

بررسی تاثیر پرلیت بر خصوصیات ژئوتکنیکی لای با کاربرد

روش ژئوپلیمریزاسیون

آیلار حسنیه^۱، روزبه دبیری^{۲*}، علیرضا علیزاده مجدی^۳، الناز صباغ تازه^۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶

چکیده

خاک لای که دارای سدیم است زمانیکه تحت تاثیر آب قرار بگیرد می تواند دچار نشست و تغییر شکل گردد. باتوجه به اینکه بخش وسیعی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت تبریز را خاکهای ریزدانه شور سدیمی و بویژه لای فرا گرفته است، هدف اصلی از تحقیق حاضر، بررسی رسوبات بستردریاچه به منظور جلوگیری از فرسایش آنها و امکان تثبیت خاک شور سدیمی موجود در منطقه به کمک فرآیند ژئوپلیمریزاسیون است. بدین منظور، پرلیت که دارای خاصیت پوزولانی بوده با درصدهای وزنی ۳، ۵ و ۷ بطور جداگانه به همراه محلول هیدروکسید کلسیم بعنوان کاتالیزور با درصد ۲، ۵ و ۷ با لای شور مخلوط گردیده و سپس نمونه ها به مدت یک روز عمل آوری شدند. جهت ارزیابی رفتار خاک تثبیت شده آزمون های تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک محوری، برش مستقیم و تحکیم انجام گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهد، پرلیت بصورت مناسب توانسته خصوصیات رفتاری خاک را اصلاح نماید. بطوریکه ترکیب ۳ درصد پرلیت به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم مقاومت فشاری تک محوری در لحظه گسیختگی را ۴/۳ برابر و مخلوط ۳ درصد پرلیت به همراه ۵ درصد هیدروکسید کلسیم میزان تورم خاک تثبیت شده را ۸۲ درصد کاهش دهد.

کلید واژه ها: لای، پرلیت، تثبیت، ژئوپلیمریزاسیون، تحکیم.

۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

۲ دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

۳ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

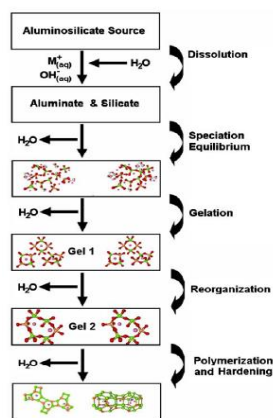
۴ استادیار، گروه علوم خاک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

Baradaran et al., 2023; Baradaran et al., 2024a; Baradaran et al., 2024b; Tareghian et al., 2024;) اشاره نمود.

یکی دیگر از این رویکردها، روش ژئوپلیمریزاسیون می‌باشد که به عنوان نسل سوم روشهای برپایه واکنش سیمانی شدن (پوزولان) بعد از آهک و سیمان معرفی نمود (Li et al., 2010). ژئوپلیمرها پیوندهای فعال شده بازی با کلسیم پایین و غلظت آلومینیم متوسط تا بالا می‌باشند که از واکنش بین محلول هیدروکسید و مصالح حاوی آلومینا سیلیکات تولید می‌شوند (Provis et al., 2009; Yung et al., 2016). استفاده از سیمانهای آلومینا سیلیکاتی فعال شده بازی در دهه‌های اخیر بعلاوت مقاومت و کارایی بالا و مقبولیت محیط زیستی، مورد توجه صنایع قرار گرفته است (Davitovits, 1991). مصالح دارای آلومینات و سیلیکات بالا همچون کائولین (Buchwald and Kaps, 2002) و خاکستر بادی (Davitovits, 1999) بعنوان منابع تأمین کننده ترکیبات مذکور در فرایند ژئوپلیمریزاسیون می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. اگرچه استفاده از روش مذکور در صنایع ساختمانی نظیر سرامیک و کاشی و همچنین تولید بتن تا حدودی رواج یافته است ولی استفاده از این تکنیک در مهندسی ژئوتکنیک بسیار نوپا بوده و نیاز به مطالعات گسترده‌تر دارد (Phetchuay et al., 2016). مکانیزم ساده سازی شده ژئوپلیمریزاسیون در شکل (۱) مشاهده می‌گردد.



شکل ۱. مدل مفهومی ژئوپلیمریزاسیون (Li et al., 2010).

دریاچه ارومیه یکی از بزرگترین دریاچه‌های شور دنیا است که در شمال غرب ایران واقع شده و به دلیل عوامل مختلفی مانند تغییرات اقلیمی، افزایش برداشت آب از منابع سطحی و زیر سطحی، ساخت سدها و تغییرات کاربری زمین، باعث کاهش شدید حجم آب شده و این کاهندگی سبب بوجود آمدن مشکلات زیست محیطی و اقتصادی گردیده و از مساحت دریاچه (نزدیک به ۸۵٪ و در حدود ۵۰۰۰ کیلومترمربع) خشک شده و رسوبات نمکی برجای گذاشته است (لک و درویشی، ۱۳۹۵). یکی از انواع آثار آسیب‌های زیست محیطی ایجاد شده، تولید و انتشار ریزگردهایی حاوی ذرات نمک و مواد معدنی با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون است که در اثر وزش باد می‌تواند زندگی ساکنین مناطقی محدوده شعاع ۵۰۰ کیلومتر اطراف دریاچه را تحت تأثیر قرار دهد (گزارش ستاد احیای دریاچه ارومیه، ۱۳۹۴). این ریزگردها در اثر فرسایش باعث تشکیل خاک‌های ریزدانه شور سدیمی در منطقه دشت تبریز شده است. خاکهای شور سدیمی بدلائل ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی که دارند یک نوعی از خاک- های مساله‌دار می‌باشد و می‌تواند مشکلات فراوانی در پروژه- های عمرانی همچون نشست (انقباض)، تورم، خوردگی بتن و ملیگردها بوجود آورد. همچنین، ریزگردهای نمکی ناشی از توسعه کانون‌های تولید ریزگرد در دریاچه ارومیه و مناطق شوره‌زار مجاور آن، خطر جدی برای سلامتی انسان محسوب می‌شود (اصغری زمانی، ۱۳۹۲؛ تجربی، ۱۳۹۵). بنابراین، بررسی امکان تثبیت رسوبات بستر دریاچه به منظور جلوگیری از فرسایش آنها به کمک فرآیند ژئوپلیمریزاسیون از اهداف اصلی تحقیق حاضر می‌باشد. در حالت کلی روش‌های تثبیت و بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک به دو روش مکانیکی (با استفاده از روش‌های تراکمی) و شیمیایی (براساس واکنش‌های شیمیایی بین ماده افزوده شده و خاک) انجام می‌گیرد. امروزه محققین در روش شیمیایی تثبیت خاک بدنبال راهکارهای دوستدار محیط زیست می‌باشند که در این مورد می‌توان به مطالعات صورت گرفته (Yazdi et al., 2023;)

ساحلی تثبیت شده با آهک- خاکستر مانند نسبت آهک - خاکستر پرداختند. ایشان مشاهده نمودند نسبت آهک- خاکستر و درصد آهک فاکتور کلیدی تاثیر گذار در مقاومت فشاری تک محوری خاک شور ساحلی است. بینجی (Binici, 2013) در مطالعات خود پوزولان‌های مختلف را با سدیم هیدروکسید ترکیب نمود تا سیمان ژئوپلیمری را جهت کاربردهای مهندسی تولید نماید. او در تحقیقات خود از سرباره، خاکستر بادی و پومیس استفاده نمود. تحقیقات وی نشان داد در همه پوزولان‌ها با افزایش دما مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها بالا می‌رود. ژنگ و همکاران (Zhang et al., 2014) امکان استفاده از متاکائولن و ژئوپلیمر به عنوان تثبیت کننده خاک شور در اعماق سطحی را ارزیابی نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر خیلی بیشتر از نمونه خاک رس خالص بدست آمده است مائو و همکاران (Miao et al., 2017) رفتار خاک سیاه بسیار متورم شونده تثبیت شده با محلول‌های قلیایی هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم و خاکستر آتشفشانی را مطالعه نمودند. ایشان دریافتند اثر تثبیت کنندگی هیدروکسید پتاسیم نسبت به هیدروکسید کلسیم بیشتر بوده و درصد تورم در نمونه‌های مخلوط کاهش می‌یابد. دیبامهر و همکاران (۱۴۰۲) جهت تثبیت خاک مارن سبز شهر تبریز از روش ژئوپلیمریزاسیون با کاربرد ژئولیت و متارس به عنوان فعال کننده استفاده نمود. ایشان دریافتند مکانیسم ژئوپلیمریزاسیون تاثیر مناسب در اصلاح مشخصات مقاومتی خاک رسی کربناته دارد. از سوی دیگر، پرلیت یک نوع سنگ آتشفشانی سبک و دارای خاصیت پوزولانی است و با توجه به ساختار فیزیکی و شیمیایی آن می‌تواند آب را جذب نماید. پرلیت عموماً حاوی عناصر سیلیس (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) است که برای شروع فرایند ژئوپلیمریزاسیون مناسب می‌باشد. در زمینه کارد پرلیت در تثبیت خاک ریزدانه مطالعات مختلفی انجام گرفته است. بطوریکه چالیک و شاد اوغلو (Calik and Şadoğlu, 2014) مشاهده کردند، پرلیت و آهک می‌توانند خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس را بهبود

براساس فرآیند شکل (۱)، مراحل تشکیل ژئوپلیمر را می‌توان بدین صورت بیان نمود، ابتدا منبع آلومینوسیلیکات با کمک فعال کننده بازی در آب حل شده و محلول حاوی آلومینات و سیلیکات تشکیل می‌گردد، در ادامه، محلول ژل مانند الیگومرها با گذشت زمان تشکیل شده و غلظت محیط بعلت ترکیب آب و پیوستن به ژل الیگومرهای تشکیل شده یک محیط دو فازی بوجود می‌آورد. در انتها، جابجایی مولکولی و افزایش تعداد پیوند دهنده‌های بین شبکه‌های ژلی یک ساختار سه بعدی آلومینوسیلیکاتی ایجاد می‌نماید تا فرایند ژئوپلیمریزاسیون تکمیل گردد. با توجه به مکانیزم توضیح داده شده، جهت ایجاد فرایند ژئوپلیمریزاسیون نیاز به موادی است که دارای مقادیر مشخصی از آلومیناتها و سیلیکاتها باشند. در تحقیقات پیشین انواع مختلفی از این مواد جهت فعال سازی بازی مطرح شده است و بیشترین میزان مطالعات در این خصوص مربوط به خاکستر بادی بوده است (Ambroise et al., 1985; Caldaron and Burg, 1994; Davitovits, 1999; Wan et al., 2004; Lee and Stebins, 2006; Daxson and Provis, 2008; Li et al., 2010; Heshmat abad et al., 2023; Pargar et al., 2024; Rezaeian Niri et al., 2024). این وجود استفاده از متاکائولین (دیبامهر و همکاران، ۱۴۰۲)، گرد کوره، سرباره کوره فولاد (Tutunchi et al., 2021)، پومیس (حسینیه و همکاران، ۱۴۰۱) و پرلیت نیز به عنوان منبع آلومینوسیلیکات در تحقیقات مختلف مورد بررسی واقع شده‌اند.

در زمینه کاربرد روش‌های بر پایه ژئوپلیمریزاسیون برای تثبیت و بهسازی خاکهای ریزدانه رس و لای شور مطالعات مختصری صورت گرفته است. ضیایی مویید و هراتیان تحقیقی در زمینه بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک شور و ماسه سیلتی در امتداد جاده هشتگرد- طالقان با کاربرد آهک و ترکیبی از آهک و میکرو سیلیکا با اندازه های ۰ تا ۶٪ انجام دادند. نتایج نشان داد افزودن ۲٪ آهک و ۳٪ میکرو سیلیکا به طور چشمگیری عملکرد خاک شور را بهبود می‌بخشد (ضیایی و هراتیان، ۱۳۸۹). کین و همکاران (Qin et al., 2008) به بررسی فاکتورهای اثرگذار بر مقاومت فشاری تک محوری خاک شور

همانطور که ذکر شده است، هدف از تحقیق حاضر بررسی امکان تثبیت لای شور سدیمی منطقه دشت تبریز با استفاده پرلیت به کمک روش ژئوپلیمریزاسیون است. خاک مورد مطالعه از منطقه مایان شهر تبریز تهیه شده که موقعیت اخذ نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است. پرلیت که منشأ آتشفشانی دارد و بصورت فراوان در منطقه آذربایجان یافت می‌شود از معادن موجود در منطقه توپ قره شهرستان میانه در استان آذربایجان شرقی تهیه گردیده که در شکل (۳) می‌توان محل معدن را مشاهده نمود. تصاویر مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر در شکل (۴) و خصوصیات شیمیایی آنها در جدول (۱) ارائه شده است. منحنی دانه بندی مصالح مورد مطالعه و پرلیت براساس استانداردهای ASTM D421-85 و ASTM D422-63 تعیین گردیده و در شکل (۵) دیده می‌شود. مطابق با سیستم طبقه بندی متحد خاکها، لای مورد مطالعه از نوع (ML) بوده و خصوصیات خمیری آن طبق استاندارد ASTM D4318-95a و چگالی ویژه آن و پرلیت با استفاده استاندارد ASTM D854-2002 اندازه گیری گردیده که نتایج آن در جدول (۲) قابل مشاهده است. به منظور تعیین میزان سدیم و شوری لای مورد مطالعه از شاخص (SAR=Sodium Absorption Ratio) استفاده شده است. شاخص SAR بعنوان یک معیار موثر در ارزیابی خطر بالقوه سدیم در محلول در حال تعادل با فاز جامد خاک می‌باشد. مقدار شاخص SAR طبق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، غلظت‌های کلسیم، منیزیم و سدیم برحسب میلی اکی والان گرم بر لیتر است. طبق این معیار، در صورتیکه میزان SAR اندازه گیری شده از عدد ۱۳ بزرگتر باشد در آن صورت، خاک شور و سدیمی می‌باشد. همانگونه که در جدول (۳) نشان داده شده شاخص SAR لای مورد مطالعه برابر با ۲۱/۳۸ است که بیان کننده سدیمی و شور بودن آن است. آزمایش در ادامه، آزمایش طیف سنجی فلورسانس پرتوی ایکس (XRF) بر روی لای انجام گرفته و همانطور که

دهند. زمانی که ۳۰ درصد پرلیت به همراه ۸ درصد آهک مخلوط می‌شود می‌تواند خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس را بهبود ببخشد. همچنین یلماز و فیدان (Yılmaz and Fidan, 2018) در تحقیقات خود مشاهده نمودند افزودن پرلیت و آهک می‌تواند مقاومت فشاری تک محوری خاک رس را افزایش دهد و افت وزنی ناشی از شرایط ذوب و یخبندان را کاهش دهد. گونری و یوکسلن آکسوی (Güneri and Yukselen-Aksoy, 2021). نیز در تحقیقات خودشان دریافتند افزودن پرلیت باعث کاهش وزن واحد خشک و افزایش زاویه اصطکاک داخلی در مخلوط ماسه-بتونیت شده است. همچنین، زاویه اصطکاک داخلی با دما برای خاک‌های عمل آوری شده با پرلیت افزایش می‌یابد

پانیچ و همکاران (Panich et al., 2022) تاثیر ذرات پرلیت را بر روی خاک رس نرم شور مطالعه نمودند. ایشان ذرات پرلیت را درصدهای وزنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد با مدت زمان عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز با خاک رس مخلوط نمودند. تحقیقات ایشان نشان داد افزودن ۴۰ درصد پرلیت به خاک رس نرم شور با مدت زمان عمل آوری ۷ روزه می‌تواند توانایی باربری خاک تثبیت شده را بهبود ببخشد و از آن جهت احداث لایه زیراساس استفاده نمود.

با مرور مطالعات صورت گرفته می‌توان دریافت تحقیقات اندکی در خصوص لای شور سدیمی و روش‌های تثبیت آنها (به ویژه با استفاده از روش ژئوپلیمری) با استفاده از پرلیت انجام یافته است. با توجه به اینکه خاک‌های دشت تبریز عمدتاً جزو خاک لای و شور بوده و منطقه آذربایجان غنی از ماده معدنی پرلیت حاوی ماده آلومیناسیلیکا می‌باشد، بنابراین، در تحقیق حاضر امکان کاربرد پرلیت به عنوان یک ماده تثبیت کننده انتخاب شده و تاثیر آن بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی لای شور سدیمی منطقه دشت تبریز مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲- مواد

پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) انجام گرفته بر روی پرلیت بیان کننده حضور عناصر آلومینیوم و سیلیس و ترکیب سیلیکات آلومینیوم (Al_2SiO_5) بصورت قابل توجه است.

در جدول (۴) مشاهده می شود لای خاک مورد مطالعه دارای عنصرهای سیلیس، کلسیم، آلومینیوم و سدیم است. در انتها، همانطور که در شکل (۶) دیده می شود، نتایج آزمایش طیف



شکل ۲. تصویر موقعیت نمونه تهیه شده خاک لای شور سدیمی.



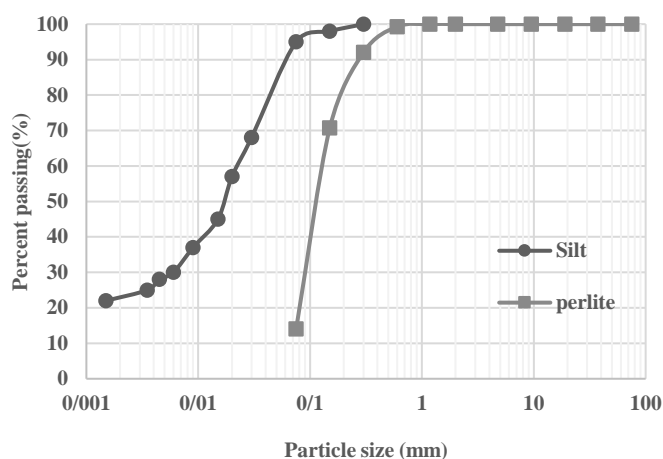
شکل ۳. تصویر موقعیت معدن پرلیت در منطقه توپ قره شهرستان میانه در استان آذربایجان شرقی.



شکل ۴. تصاویر مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر، الف- لای شور سدیمی، ب- پرلیت.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی پرلیت.

Properties	Percentes								
	TiO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Perlite	1.51	5.3	0.27	5.7	0.3	0.9	1.12	13.5	71.4



شکل ۵. منحنی دانه بندی لای و پرلیت مورد استفاده.

جدول ۲. ویژگی های ژئوتکنیکی لای و پرلیت مورد مطالعه.

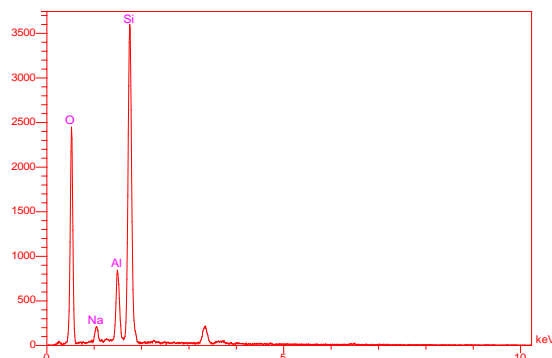
Material Properties	PI	Gs
Silt	7	2.71
Perlite	-	1.32

جدول ۳. نتایج شاخص SAR برای خاک لای مورد مطالعه.

Soil	Electrical conductivity (Ec.10 ³) Dsm/m	Saturated mud reaction (PH)	Sodium absorption ratio(SAR)	Soluble cations (meg/l)		
				Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Na ⁺
Silt	6.7	8.06	21.38	5	8	54.5

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمایش XRF بر روی لای مورد مطالعه.

Materials	percent	Materials	percent	Materials	percent
Si	38.3	Na	1.62	Cu	0.0347
Ca	24.4	Ti	1.36	Rb	0.0332
Fe	12.5	Mn	0.263	Zn	0.0212
Al	6.63	P	0.227		
Mg	5.89	Sr	0.180		
K	4.35	S	0.173		
C	3.54	Zr	0.0632		



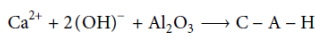
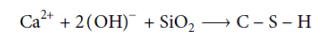
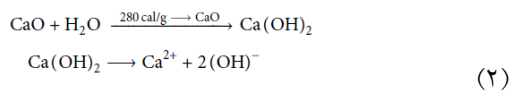
شکل ۶. نمودار حاصل از آزمون EDX بر روی پرلیت.

۲-۲- کارهای آزمایشگاهی

طبق استاندارد ASTM C618-22، هنگامیکه میزان مجموع مخلوط عناصر $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ نزدیک به ۷۰ درصد باشد رفتار پوزولانی یا سیمانی شدن مشاهده می‌شود. طبق جدول (۱) با توجه به اینکه مجموع عناصر مذکور در پرلیت دارای میزان بیش از ۷۰ درصد است، بنابراین پرلیت بصورت قابل توجه دارای این خاصیت است. از سوی دیگر، بمنظور اینکه بتوان روند واکنش شیمیایی بین پرلیت و لای را تسریع نمود و ژئوپلیمریزاسیون را بصورت مناسب انجام داد با در نظر گرفتن خصوصیات شیمیایی آن، از محلول هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 که با مقدار ۷۴ گرم در هر یک لیتر آب مخلوط می‌گردد به عنوان کاتالیزور استفاده شده است که طبق مطالعات (Davitovits, 1991)، واکنش سیمانی شدن را می‌توان مرحله دوم تثبیت خاک در نظر گرفت، زیرا این واکنش از نوع واکنش‌های درازمدت است. پیش نیاز لازم جهت فعال شدن مواد سیمانی اضافه شده به محیط، حل شدن سیلیکا و آلومینای خاک است. اگر pH محیط بالا باشد به حل شدن سیلیکا و آلومینای خاک رس و انجام واکنش سیمانی شدن کمک می‌کند. عامل دیگری که به حل شدن این مواد کمک می‌کند، درجه کریستالی کانی‌ها و اندازه ذرات است. شرط اصلی این پدیده آن است که یون کلسیم با سیلیکا و آلومینای خاک لای تشکیل شبکه‌ای از مواد سیمانی مانند C-S-H و C-A-H بدهند که در آن $\text{H} = \text{H}_2\text{O}$ و $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$ هنگامی که خاک رس از آلومینا غنی است، ژل ایجاد شده حاوی $\text{C} = \text{CaO}$ و

$\text{S} = \text{SiO}_2$ بوده و C-S-H تشکیل می‌شود و در کمبود

آلومینا فقط ژل C-A-S-H شکل می‌گیرد. واکنش سیمانی شدن می‌تواند نشست و تغییر شکل خاک در اثر جذب آب را کاهش دهد. همچنین، این واکنش می‌تواند، ذرات بخش ریزدانه خاک را به یکدیگر چسبانده و ذرات درشت دانه‌تر تشکیل دهد. این فرآیند، در واکنش‌های شیمیایی زیر قابل مشاهده است (Hayder et al., 2020):



مقدار محلول کاتالیزور براساس سعی و خطا برآورد گردیده و به میزان ۲، ۵ و ۷ درصد وزنی برای نمونه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. با مرور مطالعات گذشته مشاهده شده است راستای تثبیت و بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لای شور سدیمی دشت تبریز از پرلیت با روش ژئوپلیمریزاسیون تاکنون استفاده نشده است بنابراین، مقدار پرلیت برای تحقیق حاضر ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی انتخاب شده و با لای مخلوط شده است. بمنظور آماده سازی نمونه‌های مخلوط یکنواخت و همگن جهت ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی از استاندارد ASTM C305-14 استفاده شد. در این فرآیند، ابتدا هیدروکسید کلسیم به همراه آب (با توجه به رطوبت بهینه) به لای اضافه گردید. سپس در داخل میکسر (مخلوط کن) مخلوط شدند تا چسبندگی مناسب بین مصالح افزوده شده و خاک بوجود آید. طبق استاندارد، ۳۰

سدیمی، آزمون مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166-16، آزمایش برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080-11 برای نمونه های با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتیمتر مربع بصورت کنترل کرنش تحت اثر بارهای قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال با سرعت بارگذاری ۰/۰۵ میلیمتر بر دقیقه صورت پذیرفت. در انتها، بمنظور بررسی تاثیر مواد افزوده شده بر روی میزان نشست تحکیمی و پتانسیل تومی لای بهسازی شده آزمون تحکیم طبق استاندارد ASTM D2435-11 صورت پذیرفت. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه های مورد مطالعه طبق جدول (۵) قابل مشاهده می باشد. لازم به یادآوری است، تعداد ۲۵ درصد آزمایش ها به منظور تدقیق نتایج تکرار شده اند.

جدول ۵. برنامه آزمون های صورت گرفته بر روی نمونه های مورد مطالعه در تحقیق حاضر.

Tests				Geopolymer	Materials	Test Program		
Consolidation	Direct shear	Uniaxial strength	Compaction	2%, 5% , 7%	Perlite (%)	Soil Matrix	نام نمونه	No
*	*	*	*	*	0	Saline	S-0PU	1
*	*	*	*	*	3	Saline	S-3PE	2
*	*	*	*	*	5	Saline	S-5PE	3
*	*	*	*	*	7	Saline	S-7PE	4

حدودی روند صعودی طی نموده است. از سوی دیگر، با مشاهده نتایج نمونه های دیگر می توان ادعان نمود بالا رفتن مقادیر پرلیت همراه با هیدروکسید کلسیم تاثیر مناسبی در مقادیر γ_{dmax} نداشته و مقدار آن را کاسته است. زیرا پرلیت از نظر ذاتی ماده ای سبک و متخلخل بوده و با بالا رفتن میزان آن در خاک لای تاثیر مثبتی نداشته و باعث کاهش مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر گردیده است. در شکل (۷-ب) می توان تاثیر پرلیت به همراه $Ca(OH)_2$ را بر روی میزان رطوبت بهینه نمونه ها پس از یک روز عمل آوری مشاهده نمود. نتایج بدست آمده نمایش می دهد در نمونه های خاک مخلوط شده با ۳ درصد پرلیت به همراه ۷ درصد محلول هیدروکسید کلسیم، میزان رطوبت بهینه به مقدار تقریبی ۱۵/۸ درصد افت نموده است. این روند ناشی از واکنش سیمانی شدن و تغییر در ساختار و بافت خاک و تشکیل استخوان بندی قوی است که سبب شده تا میزان جذب آب در خاک

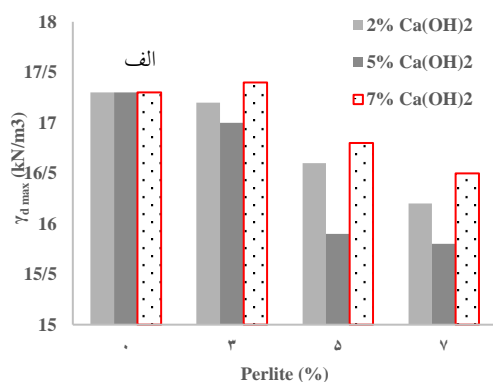
ثانیه عملیات مخلوط متوقف شده تا مصالح رطوبت را به همراه هیدروکسید کلسیم جذب نمایند. در ادامه، پرلیت به آرامی به نمونه مخلوط اضافه شد. عملیات مخلوط کردن نمونه ها به مدت ۳۰ ثانیه با دور کند، ۱۵ ثانیه تمیزکاری و ۶۰ ثانیه با دور متوسط انجام گرفت. با توجه به اینکه در ساخت نمونه ها از محلول هیدروکسید کلسیم به عنوان تسریع کننده واکنش استفاده شد، پس از اتمام عملیات اختلاط، نمونه ها به مدت یک روز در ظرف پلاستیکی سر بسته در شرایط دمای محیطی نگهداری کرده تا فرایند عمل آوری انجام پذیرد. برای نیل به اهداف تحقیق حاضر، در مرحله اول، آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698-2000 انجام گرفت. سپس بمنظور تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی لای شور

۳- نتایج و بحث

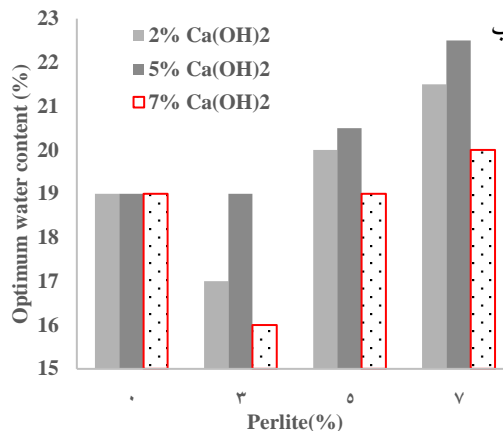
۳-۱- آزمایش تراکم

نتایج حاصل از آزمایش تراکم بر روی نمونه های لای شور سدیمی حاوی پرلیت در شکل (۷-الف و ب) ارائه شده است. در شکل (۷-الف) دیده می شود، با افزودن ۳ درصد پرلیت به همراه ۷ درصد محلول هیدروکسید کلسیم به لای، پس از یک روز عمل آوری میزان درصد رشد وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) نمونه خاک تثبیت شده ۰/۶٪ می باشد. با توجه به اینکه مجموع مواد آلمین دار و سیلیس دار در پرلیت هنگامیکه هیدروکسید کلسیم به خاک حاوی پرلیت افزوده می شود سبب تسریع در واکنش سیمانی شدن گردیده و مواد سیمانی ناشی از کربنات کلسیم ($CaCO_3$) و سیلیکات سدیم بدلیل وجود عنصر سدیم در لای بوجود می آورد. بنابراین پرلیت یک استخوان بندی قوی را بین بافت تازه تشکیل یافته بوجود آورده و فضای خالی بین آنها را بخاطر مواد سیمانی کاهش داده و سرانجام وزن مخصوص خشک حداکثر تا

است، با بالا رفتن مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها، نرخ افزایش γ_{dmax} روند صعودی‌تری را طی نماید و از مقدار رطوبت بهینه کاسته شود.



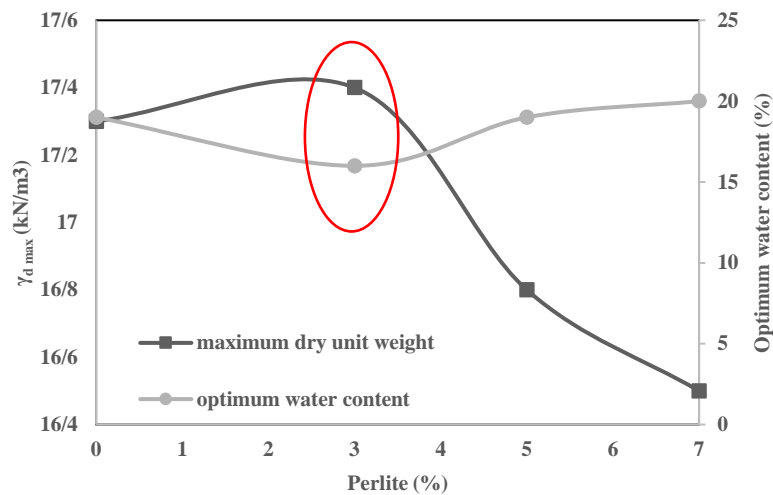
تثبیت شده کاهش یابد. از طرفی، خاصیت جذب بالای آب توسط پرلیت و سبک بودن آن به همراه تخلخل زیاد باعث شده است با افزایش مقدار آن در نمونه‌ها رطوبت بهینه افزایش یافته و ساختار و بافت خاک بهسازی شده سست بوجود آید. نتیجه بدست آمده با مطالعات صورت گرفته توسط (Calik and sadoglu, 2014) همخوانی دارد. بدیهی



شکل ۷. تاثیر پرلیت بر روی نتایج حاصل از آزمایش تراکم نمونه‌های مورد مطالعه، الف- وزن مخصوص خشک حداکثر، ب- رطوبت بهینه.

ساختار جدید پایدار ناشی از واکنش سیمانی شدن، وزن مخصوص خشک حداکثر با مقدار بالایی را ارائه نماید. این فرایند بیان کننده آن است که از این ترکیب می‌توان برای احداث لایه‌های روسازی راه و همچنین تثبیت خاک‌های زیر پی بهره برد.

همچنین، در نمودار شکل (۸) ارتباط بین سه پارامتر میزان پرلیت، رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر برای ترکیب ۳٪ پرلیت به همراه ۷٪ هیدروکسید کلسیم بعد از یک روز عمل آوری برای خاک تثبیت شده قابل مشاهده است. با توجه به نمودارها می‌توان بیان نمود مخلوط ذکر شده توانسته است فضای خالی بین ذرات را به حداقل برساند و با بالا رفتن میزان تماس بین ذرات همزمان با تشکیل شدن یک



شکل ۸. تاثیر ترکیب شیمیایی ۳٪ پرلیت به همراه ۷٪ هیدروکسید کلسیم بر روی نتایج حاصل آزمایش تراکم.

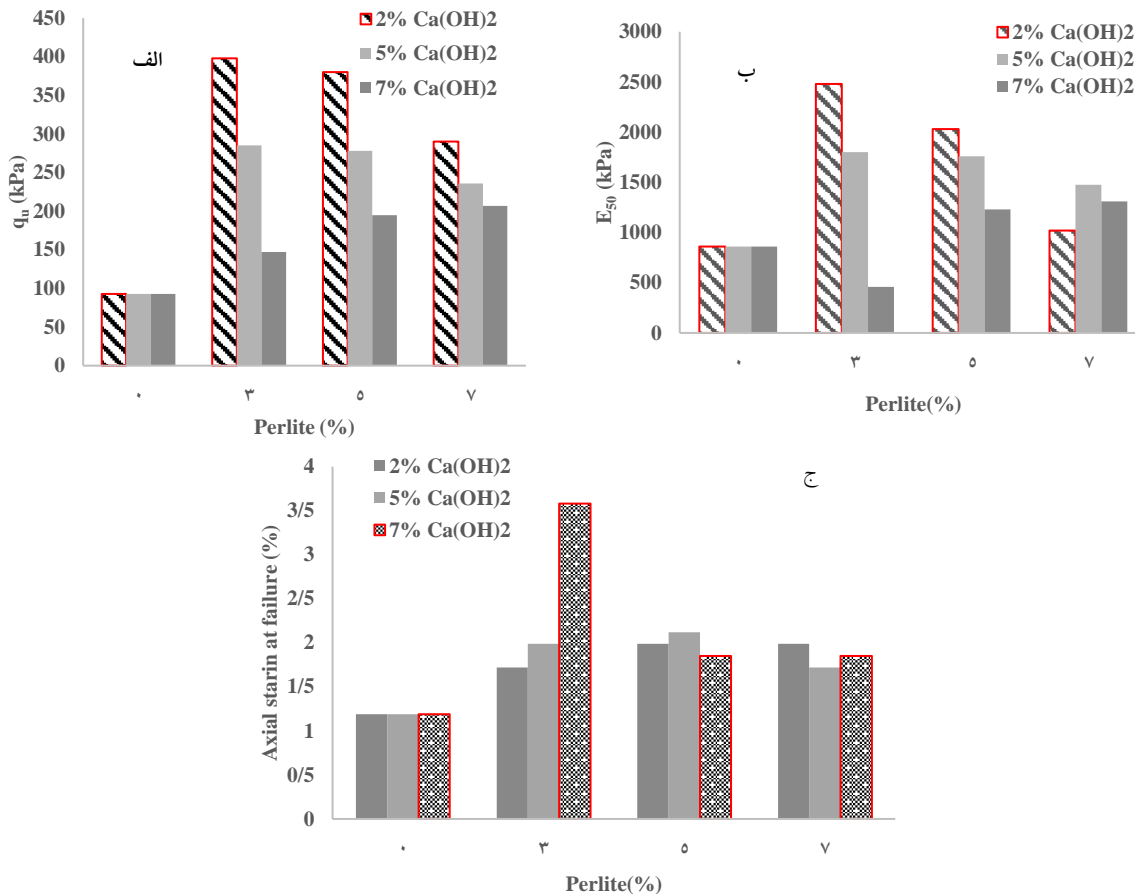
خاک تثبیت شده سبب تسریع در واکنش سیمانی گردیده است. همچنین، تشکیل سیلیکات سدیم بدلیل حضور سدیم در خاک بهسازی شده به همراه کربنات کلسیم استخوان بندی جدید و قوی را بوجود آورده که خروجی آن افزایش قابل توجه توانایی باربری است. در ادامه، بمنظور بررسی تاثیر پرلیت بر روی میزان شکل پذیری نمونه‌ها، با استفاده از منحنی تنش-کرنش بدست آمده از آزمون مقاومت فشاری تک محوری، مدول تغییر شکل سکانت تعیین گردید. در شکل (۹-۹) مشاهده می‌گردد ترکیب ۳ درصد پرلیت به همراه ۲ درصد Ca(OH)_2 پس از یک روز عمل آوری، میزان درصد رشد مدول سکانت را در خاک مخلوط را ۱۸۸ درصد بالا برده است. نتیجه بدست آمده مطابق با مطالعات صورت گرفته توسط (Calik and Sadoglu, 2014) و (Paniche et al., 2022) می‌باشد. طبق شکل (۹-ج) می‌توان دریافت، حضور پرلیت باعث شده تا بر اندازه کرنش محوری در لحظه گسیختگی خاک لای بهسازی شده تاثیر بگذارد. بطوریکه، اضافه نمودن مخلوط ۳ درصد پرلیت به همراه ۷ درصد هیدروکسید کلسیم به لای درصد رشد کرنش محوری در لحظه گسیختگی را ۲۰۰٪ افزایش داده است. همچنین، شکل (۱۰)، ارتباط بین سه پارامتر میزان پرلیت، مدول سکانت و مقاومت فشاری تک محوری برای نمونه بهسازی شده با

۲-۳- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

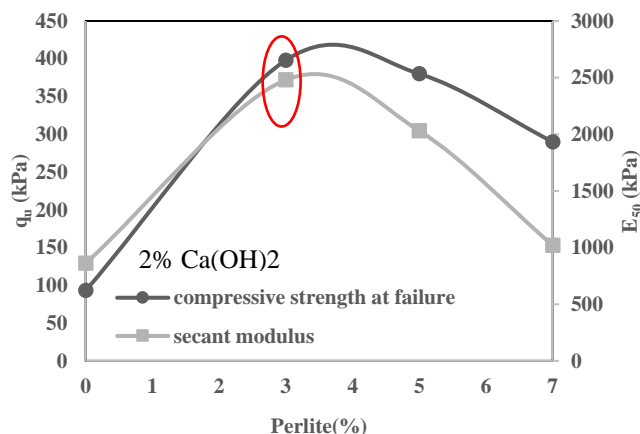
نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های لای که با مخلوط کردن پرلیت به همراه کاتالیزور هیدروکسید کلسیم تثبیت شده و یک روز عمل آوری صورت گرفته را می‌توان مشاهده نمود. در شکل (۹-الف، ب و ج) تاثیر درصدهای افزوده شده پرلیت بر روی تغییرات مقاومت فشاری تک محوری، مدول سکانت و کرنش محوری در لحظه گسیختگی نمونه‌ها ارائه شده است. در شکل (۹-الف) دیده می‌شود مخلوط ۳ درصد پرلیت به همراه تمام مقادیر هیدروکسید کلسیم، مقاومت فشاری تک محوری در مرحله گسیختگی را نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش داده است. اگرچه بیشترین میزان درصد رشد در نمونه شامل ۳ درصد پرلیت به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم مشاهده شده که توانایی باربری را به مقدار ۳۲۷٪ افزایشی کرده است. در ادامه، با بالا رفتن مقدار هیدروکسید کلسیم و حضور پرلیت در نمونه خاک توانایی باربری نسبت به حالت تثبیت نشده رشد داشته ولی نسبت به ترکیب ذکر شده کمتر است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اشاره کرد، بالا بودن درصد مواد آلومین دار و سیلیس دار پرلیت باعث شده تا پس از یک روز عمل آوری، واکنش سیمانی شدن مناسبی را بوجود آورد. البته، افزودن ۲ درصد هیدروکسیم کلسیم به

شدن بالاترین توانایی باربری به همراه مدول سکانت را برای لای شور سدیمی تثبیت شده ارائه نماید.

ترکیب ۳٪ پرلیت به همراه ۲٪ هیدروکسید کلسیم بعد از یک روز عمل آوری نشان می‌دهد. با توجه به نمودار می‌توان برشمرده مخلوط مذکور توانسته است بدلیل واکنش سیمانی



شکل ۹. تاثیر ترکیب پرلیت و هیدروکسید کلسیم بر روی نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های مورد مطالعه، الف- مقاومت فشاری تک محوری، ب- مدول سکانت، ج- کرنش محوری در لحظه گسیختگی.



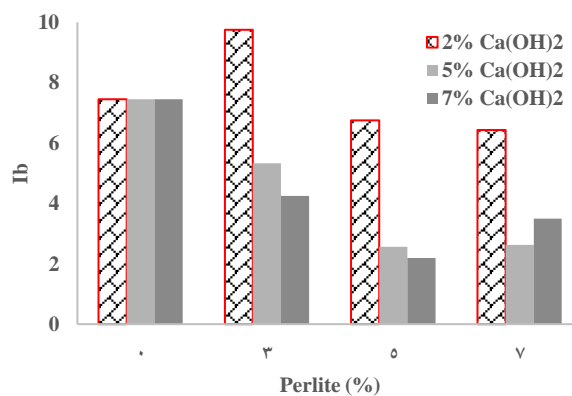
شکل ۱۰. تاثیر ترکیب شیمیایی ۳٪ پرلیت به همراه ۲٪ هیدروکسید کلسیم بر روی نتایج حاصل آزمایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه مورد مطالعه.

منحنی تنش-کرنش تعریف می‌شود. نحوه تعیین q_{res} بدین صورت است که اگر در منحنی تنش-کرنش، تنش در آنها بصورت آرام افزایش یابد و پس از رسیدن به نقطه اوج، یک روند نزولی آشکاری طی نماید، مقدار q_{res} ، حداقل مقدار تنش در انتهای منحنی تنش-کرنش انتخاب می‌شود. در صورتیکه، منحنی تنش-کرنش بگونه‌ای باشد که در آن تنش بصورت مدام و آنی افزایش می‌یابد، مقدار q_{res} معادل تنش مربوط به ۲۰٪ کرنش محوری، از روی منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری انتخاب می‌شود. تغییرات در I_b برای نمونه‌های تثبیت شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

بمنظور بررسی رفتار نمونه‌های تثبیت شده با ترکیب پرلیت به همراه هیدروکسید کلسیم از نقطه نظر رفتار مکانیکی، بعبارتی انعطاف پذیری یا ترد و شکنندگی، از معیاری تحت عنوان شاخص شکنندگی استفاده شده که توسط Consoli و همکاران (۱۹۹۸) پیشنهاد گردیده است:

$$I_b = \frac{q_{max}}{q_{res}} - 1 \quad (3)$$

که در آن I_b و q_{max} به ترتیب نشان دهنده شاخص شکنندگی و مقاومت فشاری تک محوری حداکثر نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشند. q_{res} مقاومت فشاری تک محوری باقیمانده در انتهای منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری است. همچنین، q_{max} به عنوان نقطه پیک



شکل ۱۱. تغییرات شاخص شکنندگی (I_b) در نمونه های حاوی پرلیت و مقادیر مختلف $Ca(OH)_2$.

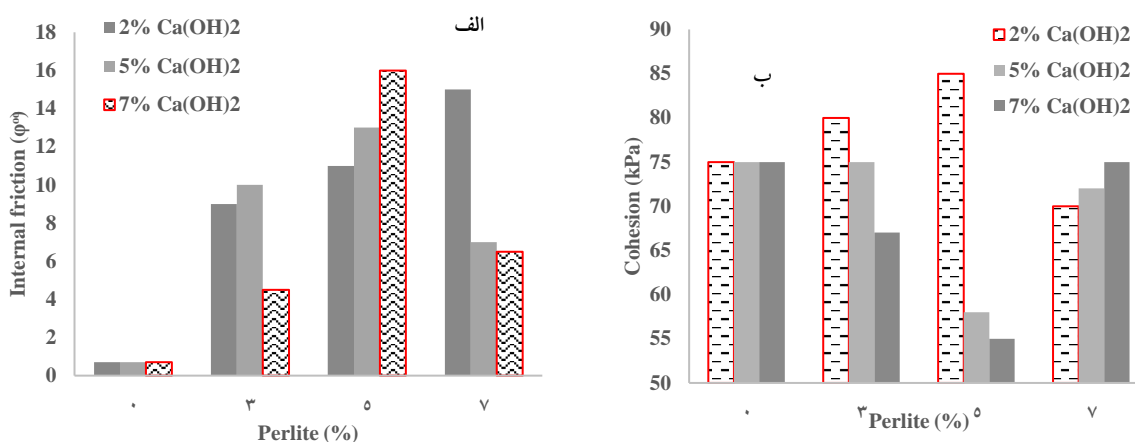
لحظه شکست و شاخص شکنندگی نمونه تثبیت شده با ۳٪ پرلیت و ۲٪ هیدروکسید کلسیم می‌توان اذعان نمود امکان کاربرد از ترکیب ذکر شده برای ساخت و اصلاح لایه‌های روسازی وجود داشته و برای خاک زیر پی به منظور جلوگیری از نشست و تغییر شکل کارایی دارد.

۳-۳- آزمایش برش مستقیم

بمنظور تعیین پارامترهای مقاومتی لای در مقابل تغییرشکل-های برشی و نشست‌های ناشی از آن، آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های بهسازی شده با پرلیت به همراه هیدروکسید کلسیم تحت اثر تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰

براساس شکل (۱۱) می‌توان اشاره نمود، عموماً افزودن ذرات پرلیت به همراه $Ca(OH)_2$ با در نظر گرفتن شرایط نمونه سازی در مطالعه حاضر باعث کاهش شاخص شکنندگی خاک بهبود یافته می‌شود. به عبارت دیگر افزایش درصد پرلیت در نمونه خاک باعث افزایش انعطاف پذیری آن می‌گردد. بعبارت دیگر، انعطاف پذیری خاک تثبیت شده با افزودن $Ca(OH)_2$ در مقایسه با شرایط بهبود نیافته افزایش می‌یابد. از طرفی، شاخص شکنندگی در نمونه با مخلوط ۳٪ پرلیت و ۲٪ هیدروکسید کلسیم افزایش یافته که بیان کننده رفتار ترد و صلب است. بنابراین، با توجه به مقادیر کرنش محوری در

سدیم و کربنات کلسیم استخوان بندی قوی را تشکیل می دهند. همچنین در شکل (۱۲-ب) تاثیر ذرات پرلیت را بر روی تغییرات چسبندگی نمونه های بهسازی شده پس از یک روز عمل آوری مشاهده می شود. با توجه به نمودارها می توان بیان نمود میزان درصد رشد پارامتر چسبندگی در اثر مخلوط ۵ درصد پرلیت به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم با خاک مورد مطالعه برابر با ۱۳/۳ درصد است. بنابراین مشابه با زاویه اصطکاک داخلی، واکنش سیمانی شدن ناشی از افزودن پرلیت همراه با هیدروکسید کلسیم سبب چسبندگی بهتر در ساختار تازه تشکیل یافته در خاک بهسازی شده گردیده است. نتایج بدست آمده هم راستا با تحقیقات انجام یافته توسط (Yilmaz and Fidan, 2018) و (Panich et al., 2022) می باشد.



شکل ۱۲. تاثیر ترکیب پرلیت و هیدروکسید کلسیم بر روی نتایج آزمون برش مستقیم نمونه های مورد مطالعه، الف- زاویه اصطکاک داخلی، ب- چسبندگی.

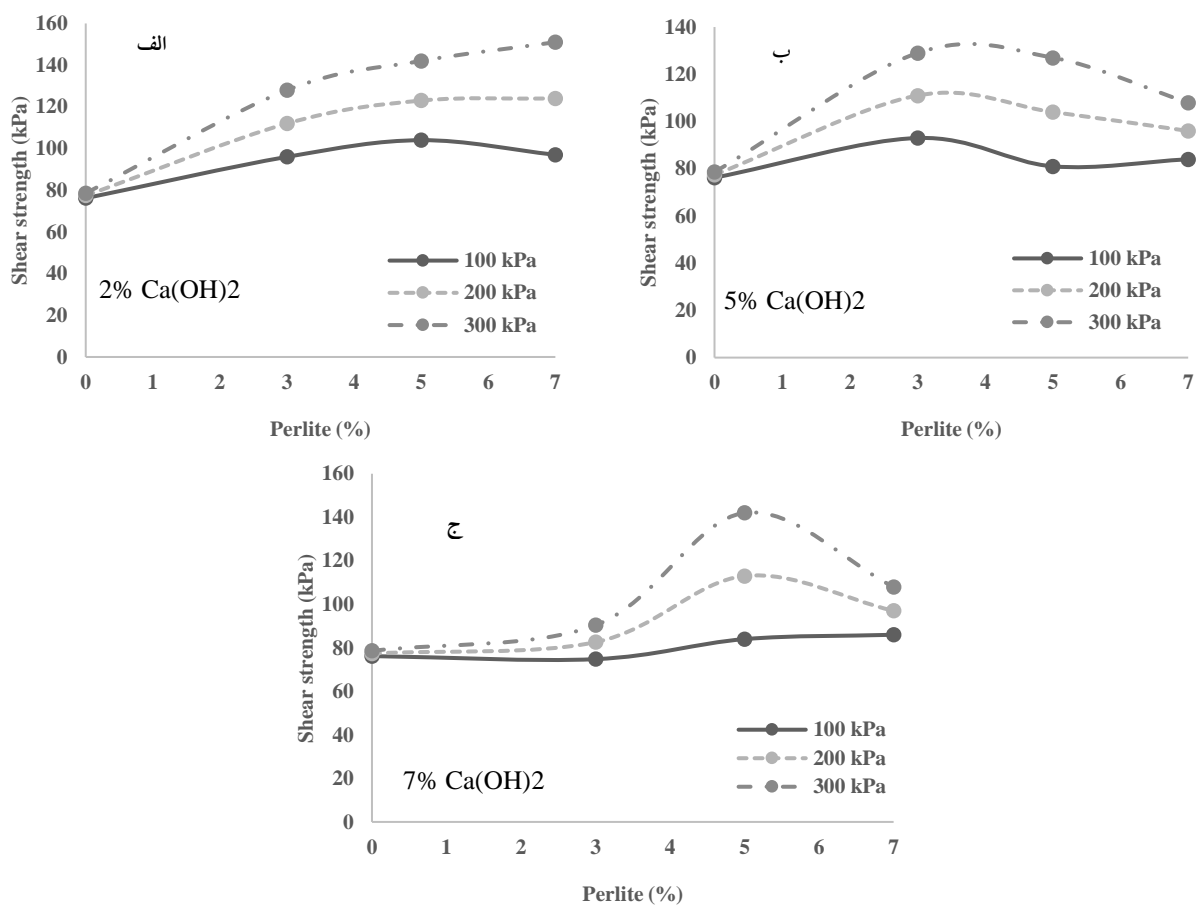
مخلوط شده اند. نتایج بدست آمده بیان کننده آنست ترکیب ۳ درصد پرلیت، میزان درصد رشد مقاومت برشی در تمامی بارها را بطور میانگین ۴۱ درصد افزایشی شده است. هنگامیکه ۷ درصد هیدروکسید کلسیم با پرلیت به لای افزوده می گردد، تغییرات بوجود آمده در مقاومت برشی در لحظه گسیختگی در شکل (۱۱-ج) نمایش داده شده است. در این حالت از ترکیب، رفتارهای متفاوت از پرلیت در خاک لای مشاهده گردیده است. بطوریکه، مخلوط کردن ۵ درصد پرلیت با خاک، در تمامی بارها میزان درصد مقاومت در لحظه گسیختگی را بطور میانگین ۴۴ درصد رشد داده ولی در ادامه

کیلوپاسکال انجام گرفت. میزان تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در نمودارهای شکل (۱۲-الف) نمایش داده شده است. همانطورکه مشاهده می شود خاک لای به دلیل کانی های میکا و شکل ورقه ای ذرات به تنهایی دارای زاویه اصطکاک داخلی بسیار پایینی است. با مد نظر قراردادن تغییرات می توان اشاره کرد، افزودن ۵ درصد پرلیت به همراه ۷ درصد هیدروکسید کلسیم به لای و بعد از یک روز عمل آوری باعث شده است تا زاویه اصطکاک داخلی نمونه تثبیت شده از زاویه ۰/۷ درجه به ۱۶ درجه افزایش یابد که بیان کننده بالا رفتن قابل توجه در اصطکاک بین ذرات تازه تشکیل یافته است. این فرآیند بدلیل واکنش سیمانی شدن ناشی مواد آلوئومین دار و سیلیس دار موجود در پرلیت است و مواد سیمانی ناشی از سیلیکات

در ادامه، تاثیر افزودنی پرلیت به همراه هیدروکسید کلسیم بر روی مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه های مطالعه شده ارزیابی شده است. در شکل (۱۳-الف) تاثیر مخلوط نمودن ۲ درصد هیدروکسید کلسیم با مقادیر مختلف پرلیت و افزودن آن به لای نشان داده شده است. با توجه به نمودارها می توان برشمرد، هنگامیکه ۵ درصد پرلیت به خاک اضافه می شود میزان درصد رشد مقاومت برشی تقریباً در تمامی بارگذاری ها بطور میانگین ۵۶ درصد بالا رفته است. در شکل (۱۳-ب) تغییرات مقاومت برشی نمونه های تثبیت شده را نشان می دهد که با ۵ درصد هیدروکسید کلسیم و پرلیت

و بارگذاری می‌تواند باشد. در مجموع می‌توان اذعان کرد، ساختار و بافت جدید تشکیل یافته ناشی از حضور پرلیت و هیدروکسید کلسیم و بوجود آمدن مواد سیمانی سیلیکات سدیم و کربنات کلسیم ناشی واکنش سیمانی شدن پس از یک روز عمل آوری استخوان بندی جدیدی را ایجاد نموده که باعث افزایش تماس و اصطکاک بین ذرات، چسبندگی و در انتها مقاومت برشی در لحظه گسیختگی شده است.

با افزایش مقدار پرلیت مقاومت برشی افت یافته است. بنابراین، با مشاهده نتایج کلی بدست آمده از آزمون برش مستقیم بنظر می‌رسد افزودن پرلیت به خاک لای باعث بهبود توانایی باربری شده است. اگرچه، در مقادیر تنش‌های قائم مختلف، ترکیبات مختلف از پرلیت و هیدروکسید کلسیم مقاومت برشی در خاک تثبیت شده اصلاح نموده که این شرایط ناشی از دست خوردگی نمونه‌ها در حین عمل آوری



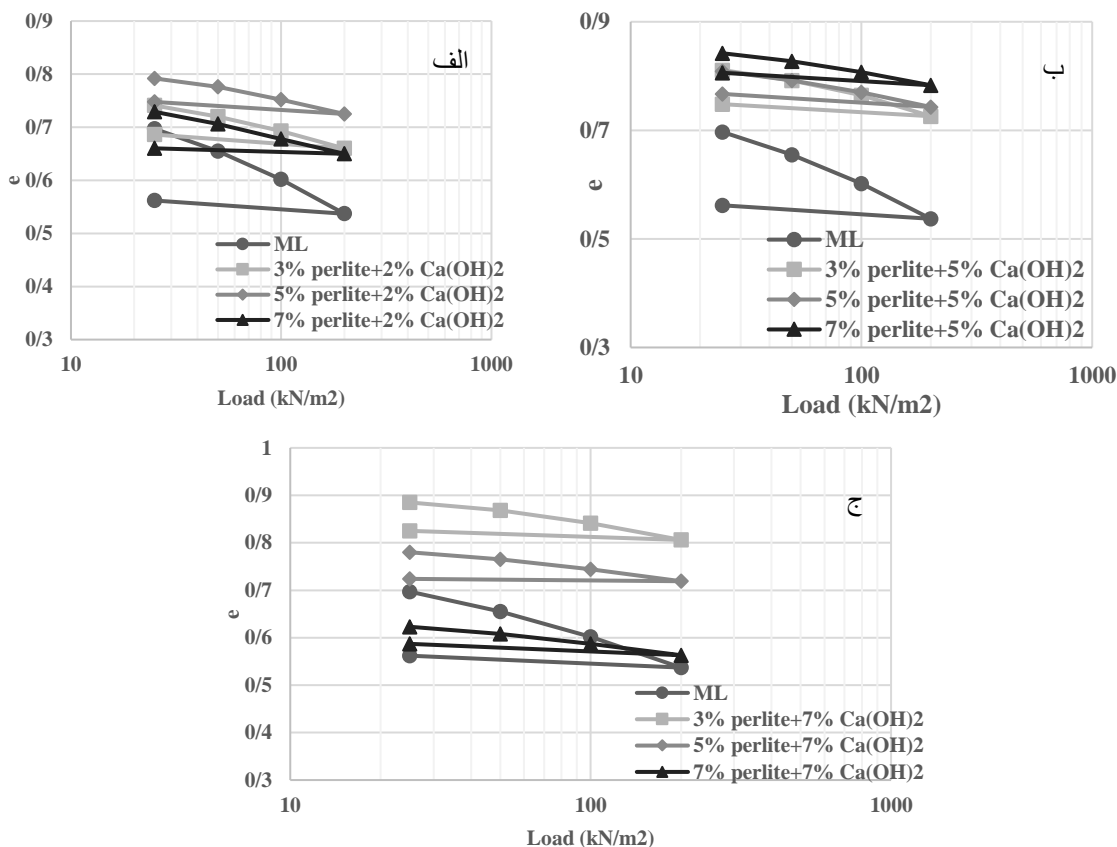
شکل ۱۳. تاثیر ترکیب پرلیت و هیدروکسید کلسیم بر روی مقاومت برشی نمونه‌های مورد مطالعه، الف- ۲٪ هیدروکسید کلسیم، ب- ۵٪ هیدروکسید کلسیم، ج- ۷٪ هیدروکسید کلسیم.

مقدار نشست تحکیمی و تورم لای ارزیابی شده است. در شکل (۱۴-الف، ب و ج)، تاثیر پرلیت و هیدروکسید کلسیم با درصدهای مختلف بر روی تغییرات نشست تحکیم لای پس از یک روز عمل آوری قابل مشاهده می‌باشد. طبق نمودارهای شکل (۱۴-الف و ب) می‌توان دریافت با افزایش حضور

نشست تحکیم و تورم احتمالی در خاکهای ریزدانه ناشی از جذب آب و رطوبت، از نمونه‌های رفتاری در خاک‌های مساله‌دار می‌باشد. در تحقیق حاضر، با انجام آزمایش تحکیم، تاثیر ماده افزودنی پرلیت به همراه هیدروکسید کلسیم بر روی

مناسبی در وقوع نشست تحکیم داشته است. بطوریکه میزان آن نسبت به خاک خالص کاهش یافته است. بعبارت دیگر بدلیل ساختار متخلخل و سلولی که ماده پرلیت دارد که می تواند آب را در خود حفظ نماید، ترکیب ذکر شده مانع از وقوع نشست گسترده تحکیمی در اثر جذب آب شده است.

پرلیت و هیدروکسید کلسیم در خاک لای، بدلیل بالا بودن میزان خاصیت جذب آب توسط پرلیت فضای خالی بین ذرات افزایش یافته و تا حدودی نشست تحکیمی گسترده بوقوع پیوندد. از سوی دیگر، در شکل (۱۴-ج) دیده می شود ترکیب ۷٪ پرلیت به همراه ۷٪ هیدروکسید کلسیم تاثیر



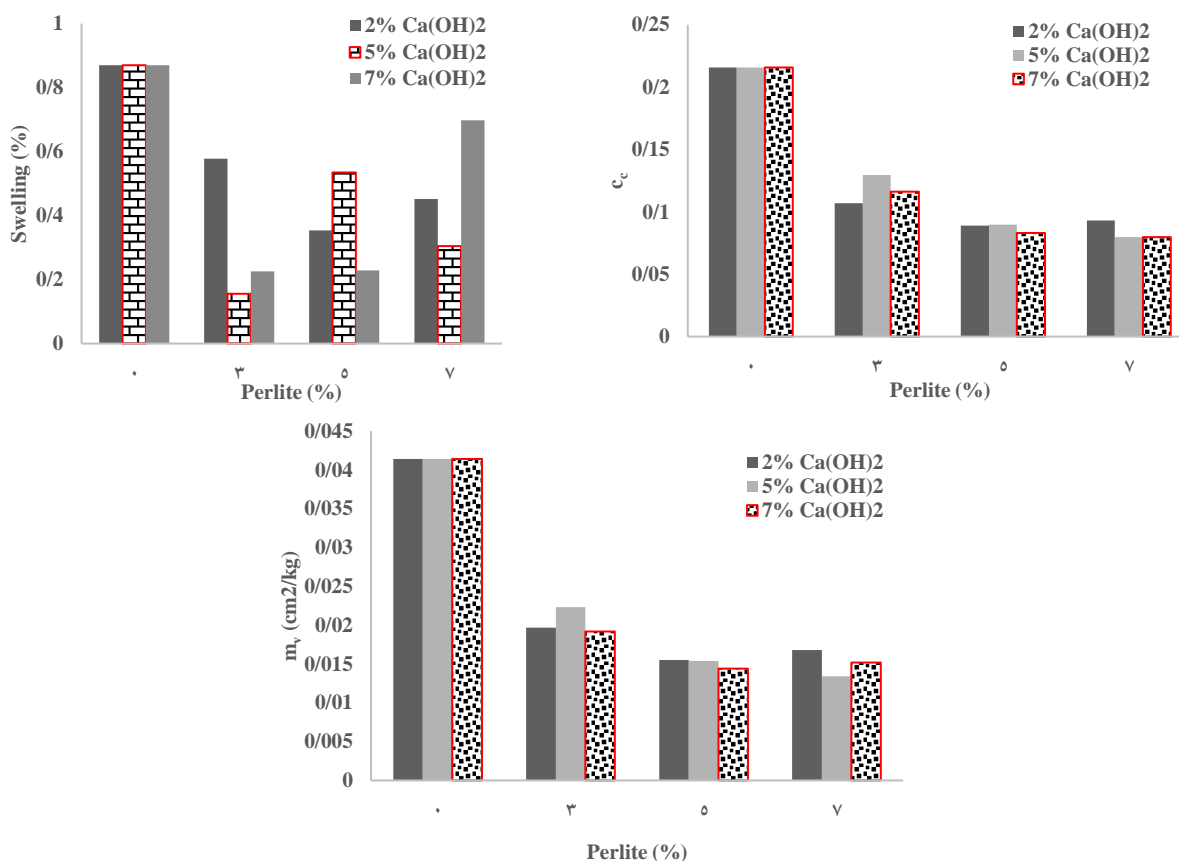
شکل ۱۴. تاثیر ترکیب پرلیت و هیدروکسید کلسیم بر روی نسبت تخلخل خاک مورد مطالعه، الف- ۲٪ هیدروکسید کلسیم، ب- ۵٪ هیدروکسید کلسیم، ج- ۷٪ هیدروکسید کلسیم.

۸۲ درصد کاهش یابد. این روند رفتاری به دلیل خاصیت جذب آب بالای توسط ذرات پرلیت و وجود ذرات آلومین دار و سیلیس دار و تشکیل استخوان بندی قوی بین ذرات تازه تشکیل یافته ناشی از واکنش سیمانی شدن است. همچنین، در شکل (۱۵-ب) مشاهده می شود افزودن پرلیت بین ۳ تا ۷ درصد به نمونه لای مورد مطالعه باعث گردیده تا شاخص فشردگی و مقدار نشست تحکیم در تمامی مقادیر هیدروکسید کلسیم یک روند کاهشی را نشان دهد. بطوریکه مخلوط ۷

در شکل (۱۵-الف، ب وج) تغییرات تورم آزاد، شاخص فشردگی نشست تحکیم و ضریب تغییر حجم نمونه های لای تثبیت شده با پرلیت و هیدروکسید کلسیم را می توان مشاهده نمود. در شکل (۱۵-الف) دیده می شود زمانیکه ۳ درصد پرلیت به خاک لای اضافه شده در تمامی درصدهای هیدروکسید کلسیم میزان تورم آزاد کاهش یافته است. البته بیشترین میزان درصد افت مربوط به ترکیب ۳ درصد پرلیت به همراه ۵ درصد هیدروکسید کلسیم بوده که سبب شده تورم

پرلیت با تمامی مقادیر هیدروکسید کلسیم بطور میانگین باعث افت ضریب تغییر حجم به مقدار ۶۳ درصد شده است.

درصد پرلیت با تمامی مقادیر هیدروکسید کلسیم سبب گردیده تا بطور میانگین میزان شاخص فشردگی ۶۱ درصد افت نماید. همچنین، طبق شکل (۱۵-ج)، مخلوط ۷ درصد



شکل ۱۵. تاثیر پرلیت بر نتایج حاصل از آزمایش تحکیم نمونه‌های مورد مطالعه، الف- تورم آزاد، ب- شاخص فشردگی تحکیم، ج- ضریب تغییر حجم.

در شکل (۱۶-الف، ب و ج) ارائه شده، می‌توان بیان کرد اگرچه مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها کوتاه بوده ولی واکنش سیمانی شدن (پوزولان) به دلیل افزودن پرلیت و با حضور هیدروکسید کلسیم به عنوان کاتالیزور خیلی سریع تشکیل یافته و وجود سدیم در خاک مورد مطالعه سبب شده تا هنگامیکه پرلیت با آن مخلوط می‌شود سیلیکات سدیم به همراه کربنات کلسیم تشکیل گردد که باعث بوجود آوردن مواد سیمانی می‌شود و می‌تواند یک استخوان بندی قوی را در بافت جدید تازه تشکیل یافته بوجود آورد. البته با توجه به کاربری‌هایی که از خاک تثبیت شده مورد مطالعه می‌توان

با مشاهده نتایج حاصل از آزمون تحکیم می‌توان اشاره کرد افزودن پرلیت به لای مورد مطالعه با درصدهای مختلف به همراه هیدروکسید کلسیم پس از یک روز عمل آوری در حالت کلی سبب کاهش میزان تورم و جذب آب شده‌اند. البته پرلیت بدلیل خاصیت جذب آب بالا و دارا بودن درصد بیشتر مواد آلومین دار و سیلیس دار در این خصوص دارای امتیاز ویژه است. با مرور تمامی نتایج بدست آمده از آزمون‌های انجام یافته می‌توان ذکر کرد پرلیت رفتار مکانیکی مناسبی در هنگام مخلوط شدن با لای شور سدیمی نشان داده است. طبق تصاویری پتروگرافی نمونه‌های خاکی تثبیت شده با پرلیت که

برشی را در مقادیر بارگذاری بالا ارائه نموده است. از طرفی، بدلیل بالا بودن خاصیت جذب آب پرلیت، رفتار مناسبی در مورد کاهش تورم و نشست تحکیمی در تمامی ترکیبات پرلیت به همراه هیدروکسید کلسیم در لای مورد مطالعه مشاهده گردید.

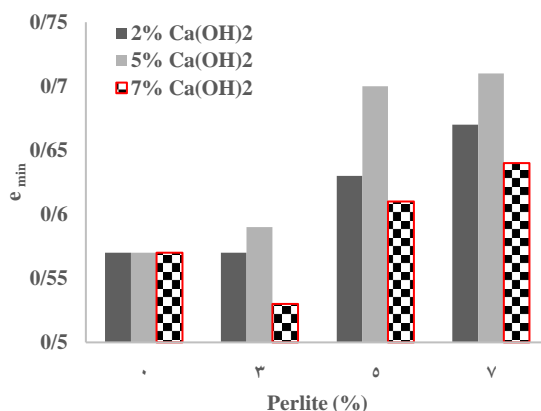
انتظار داشت درصدهای مختلفی از پرلیت امکان کاربرد دارد. بطوریکه ترکیب ۳ درصد پرلیت به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم بالاترین مقاومت فشاری تک محوری را نشان داده یا ترکیب ۵ درصد پرلیت به همراه ۷ درصد هیدروکسید کلسیم به عنوان کاتالیزور مناسب ترین مقاومت



شکل ۱۶. تصاویر پتروگرافی تاثیر پرلیت بر روی لای مورد مطالعه قبل و پس از تثبیت، الف: خاک مورد مطالعه، ب- خاک مورد مطالعه به همراه ۳ درصد پرلیت و ۲ درصد هیدروکسید کلسیم.

درصد کاهش داده است. بنابراین می توان دریافت، با کاهش فضا خالی بین ذرات تازه تشکیل یافته ناشی از ترکیب پرلیت با لای مورد مطالعه و بالا رفتن تماس سطحی بین آنها، تغییر رفتار بهتر از نقطه نظر جذب آب و توانایی باربری بالاتری قابل پیش بینی است.

در ادامه، تغییرات نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) در نمونه های تثبیت شده با ترکیب هیدروکسید کلسیم و پرلیت در شکل (۱۷) مشاهده نمود. با توجه به نمودارها، کمترین فضای خالی بین ذرات تازه تشکیل یافته در خاک تثبیت شده حاصل از واکنش شیمیایی ترکیب ۳ درصد پرلیت به همراه ۷ درصد هیدروکسید کلسیم است که نسبت تخلخل حداقل را ۷



شکل ۱۷. تاثیر پرلیت بر نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) نمونه های مورد مطالعه.

۴- افزودن ۵ درصد پرلیت به همراه ۷ درصد هیدروکسید کلسیم به لای و بعد از یک روز عمل آوری باعث شده است تا زاویه اصطکاک داخلی نمونه تثبیت شده از زاویه ۰/۷ درجه به ۱۶ درجه افزایش یابد که بیان کننده بالا رفتن قابل توجه در اصطکاک بین ذرات تازه تشکیل یافته است.

۵- میزان درصد رشد پارامتر چسبندگی در اثر مخلوط ۵ درصد پرلیت به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم با خاک مورد مطالعه برابر با ۱۳/۳ درصد است.

۶- زمانیکه ۳ درصد پرلیت به خاک لای اضافه می شود در تمامی درصدهای هیدروکسید کلسیم میزان تورم آزاد کاهش می یابد. البته بیشترین میزان درصد افت مربوط به ترکیب ۳ درصد پرلیت به همراه ۵ درصد هیدروکسید کلسیم بوده که سبب شده تورم ۸۲ درصد کاهش یابد.

بنابراین، با توجه به نتایج بدست آمده می توان برشمرده افزودن پرلیت به لای شور سدیمی همراه با هیدروکسید کلسیم پس از یک روز عمل آوری سبب بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مورد مطالعه گردیده تا بتوان از آن جهت کارهای عمرانی استفاده نمود. همچنین، واکنش شیمیایی مناسب بین پرلیت و لای باعث می گردد تا روند فرسایش خاک و حرکت ریزگردها در محدوده حوضه دریاچه ارومیه تا حدودی کاسته شود. البته، عوامل مختلفی همچون شرایط محیطی، دستخوردگی نمونه ها حین ساخت نمونه در آزمایشگاه و نمونه برداری خاک از محدوده مورد مطالعه، نوع کانی خاک ریزدانه و شرایط ذوب و یخبندان می تواند بر نتایج بدست آمده تاثیرگذار باشد که در تحقیقات آینده به آنها پرداخته خواهد شد.

در دو دهه اخیر به علت مدیریت ناصحیح منابع آبی و کاهش بارندگی ها، دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران در معرض خشک شدگی قرار گرفته است، به طوریکه گزارش ها حاکی از آن است که تنها ۲۰٪ از حجم کل دریاچه دارای آب می باشد. از سوی دیگر، خاک های شور سدیمی مشکلات فراوانی را می توانند در پروژه های عمرانی به وجود آورند. بویژه نشست و تغییر شکل از جمله موضوع های بحرانی در اینگونه خاکها می باشند. با توجه به فراوانی ماده معدنی پرلیت در منطقه آذربایجان هدف از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر این ماده افزودنی به همراه هیدروکسید کلسیم بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی لای شور سدیمی موجود در محدوده مورد مطالعه می باشد. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر بصورت ذیل قابل بیان است:

۱- با افزودن ۳ درصد پرلیت به همراه ۷ درصد محلول هیدروکسید کلسیم به لای، پس از یک روز عمل آوری میزان درصد رشد وزن مخصوص خشک حداکثر (γ_{dmax}) نمونه خاک تثبیت شده نسبت به حالت خالص تقریباً ۰/۶٪ می باشد.

۲- نتایج بدست آمده نمایش می دهد در نمونه های خاک مخلوط شده با ۳ درصد پرلیت به همراه ۷ درصد محلول هیدروکسید کلسیم، میزان رطوبت بهینه به مقدار تقریبی ۱۵/۸ درصد افت نموده است.

۳- نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری نشان داده است میزان توانایی باربری در نمونه شامل ۳ درصد پرلیت به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم بعد از یک روز عمل آوری رشد افزایشی ۳۲۷٪ داشته است. همچنین، ترکیب مذکور میزان مدول سکانت در خاک بهبود یافته را تا ۱۸۸ درصد افزایش داده است.

منابع

- اصغری زمانی، ا.، ۱۳۹۲. ارزیابی تغییرات سطح دریاچه ارومیه به عنوان چالش عمیق زیست محیطی فراروی منطقه شمال غرب ایران، فصلنامه علمی - پژوهشی فضای جغرافیایی، سال ۱۳، شماره ۴۱، ۹۱-۷۷.
- تجربشی، م. م.، ۱۳۹۵. احیای دریاچه ارومیه، چالش ها و ضرورت ها، کنفرانس بین المللی پیامدهای جغرافیایی و زیست محیطی وضعیت دریاچه ارومیه. دانشگاه تبریز. دفتر برنامه ریزی و تلفیق ستاد احیای دریاچه ارومیه. ۳ و ۴ آذر ماه. تبریز. ایران.

- حسنیه، آ.، دبیری، ر.، علیزاده مجدی، ع.، صباغ، ا.، ۱۴۰۱، تأثیر پومیس در خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لای دار شور سدیمی، نشریه زمین شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی، جلد ۱۶، شماره ۴، ۹۲-۱۱۵.
- دیپامهر، ا.، بهروز سرند، ف.، وفایی پور، ر.، ۱۴۰۲، بهسازی مارن سبز تبریز با استفاده از ژئولیت و متارس فعال شده بازی، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، جلد ۵۳، شماره ۴، ۲۴-۳۵.
- ضیایی موید، ر.، هراتیان، م.، ۱۳۸۹. تأثیر تثبیت با آهک و پلیمر و تسلیح با الیاف پلیمری بر رفتار تغییر حجمی خاک های رسی شور، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، دانشکده فنی مهندسی، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد چهارم، شماره ۱ بهار، ۸۲۷-۸۵۴.
- ستاد احیای دریاچه ارومیه، ۱۳۹۴. دریاچه ارومیه علل خشکی و تمهیدات احتمالی، گزارش شماره ۱.
- لک، ر.، درویشی، ج.، ۱۳۹۵. مطالعه محیط‌های رسوبی و ترکیب شورابه دریاچه ارومیه با نگرشی بر ارائه راهکار مناسب جهت احیاء. محیط زیست طبیعی، دوره ۶۹، شماره ۳، ۸۳۵-۸۵۱. JNE.2016.61884/۱۰,۲۲۰۵۹
- Ambrose, J., Murat, M. and Pera, J., 1985, Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: V. Extension of the research and general conclusions, *Cement and Concrete Research*, Vol.15, pp.261–268.
- ASTM D421-85, 1985, Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants, Annual book of ASTM standards, (reapproved 1998), 1985.
- ASTM D422-63, 1963, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils”, Annual book of ASTM standards (reapproved 1998), 1963.
- ASTM D4318-95a, 1995, Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils, Annual book of ASTM standards, 1995.
- ASTM D 854-02, 2002. Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Annual book of ASTM standards, 2002
- ASTM C618, 2022, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolana for Use as Mineral Admixture. Annual book of ASTM standards, 2022.
- ASTM C305, 2014, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Annual book of ASTM standards, 2014.
- ASTM D698-00, 2000, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))”, Annual book of ASTM standards, 2000.
- ASTM D2166/D2166M-16, 2016, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils, Annual book of ASTM standards, 2016.
- ASTM D2435-11, 2011, Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, Annual book of ASTM standards, 2011.
- ASTM-D 3080-11, 2011, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained condition, Annual book of ASTM standards, 2011.
- Baradaran, M. S., Qazanfari, R., and Baradaran, S., 2023, Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule, *Materials research express*, Vol.10, No.5, pp.1-10, DOI 10.1088/2053-1591/acd5af.
- Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M., and Maleki, A., 2024a, Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET, *Case Studies in Construction Materials*, Vol.20, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740>
- Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A., and Shane Underwood, B., 2024b, Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature, *Construction and Building Materials*, Vol.449, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138426>
- Binici, H., 2013, Engineering properties of geopolymer incorporating slag, fly ash, silica sand and pumice, *ACEE*, Vol.1, No.3, pp.108-123.
- Buchwald, A. and Kaps, Ch., 2002, Property controlling influences on the generation of geopolymeric binders based on clay. [www.geopolymer strength properties.com](http://www.geopolymerstrengthproperties.com) (Melbourne, Australia).
- Caldaron, A. A. and Burg, R. G., 1994, High-reactivity metakaolin: a new generation mineral, *Concrete International journal*, Vol.16, No.11, pp.37–40.
- Calik, U. and Şadoğlu, E., 2014, Engineering properties of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite, *Geomechanics and Engineering*, Vol.6, No.4, pp.403-418.
- Davidovits, J., 1991, Geopolymers, Inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis*, Vol.37, No.8, pp.1633-1656.
- Davidovits, J., 1999, Chemistry of geopolymeric systems, terminology, *Proceeding of Geopolymer, International Conference on Geopolymer*, Paris, France, 9–40.
- Duxson, P., and Provis, J. L., 2008, Designing precursors for geopolymer cements, *Journal of American Ceramic Society*, Vol.91, No.12, pp.3864–3869.

- Güneri, E., and Yukselen-Aksoy, Y., 2021, Improvement of thermally durable soil material with perlite additive, *Environmental Earth Sciences*, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-180207/v1>.
- Hayder, H. A., Mohamed, A., Shahin, and Walske, M. L., 2020, Review of Fly-Ash-Based Geopolymers for Soil Stabilization with Special Reference to Clay, *Geosciences*, Vol.10, pp.249, doi:10.3390/geosciences10070249
- Lee, S. K. and Stebbins, J. F., 2006, Disorder and the extent of polymerization in calcium silicate and aluminosilicate glasses: O-17 NMR results and quantum chemical molecular orbital calculations, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.70, pp.4275–4286.
- Li, C., Sun, H. and Li, L., 2010. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 40: 1341–1349.
- Miao, Sh., Shen, Z., Wang, X., Luo, F., Huang, X., and Wei, C., 2017, Stabilization of Highly Expansive Black Cotton Soils by Means of Geopolymerization, *Journal of material in civil engineering*, Vol.29, No.10, 04017170.
- Panich, V., Chairat, T., Wilailak, S., and Ittipon, M., 2022, Stabilization of Soft Clay Using Perlite Geopolymer Activated by Sodium Hydroxide, *International journal of geosynthetics and ground engineering*, Vol.8, No.5, . <https://doi.org/10.1007/s40891-022-00350-w>
- Pargar, J., Akhtarpour, A. and Baradaran, M. S., 2024, An Unsaturated Soil Mechanics-Based Numerical and Experimental Method to Assess Soil Settlement Due to Ground Water Level Rise. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, Vol.11, pp. 3621–3646, <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00422-6>
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C. and Udomchai, A., 2016, Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer, *Applied Clay Science*, pp.134–142.
- Provis, J. L., Deventer, J. S. J., and Van, D., 2009, *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. 1st edition, Elsevier publication.
- Qin Yin, H., Liu Fu, H., and Zhou, Q., 2008, Influencing factors of compressive strength of solidified inshore saline soil using SH lime-ash. *Journal of Central South University and Technology*, Vol.15, No.s1, pp. 386–390.
- Rostami H. A., Sh., Mohammadyar, M. A., and Akhtarpour, A., 2023, Investigation of torsion in asymmetric mid-rise structures on the pile-raft system considering soil-structure interaction, *Soil dynamic and earthquake engineering*, Vol.184, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108862>.
- Rezaeian Niri, Sh., Akhtarpour, A., Daliri, F., and Baradaran, M. S., 2024, Experimental investigation of dewatering silty tailings using electrokinetic method, *Canadian geotechnical journal*, <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0069>
- Tareghian, B., Baradaran, M. S. and Akhtarpour, A., 2024, The effect of sand-crumb rubber mixture treatment on the seismic response of a low-rise building located on liquefiable soil, *Discover Geoscience*, Vol.2, No.11. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00014-4>
- Tutunchi, S., Dabiri, R. and Dilmeghani, S., 2021, Experimental Studies in Ultrasonic Pulse Velocity of Roller Compacted Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag in Cold Region, *International journal of civil engineering*, Vol.19, No.8, doi:10.1007/s40999-021-00637-5.
- Wan, H., Shui, Z. and Lin, Z., 2004, Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties. *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.133–137.
- Yazdi, A. N., Akhtarpour, A., Abdalhusein, M. M., and Baradaran, M. S., 2024, Experimental Investigation of the Volume Change of a Swelling Clay and Its Improvement. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, Vol.11, pp.1008–1031, <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00315-0>
- Yilmaz, F. and Fidan, D., 2018, Influence of freeze-thaw on strength of clayey soil stabilized with lime and perlite, *Geomechanics and Engineering*, Vol.14, No.3, pp.301-306.
- Yung-Ming, L., Cheng-Yong, H., Al Bakri, M., and Hussin, K., 2016, Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review. *Progress in Materials Science*, Vol.83, pp.595–629.
- Zhang Z, Wang H, Zhu Y, Reid A, Provis J L, and Bullen, F., 2014. Using fly ash to partially substitute metakaolin in geopolymer synthesis. *Applied Clay Science*, 88: 194-201.