



## بررسی اثر کلسیم موجود در ماده معدنی صدف کوهی به کار رفته در تثبیت خاک رس به روش ژئوپلیمر

نگین بهرامی<sup>۱</sup>، دانیال معظمی<sup>۱\*</sup>، شهرام پوراکیب<sup>۲</sup>

۱- گروه عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی بینالود، طرقبه، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

### کلمات کلیدی:

تثبیت خاک

خاک رس

ژئوپلیمر

مقاومت فشاری تک محوری

برش مستقیم

**خلاصه:** در این مطالعه از ژئوپلیمر با ماده معدنی صدف کوهی برای تثبیت خاک رس استفاده شده است. همچنین تلاش شده است نقش خواص شیمیایی کلسیم اکساید (CaO) موجود در این ماده معدنی برای تثبیت خاک به روش ژئوپلیمر بررسی گردد. در این راستا، از ترکیب سدیم هیدروکسید و چسب سیلیکات به عنوان فعال کننده بازی استفاده شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری معیار اصلی مقایسه نمونه های تثبیت شده ژئوپلیمری بوده است و همچنین از آزمایش برش مستقیم برای بررسی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه های تثبیت شده استفاده شده است. تحلیل شیمیایی واکنش ها و تغییرات نسب عناصر از طریق عکس برداری الکترونی (SEM) بر روی نمونه ژئوپلیمری انجام پذیرفت. نتایج نشان می دهد که با افزایش مواد معدنی مقاومت فشاری تک محوری افزایش مییابد. نتایج تحلیل ریزساختاری نشان دهنده واکنش ماده معدنی صدف کوهی با خاک و تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی در نمونه های ژئوپلیمری است. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق به منظور حذف کامل سیمان و آهک از چرخه تثبیت خاک، استفاده از مواد معدنی با داشتن المان CaO بالا در ساختار خود می تواند سبب افزایش چسبندگی در مقاومت خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر گردد. استفاده از ماده معدنی صدف کوهی ۱۰ درصد در روش ژئوپلیمر سبب افزایش مقاومت  $UCS, kpa$  ۶۷۱ و  $MPa$  ۲/۰۴ به ترتیب در دوره عمل آوری ۷ و ۴۵ روز می گردد.

### ۱- مقدمه

استفاده قرار گرفته است. استفاده از مواد شیمیایی مانند سیمان با وجود تاثیر قابل قبول در بهبود مشخصات مهندسی خاک، به دلیل آلودگی های زیست محیطی ناشی از فرایند تولید این ماده، مورد انتقاد بسیاری قرار گرفته است. صنعت سیمان بیش از ۵-۷٪ انتشار آلاینده کربن دی اکسید در جهان را شامل می شود به طوری که در تولید یک تن سیمان ۰/۸ الی ۱ تن کربن دی اکسید تولید و انتشار می یابد. به علاوه برای تولید یک تن سیمان به ۱/۵-۱/۶ تن مواد خام و مصرف ۳۰۰۰-۴۰۰۰ مگاوات انرژی سوخت و ۱۲۰-۱۶۰ کیلو وات انرژی الکتریکی نیاز است که بعد از فولاد و آلومینیوم بیشترین مصرف انرژی در فرآیند تولید را دارد [۴، ۵].

از اینرو پیدا کردن جایگزین مناسب برای سیمان مصرفی در پروژه های عمرانی می تواند به عنوان یکی از بهترین راهکارها جهت حفاظت از محیط زیست باشد. شیمی ژئوپلیمر در دهه ۱۹۷۰ میلادی بنا نهاده شد و در دهه ۱۹۹۰ به سمت کاربری در مهندسی عمران توسعه پیدا کرد. با توجه به مزایایی مواد ژئوپلیمری از جمله کاهش انتشار  $CO_2$  نسب به سیمان پرتلند و امکان استفاده از مواد طبیعی و مواد ضایعاتی در تولید آن ها، تحقیقات

یکی از خاک های مشکل ساز در علم ژئوتکنیک خاک های رسی می باشند. بهبود مشخصات فنی خاک و افزایش مقاومت آن برای قابل استفاده نمودن در یک کاربرد معین عملیات تثبیت خاک گفته می شود. تثبیت خاکهای رسی با ظرفیت باربری کم یک روش اقتصادی تقویت زمین برای ساختن اهداف عمرانی است [۳-۱].

از جمله مباحث مهم در مکانیک خاک، بحث مقاومت برشی می باشد. پارامترهای مهم و مؤثر بر مقاومت برشی زاویه اصطکاک داخلی و بحث چسبندگی در خاک است. از آنجا که در اکثر پروژه های عمرانی، خاک جزء جدایی ناپذیر است بنابراین تأمین مقاومت به ویژه در خاک های رسی از اهمیت خاصی برخوردار است. جهت تأمین مقاومت خاک می توان از روش اصلاح و تثبیت خاک از روش های گوناگون استفاده نمود.

یکی از متداول ترین روش ها برای تثبیت خاک روش شیمیایی می باشد، که آهک و سیمان پرتلند و به خصوص سیمان پرتلند بیشتر مورد

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: D\_moazami@mshdiau.ac.ir



زیادی به استفاده از آنها در حوزه ساخت و ساز پرداخته اند. بر اساس تحقیقات محققین به این نتیجه دست یافتند که، تکنولوژی ژئوپلیمر قابل رقابت با سیمان پرتلند را دارد. لذا در این تحقیق سعی شده است تا توانایی مواد ژئوپلیمری در تثبیت خاک رس بررسی شود.

اصطلاح ژئوپلیمر در دهه ۱۹۷۰ توسط جوزف دیویدویتس ساخته شده است. توصیف یک ماده چسباننده آلومینو-سیلیکات متشکل از واحدهای آلومینات چهار وجهی و سیلیکات تشکیل شده توسط فعال سازی قلیایی مواد منبع تحمل سیلیکات آلومینو مانند خاک رس کلسینه و خاکستر بادی است [۶، ۷].

مخلوط ژئوپلیمر با سنتز آلومینا و سیلیکا به همراه محلول قلیایی به عنوان فعال کننده از طریق مراحل ژئوپلیمریزاسیون تولید می شود که گزینه ای برای جایگزینی سیمان پرتلند است [۸]. ژئوپلیمر یک پلیمر غیر ارگانیک است که در اثر واکنش محلول قلیایی و مصالح معدنی یا زائد صنعتی حاوی آلومینوسیلیکات تولید می شود [۹-۱۱]. در پژوهش های آغازین در مورد ژئوپلیمرها توسط دیویدویتس از محلول هیدروکسید سدیم یا هیدروکسید پتاسیم بدون محلول سیلیکاتی، به عنوان محلول فعال کننده قلیایی استفاده می شد [۱۲].

در سال های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوست دار محیط زیست، به عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است که می تواند منجر به کاهش مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان پرتلند شود. تولید ژئوپلیمر سازگار با محیط زیست است و محصولات حاصل از ماندگاری بیشتری نسبت به چسب سیمان پرتلند دارند [۸، ۱۳، ۱۴].

در دهه ۱۹۴۰، توسعه فعال سازی قلیایی سهم عمده ای داشت که اولین بار توسط پوردون نشان داده شد. پوردون انواع مواد حاوی آلومینیوم و سیلیس را با هیدروکسید سدیم (NaOH) به عنوان فعال کننده قلیایی مورد بررسی قرار داد. به گفته وی، این فرآیند زمانی توسعه یافت که آزادسازی آلومینیوم، سیلیسیم و آهک صورت گرفت [۱۵].

در دهه ۱۹۵۰، گلوخوفسکی اولین محقق بود برای تجزیه و تحلیل اتصال دهنده های مختلف در مصر باستان و سازه های رومی استفاده شده است. او سه ژل، یعنی C-S-H، C-A-H و هیدرات آلومینوسیلیکات (A-S-H) را در قلیایی فعال شده شناسایی کرد. چسب سرباره، که برای ساخت یک ساختمان بلند در روسیه مورد استفاده قرار گرفت [۱۶].

کریستلو و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۱۷] به تثبیت خاک سست پرداختند که فعال کننده قلیایی مورد استفاده سدیم هیدروکسید و ماده اولیه خاکستر

بادی بوده است. نتیجه جالب این تحقیق مقاومت ۳،۷ برابری ترکیبات فعال شده قلیایی نسبت به سیمانی در بلند مدت است. عموماً پتاسیم هیدروکسید عملکرد بهتری از سدیم هیدروکسید دارد اما باید به قیمت بیشتر این محلول نسبت به سدیم هیدروکسید توجه داشت. به علت قیمت کمتر سدیم هیدروکسید اکثر تحقیقات با این ماده انجام شده است.

کریستلو و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۱۸] از دو نوع خاکستر بادی نوع F با (کلسیم کم) و نوع C با (کلسیم زیاد) فعال سازی قلیایی شده برای تثبیت خاک استفاده کردند و نتیجه گرفتند در کوتاه مدت (۱ هفته عمل آوری) خاکستر بادی با درصد کلسیم بیشتر و در بلند مدت (۱۲ هفته عمل آوری) خاکستر بادی با کلسیم کمتر دارای مقاومت فشاری بیشتری می باشد و در مجموع استفاده از ژئوپلیمر خاکستر بادی نوع F برای تثبیت خاک توصیه می شود.

پوراکبر و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۹] گزارش دادند که افزودن املاح بسیار قلیایی از جمله NaOH و KOH باعث افزایش مقاومت نمونه های خاک های عمل آوری شده می شود. در همان فعال ساز قلیایی، نمونه های عمل آوری شده با استفاده از فعال کننده KOH دارای مقادیر ۹۰ و ۱۸۰ روزه UCS بالاتر از خاک های عمل آوری شده با استفاده از فعال کننده NaOH بوده است.

توفیق و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۰] به بررسی بهبود خواص مکانیکی خاک با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه پوزولان تفتان، میکروسیلیس و محلول قلیایی سدیم هیدروکسید پرداختند و به مقاومتی بیشتر از نمونه های کنترل (خاک خالص) دست یافتند.

بررسی تاریخچه مطالعات نشان می دهد که استفاده از مواد معدنی در حجم وسیع در این روش جهت تثبیت خاک بستر کارایی لازم را دارد. با این وجود، استفاده از مواد معدنی که در کشور موجود می باشد می تواند به عنوان ماده اولیه در دسترس در روش ژئوپلیمر استفاده گردد محدود بوده است.

لذا در این تحقیق به بررسی نقش صدف کوهی با دارا بودن کلسیم اکسید (CaO) بالا در ساختار خود در روش ژئوپلیمر پرداخته شده است. هدف از انجام این پژوهش آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (UCS) جهت ارزیابی نمونه های تثبیت شده به روش ژئوپلیمر استفاده شده است. لازم به ذکر است نمونه های خاک تثبیت شده با سیمان و آهک به عنوان نمونه های شاهد جهت مقایسه با نمونه های ژئوپلیمری نیز ساخته شده اند. نمونه های ژئوپلیمری ساخته شده با ماده معدنی صدف کوهی در درصد های مختلف ۰،۵٪، ۰،۷۵٪، ۱،۰٪ و ۱۲،۵٪ (وزن صدف کوهی نسبت به وزن

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک

Table 1. The geotechnical properties of clay.

پارامتر	استاندارد	مقدار
نام خاک در سیستم طبقه بندی متحد	ASTM D2487	CL
درصد رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ )	ASTM D 698	12.5(%)
حداکثر وزن مخصوص خشک ( $\gamma_{d max}$ )	ASTM D 698	1.91(gr/cm <sup>3</sup> )
چگالی دانه های خشک (Gs)	ASTM D854	2.65
نشانه خمیری (PI)	ASTM D4318-10	8
حد خمیری (PL)	ASTM D4318-10	21
حد روانی (LL)	ASTM D4318-10	29
مقاومت فشاری تک محوری (UCS)	ASTM D2166/D2166M	247(KPa)
چسبندگی (C)	ASTM D3080	0.33(kg/cm <sup>2</sup> )
زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )	ASTM D3080	185

دراستان گلستان (شهرستان گنبدکاووس) صدف معدنی با دارا بودن حدود ۳۸٪ تا ۴۰٪ کلسیم خالص به عنوان ماده اولیه جهت بررسی نقش کلسیم در روش ژئوپلیمر مورد استفاده قرار گرفته است. این ماده معدنی از کارخانه پویا صدف واقع در منطقه گنبد کاووس خریداری شد و به آزمایشگاه منتقل شده است.

در این پژوهش صدف معدنی رد شده از الک ۲۰۰ مورد استفاده قرار گرفته است. جدول (۲) نتایج آنالیز (XRF) صدف معدنی برای شناسایی ترکیبات مصرفی را نشان می دهند.

در این تحقیق از نوع سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان مشهد می باشد که فقط جهت ساخت نمونه شاهد استفاده شده است. لازم به ذکر است که در ساخت نمونه های ژئوپلیمری از سیمان استفاده نشده است. جدول (۲) نتایج آنالیز (XRF) سیمان پرتلند تیپ II برای شناسایی ترکیبات مصرفی را نشان می دهند.

آهک مورد استفاده در این تحقیق از آهک صنعتی شرق مشهد می باشد که فقط جهت ساخت نمونه شاهد استفاده شده است. جدول (۲) نتایج آنالیز (XRF) ترکیبات آهک را نشان می دهند.

خشک خاک) و دوره های عمل آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روز ساخته شده است. علاوه بر آن، از ترکیب چسب سیلیکات و سود سوز آور به عنوان فعال کننده قلیایی در ساخت نمونه های ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گرفته است. جهت بررسی ساختار نمونه های ساخته شده به روش ژئوپلیمری آزمایش شیمیایی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بر روی نمونه های تثبیت شده صورت پذیرفت.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مواد

برای انجام این تحقیق از خاک رس، ماده معدنی صدف کوهی، چسب سیلیکات و سود سوز آور استفاده شده است. پس از انجام آزمایش های شناسایی خاک مطابق استاندارد ASTM مشخصات کامل نمونه خاک، صدف کوهی مورد آنالیز XRF در جداول ۲ ارائه شده است.

خاک استفاده شده در این تحقیق براساس طبقه بندی یونیفاید، خاک رس با پلاسیسیته پایین (CL) می باشد. حد روانی و حد خمیری نیز با توجه به استاندارد [21] ASTM D4318 تعیین گردید. در جدول (۱) نتایج آزمایش های شناسایی خاک مورد مطالعه آمده است.

جدول ۲. نتایج آنالیز XRF برای شناسایی ترکیبات مصرفی

Table 2. The results of XRF analysis for detecting chemical compounds.

ساختار شیمیایی	صدف کوهی	II سیمان تپ	آهک
SiO <sub>2</sub>	12.31	21.11	2.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.37	4.42	0.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8	3.96	0.26
CaO	38	63.36	79.8
MgO	2.3	1.51	0.66
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.38	0.08
K <sub>2</sub> O	0.35	0.51	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-
SO <sub>3</sub>	0.45	2.61	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	-
MnO	-	-	-
LOI	-	-	-

در این تحقیق از ترکیب سود سوزآور (NaOH) و چسب سیلیکات به عنوان فعال کننده بازی استفاده شده است. شکل پولکی سود کاربرد بسزایی در صنایع مختلف دارد و استفاده از آن در ساخت بتن ژئوپلیمری و تثبیت خاک به روش ژئوپلیمر به صورت گسترده توسط محققین استفاده شده است [۱۹، ۲۲]. در این پژوهش نیز سود به شکل پولکی به عنوان فعال کننده بازی استفاده شده است.

روش ساخت محلول قلیایی شامل سدیم هیدروکسیدیدین صورت است که آب و محلول سدیم هیدروکسید را با ترازویی با دقت ۰/۰۱ gr وزن کرده، ابتدا وزن مشخصی از تکه‌های سدیم هیدروکسید ۳/۵ مولار به وزن ۱۴۰ gr را با ۱۰۰۰ ml آب داخل یک ظرف شیشه ای به آرامی حل کرده تا محلول سدیم هیدروکسید یکنواختی حاصل شود و برای اینکه محلول مذکور به دمای محیط برسد، یک شبانه روز در محیط آزمایشگاه سرد میشود. به منظور استفاده از مقدار بهینه مواد فعال ساز قلیایی، نسبت دو واحد چسب سیلیکات به یک واحد سود به عنوان نسبت بهینه محلول فعال ساز قلیایی توسط محققین معرفی شده است [۱۷، ۱۹]. لذا در این تحقیق نیز نسبت ۲ واحد چسب سیلیکات و ۱ واحد سود در ساخت نمونه های ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که با توجه به خاصیت خوردگی سود سوز آور، استفاده از این ماده شیمیایی در ساخت

نمونه باید با استفاده از دستکش و ماسک انجام شود.

مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول (۳) آورده شده است. همانطور که در این جدول مشخص است دوره های عمل آوری، درصد رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ )، دانسیته خشک حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ )، نسبت چسب به سود، درصد چسب و سود، مولاریته سود و مشخصات گروه های شاهد که شامل ۵ گروه نمونه شامل خاک طبیعی (S)، خاک تثبیت شده با چسب و سود (SG)، خاک تثبیت شده با سیمان ۶٪ و ۱۰٪ ( $SC_{10}$  و  $SC_6$ ) و خاک تثبیت شده با آهک ۱۰٪ ( $SL_{10}$ ) می باشند. علاوه بر آن گروه نمونه اصلی شامل خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر با صدف کوهی (SGO) می باشند.

۲-۲- نحوه انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (UCS)

طبق استاندارد ASTM [23] D2166 به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، با توجه به ابعاد قالب نمونه تک محوری (قطر ۳۸mm و ارتفاع ۷۶mm) مقدار مشخصی خاک خشک با درصد های مختلف افزودنی به طور همگن مخلوط شد. در رابطه با نمونه های تثبیت شده با ژئوپلیمر پس از تهیه مواد اولیه و قبل از شروع به نمونه سازی باید ۲۴ ساعت قبل محلول قلیایی سدیم هیدروکسید تهیه شود.

خاک، صدف کوهی، محلول سدیم هیدروکسید و چسب سیلیکات را با

جدول ۳. مشخصات ترکیبات مورد استفاده در آزمایشات

Table 3. Specifications of soil samples specimens.

گروه شاهد	نوع مواد افزودنی	نام اختصاری	نسبت چسب به سود	مولاریته سود (M)	درصد چسب و سود	$\omega_{opt}$ (%)	$\gamma_{d max}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	دوره عمل آوری (روز)
S	خاک طبیعی	S	-	-	-	۱۲/۵٪	۱/۹۱	۷-۱۴-۲۸-۴۵
SG	خاک + چسب + سود	SG	۱-۲	۳/۵	۱۶٪	۱۶٪	۱/۹۷	۷-۱۴-۲۸-۴۵
SGO	خاک + چسب + سود + صدف کوهی ۵٪	SGO <sub>5</sub>	۱-۲	۳/۵	۱۸٪	۱۸٪	۱/۹۸	۷-۱۴-۲۸-۴۵
	خاک + چسب + سود + صدف کوهی ۷/۵٪	SGO <sub>7.5</sub>	۱-۲	۳/۵	۱۸٪	۱۸٪	۱/۹۸	۷-۱۴-۲۸-۴۵
	خاک + چسب + سود + صدف کوهی ۱۰٪	SGO <sub>10</sub>	۱-۲	۳/۵	۱۸٪	۱۸٪	۱/۹۸	۷-۱۴-۲۸-۴۵
	خاک + چسب + سود + صدف کوهی ۱۲/۵٪	SGO <sub>12.5</sub>	۱-۲	۳/۵	۱۸٪	۱۸٪	۱/۹۸	۷-۱۴-۲۸-۴۵
SC	خاک + سیمان ۶٪	SC <sub>۶</sub>	-	-	-	۱۲/۵٪	۱/۹۵	۷-۱۴-۲۸-۴۵
	خاک + سیمان ۱۰٪	SC <sub>10</sub>	-	-	-	۱۲/۵٪	۱/۹۵	۷-۱۴-۲۸-۴۵
SL	خاک + آهک ۱۰٪	SL <sub>۱۰</sub>	-	-	-	۱۵٪	۱/۹۵	۷-۱۴-۲۸-۴۵

در قالب استوانه ای در سه لایه ریخته و هر لایه را در زیر جک هیدرولیکی با فشار  $40 \text{ Kg/Cm}^2$  متراکم میگردد و ۳۰ ثانیه صبر کرده و شیار زده و لایه بعد را درون قالب ریخته می شود. این روش ساخت نمونه جهت انجام آزمایش UCS توسط محققین دیگر گزارش شده است [۱۷-۱۹]. سپس با استفاده از جک نمونه ها از قالب بیرون آورده شده و به منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت نمونه ها در زمان عمل آوری، ابتدا هر نمونه درون سلفون کاملاً محصور شده و با فویل آلومینیومی پوشانده شده است.

بر اساس تحقیقات گذشته، محققین در روش های مختلف جهت بررسی مقاومت فشاری خاک تثبیت شده درصد های ذکر شده را استفاده و گزارش داده اند که درصد های بهینه برای مواد معدنی جهت تثبیت خاک به روش ژئوپلیمر درصد های ذکر شده می باشد [۱۷-۱۹]. درصد های ماده معدنی صدف کوهی شامل ۵٪، ۷/۵٪، ۱۰٪، ۱۲/۵٪ به نمونه ها بر حسب وزن خشک خاک اضافه و پس از مدت زمان عمل آوری مناسب استفاده شدند.

ترازویی با دقت  $0.01 \text{ gr}$  وزن کرده، سپس خاک و ماده معدنی صدف کوهی را به صورت خشک مخلوط کرده تا یکنواخت شوند.

در گام بعد، محلول سدیم هیدروکسید و چسب سیلیکات را درون لیوان همزن ریخته و این مخلوط به مدت ۲ دقیقه با دور کند و ۶ دقیقه با دور تند مخلوط می شوند تا محلول همگنی به دست آید، چرا که افزایش درجه اسیدیته محیط تاثیر بسیار زیادی بر آماده سازی مواد داشته و باعث همگنی بیشتر مواد و مشارکت حداکثری در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون می شود. لازم به ذکر است به دلیل یکسان بودن نرخ جذب آب پسماند های صنعتی و ماده معدنی با خاک، همه نمونه ها با انرژی تراکم یکسان و رطوبت بهینه که برای هر کدام از مواد از آزمایش تراکم جدول (۳) به دست آمده ساخته شدند. سپس چسب و سود به مقدار رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم به ترکیب اضافه شد و در هنگام اختلاط مصالح دقت شد تا توده های در خاک ایجاد نشود و مخلوطی کاملاً همگنی حاصل شود. مخلوط حاصل را

جدول ۴. مشخصات مصالح برای انجام آزمایش برش مستقیم

Table 4. Materials' properties for the direct shear test.

نام نمونه	نام اختصار	$\omega_{opt}$ (%)	$\gamma_{d max}$ ( $gr / Cm^3$ )	دوره عمل آوری (روز)
خاک طبیعی	S	16%	1.91	1,7,14
خاک+چسب و سود	SG	16%	1.97	1,7,14
خاک+چسب و سود+صدف کوهی ۱۰٪	SGO10%	18%	1.98	1,7,14

برش قرار گرفته و سپس درون دستگاه گذاشته می شوند و پس از اعمال سربار اقدام به اعمال نیرو و قرائت نیروسنج و کرنش سنج می شود.

مشخصات مصالح استفاده شده جهت ساخت نمونه ها برای انجام آزمایش برش مستقیم در جدول (۴) آورده شده است. همانطور که در این جدول مشخص است دوره های عمل آوری نمونه های تثبیت شده با ماده معدنی صدف کوهی (SGO) به روش ژئوپلیمر ۱، ۷ و ۱۴ روز بوده است. لازم به ذکر است تعداد کم قالب ها و ترکیبات مختلف مصالح مستلزم زمان زیادی برای ساخت و آماده سازی نمونه ها جهت آزمایش برش مستقیم بود. لذا نمونه های ساخته شده در دوره های عمل آوری ذکر شده در بالا عمل آوری گردید.

### ۳- ارائه و تحلیل نتایج

۳-۱- تاثیر استفاده از ماده معدنی صدف کوهی در روش ژئوپلیمر با درصد های مختلف بر روی مقاومت فشاری تک محوری خاک رس

شکل ۱ (الف-د) تاثیر درصد های مختلف نمونه های تثبیت شده صدف کوهی در روش ژئوپلیمر (گروه SGO) به همراه نمونه خاک طبیعی و نمونه های شاهد در دوره های عمل آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روز را نشان می دهد. با توجه به شکل ۱ (ب) در مورد نمونه های تثبیت شده با صدف کوهی ۱۰٪ (SGO<sub>10</sub>) مشاهده می شود مقاومت این نمونه در زمان عمل آوری ۱۴ روز تقریباً با مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با سیمان ۶٪ (SC<sub>6</sub>) برابری می کند.

اما مقاومت فشاری تک محوری با افزودن ۱۲/۵٪ صدف کوهی (SGO<sub>12.5</sub>) در ۱۴ روز عمل آوری کاهش قابل توجهی را نسبت به

در تمامی نمونه ها برای ارزیابی اثر زمان عمل آوری، آزمایشها در شرایط ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روزه انجام و نتایج مقاومت فشاری به دست آمده آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

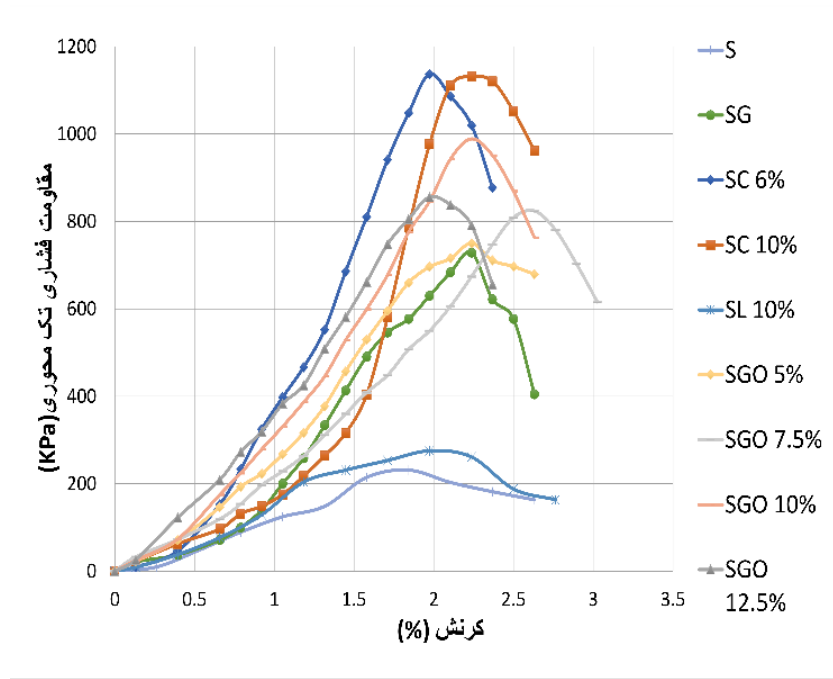
علاوه بر ساخت نمونه های ذکر شده جهت تهیه نمونه ای شاهد خاک تثبیت شده با سیمان ۶٪ و ۱۰٪ (SC<sub>6</sub> و SC<sub>10</sub>)، ابتدا خاک و سیمان به میزان اشاره شده در جدول (۳) مخلوط و سپس به حدی آب به مخلوط اضافه می شود تا رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم برسد. همین پروسه جهت ساخت نمونه های شاهد خاک تثبیت شده با آهک ۱۰٪ (SL<sub>10</sub>) صورت پذیرفت.

### ۲-۳- نحوه انجام آزمایش برش مستقیم

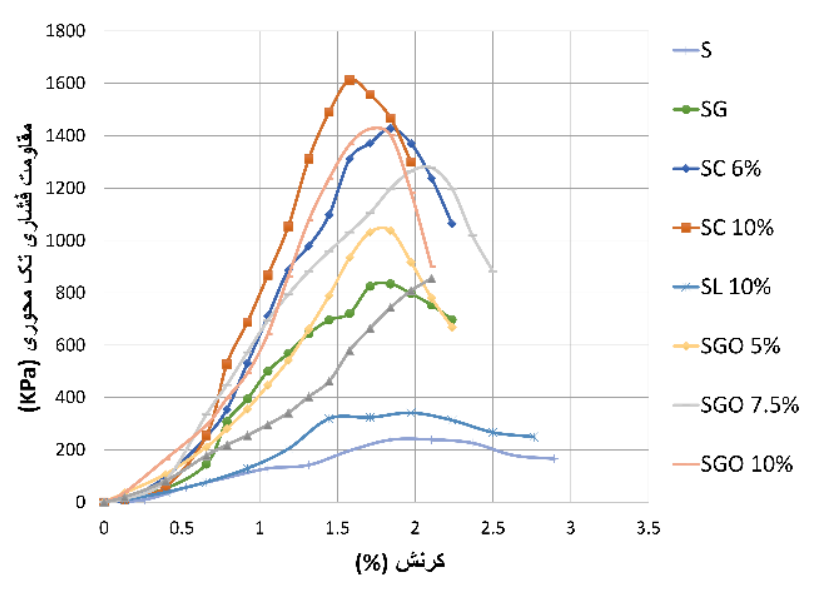
بر اساس استاندارد ASTM D3080 [۲۴] تجهیزات این آزمایش شامل دستگاه های برشی مستقیم هستند.

نحوه ساختن نمونه در آزمایش برش مستقیم همانند آزمایش تک محوری است. نحوه محاسبه مقدار خاک و نگهداری نمونه ها نیز مشابه است. حجم قالب در این آزمایش مکعبی به طول و عرض ۷ cm و ارتفاع ۷ cm بوده محاسبه کرده و ضخامت قالب (صفحات متخلخل) را از ارتفاع در به دست آوردن حجم، کم می کنیم. برای انجام این آزمایش، ابتدا خاک مورد نظر از الک نمره ۴ عبور داده شد و وزن خشک خاک مورد نیاز بر اساس حجم جعبه برش و وزن مخصوص خشک حداکثر خاک تعیین گردید.

شیب خط حاصل زاویه اصطکاک داخلی و محل تلاقی آن ها با محور قائم چسبندگی نام گذاری شده است. پس از ساخت نمونه های آزمایش برش مستقیم و سپری شدن مدت زمان عمل آوری نمونه ها درون قالب



(الف)

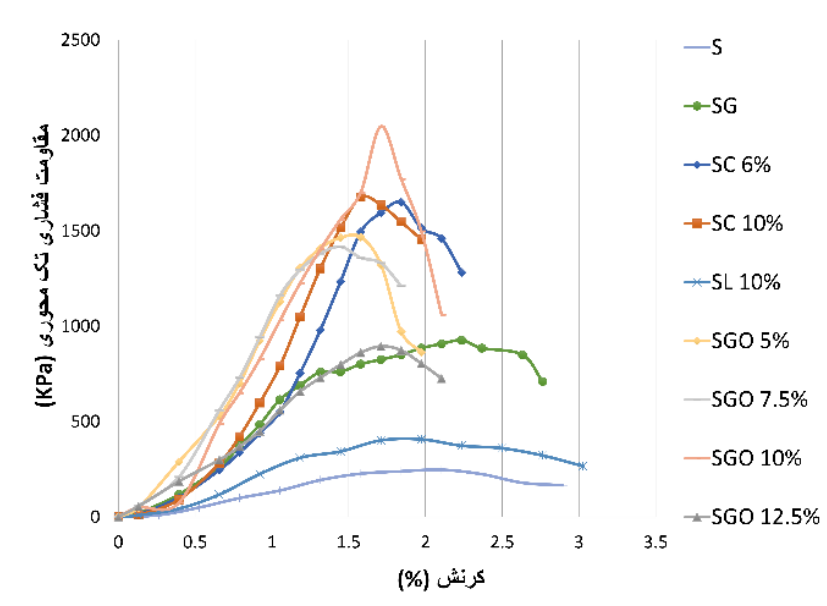


(ب)

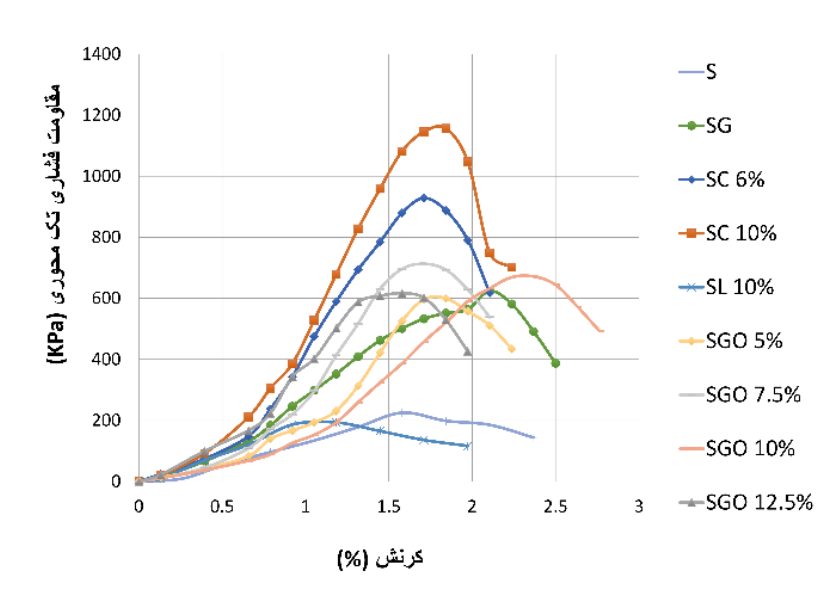
شکل ۱. الف) دوره عمل آوری ۷ روزه، ب) دوره عمل آوری ۱۴ روزه، ج) دوره عمل آوری ۲۸ روزه، د) دوره عمل آوری ۴۵ روزه (ادامه دارد)

Fig. 1. The unconfined compression strength tests in various curing times(Continued)





(ج)

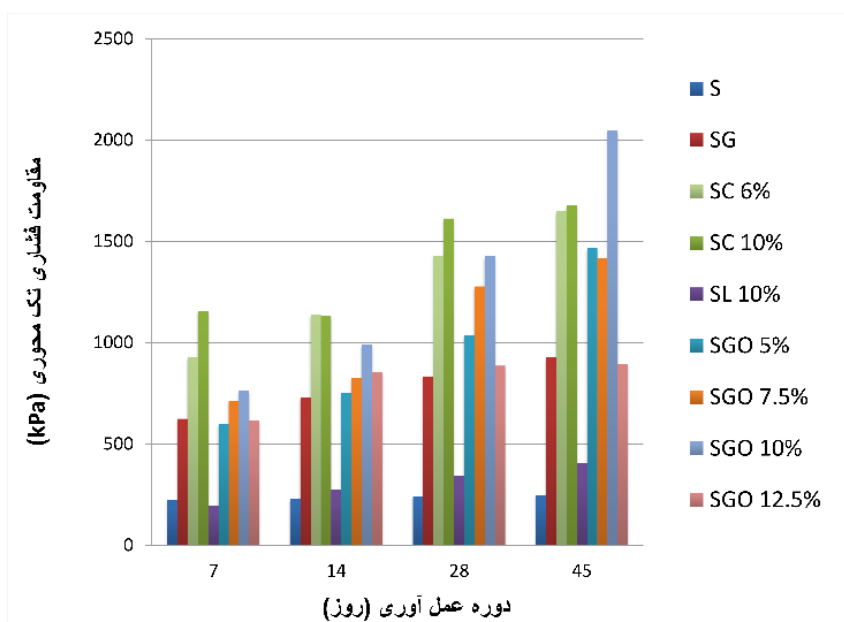


(د)

شکل ۱. الف) دوره عمل آوری ۷ روزه، ب) دوره عمل آوری ۱۴ روزه، ج) دوره عمل آوری ۲۸ روزه، د) دوره عمل آوری ۴۵ روزه

Fig. 1. The unconfined compression strength tests in various curing times





شکل ۲. مقایسه مقاومت فشاری تک محوری صدف کوهی در دوره های عمل آوری مختلف

Fig. 2. The unconfined compression strength tests in selected curing times

با استفاده از ژئوپلیمر بر پایه پوزولان تفتان، میکروسیلیس و محلول قلیایی سدیم هیدروکسید پرداختند و به مقاومتی بیشتر از نمونه های کنترل (خاک خالص) دست یافتند.

### ۳-۲- بررسی زمان عمل آوری بر روی نمونه های تثبیت شده

شکل (۲) مقاومت فشاری خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر به وسیله ماده معدنی صدف کوهی را در دوره های عمل آوری مختلف نشان می دهد. به منظور بررسی اثر زمان عمل آوری بر حداکثر مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده، نمودار های حداکثر مقاومت فشاری تک محوری در مقابل زمان عمل آوری ترسیم شده است. در تمامی نمودار های فوق ملاحظه می شود که مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده با ۱۰٪ آهک ( $SL_{10}$ ) حتی پس از گذشت ۴۵ روز عمل آوری، با مقاومت فشاری تک محوری نمونه های تثبیت نشده تفاوت چندانی ندارد. همچنین افزودن ۶٪ و ۱۰٪ سیمان به خاک طبیعی ( $SC_{10}$  و  $SC_6$ ) موجب حداکثر مقاومت فشاری تک محوری در بین نمونه های شاهد می گردد.

در شکل (۲) نیز مشاهده می شود مقدار بهینه ۱۰٪ صدف کوهی ( $SGO_{10}$ ) در ۲۸ و ۴۵ روز عمل آوری باعث ایجاد مقاومت فشاری  $MPa$  و  $MPa$  و  $MPa$  در خاک مورد پژوهش گردیده است. مطابق شکل (۲)

مقاومت فشاری گروه شاهد  $SC_6$  نشان می دهد. با توجه به توضیحات ارائه شده، مقدار بهینه صدف کوهی در دوره عمل آوری ۱۴ روز ۱۰٪ می باشد. همچنین با اضافه کردن صدف کوهی به میزان ۱۰٪ در روش ژئوپلیمر ( $SGO_{10}$ ) مقاومت فشاری  $MPa$  در ۲۸ روز عمل آوری به دست آمده که با مقاومت گروه شاهد  $SC_6$  تقریباً برابر بوده است. شکل ۱ (ج) نشان می دهد که مقدار بهینه صدف کوهی در روش ژئوپلیمر برای تثبیت خاک در ۲۸ روز عمل آوری شامل ۱۰٪ صدف کوهی ( $SGO_{10}$ ) می باشد. همانطور که در شکل ۱ (الف-د) مشاهده می شود افزودن ۵٪، ۷٫۵٪، ۱۰٪ و ۱۲٫۵٪ صدف کوهی (گروه SGO) به خاک در دوره عمل آوری ۴۵ روز به ترتیب مقاومت فشاری تک محوری  $MPa$ ،  $MPa$ ،  $MPa$  و  $MPa$  می باشد که در همه نمونه ها باعث افزایش مقاومت آن نسبت به نمونه شاهد ( $SC_6$ ) می باشد. به بیان دیگر در این پژوهش میزان استفاده بهینه صدف کوهی در دوره های عمل آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روزه ۱۰٪ ( $SGO_{10}$ ) می باشد. این نتایج نشان می دهد که استفاده از ماده معدنی صدف کوهی با  $CaO$  بالا می تواند در تثبیت خاک به روش ژئوپلیمر در پرژه های عمرانی مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه این پژوهش با توفیق و همکاران [۲۰] که به بررسی بهبود خواص مکانیکی خاک

جدول ۵. میزان پارامترهای آزمایش برش مستقیم

Table 5. direct shear test results

نام نمونه	نام اختصار	دوره عمل آوری (۱روز)		دوره عمل آوری (۷روز)		دوره عمل آوری (۱۴روز)	
		C (Kg/Cm <sup>2</sup> )	( $\theta$ )°	C (Kg/Cm <sup>2</sup> )	( $\theta$ )°	C (Kg/Cm <sup>2</sup> )	( $\theta$ )°
خاک طبیعی	S	۰/۳۳	۱۸	۰/۳۳	۱۸	۰/۳۳	۱۸
خاک+چسب و سود	SG	۰/۳۵	۱۹	۰/۳۵	۳۰	۰/۳۹	۳۴
خاک+چسب و سود + صاف کوهی ۱۰٪	SGO 10%	۰/۳۷	۳۲	۰/۴۸	۳۵	۰/۵۳	۴۰

۳-۳- نتایج آزمایش برش مستقیم

همانطور که در جدول (۵) مشاهده می شود، چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\theta$ ) خاک طبیعی مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب ۳۳ kPa و  $18^\circ$  می باشد. استفاده از چسب و سود به عنوان فعال ساز قلیایی در تثبیت خاک (نمونه شاهد SG) سبب افزایش C و  $\theta$  به ترتیب به میزان ۳۵ kPa و  $19^\circ$  می گردد.

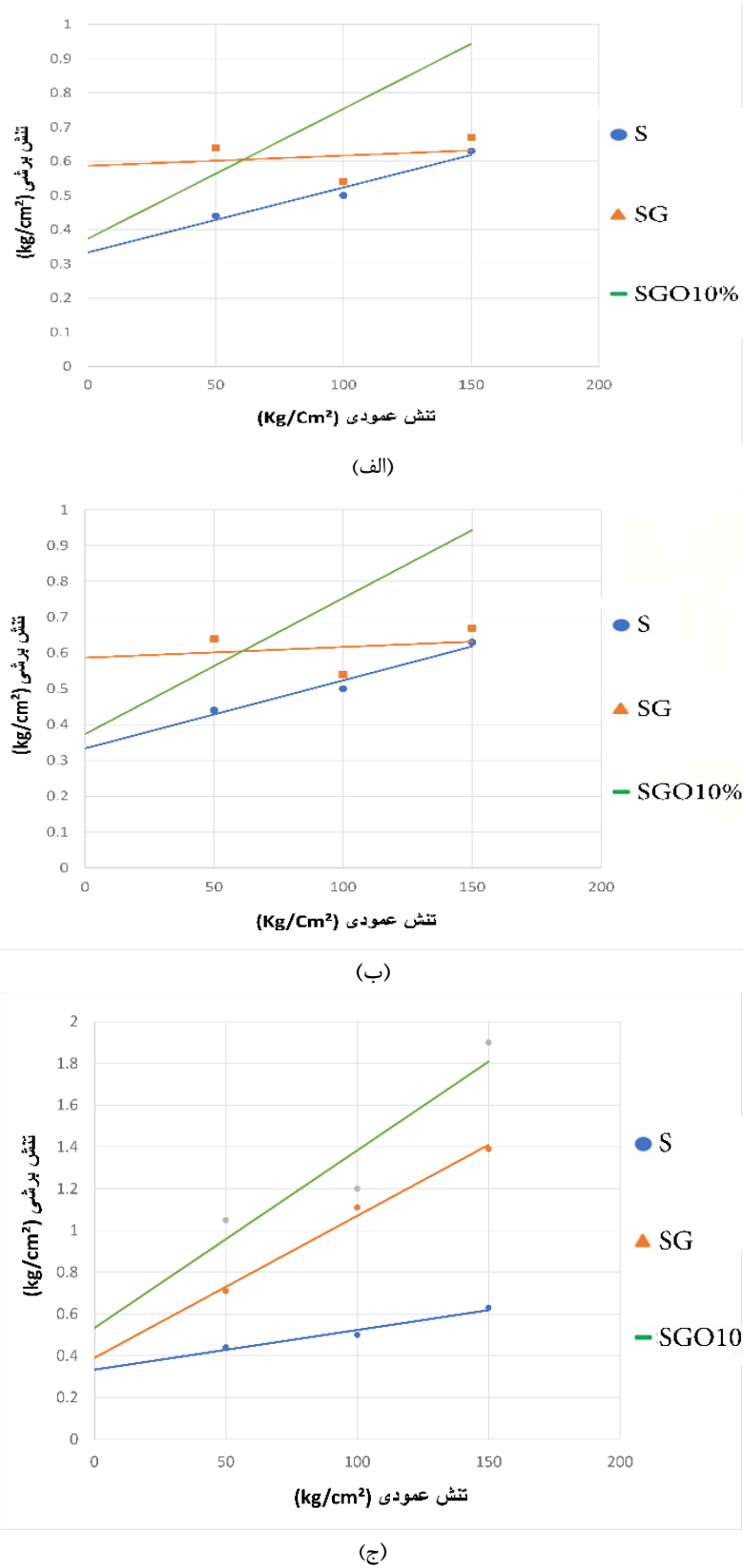
شکل ۳ (الف-ج) نمودار تنش برشی-تغییر مکان برشی را به ازای تنشهای قائم ۵۰kPa، ۱۰۰kPa و ۱۵۰kPa نشان می دهد. همانطور که از شکل زیر دیده می شود و همانگونه که انتظار می رفت، با افزایش تنش قائم، نمونه ها تنش برشی بالاتری از خود نشان می دهند.

شکل ۳ (الف-ج) نمودارهای تنش برشی خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر به وسیله ماده معدنی صدف کوهی را در دوره های عمل آوری ۱، ۷ و ۱۴ روز را نشان می دهد. استفاده از ماده معدنی صدف کوهی ۱۰ درصد (SGO<sub>10</sub>) سبب افزایش چسبندگی در خاک تثبیت شده به میزان ۳۷ kPa، ۴۸ kPa و ۵۳ kPa و همچنین سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی به مقدار  $32^\circ$ ،  $35^\circ$  و  $40^\circ$  به ترتیب در دوره های عمل آوری ۱، ۷ و ۱۴ روز گردیده است. ماده معدنی صدف کوهی در روش ژئوپلیمر سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در خاک تثبیت شده می گردد. لازم به ذکر است از درصد بهینه ماده معدنی به دست آمده از آزمایش تک محوری بر

استفاده از مواد معدنی نظیر صدف کوهی در روش ژئوپلیمر می تواند سبب تثبیت خاک بستر گردد.

پس از افزودن محلول قلیایی و چسب سیلیکات که بر اساس درصد رطوبت بهینه محاسبه گردیده، نمونه در سه لایه با ضخامت یکسان داخل جعبه برش تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر متراکم می شود و در دستگاه برش گذاشته می شوند. برای نمونه های عمل آوری شده قبل از ساخت نمونه ها در قالب سطح داخلی قالب روغن کاری شده است. نمونه های ساخته شده از درون قالب خارج شده و درون سلفون و فویل قرار داده شدند تا عمل آوری گردند. لازم به ذکر است عمل آوری نمونه ها جهت انجام آزمایش برش مستقیم طبق شرایطی که برای نمونه های تک محوری توضیح داده شده، عمل آوری شده است.

نمونه ها پس از عمل آوری درون جعبه برش قرار داده شده و روی دستگاه برش مستقیم گذاشته می شود. قرائت ها تا جایی که مقدار بار برشی به حداکثر مقدار خودش برسد ادامه داده می شود. ابتدا برای بار ۳۰ kg نیز نمودار تغییر شکل افقی رسم گردید و سپس برای بارهای ۶۰ kg و ۹۰ kg نیز این نمودار رسم گردید و از هر نمودار حداکثر بار به دست آمد و پس از محاسبه حداکثر تنش برشی نمودار تنش ماکزیمم بر حسب تنش قائم رسم شد.



شکل ۳. الف: نمودار تنش برشی در دوره عمل آوری ۱ روزه، ب: نمودار تنش برشی در دوره عمل آوری ۷ روزه، ج: نمودار تنش برشی در دوره عمل آوری ۱۴ روزه

Fig. 3. The values of the shear strength parameters in the direct shear test.

روی نمونه ژئوپلیمری جهت ساخت و انجام آزمایش برش مستقیم استفاده شده است.

نتایج مقاومت برشی برای نمونه ها با سه تنش سربار متفاوت در زمان عمل آوری ۱، ۱۴ و ۲۸ روزه در شکل ۳ (الف-ج) ارائه شده است.

همانگونه که نمودارهای شکل ۳ (الف-ج) حاصل از آزمایش برش مستقیم نشان می دهد، با افزایش میزان سیمان و تنش نرمال، مقاومت برشی نمونه ها افزایش می یابد که این امر می تواند ناشی از افزایش پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، به دلیل تکمیل واکنشهای شیمیایی چسب و سود با ماده معدنی صدف کوهی باشد.

همچنین با افزودن صدف کوهی تا درصد معینی شاهد افزایش مقاومت برشی نمونه ها نسبت به نمونه های بدون صدف کوهی (نمونه هایی که فقط از چسب و سود استفاده شده است) هستیم که در این تحقیق افزودن ۱۰ درصدی صدف کوهی به چسب و سود، درصد بهینه جهت افزایش مقاومت برشی است.

در نمونه های با زمان عمل آوری ۲۸ روز به دلیل وجود زمان بیشتر، واکنشهایی که باعث کسب مقاومت می شوند بیشتر و بهتر انجام شده و مقاومت بیشتری حاصل می شود. نتایج آزمایش برش مستقیم در نشان دهنده تاثیر گذاری خیلی خوب المان های موجود در ماده معدنی صدف کوهی در تثبیت خاک رس به روش ژئوپلیمر بر روی پارامترهای مقاومت برشی و همچنین سبب افزایش میزان (C) و (Ø) در مقایسه با خاک طبیعی داشته است.

### ۳-۴- آزمایش شیمیایی میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

اساس کار میکروسکوپ های الکترونی روبشی مبتنی بر روبش سطح نمونه توسط یک پرتو الکترونی می باشد. میکروسکوپ های الکترونی روبشی عموماً در خلاء کار می کنند. پس از ایجاد خلاء با انجام عملیات روبش توسط پرتو الکترونی بر روی سطح نمونه، از سطح نمونه تصویری بر روی صفحه نمایشگر مشاهده می گردد. با تغییر ابزار ثبت پرتو، می توان تصاویری با اطلاعات مختلف از سطح نمونه به دست آورد. شکل ۴ (الف-ج) عکس های SEM نمونه های خاک طبیعی، خاک تثبیت شده با چسب سود و خاک تثبیت شده با ماده معدنی صدف کوهی در دوره عمل آوری ۲۸ روز را نشان می دهد.

همانطور که در شکل ۴ (الف) مشاهده می شود حفرات زیادی در خاک

طبیعی قابل مشاهده می باشد. استفاده از روش ژئوپلیمر بدون افزودنی مطابق شکل ۴ (ب) سبب تثبیت خاک و کاهش حفرات موجود در خاک گردیده است. در شکل ۴ (ج) ملاحظه می شود استفاده از ماده معدنی به عنوان ماده اولیه در روش ژئوپلیمر سبب افزایش یکپارچگی و کاهش حفرات در نمونه های تثبیت شده می گردد. همانطور که در شکل ۴ (ج) مشاهده می شود، استفاده از ماده معدنی صدف کوهی در تثبیت خاک به روش ژئوپلیمر سبب تشکیل باند های مستحکم در بین ذرات خاک و افزایش مقاومت در توده های خاک در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روز می گردد. همچنین در شکل ۴ (ج) ملاحظه می شود، استفاده از ماده معدنی با CaO نیز می تواند باعث افزایش یکپارچگی خاک در نمونه های تثبیت شده به روش ژئوپلیمر گردد. در این راستا، می توان نتیجه گیری کرد که استفاده از ماده معدنی صدف کوهی با داشتن المان های متفاوت در ساختار خود، کارایی لازم در تثبیت خاک بستر در روش ژئوپلیمر را دارد. لذا طیف وسیعی از این ماده معدنی می توانند جهت تثبیت خاک بستر به روش ژئوپلیمر گردند.

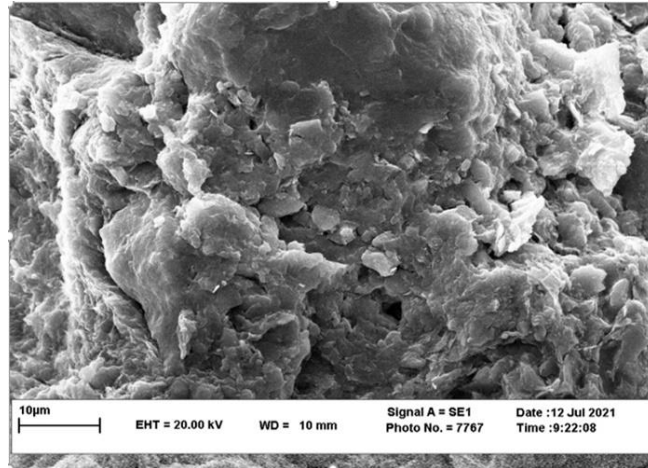
### ۴- نتیجه گیری

مهمترین نتایج به دست آمده به شرح ذیل است :

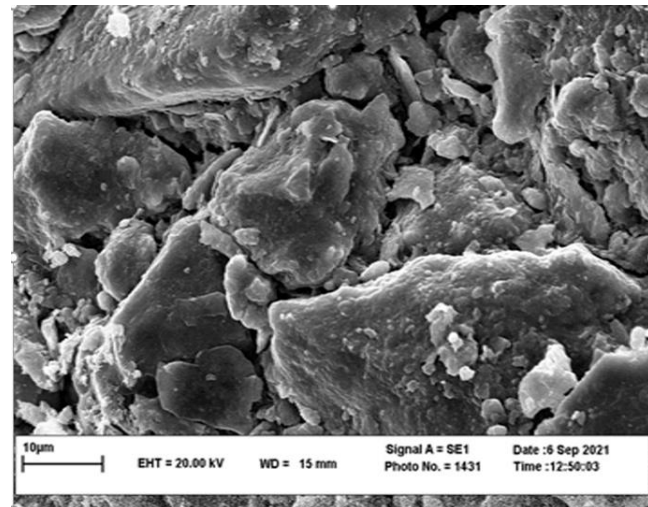
استفاده از فعال کننده بازی بدون استفاده از مواد افزودنی سبب افزایش مقاومت فشاری خاک تثبیت شده به میزان حداکثر  $kPa931$  در دوره عمل آوری ۴۵ روز می شود. این نتایج نشان می دهد به دلیل عدم وجود  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  کافی در خاک طبیعی نمی توان شاهد مقاومت چشمگیر در خاک تثبیت شده به روش ژئوپلیمر بدون افزودنی بود. استفاده از ماده معدنی صدف کوهی ۱۰٪ در روش ژئوپلیمر سبب افزایش مقاومت UCS،  $kPa 671$  و  $MPa 2/04$  به ترتیب در دوره عمل آوری ۷ و ۴۵ روز می گردد. بر اساس این نتایج استفاده از پسماند دارای المان CaO بالا می تواند سبب افزایش ۲۰۴٪ مقاومت نمونه های ژئوپلیمری در دوره های عمل آوری کوتاه مدت و بلند مدت گردد.

بر اساس نتایج به دست آمده استفاده از مواد معدنی سبب افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در دوره های عمل آوری مختلف می گردد.

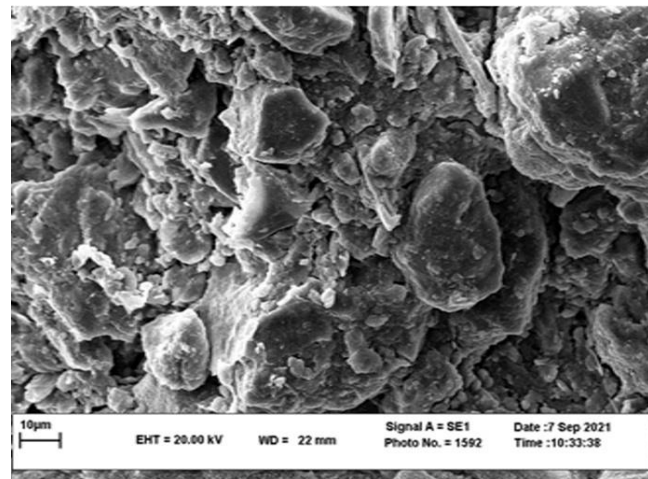
همچنین تصاویر SEM نشان می دهد افزودن ماده معدنی (صدف کوهی) با دارا بودن CaO در ساختار خود نیز می تواند باعث کاهش فضای خالی بین ذرات خاک در نمونه های تثبیت شده به روش ژئوپلیمر گردد. در این راستا می توان نتیجه گیری کرد که افزایش همگنی سطح و کاهش خلل



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. الف) تصویر SEM خاک طبیعی با دوره عمل آوری ۲۸ روزه، ب) تصویر SEM خاک چسب سود با دوره عمل آوری ۲۸ روزه، ج) تصویر SEM صدف کوهی با دوره عمل آوری ۲۸ روزه

Fig. 4. The SEM results of selected soil samples

735-744.

- [6] J. Davidovits, Geopolymers and geopolymeric materials, *Journal of thermal analysis*, 35(2) (1989) 429-441.
- [7] B.H. Ahmed Hisseini, A. Bennabi, R. Hamzaoui, L. Makki, G. Blanck, Treatment and Recovery of Clay Soils Using Geopolymerization Method, *International Journal of Geomechanics*, 21(11) (2021) 04021206.
- [8] S. Luhar, S. Chaudhary, I. Luhar, Development of rubberized geopolymer concrete: Strength and durability studies, *Construction and Building Materials*, 204 (2019) 740-753.
- [9] J.L. Provis, S.A. Bernal, Geopolymers and related alkali-activated materials, *Annual Review of Materials Research*, 44 (2014) 299-327.
- [10] M. Zhang, N.A. Deskins, G. Zhang, R.T. Cygan, M. Tao, Modeling the polymerization process for geopolymer synthesis through reactive molecular dynamics simulations, *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(12) (2018) 6760-6773.
- [11] H.H. Abdullah, M.A. Shahin, M.L. Walske, A. Karrech, Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymer for clay stabilization, *Canadian Geotechnical Journal*, 57(9) (2020) 1356-1368.
- [12] J. Davidovits, Soft mineralogy and geopolymers, in: *Proceedings of the geopolymer 88 international conference*, the Universite de Technologie Compiengne, France, 1988.
- [13] I. Bashir, K. Kapoor, H. Sood, An Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete, *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 6(3) (2017) 33-36.
- [14] S. Wang, Q. Xue, Y. Zhu, G. Li, Z. Wu, K. Zhao, Experimental study on material ratio and strength performance of geopolymer-improved soil, *Construction and Building Materials*, 267 (2021) 120469.
- [15] A. Purdon, The action of alkalis on blast-furnace slag, *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59(9) (1940) 191-202.
- [16] V. Glukhovskiy, *Soil silicates*. Kiev, USSR: Gostroiizdat

و فرج نمونه ها علت اصلی رشد مقاومت نمونه های تثبیت شده به روش ژئوپلیمر می باشد.

بررسی نتایج شیمیایی نشان می دهد که استفاده از ماده معدنی صدف کوهی در روش ژئوپلیمر سبب افزایش یکپارچگی در خاک تثبیت شده می گردد. بر اساس نتایج به دست آمده در این تحقیق، استفاده از مواد معدنی با داشتن المان CaO در ساختار خود می تواند در حجم وسیع به عنوان مواد اولیه در روش ژئوپلیمر به منظور تثبیت خاک بستر استفاده گردد.

از سوی دیگر استفاده از ماده معدنی صدف کوهی به عنوان یک ماده معدنی طبیعی و ارزان (در ایران) و جایگزینی آن با درصدی از سیمان، می تواند برای بهسازی سیمان با سیمان، مناسب باشد. ارزان بودن صدف کوهی نسبت به قیمت مواد خام پایه در تولید و فرآوری سیمانبا توجه به آنالیزهای جهانی و کمک به کاهش مصرف سیمان و ذخیره کردن مقدار قابل توجهی انرژی در فرآیند تولید سیمان و مشارکت در توسعه پایدار از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای خصوصاً دی اکسید کربن، از جمله عوامل تأثیرگذار در انتخاب این ماده معدنی در تثبیت خاک های رسی است.

## منابع

- [1] [1] T.B. Edil, C.H. Benson, M. Bin-Shafique, B.F. Tanyu, W.-H. Kim, A. Senol, Field evaluation of construction alternatives for roadways over soft subgrade, *Transportation Research Record*, 1786(1) (2002) 36-48.
- [2] D.H. Moon, D.G. Grubb, T.L. Reilly, Stabilization/ solidification of selenium-impacted soils using Portland cement and cement kiln dust, *Journal of hazardous materials*, 168(2-3) (2009) 944-951.
- [3] H. Kukko, Stabilization of clay with inorganic by-products, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12(4) (2000) 307-309.
- [4] R. Feiz, J. Ammenberg, L. Baas, M. Eklund, A. Helgstrand, R. Marshall, Improving the CO2 performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry, *Journal of Cleaner Production*, 98 (2015) 272-281.
- [5] A.M. Rashad, An exploratory study on high-volume fly ash concrete incorporating silica fume subjected to thermal loads, *Journal of Cleaner Production*, 87 (2015)



- pozzolan, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 24(9) (2020) 1339-1362.
- [21] A.C.D.-o. Soil, Rock, Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM international, 2010.
- [22] S. Ahmari, K. Parameswaran, L. Zhang, Alkali activation of copper minetailings and low-calcium flash-furnace copper smelter slag, Journal of materials in civil engineering, 27(6) (2015) 04014193.
- [23] A. International, ASTM D2166/D2166M-16 standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, Annual Book of ASTM Standards 2016, (2016).
- Publish, (1959).
- [17] N. Cristelo, S. Glendinning, A. Teixeira Pinto, Deep soft soil improvement by alkaline activation, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 164(2) (2011) 73-82.
- [18] 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.
- [19] S. Pourakbar, A. Asadi, B.B. Huat, M.H. Fasihnikoutalab, Soil stabilisation with alkali-activated agro-waste, Environmental Geotechnics, 2(6) (2015) 359-370.
- [20] V. Toufigh, M. Barzegari Dehaji, K. Jafari, Experimental investigation of stabilisation of soils with Taftan

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*N. bahrami, D. Moazami, Sh. Pourakbar, The effect of calcium presence in limepet for clayey soil stabilization using the geopolymer method, Amirkabir J. Civil Eng., 55(11) (2024) 2179-2194.*

DOI: 10.22060/ceej.2023.21117.7627





