بررسی تأثیر نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش برش مستقیم برای تعیین مقاومت برشی

وحید تائبی*، محمد حاجی‌ستوده، احمدرضا محبوبی‌اردکانی؛
دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی‌مهندسی شهید عباسپور

تاریخ: دریافت ۹۲/۷/۳۰ **پذیرش** ۹۲/۱۲/٦

چکیده

استفاده از آهک راه حلی برای تثبیت خاک رس است. بهبود ویژگی‌های خاک با استفاده از آهک عملیاتی سریع و ساده است که می‌تواند در پروژه‌های بزرگ یا کوچک، گنجانیده شود. هدف از بهبود خاک با آهک، رسیدن به واکنشی فوری است که تقویت خاک با توجه به کاهش رطوبت و تغییرات شیمیایی در خاک رس را به‌طورچشم‌گیری به‌همراه دارد. روش آماده‌سازی نمونه‌ها برای بررسی پارامتریک تأثیر آهک بر مقاومت برشی، مهم است. در این تحقیق علاوه بر بررسی نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌ها به بررسی تأثیر درصد آهک، درصد رطوبت عمل‌آوری و زمان عمل‌آوری بر مقاومت برشی خاک رس با استفاده از آزمایش برش مستقیم پرداخته شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌ها در نتایج حاصل مؤثر است و معین شد که درصد بهینه‌ای از آهک و رطوبت وجود دارد که در آن مقاومت برشی بیشنیه می‌گردد

واژگان کلیدی: درصد آهک، درصد رطوبت اختلاط، زمان عمل‌آوری، مقاومت برشی، نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌ها، تثبیت خاک

مقدمه

خاک‌های رسی به‌دلیل ساختار ملکولی خود، از نظر مقاومت برشی رفتاری کاملاً متفاوت با خاک‌های درشت دانه‌تر مانند لای و ماسه دارند. بدین‌ترتیب که مقاومت برشی ایجاد شده در ساختار رس‌ها بیش‌تر به‌دلیل وجود چسبندگی در بین ذرات رس است و این در حالی است که عامل به‌وجودآورندهٔ مقاومت برشی در ساختار خاک‌های درشت دانه‌تر اصطکاک بین ذرات است. بنا بر این، هر عاملی که باعث تغییر در این ساختار شود، می‌تواند باعث تغییر در

* **نویسندهٔ مسئول** vtaebi@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

پارامترهای مقاومت برشی خاک شود. می‌توان انتظار داشت که به‌دلیل تغییراتی که در ساختار کانی‌های خاک رس به‌علت اضافه کردن آهک به‌وجود می‌آید، در پارامترهای مقاومت برشی تغییر چشم‌گیری اتفاق بیافتد. آهک با شروع سیمانتاسیون از نظر مقاومت می‌تواند تثبیت شود و مقدار مقاومت و سختی به‌طور محسوسی زیاد می‌شود [۸]، [۱۱]، [۲۰]. مقاومت کوتاه مدت خاک تثبیت شده با آهک ناشی از واکنش‌های تبادل کاتیونی و مقاومت بلندمدت ناشی از واکنش‌های پوزولانی هستد [۲۱]، [۲۳]. چندین بررسی موردی، به بهبود عمل‌کرد خاک‌های مسئله‌دار تثبیت شده با آهک پرداخته است [۱٤]، [۱۸]، [۲٦]. آشنا بودن با واکنش‌های اساسی که عموماً پس از اختلاط آهک با خاک به‌وقوع می‌پیوندد برای تفسیر نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های بهبود خاک ضروری است. افزایش مقاومت در طول زمان، در هر دو دیدگاه کوتاه‌مدت و بلندمدت، می‌تواند به نوع و مقدار محصولات واکنش که با فرایندهای شیمیایی در طی تثبیت به‌وقوع می‌پیوندند، بستگی داشته باشد.

واکنش‌های آهک با خاک در مقاله‌ها و کتاب‌های بسیاری تشریح شده است [۹]. فرایندهای شیمیایی که در خاک تثبیت شده با آهک به‌وجود می‌آید با TRB در سال ۱۹۸۷، و اینگلز[۱] و متکالف[۲] در سال ۱۹۷۲و هم‌چنین روف[۳] و هو[٤] و در سال ۱۹٦٦بررسی شده است. پیش‌بینی میزان افزایش مقاومت بدست آمده از اختلاط آهک برای خاک‌های مختلف کار سختی است. لوکات[٥] در سال ۱۹۹۰ با بررسی عوامل مختلف مقدار مقاومت برشی (Su) به‌دست آمده از آزمایش‌ها را تابع متغیرهای زیر معرفی کرده است.

$$S_u = (S_{u0}, A, A_w, W_0, c_0, t_a, t) \qquad (۱)$$

که در آن S_{u0} مقاومت برشی زه‌کشی نشده بلافاصله بعد از تراکم، A پارامتر نوع کانی‌ها، سطح مقطع مخصوص، اندازهٔ ذرات و ظرفیت تبادل یون است، A_w پارامتر مربوط به خصوصیات شیمیایی آب منفذی اولیه، W_0 درصد رطوبت نمونه، c_0 درصد مواد افزودنی، t_a و t بر حسب روز و به‌ترتیب زمان جاافتادگی و مراقبت هستند. زمان جاافتادگی عبارت است از مدت زمان بین اختلاط و تراکم (معمولاً ۲٤ ساعت) و زمان مراقبت مدت سپری شده بعد از تراکم یا قالب‌بندی است. این‌که طبیعت خاک ثابت نیست از موضوعات مهمی است که

۱. Ingles ۲. Metcalf ۳. Ruff ٤. Ho ٥. Locat

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

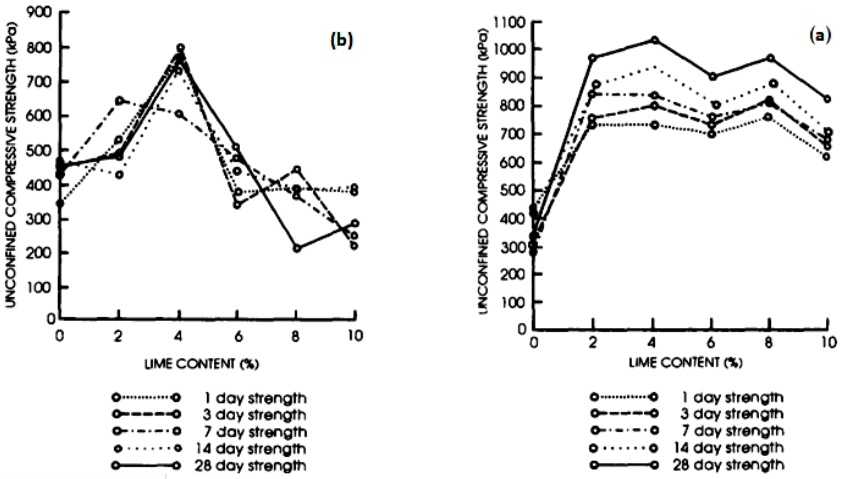
واکنش‌های شیمیایی بر کانی‌های خاک منجر به تغییراتی در بعضی از پارامترها از جمله توزیع اندازهٔ دانه‌ها (با اثر سیمانتاسیون) و کانی‌ها می‌شود. این موضوع باعث اصلاح ویژگی‌های شاخص از جمله حدود اتربرگ و روانی می‌شود [۱۰]. با توجه به توضیحات ارائه شده رفتار خاک‌ها فقط با روش‌های تجربی قابل شناسایی هستند ولی بررسی‌های بسیاری نشان داده است که اختلاط خاک رس با آهک مقدار چسبندگی را کاهش و مقدار ضریب اصطکاک را بیش‌تر می‌کند

بل [۱] در سال ۱۹۹۶ به‌بررسی اثر تغییر درصد آهک بر مقاومت نمونه‌های کائولینیت و مونتموریلونیت با زمان‌عمل‌آوری ۱، ۳، ۷، ۱٤ و ۲۸ روز پرداخت. وی مقاومت نمونه‌ها را با استفاده از آزمایش فشاری ساده اندازه‌گیری کرد. نتایج آزمایش‌هایش در شکل ۱ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود با افزودن ٤ درصد آهک به خاک‌های بررسی شده، مقاومت افزایش یافته است و با افزودن بیش‌تر آهک، مقاومت کسب شده روند کاهشی داشته است. اما مشاهده می‌شود که در بعضی نقاط مثلاً نمونه‌های کائولینیتی با ۸ درصد آهک پس از شروع به کاهش مقاومت، دوباره افزایش می‌یابد. این افزایش در بعضی نمونه‌ها به ۱۰۰ کیلوپاسکال نیز می‌رسد. بل در سال ۱۹۹٦در گزارش‌های خود به نحوهٔ متراکم کردن نمونه‌ها و انرژی تراکمی اشاره نکرده است

کیتازومی [۲] و تراشی [۳] در سال ۲۰۰۲ و هم‌چنین پورباها [٤] و همکارانش در سال ۲۰۰۰، برای چند نوع خاک و بیش‌تر برای خاک‌های تثبیت شده با آهک یا سیمان، به بررسی افزایش مقاومت با گذشت زمان پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش مدت‌زمان عمل‌آوری منجر به انجام واکنش‌های پوزولانی می‌شود که در نهایت مقاومت برشی افزایش می‌یابد. هم‌چنین آهنبرگ [٥] و جوهانسون [٦] نیز در سال ۲۰۰٦ اثر زمان روی مقاومت برشی سه نوع خاک که دو نوع آن‌ها رسی بودند، با آزمایش فشاری ساده، بررسی کردند. آن‌ها در تحقیقاتشان از مواد تثبیت‌کنندهٔ متعددی از جمله آهک استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که رفتار یک خاک با مواد تثبیت کننده مختلف، متفاوت است. برای مثال اکثر مقاومت کسب شده در خاک‌های

۱. Bell ۲. Kitazume ۳. Terashi ۴. Porbaha ۵. Ahnberg
٦. Johansson

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

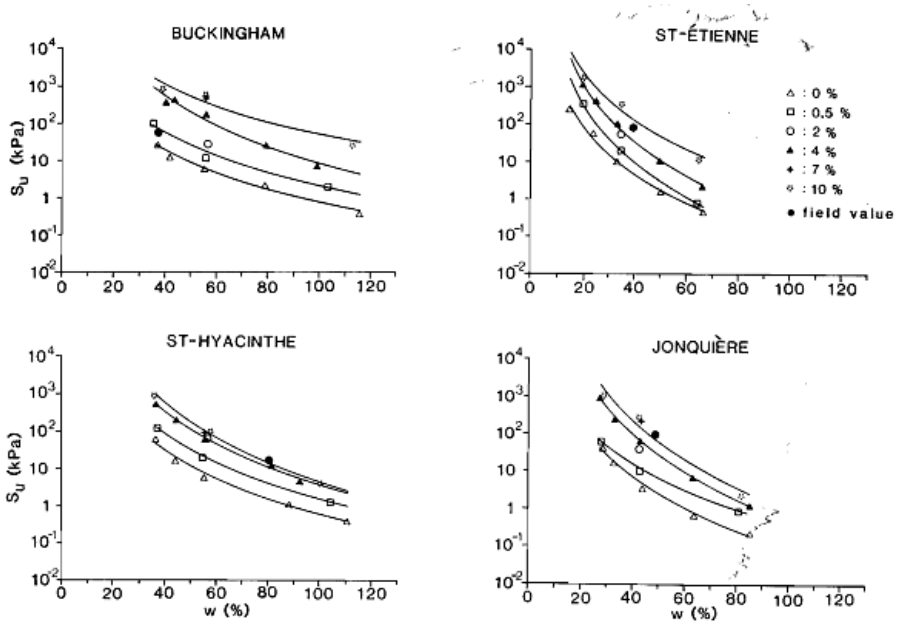


شکل ۱. مقاومت فشاری ساده: a) کائولینیت، b) مونتموریلونیت با درصدهای مختلف آهک [۸]

تثبیت شده با سیمان مربوط به ۱ تا ۳ ماه اولیه پس از عمل اختلاط است و از این زمان به بعد افزایش مقاومت با سرعت کم‌تری پیش می‌رود در حالی که برای خاک‌های تثبیت شده با آهک افزایش مقاومت سرعت ثابتی دارد.

لوکات و همکارانش (۱۹۹۰)، آهنبرگ و همکارانش (۲۰۰٦) و چند محقق دیگر، تأثیر تغییرات درصد رطوبت بر مقاومت برشی خاک رس تثبیت شده با آهک، را بررسی کردند. لوکات و همکارانش (۱۹۹۰)، آزمایش‌های خود را روی ٤ نوع خاک مختلف و برای درصدهای مختلف آهک استفاده شده بررسی کردند و نتایج را به‌صورت نمودارهای شکل ۲ نشان دادند. چنان‌که مشاهده می‌شود برای درصد رطوبت‌های کم‌تر مقاومت برشی بیش‌تر به‌دست آمده است. این در حالی است که باید در درصد رطوبت معینی بیش‌ترین مقاومت برشی در اثر افزودن آهک به خاک به‌دست آید و با افزودن بیش‌تر رطوبت از مقاومت کاسته شود. در حقیقت بر اثر افزودن رطوبت به خاک بدون آهک، به‌دلیل ایجاد روغن‌کاری بین ذرات مقاومت برشی تا حدی افزایش، و با افزودن بیش‌تر رطوبت، کاهش می‌یابد. برای خاک تثبیت شده با آهک نیز همین رفتار وجود دارد با این تفاوت که مقداری از رطوبت، صرف انجام واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزلانی می‌گردد. در ادامه به‌نحوهٔ انجام آزمایش‌های برش مستقیم بر روی خاکی با دامنه خمیری کم (حدود ۱۷ درصد) می‌پردازیم.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]



شکل۲. مقاومت برشی بر حسب درصد رطوبت و برای درصدهای مختلف آهک (۳۰ روزه) [۱۷]

خاک بررسی شده

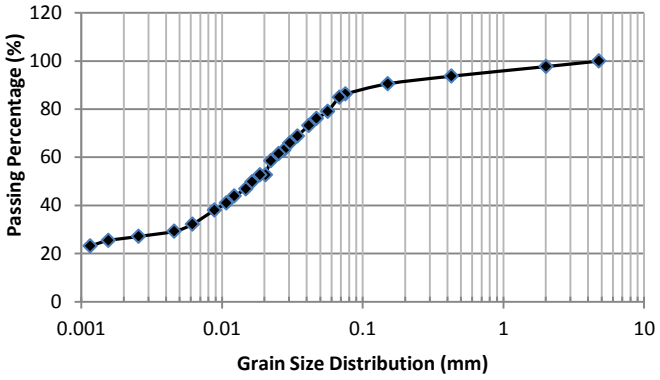
برای این بررسی آزمایش‌های اولیه روی چند نوع خاک مختلف از مناطق مختلف شهر تهران، انجام شد. با انجام آزمایش‌های مختلف، سرانجام خاک منطقه‌ای از شهرستان ورامین برای انجام آزمایش‌ها انتخاب شد. در شکل ۳ نمودار دانه‌بندی خاک مورد نظر قابل مشاهده است. حد پلاستیک و حد روانی این خاک به‌ترتیب ١٤ و ۳۲ درصد است. هم‌چنین خاک برای تعیین عناصر تشکیل‌دهنده از لحاظ XRF آنالیز شد. نتایج این آنالیز و سایر آزمایش‌های مربوط به تعیین مشخصات فیزیکی خاک بررسی شده در جدول ۱ آمده است

آهک استفاده شده در بسته‌های ۲۵ کیلویی محصول کارخانهٔ قم، شرکت همکار سنگ است که مشخصات اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن در جدول ۲ آمده است. قبل از استفاده از آهک، آن را در اجاق حرارت داده و پس از خشک شدن از الک نمره ٤٠ عبور داده شد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

جدول۱. مشخصات شیمیایی و فیزیکی خاک بررسی شده

	۱. ترکیبات شیمیایی (نتایج آزمایش XRF و pH)								
O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	pH
٥٦/٨١	٠/٨٤	٢/١٧	٦/٨٥	١٩/٨٨	٢/٠٧	٦/٧٨	٠/٢٧	٤/٣٢	٦/٥
	۲. مشخصات فیزیکی								
	اندازهٔ ذرات								
٪ ١٠	۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر								
٪ ٦٥	۰/۰۰۲ تا ۰/۱ میلی‌متر								
٪ ٢٥	کوچک‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر								
٢/٦١	چگالی ویژه								
٣١/٦	حد روانی (٪)								
١٤	حد خمیری (٪)								
١٧/٦	نشانهٔ خمیری (٪)								
١٢/٥	درصد رطوبت بهینه (٪)								
١٩/٩	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)								
CL	نوع خاک								



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک بررسی شده

جدول ۲. مشخصات آهک استفاده شده

عناصر	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Si_2O	Na_2O	K_2O	MgO	TiO_2	MnO	P_2O_5	S
درصد وزنی	٨٠/١٥	٠/٠٦	٠/١٥	٠/٧٤	٠/٠٣	٠/٠١	٠/٣٧	٠/٠٠٢	٠/٠٠١	١/٣٢٥	٠/٠٠١

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌های برش مستقیم

در این بخش، برای بررسی پارامترهای درصد آهک، درصد رطوبت و زمان عمل‌آوری بر مقاومت برشی خاک رس، ۱٤٤ نمونه که حاوی درصد اختلاط مختلف هستند برای آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. خاک بررسی شده برای تهیهٔ نمونه‌ها ابتدا از الک نمرهٔ ٤ عبور داده شده است. بدین منظور آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های با درصدهای اختلاط آمده در جدول ۳ در قالب برش با ابعاد ۲×٦×٦ سانتی‌متر، انجام شد.

جدول ۳. فهرست مخلوط‌های به‌کار گرفته شده در آزمایش برش مستقیم

دمای عمل‌آوردن (درجهٔ سانتی‌گراد)	سرعت دستگاه (mm/min)	نیروی قائم (kg/cm^2)	مدت زمان عمل‌آوری (روز)	درصد رطوبت	درصد آهک	شمارهٔ نمونه
دمای اتاق	۰/۲۵	۱، ۲، ٤	۱، ۷، ۲۸، ۹۰	۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۸	۱	A
دمای اتاق	۰/۲۵	۱، ۲، ٤	۱، ۷، ۲۸، ۹۰	۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۸	۳	B
دمای اتاق	۰/۲۵	۱، ۲، ٤	۱، ۷، ۲۸، ۹۰	۱۱، ۱۳، ۱۵، ۱۸	۵	C

لازم است که عوامل مؤثر در تثبیت و به‌سازی خاک برای تهیهٔ نمونه‌ها به‌خوبی شناسایی شود. عوامل مؤثر در به‌سازی خاک عبارتند از:

جنس خاک (دانه‌بندی، نوع کانی‌ها، مقدار کانی‌ها و ...)، نوع و مقدار اضافه شونده، نحوهٔ اختلاط، انرژی تراکم، رطوبت عمل‌آوری، درصد اضافه شونده و زمان عمل‌آوری.

انرژی تراکمی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در به‌سازی خاک است که در منابع مختلف کم‌تر به آن پرداخته شده و حتی در بعضی از آن‌ها نادیده گرفته شده است منظور از انرژی تراکمی همان انرژی‌ای است که در لحظه کوبیدن نمونه‌ها در قالب برش مستقیم صرف می‌شود. از آن‌جا که انرژی تراکم و نحوهٔ تراکم در عمل بر مقاومت برشی اثر دارد، ضروری است تا در این پژوهش انرژی تراکم و نحوهٔ تراکم ثابت نگه داشته شود، به‌عبارتی استانداردسازی شود. در ادامه سه روش برای این تهیهٔ نمونه‌ها ارائه شد و محاسن و ایرادهایی که هر روش دارد ارزیابی شد.

الف) روش اول: می‌توان برای تهیهٔ نمونه‌ها مقدار وزن مخصوص خشک را ثابت نگه داشت. در این حالت، نمی‌توان مقدار انرژی تراکم در ساخت نمونه‌ها را ثابت کرد. این روش در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

بسیاری از تحقیقات پیشین استفاده شده است. این در حالی است که در به‌سازی خاک عامل انرژی نسبت به وزن مخصوص خشک اهمیت بیش‌تری دارد و وزن مخصوص نتیجه آزمایش است. به‌عبارت دیگر در صورتی که خواسته شود برای نمونه‌های با درصد رطوبت متفاوت به وزن مخصوص یک‌سان رسید، نیاز است تا انرژی تراکم تغییر داده شود. بنا بر این در صورتی‌که پارامتر بررسی شده رطوبت عمل‌آوری باشد دیگر نمی‌توان گفت که عامل به‌وجود آمدن تغییرات مقاومت برشی رطوبت است بلکه انرژی تراکم نیز در این تغییرات مؤثر است. از این رو، ذکر این نکته ضروری است که با توجه به این‌که معیاری برای اندازه‌گیری کمی اعمال انرژی وارد در ساخت نمونه‌ها وجود ندارد، به همین سبب، محتمل‌ترین علت برای بروز خطا در نتایج حاصل از انجام آزمایش برش مستقیم، تفاوت در انرژی وارد شده در تراکم لایه‌ها است. این مسئله، خصوصاً در ساخت نمونه‌های کوچک مقیاس، تأثیر بیش‌تری خواهد داشت. بنا بر این در آماده‌سازی نمونه‌ها لازم است انرژی تراکم ثابت نگه داشته شود.

ب) روش دوم: برای ثابت کردن انرژی تراکم می‌توان بعد از عمل‌آوری نمونه‌ها، آن‌ها را بدون ایجاد تراکم نگه‌داری کرد و در روز آزمایش با استفاده از انرژی تراکمی که مقدار آن استاندارد شده است درون قالب برش مستقیم کوبید. در این تحقیق برای کوبیدن نمونه در قالب برش مستقیم با وارد کردن ضربه با چکش استفاده شده در پروکتور اصلاح شده بر کوبه استفاده می‌شود (شکل ۲). بنا بر این برای تعیین تعداد ضربات برای کوبیدن نمونه در قالب برش مستقیم لازم است که مقدار انرژی وارد در واحد حجم در قالب برش مستقیم برابر استاندارد ASTM D۱۵۵۷ (پروکتور اصلاح شده) گردد. در صورتی‌که نمونه در سه لایه درون قالب برش مستقیم کوبیده شود تعداد ضربه برای متراکم کردن هر لایه با توجه به این اطلاعات برابر است با:

ارتفاع سقوط (٤٥٧/٢ میلی‌متر)، وزن چکش (٤٤/٥ نیوتن)،

نیرو در واحد حجم (۲۷۰۰kN,m/m^{۳})، حجم قالب برش مستقیم (۰/۰۰۰۰۷۲ متر)،

سطح مقطع کوبه فلزی (۰/۰۰۳٦ متر)، تعداد لایه (۳ لایه)

$$۲۷۰۰۰۰۰ = \frac{۳ \times ۰/۴۵۷۲ \times ۴۴/۵ \times n}{۰/۰۷۲ \times ۱۰^{-۳}} \rightarrow n = ۳$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

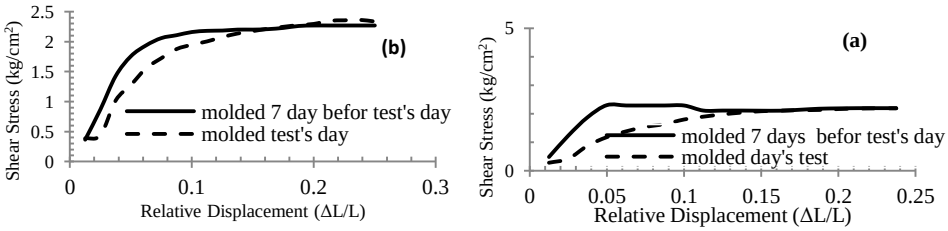
با توجه به محاسبه مذکور، برای متراکم کردن خاک در قالب برش مستقیم (شکل ٤) آن را در ۳ لایه ریخته و هر لایه برای رسیدن به انرژی تراکم اصلاح شده با ۳ ضربه کوبیده می‌شود.

شکل ٤. کوبه فلزی و خاک متراکم شده در قالب برش مستقیم

برای بررسی صحت این نوع استانداردسازی یک سری آزمایش برش مستقیم بر خاک رس مخلوط شده با ۱، ۳ و ۵ درصد آهک که در دو حالت متفاوت قالب‌گیری شده بود انجام و مشاهده شد مخلوطی که در روز اختلاط قالب‌گیری شده بود رفتار شکننده‌ای از خود نشان می‌دهد (شبیه به خاک بیش تحکیم یافته، چنان‌که در شکل ۵ a قابل مشاهده است) درحالی‌که مخلوطی که روز آزمایش قالب‌گیری شده است رفتاری شبیه به خاک عادی تحکیم از خود نشان داد (شکل ۵ b). و به این علت است که نمونه‌هایی که در روز اختلاط قالب‌گیری شده‌اند پیوندهای آهک با خاک رس، درون قالب، تشکیل می‌شود، این در حالی است که اگر خاک اختلاط شده با آهک نگه‌داری شود و در روز آزمایش قالب‌گیری گردد دیگر این پیوندها وجود ندارند و عمل کوبش این پیوندها را از بین می‌برد. هرچه درصد آهک مخلوط کم‌تر باشد، رفتار دو نوع خاکی که با روش مختلف قالب‌گیری شده تقریباً یک‌سان‌تر است (شکل ۵ b) از این رو، این روش آماده‌سازی نمونه ممکن است باعث بروز دو خطا در آزمایش شود: اول خطای شکسته شدن پیوندهای ایجاد شده با واکنش بین آهک و ذرات خاک رس در لحظهٔ کوبیدن نمونه در قالب برش مستقیم در روز آزمایش، دوم عدم شبیه‌سازی چکشی، که برای کوبیدن نمونه در قالب برش مستقیم استفاده می‌شود (با توجه به چکش استفاده شده در استاندارد)، زیرا نمی‌توان از اثر تمرکز تنش غافل شد.

ج) روش سوم: نمونه‌ها به‌صورت متراکم شده نگه‌داری شوند. در این حالت دو روش وجود دارد. ۱) از اثر تمرکز تنش صرف نظر شود و نمونه‌ها را درون قالب برش با ۳ ضربه‌ای که در بخش قبل محاسبه شد، کوبیده شود و تا روز آزمایش به‌همان صورت درون قالب نگه‌داری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]



شکل ۵. نحوه تغییرات تنش‌برشی-جابجایی نسبی برای نمونه ۷ روز قالب‌گیری شده و در روز آزمایش قالب‌گیری شده (a) ۵ درصد آهک اختلاط (b) ۱ درصد آهک اختلاط

شود که این گزینه به‌دلیل کم بودن قالب‌های برش زمان‌بر است. ۲) نمونه‌ها در ظرف پروکتور طبق ASTM D۱۵۵۷ کوبیده شوند و از آن‌ها در روز آزمایش درون قالب برش مستقیم نمونه‌گیری شود. در این صورت نمونه‌ها طبق استاندارد کوبیده می‌شوند و بحث تمرکز تنش پیش نمی‌آید ولی با توجه به این‌که برای آماده‌سازی نمونه‌ها باید ۱٤٤ آزمایش تراکم انجام شود، حجم مصالح مصرفی زیاد و از نظر زمانی هم وقت‌گیر می‌شود، بدین منظور می‌توان نمونه کوبیده شده را با استفاده از جک هیدرولیکی (شکل ٦) از قالب خارج کرده و به چهار قرص تقسیم کرد. در این صورت تعداد تراکم به ۳٦ عدد کاهش می‌یابد. سپس می‌توان هر قرص را در نایلون به‌صورت جداگانه قرار داده و برای نمونه‌گیری در روزهای مدنظر، در جای مناسب به‌طوری‌که رطوبت از دست ندهند نگه‌داری کرد. هر کدام از این قرص‌ها در روز آزمایش از ظرف خارج شده و با استفاده از قالب برش مستقیم از آن‌ها نمونه‌گیری می‌شود. لازم به‌ذکر است در این تحقیق برای کوبیدن نمونه‌ها درون قالب پروکتور از روش تراکم با انرژی اصلاح شده استفاده شده است. نمونه‌ها درون قالب به قطر ٤ اینچ و با انرژی تراکم اصلاح شده در ۵ لایه با ۲۵ ضربه متراکم شدند

تغییرات مقاومت برشی خاک تثبیت شده با آهک

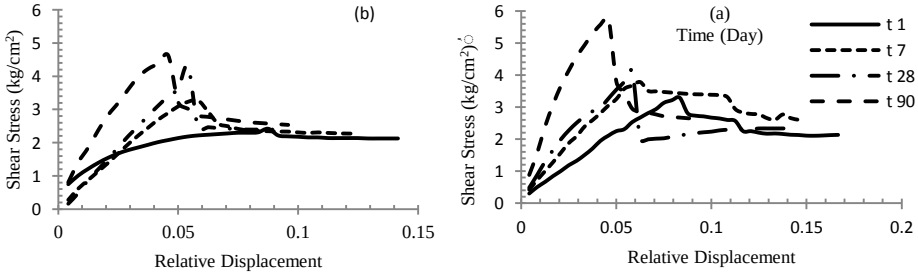
قبل از بررسی نتایج، در نظر گرفتن این نکته مهم است که به‌سازی با آهک فرایندی سیمانتاسیون است که مقاومت برشی و چسبندگی خاک را تا حد بسیار زیادی افزایش می‌دهد. برای شکل ۷ که نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی نسبی برای نمونه‌های با ۳ درصد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

الف ب ج

شکل ٦.) الف) نحوۀ خارج کردن نمونه با استفاده از جک هیدرولیکی، ب) نحوۀ قالب‌گیری با استفاده از جک هیدرولیکی، ج) نحوۀ پر کردن قالب برش

آهک و ۱۸ درصد رطوبت و ۱ درصد آهک با ۱۱ درصد رطوبت برای زمان‌های ۱، ۷ ، ۲۸ و ۹۰ روز است این مطلب را نشان می‌دهد. نتایج شکل ۷ حاصل آزمایش برش مستقیم برای تنش قائم ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. چنان‌که شکل نشان می‌دهد، برای نمونه‌های با زمان عمل‌آوری بیش‌تر شیب اولیه منحنی بیش‌تر می‌شود و نمونه‌ها رفتار شکننده‌تری دارند و با تغییر مکان کم‌تری به نقطۀ گسیختگی می‌رسند. این رفتار برای نمونه‌های با درصد آهک و رطوبت متفاوت، و تحت تنش قائم ۱ و ٤ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نیز مشاهده شد. در طی واکنش‌های پوزولانی، سیمانته شدن رخ می‌دهد و یون‌های کلسیم و هیدروکسید به‌صورت یک‌دست در محلول مصرف می‌شوند. افزایش مقاومت در طول زمان اثرهای هم‌افزایی فرایندهای سیمانتاسیون را منعکس می‌کند

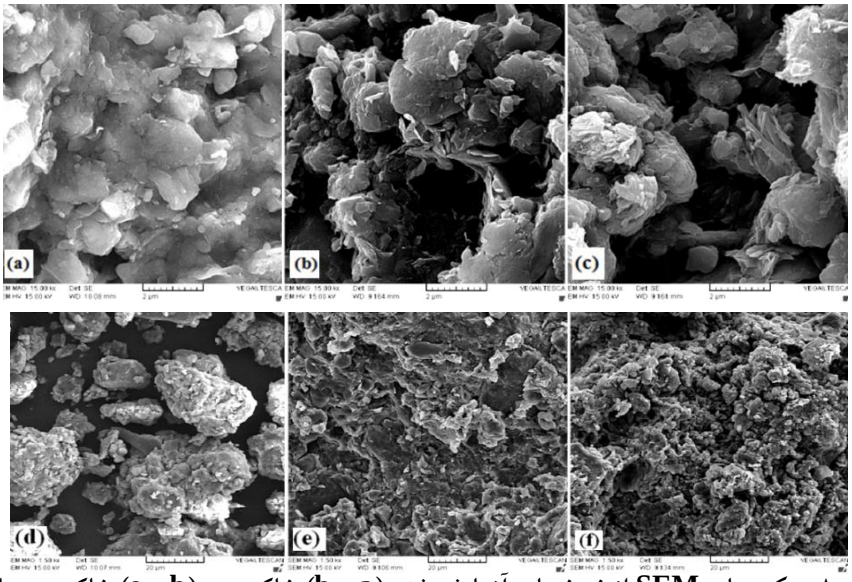


شکل ۷. نمودار تنش برشی بر حسب جابه‌جایی نسبی a) ۱ درصد آهک با ۱۱ درصد رطوبت، b) ۳ درصد آهک با ۱۸ درصد رطوبت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

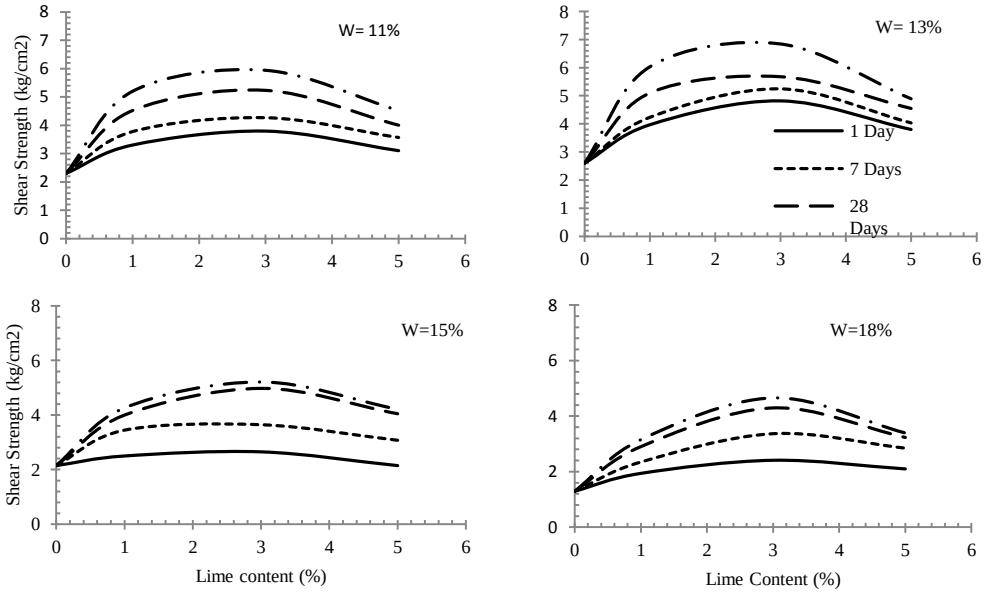
تأثیر افزایش آهک بر میکروساختار ذرات خاک رس

برای بررسی تغییرات میکروساختار ذرات خاک رس پس از اختلاط با آهک از نمونه بدون آهک و هم‌چنین ۱ و ۳ درصد آهک با زمان‌عمل‌آوری ۲۸ روزه عکس SEM گرفته شده است. میکروساختار واکنش آهک با خاک رسی بررسی شده در شکل ۸ قابل مشاهده است. شکل ۸ a و ۸ b به‌ترتیب، خاک رس را قبل از اضافه کردن آهک با بزرگ‌نمایی ۲۰ و ۲ میکرومتر نشان می‌دهد. قبل از اضافه کردن آهک ذرات و دانه‌های خاک به‌صورت منفرد قابل مشاهده‌اند شکل ۸ c و ۸ d خاک رس را با ۱ درصد آهک و شکل ۸ e و ۸ f خاک رس را با ۳ درصد آهک بعد از ۲۸ روز با بزرگ‌نمایی‌های ۲۰ و ۲ میکرومتر نشان می‌دهد. اضافه شدن آهک منجر به شروع فرایند هیدراتاسیون حرارتی سریع و تبادل یون به‌صورت هم‌زمان می‌شود که بعد از مدت ۲۸ روز ذرات خاک را در یک کلوخه‌های بزرگ‌تر لخته می‌کند (شکل ۸ b و ۸ c). این کلوخه‌ها به‌تبع واکنش‌های پوزولانی با یک‌دیگر کم و بیش سیمانته می‌شوند (شکل ۸ e و ۸ f). این مشاهده‌ها نشان می‌دهد که واکنش‌های پوزولانی عامل مقاومت بلندمدت هستند. این نتیجه در تعدادی از گزارش‌های قبلی از جمله ادیس[1] و گریم[2] (۱۹٦٦) و کروفت[3] در سال ۱۹٦٤ نیز برای خاک‌های دیگری آمده است.



شکل ۸. عکس‌های SEM از نمونه‌های آزمایش شده (a و b) خاک رس (b و e) خاک رس با ۱ درصد آهک (c و f) خاک رس با ۳ درصد آهک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]



شکل ۹. نحوه تغییرات مقاومت برشی بر حسب درصد آهک اختلاط با رطوبت و زمان عمل‌آوری مختلف (محور قائم نشان دهنده مقاومت برشی حداکثر نمونه‌ها می‌باشد)

چنان‌که مشاهده می‌شود افزایش مقاومت در طول زمان برای نمونه با ۳ درصد آهک نسبت به نمونه‌های دیگر بیش‌تر است و این موضوع بیان‌گر این مطلب است که درصد بهینه این آهک برای تثبیت خاک مورد آزمایش شده ۳ درصد وزنی خاک خشک است. شایان ذکر است که در پژوهش‌های قبلی نیز به یک درصد آهک بهینه اشاره شده بود [۱۷]. بنا بر این یک درصد وزنی بهینه وجود دارد که در آن مقاومت برشی بیشینه می‌گردد. به‌طوری‌که در صورت افزودن آهک به خاک که بیش از درصد وزنی بهینه باشد نه تنها افزایش مقاومت به‌همراه نمی‌آورد بلکه منجر به کاهش مقاومت نیز خواهد شد. علت این پدیده را باید در سازوکار واکنش آهک با ذرات خاک بررسی کرد. خاک ترکیب شده با آهک با شروع سیمانتاسیون می‌تواند تثبیت شود و مقدار مقاومت و سختی به‌طور محسوسی زیاد می‌گردد. مقاومت کوتاه مدت خاک تثبیت شده با آهک ناشی از واکنش‌های تبادل کاتیونی و مقاومت بلندمدت ناشی از واکنش‌های پوزولانی هستند. با افزودن آهک به خاک تا حد درصد بهینه، حداکثر تغییر در کانی‌های خاک رس به‌دلیل واکنش‌های سیمانتاسیون و پوزولانی اتفاق می‌افتد و درگیری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

مکانیکی بین ذرات خاک منجر به افزایش زاویهٔ اصطکاک می‌شود که همین تغییرات ساختاری عاملی در افزایش مقاومت برشی است ولی درصورتی‌که این مقدار از درصد بهینه عبور کند، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. احتمالاً دلیل عدم افزایش قابل ملاحظه در مقاومت برشی با افزایش میزان آهک از ۳ به ۵ درصد، اشباع شدن مخلوط از آهک است که وجود آهک بیش‌تر نه تنها مؤثر واقع نشده است بلکه نهایتاً باعث کاهش مقاومت برشی نیز خواهد شد.

بنا بر این با توجه به توضیحاتی که در مورد علت افزایش مقاومت در بالا ذکر شد، آن‌چه که بل (۱۹۹٦) گزارش کرده است نمی‌تواند توجیه علمی داشته باشد و چنان‌که در مقدمه به آن اشاره شد این پراکندگی در نتایج بل شاید به‌دلیل نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌ها است. یا به‌عبارت دیگر وی در ساخت نمونه‌ها انرژی تراکمی را ثابت نگه نداشته است.

تأثیر تغییر درصد رطوبت و زمان بر مقاومت برشی

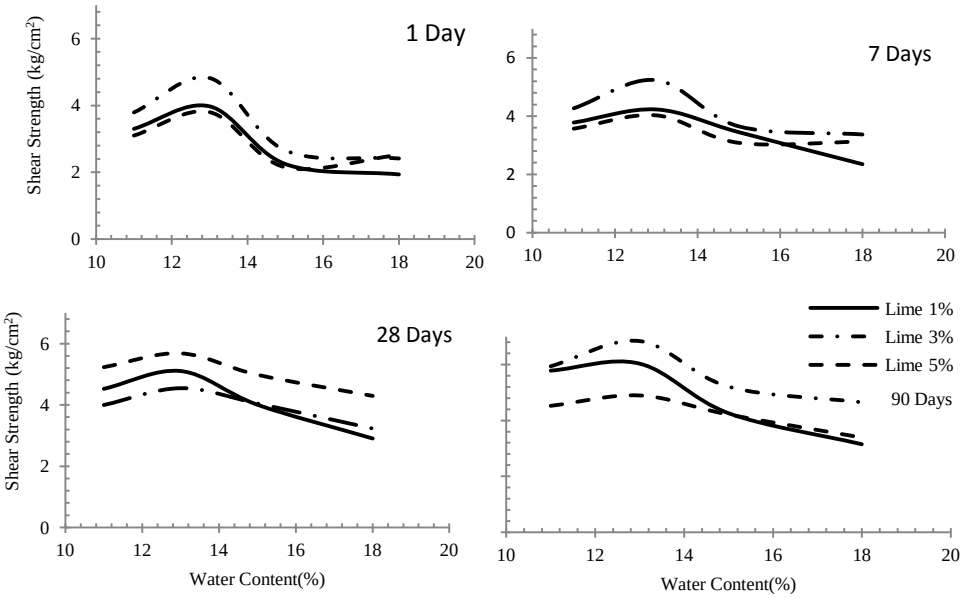
شکل ۱۰ نمودارهای مقاومت برشی بر حسب درصد رطوبت را برای درصدهای آهک و زمان عمل‌آوری ۱، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نشان می‌دهد. این نمودارها برای نیروی قائم ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع ترسیم شده‌اند. بقیه نمونه‌ها نیز رفتاری مشابه و حدوداً بین این دو نمونه را دارند. از قبل انتظار می‌رفت که در درصد رطوبت‌های کم‌تر مقاومت برشی بیش‌تر به‌دست آید [۱۷]. اما چنان‌که از نمودارهای شکل ۱۰ مشخص است در رطوبت ۱۳ درصد که حدود ۰/۵ درصد بیش‌تر از رطوبت بهینه خاک بدون آهک است حداکثر مقاومت به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی اثر افزودن آهک به خاک بر مقاومت برشی خاک رس بررسی شده، نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم بررسی و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که خاک رس در اثر انجام واکنش‌های سیمانتاسیون که در طی افزودن آهک به خاک بوقوع می‌پیوندد، حالت شکننده می‌گیرد به‌طوری‌که با جابه‌جایی کم‌تر اما با تنش‌بیش‌تری دچار گسیختگی می‌گردد. هرچه زمان عمل‌آوری افزایش یابد این پدیده خود را بیش‌تر نشان می‌دهد. هم‌چنین عکس‌های SEM گرفته شده از نمونه‌های با ۱ و ۳ درصد آهک نشان می‌دهد که در اثر افزودن آهک به خاک ساختار صفحه‌ای خاک رس تغییر می‌کند و ذرات

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

حالت کلوخه‌ای به‌خود می‌گیرند.



شکل ۱۰. مقاومت برشی بر حسب رطوبت برای درصدهای مختلف آهک (محور قائم نشان‌دهندهٔ مقاومت برشی حداکثر نمونه‌ها است

یکی از نکات حائز اهمیت در تحقیقات آزمایشگاهی نحوهٔ آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش شده است. در این تحقیق روش‌های مختلف تهیه نمونه‌ها ذکر شد و با مقایسه آن‌ها بهترین روش برای اجرای این‌گونه تحقیقات ارائه شد. یکی از عواملی که باید در تهیه نمونه‌های خاک رس به‌سازی شده با آهک به آن توجه شود نحوه وارد کردن انرژی تراکم در آماده‌سازی نمونه‌ها است که در این تحقیق روشی مناسب ارائه شد.

نتایج مقاومت برشی حاکی از آن است که افزودن آهک به خاک تا ۳ درصد منجر به افزایش مقاومت برشی می‌گردد که بسته به درصد رطوبت و زمان عمل‌آوری این مقدار متغیر است اما با افزودن بیش‌تر درصد آهک روند کاهشی در مقاومت دیده می‌شود. هم‌چنین نتایج آزمایش‌ها در طول زمان نشان می‌دهد که با گذشت زمان نیز مقاومت روند افزایشی دارد اما میزان افزایش مقاومت برای این نوع خاک بعد از ۲۸ روز نسبت به قبل از این زمان کاهش می‌یابد. درصد رطوبت عمل‌آوری نیز یکی دیگر از عوامل مؤثر در تغییرات مقاومت برشی کسب شده با

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

خاک تثبیت شده با آهک است. نتایج نشان داد که افزودن رطوبت تا حدی منجر به افزایش مقامت برشی می‌گردد و با افزودن بیش‌تر رطوبت اثر نامطلوب بر آن دارد. هم‌چنین با بررسی تأثیر درصد آهک، درصد رطوبت عمل‌آوری و زمان عمل‌آوری بر پارامترهای مقاومت برشی (چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک) این نتیجه به‌دست آمد که روند تغییرات پارامترهای مقاومت برشی نیز مشابه روند تغییرات مقاومت برشی است که در بالا شرح داده شد

منابع

۱. آذرفر پ.، عبدی م.، *تأثیر کلراید بر مقاومت فشاری و خواص خمیری کائولینیت تثبیت شده با آهک*، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، سمنان، ایران (۱۳۸۲).

۲. فاخر ع.، عسگری ف.، *تورم و واگرایی خاک‌ها*، جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران (۱۳۷۲).

3. Ahnberg H., Johansson S. E., Pihl H., Carlsson T., "Stabilizing Effect of Different Binders in Some Swedish Soils", Swedish Geotechnical Institute, Vol. 7, No. 1 (2006) 9-23.

4. Al-Mukhtar M., Lasledj A., Alcover J., "Behaviour and Mineralogy Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 20°C", Applied Clay Science, Vol. 50 (2010) 191-198.

5. ASTM D2487, "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", Annual Book of American Society for Testing and Material Standards, West Conshohocken, USA (2006).

6. ASTM D4318, "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soil", Annual Book of American Society for Testing and Material Standards, West Conshohocken, USA (2005) 561-572.

7. ASTM D4972, "Standard test Method for pH of Soils", Annual Book of American Society for Testing and Material Standards, West Conshohocken, USA (2007).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

8. Bell F. G. "Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils", Department of Geology and Applied Geology, Engineering Geology, Vol. 42 (1996) 223-237.

9. Boynton R. "Chemistry and Technology of Lime and Limestone." 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY (1980).

10. Choquette M., "La stabilisation a la chaux des sols argileux du Quebec". Ph.D. thesis, Department of Geology, Universite Laval, Quebec, Que (1988).

11. Consoli N. C., Lopes L. S., Jr. Prietto P. D. M., Festugato L., Cruz R. C., "Variables Controlling Stiffness and Strength of Lime-Stabilized Soils." J. Geotech. Geoenviron. Eng., 137 (6) (2011) 628-632.

12. Croft J. B., "The Processes Involved in the Lime Stabilization of Clay Soils", Proc. Aust. Road Research Board, Vol. 2, part 2 (1964) 1169-1203.

13. Eades J. L., Grim R. E., "A quick test to determine lime requirements for soil stabilization", Highway Research Record, Vol. 139 (1966) 61-72.

14. Joshi R. C., Natt G. S., Wright P. J., "Soil Improvement by Lime-Flyash Slurry Injection." Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, AA Balkema, Stockholm, Rotterdam, 3 (1981) 707-712.

15. Le roux A., "Traitement des sols argileux par la chaux", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussees, No. 40 (1969) 59-95.

16. Le roux A., Toubeau Ph. "Mise en evidence du seuil de nocivite et du mecanisme d'action des sulfures au cours d'un traitement a la chaux". 9th South East Asian Geotechnical Conference, Bangkok, Thailand (1987).

17. Locat J., Berube M., Choquette M., "Laboratory Investigations on the Lime Stabilization of Sensitive Clays–Shear Strength Development", Sainte-Foy (Qukbec) Canada (1990).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]

18. Petry T. M., Little D. N., "Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures-History, Practice and Future." J. Mater. Civ. Eng., 14(6) (2002) 447-460.

19. Porbaha A., Shibuya S., Kishida T., "State of the Art in Deep Mixing Technology", Geomaterial Characterization and Ground Improvement, Vol. 4, No. 3, Part 3 (2000) 91-110.

20. Rajasekaran G., Rao S. N., "Strength Characteristics of Lime-Treated Marine Clay." Proc. Inst. Civ. Eng. Ground Improv., 4(3) (2000) 127-136.

21. Khattab S. A. A., Al-Mukhtar M., Fleureau J. M., "Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil." J. Mater. Civ. Eng., 19(4) (2007) 358-366.

22. Kitazume M., Terashi M., "The Deep Mixing Method-Principle, Design and Construction", Coastal Development Institute of Technology (CDIT), A. A. Balkema Publishers Tokyo, Japan (2002).

23. Rogers C. D. F., Boardman D. I., Papadimitriou G., "Stress Path Testing of Realistically Cured Lime and Lime/Cement Stabilized Clay." J. Mater. Civ. Eng., 18(2) (2006) 259-266.

24. Ruff C. G., Ho C., "Time-Temperature Strength-Reaction Product Relationships in Lime-Bentonite-Water Mixtures", Highway Research Record No. 139, Highway Research Board (1966) 42-60.

25. TRB "Lime Stabilization, Reactions, Properties, Design, and Construction", State-of-the-Art Report 5. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, USA (1987).

26. Wilkinson A., Haque A., Kodikara J., Adamson J., Christie D., "Improvement of Problematic Soils by Lime Slurry Pressure Injection: Case Study", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.136, Issue 10 (2010) 1459-1468.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.4.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2615]