**مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران**
**پاییز و زمستان ۱۳۹۱، جلد پنجم، شماره ۳ و۴، صفحه ۱ تا ۱۶**

# بهسازی خاک‌های رسی جنوب غرب همدان با استفاده از آهک

محمدحسین قبادی [۱*]، یاسین عبدی‌لر [۲]، رضا بابازاده [۲]

دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۰۵ پذیرش مقاله: ۹۱/۰۵/۰۸

## چکیده

این مقاله به بررسی نتایج مطالعات کانی‌شناختی و ژئوتکنیکی خاک‌های رسی نرم بهسازی شده با آهک در جنوب غرب همدان می پردازد. بدین منظور آهک شکفته با درصدهای وزنی ۱، ۳، ۵ و ۷ به خاک اضافه شده است و آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل مطالعات کانی‌شناسی، توزیع اندازه ذرات، حدود خمیری، تراکم و مقاومت فشاری تک‌محوری بعد از ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روز دوره عمل‌آوری، بر روی نمونه‌های مورد نظر انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش درصد آهک، خاک مورد نظر به‌تدریج خواص خمیری خود را از دست می‌دهد و در نهایت غیرخمیری می‌شود. همچنین با افزایش درصد آهک و افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه‌های مخلوط شده با آهک افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصل شده خاک رس نرم مورد مطالعه با افزایش ۷٪ آهک و بعد از گذشت یک دوره عمل‌آوری ۳۰ روزه به صورت مطلوبی بهسازی می‌شود. علاوه بر این به منظور بررسی ارتباط بین ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک مخلوط شده با درصد آهک و زمان عمل‌آوری، آنالیز رگرسیون غیرخطی انجام شده و روابط خوبی با ضریب رگرسیون بالا ارائه شده است.

**کلید واژه‌ها:** *آهک، بهسازی، خاک رس، شاخص خمیری، مقاومت، همدان*

۱. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان *amirghobadi@yahoo.com*
۲. دانشجویان دکتری زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا
* مسئول مکاتبات

**۱. مقدمه**

خاک‌های رسی در حالت خشک، عمدتاً از صلبیت و سفتی مناسبی برخوردار هستند اما وقتی اشباع می‌شوند، از سفتی آنها کاسته می‌شود. از مشخصه‌های بارز خاک‌های رسی نرم می‌توان به ظرفیت باربری کم و تراکم‌پذیری زیاد آنها اشاره کرد. کاهش مقاومت خاک‌های رسی نرم باعث از دست رفتن ظرفیت باربری و نشست زیاد خاک شده و خسارات جدی به ساختمان و پی وارد می‌شود (Mohamed et al., 2009). بهسازی خاک‌ها به منظور استفاده در ساخت‌وساز به‌ویژه برای احداث جاده‌های خاکی از پیشینه طولانی برخوردار است (Mc Dowell, 1959).

در میان روش‌های بهسازی خاک می‌توان به استفاده از انواع افزودنی‌های رایج شیمیایی مثل آهک، سیمان و خاکستر بادی (Fly ash) اشاره کرد. در این بین بهسازی خاک با آهک در سطح وسیعی برای اصلاح پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ها به کار گرفته شده و نتایج قابل قبولی نیز در بر داشته است. افزایش مقداری آهک موجب تغییر بافت خاک و در نتیجه بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی آن می‌شود. این تغییرات به دلیل واکنش بین اجزای سیلیکاتی خاک و آهک در حضور آب انجام می‌شود (زارعی و همکاران، ۱۳۸۹). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که بسیاری از ویژگی‌های مهندسی مهم خاک‌های رسی نرم را می‌توان با افزودن آهک اصلاح نمود. (Bell,1996, Nalbantoglue, 2000, Sabry, 1977). بر این اساس افزایش آهک می‌تواند باعث کاهش شاخص خمیری، افزایش قابلیت کاربری، کاهش ترک‌خوردگی ناشی از انقباض، از بین رفتن فشار تورمی، افزایش مقاومت و نفوذپذیری خاک شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که ویژگی‌های مخلوط خاک - آهک متغیر است و به خصوصیات خاک‌رسی، نوع و طول دوره عمل‌آوری و روش مورد استفاده بستگی دارد (Alkhashab et al.,2008)

نکته مهم در استفاده از آهک، تعیین مقدار آهک بهینه جهت بهسازی است، زیرا در پروژه‌های عمرانی علاوه بر توجیه علمی و فنی، اقتصادی بودن روش بهسازی نیز در نظر گرفته می‌شود (هاشمی طباطبایی و آقایی آرایی، ۱۳۸۶). زمانی که آهک در حضور آب به خاک‌های رسی اضافه می‌شود، فعل و انفعالاتی در خاک رخ می‌دهد که از نظر ژئوتکنیکی بهبود کیفیت خاک را در پی خواهد داشت. این واکنش شامل واکنش گرمازای هیدراتاسیون می باشد که طی آن آهک با آب واکنش داده و تولید آهک هیدراته می‌کند. این واکنش در مدت زمان کوتاهی انجام شده و یون‌های کلسیم آزاد شده در آن واکنش باعث شروع واکنش‌های تبادل یونی می‌شود (Puppala et al., 2004). دومین واکنش آهک و خاک، واکنش کربناسیون است که طی آن آهک با گاز کربنیک هوا ترکیب شده و باعث برگشت آهک به حالت غیرفعال شده و به اصطلاح آهک کشته می‌شود (Kezdi, 1977). سومین واکنش، واکنش تبادل کاتیونی است که بین کاتیون‌های سطح ذرات رس و کاتیون‌های کلسیم موجود در آهک رخ می‌دهد. طی این واکنش در اثر تبادل و جذب کاتیون، ذرات رس به هم نزدیک شده که این فرآیند را فولوکوله شدن و یا مجتمع شدن می‌نامند. در واقع این واکنش عامل اصلی تغییرات ایجاد شده در خصوصیات خمیری خاک‌های رسی بهسازی شده با آهک است (Sherwood, 1993). چهارمین واکنش، واکنش پوزولانی است که برخلاف واکنش تبادل کاتیونی و فولوکوله شدن، وابسته به زمان و دمای انجام آزمایش می‌باشد و می‌توان آن‌را به عنوان یک واکنش زمان‌بر مورد بررسی قرار داد. این واکنش بین آب و آهک و مواد سیلیس‌دار و آلومین‌دار خاک انجام شده که موجب تولید نوعی مواد سیمانی کننده در خاک می‌گردد و افزایش مقاومت و دوام خاک را به دنبال دارد (جسمانی و همکاران، ۱۳۸۷).

مطالعات زیادی به منظور بررسی تأثیر مواد افزودنی به خاک رس جهت بهبود خواص مقاومتی آن صورت گرفته است که شروع این مطالعات به سال ۱۹۶۰ بر می‌گردد. در آن زمان با افزودن آهک به خاک رس مشاهده شد که خصوصیات مقاومتی خاک رس از جمله مقاومت برشی و مقاومت فشاری آن تا حد زیادی بهبود می‌یابد. Chen, 1975 در مورد میزان آهک مورد نیاز برای تثبیت خاک‌های رسی، مطالعاتی انجام داد

و به این نتیجه رسید که محدوده آهک مورد نیاز برای تثبیت خاک‌های رسی بین ۲ تا ۸ درصد است. Mitchel, ۱۹۷۶ با مطالعه بر روی خصوصیات تراکمی خاک‌های اصلاح شده به این نتیجه رسید که اگر فاصله زمانی بین تهیه نمونه و انجام آزمایش تراکم وجود داشته باشد، مقاومت تک‌محوری کاهش پیدا می‌کند. در این تحقیق با افزودن درصدهای متفاوتی از آهک هیدراته به خاک رس، تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری، دانسیته و حدود خمیری مطالعه گردیده است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، درصد آهک بهینه و دوره عمل‌آوری مناسب تعیین شده و نتایج حاصله می‌تواند در فرآیند بهسازی خاک‌های رسی مورد استفاده قرار بگیرد.

## ۲. مواد و روش‌ها

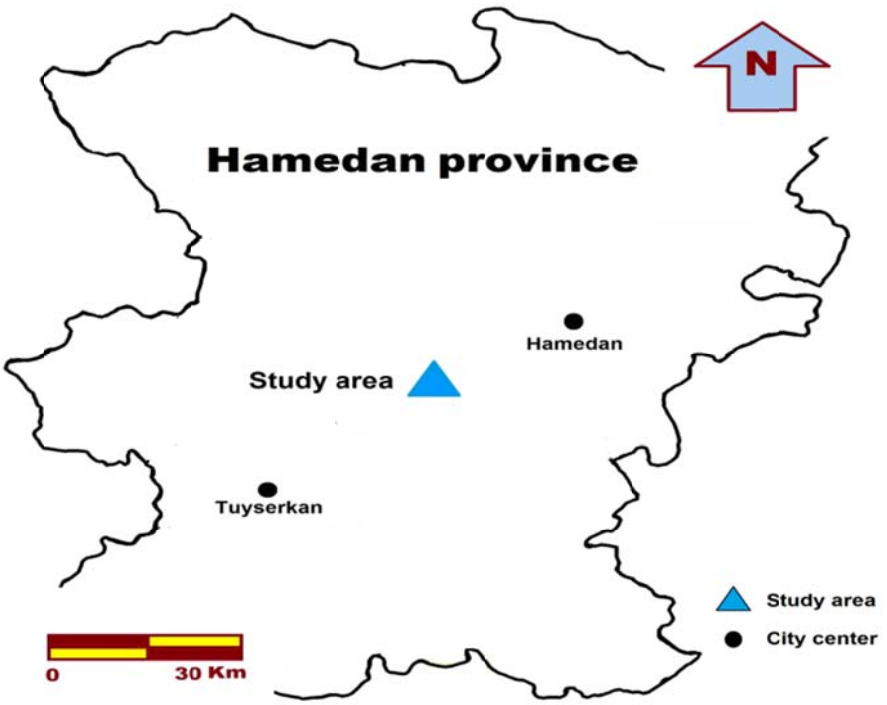
خاک رس مورد استفاده در این مطالعه از دامنه جنوبی الوند درمنطقه گنج‌نامه، واقع در جنوب غرب همدان تهیه شده است. خاک مذکور از نوع باقی مانده و حاصل هوازدگی سنگ‌های هورنفلسی می‌باشد (شکل ۱). این خاک به دلیل گسترش نسبتاً زیاد به عنوان قرضه ریزدانه می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. به منظور شناخت ویژگی‌های خاک، حدود۵۰ کیلوگرم از خاک مورد نظر تهیه شده و به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک دانشگاه بوعلی سینا انتقال داده شد. لازم به ذکر است که نمونه‌گیری طوری انجام شده است که معرف خوبی برای کل منطقه باشد. علاوه بر این به منظور بررسی تأثیر افزایش آهک بر خصوصیات مقاومتی خاک‌های رسی، می‌توان از آهک زنده و آهک شکفته استفاده کرد که هر کدام مزایا و معایبی دارند. اگرچه آهک زنده به علت درصد بالای CaO تأثیر بیشتری در تثبیت و اصلاح خاک نسبت به آهک هیدراته یا شکفته دارد ولی چون کارکردن با آهک هیدراته ایمن‌تر می‌باشد، کاربرد آن در صنعت مرسوم‌تر است. هرچند که از نظر فعل و انفعالات شیمیایی تفاوتی بین دو آهک وجود ندارد (هاشمی طباطبایی و آقایی آرایی، ۱۳۸۶). بر همین اساس آهک استفاده شده برای این مطالعه، آهک هیدراته یا آهک شکفته بوده است.

آهک در دمای اتاق و با درصدهای وزنی مختلف (۱، ۳، ۵ و ۷) به خاک اضافه و در سرتاسر خاک پخش و با دست کاملاً به هم زده شده است تا ترکیبی کاملاً یکنواخت و همگن حاصل شود. علاوه بر این به‌منظور بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی نمونه‌ها، خاک مورد نظر با درصدهای مختلف آهک مخلوط و سپس با رطوبت بهینه مرطوب شده‌اند. مخلوط خاک – آهک با نسبت‌های مختلف در داخل کیسه‌های پلاستیکی نگهداری شده‌اند تا رطوبت نمونه‌ها حفظ شده و دوره گیرش نمونه‌ها نیز سپری شود و در زمان‌های معین ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روزه، آزمایش‌های مورد نظر بر روی آنها انجام شود (داودی و کبیر ۱۳۸۹، دریایی و کاشفی پور۱۳۹۰، زارعی و همکاران ۱۳۸۹، Mallela et al 2004, Bell, 1996, Mohammet et al., 2009).

## ۳. مطالعات آزمایشگاهی و بحث

### *۳-۱. خصوصیات پایه خاک رس*

به منظور شناخت خصوصیات پایه خاک رس مورد مطالعه و بررسی میزان تأثیر مواد افزودنی، کلیه آزمایش‌های لازمه به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و طبقه‌بندی خاک بر اساس استاندارد بر روی نمونه‌های اخذ شده انجام شد و برای کاهش درصد خطا هر آزمایش چندین بار تکرار شد. جدول ۱ نتایج این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. خاک مورد مطالعه بر اساس استاندارد ASTM D422 (1990) دانه‌بندی شد(شکل ۲). براساس نتایج آزمون دانه‌بندی مشخص شد که خاک مورد نظر متشکل از ۱۲ درصد ماسه، ۶۵ درصد سیلت و ۲۳ درصد رس می‌باشد و مطابق با سیستم طبقه‌بندی متحد، در رده CL قرار می‌گیرد. علاوه بر این نتایج آزمایش تراکم تک‌محوری نشان می‌دهد که خاک مورد مطالعه در رده خاک‌های رسی خیلی نرم واقع می‌شود.



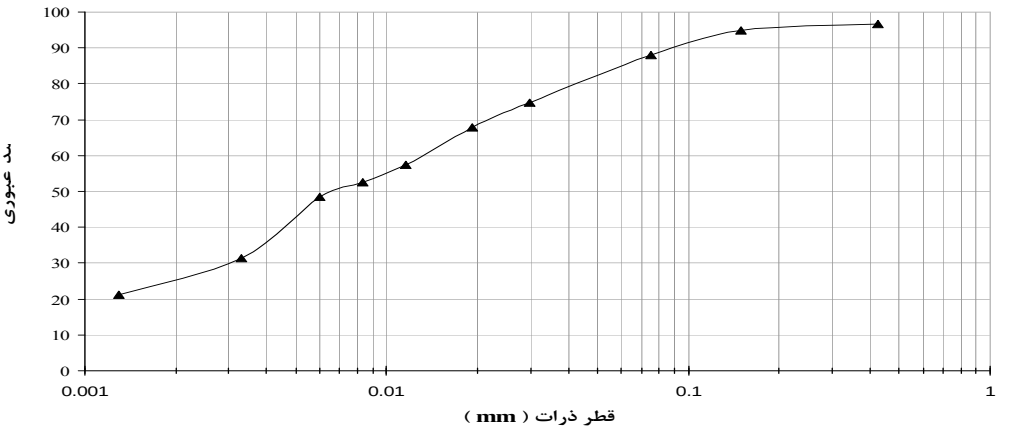

**شکل ۱.** موقعیت برداشت نمونه خاک در استان همدان

**جدول ۱.** ویژگی‌های پایه خاک رس مورد مطالعه

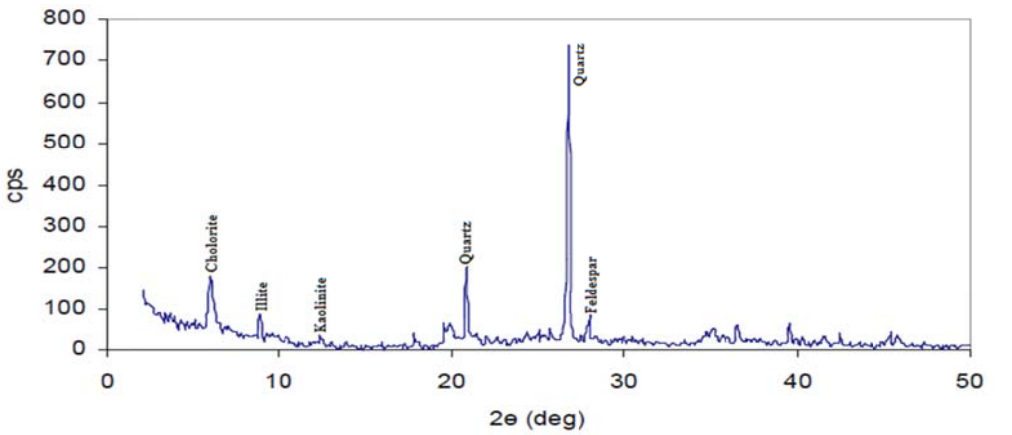
| مشخصات | مقادیر |
|---|---|
| رطوبت طبیعی خاک (٪) | ۹/۲ |
| رنگ خاک | قهوه‌ای |
| درصد رس | ۲۳ |
| درصد سیلت | ۶۵ |
| درصد ماسه | ۱۲ |
| حد روانی (٪) | ۳۲ |
| حد خمیری (٪) | ۲۲ |
| شاخص خمیری (٪) | ۱۰ |
| وزن مخصوص قسمت جامد (Gs) | ۲/۵۵ |
| حداکثر دانسیته خشک خاک(گرم بر سانتیمتر مکعب) | ۱/۶۵ |
| رطوبت بهینه خاک (٪) | ۱۹/۶ |
| مقاومت فشاری تک‌محوری (کیلوپاسکال) | ۱۴/۲ |
| رده‌بندی خاک بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید | CL |

*۳-۲. آنالیز کانی‌شناختی*

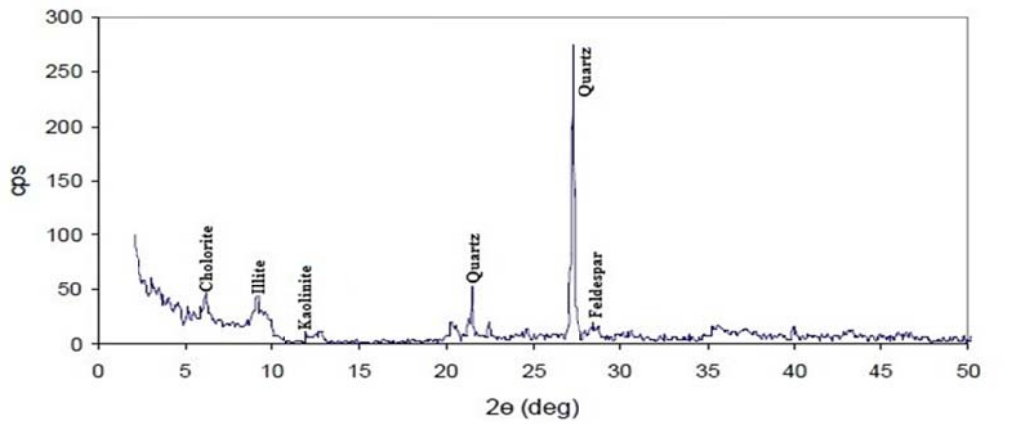
به منظور شناسایی ترکیب کانی‌شناختی خاک و همچنین بررسی تأثیر درصد آهک افزودنی بر تغییرات کانی‌شناختی، آزمایش پراش اشعه X X Ray Diffraction (XRD) در دو حالت بدون آهک و همراه با آهک انجام شد که در این بخش، نتایج آنها مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳). با توجه به نمودار شکل ۳، نتایج آزمون XRD برای نمونه‌های خاک بهسازی نشده با آهک نشان می‌دهد که کلریت، ایلیت و کائولینیت کانی‌های رسی اصلی نمونه خاک مورد نظر می‌باشند. بر این اساس کانی‌های غیر رسی نیز شامل کوارتز و فلدسپار هستند. همانطور که در شکل‌های ۴، ۵ و۶ نشان داده شده است، با افزایش درصد آهک به نمونه‌های خاک، یک کاهش نسبی در فراوانی شدت پیک کانی‌های رسی شامل کلریت، ایلیت و کائولینیت اتفاق افتاده است. همچنین ملاحظه می‌شود که فراوانی شدت پیک کائولینیت در مقایسه با ایلیت و کلریت، در اثر افزایش درصد آهک، کمتر دچار کاهش شده است که این موضوع را می‌توان به پایداری نسبی کائولینیت در مقایسه به دیگر کانی‌های رسی نسبت داد.



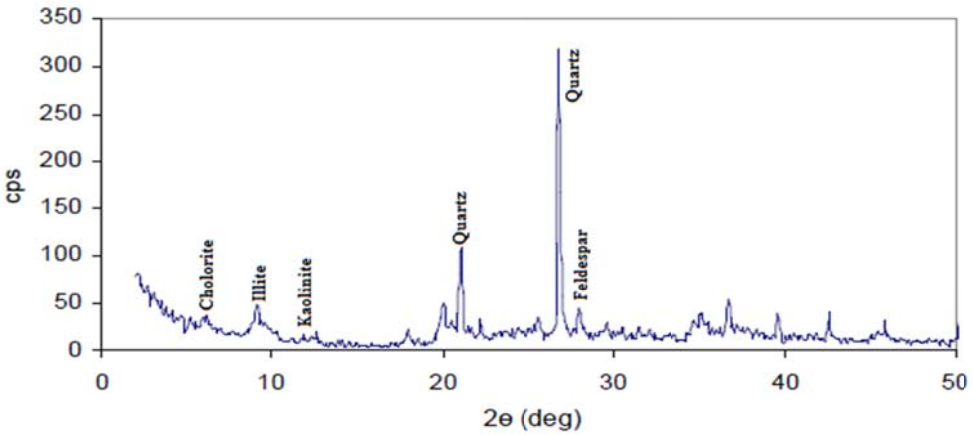

**شکل۲.** منحنی دانه‌بندی خاک رس نرم منطقه گنجنامه



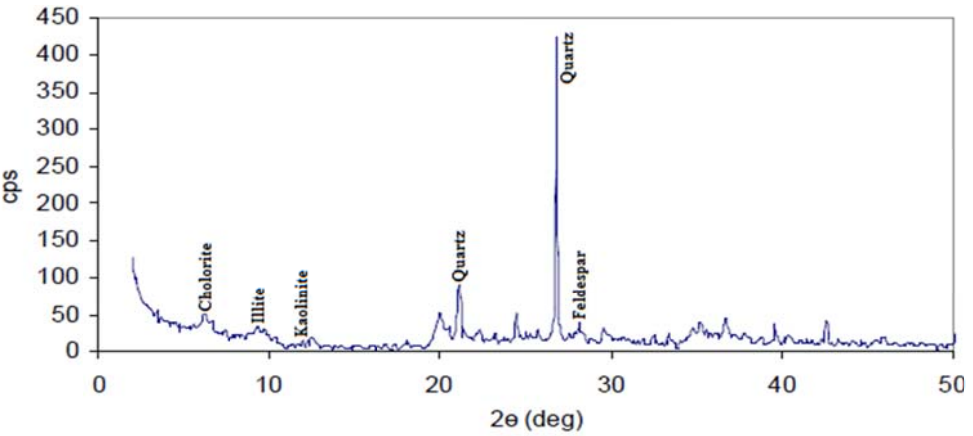

**شکل ۳.** نتایج آنالیز XRD خاک رس بهسازی نشده با آهک




شکل ۴. نتایج آنالیز XRD نمونه خاک رس برای ۳٪ آهک افزودنی




**شکل ۵.** نتایج آنالیز XRD نمونه خاک رس برای ۵٪ آهک افزودنی




شکل۶. نتایج آنالیز XRD نمونه خاک رس برای ۷٪ آهک افزودنی

*۳-۳. آزمایش حدود خمیری*

آهک معمولاً با خاک‌های دارای شاخص خمیری بین ۱۰ تا ۵۰ درصد واکنش مناسبی نشان می‌دهد (اکرمی، ۱۳۸۵). همچنین آهک با رس‌های حاوی کانی مونت‌موریلونیت نسبت به رس‌های حاوی کانی کائولینیت، سریع‌تر واکنش انجام می‌دهد (جسمانی و همکاران، ۱۳۸۷). آزمایش حدود خمیری بر اساس دستورالعمل ASTM D4318 (1984) انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده با افزایش درصد آهک افزودنی به خاک رس، شاخص خمیری دچار کاهش می‌شود. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری مخلوط خاک - آهک نیز، شاخص خمیری نمونه‌های خاک‌ها به تدریج دچار کاهش شده و در نهایت به صفر می‌رسد. بر این اساس زمانی‌که آهک افزودنی معادل ۱٪ است، برای یک دوره عمل‌آوری ۴۵ روزه، شاخص خمیری به تدریج دچار کاهش می‌شود تا اینکه در پایان دوره، خاک غیرخمیری می‌شود. اما برای ۳، ۵ و ۷ درصد آهک افزودنی، پس از ۷ روز شاخص خمیری خاک صفر می‌گردد. بنابراین با افزایش درصدآهک، تأثیر زمان عمل‌آوری کمتر می‌شود. چون واکنش‌های تبادل کاتیونی سریع رخ می‌دهند، درصد آهک افزوده شده اثر بیشتری در کاهش حدود خمیری خاک دارد. کاهش حدود خمیری خاک‌های رسی نرم در اثر اختلاط با آهک نتیجه تبادل کاتیونی در حضور آب است. به عبارتی در اثر جذب یون کلسیم که از قطر یونی بزرگتری برخوردار است، فاصله بین کانی‌ها بیشتر شده ولی به دلیل خاصیت الکترونگاتیویته بیشتر، مقاومت خاک بیشتر شده اما خصوصیات خمیری دچار کاهش می‌گردد.

*۳-۴. آزمایش تراکم*

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در خاک‌های با خاصیت پلاستیسیته پائین، افزودن آهک موجب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش رطوبت بهینه می‌گردد و از میزان حساسیت وزن مخصوص خشک نسبت به تغییرات رطوبت می‌کاهد (جسمانی و همکاران، ۱۳۸۷). در این تحقیق سه هدف عمده از انجام آزمایش تراکم مد نظر بوده که عبارتند از:

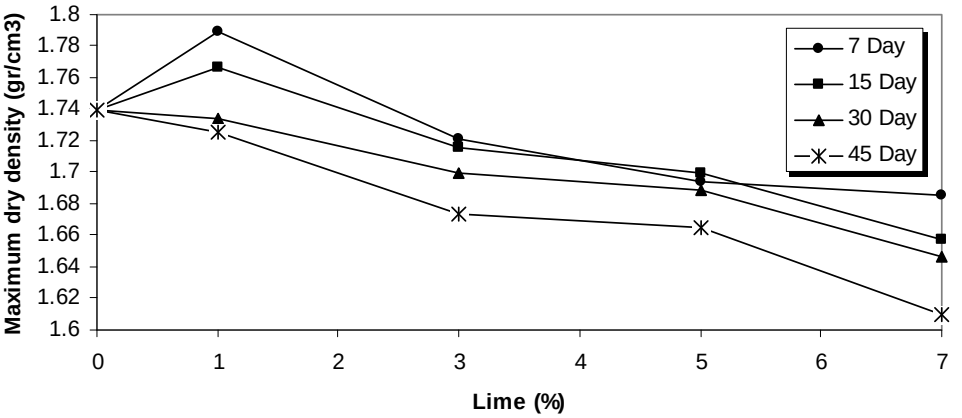
۱- بررسی تأثیر افزودن آهک بر روی حداکثر دانسیته خشک

۲- بررسی تأثیر افزودن آهک بر روی رطوبت بهینه

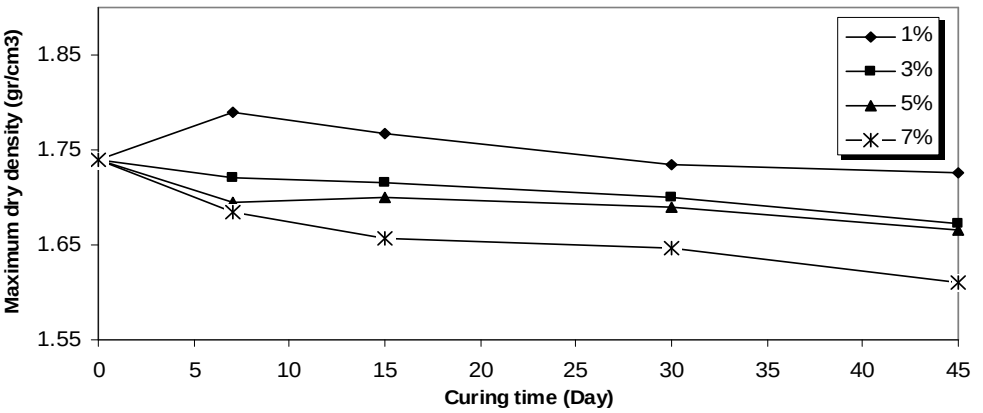
۳- به دست آوردن رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک برای هر طرح اختلاط به منظور ساخت نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش مقاومت تراکم تک‌محوری.

بر همین اساس آزمایش تراکم مطابق با استاندارد ASTM D698 (2000) برای نسبت‌های مختلف خاک و آهک انجام شده است. نتایج آزمایش‌های تراکم در شکل‌های ۷ تا ۱۰ مشاهده می‌شود. براساس نتایج حاصله با افزایش درصد آهک افزودنی به خاک رس، حداکثر دانسیته خشک نمونه‌ها به طورکلی یک روند کاهشی را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۷ ملاحظه می‌گردد که برای حالتی که ۱ درصد آهک به خاک افزوده شده و زمان عمل‌آوری ۷ و۱۵ روزه بوده، حداکثر دانسیته خشک نمونه‌ها دچار افزایش گردید. علت چنین فرآیندی می‌تواند مربوط به عدم انجام کامل واکنش‌های پوزولانی به دلیل درصد کم آهک و زمان ناکافی گیرش باشد. اما در بقیه موارد، افزایش درصد آهک مطابق انتظار باعث کاهش حداکثر دانسیته خشک نمونه‌ها شده است. علاوه بر این همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده، با افزایش زمان عمل‌آوری، حداکثر دانسیته خشک نمونه‌ها دچار کاهش شده است و تنها برای زمان عمل‌آوری ۷ روزه ابتدا حداکثر دانسیته خشک نمونه‌های خاک افزایش یافته ولی در ادامه یک روند کاهشی را دنبال کرده است.

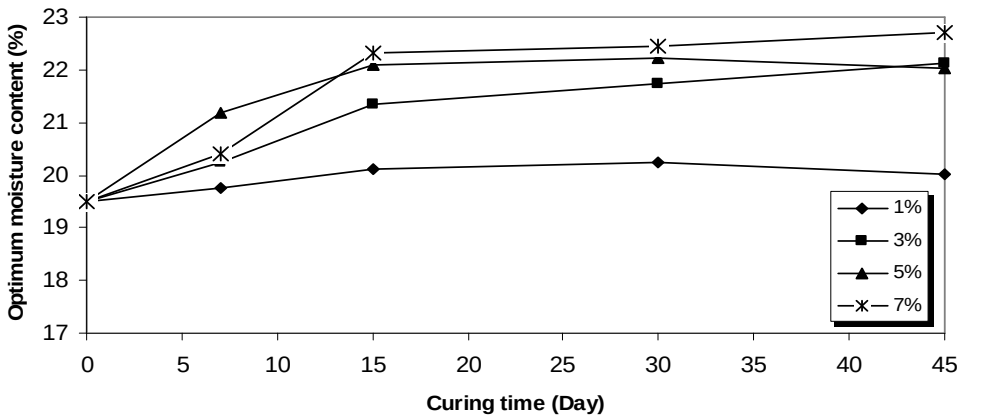
شکل‌های ۹ و۱۰ نیز به ترتیب تأثیر افزایش درصد آهک و زمان عمل‌آوری را بر روی رطوبت بهینه نمونه‌های خاک رس نرم بهسازی شده نشان می‌دهند. همان‌طورکه در شکل ۹ دیده می‌شود با افزایش درصد آهک به نمونه‌های خاک رس، رطوبت بهینه برای تمامی دوره‌های عمل‌آوری افزایش یافته است. شکل۱۰ نیز تأثیر زمان عمل‌آوری مخلوط خاک – آهک را بر روی رطوبت بهینه نشان می‌دهد. مطابق با شکل مذکور با افزایش زمان عمل‌آوری، رطوبت بهینه افزایش یافته و تنها در پایان دوره ۴۵ روزه عمل‌آوری برای ۱ و ۳ درصد آهک افزودنی، کاهش نشان می‌دهد.



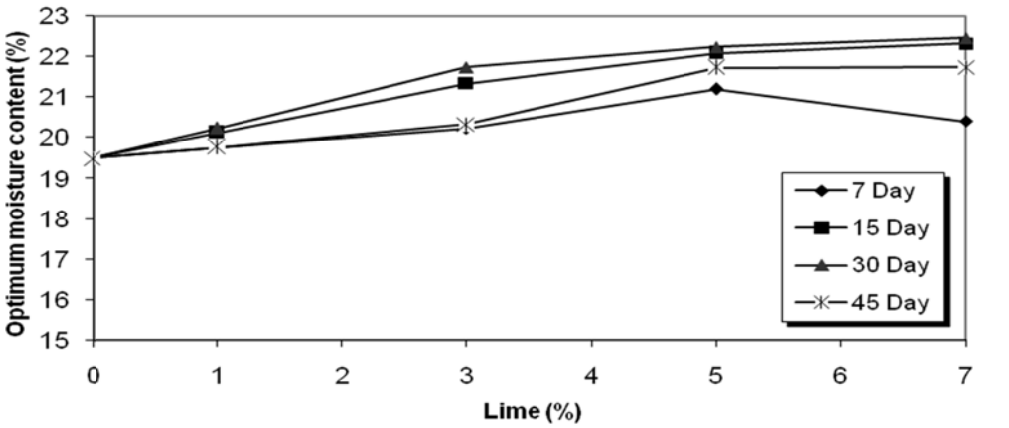

**شکل۷.** تأثیر درصد آهک افزودنی بر روی حداکثر دانسیته خشک خاک رس




**شکل ۸.** تأثیر زمان عمل‌آوری بر روی حداکثر دانسیته خشک خاک رس




**شکل ۹.** تأثیر درصد آهک افزودنی بر روی رطوبت بهینه خاک رس



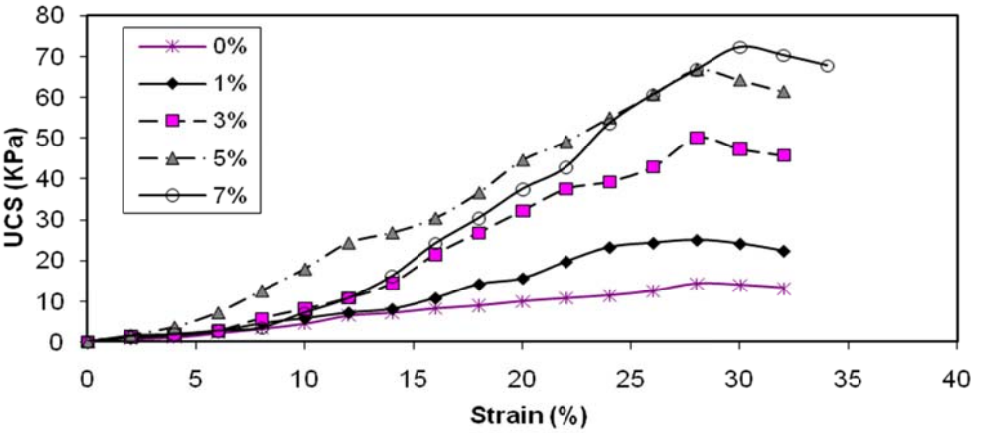

**شکل ۱۰.** تأثیر زمان عمل‌آوری مخلوط خاک- آهک روی درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها

*۳-۵. آزمون مقاومت تراکمی تک‌محوری و مدول الاستیسیته*

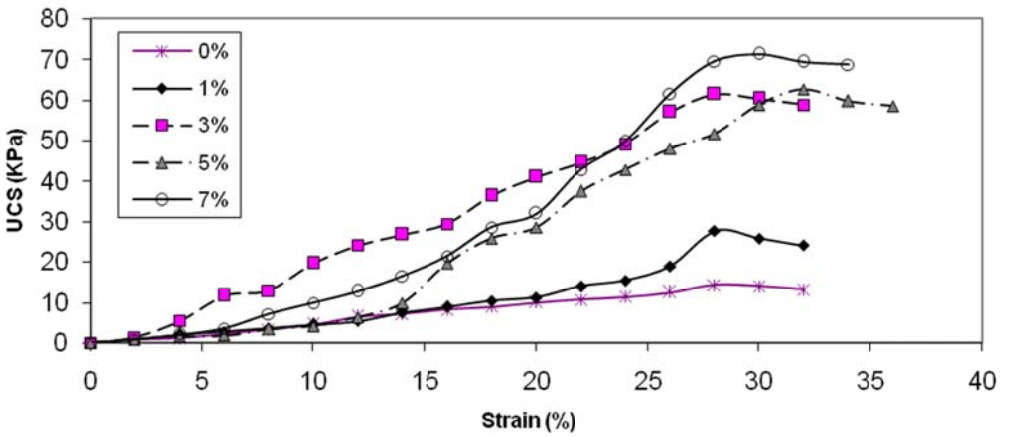
یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی تأثیر آهک بر روی بهسازی خاک، افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک می‌باشد. در واقع یکی از نشانه‌های خاک بهسازی شده با آهک، دارا بودن مقاومت بالاتر است(Rajan et al., 2009). در این پژوهش، ابتدا مخلوط‌های خاک و آهک با درصدهای

مختلف تهیه شده و پس از پایان دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روزه، نمونه‌های مورد نظر برای انجام آزمایش تراکم تک‌محوری با رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک، تهیه و قالب‌گیری شده است و آزمایش مقاومت تراکمی تک‌محوری بر اساس استاندارد ASTM D2166 (2000) انجام شده است.

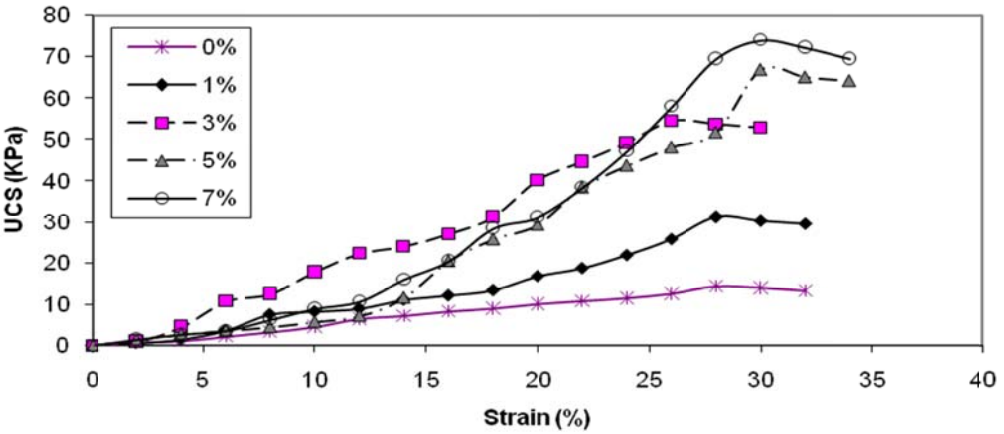
همان طور که در جدول ۱ نشان داده شد، مقاومت تراکمی تک‌محوره خاک رس بهسازی نشده ۱۴/۲ کیلوپاسکال می‌باشد که نشان دهنده یک خاک رس بسیار نرم است. بر این اساس آزمایش تراکم تک‌محوره بر روی نمونه‌های بهسازی شده با آهک برای درصدهای مختلف شامل ۱، ۳، ۵ و ۷ و برای زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۵ ،۳۰ و۴۵ روزه انجام شد. منحنی‌های تنش- کرنش برای زمان‌های عمل‌آوری مختلف در شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این منحنی‌ها مشاهده می‌شود، برای حالتی که خاک بهسازی نشده است، منحنی تنش – کرنش در ابتدا روند صعودی را نشان داده تا زمانی‌که به یک حالت ثابتی از تغییر شکل رسیده و منحنی بدون اینکه نقطه پیک یا نقطه شکست مشخصی داشته باشد دگرشکلی ثابتی را ادامه می‌دهد. به عبارت دیگر می‌توان گفت خاک‌های رسی نرم بهسازی نشده با آهک، رفتاری شبیه به خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته از خود نشان می‌دهند. اما برای نمونه‌های خاک بهسازی شده با آهک با درصدهای مختلف، منحنی تنش-کرنش در ابتدا روند صعودی داشته، اما بعد از رسیدن به نقطه حداکثر مقاومت دوباره روند نزولی را طی نموده‌اند، بنابراین رفتاری شبیه به خاک‌های رسی پیش تحکیم یافته دارند. لازم به ذکر است که میزان این روند صعودی به درصد آهک و زمان عمل‌آوری بستگی دارد و عامل آن نیز سیمان شدگی ذرات خاک است.



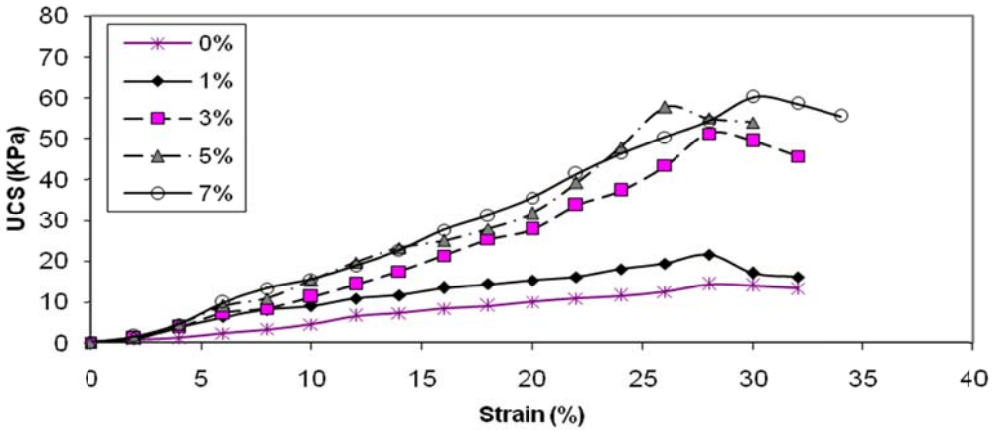

**شکل ۱۱.** منحنی تنش-کرنش خاک‌های رسی بهسازی شده برای دوره عمل‌آوری ۷ روزه




**شکل ۱۲.** منحنی تنش-کرنش خاک‌های رسی بهسازی شده برای دوره عمل‌آوری ۱۵ روزه




**شکل ۱۳.** منحنی تنش-کرنش خاک‌های رسی بهسازی شده برای دوره عمل‌آوری ۳۰ روزه

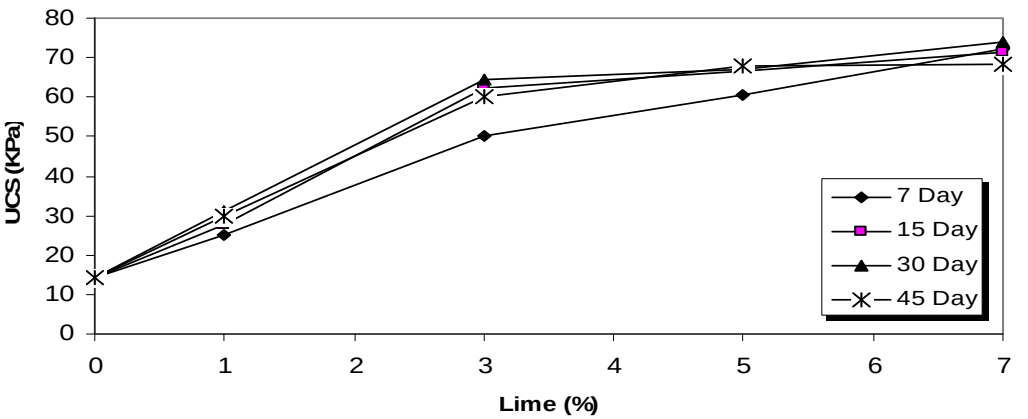



**شکل ۱۴.** منحنی تنش- کرنش خاک‌های رسی بهسازی شده برای دوره عمل‌آوری ۴۵ روزه

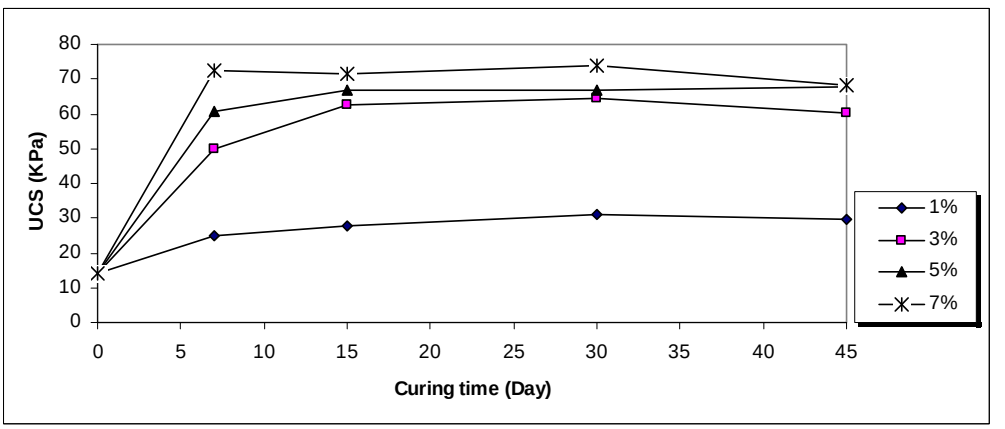
همان طور که در منحنی‌های تنش – کرنش نیز نشان داده شده است، با افزایش درصد آهک، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های خاک رس، افزایش قابل توجهی داشته است که این موضوع در شکل ۱۵ نیز دیده می‌شود. بر این اساس مشاهده می‌شود که با افزودن ۱ درصد آهک به خاک با گذشت ۷ روز، مقاومت فشاری مخلوط خاک – آهک از ۱۴/۲ به ۲۴/۹ کیلوپاسکال افزایش یافته و بعد از ۳۰ روز به ۳۱/۲ کیلوپاسکال رسیده است. همچنین با افزایش آهک به‌میزان ۳، ۵ و ۷ درصد، مقاومت نمونه‌های خاک رس نیز با نرخ بیشتری افزایش یافته و به ترتیب ۴۹/۹، ۶۶/۷ و ۷۲/۲ کیلوپاسکال پس از ۷ روز و ۵۴/۴، ۶۶/۹ و ۷۴ کیلوپاسکال بعد از ۳۰ روز عمل‌آوری تعیین شده است. افزایش قابل توجه در مقاومت نمونه‌ها با افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد آهک به علت سیمان‌شدگی ذرات خاک است‌که در نتیجه واکنش‌های پوزولانی در سطح گسترده‌تری نسبت به درصدهای کمتر آهک‌صورت می گیرد. نکته حائز اهمیت آن است که برای دوره‌های عمل‌آوری مختلف، بیشترین مقاومت نمونه‌ها برای ۷ درصد آهک حاصل شده است. بنابراین با توجه به روش فرآوری مورد استفاده در این پژوهش و نتایج به دست آمده برای مقاومت نمونه‌ها، می‌توان درصد آهک بهینه برای تثبیت خاک‌های رسی نرم مطالعه شده را ۷ درصد انتخاب نمود. به عبارتی دیگر می‌توان گفت که با افزودن ۷٪ آهک به این خاک‌ها، فرآیند تثبیت و بهسازی آن‌ها را به نحو مطلوبی انجام داد. البته لازم به ذکر است در صورتی‌که مخلوط کردن خاک و آهک به روشی دیگر مثلاً به صورت دوغاب با درصد رطوبت بیشتر صورت گیرد،

انتظار می‌رود که با درصد پائین‌تر آهک نیز این نتایج حاصل گردد.

علاوه بر موارد ذکر شده، در شکل ۱۶ تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت تراکمی تک‌محوره به صورت نمودار نشان داده شده است. همان طور که می‌توان ملاحظه نمود، با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌های حاوی آهک، مقاومت فشاری محصور نشده افزایش قابل توجهی نداشته است. به نظر می‌رسد که دلیل افزایش ناچیز مقاومت فشاری نامحصور نمونه‌ها این باشد که دوره عمل‌آوری نمونه‌ها قبل از آماده کردن، متراکم و قالب زدن نمونه‌ها برای آزمایش صورت گرفته باشد و لذا چسبندگی ایجاد شده در خاک در حین قالب زدن نمونه‌ها به هم خورده و از بین رفته است.

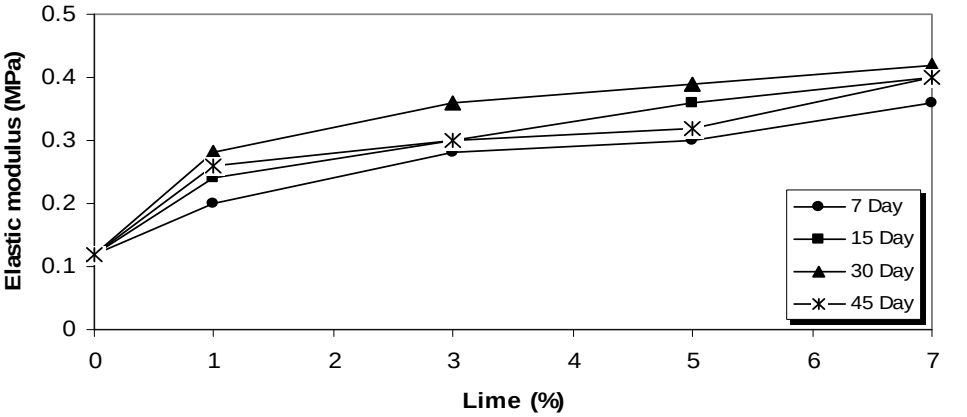



**شکل ۱۵.** ارتباط بین مقاومت تراکمی تک‌محوره و افزایش درصد آهک افزودنی

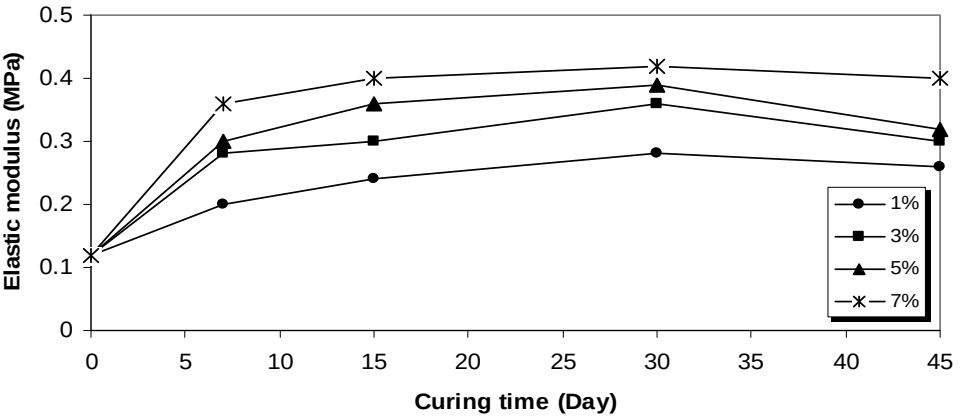



**شکل ۱۶.** ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوره و زمان عمل‌آوری نمونه‌ها

شکل‌های ۱۷و ۱۸ تأثیر درصد آهک افزودنی و دوره عمل‌آوری را بر روی مدول الاستیسیته نمونه‌های خاک نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد آهک افزودنی به تدریج میزان مدول الاستیسیته نمونه‌ها افزایش می‌یابد و بیشترین افزایش برای ۷ درصد آهک است. به این ترتیب مشاهده می‌گردد که با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌ها تا پایان دوره ۳۰ روزه، میزان مدول الاستیسیته افزایش یافته است.




**شکل ۱۷.** تأثیر درصد آهک افزودنی بر مدول الاستیسیته نمونه‌های خاک




**شکل ۱۸.** تأثیر زمان عمل‌آوری بر مدول الاستیسیته نمونه‌های خاک

### ۴. تجزیه و تحلیل استاتیکی

به منظور به دست آوردن روابط مناسب بین ویژگی‌های ژئوتکنیکی (مقاومت فشاری محصور نشده، مدول الاستیسیته، حداکثر دانسیته خشک و درصد رطوبت بهینه) نمونه‌های خاک بهسازی شده با درصدهای متفاوت آهک افزودنی (LC%) و زمان عمل‌آوری (t) نمونه‌ها، آنالیز رگرسیون خطی چند متغیره با استفاده از نرم‌افزار SPSS Statistics 17.0 انجام شده است. بر این اساس معادلات زیر به دست آمده است:

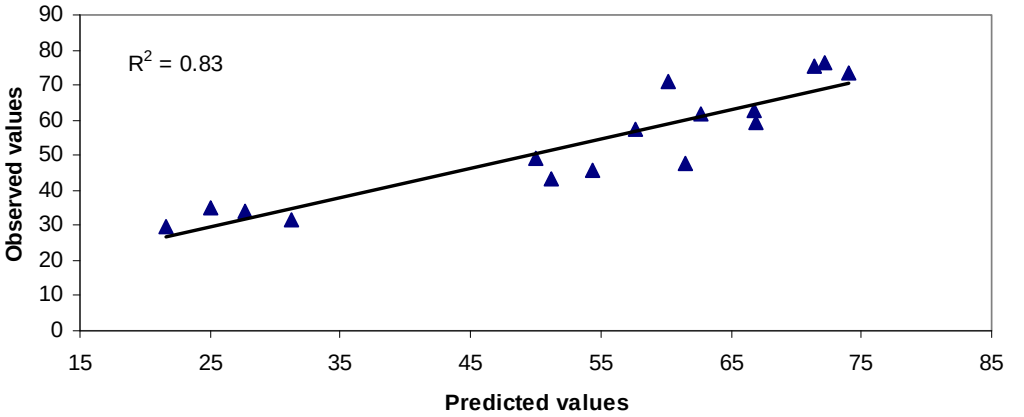
$$UCS = 29.216 + 6.93LC\ (\%) - 0.146t\ (Days) \quad (۱)$$

$$E = 0.164 + 0.033LC\ (\%) - 0.009t\ (Days) \quad (۲)$$

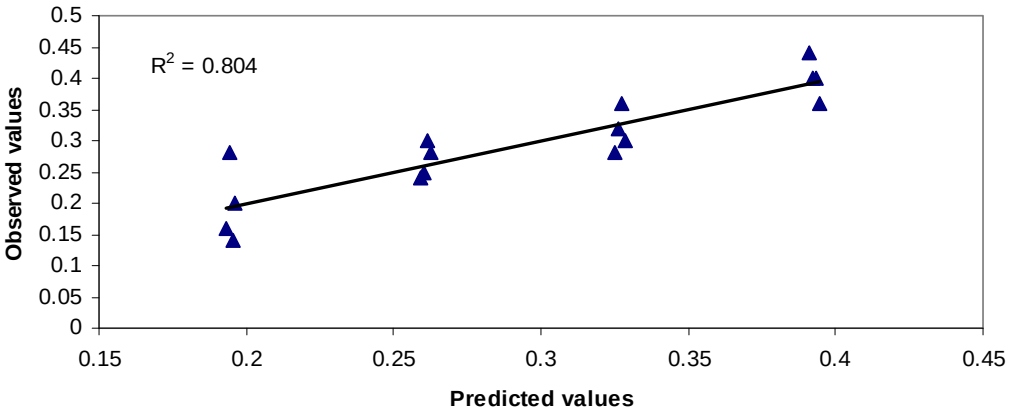
$$\gamma_d = 1.8 - 0.016LC\ (\%) - 0.001t\ (Days) \quad (۳)$$

$$\omega_{opt} = 19.33 + 0.317LC\ (\%) + 0.029t\ (Days) \quad (۴)$$

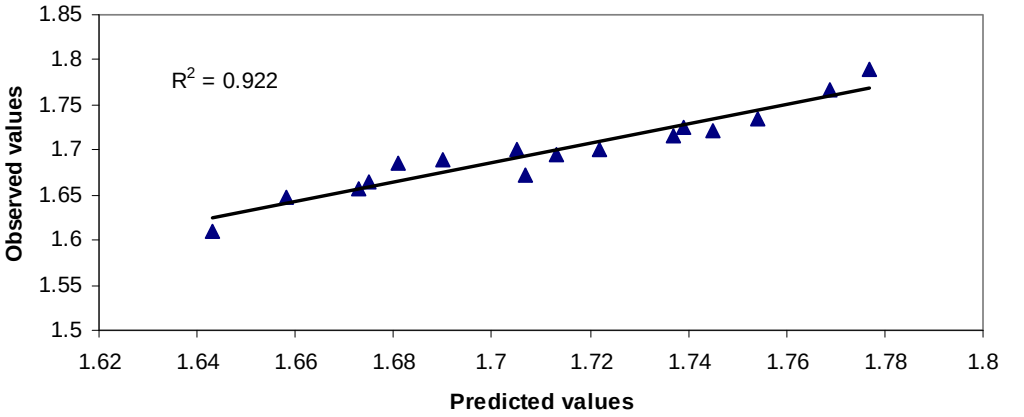
نتایج نشان می‌دهد که ضرایب رگرسیون(r) بالایی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از معادلات ۱، ۲، ۳ و۴ بدست آمده است. این معادلات به ترتیب برای مقاومت فشاری محصور نشده، مدول الاستیسیته، حداکثر دانسیته خشک و درصد رطوبت بهینه نمونه‌های خاک بهسازی شده با آهک، معادل ۰/۸۳، ۰/۸۰، ۰/۹۲ و۰/۷۳ می‌باشد. شکل‌های ۱۹، ۲۰، ۲۱ و۲۲ ضرایب رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادلات را نشان می‌دهند. معادلات بالا می‌توانند به عنوان یک روش سریع و مفید در شناسایی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه رسی بهسازی شده با آهک، مورد استفاده قرار گیرند.



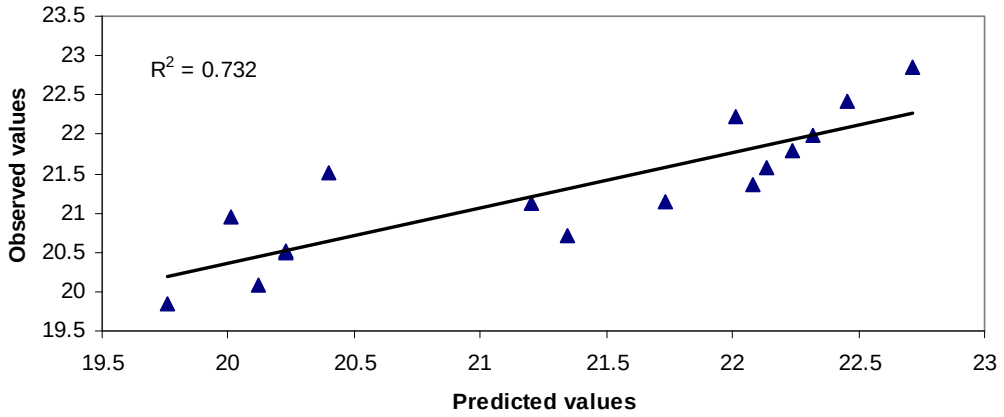

**شکل۱۹.** ارتباط بین مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی




**شکل ۲۰.** ارتباط بین مقادیر مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی




**شکل ۲۱.** ارتباط بین مقادیر حداکثر دانسیته خشک اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی




**شکل ۲۲.** ارتباط بین درصد رطوبت بهینه اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تغییرات کانی‌شناختی و ژئوتکنیکی خاک‌های رسی نرم منطقه گنجنامه در جنوب غربی همدان در اثر افزودن آهک هیدراته مورد مطالعه قرار گرفت. آهک با درصدهای وزنی ۱، ۳، ۵ و ۷ به خاک اضافه شد و آزمایش‌های حدود خمیری، تراکم و مقاومت فشاری تک‌محوری بعد از دوره‌های ۷، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ روزه بر روی نمونه‌های خاک - آهک انجام شد. علاوه بر این، معادلاتی که ارتباط بین ویژگی‌های ژئوتکنیکی نمونه‌های خاک بهسازی شده را با درصد آهک و زمان عمل‌آوری نشان می‌دهند، به دست آمد.

نتایج مطالعات کانی‌شناسی نشان می‌دهد که با افزایش درصد آهک، شدت فراوانی کانی‌های رسی دچار یک کاهش نسبی می‌شود که می‌توان آنرا به واکنش‌های پوزولانی بین آهک و کانی‌های رسی نسبت داد. علاوه بر این مشاهده شده است که شدت پیک فراوانی کانی رسی کائولینیت نسبت به ایلیت و کلریت، کمتر کاهش یافته است که این موضوع حاکی از پایداری نسبی این کانی نسبت به دیگر کانی‌های رسی است.

در اثر افزودن آهک به خاک، خصوصیات خمیری خاک روند کاهشی را نشان می‌دهد به طوری که برای ۱٪ آهک افزودنی، شاخص خمیری خاک به تدریج کاهش پیدا می‌کند تا اینکه در پایان دوره عمل‌آوری ۴۵ روزه به صفر می‌رسد و خاک رفتاری غیرخمیری از خود نشان می‌دهد، اما برای بالاتر از ۱٪ آهک افزودنی، تنها پس از گذشت ۷ روز از دوره عمل‌آوری، خاک غیرخمیری می‌شود. با افزایش زمان عمل‌آوری مخلوط خاک – آهک، شاخص خمیری نمونه‌ها دچار کاهش می‌شود و برای ۳، ۵ و ۷ درصد آهک، پس از ۷ روز زمان عمل‌آوری، خاک‌ها غیرخمیری می‌شوند.

نتایج آزمایش تراکم بر روی نمونه‌های بهسازی شده نشان می‌دهد که با افزایش درصد آهک، حداکثر دانسیته خشک نمونه‌ها تقریباً در تمامی موارد کاهش می‌یابد و فقط برای زمان عمل‌آوری ۷ و ۱۵ روزه با ۱٪ آهک افزودنی، ابتدا حداکثر دانسیته افزایش یافته و دوباره روند کاهشی به خود می‌گیرد که به نظر می‌رسد در این دوره‌های زمانی به دلیل کم بودن درصد آهک، هنوز واکنش‌های مربوطه به طور کامل انجام نشده‌اند. همچنین با افزایش دوره عمل‌آوری نمونه‌های خاک – آهک نیز مشاهده شد که حداکثر دانسیته خشک نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

علاوه بر این مشاهده شد که با افزایش آهک به نمونه‌های خاک تا ۷٪ وزنی، مقاومت فشاری نمونه‌ها در پایان دوره ۳۰ روزه تا حدود ۷ برابر نسبت به حالت بهسازی نشده می‌تواند افزایش پیدا کند. اما با افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌های بهسازی شده، مقاومت فشاری محصور نشده به دلیل انجام شدن دوره عمل‌آوری نمونه‌ها قبل از آماده کردن، متراکم و قالب‌زدن و از بین رفتن چسبندگی ایجاد شده در خاک در حین قالب‌زدن نمونه‌ها، افزایش قابل توجهی نداشته ولی روند افزایشی آن تا پایان دوره ۳۰ روزه ادامه داشته است. با توجه

به نتایج حاصل شده، می‌توان انتظار داشت که با افزودن ۷ درصد آهک برای یک دوره عمل‌آوری ۳۰ روزه، فرآیند تثبیت خاک‌های رسی نرم مورد مطالعه به نحو مطلوبی صورت پذیرد.

۱. به منظور اینکه بتوان روابطی بین ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های بهسازی شده با درصد آهک و زمان عمل‌آوری به دست آورد، بر روی نتایج حاصل شده آنالیز استاتیکی انجام شد که در نهایت یکسری روابط با ضرایب رگرسیون بالایی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده به دست آمد. با توجه به قابلیت پیش‌بینی بالای این روابط و به منظور کاهش هزینه‌های بهسازی خاک، می‌توان از روابط ارائه شده برای تعیین درصد آهک و زمان عمل‌آوری بهینه استفاده نمود.

## منابع


آذرفر، پ.، عبدی، م. (۱۳۸۲) تأثیر کلرید سدیم بر مقاومت فشاری و خواص خمیری کائولینیت تثبیت شده با آهک، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران. صفحه ۶.

اکرمی، ع. (۱۳۸۵) بررسی خاک رس تثبیت شده با آهک و سربار کوره و اثر سولفات بر آن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ۱۶۶ ص.

داودی، م. ه.، کبیر، ا. (۱۳۸۹) اندرکنش آهک و کلرید سدیم در خاک‌های ریزدانه با شاخص خمیری اندک، فصل‌نامه زمین‌شناسی کاربردی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان، سال ششم، شماره ۳، صفحات ۲۰۳ – ۱۹۵.

دریایی، م.، کاشفی پور، س. م. (۱۳۹۰) بررسی تأثیر ماسه بادی و آهک بر روی خصوصیات مقاومتی خاک رس، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شماره ۲، صفحات ۲۳۹ – ۲۳۰.

زارعی، ی.، نیکودل، م.، ارومیه ای، ع. (۱۳۸۹) تأثیر افزودن آهک بر خصوصیات مقاومتی خاک‌های رسی نرم محدوده بندرماهشهر در شرایط اشباع، چهارمین همایش زمین‌شناسی دانشگاه پیام‌نور، مشهد. صفحات ۱۳۹ – ۱۳۰.

جسمانی، م.، معماریان، ح.، جمشیدی، م. (۱۳۸۷) بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک کویر میقان به منظور اصلاح و تثبیت آن، نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد اول، شماره ۱، صفحات ۳۴ تا ۲۳.

هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرایی، ع. (۱۳۸۶) مقایسه تأثیر آهک زنده و شکفته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده، فصلنامه علمی – پژوهشی علوم زمین، سال هجدهم، شماره ۶۳، صفحات ۴۵ – ۳۷.

Al-Khashab, M. N., Al-Hayalee, M. T., 2008. Stabilization of expansive clayey soil modified by lime with an Emulsified Asphalt Addition, Eng.& Technology,Vol. 26, No.10: 324-332.

ASTM D422. 1990. Standard test methods for particle size analysis of soils. Annual Books of ASTM Standards.

ASTM D4318. 1984. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soil. Annual Books of ASTM Standards.

ASTM D2166. 2000. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. Annual Books of ASTM Standards.

ASTM D698. 2000. Standard test method for laboratory compaction characteristic. Annual Books of ASTM Standards.

Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. Engineering Geology, No 42: 223-237.

Chen, F.H., 1975. Foundation in expansive soils, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.

Kezdi, A., 1979. Stabilization earth roads, Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier Science Ltd.

Mallela, J., Von Quintus, H., Smith, K., 2004. Consideration of lime stabilized layer in mechanistic empirical pavement design, the national lime association, 200 North Glebe Road, Suite 800, Arlington, Virginia 22203: 1-30.

McDowell, C., 1959. Stabilization of soils with lime, lime flyash and other lime reactive materials. Highway Research Board 231: 60–66

Mitchel, J.K. 1976. The properties of cement stabilized soils. Residential workshop on materials and methods for low cost road, rail and reclamation works, Australia.

Mohamed, A.S., Mohamed, A.S., Yaser, M.M., 2009. Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content, Geotech Geolo Eng. 27: 105-113.

Nalbantoglue, Z., 2000. Engineering properties of an expansive soil modified by lime. 3rd International Conference on Ground Improvement Techniques, Singapore, pp. 277-282.

Puppala, A.J., Griffin, J.A., Hoyos, L.R., Chomtid, S., 2004. Studied on sulfate-resistant cement stabilization methods to address sulfate induced soil heave, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering. ASCE, Vol. 130 (4): 391-402.

Rajani, S.C., Padmakumar, G.P., 2009. Stabilization of clayey soil using lime solution, 10th National Conference on Technological Trends (NCTT09) 6-7 Nov., pp. 73-77.

Sabry, M.A., 1977. Mineralogical and engineering properties of compacted soil lime mixture. PhD thesis, Oklahama State University, Oklahama.

Sherwood, P.T., 1993. Soil stabilization with cement and lime: state of the-art review. Transport Research Laboratory, London: Her Majesty's Stationery Office.