



## ساخت ژئوپلیمر با پایه پودر شیشه بازیافتی و بررسی کاربرد آن در اصلاح پارامترهای مقاومتی جهت تثبیت خاک رس

محمدعلی محمدزاده<sup>\*</sup>، محمد محسن توفیق

دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران .

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۲  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۳  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

### کلمات کلیدی:

ژئوپلیمر  
پودر شیشه بازیافتی  
تثبیت خاک رس  
نسبت باربری کالیفرنایی  
فعال سازی قلیایی

**خلاصه:** پودر شیشه یکی از پسماندهای جامد روزافزون در جهان است و از طرفی خاک رس معمولاً نیازمند بهسازی جهت استفاده در پروژه‌های عمرانی می‌باشد. در تحقیق حاضر اصلاح پارامترهای مقاومتی خاک رس، توسط ژئوپلیمر ساخته شده با پایه پودر شیشه بازیافتی (RGP) مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور آزمایش‌های مقاومت تک محوری (UCS) و نسبت باربری کالیفرنایی (CBR) به روی نمونه‌های اصلاح شده انجام شد. زمان عمل‌آوری، درصد وزنی استفاده RGP و غلظت ماده فعال کننده (M) از جمله متغیرهای مورد بررسی در پژوهش بودند. به منظور مقایسه، آزمایش‌ها بروی نمونه‌های اصلاح شده با ۱۰ درصد سیمان پرتلند نیز انجام گردید. نتایج افزایش ژئوپلیمر به نمونه‌های خاک نشان داد که میزان استفاده بهینه از RGP مقدار ۹ درصد است. همچنین به غیر از نمونه‌های Oday در آزمایش CBR، سایر نمونه‌های UCS و CBR دارای مقدار بهینه غلظت ماده فعال کننده (NaOH) بودند که نشان دهنده تاثیر شرایط عمل‌آوری بر رفتار خاک اصلاح شده است. بررسی تصاویر عکس برداری الکترونی روبشی (SEM) حاکی از تاثیر روش اصلاحی بر توده خاک بود. مقایسه تحلیلی آزمایش‌های UCS و CBR بیانگر رابطه ریاضی میان نتایج آزمایش‌های UCS و 7day-CBR با همبستگی نسبی خوب بود که با توجه به شرایط نگهداری یکسان نمونه‌ها در ۷ روز اول قابل انتظار بود. همبستگی اندکی در نتایج آزمایش‌های UCS و Oday-CBR مشاهده شد که علت آن تفاوت شرایط عمل‌آوری دو آزمایش در ۷ روز اول بود.

۱- مقدمه

که روند تولید آن در جهان رو به افزایش است. تولید شیشه ضایعاتی اروپا از ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۸ به ترتیب از ۳ میلیون تن به ۴/۱ میلیون تن در سال رسیده است. بر اساس آمار سازمان ملل، در سال ۲۰۰۴ حدود ۲۰۰ میلیون تن ضایعات جامد تولید شده که ۷٪ یعنی حدود ۱۴ میلیون تن آن شیشه ضایعاتی بوده است. همچنین، شیشه‌های ضایعاتی در سرتاسر جهان به علت میزان کم بازیافت آن، کم بودن فضای مراکز دفن موجود و اشغال مراکز دفن جدید، برای سیستم مدیریت ضایعات یک چالش محسوب می‌گردند [۲].

توجه به مسائل زیست محیطی، اقتصادی، فنی و حتی محدود بودن منابع انرژی و مواد معدنی اولیه در فرایند تولید سیمان پرتلند، به خوبی می‌تواند نشان دهنده ضرورت تحقیق و پژوهش در ارتباط با استفاده از مواد جایگزین سیمان در کاربردهای مهندسی عمران و به خصوص اصلاح و تثبیت خاک‌های مسئله‌دار باشد. یکی از بهترین جایگزین‌های سیمان پرتلند استفاده از ژئوپلیمرها است. سیمان ژئوپلیمری ترکیبی از مصالح طبیعی، سیلیکات و آلومینا است که بین آن‌ها فرایند ژئوپلیمریزاسیون صورت

اغلب خاک‌های مسئله‌دار به عنوان بستر پروژه‌های عمرانی نیاز به بهسازی دارند. سیمان پرتلند و آهک گزینه‌های متداول سنتی تثبیت این گونه خاک‌ها در مهندسی ژئوتکنیک هستند، اما استفاده از این مصالح باعث آلودگی محیط زیست شده است. تحقیقات نشان داده است که برای تولید هر یک تن سیمان حدود یک تن گاز دی اکسید کربن<sup>۱</sup> حاصل می‌گردد و این امر سبب گردیده صنعت تولید سیمان به تنهایی حدود ۵٪ تا ۸٪ از آلودگی ناشی از گاز دی اکسید کربن جهان را به خود اختصاص دهد [۱] و در نتیجه این صنعت در زمره صنایع بسیار آلوده کننده محیط زیست قرار گیرد. لازم به ذکر است گاز دی اکسید کربن بیشترین تاثیر را در تولید گازهای گلخانه‌ای دارد که باعث تغییرات شدید آب و هوایی و افزایش دمای کره زمین می‌گردد. از طرفی شیشه‌ها یکی از فراوان‌ترین مواد در پسماندهای گوناگون می‌باشند

1 CO2

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Geocivil.mdz@gmail.com

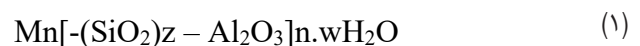


در سال ۱۹۹۴ داویدوویچ و همکارانش طی تحقیقاتی نمونه‌هایی از سیمان ژئوپلیمری را که دارای مقاومت مکانیکی مطلوبی نسبت به سیمان پرتلند معمولی بودند معرفی کردند [۹] و از آن سال تاکنون تحقیقات گسترده‌ای روی این مواد انجام شده است. در تاریخچه تولید با فرآوری ماده خام ژئوپلیمر، تجربه حرارت‌های بسیار بالا، بسیار مهم است. زیرا مواد با قرار گرفتن در دماهای بالا، دچار تغییر ساختار مولکولی می‌شوند. این فرایند ساختار منظم و کریستالی ماده را (که ماده واکنش‌پذیری اندک دارد) به حالت آمورف یا غیر کریستالی (که واکنش‌پذیری به شدت افزایش می‌یابد) تغییر می‌دهد. حرارت بالا موجب بازچینش یون‌های اکسیژن و آلومینوم و از بین بردن رطوبت درون ساختاری ماده خام می‌شود [۱۰]. این فرآیند برای پوزولان طبیعی و خاکستر آتش‌فشانی به صورت طبیعی و برای خاکستر بادی و سرباره‌های صنعتی و شیشه به شکل مصنوعی اتفاق می‌افتد. در واقع امکان‌پذیر شدن ساخت ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی [۱۱]، کمک شایانی به توسعه تکنولوژی ژئوپلیمر کرد. زیرا متاکائولین در ابتدا تنها ماده اولیه‌ای بود که با آن می‌توانست ژئوپلیمر ساخت. متاکائولین، نیازمند صرف انرژی زیاد برای گداخته شدن بود تا مناسب برای استفاده باشد. اما خاکستر بادی (مانند شیشه) بدون نیاز به صرف انرژی مجدد، حرارت دیده است و ساختار مولکولی‌اش آماده انجام واکنش شیمیایی است. پالومو و همکاران (۱۹۹۹) با بررسی‌های آزمایشگاهی، فعال‌سازی قلیایی خاکستر بادی را بررسی کردند [۱۲]. هاردیجتو و همکاران، با بررسی عوامل مختلف موثر بر مقاومت و کیفیت بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی نتیجه گرفتند که بیشتر شدن غلظت محلول سدیم هیدروکسید، موجب افزایش مقاومت بتن ژئوپلیمری می‌گردد و هر قدر که دما در بازه ۳۰-۹۰ درجه سانتی‌گراد زیاد می‌شود مقاومت بتن ژئوپلیمری نیز بیشتر شده است. همچنین با افزایش زمان گیرش در بازه ۴-۹۶ ساعت، مقاومت بتن ژئوپلیمری نیز افزایش می‌یابد [۱۳].

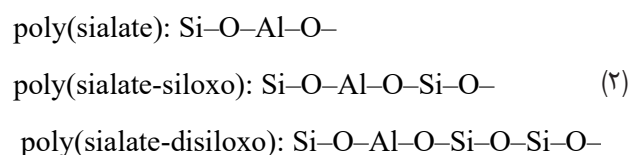
مهنداران و همکاران در سال ۲۰۱۵، از سرباره مس به جای ماسه با درصد‌های جایگزینی مختلف به عنوان سنگدانه ریز در بتن ژئوپلیمری استفاده کردند و نتیجه گرفتند با افزایش جایگزینی سرباره مس با ماسه مقاومت فشاری و دانسیته افزایش و جذب آب کاهش می‌یابد [۱۴ و ۱۵]. محمد و همکاران در سال ۲۰۱۲، از میکروسیلیس به جای ۵۰،۲۵ و ۷۵ درصد سرباره کوره آهن‌گذاری برای ساخت ژئوپلیمر استفاده کردند و نتیجه گرفتند با افزایش درصد میکروسیلیس تا ۵۰ درصد مقاومت فشاری افزایش می‌یابد این افزایش برای ۲۵ درصد میکروسیلیس خیلی قابل توجه است به نحوی که برای دوره‌های عمل‌آوری ۷ روز و کمتر از آن مقاومت بیش

گرفته و از این جهت ژئوپلیمر نامیده می‌شود. فرآیند ژئوپلیمریزاسیون شامل یک واکنش شیمیایی بین منبع آلومینوسیلیکاتی جامد و سیلیکات قلیایی و محلول فعال شده هیدروکسیدی است که منجر به پیوندهای Si-O-Al پلیمری می‌شود. علیرغم آن که تأثیرات مثبت ژئوپلیمرها در بهبود پارامترهای مقاومتی خاک‌ها به وضوح مشخص شده است، اما تأثیرات استفاده از سیمان ژئوپلیمری بر پایه پودر شیشه باز یافتی و تأثیر آن در بهسازی خاک‌ها به صورت ویژه خیلی کم مطالعه شده است.

آغاز تحقیقات روی سیستم‌های فعال‌سازی قلیایی را به تحقیقات دانشمند روس، ویکتور گلوخوفسکی و پس از آن کریونکو در دهه ۱۹۵۰ نسبت می‌دهند. سیستم‌های سیمانی آلومیناسیلیکاتی قلیایی برای اولین بار سیلیکات‌های خاکی و سپس سویلکریت نامیده شدند [۶-۳]. داویدوویچ به دنبال توسعه تحقق ایده تولید پلیمر غیر آلی از مواد آلومینوسیلیکاتی معدنی بود که بعد از ثبت اختراعاتی در ۱۹۷۸، آن‌ها را ژئوپلیمر نامید [۷]. این پلیمر غیر آلی دارای زنجیره‌هایی است که پلی سیالیت نامیده شدند. یک زنجیره سیالیت شامل چهار وجهی‌های  $SiO_4$  و  $AlO_4$  است که با اشتراک تمام اتم‌هایی اکسیژن خود، بهم وصل شده‌اند. یون‌های مثبت  $(Ca^{2+}, Na^+)$ ،  $Li^+$ ،  $K^+$ ،  $NH_4^+$ ،  $Ba^{2+}$  و  $H_3O^+$  باید در ساختار ماده وجود داشته باشند تا بار منفی  $Al^{3+}$  در هر چهار وجه متعادل شود. پلی سیالیت فرمول تجربی زیر را دارد:



M کاتیونی مانند  $Na^+$ ،  $K^+$  و یا  $Ca^{2+}$  است و n درجه بسپارش است که به عبارتی بیانگر درجه پلیمر تشکیل شده است. Z می‌تواند ۲، ۱ و ۳ باشد. پلی سیالیت‌ها پلیمرهایی زنجیره‌های حلقوی با  $Al^{3+}$  و  $Si^{4+}$  در مختصات چهار وجهی به همراه اکسیژن هستند و از حالت آمورف تا شبه کریستالی می‌توانند باشند همچنین داویدوویچ تعدادی از آن‌ها را نام گذاری کرد [۸]:



سینقی و همکاران در سال ۲۰۱۶، از ژئوپلیمر سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی و ترکیبانش برای تثبیت خاک رس با پلاستیسیته پایین استفاده کردند. نتایج آزمایشات نشان داد مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر خاکستر بادی در مقایسه با خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر سرباره ناچیز است. همچنین این نتیجه حاصل شد در صورتی که از خاکستر بادی با اندازه ذرات ریزتر استفاده شود مقاومت فشاری بیشتری حاصل می‌شود [۲۵]. شاوو و همکاران اثر اندازه ذرات شیشه ضایعاتی بر خواص سیمان و بتن را با جایگزینی ۳۰ درصدی سیمان در مخلوط بتن بررسی کردند [۲۶]. نتایج تصریح کرد که مقاومت فشاری با کاهش اندازه ذرات افزایش می‌یابد. خمیری و همکاران به بررسی اثر اندازه ذرات شیشه ضایعاتی با جایگزینی مقدار ثابت ۲۰٪ از آن‌ها با سیمان پرتلند پرداختند [۲۷]. نتایج نشان داد که با کاهش اندازه ذرات شیشه مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. لسکار و موزومبر در سال ۲۰۱۵، مطالعه عددی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوری خاک‌های اصلاح شده با ژئوپلیمر انجام دادند [۲۸]. آرول و همکاران در سال ۲۰۱۵ با انجام آزمایشاتی مانند تراکم، UCS و CBR، اثر مثبت خاکستر زغال سنگ و سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات را بر پارامترهای مقاومتی خاک‌هایی با مواد ارگانیک زیاد گزارش کردند [۲۹]. بینال در سال ۲۰۱۶ افزایش ۶۸/۷ واحدی عدد CBR را با افزودن ۲۵٪ خاکستر زغال سنگ به خاک ریزدانه با پلاستیسیته زیاد مشاهده نمود [۳۰]. فومیفان و همکاران در سال ۲۰۱۸، با انجام آزمایشات تک محوری و دوام تاثیر افزودن سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی رده C را بر روی خاک‌های ساحلی بررسی کردند [۳۱]. آدینجو و همکاران در سال ۲۰۲۰، با افزودن نسبت‌های مختلف خاکستر پوسته برنج<sup>۱</sup> و گرد و غبار کوره سیمانی<sup>۲</sup> به خاک رسی و انجام آزمایشات UCS و CBR اثر مثبت استفاده از این مواد را در افزایش مقاومت تک محوری و عدد CBR خاک اصلاح شده مشاهده کردند و در نتیجه آن به محاسبه کاهش ضخامت لایه روسازی و صرفه جویی اقتصادی آن پرداختند [۳۲]. بیلندی و همکاران در سال ۲۰۱۸ با انجام آزمایش‌های تک محوری عمل‌آوری شده در دو شرایط دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به بررسی تغییرات مقاومت تک محوری و شکل‌پذیری نمونه‌های اصلاح شده با درصد‌های وزنی مختلف پودر شیشه و غلظت‌های مختلف فعال‌کننده پرداختند. برای هر دو متغیر درصد پودر شیشه و غلظت ماده فعال‌کننده مقدار بهینه گزارش کردند [۳۳]. جاناتان و همکاران در سال ۲۰۱۹ با مطالعه اصلاح خاک لجنی توسط fly-ash

از ۱۰ برابر می‌شود [۱۶]. از سالیان قبل استفاده از مواد طبیعی دیگر مانند پوزولان طبیعی، به علت داشتن خواص پوزولانی مطلوب، در ساخت بتن و ملات طبیعی استفاده شده است. بوندار و همکاران در سال ۲۰۱۳، پنج نوع پوزولان طبیعی ایران را مورد بررسی‌های شیمیایی و فیزیکی قرار دادند با توجه به نتایج و با در نظر گرفتن مقاومت فشاری و حلالیت قلیایی به عنوان میزان فعالیت پوزولانی ماده، از میان پوزولان‌های سیرجان، رفسنجان، تفتان، سهند و شاهین دژ، پوزولان تفتان به علت داشتن LOI کم و مقدار کلسیم قابل حل زیاد، بیشترین واکنش‌پذیری و بهترین رفتار را نشان داد [۱۷]. جعفری و رمضانیان پور در سال ۲۰۱۶ به بررسی اثر نوع و غلظت فعال‌کننده بر عملکرد ملات ژئوپلیمری بر پایه پوزولان طبیعی و سرباره پرداختند که نتایج نشان داد نمونه‌های حاوی محلول KOH مقاومت فشاری بیشتری در مقایسه با نمونه‌های NaOH مشابه داشتند. همچنین غلظت بهینه محلول قلیایی ۶-۸ مولار بوده است [۱۸]. بوندار و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی مقاومت ژئوپلیمر پوزولان طبیعی در انواع، فرم‌ها و مقادیر مختلف فعال‌کننده و نسبت مولی  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  و نسبت وزنی محلول هیدروکسید قلیایی به سیلیکات سدیم متفاوت در فعال‌کننده شامل NaOH و  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  پرداختند [۱۹]. کریستلو و همکاران در سال ۲۰۱۲، از ژئوپلیمر خاکستر بادی برای تثبیت خاک استفاده کردند نتایج نشان می‌دهد هر اندازه خاک ریزتر باشد مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر خاکستر بادی بیشتر خواهد شد [۲۰]. کریستلو و همکاران در سال ۲۰۱۲، از دو نوع خاکستر بادی برای تثبیت خاک استفاده کردند و نتیجه گرفتند در کوتاه مدت (۱ هفته عمل‌آوری) خاکستر بادی با درصد کلسیم بیشتر و در بلند مدت (۱۲ هفته عمل‌آوری) خاکستر بادی با کلسیم کمتر دارای مقاومت فشاری بیشتری است [۲۱]. بی و همکاران در سال ۲۰۱۵، از سرباره کوره آهن‌گدازی فعال‌سازی قلیایی شده توسط منیزیم اکسید واکنش‌پذیر و سرباره کاربرد برای تثبیت یک خاک طبیعی در مقایسه با سیمان پرتلند استفاده کردند [۲۲] و به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری بهینه خاک تثبیت شده با سرباره کوره آهن‌گدازی فعال‌سازی قلیایی شده توسط منیزیم اکسید واکنش‌پذیر و سرباره کاربرد، چندین برابر خاک تثبیت شده با سیمان می‌باشد. بی و همکاران در سال ۲۰۱۴، از فعال‌کننده‌های مختلفی برای فعال‌سازی قلیایی سرباره کوره آهن‌گدازی استفاده کردند و نتایج آزمایشات نشان داد که در صورت استفاده از سدیم هیدروکسید بیشترین مقاومت فشاری برای خاک تثبیت شده حاصل می‌شود [۲۳]. ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ از ژئوپلیمر متاکاتولین برای تثبیت خاک رس با پلاستیسیته پایین استفاده کردند [۲۴].

- 1 Rice Husk Ash
- 2 Cement Kiln Dust

در آزمایشگاه نتیجه گرفتند هر دو پارامتر مقاومت تک محوری و نسبت باربری کالیفرنمایی با استفاده از این ژئوپلیمر افزایش داشته‌اند [۳۴]. ساگانیا و همکاران در سال ۲۰۲۰ با انجام آزمایش‌هایی به بررسی تغییرات رطوبت بهینه، وزن خصوص خشک حداکثر و عدد CBR در خاک‌های تورم‌پذیر<sup>۱</sup> اصلاح شده با غبار کوره سیمانی پرداختند و برای پارامترهای وزن مخصوص خشک حداکثر، عدد CBR اشباع و CBR غیر اشباع مقدار بهینه مصرف غبار کوره سیمانی برابر با ۲۰٪ را مشاهده کردند [۳۵].

با توجه به موارد مذکور، بررسی استفاده از پودر شیشه ضایعاتی جهت تثبیت خاک، از یک سو به عنوان یکی از منابع غنی سیلیس و دارای پتانسیل بالا در ساخت سیمان ژئوپلیمری و از سوی دیگر با توجه به مسائل زیست محیطی و امکان بازگرداندن ضایعات شیشه به چرخه تولید، امری ضروری به نظر می‌رسد. بر همین اساس در پژوهش حاضر تأثیر استفاده از ژئوپلیمر با پایه پودر شیشه ضایعاتی بر بهسازی خاک رس مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجا که خاک مورد آزمایش به دلیل پایین بودن مقادیر UCS و CBR، قابلیت استفاده در خاکریزهای مهندسی را نداشت، آزمایش‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت شامل آزمایش‌های پایه مکانیک خاکی شامل آزمایشات دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم، آزمایشات مقاومت فشاری تک محوری، نسبت باربری کالیفرنمایی و همچنین پاره‌ای از آزمایشات ریز ساختاری بود.

## ۲- مواد

### ۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق از گمانه‌های حفاری شده واقع در منطقه پسابندر چابهار در ایران تهیه شده است<sup>۲</sup>. با انجام آزمایش دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM D422 بر روی این خاک نمودار شکل ۱ به دست آمد [۳۶]. نتیجه آزمایش تعیین حدود اتربرگ<sup>۳</sup> نشان داد که دامنه خمیری خاک (PI) برابر ۱۴٪ و حد روانی آن (LL) ۳۴٪ است [۳۷]. با توجه به نتایج فوق و بر اساس سیستم طبقه‌بندی خاک‌ها، خاک مورد مطالعه در طبقه رس با خاصیت خمیری کم (CL) قرار گرفت [۳۸]. نتیجه آزمایش تراکم استاندارد<sup>۴</sup> نشان داد که رطوبت بهینه خاک برابر ۱۴٪ و وزن مخصوص خشک حداکثر آن  $1/68 \text{ gr/cm}^3$  است [۳۹].

### ۲-۲- پودر شیشه

پودر شیشه بازیافتی (RGP)، از جمع‌آوری شیشه‌های بازیافتی از سطح شهر و خرد و پودر کردن آن‌ها در آزمایشگاه و الک کردن به دست آمد. نمودار دانه‌بندی پودر شیشه بازیافتی در شکل ۱ و خواص شیمیایی آن در جدول شماره ۲ نشان داده شده است.

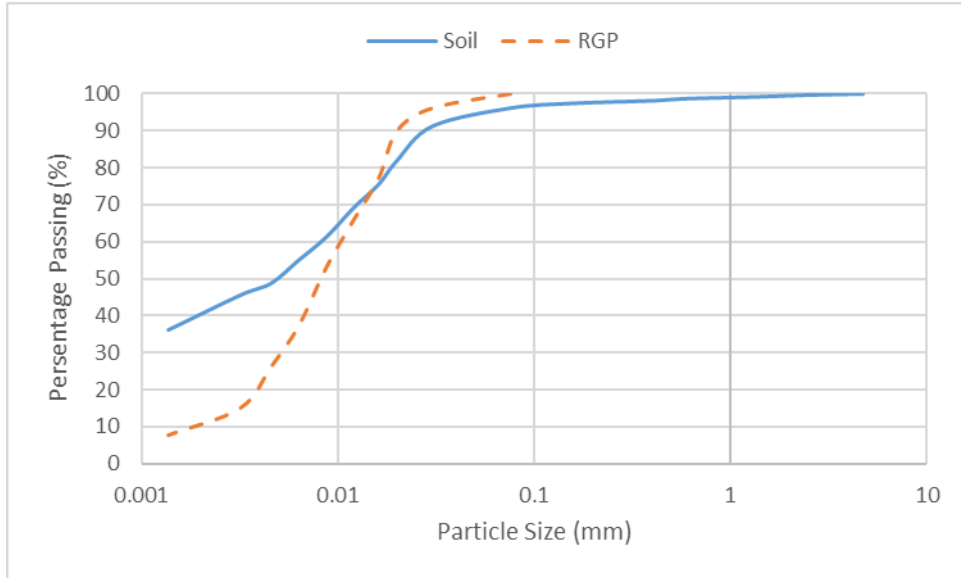
### ۲-۳- ماده فعال کننده

مواد مایع استفاده شده برای ساخت ژئوپلیمرها را فعال کننده گویند. در این تحقیق برای ساخت فعال کننده از هیدروکسید سدیم (NaOH) خریداری شده، با درجه خلوص ۹۸٪ استفاده شده است. هیدروکسید سدیم یکی از متداول‌ترین موادی است که به عنوان فعال کننده قلیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که انحلال هیدروکسید سدیم در آب باعث افزایش دما می‌شود، محلول قلیایی یک روز قبل تهیه شد. محلول قلیایی معادل با رطوبت بهینه (۱۴٪) با غلظت‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ مولار به مخلوط RGP و خاک اضافه شده و تا زمانی که مخلوط یکنواختی تهیه شود اختلاط ادامه یافت (توجه: هنگام تهیه و کار با این محلول، باید از عینک و دستکش محافظ استفاده شود).

### ۳- برنامه آزمایش‌ها

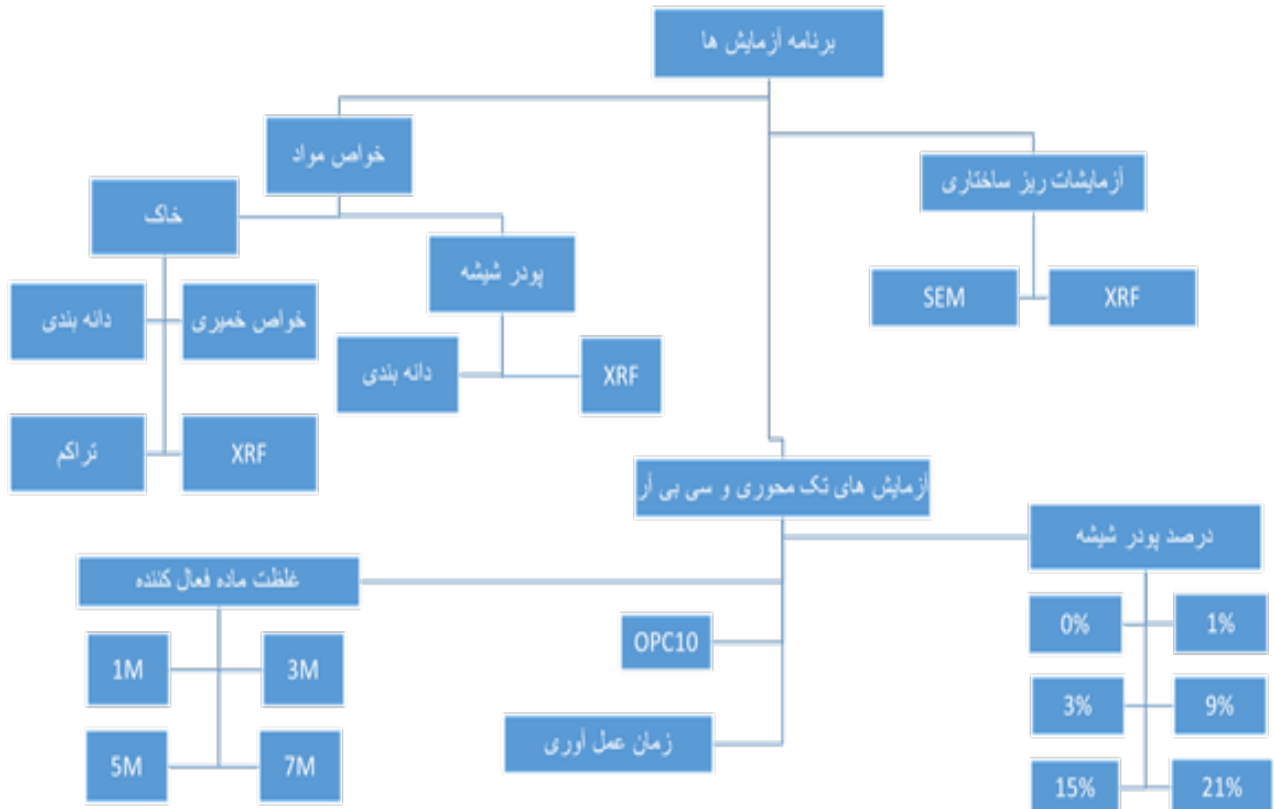
از آنجا که ساخت ملات‌های ژئوپلیمری که در دمای محیط عمل‌آوری شده‌اند برای بهسازی خاک‌ها اجرایی‌تر از سایر موارد به نظر می‌رسد، برای این تحقیق انجام آزمایشات UCS و CBR در دمای محیط در نظر گرفته شد. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به منظور تعیین مقادیر بهینه پودر شیشه بازیافتی و مولاریته ماده فعال کننده مصرفی و آزمایش نسبت باربری کالیفرنمایی به منظور بررسی تأثیر روش عمل‌آوری و ارتباط میان نتایج آزمایشگاهی انجام گرفت. به این منظور تأثیر پارامترهای درصد پودر شیشه، غلظت ماده فعال کننده و زمان عمل‌آوری بر مقاومت تک محوری و عدد CBR خاک اصلاح شده بررسی گردید. همچنین برای مقایسه نتایج، نمونه‌های اصلاح شده با ۱۰ درصد سیمان پرتلند ساخته و با نتایج حاصل از اصلاح با ژئوپلیمر فعلی مقایسه انجام شد. مراحل آزمایشات در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین نام و خواص نمونه‌ها در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

- 1 Black Cotton Soil Expansive
- 2 25.068884 ^L 61.398807^E; 5m AMSL
- 3 ASTM D4318-00
- 4 ASTM D698



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک و پودر شیشه بازیافتی

Fig.1. Particle size distribution of soil and glass powder



شکل ۲. مراحل آزمایش‌ها

Fig. 2. Experimental steps

جدول ۱. نام و خواص نمونه‌ها

Table 1. Names and properties of samples

نام نمونه	غلظت ماده فعال کننده (مولار)	درصد پودر شیشه بازیافتی (%)	درصد سیمان مصرفی (%)	نام آزمایش
Soil	۰	۰	۰	UCS/CBR
S-OPC10	۰	۰	۱۰	UCS/CBR
M1G0	۱	۰	۰	UCS/CBR
M1G1	۱	۱	۰	UCS/CBR
M1G3	۱	۳	۰	UCS/CBR
M1G9	۱	۹	۰	UCS/CBR
M1G15	۱	۱۵	۰	UCS/CBR
M1G21	۱	۲۱	۰	UCS/CBR
M3G0	۳	۰	۰	UCS/CBR
M3G1	۳	۱	۰	UCS/CBR
M3G3	۳	۳	۰	UCS/CBR
M3G9	۳	۹	۰	UCS/CBR
M3G15	۳	۱۵	۰	UCS/CBR
M3G21	۳	۲۱	۰	UCS/CBR
M5G0	۵	۰	۰	UCS/CBR
M5G1	۵	۱	۰	UCS/CBR
M5G3	۵	۳	۰	UCS/CBR
M5G9	۵	۹	۰	UCS/CBR
M5G15	۵	۱۵	۰	UCS/CBR
M5G21	۵	۲۱	۰	UCS/CBR
M7G0	۷	۰	۰	UCS/CBR
M7G1	۷	۱	۰	UCS/CBR
M7G3	۷	۳	۰	UCS/CBR
M7G9	۷	۹	۰	UCS/CBR
M7G15	۷	۱۵	۰	UCS/CBR
M7G21	۷	۲۱	۰	UCS/CBR

Soil: نمونه خاک، S-OPC: نمونه اصلاح شده با سیمان پرتلند، M: مولاریته ماده فعال کننده، G: درصد پودر شیشه بازیافتی

جدول ۲. ترکیب شیمیایی خاک و پودر شیشه بازیافتی

Table 2. Chemical composition of soil and RGP

Chemical Composition (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	LoI
Soil	۴۲/۰۷	۱۹/۸۳	۵/۴۶	۴/۲۴	۱۱/۸۸	۰/۱۰۲	۱/۵۵	۱/۱	۰/۶۸۶	۱۱/۸
RGP	۷۳/۷۷	۱/۹	۰/۰۳۱	۸/۸۷	۲/۱	۰/۷۸	۰/۲۸۱	۱۱/۵	۰/۱۲۸	۰/۲۱

میلی‌متر که بدنه آن با روغن آغشته شده بود متراکم گردید. پس از تراکم، نمونه‌ها از قالب بیرون آورده و وزن شدند. برای انجام هر آزمایش سه نمونه مشابه ساخته شد. نمونه‌های کنترلی خاک اصلاح نشده (Soil) و نمونه اصلاح شده با ۱۰ درصد سیمان پرتلند (S-OPC10) نیز با همین روش ساخته شدند.

۳-۲-۲- عمل‌آوری نمونه‌های فشارشی تک محوری

نمونه‌های متراکم شده، بر روی میز کار در دمای اتاق قرار داده شدند تا زمان عمل‌آوری آن‌ها که ۷، ۲۸ و ۹۰ روز بود طی شد و مورد آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند (شکل ۳).

۳-۲-۳- انجام آزمایش مقاومت فشارشی تک محوری

نمونه‌های عمل‌آوری شده طبق استاندارد ASTM D2166-87 به روش کنترل کرنش با سرعت ۱ mm/min بارگذاری و شکسته شدند [۴۱].

۳-۳- آماده‌سازی، نگهداری و تعیین مقاومت نمونه‌های آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

۳-۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

آماده سازی نمونه‌های آزمایش CBR همانند آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش UCS مطابق بند ۳-۲-۱ بود با این تفاوت که از قالب آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا استفاده شد و در انتها، نمونه‌ها داخل قالب باقی ماندند.

۳-۱- آزمایش طیف سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF)

به منظور شناسایی ساختار شیمیایی، توسط دستگاه *XI3tgoldd,thermos scientific* آنالیز XRF بر روی خاک و پودر شیشه انجام گرفت که نتایج آن در جدول شماره ۲ آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، پودر شیشه منبع غنی از سیلیکا ( $SiO_2=73.77\%$ ) و خاک منبع خوبی از آلومینا ( $Al_2O_3=19.83\%$ ) است که هر دو این‌ها برای ساخت ژئوپلیمر مناسب‌اند.

۳-۲- آماده‌سازی، نگهداری و تعیین مقاومت نمونه‌های فشارشی تک محوری

۳-۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

از آنجا که با افزودن ژئوپلیمرها به خاک تاثیر محسوسی بر مقادیر وزن مخصوص و رطوبت بهینه گزارش نشده است [۴۰ و ۲۴] در این تحقیق نیز اثر فوق در نظر گرفته نشد و کلیه نمونه‌ها با نتایج حاصل از آزمایش تراکم ساخته شدند. آزمایش مقاومت فشارشی تک محوری، یکی از آزمایش‌های متداول در مطالعه تاثیر ژئوپلیمرها بر اصلاح پارامترهای مقاومتی خاک‌ها است. برای ساخت نمونه‌های تک محوری ابتدا خاک عبوری از الک شماره ۴۰ برای مدت ۳ روز در گرمخانه با دمای ۶۰ درجه خشک گردید و سپس برای به دست آوردن مخلوطی یکنواخت، مقادیر مشخص خاک خشک و پودر شیشه با نسبت‌های وزنی مختلف RGP به خاک خشک (۱، ۳، ۹، ۱۵ و ۲۱ درصد وزنی) به مدت حداقل ۲ دقیقه توسط مخلوط کن، مخلوط شدند. محلول ماده فعال کننده با غلظت‌های مختلف (۱، ۳، ۵ و ۷ مولار) به مخلوط خاک و RGP اضافه و حداقل به مدت ۱۰ دقیقه ورز داده شد. مخلوط حاصل در ۳ لایه داخل قالب فلزی دو کفه‌ای با قطر ۳۶ و ارتفاع ۷۲



شکل ۳. تصویر شرایط عمل‌آوری نمونه‌های تک محوری ساخته شده در تحقیق

Fig. 3. Image of processing conditions of UCS samples made in the research

۴، روند این افزایش مقاومت با افزایش درصد پودر شیشه بازیافتی در یک مولارپته ثابت ماده فعال کننده، دارای مقدار بهینه ( $RGP=15\%$ ) می‌باشد. علت را می‌توان در این مورد دانست که با افزایش پودر شیشه از مقدار بهینه، پودر شیشه مازاد بر مقدار بهینه وارد واکنش با ماده فعال کننده نشده و به شکل پودر شیشه در محیط نمونه باقی می‌ماند و از آنجا که پودر شیشه شامل ذرات بسیار ریز و فاقد چسبندگی است لذا افزایش مقدار آن‌ها به تنهایی باعث کاهش مقاومت نمونه خاک خواهد شد. به عنوان مثال نمونه M3G15 در زمان‌های ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۳۴، ۳۸ و ۴۰ برابر نمونه‌های خاک تثبیت نشده متناظر افزایش مقاومت داشته و نسبت به نمونه‌های S-OPC10 متناظر به ترتیب ۷، ۵ و ۴ برابر افزایش مقاومت مشاهده شد. روند کاهشی افزایش مقاومت نمونه‌های M3G15 با افزایش زمان عمل‌آوری، نسبت به نمونه‌های S-OPC10 نشان دهنده زودگیر بودن ترکیب ژئوپلیمری نسبت به سیمان است.

#### ۴-۱-۲- اثر ماده فعال کننده

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود میزان مولارپته بهینه ماده فعال کننده ۳٪ ( $M=M3$ ) است. این روند با توجه به مطالعات پیشین قابل انتظار بود [۳۳]. در این تحقیق نیز مشاهده شد که نمونه‌های M7 در

۳-۳-۲- عمل‌آوری نمونه‌های آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا یک سری از نمونه‌های CBR بلافاصله بعد از ساخت به مدت ۹۶ ساعت داخل حوض آب قرار داده شدند و با شناسه 0day مشخص شدند و سری دوم ابتدا به مدت ۷ روز در دمای اتاق و سپس به مدت ۹۶ ساعت داخل حوض آب قرار داده شدند که با شناسه 7day مشخص شدند.

#### ۳-۳-۳- انجام آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

هر دو سری نمونه‌های عمل‌آوری شده طبق استاندارد ASTM D1883 بارگذاری و شکسته شدند [۴۲].

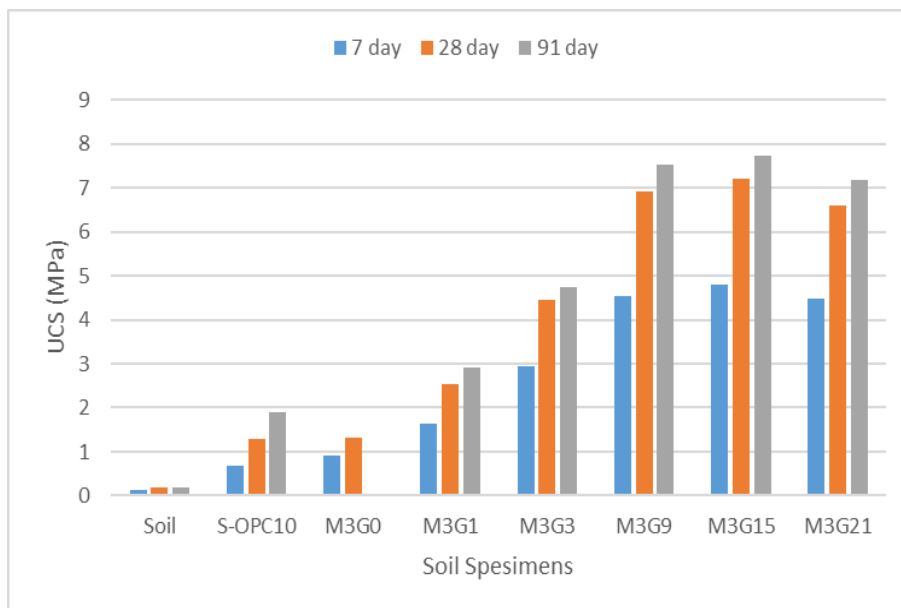
#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشارشی تک محوری تاثیر پارامترهایی همچون درصد پودر شیشه بازیافتی، زمان عمل‌آوری نمونه‌ها و مولارپته ماده فعال کننده مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۱-۱- اثر درصد پودر شیشه بازیافتی و زمان عمل‌آوری

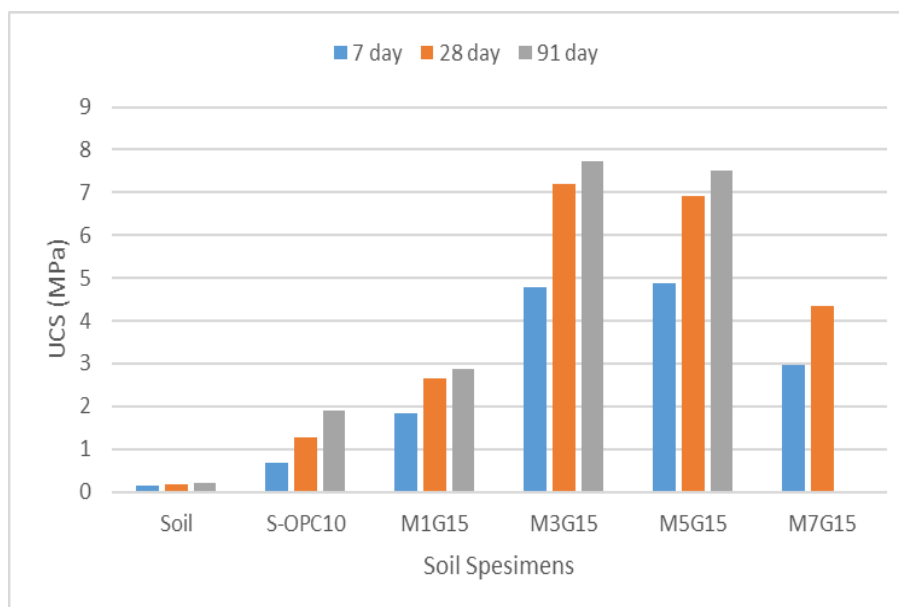
مقایسه نتایج آزمایش‌های فشارشی تک محوری نشان داد که به طور کلی اصلاح خاک با ژئوپلیمر باعث افزایش مقاومت می‌شود. مطابق شکل





شکل ۴. مقاومت تک محوری خاک تثبیت نشده، خاک تثبیت شده با ۱۰٪ سیمان و خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر (سود سوز آور ۳ مولار و مقادیر متغیر پودر شیشه بازیافتی)

Fig. 4. Uniaxial strength of unstabilized soil, soil stabilized with 10% cement and soil stabilized with geopolymer (3 M caustic soda and variable amounts of RGP)

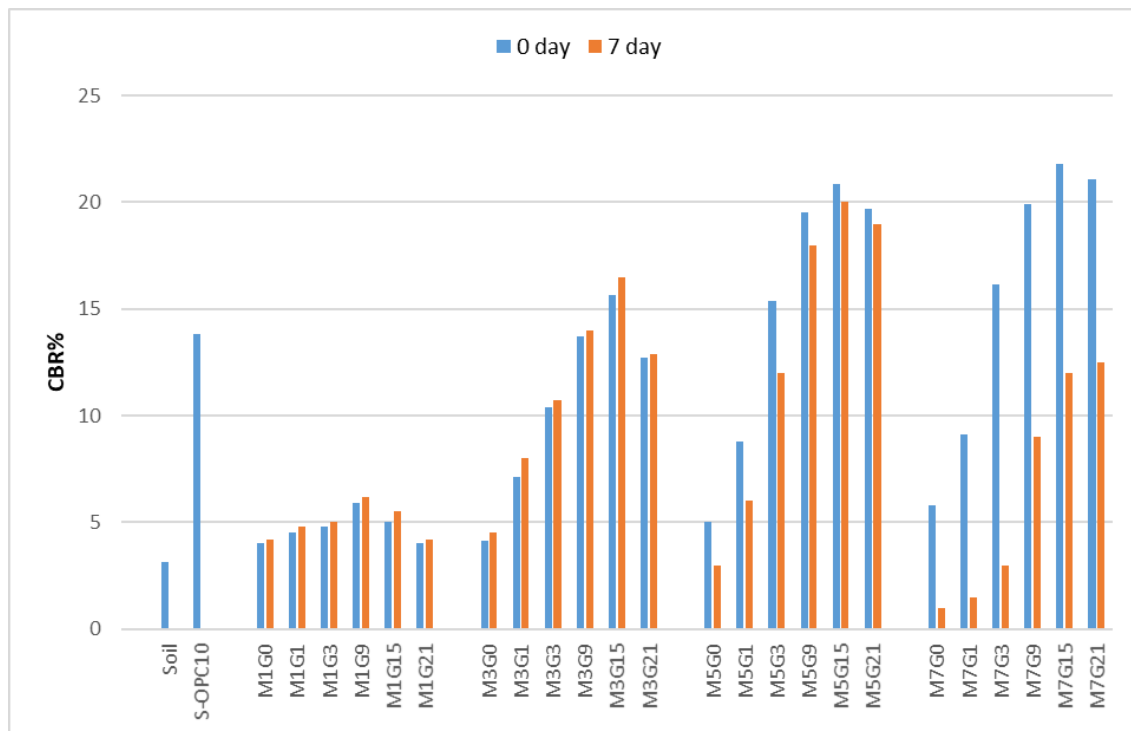


شکل ۵. مقاومت تک محوری خاک تثبیت نشده، خاک تثبیت شده با ۱۰٪ سیمان و خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر (ماده فعال کننده با غلظت‌های مختلف و پودر شیشه بازیافتی ۱۵ درصد)

Fig. 5. Uniaxial strength of unstabilized soil, soil stabilized with 10% cement and soil stabilized with geopolymer (activator with different concentrations and 15% RGP)

RGP و یا درصد پایین آن مشاهده شد. علت کاهش مقاومت بعد از نقطه بهینه را می‌توان این گونه بیان نمود که با افزایش غلظت ماده فعال کننده، غلظت اضافی از واکنش با پودر شیشه، با خاک وارد واکنش شده و باعث تخریب ساختار خاک و در نتیجه کاهش مقاومت آن می‌شود.

زمان عمل‌آوری دچار افزایش حجم و ترک‌های مویی شدند و حتی برخی نمونه‌هایی که برای ۹۰ روز نگهداری می‌شدند در زمان بارگذاری قبل از اعمال بار متلاشی شدند. علت این امر را می‌توان در تخریب ساختار خاک توسط ماده فعال کننده دانست. البته این اتفاق بیشتر برای نمونه‌های فاقد



شکل ۶. CBR خاک تثبیت نشده، خاک تثبیت شده با ۱۰٪ سیمان و خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر

Fig. 6. CBR of unstabilized soil, soil stabilized with 10% cement and soil stabilized with geopolymer

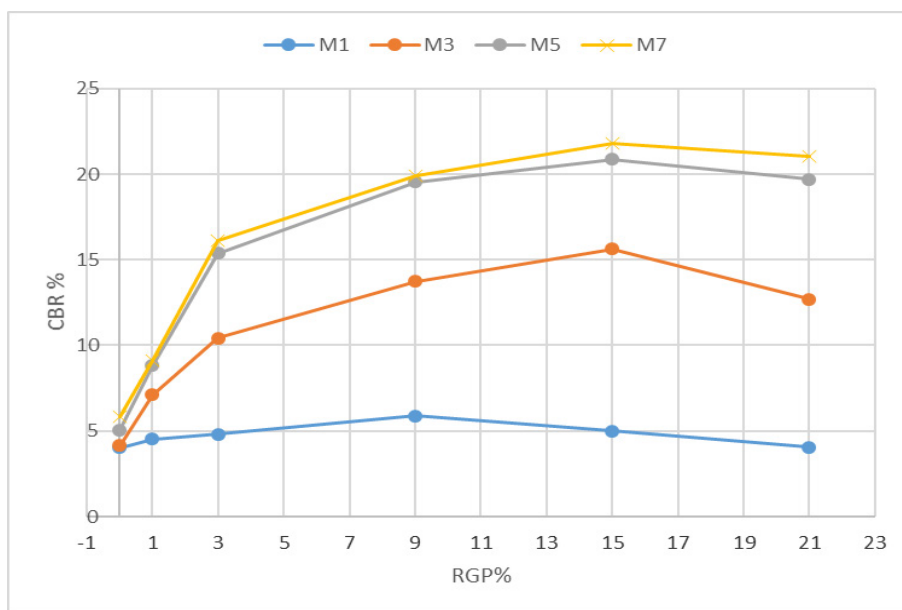
برای نمونه‌های 0day نسبت به نمونه‌های Soil مشاهده شد که بیشتر از افزایش ۶/۳ برابری نمونه‌های 7day بود. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افزایش نسبت باربری کالیفرنایی نمونه‌های S-OPC10 نسبت به نمونه‌های Soil، ۴/۴ برابر است. این مقادیر نشان دهنده موثرتر بودن ژئوپلیمر در اصلاح عدد CBR خاک نسبت به سیمان پرتلند است. از طرفی مشاهده می‌شود مقدار CBR از عدد ۵ که در طراحی روسازی راه‌ها، مرزی مهم برای استفاده مصالح در زیر اساس است، بالاتر رفته و به عبارتی از وضعیت غیر قابل قبول به وضعیت قابل قبول برای استفاده در زیر اساس تغییر کرده است [۳۵]. افزایش عدد CBR با استفاده از ژئوپلیمر با پایه پودر شیشه بازیافتی، امید برای اصلاح خاک‌های رس به کمک ژئوپلیمرها را افزایش می‌دهد. مطابق شکل‌های ۷ و ۸ برای هر دو سری نمونه‌های 0day و 7day مقدار بهینه مصرف پودر شیشه بازیافتی، مشاهده شد. به این معنی که برای بیشتر نمونه‌ها با افزایش مقدار RGP از ۱۵٪، مقدار عدد CBR کاهش یافت. علت این رفتار را می‌توان در اضافه ماندن RGP از مقدار مورد نیاز برای تشکیل ژل ژئوپلیمر دانست. این پودر شیشه اضافی

#### ۴-۲- نتایج آزمایشات نسبت باربری کالیفرنیا

عدد CBR یکی از پارامترهای پرکاربرد در تعیین کیفیت خاک، برای ساخت خاکریزهای مهندسی است. در مناطقی که مصالح در دسترس، از نظر مقدار CBR قابلیت استفاده در پروژه‌ها را ندارند، اصلاح خاک به منظور بالا بردن این عدد، یکی از راهکارهای عملی می‌تواند باشد. برای خاک مورد مطالعه عدد CBR برابر با ۳ در آزمایشگاه به دست آمد که عددی کوچک و نشان دهنده نامناسب بودن خاک برای استفاده در خاکریزهای مهندسی است. بنابراین امکان اصلاح این عدد با استفاده از ژئوپلیمر با پایه RGP مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور تاثیر پارامترهای، درصد پودر شیشه، غلظت ماده فعال کننده و زمان عمل‌آوری بر عدد CBR خاک اصلاح شده بررسی گردید.

#### ۴-۲-۱- اثر درصد وزنی پودر شیشه بازیافتی

افزایش عدد CBR با اصلاح خاک توسط ژئوپلیمر ساخته شده با RGP مشاهده شد (شکل‌های ۶ تا ۱۰). افزایش ۶/۹ برابری عدد CBR



شکل ۷. تغییرات مقادیر CBR در برابر تغییرات درصد RGP برای نمونه‌های 0day

Fig. 7. Changes in CBR values versus changes in RGP percentage for 0day samples

متفاوت بود. همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود افزایش غلظت ماده فعال کننده برای نمونه‌های 0day، دارای روند افزایشی مقادیر CBR با شیب کاهشی است. نرسیدن به مقدار اوج با افزایش غلظت را می‌توان این گونه توجیه نمود که با قرارگیری نمونه‌ها در آب بلافاصله بعد از تراکم، غرقاب شدن باعث نفوذ آب به داخل نمونه و کاهش غلظت ماده فعال کننده و در نتیجه کاهش تشکیل ژل برای ساخت ژئوپلیمر شده است.

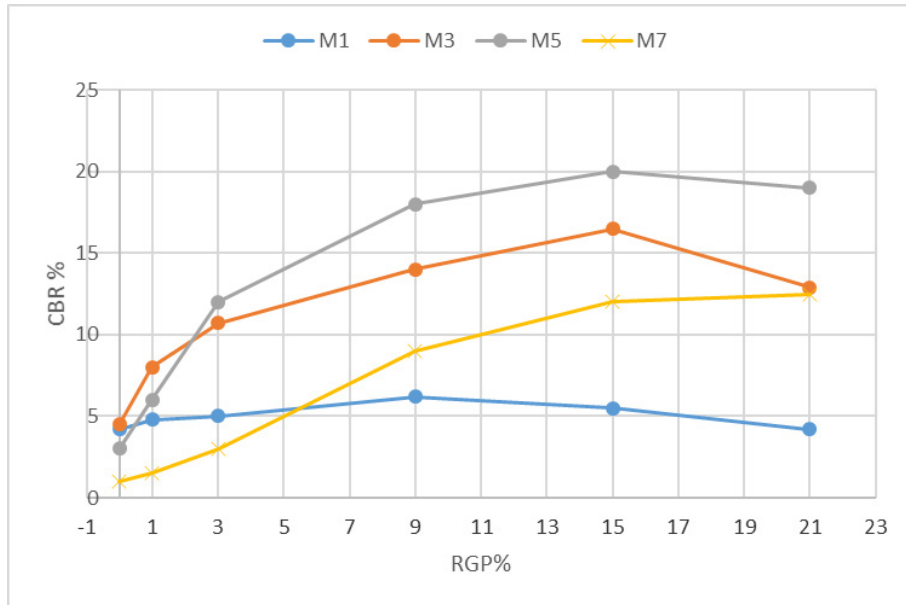
اما همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود نمونه‌های 7day با افزایش غلظت ماده فعال کننده دارای مقدار اوج بودند به این معنی که با افزایش غلظت ماده فعال کننده تا مقدار بهینه عدد CBR افزایش و با افزایش ماده فعال کننده از مقدار بهینه، عدد CBR کاهش می‌یابد. این کاهش مقدار CBR در بیشترین مقدار به ۳۸٪ می‌رسد. مشابه این رفتار در نمونه‌های UCS نیز مشاهده شد که با توجه به شباهت روش عمل‌آوری در ۷ روز اول، قابل پیش بینی بود. نکته دیگری که در شکل ۱۰ قابل ملاحظه است مقدار بهینه غلظت ماده فعال کننده است. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است مقدار بهینه برای نمونه‌های G0 و G1 برابر ۳ (M=۳) و برای سایر نمونه‌ها برابر ۵ (M=۵) است. در حالی که برای نمونه‌های UCS مقدار بهینه غلظت ماده فعال کننده برابر ۳ (M=۳) است. علت این افزایش مقدار بهینه از ۳ برای نمونه‌های UCS به ۵ برای نمونه‌های

که فاقد چسبندگی است در محیط خاک باعث کاهش چسبندگی و در نتیجه کاهش عدد CBR می‌شود. مشابه این رفتار در تحقیق ساگاتیا و همکاران هم مشاهده شده است [۳۵]. برای بیشتر نمونه‌ها مقدار بهینه مطابق انتظار از نتایج تک محوری، مشاهده شد. اما در مورد نمونه‌های M7-7day شرایط متفاوت بود.

نمونه‌های M7-7day با مقادیر RGP برابر صفر، یک و سه درصد دارای مقادیر CBR کمتر از خاک (Soil) بودند. این موضوع می‌تواند نشانه تخریب ساختار خاک توسط ماده فعال کننده باشد، مطابق آنچه در تصاویر آزمایش SEM (شکل D-۱۱) نیز مشاهده می‌شود. اما با افزایش پودر شیشه در نمونه، میزان تخریب ساختار خاک کاهش یافته و واکنش‌ها بیشتر بین RGP و ماده فعال کننده انجام می‌شود. علت اینکه انجام آزمایش روی نمونه‌های M7G0-7day، M7G1-7day و M7G3-7day بر خلاف نمونه‌های UCS متناظر، میسر شد این بود که نمونه‌های CBR، محصور بودند.

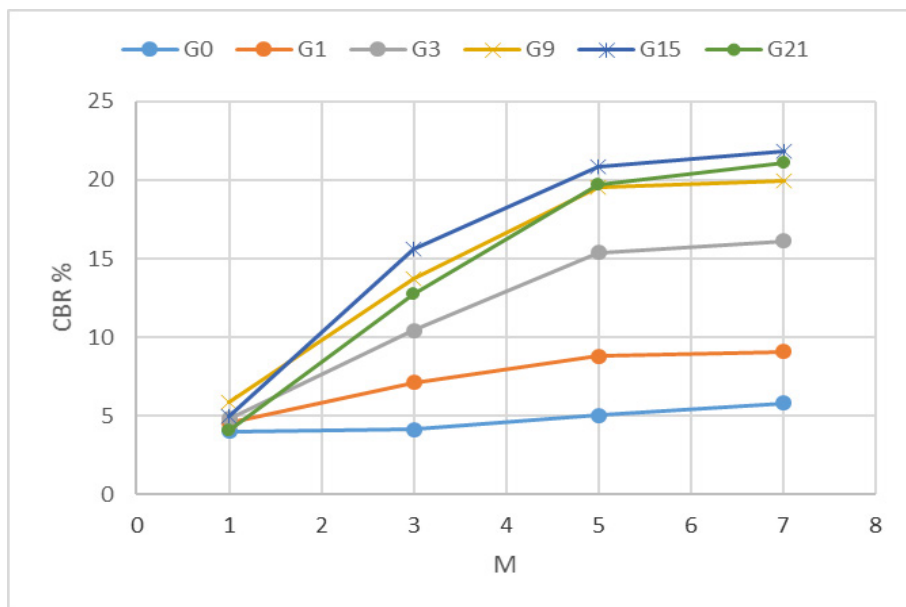
#### ۴-۲-۲ اثر غلظت ماده فعال کننده و شرایط عمل‌آوری

مطابق شکل‌های ۹ و ۱۰، اثر غلظت ماده فعال کننده بر نسبت باربری کالیفرنایی خاک‌های اصلاح شده برای نمونه‌های 0day و 7day کاملاً



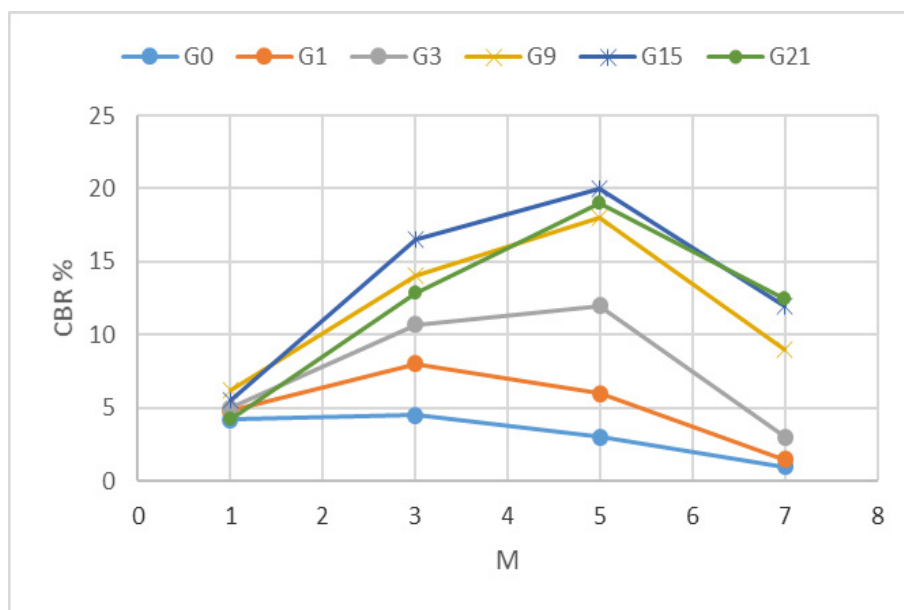
شکل ۸. تغییرات مقادیر CBR در برابر تغییرات درصد RGP برای نمونه‌های 7day

Fig. 8. Changes in CBR values versus changes in RGP percentage for 7day samples



شکل ۹. تغییرات مقادیر CBR در برابر تغییرات غلظت ماده فعال کننده برای نمونه‌های 0day

Fig. 9. Changes in CBR values versus changes in activator concentration for 0day sample



شکل ۱۰. تغییرات مقادیر CBR در برابر تغییرات غلظت ماده فعال کننده برای نمونه‌های 7day

Fig. 10. Changes in CBR values versus changes in activator concentration for 7day samples

۴-۴- بررسی ارتباط نتایج آزمایش‌های مقاومت فشارشی تک محوری و نسبت باربری کالیفرنیا

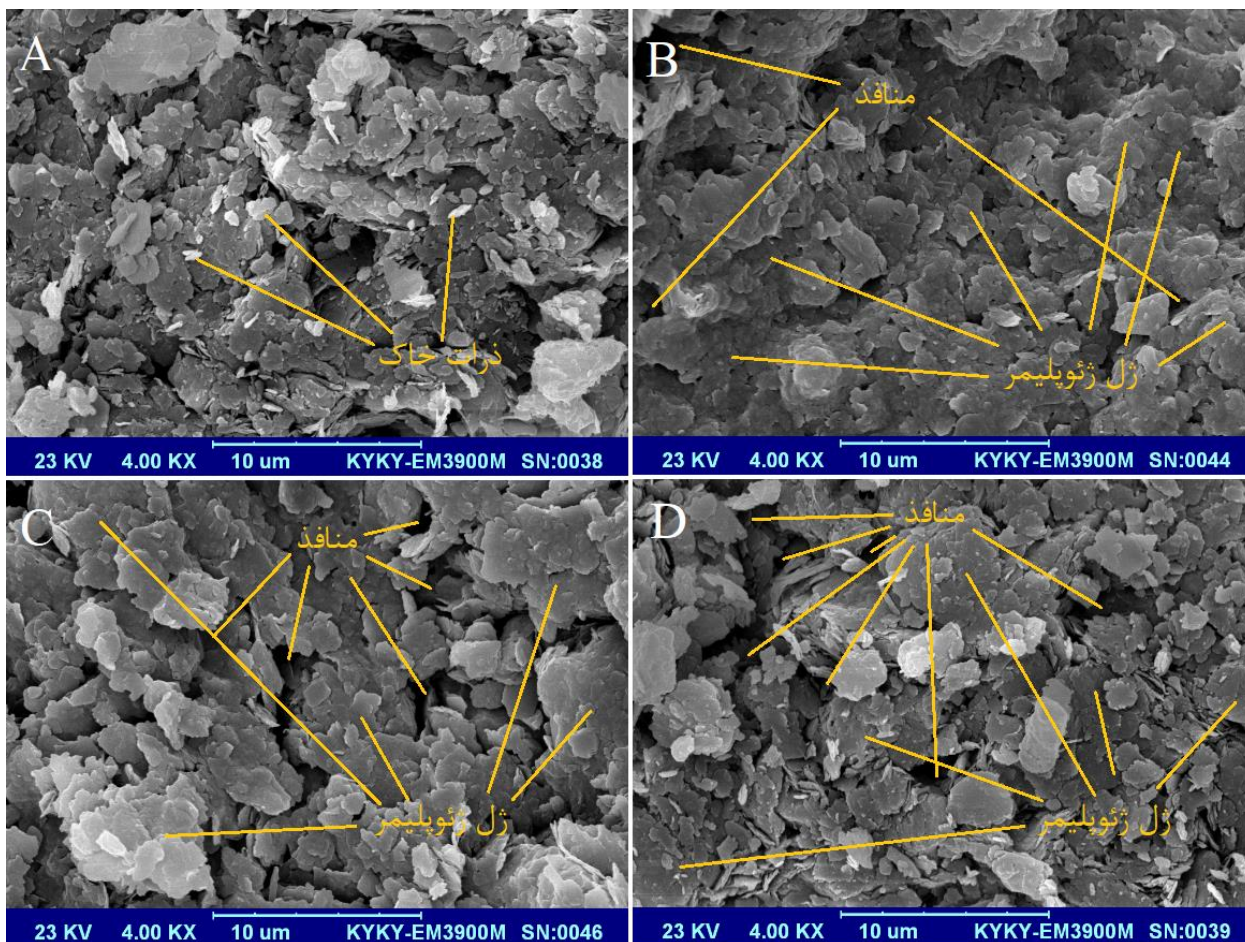
بررسی رابطه میان نتایج آزمایش مقاومت فشارشی تک محوری و نسبت باربری کالیفرنیا، همواره یکی از نتایج جالب توجه و کاربردی تحقیقات مشابه بوده است [۴۳]. در این تحقیق نیز مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳ رابطه میان نتایج UCS و CBR مورد بررسی قرار گرفت. عمل‌آوری نمونه‌های 7day (شکل ۱۲) در ۷ روز ابتدایی ساخت نمونه‌ها مطابق شرایط عمل‌آوری نمونه‌های UCS بود و بنابراین در نمودار هر دو آزمایش نقطه بیشینه مشاهده شد، با توجه به منحنی، معادله خط همبستگی برابر  $UCS = 3.1865CBR + 2.451$  ( $R^2 = 0.8587$ ) به دست آمد. اما برای نمونه‌های 0day (شکل ۱۳) رابطه معادله خط برابر  $UCS = 18.299Ln(CBR) - 19.136$  ( $R^2 = 0.6287$ ) با ضریب همبستگی  $0.6287$  مشاهده گردید. همانطور که از مفهوم ضریب همبستگی پیداست هر چه این عدد به یک نزدیک‌تر باشد به این معنی است که نتایج در مقایسه با یکدیگر دقیق‌تر قابل پیش‌بینی می‌باشند. بنابراین با توجه به تفاوت روش عمل‌آوری نمونه‌های UCS و CBR، میزان همبستگی نتایج آن‌ها کم شده که نشان دهنده تاثیر روش‌های عمل‌آوری بر نتایج آزمایشات است. نتیجه بررسی فوق این است که توجه به شرایط عمل‌آوری نمونه‌ها برای استفاده از رابطه ریاضی پیش‌بینی نتایج

CBR را شاید بتوان در غرق آب شدن نمونه‌های CBR به مدت ۹۶ ساعت قبل از شکستن دانست. به این معنی که با غرقاب شدن نمونه‌هایی که ۷ روز در شرایط محیط قرار داشته‌اند (نمونه‌های 7day) بخشی از ژل ساخته شده واکنش برگشتی داشته و به عبارتی در آب حل شده است.

۴-۳- مطالعات ریز ساختاری

۴-۳-۱- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

عکس برداری الکترونی روبشی از نمونه‌های آزمایش CBR با شناسه‌های Soil، M5G15-0day، M5G15-7day و M7G15-7day انجام شد. علت انتخاب این نمونه‌ها بررسی تاثیر اصلاح برای هر دو شرایط عمل‌آوری نمونه‌ها و بررسی علت کاهش مقاومت با افزایش غلظت ماده فعال کننده بعد از مقدار بیشینه بود. این چهار نمونه به ترتیب دارای CBRهای ۳/۱۷، ۲۰/۸۷، ۲۰ و ۱۵ می‌باشند. شکل ۱۱ تصاویر عکس برداری الکترونی از این چهار نمونه را نشان می‌دهد. مقایسه تصاویر B، C و D از شکل ۱۱ با تصویر A نشان دهنده کاهش تخلخل در نمونه‌هاست. کاهش تخلخل در نمونه‌های اصلاح شده بیانگر انجام فرآیند پلیمریزاسیون است. نکته دیگر قابل مشاهده افزایش تخلخل تصویر D در مقایسه با تصاویر B و C است که می‌تواند نشانی از تخریب بافت خاک و کاهش پیوندهای ژئوپلیمری و در نتیجه کاهش عدد CBR باشد.



شکل ۱۱. تصاویر SEM : A) Soil B) M5G15-0day C) M5G15-7day D) M7G15-7day

Fig.11. SEM Images of: A) Soil B) M5G15-0day C) M5G15-7day D) M7G15-7day

مقاومت فشاری تک محوری،  $M=M3$  )۳٪ (به دست آمد.

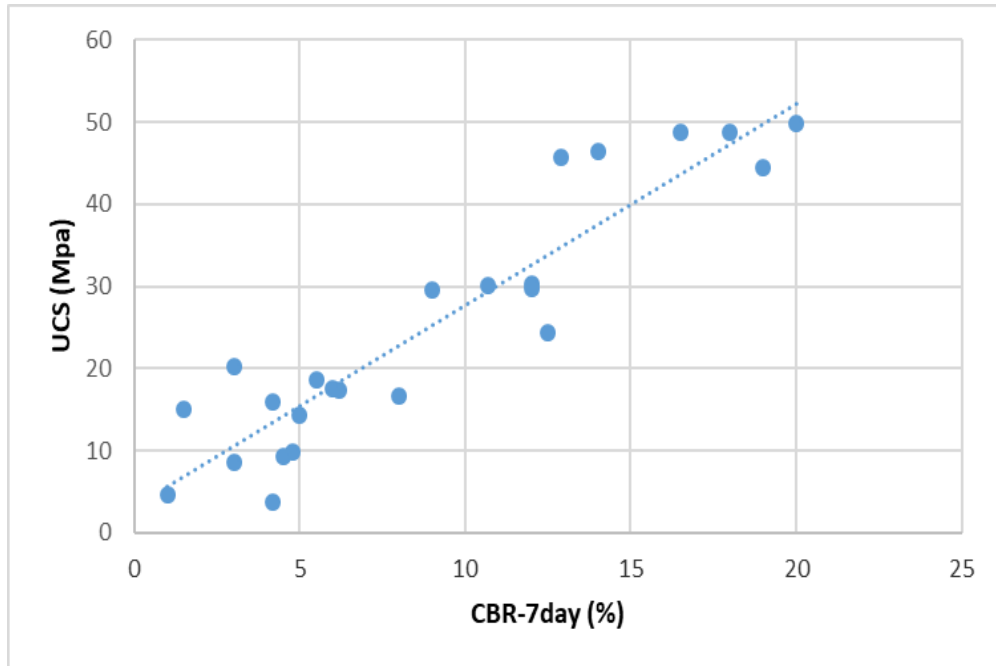
- زمان عمل‌آوری نمونه‌ها نیز بر نتایج UCS موثر بود. به این معنا که با افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار مقاومت تک محوری نیز افزایش می‌یابد اما شیب این افزایش مقاومت، کاهشی است که نشانه‌ای بر زود گیر بودن آن در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی است.
- افزایش مقاومت تک محوری نمونه‌های اصلاح شده توسط ژئوپلیمر در بیشترین مقدار بیش از چهار برابر افزایش مقاومت توسط سیمان پرتلند بود.
- افزودن RGP به خاک باعث افزایش عدد CBR در هر دو حالت عمل‌آوری 0day و 7day شد. برای هر دو سری نمونه‌های 0day و 7day بیشترین افزایش عدد CBR در درصد وزنی ۱۵ درصد از RGP اتفاق افتاد.

آزمایشات UCS و CBR دارای اهمیت است و باید به آن توجه نمود.

## ۵- نتیجه‌گیری

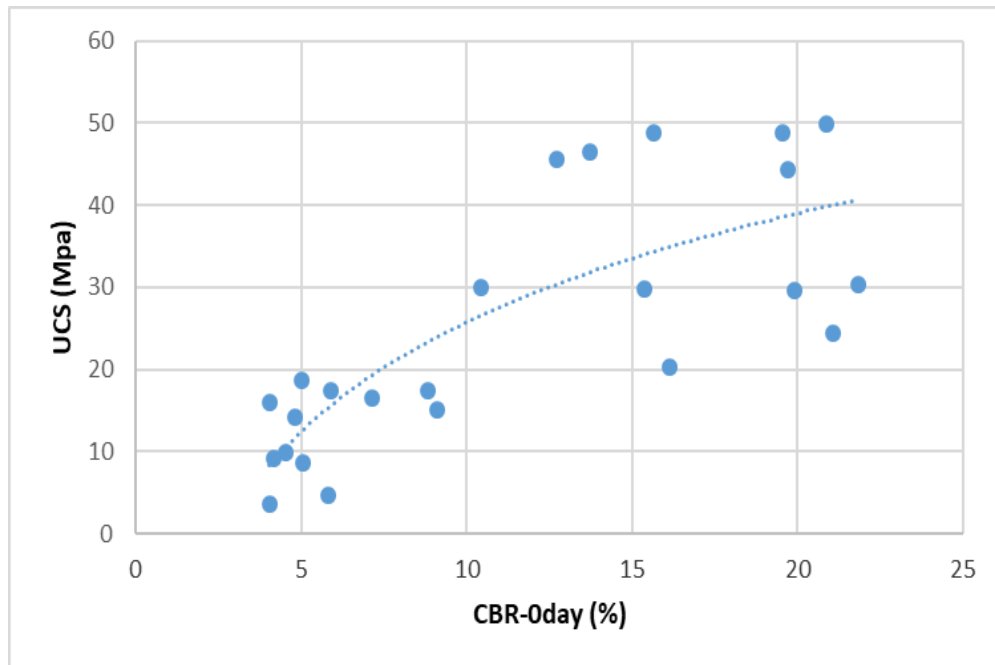
هدف از انجام این تحقیق بررسی امکان استفاده از ژئوپلیمر با پایه پودر شیشه بازیافتی در اصلاح خصوصیات مقاومتی خاک‌های رسی است. با انجام آزمایش‌های برنامه‌ریزی شده نتایج زیر به دست آمد:

- افزودن RGP به خاک باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری شد. درصد وزنی پودر شیشه دارای مقدار بهینه (۱۵٪) است به این معنی که استفاده مقادیر وزنی کمتر و یا بیشتر از مقدار بهینه، مقاومت‌های تک محوره کمتری می‌دهد.
- همچنین غلظت ماده فعال کننده نیز دارای مقدار بهینه برای نتایج UCS بود. میزان مولاریته بهینه ماده فعال کننده برای آزمایش



شکل ۱۲. رابطه مقادیر UCS با 7day-CBR

Fig. 12. Relationship between UCS values and CBR-7day



شکل ۱۳. رابطه مقادیر UCS با 0day-CBR

Fig. 13. Relationship between UCS values and CBR-0day

- Early High Strength Cement, *Materials Education*, 16(2-3) (1994) 1--25.
- [9] J. Davidovits, Properties of Geopolymer Cements, (1994) 131--149.
- [10] J.T. Analysis, Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *Journal of thermal analysis*, 37 (1991) 1633--1665.
- [11] J. Wastiels, X. Wu, S. Faignet, G. Patfoort, Mineral polymer based on fly ash, *The Journal of resource management and technology*, 22(3) (1994) 135--141.
- [12] A. Palomo, M.W. Grutzeck, M.T. Blanco, Alkali-activated fly ashes: A cement for the future, *Cement and Concrete Research*, 29(8) (1999) 1323--1329.
- [13] T. Xie, T. Ozbakkaloglu, Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature, *Ceramics International*, 41(4) (2015) 5945--5958.
- [14] K. Mahendran, N. Arunachalam, Study on utilization of copper slag as fine aggregate in geopolymer concrete, *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(53) (2015) 336--340.
- [15] K. Mahendran, N. Arunachalam, Performance of fly ash and copper slag based geopolymer concrete, *Indian Journal of Science and Technology*, 9(2) (2016).
- [16] M. Sayed, S.R. Zeedan, Green binding material using alkali activated blast furnace slag with silica fume, *HBRC Journal*, 8(3) (2012) 177--184.
- [17] D. Bondar, C.J. Lynsdale, N.B. Milestone, Alkali-Activated Natural Pozzolan Concrete as New Construction Material, *ACI Materials Journal*, 110(3) (2013) 331--337.
- [18] The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers, *Construction and Building Materials*, 111 (2016) 337--347.
- [19] D. Bondar, C.J. Lynsdale, N.B. Milestone, N. Hassani, A.A. Ramezani-pour, Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans, *Cement and Concrete Composites*, 33(2) (2011) 251--260.
- اثر غلظت ماده فعال کننده بر افزایش CBR دارای دو روند کاملا متفاوت برای نمونه‌های 0day و 7day بود. به این معنا که برای نمونه‌های 0day شاهد روند افزایشی مقدار CBR اما با شیب کاهشی بودیم ولی برای نمونه‌های 7day شاهد مقدار بهینه در غلظت M3 برای نمونه‌های G0 و G1، و مقدار بهینه در مقدار M5 برای سایر مقادیر بودر شیشه بودیم.
- رابطه بین نتایج آزمایش UCS و CBR-7day که شرایط عمل‌آوری مشابهی داشتند از همبستگی بهتری برخوردار بود. اما رابطه بین نتایج آزمایش UCS و CBR-0day که شرایط عمل‌آوری متفاوتی داشتند از همبستگی کمتری برخوردار بود.
- از نتایج مهم این تحقیق مشاهده تاثیر روش عمل‌آوری نمونه‌ها بر روی مقدار و روند نتایج است. این نتیجه نشانه‌ای است از تاثیر آب در زمان عمل‌آوری نمونه‌ها بر روی نتایج آزمایشات. همین موضوع لزوم بررسی تاثیر وجود آب بر روی نتایج را در زمان عمل‌آوری و پس از آن آشکار می‌کند.

## منابع

- [1] D. Khale, R. Chaudhary, Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review, *Journal of Materials Science*, 42(3) (2007) 729--746.
- [2] Y. Jani, W. Hogland, Waste glass in the production of cement and concrete - A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3) (2014) 1767--1775.
- [3] V.D. Glukhovskiy, *Soil Silicate Articles and Structures*, Budivelnyk Publisher, (1967) 156.
- [4] V.D. Glukhovskiy, *Soil silicates*, Gostroiizdat Publish, Kiev, 22(7) (1959) 1305--1314.
- [5] V.D. Glukhovskiy, Ancient, modern and future concretes, (1994) 1--8.
- [6] P.V. Krivenko, G.Y. Kovalchuk, Directed synthesis of alkaline aluminosilicate minerals in a geocement matrix, *Journal of Materials Science*, 42(9) (2007) 2944--2952.
- [7] J. Davidovits, Synthesis of new high temperature geopolymers for reinforced plastics/composites. SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center, Spe Pactec, 79 (1979) 151--154.
- [8] J. Davidovits, GEOPOLYMERS: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very



- Structural Fill Material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5) (2016) 04015197.
- [30] A. Binal, The Effects of High Alkaline Fly Ash on Strength Behaviour of a Cohesive Soil, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016 (2016).
- [31] I. Phummiphon, S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Arulrajah, S.L. Shen, P. Chindaprasirt, High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material, *Journal of Hazardous Materials*, 341 (2018) 257--267.
- [32] E. Adeyanju, C.A. Okeke, I. Akinwumi, A. Busari, Subgrade Stabilization using Rice Husk Ash-based Geopolymer (GRHA) and Cement Kiln Dust (CKD), *Case Studies in Construction Materials*, 13 (2020).
- [33] M. P. Bilondi, M. M. 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.
- [34] J.R. Dungca, K.D. Ang, A.M.L. Isaac, J.J.R. Joven, M.B.T. Sollano, Use of dry mixing method in fly ash based geopolymer as a stabilizer for dredged soil, *International Journal of GEOMATE*, 16(57) (2019) 9--14.
- [35] A. Sagathiya, B. Patel, Y. Zala, Experimental Study on Cement Kiln Dust Based Geopolymer as Subgrade Soil Stabilizer, (7) (2020) 3--8.
- [36] Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, (Reapproved 2007) (2007) 1--8.
- [37] A.C.D.-o. Soil, Rock, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM international, 2010.
- [38] S.N. Warren, R.R. Kallu, C.K. Barnard, Correlation of the rock mass rating (RMR) system with the unified soil classification system (USCS): introduction of the weak rock mass rating system (W-RMR), *Rock mechanics and rock engineering*, 49(11) (2016) 4507-4518.
- [39] S. Yoon, M. Abu-Farsakh, Laboratory investigation on the strength characteristics of cement-sand as base
- [20] N. Cristelo, S. Glendinning, T. Miranda, D. Oliveira, R. Silva, Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed earth construction, *Construction and Building Materials*, 36 (2012) 727--735.
- [21] N. Cristelo, S. Glendinning, L. Fernandes, A.T. Pinto, Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation, *Construction and Building Materials*, 29 (2012) 167--174.
- [22] Y. Yi, C. Li, S. Liu, Alkali-Activated Ground-Granulated Blast Furnace Slag for Stabilization of Marine Soft Clay, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(4) (2015) 04014146.
- [23] Y. Yi, X. Zheng, S. Liu, A. Al-Tabbaa, Comparison of reactive magnesia- and carbide slag-activated ground granulated blastfurnace slag and Portland cement for stabilisation of a natural soil, *Applied Clay Science*, 111 (2015) 21--26.
- [24] 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.
- [25] B. Singhi, A.I. Laskar, M.A. Ahmed, Investigation on Soil-Geopolymer with Slag, Fly Ash and Their Blending, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(2) (2016) 393--400.
- [26] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez, Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, 30(1) (2000) 91--100.
- [27] A. Khmiri, B. Samet, M. Chaabouni, A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement, *Construction and Building Materials*, 28(1) (2012) 680--686.
- [28] R.A. Mozumder, A.I. Laskar, Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using Artificial Neural Network, *Computers and Geotechnics*, 69 (2015) 291--300.
- [29] A. Arulrajah, T.-A. Kua, C. Phetchuay, S. Horpibulsuk, F. Mahghoolpilehrood, M.M. Disfani, Spent Coffee Grounds-Fly Ash Geopolymer Used as an Embankment

- 1--7.
- [42] M.-r.S. Compactors, ASTM D 1883-99, Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils, Astm D 1883-99, 04(May) (2005) 21--24.
- [43] J.N. Mukabi, Review of DCP Based CBR-UCS and resilient modulus models for applications in highway and airport pavement design, US Army, 10 (2016) 1.
- material, KSCE Journal of Civil Engineering, 13(1) (2009) 15.
- [40] S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, Y. Raksachon, A. Suddepong, Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations, Construction and building materials, 24(10) (2010) 2011-2021.
- [41] Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, (2014)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. A. Mohammadzadeh, M. M. Toufigh, Construction of recycled glass powder-based geopolymer and its application in resistance parameters to stabilize the clay, Amirkabir J. Civil Eng., 54(5) (2022) 1885-1902.*

DOI: 10.22060/ceej.2021.19653.7306

