddeepong, Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations, *Construction and Building Materials*, 24 (2010) 2011–2021.
- [25] T.W. Zhang, X.B. Yue, Y.F. Deng, D.W. Zhang, S.Y. Liu, Mechanical behavior and micro-structure of cement-stabilised marine clay with a metakaolin agent, *Construction and Building Materials*, 73 (2014) 51–57.
- [26] M. Murat, J. Ambroise, J. Pera, Investigation on synthetic binders obtained by middle temperature thermal dissociation of clay minerals. In: 87th Annual meeting of the American ceramic society, Cincinnati, Ohio; May 5–9, 1985.
- [27] P. Duxson, A. Fernandez-Jimenez, JL. Provis, GC. Lukey, A. Palomo, JSJ. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of Materials Science*, 42(9) (2007) 2917–33.
- [28] J. He, J. Zhang, Y. Yu, G. Zhang, The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 80–91.
- [29] L. Wang, X. Li, Y. Cheng, Y. Zhang, X. Bai, Effects of coal-bearing metakaolin on the compressive strength and permeability of cemented silty soil and mechanisms, *Soils Stabilized with Alkali-Activated Volcanic Ash and Slag*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(11) (2021) 04021295.
- [12] MC. Silva, T. Miranda, M. Rouainia, N. Araujo, S. Glendinning, N. Cristelo, Geomechanical behaviour of a soft soil stabilised with alkali-activated blast-furnace slags, *cleaner production*, 267 (2020) 122017.
- [13] S. Horpibulsuk, C. Phetchuay, A. Chinkulkijniwat, A. Cholaphatsorn, Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash, *Soils and Foundations*, 53 (2013) 477–486.
- [14] S. Horpibulsuk, C. Phetchuay, A. Chinkulkijniwat, Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(2) (2012) 184–193.
- [15] C. Phetchuay, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, C. Suksiripattanapong, Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer, *Applied Clay Science*, 127 (2016) 134–142.
- [16] S. Lopez-Querol, J. Arias-Trujillo, M. GM-Elife, A. Matias-Sanchez, B. Cantero, Improvement of the bearing capacity of confined and unconfined cement-stabilized aeolian sand, *Construction and Building Materials*, 153 (2017) 374–384.
- [17] J. Arias-Trujillo, A. Matías-Sanchez, B. Cantero, S. López-Querol, Effect of polymer emulsion on the bearing capacity of aeolian sand under extreme confinement conditions, *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117473.
- [18] D. Li, K. Tian, H. Zhang, Y. Wub, K. Nie, S. Zhang, Experimental investigation of solidifying desert aeolian sand using microbially induced calcite precipitation, *Construction and Building Materials*, 172 (2018) 251–262.
- [19] J. Davidovits, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37 (1991) 1633–1656.
- [20] A. Marsh, A. Heath, P. Patureau, P. Evernden, P. Walker, Influence of clay minerals and associated minerals in

- carbide residue as an alkaline activator for glass powder-clay geopolymer, *Construction and Building Materials*, 183 (2018) 417-428.
- [35] KJDB. MacKenzie, R. Dan Fletcher, C. Nicholson, R. Vagana, M. Schmücker, Advances in understanding the synthesis mechanisms of new geopolymeric materials. In: 6th Pacific Rim conference on ceramic and glass technology 2006. American Ceramic Society: Maui, HI, United States. p. 187-19.
- [36] CK. Yip, G. Lukey, J. Van Deventer, The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, *Cement and Concrete Research*, 35(9) (2005) 1688-1697.
- [37] I. Lecomte, C. Henrist, M. Liegeois, F. Maseri, A. Rulmont, R. Cloots, (Micro)-structural comparison between geopolymers, alkaliactivated slag cement and Portland cement. *Journal of European Ceramic Society* 26(16) (2006) 3789-3797.
- Construction and Building Materials*, 186 (2018) 174-181.
- [30] Z.L. Wu, Y.F. Deng, S.Y. Liu, Q.W. Liu, Y.G. Chen, F.S. Zha, Strength and microstructure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin, *Applied Clay Science*, 127 (2016) 44-51.
- [31] K.G. Kolovos, P.G. Asteris, D.M. Cotsovos, E. Badogiannis, S. Tsvilis, Mechanical properties of soilcrete mixtures modified with metakaolin, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1026-1036.
- [32] ASTM D2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, 2016.
- [33] ASTM D1883 (2016) Standard test method for California bearing ratio test of soil. D 1883, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [34] M. Pourabbas, M. Toufigh, V. toufigh, Using calcium

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Kianynejad, M. Toufigh, V. Toufigh, Aeolian Sand Stabilization using Metakaolin and Calcium Carbide Residue as an Alkaline Activator, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(8) (2023) 1579-1600.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21238.7675





