

## بررسی تاثیر ژئوپلیمر بر تثبیت خاک لس (مطالعه موردی خاک لس استان گرگان)

لیلا کرمی<sup>۱</sup>، علی محمد رجیبی<sup>۲\*</sup>

پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۲۳

دریافت مقاله: ۹۸/۰۶/۲۶

### چکیده

لس‌ها نوعی خاک فروریزی هستند که در شرایط اشباع، حجم‌شان به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. کشور ایران از جمله کشورهایی است که لس در بخش‌های مختلفی از آن پراکنده شده است. هدف از این پژوهش، بهبود پارامترهای مقاومتی خاک لس گرگان (شمال ایران) با استفاده از نسبت‌های مختلفی از ژئوپلیمر (ترکیبی از لس و متاکائولن) می‌باشد. بدین منظور، در این مطالعه علاوه بر انجام آزمایش‌های شناسایی، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزلی، سرعت موج فشاری و تراکم اصلاح شده، همچنین آزمایش‌های SEM، EDX و XRD برای بررسی ریزساختار خاک تثبیت نشده و تثبیت شده انجام شده است. در نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر، با افزایش زمان عمل‌آوری و نسبت لس به متاکائولن با ثابت بودن میزان محلول فعال کننده قلیایی، مقاومت تک‌محوری، مقاومت کششی و سرعت موج فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به طوری که با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها ۰/۸۳، کاهش یافته و نرخ این کاهش مقاومت در ۷ روز اول بیشتر است. نتایج آنالیز XRD و تصاویر SEM نشان می‌دهند که ساختار پراکنده خاک لس در اثر افزودن ژئوپلیمر تغییر می‌کند و با تولید ژل آلومینوسیلیکاتی منجر به افزایش مقاومت نهایی، کاهش تخلخل و همگن‌تر شدن ساختار خاک لس می‌شود.

کلید واژه‌ها: لس، ژئوپلیمر، متاکائولن، SEM، XRD

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران leilakaramimc@yahoo.com

۲. گروه زمین شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

## ۱. مقدمه

خاک لس به عنوان خاک رهنده همواره دارای مشکلات فراوان ژئوتکنیکی از جمله نشست و کم بودن ظرفیت باربری می‌باشند. این نوع خاک‌ها در حالت خشک دارای مقاومت نسبتاً زیادی هستند، ولی به محض جذب آب و نزدیک شدن به شرایط اشباع مقاومت خود را تا حدود زیادی از دست می‌دهند. از این جهت این خاک‌ها در گروه خاک‌های مسئله‌دار و یا خاک‌های حساس در مقابل آب طبقه‌بندی شده و در کاربردهای مهندسی بایستی تمهیدات خاصی برای بهسازی آنها در نظر گرفته شود.

مطابق با تحقیقات استاتیو (Evstatiev, 1988)، لس‌ها خاک‌های بادرفتی هستند که قسمت عمده آنها را سیلت تشکیل می‌دهد و از نظر کانی‌شناسی عموماً شامل کوارتز، به همراه مقادیر متغیری میکا، فلدسپارها، کربنات‌ها و رس می‌باشند (Evstatiev, 1988). لس‌ها حدود ۱۰ درصد از کل سطح خشکی کره زمین را پوشانده اند (El Howayek et al., 2008). این مناطق شامل نهشته‌های پیوسته‌ای از شمال چین تا جنوب شرقی اروپا، مناطق پراکنده‌ای در آمریکای شمالی، جنوبی، نیوزلند و عمدتاً شامل کشورهای اوکراین، چین، آمریکا، روسیه، آرژانتین و ایران می‌باشد. در بخش‌های مختلفی از ایران نیز از جمله ۳۸۸ هزار هکتار از کل ناحیه ۱/۵ میلیون هکتاری دشت گرگان با مصالح لس پوشانیده شده است.

برای بهبود ویژگی‌های مقاومتی و سختی خاک‌های فروریزی از جمله لس‌ها، تثبیت شیمیایی با مواد سیمانی در سطح گسترده‌ای انجام گرفته است. تثبیت کننده‌هایی که معمولاً با مکانیسم‌های مرسوم پایدارسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت از سیمان پرتلند معمولی و آهک (Swan, 2005)، کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، (۱۳۸۷) می‌باشند. در خاک‌های تثبیت شده با سیمان، مکانیسم‌های تثبیت با هیدراتاسیون و واکنش‌های پوزولانی همراه هستند (Feda, 1988 Reznic, 1993). مسئله مهم در تثبیت کننده‌های معمولی خاک (به عنوان مثال، OPC و آهک) این است که فرآیند تولید آنها مصرف انرژی و میزان CO2 را به

طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Futai and Admeida, 2008). به طور کلی، استفاده از ژئوپلیمر به عنوان یک ملات به علت تولید کم یا ناچیز ترکیبات CO2، حصول مقاومت فشاری بالا در زمان کم و دوام بالا، در حال افزایش است (Dassekpo et al., 2017). اصطلاح ژئوپلیمر را اولین بار داویدوویتس (Davidovits, 1979) و به عنوان شاخه‌ای جدید از مواد آلومیناسیلیکاتی با ساختار سه بعدی معرفی کرد. به دنبال توسعه تکنولوژی ساخت ژئوپلیمرها، فرصت بسیار خوبی برای رشد و تولید محصولات گوناگون بر پایه ژئوپلیمرها فراهم گشت (Davidovits, 1994).

اگر چه ژئوپلیمرها کاربردهای متعددی دارند، اما کاربرد گسترده آنها به دلایل نبود توجه اقتصادی، غلبه سیمان پرتلند معمولی در صنعت و عدم پذیرش تکنولوژی‌های جدید محدود شده است. ژئوپلیمرها کاربردهای وسیعی در اجرای سازه‌های پیش ساخته، محصولات و سنگفرش‌های بتنی، غیرسیال کردن باطله‌های سمی و رادیواکتیو، سرامیک‌های نسوز و ترکیبات ضد آتش مورد استفاده کاربرد در ساختمان و صنایع انرژی هسته‌ای و... دارند.

ساختار ژئوپلیمرها به صورت شبکه‌ای از پیوندهای آلومینوسیلیکاتی می‌باشد. ساده‌ترین ژئوپلیمر را پلی سیالیت نامیدند. یک زنجیره سیالیت شامل چهاروجهی‌های SiO4 و AIO4 می‌باشد که با اشتراک تمام اتم‌های اکسیژن خود به یکدیگر وصل شده‌اند. یون‌های مثبت (Li<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>)، Ca<sup>2+</sup>، Ba<sup>2+</sup>، NH<sup>4+</sup> و H3O<sup>+</sup> باید در ساختار ماده وجود داشته باشند تا بار منفی آلومینیوم در هر چهار وجه متعادل شود. فرمول عمومی پلی سیالیت به صورت زیر می‌باشد (Davidovits, 1994):



M کاتیونی مانند Na<sup>+</sup>، k<sup>+</sup> یا Ca<sup>2+</sup> و n درجه بسپارش<sup>۱</sup> است که به عبارتی بیانگر درجه پلیمر تشکیل شده است. z نسبت مولار Si/Al که می‌تواند ۱، ۲ و ۳ باشد. محدوده دمایی

بسپارش یا پلیمریزیشن یک واکنش شیمیایی است که در آن مولکول‌های کوچک<sup>۱</sup> و ساده با یکدیگر پیوند برقرار کرده و مولکولی بزرگ به وجود می‌آورند.

خاکستر بادی می‌تواند به عنوان یک جایگزین مناسب برای سیمان در تثبیت خاک‌ها مطرح شود. آنها همچنین دریافته‌اند هرچه نسبت فعال کننده به خاکستر کمتر باشد کسب مقاومت نمونه‌ها بیشتر خواهد شد. یافته دیگر این محققین این بود که بهتر است غلظت محلول سدیم هیدروکسید به ۲/۵ مولال محدود شود، زیرا محلول‌های سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۵ مولال اثر منفی روی کسب مقاومت نمونه‌ها در دوره‌های عمل آوری بلند مدت (۳۶۵ و ۹۰ روز) دارند (Cristelo et al., 2013).

ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2013) از ژئوپلیمر بر پایه متاکائولن برای تثبیت خاک رس با پلاستیسیته پایین استفاده کردند و نتایج نشان داد ژئوپلیمر بر پایه متاکائولن تثبیت کننده موثری برای خاک است. ژئوپلیمر شکل پذیری و مدول یانگ خاک را افزایش می‌دهد ولی در مقایسه با سیمان مدول یانگ کمتری حاصل خواهد شد. همچنین با افزایش درصد ژئوپلیمر، انقباض نمونه‌های خاک تثبیت شده کاهش یافته و درصد رطوبت باقی مانده افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2013). سینگی و همکاران (Singhi et al., 2016) از ژئوپلیمر بر پایه سرباره کوره آهن گدازی و خاکستر بادی برای تثبیت خاک رس با پلاستیسیته پایین استفاده کردند. نتایج بررسی‌های ایشان نشان داد که اختلاف مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه خاکستر بادی در مقایسه با خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر بر پایه سرباره ناچیز است. همچنین در صورتی که از خاکستر بادی با اندازه ذرات ریزتر استفاده شود مقاومت فشاری بیشتری حاصل می‌شود (Singhi et al., 2016). لیو و همکاران (Liu et al., 2016) با بررسی مقاومت فشاری و ریزساختار نمونه‌های ژئوپلیمری، اثر تفاوت سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید را بررسی کردند. نتایج نشان داد در شرایط مقدار برابر فعال کننده، ترکیبات حاوی پتاسیم هیدروکسید مقاومت بیشتری از ترکیبات حاوی سدیم هیدروکسید به دست می‌دهند (Yaolin et al., 2016).

مناسب برای ساخت ژئوپلیمرها از ۲۵ تا ۸۰ درجه سانتی گراد (Deventer et al., 2006) می‌باشد. از خواص مکانیکی فوق العاده ژئوپلیمرها می‌توان به خواصی مانند مقاومت فشاری و سختی بالا، مقاومت استثنایی در برابر گرما، مقاومت در برابر حلال‌های آلی و اسیدها اشاره کرد. علاوه بر این ژئوپلیمرها می‌توانند از محدوده وسیعی از مواد ارزان حاوی آلومینا و سیلیکا مانند زباله‌های صنعتی، متاکائولن، پوزولان‌ها، خاکستر بادی، اسلگ کوره، رسوب لجن، خاکستر برنج و.. تولید شوند (Diannopoulou et al., 2009).

اکثر تحقیقات پیشین بر پایه پایدارسازی و تحکیم لس بوده است. برای مثال وایت و همکاران (White et al., 2005) از خاکستر بادی برای بهبود لس ایالت آیوا استفاده کردند. نتایج نشان داد که هرچند پایداری خاک لس مورد بررسی بهبود یافته است ولی مقاومت و دوام بلند مدت آن تغییرات محسوسی نداشته است (White, et al., 2005). علاوه بر آن، کیم و همکاران (Kim et al., 2011) با موفقیت توانستند ملات حاوی لس را با فرایند ژئوپلیمری توسعه دهند. به طوری که دریافته‌اند کاربرد ژئوپلیمر از جنس لس می‌تواند به مصالح پایدار ساز در ساخت جاده‌ها و روسازی‌ها، برای تحکیم بستر، زیرساخت و اساس استفاده شود (Kim, et al., 2011).

هاردجیتو و همکاران (Hardjito et al., 2005) به بررسی عوامل موثر بر مقاومت و کیفیت بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی، پرداختند. نتایج نشان داد بیشتر شدن غلظت محلول سدیم هیدروکسید و نسبت وزنی سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید مایع، موجب افزایش مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری می‌گردد. همچنین هر قدر که دما در بازه ۳۰-۹۰ درجه سانتی گراد زیاد شود و زمان گیرش در بازه ۴-۹۶ ساعت باشد مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری نیز بیشتر می‌شود. همچنین بتن ژئوپلیمری در برابر سدیم سولفات مقاومت بالایی دارد (Rangan and Hardjito, 2005).

کریستلو و همکاران (Cristelo et al., 2013) چگونگی تثبیت خاک‌های نرم را با استفاده از فعال ساز قلیایی و خاکستر بادی مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که فعال‌سازی

"سدیم هیدروکسید، میکروسلیس و آب" و "سدیم مطالعات محدود در خصوص ماده افزودنی ژئوپلیمر و تاثیر آن‌ها در بهسازی خاک لس، اثر ژئوپلیمر بر تثبیت خاک لس گرگان مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

## ۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. مشخصات خاک مورد مطالعه خاک مورد مطالعه در این تحقیق خاک لس گرگان (شمال ایران) می‌باشد. نمونه‌های دست نخورده‌ای از این خاک بر اساس استاندارد ASTM D1587 توسط نمونه گیر شلبی تهیه شدند. خاک مورد استفاده دارای رنگ زرد نخودی با دانسیته ۱/۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب، چگالی دانه‌های خاک ۲/۶۷ بوده و درصد عبوری خاک از الک ۲۰۰ بیشتر از ۹۰ درصد می‌باشد. به منظور شناسایی ترکیب شیمیایی خاک لس مورد استفاده، آنالیز EDX و XRD انجام شده است. جدول ۱ مشخصات شیمیایی حاصل از این آنالیز را نشان می‌دهد. تجزیه عنصری خاک لس، حاصل از آنالیز EDX با توجه به پیک‌های ظاهر شده در شکل ۱ نشان می‌دهد که عناصر اصلی تشکیل دهنده خاک O, Si, Ca, Al و Fe می‌باشد.

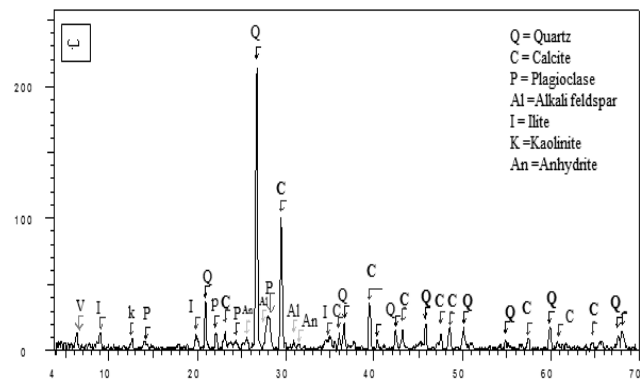
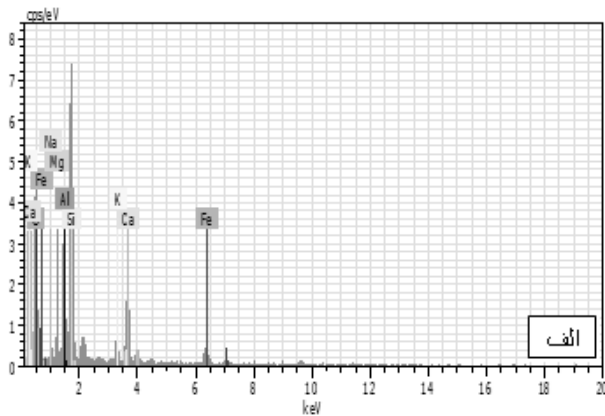
## ۲-۲. ژئوپلیمر

در این مطالعه نمونه‌های ملات ژئوپلیمر مورد استفاده از ترکیب متاکائولن با سدیم هیدروکسید (NaOH) و سدیم سیلیکات ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) تهیه شده است. ژئوپلیمر مورد استفاده به صورت محلول و از ترکیب سدیم هیدروکسید به صورت قرص در محلول آب و سدیم سیلیکات آماده شده‌اند. همچنین متاکائولن مورد استفاده در این تحقیق از شرکت تولیدی جهان پودر دلیجان تهیه شده است. آنالیز شیمیایی متاکائولن به شرح جدول ۲ می‌باشد.

آسی و همکاران (Assi et al., 2016) از دو محلول فعال ساز هیدروکسید، سدیم سیلیکات و آب برای ساخت بتن ژئوپلیمری استفاده کردند. بررسی‌ها نشان داد بتن ساخته شده با محلول فعال ساز شامل سدیم هیدروکسید و میکروسلیس دارای حداکثر مقاومت فشاری برابر با ۱۰۶ مگاپاسکال است در حالیکه این پارامتر برای بتن حاوی محلول فعال کننده شامل سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات برابر با ۳۸ مگاپاسکال است. نکته قابل توجه دیگر این است مقاومت فشاری کسب شده بتن تهیه شده با محلول فعال ساز سدیم سیلیکات برخلاف بتن حاوی محلول فعال ساز میکروسلیس به شدت تحت تاثیر شرایط عمل‌آوری است (Assi et al., 2016). ژان باپتیست و همکاران (Jean-Baptiste et al., 2017) تثبیت خاک لس چین با مواد ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نسبت فعال ساز قلیایی را در کل نمونه‌ها ثابت در نظر گرفتند در حالی که نسبت خاک لس به خاکستر بادی (L/FA) از ۰ تا ۱۰۰ متغیر بود. نتایج نشان داد که افزودن ژئوپلیمر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد. به طوری که در زمان عمل‌آوری آبی نرخ افزایش مقاومت نسبت به زمان ۲۸ روزه بیشتر است و بیشترین مقاومت در نمونه‌هایی با میزان خاک لس صفر درصد و خاکستر بادی ۱۰۰ درصد می‌باشد. همچنین جایگزینی لس با خاکستر بادی نه تنها در بحث مقاومت فشاری بلکه در بحث مدیریت و حفاظت از محیط زیست در برابر کربن دی اکسید نیز مفید خواهد بود (Dassekpo, et al., 2017). بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد علیرغم انجام تحقیقات گسترده روی تثبیت خاک‌های لس (با سیمان، آهک، گردکورهی سیمان، نمک‌های آمونیوم سولفات و خاکستر پوسته برنج و...)، مطالعات محدودی در خصوص بهسازی خاک‌های لس شهرگرگان با ژئوپلیمرها انجام شده است (حائری و همکاران ۱۳۹۴، پاک نیت، ۱۳۹۳; Dassekpo et al., 2017; Hosseini et al., 2012). در این تحقیق با توجه به

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی خاک لس مورد استفاده در این مطالعه

Phase / mineral name	chemical formula	Content (%)
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	31.9
Quartz	SiO <sub>2</sub>	27.8
Plagioclase	(Na,Ca)Al(Si,Al)3O <sub>8</sub>	16.1
Illite	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	11.1
Anhydrite	CaSO <sub>4</sub>	5.4
Vermiculite	Mgx(Mg,Fe)3(Si,Al)4O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	2.6
Alkalifeldspar	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2.2
Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	1.9
Amphibole	Ca <sub>2</sub> (Mg,Fe)5Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	0.9



شکل ۱. نتایج آنالیز EDX (الف) و XRD (ب) خاک لس گرگان در محدوده مورد مطالعه

جدول ۲. مشخصات شیمیایی متاکائولن مورد استفاده در این مطالعه

SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Chemical Composition Content (%)
0.12	0.1	0.04	0.38	0.04	0.01	0.05	1.46	15.69	80.76	

### ۲-۲-۱. محلول فعال سازقلیایی

صنایع مورد استفاده است. سدیم هیدروکسید را به صورت پودر یا پولک‌های جامد سفید رنگ می‌توان تهیه کرد. شکل پولکی آن کاربردهایی صنعتی داشته و استفاده از آن در تحقیقات مهندسی رایج است. عموماً استفاده از سدیم هیدروکسید به صورت محلول می‌باشد. در آزمایشگاه سدیم هیدروکسید لازم جهت تهیه محلول با غلظت مورد نظر در

در تکنولوژی‌های ژئوپلیمر و فعالسازی قلیایی، بطورکلی به محلولی با خاصیت قلیایی بالا که منبعی از هیدروکسید آزاد و اکسید قلیا است، فعال کننده می‌گویند. متداول‌ترین فعال کننده های مورد استفاده، سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات هستند. سدیم هیدروکسید (SH) یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH، همواره به عنوان یک ماده پر مصرف در

گیرد. سدیم هیدروکسید مورد استفاده در این تحقیق از شرکت آراکس شیمی با غلظت ۱۴ مولار تهیه شده است. آنالیز شیمیایی سدیم هیدروکسید به شرح جدول ۳ می باشد.

چند مرحله به آب اضافه و هم زده می شود. محلول سدیم هیدروکسید حین انحلال، حرارت بسیار زیادی تولید می کند. بنابراین تا رسیدن به دمای محیط نبایستی مورد استفاده قرار

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سدیم هیدروکسید مورد استفاده در این مطالعه.

Chemical Composition	Content (%)
Fe	0.003
K <sub>2</sub> O	0.066
Ni	0.003
Mg	ND
Purity	98±1

#### ۲-۲-۲. محلول سدیم سیلیکات

سدیم سیلیکات (SS) با فرمول شیمیایی  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  به صورت جامد و مایع تولید شده و در صنایع کاربرد زیادی دارد. سدیم سیلیکات موجود در بازار به سه شکل دانه ای، پودری و محلول وجود دارد و مصرف کننده با توجه به نیاز خود از آن استفاده می کند. در تحقیقات صورت گرفته بر روی مواد ژئوپلیمری عموماً شکل محلول آن استفاده می شود. سدیم سیلیکات مورد استفاده در این مطالعه، با خلوص و مدول (نسبت سیلیکا به سدیم اکسید) ۲/۷۵ به صورت محلول صنعتی خریداری شده و شامل ۵۵٪ آب، ۱۲٪ سدیم اکسید، ۳۳٪ سیلیکا و ۶۳٪ ناخالصی شامل اکسید پتاسیم و مقادیری لیتیم، سرب و منگنز است. محلول سدیم سیلیکات زرد کم رنگ بوده و ویسکوزیته بالایی دارد.

#### ۲-۲-۳. طرح اختلاط ژئوپلیمر

در این مطالعه به منظور آماده سازی ژئوپلیمر مصرفی همانطور که قبلاً ذکر شد متاکائولن، سدیم هیدروکسید، سدیم سیلیکات و آب با یکدیگر ترکیب شدند. درصد مواد مورد استفاده جهت اختلاط مطابق با جدول ۴ می باشد. مطابق جدول (۴)، میزان فعال ساز قلیایی در همه نمونه ها ثابت بوده

و مقدار خاک و متاکائولن (به عنوان پوزولان) از ۰ تا ۱۰۰ درصد تغییر می کند. نحوه ساخت نمونه به این صورت است که خاک با متاکائولن به صورت خشک کاملاً مخلوط شده تا به طور یکنواخت پراکنده شود. سپس محلول سدیم سیلیکات، قرص های سدیم هیدروکسید و آب براساس نسبت های از پیش تعیین شده به صورت یک محلول یکنواخت ترکیب شدند تا فعال ساز قلیایی مورد استفاده بوجود آید. سپس این محلول در نسبت های مورد نظر به مخلوط خاک و متاکائولن اضافه شد. به منظور توزیع یکسان، محلول به دست آمده به مدت ۵ تا ۶ دقیقه با همزن ترکیب شده، سپس داخل قالب ریخته و بر روی میز لرزان به مدت ۲ تا ۳ دقیقه برای از بین بردن هوای داخل مخلوط، قرار گرفته اند. با توجه به اثر دمای عمل آوری بر مقاومت ژئوپلیمر تولید شده، مطابق با پالومو و همکاران (Palomo et al., 1999) نمونه ها پس از اعمال ۴ ساعت استراحت در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۱ ساعت عمل آوری شدند (Palomo et al., 1999) شکل (۲) تصاویری از مواد استفاده شده در تهیه ملات را نشان می دهد.



شکل ۲. مواد مورد استفاده در تهیه ژئوپلیمر مورد استفاده در این مطالعه؛ (سیلیکات سدیم) (الف)، سدیم هیدروکسید (ب)، آب (ج)، متاکائولن (د)؛ خاک لس (ح)؛ و مخلوط نهایی حاصل از ترکیب مواد (ی)

جدول ۴. اختلاط نمونه‌های ژئوپلیمری مورد استفاده در این مطالعه

Specimen Label	Loess (%)	Metakaol (%) in	Loess (g)	Metakaolin (g)	Alkaline Solution (g)		Water (g)
					NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	
GP-L0	0	100	•	269.44	10.9	67.98	44.89
GP-L10	10	90	26.94	242.5	10.9	67.98	44.89
GP-L20	20	80	53.88	215.55	10.9	67.98	44.89
GP-L30	30	70	80.83	118.3	10.9	67.98	44.89
GP-L40	40	60	107.77	161.66	10.9	67.98	44.89
GP-L50	50	50	134.72	134.72	10.9	67.98	44.89
GP-L60	60	40	161.66	107.77	10.9	67.98	44.89
GP-L70	70	30	188.60	80.83	10.9	67.98	44.89
GP-L80	80	20	215.55	53.88	10.9	67.98	44.89
GP-L90	90	10	242.5	26.94	10.9	67.98	44.89
GP-L100	100	0	269.44	•	10.9	67.98	44.89

### ۳. روش انجام آزمایش‌ها

#### ۳-۱. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

مخلوط خاک و ژئوپلیمر تهیه شده را در قالب تک‌محوری ریخته و بعد از مدت استراحت نمونه‌ها برای ۴ ساعت، نمونه‌ها در دمای نگهداری ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۱ ساعت

در این مطالعه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D2166-85 بر روی خاک لس تثبیت نشده و تثبیت شده با ژئوپلیمر انجام شده است. به این منظور

عمل‌آوری شده‌اند. سپس نمونه‌ها در کیسه‌های در بسته نگهداری شدند (Assi et al. 2016).

۲-۳. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (روش برزیلی) آزمایش مقاومت کششی مطابق با SRM 1978 و به منظور تعیین مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری روی نمونه‌های خاک لس تثبیت نشده و تثبیت شده با ژئوپلیمر انجام شده است. در این آزمایش نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای و با قطری دو برابر طول نمونه تهیه شده و میان دو صفحه بارگذاری قرار می‌گیرند. در این آزمایش بارگذاری فشاری بر روی نمونه به صورت تدریجی به میزان ۰/۲ کیلونیوتن بر ثانیه اعمال شده و تا زمان گسیختگی نمونه ادامه می‌یابد و مقدار بار وارد شده در زمان شکست ثبت می‌شود. با فرض ثابت و همگن بودن خصوصیات فیزیکی نمونه و در غیاب هرگونه سطح ناهمسانی، مقاومت کششی از رابطه ۰ محاسبه می‌شوند.

$$\sigma_t = \frac{2p}{\pi DL} \quad (1)$$

که در آن  $\sigma_t$  مقاومت کششی،  $D$  قطر نمونه،  $L$  طول نمونه و  $P$  بار وارد شده در زمان شکست می‌باشد. ۳-۳. آزمایش تعیین سرعت موج فشاری در این مطالعه به منظور تعیین یکی دیگر از پارامترهای مرتبط با مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر، سرعت موج فشاری  $p$  مطابق با استاندارد ISRM اندازه‌گیری شد. در این آزمایش پس از اندازه‌گیری طول مغزه، امواج الاستیک به داخل نمونه هدایت می‌شوند. با داشتن زمان سیر موج و طول مغزه می‌توان سرعت موج طولی را اندازه‌گیری کرد. سرعت این امواج به کیفیت نمونه بستگی دارد. از عوامل مؤثر بر سرعت صوت در یک نمونه می‌توان به بافت، چگالی، تخلخل، درجه حرارت، روزه داری، ناهمسانگردی، میزان تنش (سطح تنش) و مقدار آب موجود در

نمونه اشاره نمود. عموماً می‌توان گفت هر چه نمونه متراکم‌تر و ریزدانه‌تر باشد سرعت صوت در آن بیشتر خواهد بود. سرعت امواج صوتی متناسب با سرعت صوت در کانی‌های تشکیل دهنده آن می‌باشد (Palomo, et al., 1999). در این تحقیق آزمایش سرعت موج فشاری برای نمونه‌های ژئوپلیمری در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه انجام شده است.

#### ۴. نتایج و بحث

۴-۱. نتایج آزمایش تک‌محوری خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر

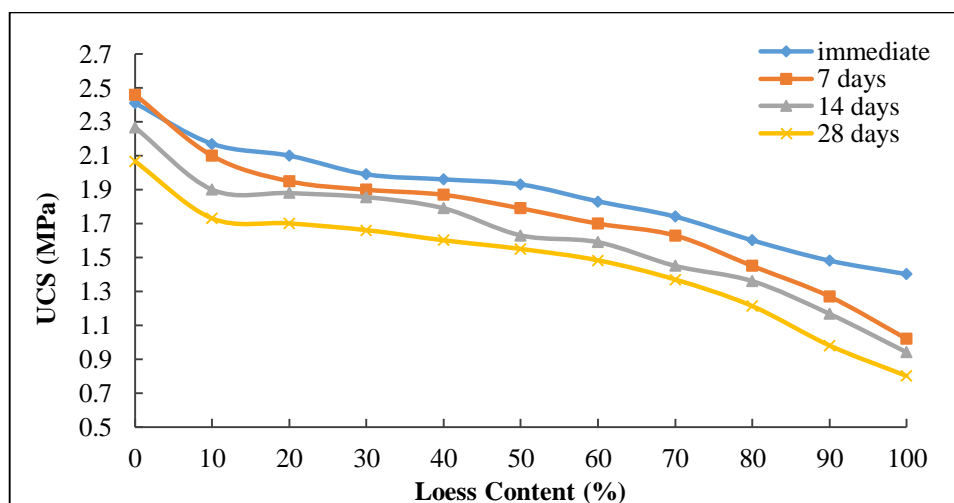
در این مطالعه، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر در درصد‌های مختلف خاک و متاکائولن با ثابت بودن مقدار فعال کننده قلیایی در زمان‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام شده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر در جدول ۵ نشان داده شده است. در جدول ۵ به عنوان مثال ملات GP-LO حاوی ۱۰۰ درصد متاکائولن و صفر درصد خاک و GP-L100 حاوی ۰ درصد متاکائولن و ۱۰۰ درصد خاک لس می‌باشد.

در شکل ۳ مقاومت فشاری تک‌محوری خاک لس تثبیت شده با درصد‌های مختلف خاک و متاکائولن در زمان‌های عمل‌آوری مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش درصد خاک و کاهش نسبت متاکائولن به خاک، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در تمامی درصدها کاهش می‌یابد و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه نمودار شیب کمتری نسبت به نمونه‌های ۲۸ روزه دارد.



جدول ۵. نتایج مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر

Curing time (day)				Specimen Label
28	14	7	0	
2.06	2.26	2.46	2.41	GP-L0
1.72	1.90	2.10	2.17	GP-L10
1.70	1.88	1.95	2.10	GP-L20
1.66	1.85	1.90	1.99	GP-L30
1.60	1.79	1.87	1.96	GP-L40
1.54	1.63	1.79	1.93	GP-L50
1.48	1.59	1.70	1.83	GP-L60
1.36	1.45	1.63	1.74	GP-L70
1.21	1.36	1.45	1.60	GP-L80
0.98	1.16	1.27	1.48	GP-L90
0.80	0.94	1.02	1.40	GP-L100



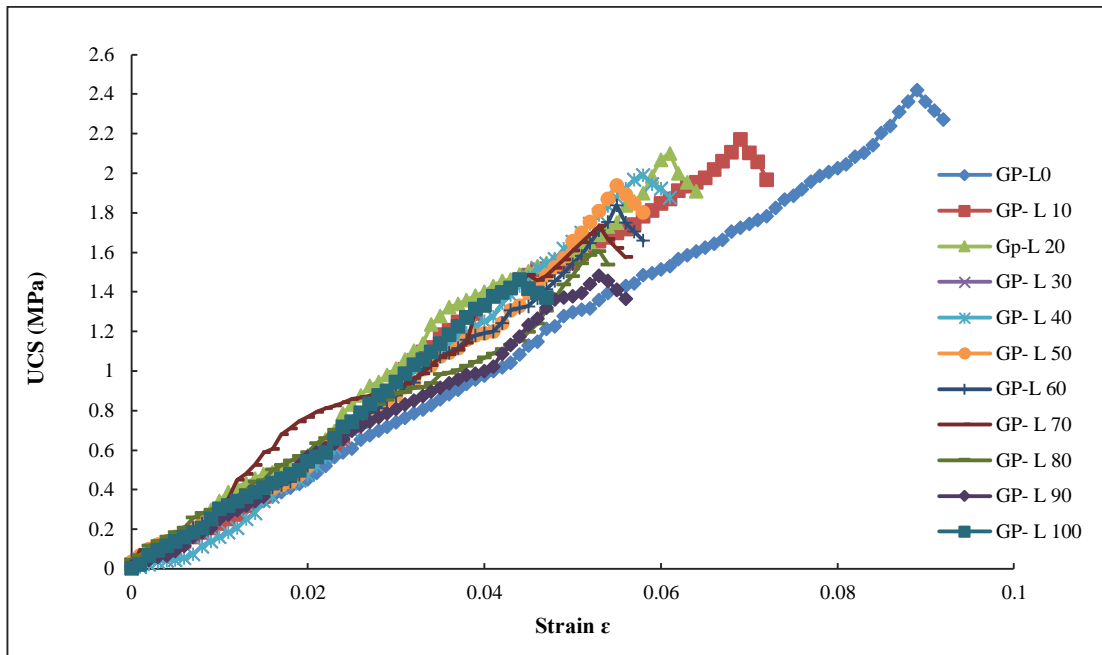
شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری خاک لسی تثبیت شده با ژئوپلیمر به ازای درصدهای مختلف خاک لس در زمان‌های عمل‌آوری مختلف

همان‌طور که در شکل‌های ۴ تا ۷ مشاهده می‌شود تمامی نمونه‌ها بعد از رسیدن به مقاومت نهایی همچنان قادر به تحمل بارهای وارده هستند و نرخ افت مقاومت‌شان کم است. بررسی شکل‌ها نشان می‌دهد که افزایش درصد متاکائولن موجب افزایش نرخ کاهش مقاومت شده است. برای مثال مقاومت نهایی نمونه‌ای که دارای ۱۰۰ درصد متاکائولن و ۰ درصد خاک باشد، در زمان عمل‌آوری آنی ۲/۴۱

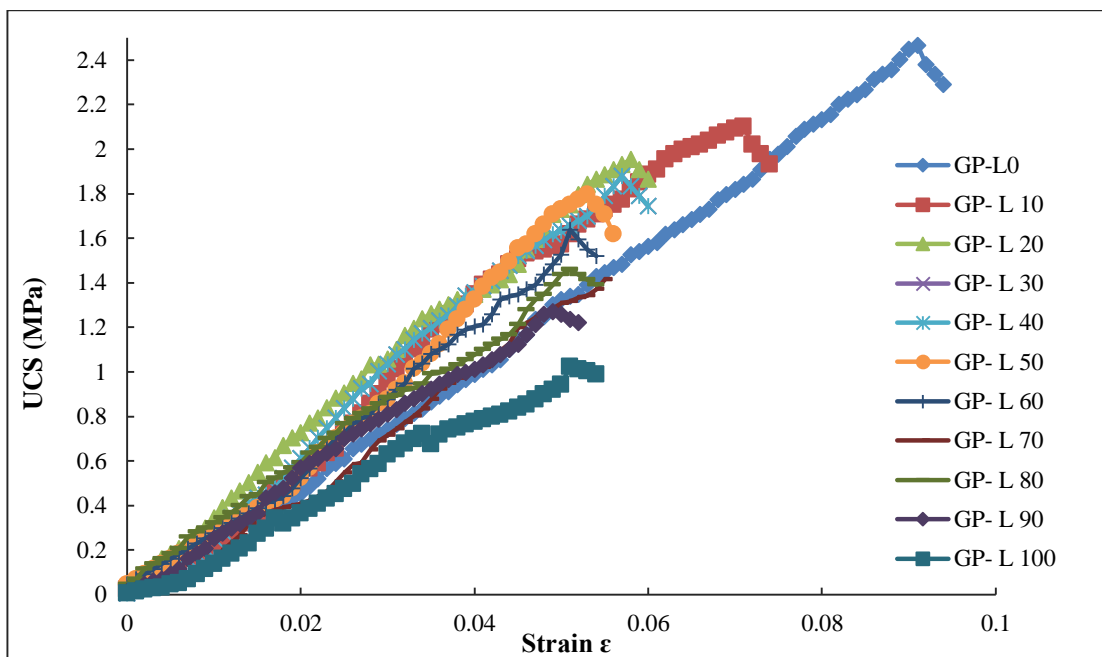
تغییرات تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر در درصدهای مختلف خاک لس و متاکائولن در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در شکل‌های ۴ تا ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴ در نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر در زمان عمل‌آوری آنی، با افزایش نسبت خاک لس به متاکائولن، مقاومت تک‌محوری و شکل‌پذیری نمونه‌ها کاهش و مدول الاستیسیته افزایش یافته است.

متاکائولن مقاومت نمونه‌ها از ۱/۴۰ به ۱/۳۷ مگاپاسکال کاهش می‌یابد که احتمالاً به دلیل تردی نمونه‌ها می‌باشد.

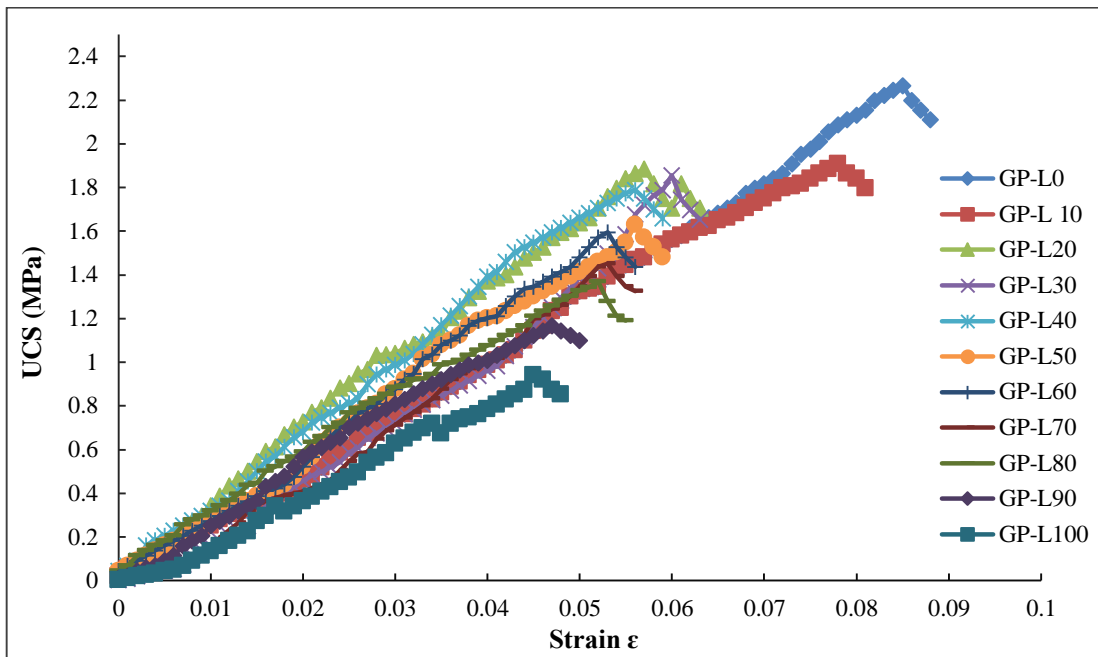
مگاپاسکال می‌باشد. این مقدار در تغییر شکل ۸/۹ میلی‌متر بعد از رسیدن به مقاومت نهایی با کاهش اندک به ۲/۲۷ مگاپاسکال می‌رسد. اما در نمونه‌های تثبیت شده با ۰ درصد



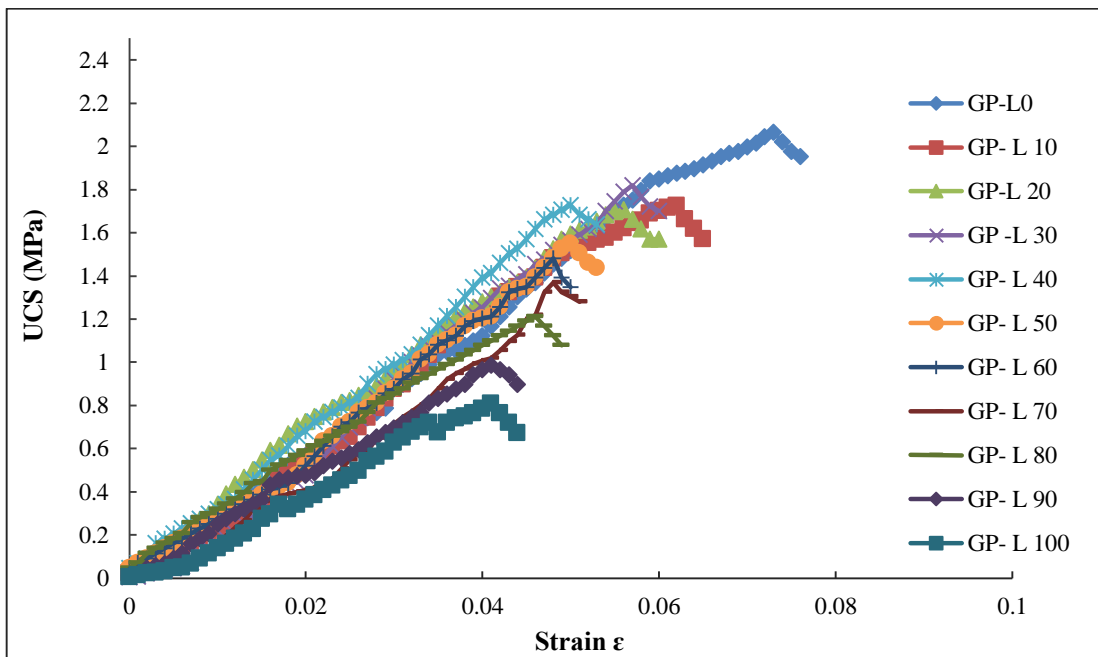
شکل ۴. تغییرات تنش-کرنش برای نمونه‌های لس تثبیت شده با درصد‌های مختلف ژئوپلیمر در زمان آنی



شکل ۵. تغییرات تنش-کرنش برای نمونه‌های لس تثبیت شده با درصد‌های مختلف ژئوپلیمر در زمان عمل آوری ۷ روزه



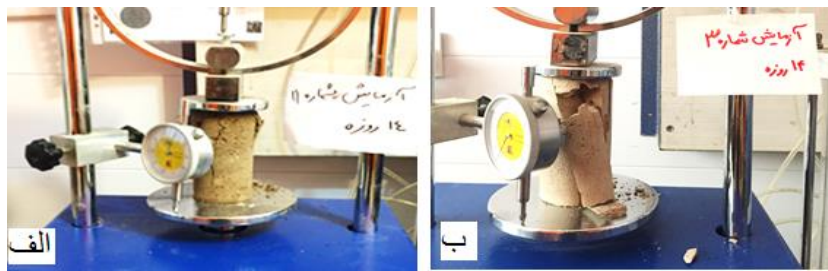
شکل ۶. تغییرات تنش-کرنش برای نمونه‌های لس تثبیت شده با درصد‌های مختلف ژئوپلیمر در زمان عمل آوری ۱۴ روزه



شکل ۷. تغییرات تنش-کرنش برای نمونه‌های لس تثبیت شده با درصد‌های مختلف ژئوپلیمر در زمان عمل آوری ۲۸ روزه

دهند. زیرا متاکائولن، سیماناسیون زیادی بین ذرات لس فراهم می‌کند و مقاومت لس تثبیت شده را افزایش می‌دهد.

با توجه به شکل ۸ نمونه‌هایی که میزان متاکائولن بیشتری دارند دارای مقاومت بیشتری بوده و رفتار ترد تری نشان می‌-



شکل ۸. نمونه گسیخته شده خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر (GP-L100) حاوی ۰ درصد متاکائولن و ۱۰۰ درصد خاک لس (الف) و نمونه گسیخته شده خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر (GP-L20) حاوی ۸۰ درصد متاکائولن و ۲۰ درصد خاک لس (ب)

#### ۲-۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (به روش برزیلی)

۰/۲۶ مگاپاسکال تغییر می‌کند. نتیجه اینکه با کاهش درصد متاکائولن مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش یافته است. ۹۰ تصاویری از نمونه‌های گسیخته شده در آزمایش مقاومت کششی را نشان می‌دهد.

در این مطالعه آزمایش مقاومت کششی روی نمونه‌های ژئوپلیمری GP-L0 تا GP-L100 در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه انجام شده است. نتایج آزمایش مقاومت کششی در جدول ۶ نشان داده شده است. مطابق با این جدول با تغییر نسبت ژئوپلیمر در خاک لس مقاومت کششی نمونه‌ها از ۱/۳۰ تا

جدول ۶- نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه

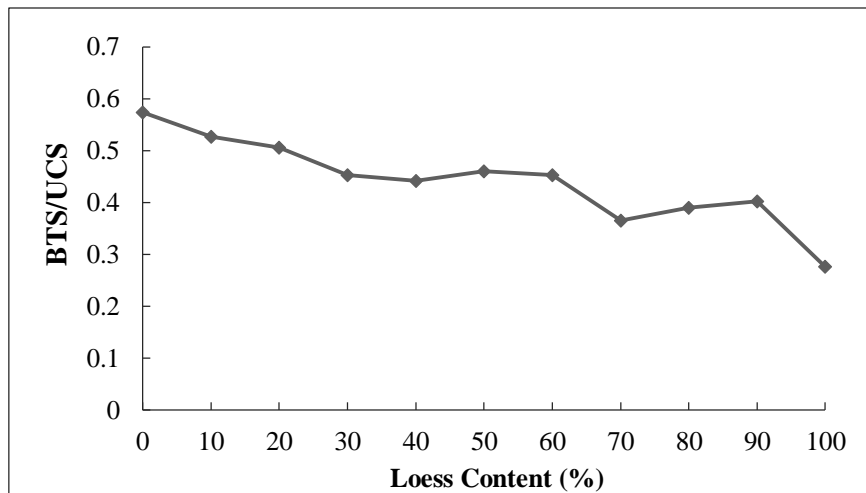
Tensile strength (Mpa)	Specimen Label
1.30	GP-L0
1	GP-L10
0.95	GP-L20
0.84	GP-L30
0.79	GP-L40
0.75	GP-L50
0.72	GP-L60
0.53	GP-L70
0.53	GP-L80
0.47	GP-L90
0.26	GP-L100



شکل ۹. نمونه‌های گسیخته شده در آزمایش مقاومت کششی روی نمونه‌های لس مورد مطالعه

درصد خاک لس نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری کاهش می یابد.

شکل ۱۰ مقادیر نسبت مقاومت کششی و مقاومت فشاری نمونه های تثبیت شده با ژئوپلیمر به ازای درصدهای مختلف خاک لس را نشان می دهد. مطابق با شکل ۱۰، با افزایش



شکل ۱۰. نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری با درصدهای مختلف خاک لس در نمونه های ژئوپلیمری

#### ۳-۴. نتایج آزمایش سرعت موج فشاری

هرحال ماهیت ژئوپلیمر و افزایش دانسیته خاک ناشی از حضور ژئوپلیمر در خاک موجب افزایش سرعت موج در نمونه های تثبیت شده می شود.

این آزمایش برای نمونه های تثبیت شده با ژئوپلیمر در زمان عمل آوری ۱۴ روزه انجام شده و نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است. مطابق با جدول ۷ با افزایش درصد متاکائولن در ژئوپلیمر، سرعت موج فشاری افزایش می یابد. به

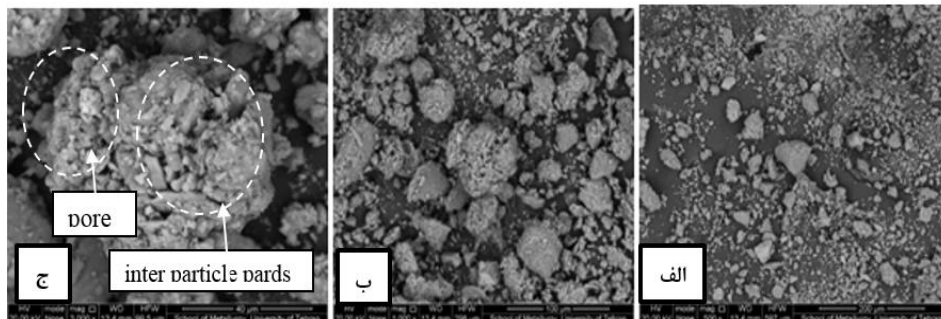
جدول ۷. نتایج آزمایش سرعت موج فشاری نمونه های تثبیت شده با ژئوپلیمر در زمان عمل آوری ۱۴ روزه

Compression Wave test (Vp) (m/s)	Specimen Label
2995	GP-L0
2984	GP-L10
2803	GP-L20
2797	GP-L30
2476	GP-L40
2614	GP-L50
2529	GP-L60
2200	GP-L70
2193	GP-L80
2191	GP-L90
1876	GP-L100

۴-۴. نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی

و دانه‌های سیلت) و ذرات ریزی اغلب روی سطح ذرات بزرگتر مشاهده می‌شود. این ذرات ریز می‌توانند علاوه بر رس شامل کربنات‌ها نیز باشند. خاک تثبیت نشده دارای منافذ بزرگی بوده و به همین علت دارای ساختار بسیار ضعیفی است که در اثر بارهای وارده دچار تغییر شکل‌های زیادی می‌شود.

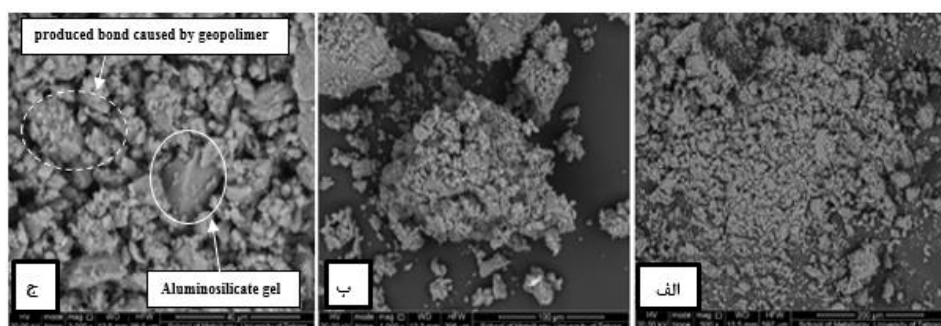
در این مطالعه به منظور بررسی ریزساختار و علل تغییر رفتار خاک لس مورد مطالعه تصویربرداری SEM از خاک به عمل آمده است. شکل ۱۱ تصاویر SEM خاک لس تثبیت نشده در بزرگنمایی‌های ۵۰۰ (الف)، ۱۰۰۰ (ب) و ۳۰۰۰ (ج) برابر را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است برخی از دانه‌ها زاویه‌دار و برخی گرد هستند (عمدتاً کوارتز شن و ماسه



شکل ۱۱. تصاویر SEM خاک لس گرگان با الف) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر ج) بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر

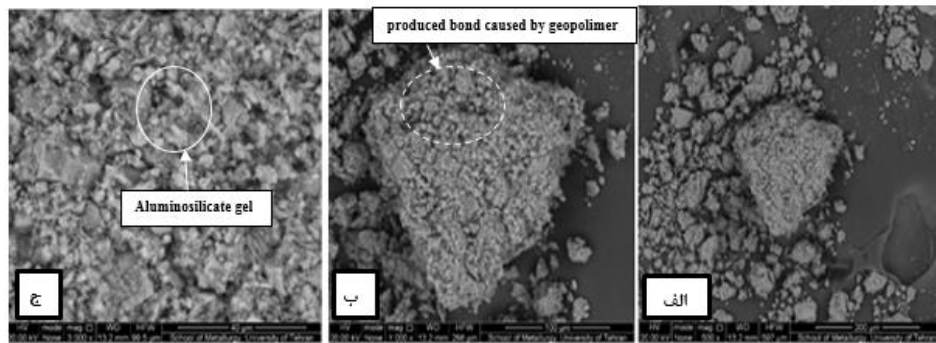
ساختار بهم پیوسته نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر مشاهده می‌شود. همچنین ژل‌های آلومینوسیلیکاتی موجود در ترکیب ژئوپلیمر با اتصال ذرات خاک، باعث افزایش مقاومت خاک شده‌اند.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تصاویر SEM خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر در زمان عمل‌آوری آبی و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. با توجه به آنچه که از مبانی ژئوپلیمر بیان شد، ژل‌های آلومینوسیلیکاتی نقش اصلی در پیوند بین ذرات خاک دارند. مطابق با شکل‌های ۱۲ و ۱۳ بوضوح همگن بودن ریزساختار و



شکل ۱۲. تصاویر نمونه‌های خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر (GP-ML10) در زمان عمل‌آوری آبی با : الف) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر

ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر ج) بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر

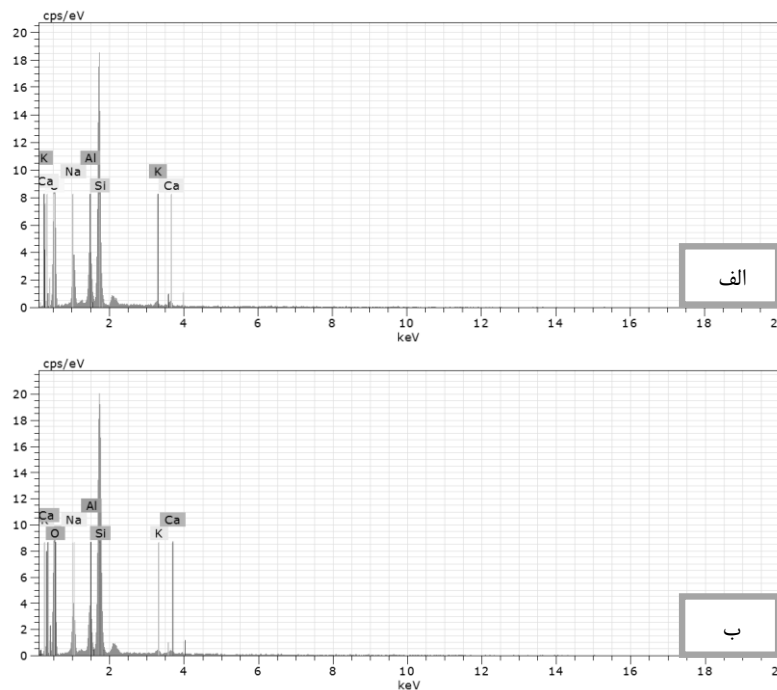


شکل ۱۳- تصاویر نمونه‌های خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر (GP-L10) در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه با: الف) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر ج) بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر

#### ۴-۵. بررسی آنالیز EDX

روزه افزایش یافته است. یون‌های کلسیم و آلومینیوم موجود در خاک تثبیت شده منجر به تجمع دانه‌های خاک شده و این موضوع یکی از دلایل افزایش مقاومت خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر است. افزایش غلظت یون کلسیم در خاک خود عامل پیوند بین ذرات خاک است، بر این اساس این عوامل منجر به افزایش مقاومت خاک ناشی از فرآیند تثبیت می-شود (Mahmoud and Dafalla, 2012)

نمودارهای بدست آمده از آنالیز EDX روی نمونه‌های خاک لس تثبیت نشده و تثبیت شده با ژئوپلیمر، در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه در شکل ۱۴ ارائه شده‌اند. پیک‌های ظاهر شده در نمونه‌های بهسازی شده نشان می‌دهند که اجزای اصلی تشکیل دهنده خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر شامل Si، O، Ca، Al، Na و K می‌باشد. بطوریکه میزان Si و Na نسبت به خاک بدون افزودنی افزایش یافته است. همچنین در نمونه آنی مقادیر Ca، Al، Na و K نسبت به زمان عمل‌آوری ۲۸



شکل ۱۴- نتایج آنالیز EDX خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر (GP-mL10) الف: در زمان عمل‌آوری آنی ب: در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز

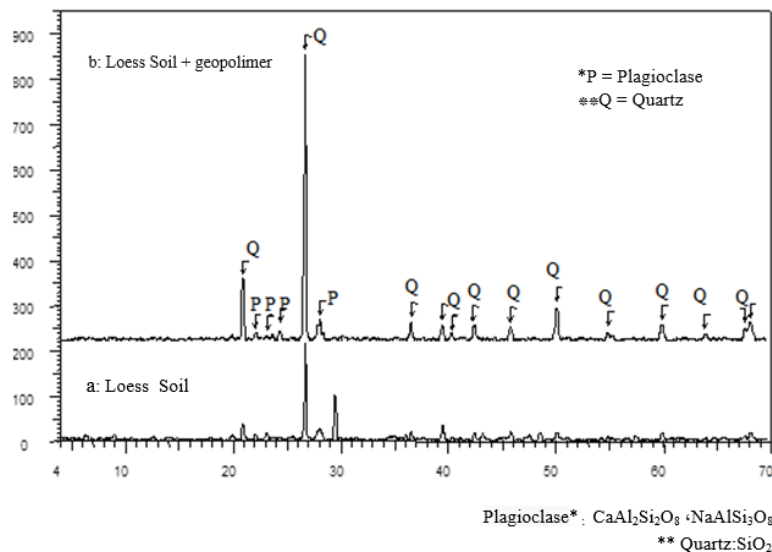
#### ۴-۶. نتایج آنالیز XRD

حاصل از آنالیز XRD خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر (GP-

Error! Reference source not found. ۱۵ نتایج

نتیجه اینکه تشکیل فاز کوارتز و ژل‌های آلومینوسیلیکاتی در نتیجه افزودن ژئوپلیمر به خاک منجر به افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت شده می‌شود.

ML10) در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه در مقایسه با خاک لس تثبیت نشده را نشان می‌دهد. با مقایسه خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر و خاک تثبیت نشده مشاهده می‌شود که فازهای کوارتز و پلاژیوکلاز در خاک تثبیت شده افزایش یافته است.



شکل ۱۵. نتایج آنالیز XRD خاک لس خاک لس تثبیت نشده (a): و تثبیت شده با ژئوپلیمر (GP-mL10) در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه (b)

## ۵. نتیجه‌گیری

کاهش می‌یابد و نرخ کاهش مقاومت در ۷ روز اول بیشتر است. همچنین نمونه‌هایی که درصد متاکائولن بیشتری دارند، ترد می‌شوند. نتایج آزمایش مقاومت کششی روی خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه نشان داد با افزایش نسبت خاک به متاکائولن، با ثابت بودن محلول فعال کننده قلیایی، مقاومت کششی نمونه کاهش یافته است. به گونه‌ای که نمونه حاوی ۱۰۰ درصد متاکائولن و ۰ درصد خاک، مقاومت کششی برابر با ۱/۳۰ مگاپاسکال و نمونه حاوی ۱۰۰ درصد خاک و ۰ درصد متاکائولن مقاومت کششی برابر با ۰/۲۶ مگاپاسکال دارد. همچنین نتایج آزمایش سرعت موج فشاری روی خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر در زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه نشان داد با افزایش نسبت خاک به متاکائولن با ثابت بودن محلول فعال کننده‌ی قلیایی سرعت موج فشاری ۰/۶۲ کاهش یافته است. بررسی تصاویر SEM نشان می‌دهند که افزودن ژئوپلیمر به خاک لس منجر به وقوع واکنش پوزولانی

در این مطالعه اثر افزودنی ژئوپلیمر بر پارامترهای مقاومتی خاک لس گرگان (شمال ایران) مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور آزمایش مقاومت فشاری تک محوری روی خاک لس تثبیت شده با ژئوپلیمر در زمان‌های عمل‌آوری آنی، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شده است. همچنین مقاومت کششی و سرعت موج فشاری روی نمونه‌های تثبیت شده با ژئوپلیمر در زمان‌های عمل‌آوری ۱۴ روزه روی خاک لس تثبیت شده انجام شده است. همچنین به منظور تحلیل و بررسی علل نتایج به دست آمده و بررسی ریزساختار خاک، عکس برداری SEM و آنالیز XRD و EDX روی نمونه های خاک انجام شده است.

نتایج حاصل از آزمایش های مقاومت فشاری تک محوری نشان می‌دهد با افزایش زمان عمل‌آوری و نسبت خاک به متاکائولن با ثابت بودن میزان محلول فعال کننده قلیایی، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها کاهش یافته است به طوری که با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت نمونه‌ها ۸۳٪



و تولید محصولات سیلیکات‌های کلسیم هیدرات (CSH) و  
ژل آلومینوسیلیکاتی بین ذرات شده و با ایجاد ساختار متجمع  
باعث افزایش مقاومت نهایی و کاهش تخلخل می‌شود.  
همچنین گذشت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز باعث تغییر ساختار  
خاک لس و مجتمع شدن آن نسبت به زمان عمل‌آوری آنی  
می‌شود.

## منابع

پاک نیت، ح. ۱۳۹۳. پایان نامه ارشد، بررسی آزمایشگاهی تثبیت خاک‌های رمنده با مواد شیمیایی و پوزولانی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.  
حائری، م. سلیمانی، س. حسینی، آ.م. و شهرابی، م.م. ۱۳۹۴. بررسی مقاومت تک محوری نمونه‌های خاک فروریزی تثبیت شده با مواد افزودنی  
مختلف، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تبریز.  
کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۸. خواص ژئوتکنیکی خاک‌های فروریزی و اهمیت آن از نظر پی سدها، شماره ۲۴.

- Assi L.N., Deaver, E., ElBatanouny, M.K., Ziehl, P., 2016. Investigation of early compressive Strength of fly ash-based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 112: 807-815
- B. Kim, B., Choi, H., Kang, K., Yi, C., 2011. Characteristics of natural loess (hwangtoh) paste subjected to geopolymerization, *J. Korea Concr. Inst.* 23 (1):121-127.
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., Pinto, A., 2013. Effect of alkaliactivated fly ash and portland cement on soft soil stabilization, *Acta geotechnical*, 8:395-405
- Dassekpo, J.B.M., Zha, X., Zhan J., 2017. Synthesis reaction and compressive strength behavior of loess-fly ash based geopolymers for the development of sustainable green materials, 141: 491-500.
- Davidovits, J., 1994. Geopolymers: Man-made Rock Geosynthesis and resulting development of very early high strength cement. *Journal of Materials Education*, 16(2&3):91-139
- Dafalla, M., and Mahmoud, M., 2012. Study of the mineralogical changes of clay due to cement and lime addition using X-ray diffraction technique. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 4(19):3746-3754
- Diannopoulou I., Dimas D., Maragos I., Panias D., 2009 "Utilization of metallurgical solid byproducts for the development of inorganic polymeric construction materials", *Journal Global Nest*, 11:127-136.
- Evstatiev, D. 1988. Loess Improvement Methods. *Journal of Engineering Geology*, 25:341-366
- El Howayek, A., Huang, P., Santaga, M., 2011. Identification and behavior of collapsible soils, Joint transportation research program technical report series, SPR-3109 Report Number: FHWA/IN/JTRP-2011/12. DOI: 10.5703/1288284314625.
- Feda, J., 1988. Collapse of loess upon wetting. *Engineering Geology*, 25: 263-269.
- Futai, M.M., Admeida, M. 2002, Collapsible soil: a Theoretical and Experimental Study, *EJGE Paper* 0218.
- Hosseini, S.E., Alizadeh, M.K., Mesbah, A. 2012. Evaluation of Shear Strength Parameters of Amended Loess through Using Common Admixtures in Gorgan, Iran. In: 7th Asian Rock Mechanics Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Hardjito, D., Rangan, B.V., 2005. Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, in *Research Report 1*. Curtin University of Technology, Australia. p. 1-94.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1978. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15:99-103
- Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T., 1999. Alkali-Activated Fly Ashes, a Cement for the Future. *Cem. Concr. Res.*, *Cement and Concrete Research* 29: 1323-1329.
- Reznic, Y. M., 1993. Plate Load Test on Collapsible Soils. *J. Geotech Eng. (ASCE)*, 119(3) PP: 608-615.
- Swan, C.C., 2005. Foundations on Weak and Compressible Soils, Supplemental Notes: Foundations on Weak and Compressible Soils, 53:139 Foundations of Structures.
- Singhi, B., Laskar, A.I., Ahmed, M.A., 2016. Investigation on Soil-Geopolymer with Slag, Fly Ash and Their Blending. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(2): 393-400.

- 
- Van Deventer, J., Lukey, G., Xu, H., 2006. Effect of Curing Temperature and Silicate “Concentration on Fly-Ash-Based Geopolymerization”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45:2917-2933
- White, D., Harrington, D., Thomas, Z., 2005. Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils. Volume I: Engineering properties and construction guidelines. Rep. IHRB Project TR-461, Iowa Highway Research Board, Iowa Dept. of Transportation, Ames, IA.
- Yaolin, Y., Liu, C., Liu, S. 2014. Alkali-Activated Ground-Granulated Blast Furnace Slag for Stabilization of Marine Soft Clay. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 27 (4):1-8
- Zhang, M., Guo, H. El-Korchi, T., Zhang, G. Tao, M., 2013. Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Construction and Building Materials*.47: 1468-1478.