



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

زمان چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

رفتار مکانیکی لس تثبیت شده با سیمان و زئولیت

میثم ابراهیمی لاکمه سری^۱، پریسا خوارزمی^۲، الهه سادات حسینی^۳ محدثه کلائی مؤخر^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نیشابور

۲- دانش آموزخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان

۳- دانش آموزخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت ساخت، موسسه آموزش عالی لامعی گرگان

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، موسسه آموزش عالی لامعی گرگان

GILSAZE.1400@GMAIL.COM

چکیده

در علم تثبیت خاکهای لسی، استفاده از مواد افزودنی از جمله سیمان به عنوان یکی از ابتدایی ترین و مؤثرترین روشها شناخته می شود. در برخی موارد استفاده از سایر مواد مانند الیاف، نانوذرات و یا زئولیت به عنوان جایگزین سیمان می تواند خصوصیات مقاومتی مخلوط را افزایش دهد. در این پژوهش زئولیت به عنوان جایگزین بخشی از سیمان معرفی و اثر آن بر لس های سیمانی مورد بررسی قرار گرفته است. لذا از خاک لس کلاله (خاک پایه)، سیمان شاهرود (تثبیت کننده) و زئولیت کلینو پیتیلویت (ماده افزودنی) بهره گرفته شده است. تستهای تراکم (۸۰ آزمایش)، مقاومت فشاری محدود نشده (۶۰ آزمایش) و دوام (۲۰ آزمایش) بر روی طرح اختلاط شامل درصدهای سیمان ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد و درصد جایگزین شده زئولیت ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد صورت گرفته است. نتایج حاصله نشان می دهد که: (۱) با افزایش درصد سیمان، وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش یافته و درصد رطوبت بهینه به طور جزئی کاهش می یابد. (۲) با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به جای سیمان، وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می یابد. (۳) افزایش زمان عمل آوری و درصد سیمان سبب افزایش مقاومت فشاری محدود نشده می شود. (۴) در نمونه های ۲۸ و ۵۶ روزه نتایج مقاومت نشان می دهد که با افزایش درصد زئولیت تا ۱۵ درصد، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافته و بعد از ۱۵٪ زئولیت جایگزین شده کاهش می یابد. (۵) در روندی مشابه برای آزمایش دوام نیز در سیکلهای تر و خشک شدگی همین رفتار مشاهده شده است. (۶) در نهایت پارامتر ذرات فعال تعریف شده و روابطی برای تخمین مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده و دوام برای پیش بین با دقت بالا ارائه شده است.

کلمات کلیدی: تثبیت، زئولیت، سیمان، مقاومت فشاری محدود نشده، لس، دوام.

۱-مقدمه

خاک های لسی مناطق وسیعی از استان گلستان را پوشش داده است. این نوع خاکها عموماً در رده بندی متحده در گروه لایها و خاکهای ریزدانه غیرچسبیده قرار می گیرند. لس ها عموماً دانسیته خشک پایینی داشته و در صورت غرقاب شدن و یا بالا آمدن سطح آب زیرزمینی ساختار آن فروریخته و سبب بروز معضلات ژئوتکنیکی و مخاطرات طبیعی از جمله ناپایداری شیروانی ها، کاهش ظرفیت باربری و نشست های غیرمتقارن و ... می شود. لذا خاکهای لسی در محدوده خاکهای مساله دار فروریزی قرار گرفته و تثبیت و بهسازی آنها خصوصاً در مناطق شهری الزامی به نظر می رسد.



ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

ISSN ۲۹۸۰-۷۷۸۶

روشهای گوناگونی برای مقابله با معظلات خاکهای لسی تا به امروز ارائه شده است که ابتدایی ترین آن جایگزین خاک لس تا عمق محدوده تأثیر پی با مصالح مرغوب با خصوصیات ژئوتکنیکی مورد نظر است که از لحاظ اقتصادی و محیط زیستی منطقی نمی باشد. در چنین شرایطی بهسازی خاک به طور عملی بایستی مورد بررسی قرار گیرند. نوع روش بهسازی تابع عوامل متفاوتی از جمله مصالح در دسترس، امکانات اجرایی در محل، مؤثر واقع شدن روش بهسازی، اثرات محیط زیستی و از همه مهمتر پارامتر بودجه پروژه است. یکی از روشهای مرسوم بهسازی استفاده از مواد افزودنی است که مواد افزودنی بر دو قسم است: (۱) فیزیکی (۲) شیمیایی

مواد افزودنی فیزیکی با تغییر ساختار و بافت خاک سبب افزایش پارامترهای مقاومتی و یا کمک به بهبود خواص نفوذپذیری خاک (هدف غیرمستقیم بهسازی) می شوند. از سوی دیگر مواد افزودنی شیمیایی علاوه بر بهبود بافت خاک سبب ایجاد فعل و انفعالات شیمیایی شده و تولید باندهای شیمیایی و در نتیجه با بهبود پارامترهای مکانیکی خاک همراه است. یکی از ابتدایی ترین و پرمصرف ترین مواد شیمیایی افزودنی سیمان است که در حضور آب هیدراسیون و تولید محصولات سیمانی شده که با افزایش زمان عمل آوری، استحکام این پیوندها بیشتر می شود. بنابراین می توان گفت که افزودن سیمان سبب افزایش مقاومت و بهبود رفتار مکانیکی خاک می شود.

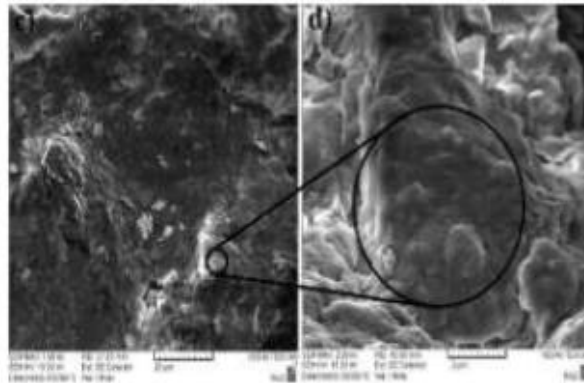
۲- روش تحلیل و یافته ها

برای بررسی و رفتار مکانیکی لس های تثبیت شده سیمان و زئولیت، ساخت نمونه های همگن از مهم ترین موارد می باشد. به دلیل آنکه نتایج حاصله بایستی امکان تکرارپذیری داشته باشد و در صورت عدم دقت در ساخت نمونه ها این مهم تحقق نمی یابد. از سوی دیگر شرایط مربوط به عمل آوری به خصوص ثابت بودن درصد رطوبت و دما و همچنین نحوه بارگذاری محوری بدون خروج از مرکزیت نیز از اهمیت به سزایی برخوردار است.

در این مقاله ابتدا به بررسی ویژگیها و خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لس (خاک پایه)، سیمان (تثبیت کننده)، و زئولیت (ماده افزودنی) پرداخته می شود. ویژگیهای مصالح شامل مشخصات دانه بندی، ویژگیهای تراکمی، حدود اتربرگ و چگالی دانه های جامد می باشد. در ادامه در رابطه با دستگاه های مورد استفاده از جمله پروکتور استاندارد اتوماتیک و دستگاه اعمال بار محوری (تک محوری) پرداخته شده است. همچنین روش ساخت نمونه ها و عمل آوری مورد بحث قرار گرفته است. نهایتاً مبانی آزمایشهای تراکم استاندارد، مقاومت فشاری محصورنشده و دوام (سیکلهای تر و خشک شدگی) ارائه شده است.

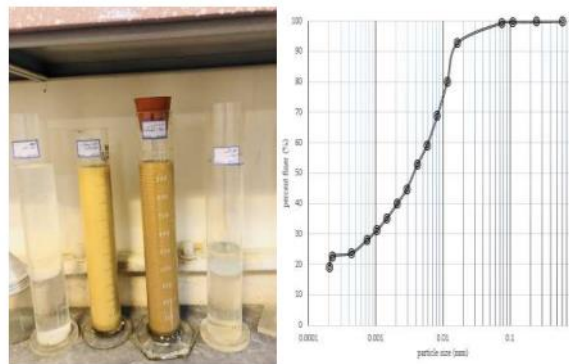
هدف اصلی این پژوهش بررسی افزودن زئولیت و سیمان به خاک لس (منطقه کلاله) بر روی خصوصیات مقاومتی تراکمی و دوام در گذر زمان است. با توجه به اینکه خاکهای وسیعی از استان گلستان را لس ها تشکیل می دهند، از خاک لس به عنوان خاک پایه استفاده گردیده است. همچنین استفاده از سیمان تیپ II در بهسازی های سطحی و عمقی روزافزون شده است. لذا از سیمان تیپ II به عنوان ماده تثبیت کننده استفاده شده است. در نهایت از ماده ای پوزولان طبیعی به نام زئولیت استخراج شده از معادن استان سمنان (منطقه افتر) به عنوان ماده افزودنی و جایگزینی سیمان بهره گرفته شده است. شایان ذکر است که تمامی آزمایشهای انجام شده در این تحقیق براساس استاندارد ASTM انجمن مواد و آزمون آمریکا صورت گرفته است.

عمده خاک مناطق شرقی استان گلستان به عنوان یک خاک بادرفت مطابق با سیستم متحده، خاک رس لای دار با خاصیت خمیری پایین (رس لاغر) قرار دارد، شکل (۱).



شکل (۱) تصویر بزرگنمایی خاک لس

منحنی دانه بندی لس منطقه کلاله با توجه به نتایج آزمایش هیدرومتری انجام شده منطبق بر استاندارد ASTM D 422 در شکل (۲) ارائه شده است. همانطوری که در شکل (۲) نشان داده شده است، قسمت اعظم ذرات خاک لس کلاله کوچکتر از ۰/۱ میلیمتر است.



شکل (۲) آزمایش هیدرومتری و نمودار دانه بندی

مطابق با نتایج آزمایش حدود اتربرگ استاندارد ASTM D 4318 (شکل ۳) حد روانی و حد خمیری این خاک مقادیر ۲۴/۲٪ و ۱۶/۴۷٪ همچنین دامنه خمیری این خاک ۲۲٪ به دست آمده است که نتایج آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات مکانیکی خاک لس کلاله

مقدار	مشخصات
۲۴/۰۲	حد روانی (%)
۱۶/۴۶	حد خمیری (%)
۷/۵۶	شاخص خمیری (%)
۲/۶۷	چگالی دانه‌های جامد



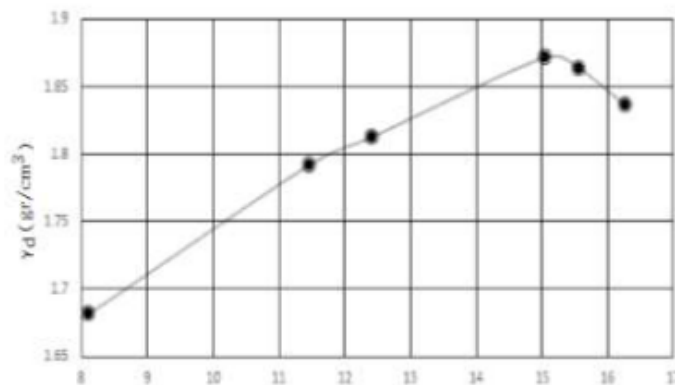
شکل (۳) آزمایش حدود اتربرگ

مطابق با استاندارد (2010) ASTM D854 چگالی دانه های خاک لس مطابق شکل (۴) ۲/۶۷ است.



شکل (۴) آزمایش تعیین چگالی دانه های جامد

آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد (2012) ASTM D698 انجام شده است و مقدار رطوبت بهینه ۱۵/۲٪ و وزن مخصوص حداکثر $87/1 \text{ gr/cm}^3$ به دست آمده است. در شکل (۵) منحنی تراکم خاک مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل (۵) منحنی تراکم خاک لس کلاله

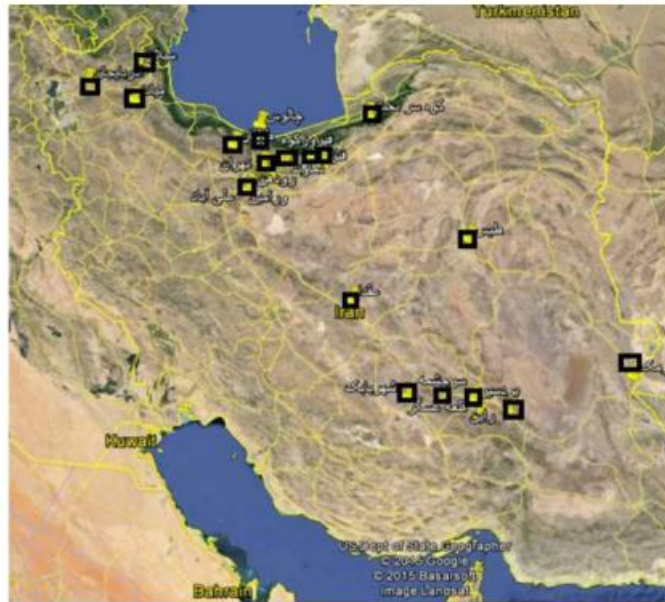
سیمان ماده ای چسبنده است که قابلیت چسباندن ذرات به یکدیگر و به وجود آوردن جسم یکپارچه از ذرات ۱۵۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه متشکله را دارا می باشد و از ترکیب مصالح آهکی، رس، سیلیس و مواد معدنی در دمای سانتیگراد ساخته می شود، به جسم حاصل پس از حرارت دادن کلینگر می گویند و از آسیاب کردن آن به همراه مقدار مشخصی سنگ گچ سیمان به دست می آید. انواع سیمان عبارتند از: سیمان پرتلند تیپ یک تا پنج، سیمان پوزولانی، سیمانهای آمیخته مانند سیمان پرآلومین، سیمان سفید و سیمان رنگی، سیمانهای سربارهای ضدسولفات، سیمان پرتلند آهکی، سیمان بنایی، سیمانهای نسوز مانند سیمان چاه نفت، سیمان پرتلند ضدآب و سیمان با گیرش تنظیم شده. در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه شاهرود در استان سمنان استفاده گردید. مصرف ویژه سیمان پرتلند در محل هایی که حرارت هیدراسیون متوسط برای آنها ضرورت داشته و حمله سولفاتها به آنها در حد متوسط می باشد. سطح مخصوص ویژه آن ۳۰۶۰ گرم بر سانتی مترمربع بوده و زمان گیرش اولیه آن ۱۸۰ تا ۲۲۰ دقیقه می باشد. برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II شاهرود در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲) مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده در این پژوهش

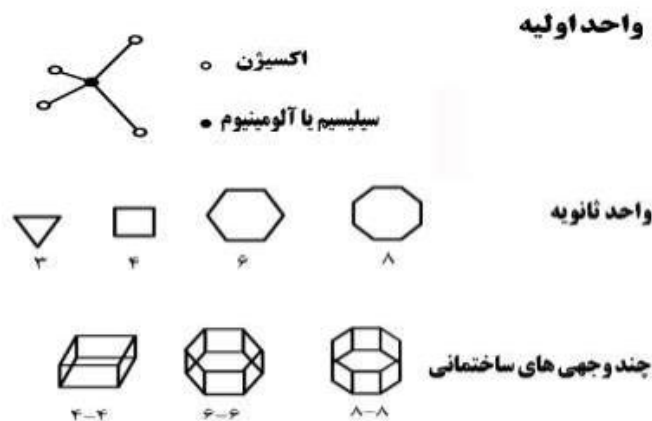
مشخصات شیمیایی			مشخصات فیزیکی		
<۶	Fe ₂ O ₃	<۸	C ₃ A	>۴۵	گیرش (دقیقه)
				<۳۶۰	ابتدایی
					نهایی
>۲۰	SiO ₂	<۶	AL ₂ O ₃	>۱۰۰	مقاومت فشاری
				>۱۷۰	۳روزه
				>۳۱۵	۷روزه
					۲۸روزه
<۳	SO ₃	<۵	MgO	>۲۸۰۰	انقباض اتوکلاو
				بلین	<۰/۸
				(gr/cm ²)	(درصد)

ژئولیت ها جامداتی به شکل بلورین و با منافذ ریز هستند که در ترکیب خود ۱۰ تا ۲۰٪ آب دارند که در دمای ۳۵۰ درجه همه یا بخشی از این آب به بیرن می رود. ساختمان بلوری شکل ژئولیت ها هنگام بی آب شدن پایدار می ماند که این عمل به صورت برگشت پذیر انجام می شود. ژئولیت های طبیعی کشف شده حدود ۵۰ نوع است که به طور عمده ناخالص می باشند.

توزیع ذخایر ژئولیت ها در مناطق مختلف کشور در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین نمایش واحدهای ساختمانی در ساختار مولکولی ژئولیت در شکل (۷) و مشخصات فیزیکی و اجزاء تشکیل دهنده آنها به ترتیب در جدول (۳) و (۴) ارائه شده است. منحنی دانه بندی ژئولیت در شکل (۸) و تصویر بزرگنمایی ژئولیت در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۶) جانمایی توزیع ذخایر ژئولیت در ایران



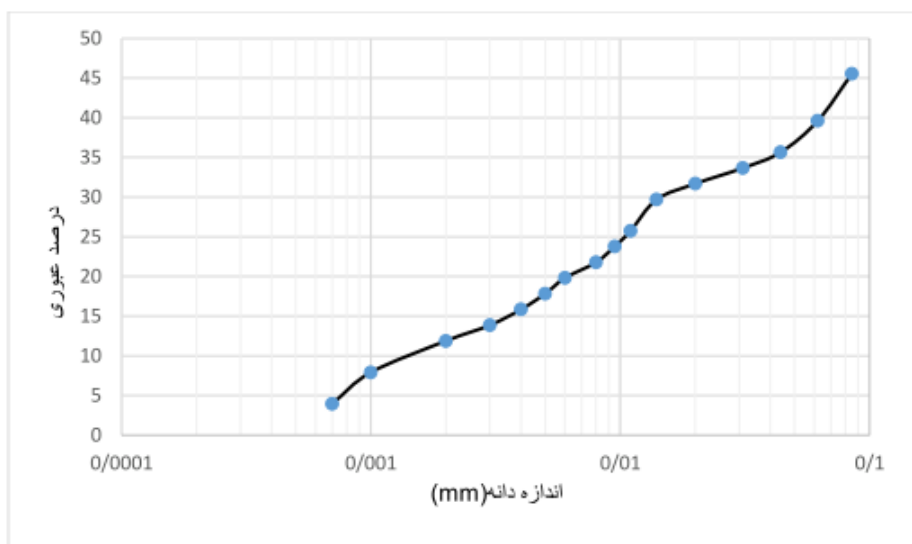
شکل (۷) نمایش واحدهای ساختمانی در ساختار مولکولی ژئولیت

جدول (۳) مشخصات فیزیکی زئولیت

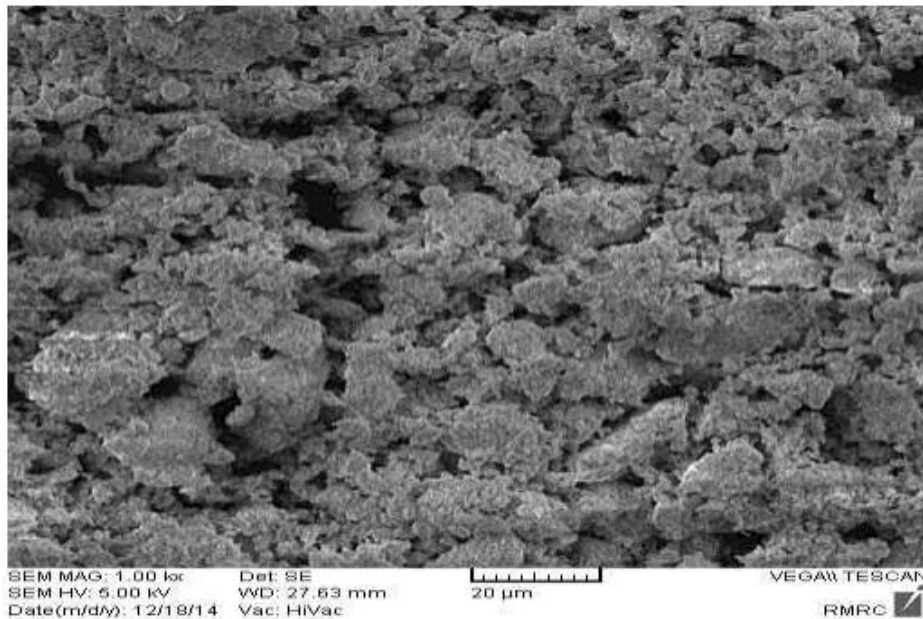
ویژگی	استاندارد	مقدار
G ₅	ASTM-D845	۲/۲۲
D ₅₀	ASTM-D422	۰/۰۱۳
LL(%)	ASTM-D4318	٪۲۳
PL(%)		NP

جدول (۴) اجزا تشکیل دهنده زئولیت

Chemical name	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
Zeolite	67.44	10.8	0.84	0.19	1.24	0.33	0.47	3.71



شکل (۸) منحنی دانه بندی زئولیت مطابق با استاندارد ASTM D422



شکل (۹) تصویر بزرگنمایی ژئولیت

برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای با توجه به طرح اختلاط‌های موردنظر (درصدهای سیمان دو، چهار شش و هشت و درصدهای جایگزینی ژئولیت ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ به جای سیمان)، وزن خشک مصالح (W_S) شامل وزنه‌های لس، سیمان و ژئولیت می‌باشد.

مقدار وزن خشک کل خاک (W_S) شکل (۱۰) شامل وزن لس (M_{loess})، وزن سیمان (M_{cement}) و وزن ژئولیت ($M_{zeolite}$) می‌باشد. با توجه به هر طرح اختلاط مقادیر وزنه‌های مصالح مطابق با روابط زیر قابل تعیین است:

$$M_{loess} = \left(\frac{100}{100+c+z} \right) \times W_S \quad (1)$$

$$M_{cement} = \left(\frac{c}{100+c+z} \right) \times W_S \quad (2)$$

$$M_{zeolite} = \left(\frac{z}{100+c+z} \right) \times W_S \quad (3)$$

که در طرح آن Z درصد ژئولیت به عنوان درصدی از سیمان و C درصد سیمان مربوط به طرح‌های اختلاط است همچنین میزان آب موردنیاز (W_{water}) برای نمونه سازی با توجه به وزن خشک کل مصالح از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$W_{water} = \% \omega_{opt} \times W_S \quad (4)$$

که در آن $\% \omega_{opt}$ درصد رطوبت بهینه است که از آزمایش تراکم به دست می‌آید. لازم به ذکر است که برای انجام آزمایشات تراکم و دوام نیز از همین روش استفاده شد و با تفاوت حجم قالب، وزن مصالح مصرفی تغییر کرد. در شکل (۱۰) مراحل انجام کار به صورت گرافیکی آورده شده است.



شکل (۱۰) مراحل نمونه سازی

برای ساخت نمونه ها، ابتدا مصالح خشک مربوط به هر طرح اختلاط برای رسیدن به مخلوطی همگن هم زده شد و سپس مقدار آب موردنظر با توجه به درصد رطوبت طرح به مخلوط همگن اضافه گردید. برای جلوگیری از تبخیر و بروز خطای آزمایشگاهی همواره میزان آب را ۱٪ افزایش داده ایم. در آزمایش تراکم میزانی نمونه جهت تعیین درصد رطوبت برداشت گردید. برای استفاده از نتایج در پژوهشهای علمی و کاربردهای مهندسی از روش تراکم دینامیکی در سه لایه استفاده گردید. قالبهای مورد استفاده برای ساخت نمونه های تراکم و دوام به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۱۱۰ میلی متر بودند و در آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده به قطر ۳۸ و ارتفاع ۷۶ میلی متر بودند شکل (۱۱).

همچنین به جهت سهولت کار و جلوگیری از چسبیدن خاک به اطراف نمونه گیر مقاومت فشاری محدودنشده از یک لایه تلق در جداره آن استفاده شد. میزان مخلوط در هر لایه طبق محاسبات طرح اختلاط به دست آمده و جداسازی شده و در سه لایه و در هر لایه به شیوه استاتیکی مطابق شکل (۱۲) متراکم گردید. ضمناً برای اتصال بهتر سه لایه خاک و جلوگیری از جدا شدن در مرز دو لایه پس از اتمام کوبیدن هر لایه با استفاده از شیء نوک تیز یک شیار به صورت ضربدری به عمق ۱۰٪ ضخامت هر لایه روی آن ایجاد شد. پس از اتمام کوبیدن سه لایه، با استفاده از تیغ موکت بری سر نمونه ها صاف گردید. در آزمایش دوام و تراکم خروج نمونه ها با استفاده از جک هیدرولیکی مطابق انجام شد و در آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده با باز نمودن پین های دو طرف قالب نمونه استخراج شد شکل (۱۲). برای جلوگیری از تغییر در درصد رطوبت نمونه ها، بلافاصله پس از خارج شدن از قالب درون کیسه پلاستیکی دو زیپه قرار گرفتند شکل (۱۲) و با توجه به زمان بندی ۲۸، ۷ و ۵۶ روزه نمونه ها طبقه بندی شدند. لازم به ذکر است قبل از زمان عمل آوری قطر، ارتفاع و وزن نمونه ها اندازه گیری شد.



شکل (۱۱) مراحل نمونه سازی آزمایش تراکم



شکل (۱۲) مراحل نمونه سازی مقاومت فشاری محصور نشده

دستگاه های پروکتور استاندارد و مقاومت فشاری محصور نشده برای بررسی رفتار نمونه های لسی، سیمانی، ژئولیتی استفاده شده که مشخصات کلی دستگاهها در ادامه ارائه شده است.

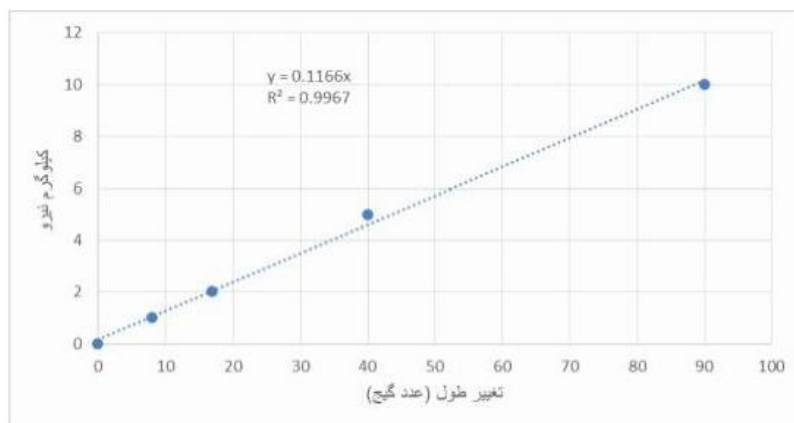
یکی از رایج ترین آزمایشات جهت بررسی اثر افزودنی های مختلف و مقایسه کارایی آنها آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده می باشد که مزیت آن عموماً ارزانی، تکرارپذیری، سادگی و ... می باشد. در این آزمایش بار محوری با سرعت مشخص به نمونه اعمال می شود و تنش همه جانبه به نمونه وارد نمی شود تا نمونه گسیخته شود. به طور کلی هدف از انجام این آزمایش تعیین مقاومت برشی زهکشی نشده می باشد.

با پیشرفته تر شدن دستگاههای آزمایشگاهی امکان ثبت خودکار داده ها و به تبع آن افزایش دقت فراهم شده است اما در این پژوهش به دلیل محدودیت های آزمایشگاهی کلیه نتایج به صورت دستی ثبت شدند. در شکل (۱۳) نمایی از دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده استفاده شده در این آزمایش را مشاهده می کنید. همانطوری که ملاحظه می شود از گچ تغییر مکان برای ثبت تغییر مکان و برای اعمال تنش به نمونه ها از حلقه بار (۲ و ۱۰ کیلونیوتن) استفاده گردیده است.



شکل (۱۳) نمایی از دستگاه مقاومت تک محوری به همراه گیج تغییر مکان و رینگ اعمال بار ۲ کیلونیوتن

حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه از پارامترهای مهم برای نمونه سازی هستند. برای دست آوردن تراکم بیشینه (حداکثر وزن مخصوص خشک) از قالب تراکم و چکش شکل (۱۳) استفاده شده است. به منظور قرائت صحیح اعداد و میزان بیشینه تنش، کالیبراسیون نیروی محوری دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده (رینگ) ۲ کیلونیوتن در آزمایشگاه انجام شد. کالیبراسیون به این صورت انجام می شود که در ابتدا از روی گیج تغییر شکل حلقه (رینگ) اندازه گیری شده برحسب میلی متر قرائت شده و سپس نیروی معادل با همان تغییر شکل اندازه گیری شده برحسب کیلونیوتن قرائت می شود و این روند برای میزان بارهای مختلف تکرار شده و نهایتاً اعداد به دست آمده در یک نمودار نیرو - تغییر شکل حلقه ترسیم و بهترین خط از بین این نقاط برازش داده می شود و این خط حتماً باید از نقطه صفر - صفر عبور کند. به این ترتیب معادله حاصل از برازش نقاط آن به عنوان مرجع کالیبراسیون در تمامی آزمایشهای انجام شده مورد استفاده قرار گرفته است. ضریب مربوط به رینگ ۲ کیلونیوتن 0.1166 کیلوگرم نیرو بر تغییر شکل به دست آمده است. شکل (۱۴)



شکل (۱۴) کالیبراسیون نیروی محوری دستگاه مقاومت فشاری محصور نشده

آزمایش های انجام شده در این پژوهش شامل آزمایش تراکم، دوام و مقاومت فشاری محصورنشده می باشد که در ادامه به آنها اشاره شده است.

برای آزمایش تراکم ابتدا مقدار سه کیلوگرم خاک در نظر گرفته شد و مطابق با طرح اختلاط با چهار درصد رطوبت انجام گردید. بدین ترتیب که خاک در سه لایه ریخته و چکش پروکتور استاندارد به تعداد ۲۵ ضربه به آن زده شد و در نهایت وزن مخصوص و درصد رطوبت آن و نیز وزن مخصوص بیشینه خشک و درصد رطوبت بهینه به دست آمد. شکل (۱۵) مراحل انجام کار را نشان می دهد.



شکل (۱۵) مراحل انجام آزمایش تراکم

برای آزمایش دوام به این ترتیب عمل شد که پس از زمان عمل آوری ۵۶ روز در طی ۸ سیکل تر و خشک که ابتدا در اون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۱ درجه سانتیگراد و سپس درون حوضچه آب به دمای 23 ± 2 درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت و در هر سیکل نمونه ها با فشار بسیار کم دست برآش شدند و سپس وزن کشی شدند شکل (۱۶).



شکل (۱۶) مراحل انجام آزمایش دوام

این آزمایش آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده طبق استاندارد ASTM D2166 انجام شده است که روش تعیین مقاومت فشاری محصورنشده خاکهای چسبنده در شرایط دست نخورده و بازسازی شده و یا متراکم شده با بارگذاری کنترل کرنش است، را بیان می کند. از جمله خاکهای چسبنده می توان به لس و خاکهای سیمانی اشاره کرد. مقاومت فشاری محصورنشده تنش فشاری است که نمونه استوانه ای شکلی از خاک را در شرایط غیرمحمور تحت بارگذاری ساده به گسیختگی برساند. در این تعریف مقاومت فشاری محصورنشده به صورت تنش فشاری بیشینه و یا تنش متناظر با ۱۵ درصد کرنش محوری (هر کدام که زودتر اتفاق بیفتد) تعریف می شود. برای آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده ۶۰ نمونه ساخته شد که شامل درصدهای مختلف سیمان و ژئولیت با زمان عمل آوری متفاوت مطابق با طرح اختلاط بود. نمونه ها دارای قطر ۳۸ میلی متر و ارتفاع ۷۶ میلی متر بودند که شرط نسبت طول به قطر بین ۲ تا ۲/۵ درصد را ارضا نمودند. سرعت بارگذاری طبق استاندارد در حدود ۰/۵ تا ۲ درصد کرنش محوری در دقیقه می باشد. مصالح نرم تر که تا لحظه گسیختگی متحمل کرنش های بزرگتر می شوند باید با سرعت بیشتری بارگذاری شوند و برعکس نمونه های ترد و شکننده که تا لحظه گسیختگی متحمل کرنش های کوچکتری هستند باید با سرعت کمتری بارگذاری شوند. سرعت بارگذاری کلیه نمونه های سیمانی و سیمانی ژئولیتی به دلیل ترد بودن ۰/۵۳ درصد کرنش محوری بر دقیقه می باشد شکل (۱۷).



نمونه سازی



خارج کردن نمونه ها

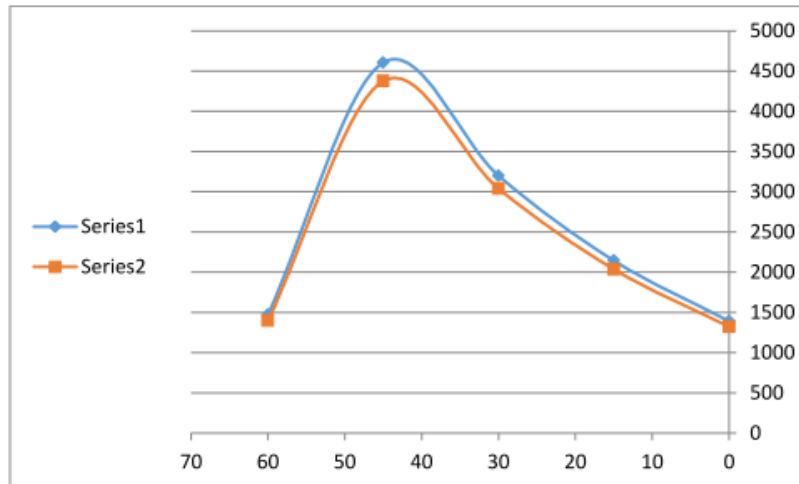


عمل آوری

شکل (۱۷) مراحل انجام آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده

در سالیان اخیر، با پیشرفت تجهیزات عکس برداری الکترونی مطالعه ریزساختاری مواد افزودنی در تثبیت خاک بیشتر مدنظر قرار گرفته است. اگرچه در حین نمونه سازی مصالح برای حصول یک ترکیب همگن کاملاً مخلوط شده و از لحاظ ظاهری کاملاً همگن به نظر می رسد، با این حال هنوز برخی از اتصالات ضعیف بین مصالح در سطح نمایان است. از طرفی دیگر شکستن نمونه های با مقاومت نزدیک به هم می توان نتیجه گرفت که نمونه ها همگن است.

در آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده بعضی از طرح اختلاط ها به صورت تصادفی تکرار شدند و نتایج مورد بازبینی قرار گرفتند. نتایج تکرارپذیری برای نمونه های سیمانی و سیمانی - ژئولیتی حاکی از همبستگی مناسب و تکرارپذیر بودن نتایج می باشد و نتایج آزمایشات در حد قابل قبولی تکرارپذیر می باشد. شکل (۱۸)



شکل (۱۸) تکرار پذیری آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده

۳- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش ژئولیت به عنوان یک ماده معدنی پوزولانی جهت بهبود رفتار مکانیکی لس تثبیت شده با سیمان معرفی شده که در محیط های خورنده پایداری بیشتری نسبت به سیمان داشته و سبب هیدراتاسیون آرام سیمان با حرارت زایی کمتر می شود. علاوه بر ارزان بودن ژئولیت، افزایش مقاومت برشی، سبک بودن و کاهش معضلات زیست محیطی نسبت به سیمان از جمله دلایل انتخاب ژئولیت و اهداف این پایان نامه است. برای مطالعه اثر افزودن ژئولیت و سیمان پرتلند بر رفتار لس در حین بارگذاری، مجموعه آزمایشهای تراکم، دوام و مقاومت فشاری محصورنشده انجام شده است. پس از آن آزمایش ها مشاهدات قبلی مورد تأیید واقع و نتیجه گیری جدیدی برای افزودن ژئولیت حاصل شد.

در این مقاله به بررسی همزمان سیمان و ژئولیت بر روی پارامترهای تراکم، مقاومت فشاری محصورنشده و دوام و همچنین به بررسی پارامترهای کلیدی پرداخته شده است. نتایج به صورت خلاصه عبارتند از:

۱- با افزایش درصد سیمان و درصد جایگزینی ژئولیت حداکثر وزن مخصوص خشک مخلوط به ترتیب افزایش و کاهش یافته و درصد رطوبت بهینه تقریباً ۱۵٪ می باشد.

۲- با افزایش درصد ژئولیت تا ۱۵٪ سبب افزایش مقاومت فشاری محصورنشده و بعد از آن باعث کاهش آن می باشد. به عبارت دیگر ۱۵٪ ژئولیت درصد بهینه می باشد که سبب افزایش مقاومت مخلوط نسبت به نمونه های سیمانی با افزایش درصد سیمان است.

۳- دوام نمونه های سیمانی - ژئولیتی با درصد ژئولیت ۱۵٪ بیشتر از سایر نمونه ها بوده که میزان این درصد با افزایش درصد سیمان سیر صعودی دارد.

۴- مقاومت فشاری محصورنشده ۲۸ و ۵۶ روزه با افزایش درصد جایگزینی ژئولیت تا حدود ۱۵ درصد وزنی نسبت به سیمان افزایش یافته و در مقادیر بیشتر کاهش می یابد. این افزایش مقاومت ناشی از فعالیت پوزولانی ژئولیت و کندتر کردن فرآیند هیدراتاسیون در مدت ۲۸ روز می باشد.

۵- با جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، رفتار نمونه ها در موقع گسیختگی از حالت ترد به حالت انعطاف پذیر میل می کند.



۶- با افزایش پوکی، مقاومت فشاری محصورنشده کاهش می یابد، این کاهش مقاومت برای نمونه های زئولیتی سیمانی در مدت ۲۸ و ۵۶ روزه کمتر می باشد.

۷- نتایج تحقیق نشان می دهد که درصد ذرات فعال به عنوان یکی از بهترین پارامترها در تعیین مشخصات مقاومتی و دوام به صورت تابعی نمایی می باشد.

۴- مراجع:

1. Jefferson I, Evstatiev D, Karastanev D. The treatment of collapsible loess soils using cement materials. GeoCongress: Geosustainability and Geohazard mitigation, ASCE, 2008.
2. Evans G.L, Bell D.H. Chemical stabilization of loess, New Zealand. 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.3, PP.649- 658, 1981. [4]
3. White D, Harrington D, Thomas Z. 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, 2005.
4. Roumyana, Nikolova, Angelova. Loess-cement long-term strength facilitating factor for loess improvement applications, Geologica Balcanica, 36. 3-4, Sofia, p. 21-24, 2007.
5. Sariosseiri F, Muhunthan B. Geotechnical properties of Palouse loess modified with cement kiln dust and Portland cement, GeoCongress: Characterization, Monitoring and Modelling of Geosystems, 2008.
6. Okonta F.N, Manciya T.M. Compaction and strength of lime-fly ash stabilized collapsible residual sand, EJGE, Vol. 15, 1976-1988, 2010.
7. Huangjing S, Gasaluck W. The stabilization of loess by chemical additives for road base, EJGE, Vol. 15, 1651- 1668, 2010.
8. Arrua P, Aiassa G, Eberhardt M, Alercia Biga C. Behavior of collapsible loessic soil after interparticle cementation, Int. J. of Geomate, Japan, Vol. 1, No. 2, pp. 10-15, 2011.
9. Moayed R. Z, Izadi E, Heidari S. Stabilization of saline silty sand using lime and micro silica, J. Cent. South Univ. 19: 3006-3011, 2012.
10. Zhang Y, Zhang ZH. Influence factor analysis on strength of lime-fly ash loess, Scientific Research, Engineering, China, No. 5, 561-565, 2013.
11. Vakili A. Evaluation of the lime and cement effect on the mechanical and physical characteristics of the collapsible soils. Basic. Appl. Sci. Res.,3(8)691-696, 2013.
12. Pei X, Zhang F, Wu W, Liang Sh. Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles, Applied Clay Science 114 (2015) 77– 84, 2015.
13. Zhen L, Cai C.S, Fengyin L, Fenghong F. Feasibility Study of Loess Stabilization with Fly Ash-Based Geopolymer, American Society of Civil Engineers, 2016.
14. Engineering Manual, (1984), "Soil stabilization for pavements mobilization construction" Department of U.S Army Corps of Engineers.
15. Engineering Manual, (1999), "Guidelines on ground improvement for structures and facilities" Department of U.S Army Corps of Engineers, Washington DC.
16. Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., and Lin, Z.S., (1999). "A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes" Constr Build Mater, Vol. 13, No. 8, pp. 427-432.
17. Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., and Ulbrich, L.A., (1998). "Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil" J Geotech Geoenvironmental Eng, Vol. 124, No. 12, pp. 1211–1214.
18. Schnaid, F., Prietto, P.D.M., and Consoli, N.C., (2001). "Characterization of cemented sand in triaxial compression" J Geotech Geoenvironmental Eng, Vol. 127, No. 10, pp. 857–868.
19. Ismail, M.A., Joer, H.A., Sim, W.H., and Randolph, M.F., (2002). "Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil" J Geotech Geoenvironmental Eng, Vol. 128, No. 6, pp. 520–529.
20. Rotta, G.V, Consoli, N.C., Prietto, P.D.M., Coop, M.R., and Graham, J., (2003). "Isotropic yielding in an artificially cemented soil cured under stress" Geotechnique, Vol. 53, No. 5, pp. 493-501.
21. Asghari, E., Toll, D. G., and Haeri, S. M., (2004). "Triaxial behaviour of a cemented gravely sand, Tehran alluvium" Geotech Geol Eng, Vol. 21, No. 1, pp. 1- 28.
22. Haeri, S.M., Hamidi, A., Hosseini, S.M., Asghari, E., and Toll, D. G., (2005). "Effect of cement type on the mechanical behavior of a gravely sand" Geotech Geol Eng, Vol. 24, No. 2, pp. 335–360.
23. Consoli, N.C., Foppa, D., Festugato, L., and Heineck, K.S., (2007). "Key parameters for strength control of artificially cemented soils" J Geotech geoenvironmental Eng, Vol. 133, No. 2, pp. 197–205.



24. Consoli, N.C., Rotta, G.V, and Prietto, P.D.M., (2006). "Yielding- compressibility-strength relationship for an artificially cemented soil cured under stress" *Geotechnique*, Vol. 56, No. 1, pp. 69-81.
25. Committee, A.C.I., (1990). "State-of-the-art report on soil cement" American Concrete Institute, Vol. 1, 123P.
26. White, G.W. and Gnanendran, C.T., (2005). "The influence of compaction method and density on the strength and modulus of cementitiously stabilised pavement materials" *Int J Pavement Eng*, Vol. 6, No. 2, pp. 97-110.