

مقایسه تأثیر انواع آهک بر فشار و زمان تورم خاک بنتونیت*

عادل کاظم‌پور^(۱)محمد سیروس پاکباز^(۲)ایرج رسولان^(۳)

چکیده امروزه باتوجه به وسعت خاک‌های تورمی و همچنین خرابی‌های ناشی از فشارهای حاصل از تورم این خاک‌ها، موجبات انهدام کامل ساختمان‌های سبک، پوشش کانال‌های آبیاری، کف‌سازی‌ها و ترک در پی‌ها را به وجود آورده است. در این تحقیق با استفاده از آزمایش فشار تورم با حجم ثابت تغییرات فشار تورم و زمان فشار تورم نمونه‌های متراکم‌شده از مخلوط خاک بنتونیت با ۳٪ آهک هیدراته صنعتی، آهک زنده صنعتی، آهک هیدراته سنتی و آهک زنده سنتی در رطوبت ۲٪ الی ۳٪ کمتر از رطوبت بهینه در زمان‌های عمل‌آوری ۰، ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه اندازه‌گیری شد. پس از اندازه‌گیری فشار تورم، باربرداری از نمونه‌ها به دو روش کنترل کرنش و کنترل تنش صورت گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که تأثیر افزودن آهک زنده به بنتونیت در کاهش مقادیر فشار تورم اولیه، زمان انتهای فشار تورم اولیه، سرعت فشار تورم ثانویه با زمان، شاخص تورم کنترل کرنش و کنترل تنش بیشتر از آهک هیدراته بود. به علاوه با افزایش درصد هیدروکسید کلسیم در آهک هیدراته و اکسیدکلسیم در آهک زنده شاخص‌های تورمی ذکر شده در بالا، در نمونه‌ها کاهش یافتند. نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زنده سنتی دارای کمترین مقدار شیب فشار تورم ثانویه با زمان بود. شیب فشار تورم ثانویه با زمان نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زنده صنعتی کمتر از آن برای نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراته صنعتی بود. شاخص تورم باربرداری با کنترل کرنش از شاخص تورم باربرداری با کنترل تنش برای کلیه نمونه‌ها بزرگ‌تر بود. ضمناً با افزایش زمان عمل‌آوری میزان فشار تورم اولیه، زمان انتهای فشار تورم اولیه، سرعت فشار تورم ثانویه با زمان و شاخص تورم کنترل کرنش و کنترل تنش همگی نمونه‌ها کاهش یافتند. شیب فشار تورم ثانویه با زمان برای انواع آهک‌ها در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه با هم اختلاف چندانی نداشتند. زمان فشار تورم اولیه پس از ۹۰ روز عمل‌آوری برای آهک هیدراته سنتی کمترین و برای آهک هیدراته صنعتی بیشترین مقدار بود. پس از ۹۰ روز عمل‌آوری شاخص تورم کنترل کرنش و کنترل تنش برای آهک زنده سنتی کمترین و برای آهک هیدراته صنعتی بیشترین مقدار بود.

واژه‌های کلیدی فشار تورم، تورم با حجم ثابت، آهک زنده، آهک هیدراته، تثبیت خاک، بنتونیت، شاخص تورم، کنترل تنش، کنترل کرنش، تورم ثانویه.

Comparing the Influence of Kinds of Lime on Time and Swelling Pressure of Bentonite

M. Siroos Pakbaz

A. Kazempour

I. rasoolan

Abstract This research compares the influence of different kinds of lime on the amount and time of swelling pressure of bentonite. In the present research, constant volume method was used for measurement of samples of bentonite soil mixed with 3 % of quick and hydrated lime compacted at 2 – 3 % dry of optimum water content and after curing period of 0,1,7,28 and 90 days. The results showed that adding quick lime to bentonite decreased the magnitude of swelling pressure, the time to reach to primary swelling pressure, time rate of secondary swelling pressure and both stress and strain controlled swelling indices more effectively than the use of hydrated lime. It was also determined that the values of these parameters decreased further with increase in curing period. Traditional quick lime had the least slope of secondary swelling pressure with time. The slope of secondary swelling pressure with time for samples stabilized with industrial quick lime were lower than those which were stabilized with industrial hydrated lime.

Key Words Swelling Pressure, Swelling with Constant Volume, Quick Lime, Hydrated Lime, Soil Stabilization Bentonite, Swelling Index, Stress Controlled Strain Controlled, Secondary Swelling.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۹/۲۲ می‌باشد.

(۱) دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز.

Email: Pakbaz_m@scu.ac.ir

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

(۳) استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

مقدمه

می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه از دیرباز تاکنون انجام گرفته و در حال انجام است [1]. آهک علاوه بر ناخالصی‌ها عمدتاً شامل اکسید کلسیم (CaO) یا آهک زنده و هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)_2) یا آهک هیدراته می‌باشد [4]. آهک به‌عنوان یک ماده افزودنی بی‌نظیر در اصلاح و تثبیت خاک‌ها در زیر جاده‌ها و پروژه‌های سازه‌ای مشابه به‌کار می‌رود. زمانی که حداقل ۳ درصد آهک با خاک رس ترکیب می‌شود در حضور آب pH خاک تا ۱۲/۴ افزایش می‌یابد و باعث جدا شدن سیلیکا (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) از داخل خاک به داخل محلول آب خاک می‌شود. این ترکیبات سپس با یون کلسیم ناشی از حضور آهک درون آب موجود در محیط ترکیب می‌شود و ایجاد سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) و آلومینات کلسیم هیدراته (CAH) می‌کند که پس از تشکیل سفت می‌شود و موجب چسبیده شدن ذرات رس به یکدیگر می‌شود [5]. مقاومت خاک‌های تثبیت‌شده با آهک عمدتاً به مقدار اکسیدهای سیلیکا و آلومینا و کلسیم موجود در محیط بستگی دارد [6]. هرچه مقادیر آنها در محلول آب خاک بیشتر باشد مقاومت خاک تثبیت‌شده با آهک بیشتر و یا میزان تورم آن کمتر خواهد بود. مقادیر آهک ۳ تا ۸ درصد خاک خشک مناسب برای پایدارسازی خاک‌های تورم‌زا می‌باشد [5]. هرچند تعیین مقدار حداقل آهک لازم برای شروع واکنش‌های پوزولانی در خاک بستگی به کیفیت آهک، دما و حجم آب موجود دارد [7]. به این پروسه، پایدارسازی خاک گفته می‌شود [7]. در مقادیر آهک کمتر از ۳ تا ۵ درصد تجمع ذرات خاک رس توسط یون کلسیم بدون واکنش پوزولانی اتفاق می‌افتد [8, 7, 4]. به این پروسه، اصلاح خاک اتلاق می‌گردد [7]. براساس تحقیق انجام‌گرفته [7] نفوذپذیری خاک تثبیت‌شده با ۵٪ آهک زنده پس از ۷ روز عمل‌آوری افزایش می‌یابد و پس از آن در اثر واکنش‌های پوزولانی در اثر کاهش منافذ بین ذرات کاهش نفوذپذیری در زمان

خاک‌های متورم‌شونده خاک‌هایی هستند که در اثر افزایش رطوبت افزایش حجم می‌دهند [1]. این تورم در اثر بارندگی، عبور آب از کانال‌ها، بالا آمدن سطح سفره زیرزمینی و جذب این آب به‌وسیله خاک و یا در اثر آبیاری زمین‌های کشاورزی ایجاد می‌گردد. فشار ناشی از تورم خاک‌ها می‌تواند آسیب کامل به سازه وارد نماید. در کشور آمریکا خسارت سالانه ناشی از رفتار مخرب خاک‌های متورم‌شونده در بزرگراه‌ها، معابر، فرودگاه‌ها، پوشش تونل‌ها، کانال‌های آبیاری و دیگر سازه‌ها، به‌میزان ۹۰۰۰ میلیون دلار برآورد شده است که به‌تنهایی بزرگ‌تر از خسارات ناشی از بلایای طبیعی از قبیل سیل، طوفان و زلزله بوده است. عموماً بالغ بر ۶۰ درصد از این سازه‌ها متحمل خسارات جزئی از قبیل ترک و حدود ۱۰ درصد از این سازه‌ها به شدت آسیب می‌بینند که دیگر قابل تعمیر نیستند [2]. خاک‌های متورم‌شونده از حیث نیروهای تورمی مختلفی که به کف‌های بتنی صلب و پی سازه‌های موجود می‌تواند وارد کنند، در برخی موارد سبب شکستگی و جابه‌جایی‌های غیرمجاز در سازه می‌گردد [3]. تورم معمولاً در خاک‌هایی مشاهده می‌شود که به‌اندازه لازم دارای ذرات ریزدانه رسی باشند. خاک‌های مونت‌موریلونیت‌دار که اکثراً با نام تجاری بنتونیت شناخته می‌شوند، تمایل زیادی به جذب آب و متورم شدن دارند. پیوند صفحات این رس‌ها بسیار پایین است و آب به‌راحتی در بین صفحات آنها نفوذ می‌کند و در اثر جذب آب زیاد خاصیت تورمی این رس‌ها بسیار بالا می‌باشد [4]. دوناسن به‌دنبال جستجویی که حوالی سال ۱۹۷۰ بر روی پراکندگی این خاک‌ها در جهان انجام داد، طی مقاله‌ای اعلام کرد که این خاک‌ها در ۱۸ کشور از جمله در ایران گزارش شده است [2]. یکی از مؤثرترین روش‌های بهبود کیفی مشخصات تورمی خاک‌های رسی، که استفاده از آن متداول است، بهره‌گیری از آهک

شکفته از نوع سنتی و صنعتی بر روی مقدار فشار تورم و نرخ توسعه فشار تورم با زمان یک خاک تورمزا بتونیتی ارزیابی گردیده است.

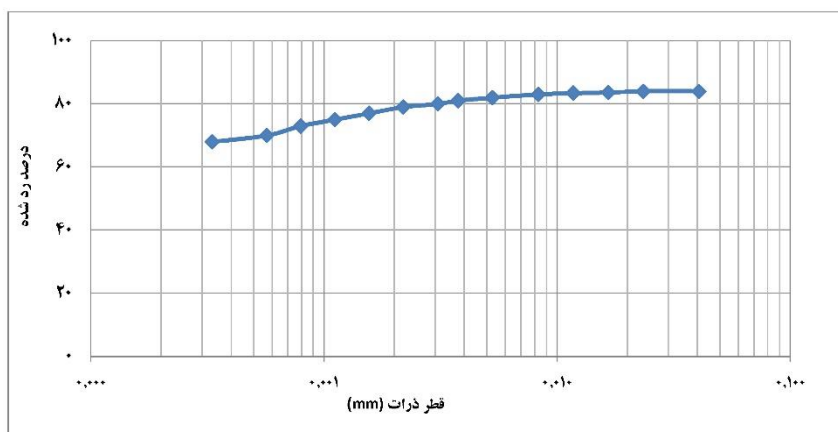
مصالح مصرفی و خصوصیات آنها

بتونیت. خاک‌هایی در تثبیت با آهک مؤثر هستند که میزان کانی‌های رسی موجود در آنها برای انجام واکنش‌های پوزولانی به‌اندازه کافی باشد. تمام کانی‌های رسی به‌علت دارا بودن سیلیس و آلومین به‌خوبی با آهک واکنش می‌دهند؛ ولی خاک‌های با پلاستیسیتته بالاتر در واکنش با آهک مؤثرترند و اثر اصلاح‌کنندگی آهک بیشتر می‌باشد.

بتونیت مصرفی در مجموعه آزمایش‌های این تحقیق از شرکت درین کاشان تهیه شده است. رنگ این بتونیت سفید روشن است. خصوصیات فنی این خاک که در آزمایشگاه براساس استاندارد ASTM به‌دست آمده است، در جدول (۱) آورده شده است.

منحنی دانه‌بندی بتونیت مطابق شکل (۱) می‌باشد که از آزمایش هیدرومتری طبق استاندارد ASTM D 422-63 به‌دست آمده است.

عمل‌آوری بالاتر پیش‌بینی می‌شود. افزایش یا کاهش نفوذپذیری خاک اصلاح‌شده بر روی تورم و زمان تورم و یا فشار تورم تأثیر می‌گذارد. در نتیجه این تحقیق همچنین ابراز شده است که تورم سریع‌تر نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک درمقایسه با نمونه‌های تثبیت‌نشده به‌خاطر عمدتاً پروسه هیدراسیون آهک می‌باشد که پس از به آب انداختن نمونه‌ها شروع می‌شود. افزایش دما تا 20°C در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک دلیل اثبات شروع این پروسه ذکر شده است [7]. در اثر هیدراسیون آهک زنده، پروسه تورم آهک نیز رخ می‌دهد. افزایش دمای خاک تثبیت‌شده با آهک زنده باعث افزایش سرعت واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه افزایش سرعت سخت شدن خاک در اثر این واکنش‌ها می‌شود [9]. علی‌رغم تحقیقات انجام‌شده بر روی جنبه‌های مختلف اثر آهک روی رفتار خاک‌های تورمزا و با توجه به تأثیر متفاوت انواع مختلف آهک بر روی خاک‌های تورمزا به‌دلایل مختلف از جمله آهک زنده و شکفته، ناخالصی و غیره درمورد موضوع تأثیر انواع آهک بر روی مقدار فشار تورم و نرخ توسعه فشار تورم با زمان تاکنون بررسی گسترده صورت نپذیرفته است. در این تحقیق تأثیر آهک‌های زنده و



شکل ۱ دانه‌بندی بتونیت

جدول ۱ مشخصات فنی خاک مورد استفاده

ASTM Code	رطوبت طبیعی %	w	۸
D422-63	ریزتر از ۲ میکرون %	CF	۷۹
D854	چگالی	G _s	۲/۶۵
D4318	حد انقباض %	SL	۲۵
D4318	حد خمیری %	PL	۳۶
D4318	حد روانی %	LL	۱۵۵
D4318	نشانه خمیری %	PI	۱۱۹
D4318	میزان فعالیت	A	۱/۵
D2487-06	طبقه بندی متحد	USCS	CH

جدول ۲ آنالیز شیمیایی آهکها

نوع آهک	Ca(OH) ₂ %	CaO %	ناخالصی %
آهک هیدراته صنعتی	۹۳	-	۷
آهک زنده صنعتی	-	۹۴	۶
آهک هیدراته سنتی	۹۰	-	۱۰
آهک زنده سنتی	-	۹۹	۱

در این تحقیق از آهک هیدراته و زنده لرستان (صنعتی ساز) و آهک هیدراته و زنده هفتکل (سنتی ساز) برای اختلاط با بتونیت استفاده شد. نتیجه آنالیز شیمیایی این آهکها مطابق جدول (۲) می باشد.

آب. آب اگر حاوی مقادیر بالایی از نمکهای محلول باشد بر روند پیشرفت واکنشها تأثیر می گذارد. ترکیب شیمیایی آب مورد استفاده برای غرقاب نمودن نمونه روی مقدار تغییر حجم و فشار تورم مؤثر می باشد. خاک محلی که آب آن مقدار زیادی یونهای کلسیم دارد، کمتر از خاک مناطقی که آب آن مقدار زیادی یونهای سدیم دارد، متورم می شود. در این تحقیق از آب تصفیه شده استفاده شده است. علت این امر حذف اثرات شیمیایی آب در نمونهها می باشد.

آهک. در واقع هدف از تهیه آهک، تبدیل سنگ آن به حالت قابل مصرف می باشد. آهک زنده یا شکفته نشده یا آبندیده ماده ای سفیدرنگ و جذب کننده رطوبت است که از پخته شدن سنگ آهک به دست می آید و نشانه شیمیایی آن CaO می باشد. هرگاه بر روی کلسیم اکسید (آهک زنده) آب ریخته شود، بر اثر واکنش با آب، هیدراته می شود و گرما ایجاد می کند که موجب بخار شدن قسمتی از آب می شود. در این عمل، آهک بر اثر جذب آب، به صورت گرد سفیدی درمی آید که اصطلاحاً آهک مرده یا شکفته شده یا هیدراته نامیده می شود. تولید آهک هیدراته پس از ایجاد آهک زنده و در شرایط ساده تر و کم هزینه تری انجام می شود. بنابراین قسمت اصلی فرایند تولید آهک زنده می باشد [10, 11]. به طور کلی آهک به دو صورت سنتی و صنعتی تهیه می شود.

مراحل تهیه نمونه و آزمایش های انجام گرفته

برای اختلاط بهتر بتونیت با آهک، خاک بتونیت از الک نمرة ۴۰ عبور داده شد. خاک های مورد نیاز برای تراکم، ۲۴ ساعت قبل در گرم خانه با دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد. سپس نمونه ها مطابق جدول (۳)، وزن و با هم مخلوط شدند. در این تحقیق، تمام درصدهای آهک افزوده شده به بتونیت، نسبت به وزن خشک بتونیت می باشد نه نسبت به وزن کل مخلوط.

برای اختلاط بتونیت با آهک هیدراته از اختلاط تر و برای اختلاط با آهک زنده از اختلاط خشک استفاده شد. در اختلاط تر ابتدا آهک هیدراته با نسبت وزنی ۱ به ۳ با آب مخلوط می شود و سپس دوغاب ساخته شده برای مخلوط شدن با خاک به بتونیت خشک اضافه می شود. بعد از آن مقدار آب اضافی مورد نیاز برای رسیدن مخلوط بتونیت-آهک هیدراته به درصد رطوبت مورد نیاز اضافه می گردد.

در اختلاط خشک آهک زنده به صورت خشک به خاک بتونیت خشک اضافه می شود و سپس مقدار آب مورد نیاز اضافه می گردد. این کار به منظور جلوگیری از شکفته شده آهک زنده قبل از اختلاط با خاک صورت می گیرد. در هر دو اختلاط سعی بر آن شد که رطوبت در

کل مخلوط به صورت یکنواخت پخش شود.

آزمایش های انجام گرفته در این تحقیق به سه دسته تقسیم بندی می شوند:

دسته اول: آزمایش های مقدماتی بر روی نمونه ها (حدود اتربرگ و تراکم به روش پراکتور استاندارد طبق استاندارد ASTM D 698).

دسته دوم: آزمایش تورم با حجم ثابت برای ارزیابی فشار تورم نمونه ها طبق استاندارد ASTM D 4546.

دسته سوم: آزمایش باربرداری به روش کنترل کرنش و کنترل تنش.

از نقطه نظر اختلاط با آهک نمونه های مورد بررسی به سه گروه عمده تقسیم می شوند:

۱- نمونه های بدون آهک درجا و بدون عمل آوری.

۲- نمونه هایی که با اختلاط تر با آهک مخلوط شده اند (شامل هر دو آهک هیدراته صنعتی و سنتی با عمل آوری ۰، ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه).

۳- نمونه هایی که با اختلاط خشک با آهک مخلوط شده اند (شامل هر دو آهک زنده صنعتی و سنتی با عمل آوری ۰، ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه). اختلاط خشک به منظور جلوگیری از هیدراته شدن آهک زنده، قبل از مخلوط شدن با خاک می باشد.



شکل ۲ عمل آوری نمونه های متراکم شده

آزمایش تورم با حجم ثابت

در روش تورم با حجم ثابت هدف یافتن بیشترین فشار لازم برای ثابت نگهداشتن ارتفاع اولیه نمونه بعد از غرقاب نمودن آن است. در این روش نمونه درون دستگاه اذئومتر قرار داده می‌شود و سربارها به صورت گام‌های بارگذاری تا رسیدن به فشار تورم نهایی اعمال می‌شوند. در این روش ابتدا سربار کوچکی در حدود ۱۰ کیلوپاسکال به نمونه اعمال می‌شود تا فشردگی (خروج هوا) صورت گیرد، بلافاصله پس از پایان فشردگی نمونه شروع به جذب آب می‌کند و متورم می‌شود. تورم نمونه تا رسیدن به حجم اولیه (ارتفاع اولیه نمونه) ادامه پیدا می‌کند و به محض رسیدن به ارتفاع اولیه سربار بعدی (حدود ۱۰ کیلوپاسکال) به نمونه اعمال می‌شود و دوباره چرخه فشردگی و تورم تحت سربار اعمالی صورت می‌گیرد؛ این روند آن قدر ادامه پیدا می‌کند تا نمونه بتواند به تمام بارهای اعمالی غلبه کند. به سربار نهایی وارد شده به نمونه، فشار تورم اطلاق می‌شود.

باربرداری به صورت کنترل کرنش و کنترل تنش

پس از اتمام آزمایش حجم ثابت، برای به دست آوردن شاخص (نشانه) باربرداری شروع به باربرداری از نمونه‌ها می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد برای هر ترکیب بتنویت +۳٪ آهک، دو نمونه تهیه شد و فشار تورم آنها به دست آمد. در پایان آزمایش فشار تورم، برای هر دو نمونه همه ترکیبات، باربرداری به دو صورت کنترل کرنش و کنترل تنش صورت گرفت. شیب خطوط باربرداری در منحنی تخلخل - لگاریتم فشار تورم به عنوان شاخص تورم کنترل کرنش و کنترل تنش موسوم است.

در روش باربرداری با کنترل کرنش، پس از برداشتن سربارها به نمونه اجازه تورم تا مقدار مشخص (۲۵/۰ میلی‌متر) داده می‌شود. به محض رسیدن ارتفاع نمونه به این مقدار، از دوباره شروع به اندازه‌گیری فشار تورم با حجم ثابت می‌شود و فشار تعادل نهایی به دست می‌آید. سپس باربرداری مجدد از نمونه انجام می‌شود تا نمونه

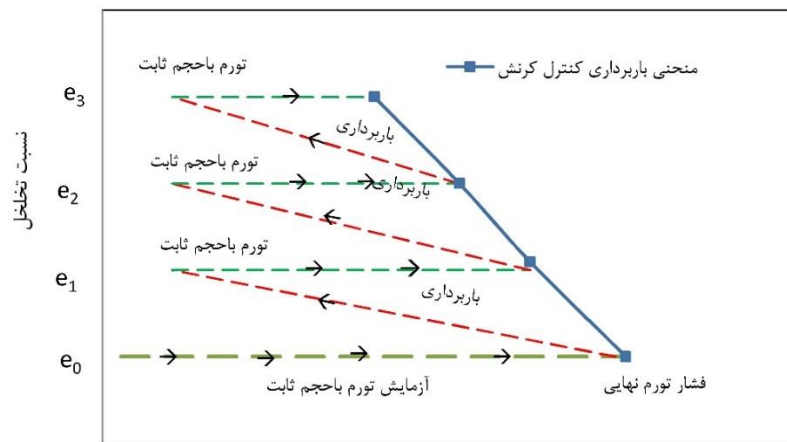
باتوجه به این‌که واکنش‌های شیمیایی پوزولانی بین آهک و خاک رس زمانبر است و همچنین به منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری نمونه‌ها روی مقادیر پارامترهای مربوط، تصمیم گرفته شد که تعدادی از نمونه‌ها قبل از آزمایش فشار تورم تحت عمل‌آوری در محیط مرطوب قرار گیرند. بدین منظور، نمونه‌های با عمل‌آوری بعد از مخلوط کردن و تراکم آنها و قبل از انجام آزمایش فشار تورم، درون ورق‌های پلاستیکی گذاشته شدند و برای عمل‌آوری درون ظروف پر از آب در دمای آزمایشگاه به مدت ۱، ۷، ۲۸، ۹۰ روز قرار گرفتند (شکل ۲). لازم به ذکر است که نمونه‌های درجا دو ساعت بعد از مخلوط کردن و تراکم آنها مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌های انجام شده مطابق جدول (۳) می‌باشد.

بر طبق مطالعات پیشین محققان، ۳٪ آهک به عنوان درصد بهینه برای کاهش فشار تورم خاک رس به دست آمده است [4, 5, 9, 10]؛ بنابراین از ۳٪ آهک برای اختلاط با بتنویت استفاده شد. برای هر ترکیب بتنویت +۳٪ آهک، دو نمونه تهیه شد و فشار تورم آنها به دست آمد. در پایان آزمایش فشار تورم، برای هر دو نمونه همه ترکیبات، باربرداری به دو صورت کنترل کرنش و کنترل تنش صورت گرفت.

به منظور نمونه‌گیری حلقه تحکیم بر روی نمونه متراکم شده قرار داده می‌شود. برای اعمال فشار یکنواخت به حلقه و نمونه از جک هیدرولیکی استفاده می‌شود. به علت افزایش حجم نمونه در طول آزمایش تصمیم بر آن شد تا ارتفاع نمونه حدود پنج میلی‌متر کمتر از ارتفاع حلقه در نظر گرفته شود تا نمونه فضای کافی برای افزایش ارتفاع داشته باشد. برای این منظور صفحه‌ای از جنس پلاستیک فشرده طوری تراش داده شد که روی آن، برجستگی استوانه‌ای شکل به قطر حلقه تحکیم و ارتفاع پنج میلی‌متر ایجاد گردد. در این تحقیق از دو رینگ تحکیم با قطرهای ۵ و ۷/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر استفاده شده است.

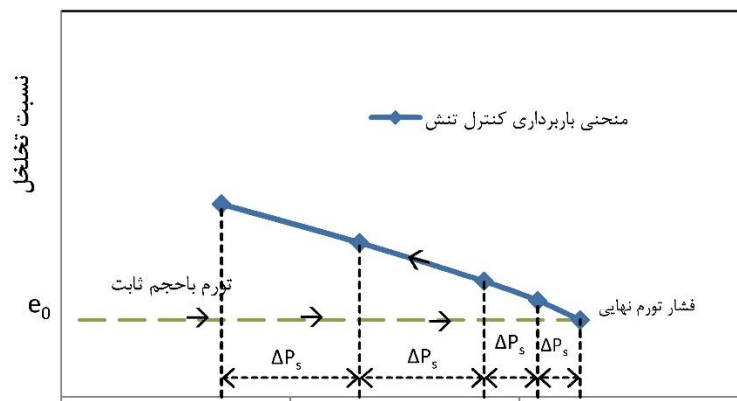
به دست می آید (شکل ۳). روش باربرداری با کنترل تنش همان روش معمول و رایج باربرداری می باشد، با این توجه که مقدار سربار باربرداری شده (ΔP_s) در همه مراحل از باربرداری، یکسان می باشد. در هر مرحله از باربرداری فشار موجود بر روی نمونه و میزان تغییرات ارتفاع نمونه، معرف یک نقطه از منحنی نسبت تخلخل - فشار تورم می باشد (شکل ۴).

به اندازه همان مقدار مشخص قبلی (۰/۲۵ میلی متر) متورم شود و با رسیدن به آن مقدار فشار تورم آن مرحله نیز به دست می آید و این چرخه به همین صورت ادامه پیدا می کند. در هر مرحله از باربرداری با کنترل کرنش، فشار موجود بر روی نمونه و نسبت تخلخل آن مرحله از نمونه معرف یک نقطه از منحنی تخلخل - فشار تورم می باشد. با رسم این نقاط منحنی باربرداری با کنترل کرنش



لگاریتم فشار تورم

شکل ۳ مسیر انجام آزمایش باربرداری با کنترل کرنش



لگاریتم فشار تورم

شکل ۴ مسیر انجام آزمایش باربرداری با کنترل تنش

جدول ۳ چارت آزمایش‌های انجام‌شده

نمونه	ترکیبات	زمان عمل‌آوری (روز)				
		درجا	۱	۷	۲۸	۹۰
۱ تا ۲	بتونیت	✓	-	-	-	-
۳ تا ۱۲	بتونیت+۳٪ آهک هیدراته صنعتی	✓	✓	✓	✓	✓
۱۳ تا ۲۲	بتونیت +۳ درصد آهک زنده صنعتی	✓	✓	✓	✓	✓
۲۳ تا ۳۲	بتونیت +۳٪ آهک هیدراته سنتی	✓	✓	✓	✓	✓
۳۳ تا ۴۲	بتونیت +۳٪ آهک زنده سنتی	✓	✓	✓	✓	✓

جدول ۴ حدود اتربرگ نمونه‌های آزمایش‌شده

نمونه	حد روانی (%)	حد خمیری (%)	نشانه خمیری (%)
بتونیت	۱۵۵	۳۶	۱۱۹
بتونیت+۳٪ آهک هیدراته صنعتی	۱۴۵	۶۴	۸۱
بتونیت+۳٪ آهک زنده صنعتی	۱۸۵	۶۸	۱۱۷
بتونیت+۳٪ آهک هیدراته سنتی	۱۲۵	۶۲	۶۳
بتونیت+۳٪ آهک زنده سنتی	۱۷۰	۶۵	۱۰۵

نتایج آزمایش‌ها

به جذب رطوبت دارد، می‌تواند باشد. درحالی‌که حد روانی در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراته نسبت به خاک پایه کاهش را نشان می‌دهد، که دلیل آن را می‌توان در افزایش غلظت کاتیون‌های کلسیم آهک در اطراف ذرات رس و در نتیجه افزایش اندازه دانه‌های خاک و زیاد شدن فاصله بین این ذرات دانست که باعث کاهش حد روانی شده است [12]. حد خمیری همه نمونه‌های تثبیت‌شده با انواع آهک نسبت به خاک پایه افزایش یافته است. در کوتاه‌مدت واکنش تبادل کاتیونی بین ذرات خاک و آهک صورت می‌گیرد که باعث تغییر ساختار خاک به حالت مجتمع یا فولوکوله می‌شود و این ساختار

حدود اتربرگ. نتایج آزمایش‌های حد روانی، حد خمیری و همچنین نشانه خمیری نمونه‌ها در جدول (۴) آورده شده است. براساس نتیجه نشانه خمیری بتونیت و باتوجه به منحنی دانه‌بندی آن (شکل ۱)، این خاک برطبق سیستم متحد در گروه CH می‌باشد. براساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش حدود اتربرگ، تمام نمونه‌ها دارای پتانسیل تورمی بالایی می‌باشند. حد روانی در هر دو نمونه تثبیت‌شده با آهک زنده صنعتی و سنتی نسبت به خاک پایه افزایش یافته است، که دلیل آن جذب درصدی از رطوبت به‌وسیله آهک زنده که تمایل زیادی

آهک هیدراته (صنعتی و سنتی) در موقعیت پایین تر (کاهش وزن مخصوص خشک) و همچنین در سمت راست (افزایش درصد رطوبت) قرار گرفته اند. این افزایش در درصد رطوبت بهینه در نمونه های تثبیت شده با آهک زنده نسبت به نمونه های تثبیت شده با آهک هیدراته به دلیل آن است که در طی واکنش های یون کلسیم با خاک رس، CaO (اکسید کلسیم) هیدراته می شود و باعث مصرف مقدار مشخصی از آب می گردد [15].

نتایج آزمایش تورم با حجم ثابت

باتوجه به دسته بندی آزمایش های صورت گرفته مطابق جدول (۳) برای هر ترکیب دو نمونه برای آزمایش تورم با حجم ثابت تهیه شد. سپس از نتایج این دو آزمایش میانگین گیری شد و نمودار فشار تورم - لگاریتم زمان ترکیب مورد نظر به دست آمد. نمودار فشار تورم در برابر لگاریتم زمان بنتونیت خالص در شکل (۶) نمایش داده شده است.

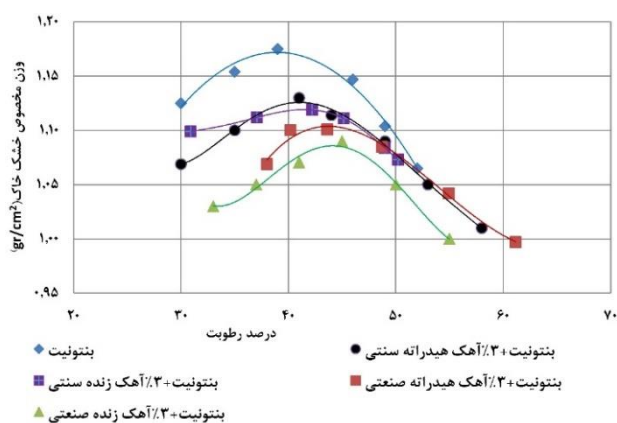
تأثیر انواع آهک بر فشار و زمان تورم نمونه ها. تأثیر انواع آهک بر فشار و زمان تورم بنتونیت در زمان های عمل آوری ۰، ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ نشان می دهد که افزودن آهک (هر ۴ نوع آهک) به بنتونیت باعث کاهش فشار تورم شده است. در واقع اضافه کردن آهک به خاک رس باعث افزایش یون کلسیم در محیط می شود که این یون جایگزین یون های سدیم و پتاسیم خاک رس می شود و این یون های جایگزین شده وابستگی کمتری به آب دارند و باعث بهبودی خواص خمیری و کاهش فشار تورم خاک رس می شوند.

علت کاهش فشار و زمان تورم نمونه های با عمل آوری درجا (عمل آوری ۲ ساعت) را می توان در تبادل کاتیونی که جزء واکنش های کوتاه مدت خاک رس و آهک است، دانست.

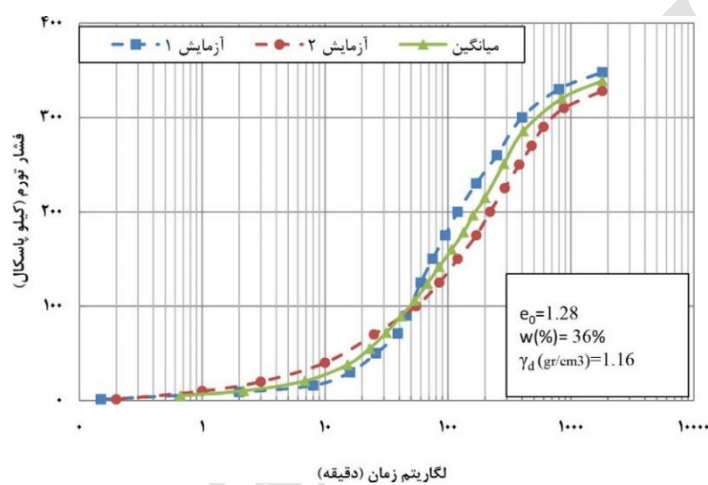
در رطوبت بالایی به حالت خمیری درمی آید [13]. از سوی دیگر هر چه درصد ذرات رس بیشتر باشد، باعث می گردد خاک دیرتر و در درصد رطوبت پایین تری ترک بخورد؛ در نتیجه برای نمونه های تثبیت شده با آهک به دلیل داشتن درصد ذرات رس پایین تر نسبت به بنتونیت خالص درصد رطوبت ترک خوردن (حد خمیری) افزایش می یابد. نشانه خمیری همه نمونه های تثبیت شده با انواع آهک نسبت به خاک پایه کاهش یافته است. جذب یون کلسیم توسط ذرات رسی و ایجاد توازن نسبی میان بارهای منفی و مثبت باعث کاهش تمایل ذرات رسی به جذب مولکول های آب می شود که نتیجه آن کاهش نشانه خمیری خاک می باشد [14].

نتایج آزمایش تراکم استاندارد

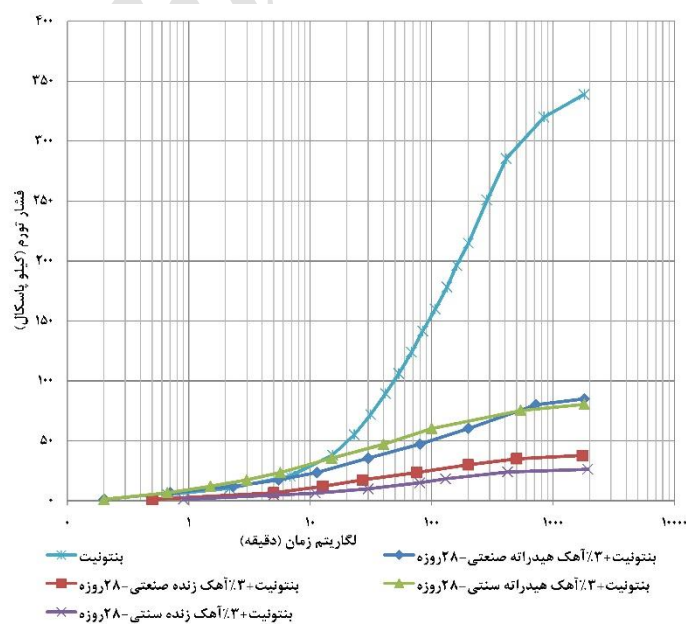
مطابق شکل (۵) منحنی های تراکم همه نمونه های تثبیت شده با انواع آهک نسبت به خاک پایه پایین تر (وزن مخصوص خشک کمتر) و همچنین متمایل به سمت راست (درصد رطوبت بیشتر) قرار گرفته اند. در نتیجه در نمونه های تثبیت شده با آهک وزن مخصوص خشک ماکزیمم نسبت به خاک پایه کاهش و درصد رطوبت بهینه آنها افزایش یافته است. آهک و خاک رس به سرعت واکنش می دهند و باعث تغییر ساختار خاک می شوند و وزن مخصوص خشک کاهش می یابد. همچنین آهک اساساً از خاک سبک تر است و وزن مخصوص خشک را کاهش می دهد [15]. اضافه کردن آهک به خاک باعث افزایش خلل و فرج خاک می شود که خود عاملی برای کاهش وزن مخصوص خشک است [16]. اضافه کردن آهک باعث افزایش درصد رطوبت بهینه نمونه ها می شود. این افزایش به علت جذب درصدی از رطوبت برای ایجاد واکنش های تبادل کاتیونی و پوزولانی بین آهک و خاک رس می باشد [17]. از طرفی مطابق شکل منحنی های تراکم مربوط به نمونه های بنتونیت تثبیت شده با آهک زنده (صنعتی و سنتی) نسبت به نمونه های اصلاح شده با



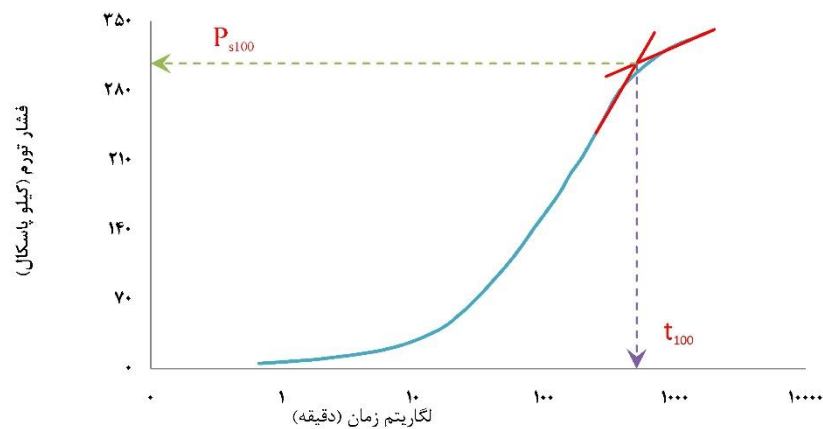
شکل ۵ منحنی تراکم بنتونیت و بنتونیت تثبیت شده با آهک های هیدراته و زنده صنعتی



شکل ۶ نمودار فشار تورم- لگاریتم زمان بنتونیت خالص



شکل ۷ مقایسه زمان و فشار تورم بنتونیت خالص با بنتونیت تثبیت شده با انواع آهک با عمل آوری ۲۸ روزه

شکل ۸ تعیین P_{s100} و t_{100} برای بتونیت خالص

جدول ۵ نتایج آزمایش تراکم نمونه‌ها

نمونه	ω_{opt} (%)	$\gamma_{d(max)}$ (gr/cm ³)
بتونیت	۳۹	۱/۱۷
بتونیت+۳/آهک هیدراته صنعتی	۴۴	۱/۱۱
بتونیت+۳/آهک زنده صنعتی	۴۵	۱/۰۹
بتونیت+۳/آهک هیدراته سنتی	۴۱	۱/۱۳
بتونیت+۳/آهک زنده سنتی	۴۲	۱/۱۲

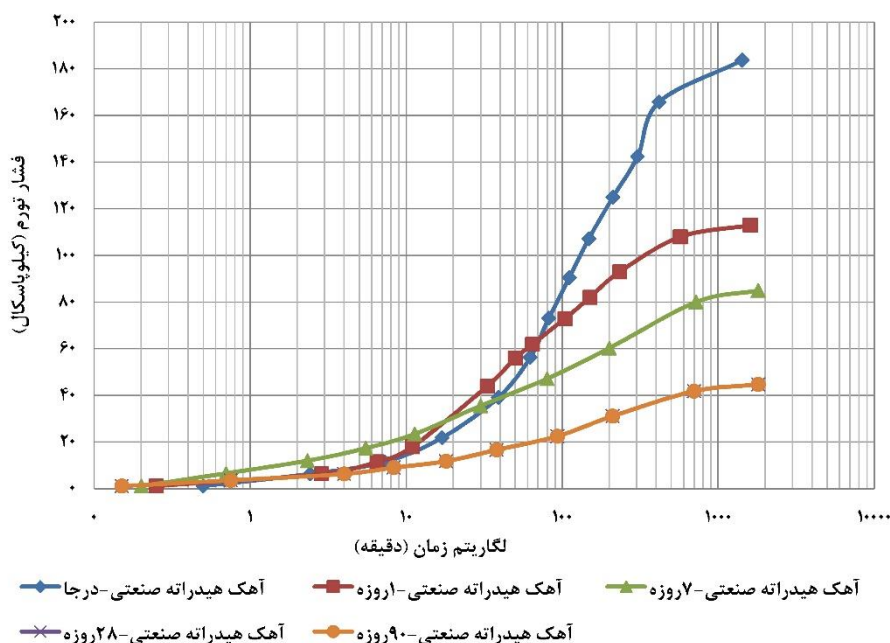
بررسی مقدار فشار تورم اولیه (PS_{100}) و زمان فشار تورم اولیه (t_{100}). نحوه تعیین مقدار فشار تورم اولیه (PS_{100}): آخرین نقطه فشار تورم که از تقاطع خط مماس بر خمیدگی و خط فشار تورم ثانویه در نمودار فشار تورم-لگاریتم زمان حاصل می‌شود (شکل ۸). زمان فشار تورم اولیه (t_{100}) که زمان متناظر با مقدار فشار تورم اولیه می‌باشد به دست می‌آید.

بررسی اثر زمان عمل‌آوری بر مقدار و زمان فشار تورم. اثر زمان عمل‌آوری بر زمان و فشار تورم نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک بررسی شده است. در شکل (۹) منحنی‌های توسعه فشار تورم با زمان برای نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراته صنعتی به عنوان نمونه و در

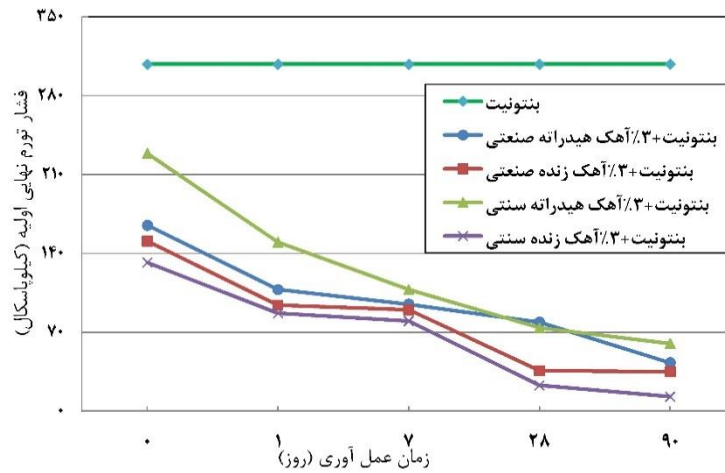
واکنش تبدالی معمولاً باعث تغییرات مهمی در مشخصات فیزیکی و شیمیایی رس می‌شود. در این واکنش تبدالی یون‌های بین لایه‌ای رس مانند سدیم با یون کلسیم آهک جایگزین می‌شوند و باعث کاهش تمایل ذرات خاک به جذب آب و در نهایت ایجاد یک ساختار مجتمع و لخته‌ای می‌شود [7]. این واکنش سریع است و در ساعات اولیه اختلاط مواد انجام می‌شود. با افزایش زمان عمل‌آوری واکنش‌های پوزولانی باعث ایجاد مواد جدید سم‌تاسیون شامل سیلیکات و آلومینات کلسیم هیدراته می‌شود که با مرور زمان مقدار آنها افزایش می‌یابد و باعث به هم چسبیده شدن بیشتر ذرات رس به یکدیگر می‌شود [4, 7]. تأثیر انواع آهک با عمل‌آوری ۲۸ روزه بر زمان و فشار تورم نمونه‌ها در شکل (۷) به عنوان نمونه نشان داده شده است.

عمل آوری طولانی، زمان بیشتری برای تشکیل واکنش‌ها در اختیار می‌گذارد؛ در نتیجه استخوان‌بندی قوی‌تری از دانه‌ها به دلیل اضافه شدن مواد جدید ناشی از واکنش‌های پوزولانی ایجاد می‌شود [4, 7]. در این حالت ساختار خاک ریزدانه به ساختار مجتمع تبدیل می‌شود. در این ساختار ذرات رس به همدیگر پیوند داده می‌شوند. طی مجتمع شدن در این ساختار، ذرات رس به همدیگر توسط مواد سممتاسیون می‌چسبند؛ در نتیجه، اندازه ذرات رس بزرگ‌تر می‌شوند و از لحاظ مکانیکی، رفتاری شبیه لای پیدا می‌کنند [14]. به علاوه این واکنش باعث تغییر ساختار رس از ماده‌ای چسبنده و ریزدانه، به ماده‌ای دانه‌ای می‌شود. خاک نیز در این ساختار وابستگی کمتری به آب دارد و باعث کاهش تورم خاک می‌شود [7]. دلیل دیگر کاهش فشار تورم با افزایش زمان عمل آوری، ادامه واکنش‌های پوزولانی (تشکیل هیدرات سیلیکات و آلومینات کلسیم) با گذشت زمان می‌باشد.

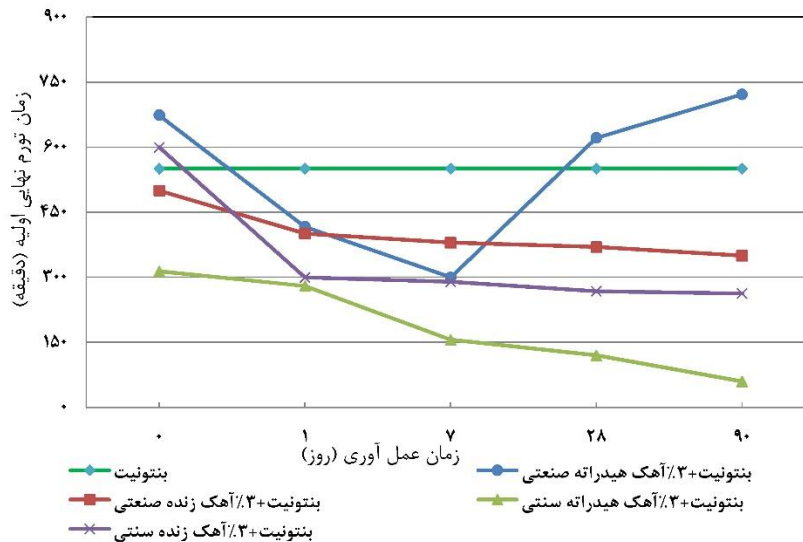
شکل‌های (۱۰ و ۱۱) مقدار فشار تورم اولیه (P_{s100}) و مقدار زمان رسیدن به فشار تورم اولیه (t_{100}) برای کلیه نمونه‌های آزمایش شده ارائه شده است. مشاهده می‌شود برای نمونه‌های تثبیت شده با افزایش زمان عمل آوری، مقدار فشار تورم و زمان رسیدن به فشار تورم اولیه نمونه‌ها کاهش یافته است. با بررسی منحنی‌های توسعه زمانی فشار تورم در شکل (۹) مشخص می‌گردد که نمونه‌های تثبیت شده با آهک در مقایسه با نمونه بتونیت خالص نرخ سریع‌تری را نشان می‌دهند و این موضوع در زمان‌های عمل آوری مشهودتر می‌باشد. این می‌تواند به دلیل افزایش در نفوذپذیری نمونه‌ها در اثر عمل تجمع ذرات خاک ناشی از حضور یون کلسیم باشد. سفت شدن خاک با زمان عمل آوری نیز می‌تواند دلیل دیگری بر افزایش نرخ توسعه فشار تورم با زمان با افزایش زمان عمل آوری باشد. یکی از دلایل کاهش در مقدار فشار تورم با زمان عمل آوری را می‌توان این‌گونه دانست که



شکل ۹ مقایسه اثر زمان عمل آوری بر زمان و فشار تورم بتونیت + ۳٪ آهک هیدراته صنعتی



شکل ۱۰ مقایسه P_{s100} نمونه‌های بتونیت تثبیت شده با انواع آهک در زمان‌های مختلف عمل آوری



شکل ۱۱ مقایسه t_{100} نمونه‌های بتونیت تثبیت شده با انواع آهک در زمان‌های مختلف عمل آوری

از طرفی از بین نمونه‌های بتونیت تثبیت شده با آهک، نمونه‌های دارای آهک زنده سنتی و آهک هیدراته سنتی به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار P_{s100} در هر پنج زمان عمل آوری می‌باشند. به علاوه، روند کاهش P_{s100} برای هر چهار نمونه روند منظمی است (شکل ۱۰). تفاوت در مقدار فشار تورم می‌تواند ناشی از وجود ناخالصی‌ها نسبت تخلخل متفاوت و واکنش‌های پوزولانی متفاوت در نمونه‌ها باشد. تغییرات مقادیر زمان

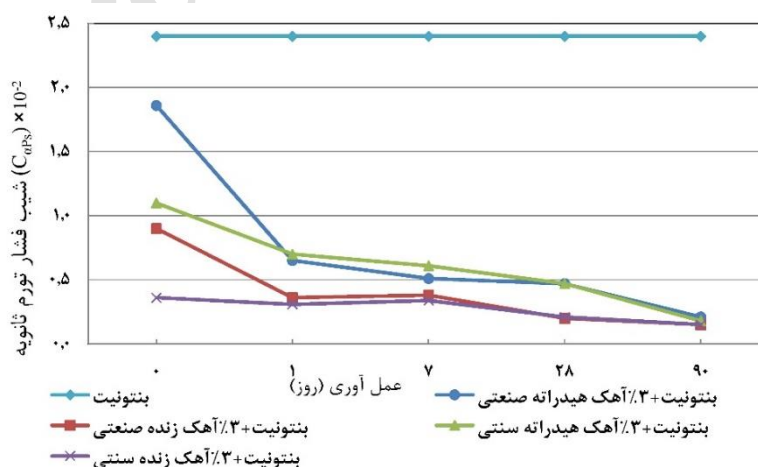
مواد تشکیل شده موجب پیوند سمتاسیون بین ذرات رس می‌شوند. از سوی دیگر کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها با افزایش زمان عمل آوری [7]، باعث کاهش جذب آب نمونه‌ها می‌شود؛ که نتیجه آن کاهش در مقدار فشار تورم می‌باشد. تأثیر زمان عمل آوری بر زمان و فشار تورم نمونه‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. در شکل (۹) مقدار فشار تورم اولیه (P_{s100}) با افزودن آهک به بتونیت و با افزایش مدت عمل آوری به شدت کاهش یافته است.

می‌باشد. از طرفی با گذشت زمان و در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه آهک‌ها، مقدار شیب فشار تورم ثانویه برای همه آهک‌ها تقریباً یکسان مشاهده شد. شیب فشار تورم ثانویه با زمان نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زنده صنعتی کمتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراته صنعتی می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً نیز گفته شد، آهک زنده نسبت به آهک هیدراته در کاهش فشار تورم بهتر عمل می‌کند. البته با گذشت زمان و در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه آهک، مقدار $C_{\alpha_{PS}}$ برای هر دو یکسان می‌شود. همچنین با گذشت زمان عمل‌آوری این مقدار برای هر دو آهک کاهش می‌یابد.

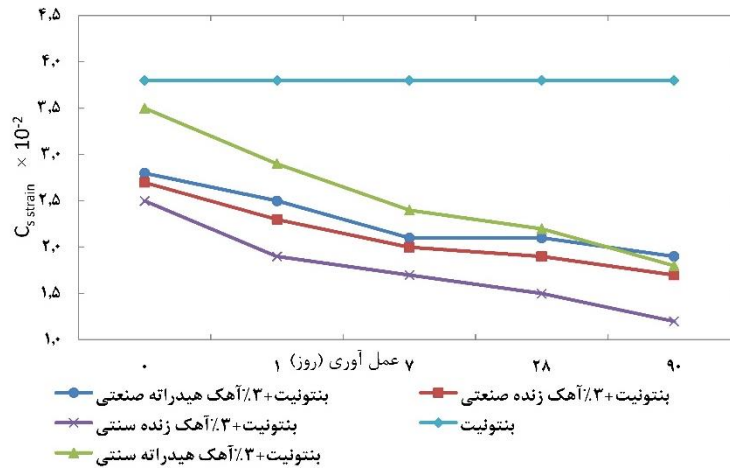
تعیین شاخص تورم کنترل تنش و کنترل کرنش نمونه‌ها. همان‌گونه که قبلاً نیز گفته شد، در پایان آزمایش تورم با حجم ثابت باربرداری برای هر کدام از ترکیبات به دو روش کنترل کرنش و کنترل تنش صورت گرفت در این نمودارها خط افقی نشان‌دهنده آزمایش تورم با حجم ثابت و دو خط مورب نشان‌دهنده منحنی باربرداری هستند. شیب خطوط باربرداری معرف شاخص تورم می‌باشد. نمودار باربرداری با کنترل کرنش و کنترل تنش بنتونیت خالص در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

رسیدن به فشار تورم اولیه (t_{100}) با مدت زمان عمل‌آوری در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. مقدار t_{100} در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک‌های هیدراته و زنده سنتی و آهک زنده صنعتی با گذشت زمان عمل‌آوری، کاهش یافته است. در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک هیدراته صنعتی در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه به جای کاهش مقدار t_{100} ، افزایش در این مقدار مشاهده می‌شود. این افزایش احتمالاً به دلیل تأخیر در انجام واکنش‌های پوزولانی درازمدت برای آهک هیدراته صنعتی و بنتونیت است. همچنین از بین نمونه‌های بنتونیت تثبیت‌شده با آهک، نمونه‌های دارای آهک هیدراته سنتی دارای کمترین مقدار t_{100} می‌باشند. برخلاف روند تغییرات P_{s100} نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری آنها، این روند برای t_{100} نمونه‌ها روند منظمی نمی‌باشد.

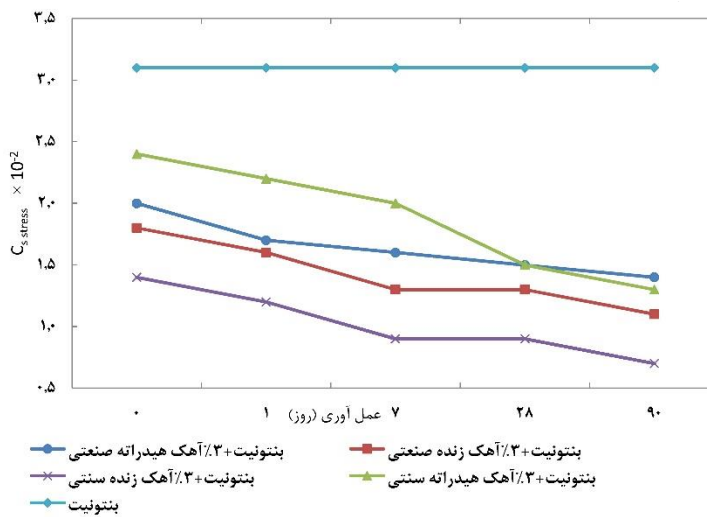
شیب تغییرات فشار تورم ثانویه با زمان ($C_{\alpha_{PS}}$). در شکل (۱۲) شیب تغییرات فشار تورم ثانویه با زمان ($C_{\alpha_{PS}}$) با زمان عمل‌آوری نمایش داده شده است. افزودن آهک باعث کاهش شدیدی در مقدار شیب فشار تورم ثانویه با زمان می‌شود. آهک زنده سنتی دارای کمترین مقدار $C_{\alpha_{PS}}$ در زمان‌های عمل‌آوری مختلف



شکل ۱۲ مقایسه $C_{\alpha_{PS}}$ نمونه‌های بنتونیت تثبیت‌شده با انواع آهک در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



شکل ۱۴ مقایسه تغییرات شاخص تورم کنترل کرنش نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری



شکل ۱۵ مقایسه تغییرات شاخص تورم کنترل تنش نمونه‌ها با زمان عمل‌آوری

می‌شود و سپس بارگذاری در شرایط حجم ثابت اعمال می‌شود که خود این بارگذاری از بارهای کوچک شروع می‌شود تا به سربار نهایی برسد. در نتیجه در این مرحله (سربارهای کوچک‌تر از حالت کنترل تنش) به نمونه اجازه جذب رطوبت بیشتری داده می‌شود. میزان شاخص تورم با زمان عمل‌آوری کاهش می‌یابد.

خلاصه نتایج نمونه‌های آزمایش‌شده

در جدول (۶) نتایج کلیه آزمایش‌های انجام‌گرفته به‌صورت خلاصه شده جمع‌آوری شده است. طبق این جدول مقدار فشار تورم بتونیت خالص بعد از مخلوط

در شکل‌های (۱۴ و ۱۵) به‌ترتیب تغییرات شاخص تورم باربرداری با کنترل کرنش ($G_{s\text{strain}}$) و شاخص تورم باربرداری با کنترل تنش ($G_{s\text{stress}}$) با مدت زمان عمل‌آوری نمایش داده شده است. با مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود که شاخص تورم باربرداری با کنترل کرنش از شاخص تورم باربرداری با کنترل تنش بزرگ‌تر می‌باشد. این مسئله شاید به این دلیل است که در روش باربرداری با کنترل تنش نمونه تحت سرباری شروع به تورم می‌کند (این سربار کمتر از سربار نهایی است)؛ در صورتی‌که در روش باربرداری با کنترل کرنش با برداشتن کامل سربارها اجازه تورم به نمونه‌ها داده

واکنش‌های پوزولانی متفاوت در نمونه‌ها باشد. چنانچه طبق جدول (۳) میزان ناخالصی در آهک زنده سنتی ۱ درصد است و در صدهای بالای کاهش در مقدار فشار تورم متعلق به نمونه‌های تثبیت‌شده با این نوع آهک می‌باشد.

شدن با ۳ درصد آهک‌های مختلف به‌اندازه ۵۶-۲۶ درصد بدون عمل‌آوری و ۹۶-۸۱ درصد بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری کاهش پیدا کرده است. درصد متفاوت کاهش فشار تورم برای آهک‌های مختلف ممکن است به علت وجود ناخالصی در آنها و نسبت تخلخل‌های متفاوت و

جدول ۶ خلاصه نتایج نمونه‌های آزمایش شده

نمونه‌ها	P_{100} (kPa)	t_{100} (min)	$C_{\alpha_{ps}}$	$C_{S_{strain}}$	$C_{S_{stress}}$	$\frac{Y_d}{(g^T/cm^3)}$	$\omega(\%)$	e_0
بتونیت	۳۰۸	۵۵۱	۰/۰۲۴	۰/۰۲۴	۰/۰۳۱	۱/۱۶۵	۳۷/۰	۱/۲۸
بتونیت+۳/آهک هیدراته صنعتی-درجا	۱۶۵	۶۷۴	۰/۰۱۸۶	۰/۰۲۸	۰/۰۲	۱/۰۹۸	۴۱/۲	۱/۲۲
بتونیت+۳/آهک زنده صنعتی-درجا	۱۵۱	۵۰۰	۰/۰۰۹	۰/۰۲۷	۰/۰۱۸	۱/۰۸	۴۲/۵	۱/۱۳
بتونیت+۳/آهک هیدراته سنتی-درجا	۲۲۹	۳۱۴	۰/۰۱۱	۰/۰۳۵	۰/۰۲۴	۱/۱۲	۳۸/۰	۱/۱۵
بتونیت+۳/آهک زنده سنتی-درجا	۱۳۲	۶۰۰	۰/۰۰۳۶	۰/۰۲۵	۰/۰۱۴	۱/۱۱۸	۳۹/۴	۱/۱۹
بتونیت+۳/آهک هیدراته صنعتی-۱روزه	۱۰۸	۴۱۷	۰/۰۰۶۵	۰/۰۲۵	۰/۰۱۷	۱/۱	۴۱/۵	۱/۱۱
بتونیت+۳/آهک زنده صنعتی-۱روزه	۹۴	۴۰۱	۰/۰۰۳۶	۰/۰۲۳	۰/۰۱۶	۱/۰۸	۴۲/۰	۱/۰۹
بتونیت+۳/آهک هیدراته سنتی-۱روزه	۱۵۰	۲۸۰	۰/۰۰۷	۰/۰۲۹	۰/۰۲۲	۱/۱۲	۳۸/۰	۱/۱۱
بتونیت+۳/آهک زنده سنتی-۱روزه	۸۷	۳۰۰	۰/۰۰۳۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۲	۱/۱۲	۳۹/۵	۱/۰۰
بتونیت+۳/آهک هیدراته صنعتی-۷روزه	۹۵	۳۰۰	۰/۰۰۵۱	۰/۰۲۱	۰/۰۱۶	۱/۰۹۵	۴۰/۸	۱/۳۰
بتونیت+۳/آهک زنده صنعتی-۷روزه	۹۰	۳۸۰	۰/۰۰۳۸	۰/۰۲۰	۰/۰۱۳	۱/۰۹	۴۲/۳	۱/۱۷
بتونیت+۳/آهک هیدراته سنتی-۷روزه	۱۰۸	۱۵۶	۰/۰۰۶۱	۰/۰۲۴	۰/۰۲۰	۱/۱۲۰	۳۸/۰	۱/۱۰
بتونیت+۳/آهک زنده سنتی-۷روزه	۸۰	۲۹۰	۰/۰۰۳۴	۰/۰۱۷	۰/۰۰۹	۱/۱۱۶	۳۸/۸	۱/۳۰
بتونیت+۳/آهک هیدراته صنعتی-۲۸روزه	۷۹	۶۲۲	۰/۰۰۴۷	۰/۰۲۱	۰/۰۱۵	۱/۰۸	۴۰/۵	۱/۱۸
بتونیت+۳/آهک زنده صنعتی-۲۸روزه	۳۶	۳۷۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱۹	۰/۰۱۳	۱/۰۷	۴۱/۵	۱/۲۹
بتونیت+۳/آهک هیدراته سنتی-۲۸روزه	۷۴	۱۲۰	۰/۰۰۴۷	۰/۰۲۲	۰/۰۱۵	۱/۱۲	۳۸/۰	۱/۱۹
بتونیت+۳/آهک زنده سنتی-۲۸روزه	۲۳	۲۶۸	۰/۰۰۲۱	۰/۰۱۵	۰/۰۰۹	۱/۱۱۶	۳۸/۵	۱/۰۹
بتونیت+۳/آهک هیدراته صنعتی-۹۰روزه	۴۳	۷۲۲	۰/۰۰۲۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۴	۱/۰۸۰	۴۰/۵	۱/۲۰
بتونیت+۳/آهک زنده صنعتی-۹۰روزه	۳۵	۳۵۰	۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۷	۰/۰۱۱	۱/۸۰	۴۲/۰	۱/۲۲
بتونیت+۳/آهک هیدراته سنتی-۹۰روزه	۶۰	۶۰	۰/۰۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۳	۱/۱۲۰	۳۸/۰	۱/۲۳
بتونیت+۳/آهک زنده سنتی-۹۰روزه	۱۳	۲۶۳	۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷	۱/۱۱۶	۳۸/۸	۱/۳۰

- تغییرات در عمل‌آوری ۲۸ روزه به ۹۰ روزه (۳٪) می‌باشد.
- ۴- افزایش زمان عمل‌آوری هر چهار آهک باعث افزایش در کاهش فشار تورم نمونه‌ها می‌شود.
- ۵- رفتار آهک هیدراته صنعتی (دارای ۹۳/۳٪ هیدروکسید کلسیم) در کاهش فشار تورم نمونه‌ها نسبت به آهک هیدراته سنتی (دارای ۹۰/۱٪ هیدروکسید کلسیم) بهتر می‌باشد.
- ۶- رفتار آهک زنده سنتی (دارای ۹۸/۸٪ اکسید کلسیم) در کاهش فشار تورم نمونه‌ها نسبت به آهک زنده صنعتی (دارای ۹۴٪ اکسید کلسیم) بهتر می‌باشد.
- ۷- شیب (سرعت) فشار تورم ثانویه به دست آمده برای بنتونیت خالص در این تحقیق ۰/۰۲۴ می‌باشد. افزودن آهک‌های هیدراته صنعتی، زنده صنعتی، هیدراته سنتی و زنده سنتی به بنتونیت باعث کاهش سرعت فشار تورم ثانویه بنتونیت می‌شود.
- ۸- رفتار آهک‌های زنده صنعتی و سنتی در کاهش مقدار $C_{\alpha p_s}$ نمونه‌ها تقریباً یکسان است. همچنین رفتار آهک‌های هیدراته صنعتی و سنتی در کاهش مقدار $C_{\alpha p_s}$ نمونه‌ها نیز تقریباً یکسان است.
- ۹- هر دو آهک زنده (صنعتی و سنتی) رفتار بهتری در کاهش فشار تورم نمونه‌ها نسبت به آهک‌های هیدراته (صنعتی و سنتی) داشته‌اند.
- ۱۰- افزایش زمان عمل‌آوری هر چهار آهک باعث افزایش در کاهش مقدار $C_{\alpha p_s}$ نمونه‌ها می‌شود. به طوری که بیشترین کاهش در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه مشاهده می‌شود.
- ۱۱- شاخص باربرداری کنترل کرنش و کنترل تنش به دست آمده برای بنتونیت تثبیت نشده به ترتیب برابر ۰/۰۳۸ و ۰/۰۳۱ می‌باشد. افزودن آهک‌های هیدراته صنعتی، زنده صنعتی، هیدراته سنتی و زنده سنتی به بنتونیت باعث کاهش در مقدار $C_{s_{stress}}$ و $C_{s_{strain}}$ می‌شود.
- ۱۲- شاخص باربرداری کنترل کرنش همه نمونه‌های

کاهش در فشار تورم در نمونه‌های بدون عمل‌آوری می‌تواند به علت بروز پدیده تجمع ذرات در اثر حضور یون کلسیم و در نمونه‌های با عمل‌آوری در اثر واکنش‌های پوزولانی و تشکیل مواد سمتاسیون هیدرات‌های سیلیکات و آلومینات کلسیم باشد. این دو پدیده، یعنی تجمع ذرات و واکنش‌های پوزولانی، هر دو باعث به هم چسبیده شدن ذرات خاک و جلوگیری از تورم آنها و در نتیجه کاهش در فشار تورم می‌شوند.

نتیجه‌گیری

- ۱- افزودن آهک‌های هیدراته صنعتی، زنده صنعتی، هیدراته سنتی و زنده سنتی به بنتونیت باعث افزایش حد انقباض می‌شود. همچنین افزودن آهک زنده به بنتونیت باعث افزایش حد روانی و افزودن آهک هیدراته باعث کاهش حد روانی می‌شود. در مجموع افزودن هر چهار نوع آهک به بنتونیت باعث کاهش نشانه خمیری می‌شود.
- ۲- افزودن آهک‌های هیدراته صنعتی، زنده صنعتی، هیدراته سنتی و زنده سنتی به بنتونیت باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک ماکزیمم خاک می‌شود. افزایش در درصد رطوبت بهینه برای نمونه‌های دارای آهک زنده صنعتی و سنتی بیشتر از آهک هیدراته صنعتی و سنتی می‌باشد. افزایش درصد رطوبت بهینه برای نمونه‌های دارای آهک‌های صنعتی هیدراته و زنده به ترتیب ۵ و ۶ درصد و برای آهک‌های سنتی هیدراته و زنده به ترتیب ۲ و ۳ درصد نسبت به بنتونیت خالص می‌باشد.
- ۳- هر دو آهک زنده (صنعتی و سنتی) رفتار بهتری در کاهش فشار تورم نمونه‌ها داشته‌اند. بیشترین کاهش در مقدار فشار تورم مربوط به نمونه‌های تثبیت شده با آهک زنده سنتی با عمل‌آوری ۹۰ روزه می‌باشد. البته از نظر اقتصادی عمل‌آوری ۲۸ روزه مناسب‌تر می‌باشد؛ زیرا میزان تغییرات در کاهش فشار تورم از عمل‌آوری ۷ روزه به ۲۸ روزه (۲۰٪) بیشتر از میزان

سستی و همچنین رفتار آهک زنده سستی بهتر از آهک زنده صنعتی می‌باشد. به طوری که بیشترین کاهش در مقدار $C_{sstrain}$ و $C_{sstress}$ در هر زمان عمل‌آوری مربوط به نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک زنده سستی می‌باشد.

۱۶- باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده افزودن آهک زنده با درصد بالای اکسیدکلسیم و با عمل‌آوری ۲۸ روزه اقتصادی‌ترین و بهترین عملکرد در کاهش فشار تورم و نشانه تورم را دارد.

تثبیت‌شده با آهک بیشتر از شاخص باربرداری کنترل تنش می‌باشد، ($C_{sstrain} > C_{sstress}$).

۱۳- هر دو آهک زنده (صنعتی و سستی) رفتار بهتری در کاهش هر دو مقدار $C_{sstrain}$ و $C_{sstress}$ نسبت به آهک‌های هیدراته (صنعتی و سستی) داشته‌اند.

۱۴- افزایش زمان عمل‌آوری برای هر چهار آهک باعث افزایش در کاهش مقدار $C_{sstrain}$ و $C_{sstress}$ نمونه‌ها می‌شود. به طوری که بیشترین کاهش در زمان عمل‌آوری ۹۰ روزه مشاهده می‌شود.

۱۵- رفتار آهک هیدراته صنعتی در کاهش مقدار $C_{sstrain}$ و $C_{sstress}$ نمونه‌ها بهتر از آهک هیدراته

مراجع

1. Mckeen, R.G., "Field Studies of Airport Pavement on Expansive Clay", proceeding of 4th international conference on Expansive Soils, Denver, Colorado, Vol. 1, Pp. 242-261, (1980).
2. عسکری، فرج الله، فاخر، علی، «تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندس ژئوتکنیک»، واحد انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، ۱۳۷۲.
3. Jones, D. E. and Holts, W. G. "Expansive Soil- the Hidden Disaster", *Civil Engineering*, ASCE, 43, Pp. 49-51, (1973).
4. Pakbaz, M. S. and Farzi, M. "With Comparison of The Effect of Mixing Methods (Dry vs. Wet) On Mechanical and Hydraulic Properties of Treated Soil Cement or Lime", *Journal of Applied Clay Science*, 105-106 (2015), Pp. 156-169.
5. Mitchell, J. K. "Soil Improvement- state – of – the art Report", Proc., 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engr., Stockholm, Sweden (1981), Pp. 509-565.
6. Consoli, N. C., Lopes, L.D.S., Prietto, P.D.M., Festugato, L. and Cruz, R.C. "Variabales Controlling Stiffness and Strength of Lime-stabilized Soils", *Journal of Geotech and Geoenvir. Engr.*, Vol. 137 (2011), No. 6, Pp. 628-632.
7. Tran, T. D., Cui, Y. J., Tang, A. M., Audiguier, M. and Cojean, R. "Effect of Lime Treatment on the Microstructure and Hydraulic Conductivity of Hericourt Clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 6 (2014), Issue 5, Oct. 2014; Pp. 399-404.
8. Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, T.F. "Behavior and Mineralogy Changes in Lime- treated Expansive Soil at 20° C. *Journal of Applied Clay Science*, vol. 50 (2010), Issue 2, Pp. 191-198.

9. Wang, W. , Kong, L. and Zhao, C. "Dynamic Characteristics of Lime- treated Expansive Soil under Cyclic Loading", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 4, Issue 4, Dec. 2012, Pp. 352-359.
10. Sherwood, P., "Soil Stabilization with Cement and Lime", Transport Research Laboratory, HMSO Publication Centre, 153p, (1993).
- ۱۱ . هاشمی طباطبایی، سعید، آقای آرای، عطاء، «مقایسه تأثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده»، نشریه علوم زمین، ش. ۶۷، صص. ۱۴-۲۱، (۱۳۸۷).
12. Wild, S., Kinuthia, J. M., Robinson, R. B. and Humphreys, I., "Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on the Strength and Swelling Properties of Lime-Stabilized Kaolinite in the Presence of Sulphates", *ClayMinerals*, Vol. 31, No. 3, pp. 423-433, (1996).
13. Huat, B. B. K., "Organic and Peat Soil Engineering", Serdang, Malaysia, University Putra Malaysia Press, (2004).
14. Leroueil, S. and Bihan, J. P., "Liquid Limits and Fall Cones", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 5, pp. 793-798, (1996).
15. Ali Jawaid, S. M., "Stabilization of Organic Soil Using Un-Alaked Lime", proceedings of 4th international conference on civil engineering, *sharif university of technology*, Tehran, Iran, Vol. 2, pp. 326-333, (1997).
16. Rajasekaran, G., "Sulphate Attack and Ettringite Formation in the Lime and Cement Stabilized Marine Clays", *ocean engineering*, Vol. 32, No. 55, pp. 1133-1159, (2005).
17. Kumar, A., Walia, B. S. and Bajaj, A., "Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil", *journal of materials in civil engineering*, ASCE, Vol. 19, No. 3, pp. 242-248, (2007).