

رفتار برشی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با آهک در معرض محیط‌های اسیدی

امین رحیمی^۱، میثم بیات^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- استادیار، گروه عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

*bayat.m@pci.iaun.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۸/۳/۲۵]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱۲/۲۱]

چکیده

یکی از مهم‌ترین آثار و نتایج آلودگی هوا ایجاد باران اسیدی است. گسترش روزافزون شهرها، رشد سریع شهرنشینی و انقلاب صنعتی باعث ایجاد آثار فراوان زیست محیطی در داخل و اطراف شهرها شده است. فعالیت‌های صنعتی، تولید انرژی و سوخت، کاربرد کود و آفت‌کش باعث ورود مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلاینده به اتمسفر می‌شود. ورود آلاینده‌های فلزی و ترکیبات اسیدساز از قبیل ترکیبات گوگرددار، نیتروژن دار و یا نتیجه واکنش‌های آنها در اتمسفر به باران موجب افزایش اسیدیته بارندگی‌ها، تشکیل باران‌های اسیدی و تغییر در کیفیت بارش‌های جوی خواهد شد. به طور کلی می‌توان این‌گونه بیان نمود که منظور از باران اسیدی، بارانی است که pH آن از ۵/۶ یعنی pH باران طبیعی کمتر باشد. در این پژوهش به بررسی تاثیر باران‌های اسیدی بر رفتار مکانیکی خاک ماسه تثبیت شده با آهک مربوط به نواحی شرقی اصفهان پرداخته شده است. در ابتدا آهک با درصد‌های متفاوت به خاک اضافه شد و نمونه‌ها پس از زمان عمل آوری و اشباع کردن در محلول‌هایی با مقادیر pH متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد افزایش درصد آهک علاوه بر افزایش درصد رطوبت بهینه و مقاومت برشی نمونه، موجب افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی شده است. در حالی که کاهش تغییر pH به سمت اسیدی شدن باعث کاهش پارامترهای مقاومت برشی نمونه خاک می‌شود. نتایج آزمایش‌های برشی نشان می‌دهد که مقدار کاهش مقاومت به دلیل افزایش اسیدیته با افزایش مقدار آهک نمود بیشتری دارد. در نهایت با استفاده از عکس‌های میکروسکوپی تهیه شده از نمونه‌ها، اثر pH و مقدار آهک روی پیوندهای ایجاد شده بین دانه‌های ماسه بررسی شده است که نشان می‌دهد افزایش اسیدیته باعث از بین رفتن پیوند ایجاد شده بین دانه‌ها توسط ذرات آهک می‌شود.

واژگان کلیدی: باران اسیدی، pH، رفتار مکانیکی، مقاومت برشی، تثبیت، آهک.

۱- مقدمه

گسترش روزافزون شهرها، رشد سریع شهرنشینی، وقوع انقلاب صنعتی و گسترش قابل توجه فعالیت‌های صنعتی، باعث ورود مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلاینده به اتمسفر می‌شود. بارش اسیدی نتیجه خود پالایی جو است که در آن ابرها ذرات معلق و گازهای محلول در هوا را جذب کرده و با شروع بارش، این آلاینده‌ها از هوا جدا می‌شوند. بیش از ۶۰ درصد اسیدیته بارش اسیدی مربوط به اسید سولفوریک و تا ۳۰ درصد سهم اکسیدهای نیتروژن است. باران اسیدی آثار زیست-محیطی متعددی دارند که بیشتر آثار منفی بوده و از آن جمله می‌توان به تخریب بناهای تاریخی، از بین رفتن پوشش-های جنگلی و موجودات زنده در دریاچه‌ها اشاره کرد [1]. همچنین باران اسیدی می‌تواند باعث فرسایش خاک شده و آثار مخربی را بر خاک داشته باشد، پس باران اسیدی به عنوان یکی از منابع آلودگی خاک نیز قلمداد می‌شود [2]. با توجه به اهمیت موضوع مورد مطالعه، پژوهش‌های قابل توجهی در این خصوص انجام شده است. کوثری و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی تاثیر حضور اسید سولفوریک بر مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های خاک پرداختند. در این مطالعه، مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های خاک اشباع از آب با مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی مربوط به نمونه‌های اشباع از اسید سولفوریک مورد مقایسه قرار گرفته است، نتایج نشان دهنده کاهش قابل توجه مقاومت ویژه نمونه‌های خاک اشباع به علت حضور اسید سولفوریک است [3]. کامون و همکاران (۱۹۹۶) تاثیر باران‌های اسیدی در خاک‌های گرانیتی تثبیت شده با سیمان و آهک را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری خاک گرانیت تثبیت شده با آهک تحت باران اسیدی با $pH=2$ ، بعد از یک جریان نفوذ کم به اندازه یک ششم مقدار اولیه اش کاهش پیدا می‌کند [4]. شارما و همکاران (۲۰۱۱) پژوهش‌های خود را روی تاثیر باران‌های اسیدی بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های با شکل پذیری متفاوت انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های ژئوتکنیکی این خاک‌ها با تغییرات در شدت باران اسیدی متفاوت است [5]. یان و همکاران (۲۰۱۴) تاثیر باران اسیدی در شستشو و خواص

هیدرولیکی خاک آلوده به سرب را بررسی نموده‌اند. در این پژوهش نتایج نشان می‌دهد که ضریب هدایت هیدرولیکی خاک با افزایش میزان منافذ به وسیله جریان مایع نفوذ کننده یا همان باران اسیدی، کاهش می‌یابد. همچنین pH و وجود یون سولفات در باران اسیدی تاثیر قابل توجهی در شدت شستشو دارد [6]. یان و همکاران (۲۰۱۴) تاثیر باران اسیدی با شرایط pH مختلف را بر ویژگی‌های شستشویی خاک رس کائولین آلوده به سرب تثبیت شده با سیمان نیز مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که شرایط بسیار اسیدی موجب افزایش قابل توجه مقادیر سرب و کلسیم شسته شده است و همچنین افزایش مقدار سیمان از ۱۲٪ تا ۱۸٪ موجب کاهش مقادیر سرب و کلسیم شسته شده می‌شود [7]. بخشی پور و همکاران (۲۰۱۶) روی تاثیر باران‌های اسیدی بر خواص ژئوتکنیکی خاک‌های درجا در مالزی پژوهش‌هایی را انجام دادند. هدف از این پژوهش بررسی اثر باران‌های اسیدی بر خاک بوده است. در این پژوهش سطوح pH مختلف باران اسیدی برای پوشش مختلف معادل ۱ تا ۲۰ سال بررسی شد و در آزمایش‌های انجام شده به این نتیجه رسیدند که pH پایین باران اسیدی منجر به کاهش در مقاومت خاک، بیشینه وزن مخصوص خشک و همچنین افزایش ضریب نفوذپذیری در خاک می‌شود [8]. قبادی و همکاران (۲۰۱۶) روی اثر تغییرات pH بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رس تثبیت شده با آهک مطالعه کردند. نتایج افزایش پارامترهای مقاومت برشی زهکشی نشده در شرایطی که مایع نفوذی pH بالا یا پایینی داشته باشد را نشان می‌دهد [9]. هو و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعات خود از آهک به منظور بهبود مقاومت فشاری محصور نشده خاک آلوده اسیدی استفاده کردند که به این نتیجه رسیدند که افزایش آهک در حدود ۳٪ باعث افزایش مقاومت فشاری محصور شده خاک و همچنین بی اثر شدن شدت بالای آلودگی خاک می‌شود [10].

اگر چه تاکنون اثر باران‌های اسیدی روی خاک‌های مختلف مورد توجه بوده است [11-15] ولی ارائه یک مطالعه کامل در این زمینه می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی خاک مفید واقع شود. در این پژوهش، نمونه خاک مورد مطالعه از

اردیبهشت ماه ادامه می‌یابد. منطقه‌ای که نمونه‌برداری خاک از آنجا صورت گرفت، به این دلیل انتخاب شد که این منطقه در قسمت شرق استان اصفهان واقع است و بیشتر جهت وزش باد در استان از غرب به شرق است. از سویی وجود دو کارخانه بزرگ فولاد مبارکه و ذوب آهن و هم چنین شهرک‌های صنعتی زیادی که در این منطقه قرار دارد، سبب اهمیت این منطقه شده است. توجه به این نکته ضروری است که عبور فاضلاب‌های صنعتی در این منطقه از دیگر عوامل اهمیت منطقه مورد مطالعه است.

شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده

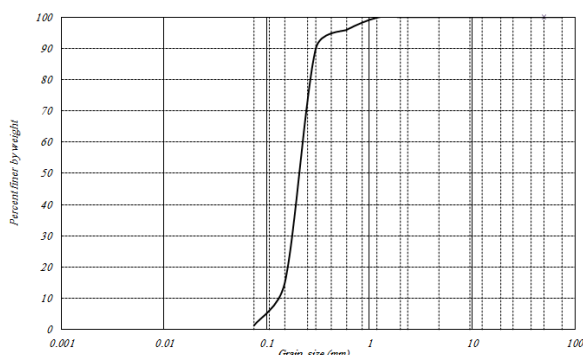


Fig. 1. Grain size distribution curve of the soil

۲-۱ چگونگی آماده سازی نمونه‌ها

آهک استفاده شده در این پژوهش، آهک آبدار یا Ca(OH)_2 به شکل پودر نرم است که ترکیبات شیمیایی آن در جدول (۱) ارائه شده است. در این مطالعه اثر باران‌های اسیدی روی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با آهک بررسی شد. در بررسی تاثیر آهک در خواص ژئوتکنیکی این دسته از خاک‌ها، آهک در دمای اتاق و بر اساس درصد‌های ۴، ۶ و ۸ درصد به هر نمونه اضافه شده است. آهک با خاک کاملاً ترکیب و مخلوط شده و پس از تهیه خاک تثبیت شده با آهک در بیشینه دانسیته خشک در درون قالب‌های مورد نظر، نمونه‌ها عمل آوری شده‌اند. برای عمل آوری نمونه‌ها، نمونه‌ها به همراه قالب بلافاصله در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شدند و برای مدت زمان عمل آوری مورد نظر در ظرف‌های آب نگهداری شده‌اند تا رطوبت آنها تغییر نکند. در شکل (۲) چگونگی نگهداری نمونه‌ها (طی دوره‌های عمل آوری) در ظرف‌های آب نشان داده شده است. در پایان زمان عمل آوری، تمامی نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت

مناطق کویری شهرستان ورزنه واقع در استان اصفهان برداشت شده و روش پژوهش در این به صورت آزمایشگاهی است. از این رو نمونه‌سازی در شرایط مختلف در آزمایشگاه صورت می‌پذیرد. در ابتدا آهک با درصد‌های مختلف به خاک اضافه می‌شود و آزمایش‌ها پس از زمان عمل‌آوری انجام می‌شود.

۲- معرفی منطقه مورد مطالعه و آماده‌سازی نمونه‌ها

امروزه یکی از معضلات شهرهای صنعتی بزرگ باران‌های آلوده است که باعث ایجاد تغییرات مخربی بر خواص مهندسی خاک از جمله افزایش تراکم پذیری، تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود. شهر اصفهان به عنوان یک کلان شهر صنعتی نیز از این معضل مبرا نبوده و وجود مناطق صنعتی متعدد مانند ذوب آهن، فولاد مبارکه، پتروشیمی و... باعث تولید باران‌های اسیدی و قلیایی در این منطقه می‌شود. خاک مورد مطالعه در این پژوهش از تپه‌های ماسه‌ای شهر ورزنه در شرق استان اصفهان تهیه شده است. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در شکل (۱) نشان داده شده است که طبق سیستم طبقه‌بندی یونیفاید، ماسه بدانه‌بندی شده (SP) است که بر اساس منحنی دانه‌بندی، پارامترهای دانه‌بندی خاک عبارت است از $D_{10}=0.13 \text{ mm}$, $D_{30}=0.17 \text{ mm}$, $D_{60}=0.23 \text{ mm}$ ، $C_u=1.77$ و $C_c=0.96$. از نظر موقعیت جغرافیایی، شهر ورزنه در طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی واقع شده است. منطقه مورد نظر از شمال به طول ۱۷ کیلومتر به راه آهن سراسری اصفهان- یزد، بطول ۷۵ کیلومتر به شهرستان نائین، از شرق به طول ۳۰ کیلومتر به تالاب بین‌المللی گاوخونی و استان یزد و از جنوب به طول ۷ کیلومتر به تپه‌های ماسه‌ای به طول ۳۵ کیلومتر به شهر حسن آباد (بخش جرقویه علیا) و از غرب به طول ۶ کیلومتر به روستای اشکهران و نهایتاً به طول ۲۵ کیلومتر به شهر اژیه (بخش جلگه) محدود است. بررسی‌های صورت گرفته با استفاده از تصاویر ماهواره ای نشان می‌دهد که در واقع، توده‌های باران‌زا که از دریای مدیترانه، دریای سیاه و اقیانوس اطلس سرچشمه می‌گیرند، منشاء اصلی بارش‌هایی هستند که از مهرماه روی استان اصفهان شروع شده و تا

اسیدسولفوریک است. به این جهت برای ساخت باران‌های اسیدی با pHهای عنوان شده، مقادیری از اسیدنیتریک و اسیدسولفوریک به نسبت ارایه شده در گزارش‌های سازمان هواشناسی استان مطابق با جدول (۲) به آب مقطر خالص افزوده شد تا pHهای مورد نظر حاصل شود.

جدول ۲. نسبت‌های نیترات به سولفات در هوای منطقه مورد مطالعه

Ratio	Value
$\text{NO}_3^- / \text{NO}_3^- \text{SO}_4^{2-}$	0.31
$\text{NO}_3^- / \text{SO}_4^{2-}$	0.44
$\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$	2.27

Table 2. Nitrate to sulfate ratios in the case study for artificial acid rain production

۳- روند انجام آزمایش‌ها و ارائه نتایج

آزمایش‌های مورد مطالعه در این پژوهش که به منظور بررسی تاثیر باران اسیدی بر رفتار مکانیکی نمونه خاک تثبیت شده با آهک انجام شده عبارتند از: آزمایش تراکم، آزمایش برش مستقیم و آزمایش تک محوری. در ادامه چگونگی انجام آزمایش و نتایج حاصل ارایه شده است.

۳-۱- آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده

به منظور یافتن درصد رطوبت بهینه (w_{opt}) و دانسیته خشک ماکزیمم (γ_{d-max}) لازم است در درصدهای رطوبت مختلف، مقادیر وزن مخصوص خشک متناظر بدست آید. این آزمایش طبق ASTM D1557 انجام شده است. منحنی تراکم اصلاح شده برای نمونه خاک تمیز (بدون آهک) و خاک با درصدهای مختلف آهک ۰.۴٪، ۰.۶٪ و ۰.۸٪ در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به نمودار منحنی تراکم مشاهده می‌شود اضافه شدن درصد آهک موقعیت منحنی تراکم را به سمت بالا و راست تغییر داده است. نتایج نشان می‌دهد که با اضافه شدن آهک به خاک میزبان تا حدی باعث افزایش رطوبت بهینه و جرم مخصوص متناظر با آن شده است.

در محلول اسیدی با pHهای متفاوت در حالت اشباع قرار گرفته‌اند. پس از گذشت مدت زمان عملیات آماده‌سازی، روی نمونه‌ها آزمایش‌های تک محوری و برش مستقیم انجام شده است.

شکل ۲. عمل آوری در یک محیط مرطوب



Fig. 2. Curing in a wet environment

در ادامه روند انجام آزمایش‌ها و آماده‌سازی نمونه‌ها کامل توضیح داده شده است. در این مطالعه، درصد آهک ۰.۴٪، ۰.۶٪ و ۰.۸٪ برای تثبیت خاک در نظر گرفته شده است. مقادیر pHهای ۲، ۳، ۴ و ۵/۶ و مدت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آهک مصرفی

جرم مخصوص	495
(kg/m^3)	
Gs (-)	2/36
Ca(OH) ₂ (%)	85/5
Mg(OH) ₂ (%)	۰/۸۲
CaCO ₃ (%)	1/6
CaSO ₄ (%)	۰/۰۶
سایر ترکیبات	12/02

Table 1. Physical and chemical properties of lime

۲-۲ چگونگی ساخت محلول اسیدی

برای بازسازی فرایند باران اسیدی با افزودن مقادیر مشخصی از اسیدهای غالب در باران منطقه اصفهان، محلول باران اسیدی مصنوعی با pHهای ۲، ۳، ۴ و ۵/۶ آماده شده است. بر طبق گزارش‌های سازمان هواشناسی استان اصفهان مقادیر اسیدهای موجود در هوای استان شامل اسیدنیتریک،

۲-۳- نتایج آزمایش تک محوری

تک محوری نمونه‌ها شده است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری تک محوری به صورت تقریبی در مورد نمونه خاک تثبیت شده با ۶٪ آهک نسبت به نمونه تثبیت شده با ۴٪ آهک ۲/۵ برابر و در مورد نمونه خاک تثبیت شده با ۸٪ آهک نسبت به نمونه تثبیت شده با ۴٪ آهک حدود ۳ برابر افزایش داشته است و در مورد نمونه های ۱۴ روزه مشاهده می‌شود، اثر اسیدی بودن در نمونه خاک تثبیت شده با ۴٪ آهک به مراتب نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با ۶٪ و ۸٪ آهک نمود کمتری دارد. به عبارت دیگر در نمونه خاک تثبیت شده با ۴٪ آهک، میزان pH تاثیر چندانی نسبت به سایر موارد روی مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته است. در حالی که در نمونه‌های تثبیت شده با ۶٪ و ۸٪ آهک، هرچه میزان pH نمونه مورد مطالعه افزایش می‌یابد، شاهد افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها هستیم.

۳-۳- نتایج آزمایش برش مستقیم

آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌های تثبیت شده با ۶٪ و ۸٪ آهک با مدت عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه طبق ASTM D3080 انجام شده است. به دلیل ساخت نمونه‌ها و عمل‌آوری آنها در قالب‌های لوله‌ای شکل، برای انجام آزمایش برش مستقیم از قالب دایره‌ای با قطر تقریباً ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. برای تهیه نمونه‌ها برای آزمایش برش مستقیم پس از ترکیب کامل خاک با آهک در رطوبت بهینه، مخلوط آماده شده و در سه لایه در داخل قالب‌های استوانه‌ای ریخته شده و در نهایت با چکش متراکم شده است. قالب‌ها بلافاصله در کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و برای مدت زمان عمل‌آوری مورد نظر درون مخزن‌های آب نگهداری شده است. برای بدست آوردن پارامترهای مقاومت برشی خاک تمامی نمونه‌ها با یک درصد آهک، pH و مدت زمان عمل‌آوری مشخص تحت سه تنش نرمال متفاوت آزمایش شده است. با توجه به تعداد زیاد نمودارهای حاصل از انجام آزمایش برش مستقیم، در شکل (۶)، منحنی‌های تنش-کرنش را تنها برای نمونه‌ها با مدت زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه ارائه شده است. پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی حاصل شده برای کلیه نمونه‌ها حاصل از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم

برای انجام آزمایش تک محوری از ASTM D2166 استفاده شده است و آزمایش‌های این مرحله طبق این استاندارد انجام شده است. نمونه‌های خاکی عمل‌آوری شده تحت pH های ۲، ۳، ۴ و ۵/۶ و با درصدهای ۴٪، ۶٪ و ۸٪ آهک تحت آزمایش تک محوری مورد بررسی واقع شدند.

شکل ۳. نتایج آزمایش پروکتور اصلاح شده برای خاک با درصدهای مختلف آهک

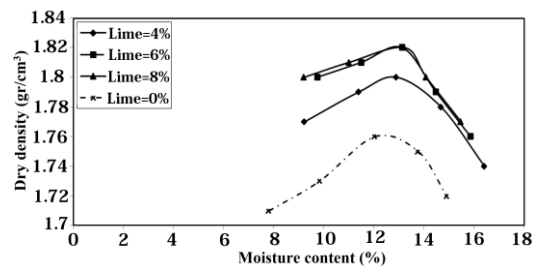


Fig. 3. Results of modified proctor tests for the soil with various lime content

شکل (۴) منحنی آزمایش تک محوری روی نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک تحت ۷ و ۵۶ روز عمل‌آوری در مقادیر مختلف pH را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در ۱۴ و ۲۸ روزه نیز این نتایج وجود دارد که بخاطر حجم بالای نمودارها فقط برای این دو مدت عمل‌آوری (یعنی ۷ و ۵۶ روزه) نتایج ارائه شده است. مقادیر ماکزیمم مقاومت تک محوری کل آزمایش‌ها در شکل (۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در یک مقدار pH ثابت، مقاومت فشاری تک محوری (UCS) تمامی نمونه‌ها با اضافه شدن آهک به خاک میزبان افزایش یافته است. در تمامی نمودارها نیز با اسیدی‌تر شدن محیط در یک دوره عمل‌آوری خاص، مقاومت نمونه‌ها کاهش یافته است. با مقایسه کلی نتایج، می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش مقدار آهک در یک دوره عمل‌آوری معین، اثر اسیدی‌تر شدن محیط بر روی کاهش مقاومت نمونه‌ها بیشتر است که این نتیجه توافق خوبی با کارهای پیشین [15] دارد. در واقع اثر اسیدی شدن محیط روی مقاومت برشی نمونه‌ها با افزایش مقدار آهک محسوس‌تر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در محیط‌های اسیدی نیز مشابه حالت معمول (pH=5.6) افزایش دوره عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت

هر یک از پارامترهای درصد آهک موجود در خاک، میزان اسیدی بودن محیط و مدت زمان عمل‌آوری را از طریق میانگین‌گیری بر پارامترهای مقاومت برشی خاک به صورت جداگانه بررسی خواهیم کرد. اثر مقدار آهک روی پارامترهای مقاومت برشی در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، افزایش مقدار آهک از ۶٪ به ۸٪، بطور میانگین موجب افزایش ۲۳/۵ درصدی چسبندگی و افزایش ۴/۷ درصدی زاویه اصطکاک داخلی شده است.

در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج ارائه شده در جدول (۳) نشان می‌دهد که برای یک دوره عمل‌آوری و مقدار pH خاص، افزایش درصد آهک در نمونه خاک، باعث افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک می‌شود. همچنین برای یک مقدار معین pH و آهک، افزایش دوره عمل‌آوری نیز موجب افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک شده است. در حالیکه برای یک نمونه خاص با یک مقدار آهک ثابت، کاهش مقدار pH باعث کاهش پارامترهای مقاومت برشی خاک شده است که تاثیر آن روی مقدار چسبندگی محسوس‌تر است. در ادامه تاثیر

شکل ۴. نتایج آزمایش تک محوری برای دوره عمل‌آوری ۷ و ۵۶ روزه

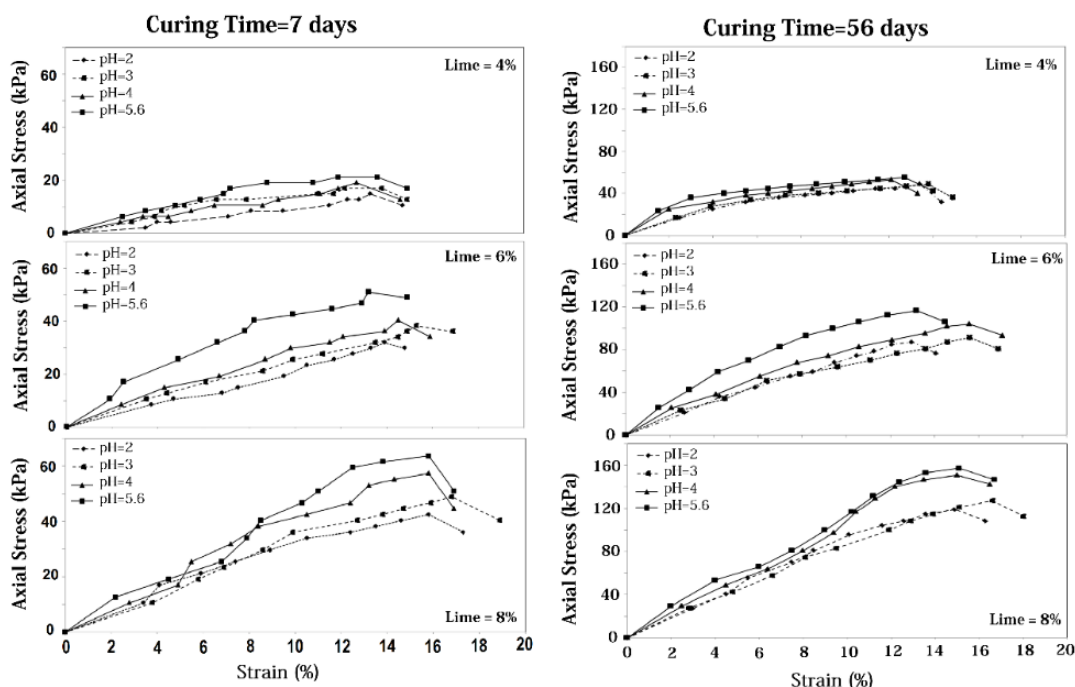


Fig. 4. The results of unconfined compression tests at curing times of 7 and 56 days.

شکل ۵. مقاومت فشاری محصور شده نمونه‌ها

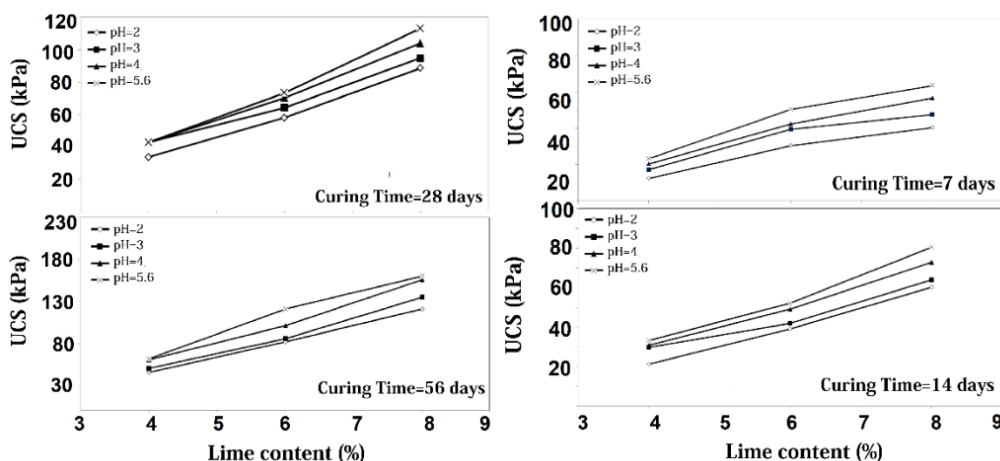


Fig. 5. Unconfined compressive strength of the specimens

شکل ۶. نمودار تنش برشی-کرنش برای نمونه خاک تثبیت شده با ۸٪ آهک به ازای pHهای مختلف در مدت زمان عمل آوری ۵۶ روزه

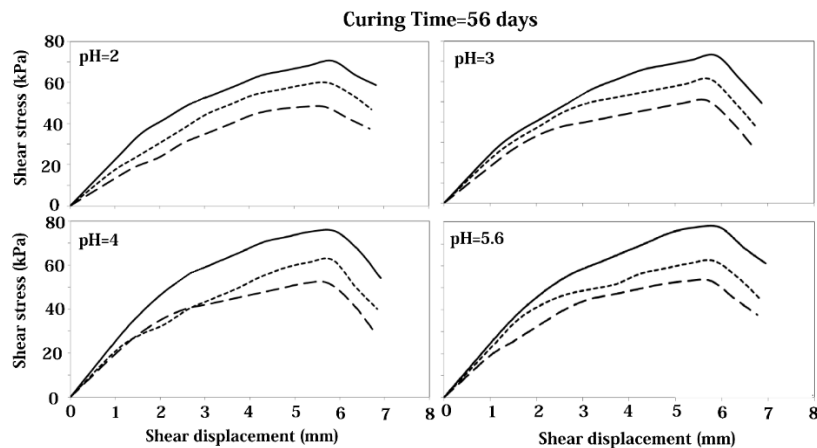


Fig. 6. The results of direct shear tests for lime content=8% at curing time of 56 days.

جدول ۳. پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها با درصد آهک، pH و مدت عمل آوری متفاوت

Curing Time=7 days	C (kPa)	ϕ (o)	Curing Time=14 days	C(kPa)	ϕ (o)
pH=2, Lime=6%	19.99	37.63	pH=2, Lime=6%	21.17	39.38
pH=3, Lime=6%	21.16	39.38	pH=3, Lime=6%	23.52	41.82
pH=4, Lime=6%	25.87	41.02	pH=4, Lime=6%	25.89	44.74
pH=5.6, Lime=6%	27.63	41.86	pH=5.6, Lime=6%	26.46	45.14
pH=2, Lime=8%	25.88	41.84	pH=2, Lime=8%	27.63	43.62
pH=3, Lime=8%	27.76	43.77	pH=3, Lime=8%	28.80	45.25
pH=4, Lime=8%	28.23	44.12	pH=4, Lime=8%	30.03	46.48
pH=5.6, Lime=8%	30.57	45.57	H=5.6, Lime=8%	31.75	46.94
Curing Time=28 days	C (kPa)	ϕ (o)	Curing Time=56 days	C (kPa)	ϕ (o)
pH=2, Lime=6%	25.27	43.71	pH=2, Lime=6%	29.97	46.56
pH=3, Lime=6%	26.43	44.45	pH=3, Lime=6%	31.72	46.85
pH=4, Lime=6%	28.21	46.85	pH=4, Lime=6%	34.65	47.20
pH=5.6, Lime=6%	29.36	46.99	pH=5.6, Lime=6%	35.24	49.40
pH=2, Lime=8%	37.64	44.85	pH=2, Lime=8%	42.86	46.66
pH=3, Lime=8%	38.81	46.23	pH=3, Lime=8%	44.69	46.92
pH=4, Lime=8%	39.36	47.94	pH=4, Lime=8%	45.30	48.51
pH=5.6, Lime=8%	40.58	48.55	pH=5.6, Lime=8%	45.49	50.15

Table 3. Shear strength parameters of the specimens with various lime content, pH and curing time

پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها تثبیت شده با ۶٪ یا ۸٪ آهک نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل (۹) دیده می‌شود، افزایش مدت زمان عمل آوری از ۷ تا ۱۴ روز تاثیر کمی روی مقدار چسبندگی داشته است و بعد از ۱۴ روز این اثر قابل‌ملاحظه‌تر شده است. در حالیکه اثر زمان عمل-آوری روی زاویه اصطکاک از همان ابتدا قابل ملاحظه بوده است. در این پژوهش پس از آزمایش نمونه‌ها با مقادیر pH و آهک مختلف در آزمایش برش مستقیم یا تک محوری، قسمتی از نمونه‌ها را بلافاصله بعد از آزمایش به صورت تکه‌های کوچک با سطحی صاف و هموار در آورده و پس از خشک

شکل (۸) نیز اثر pH روی پارامترهای مقاومت برشی خاک تثبیت شده با آهک را بطور میانگین نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، با افزایش pH خاک، هر دو پارامتر مقاومت برشی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر، هرچه خاصیت اسیدی باران افزایش یابد (با کاهش مقدار pH از مقدار خنثی)، پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های کاهش می‌یابند. کاهش مقاومت نمونه‌های خاک با افزایش میزان اسیدیته در پژوهش-های گذشته نیز نشان داده شده است [8,14-15]. در شکل (۹) نیز اثر مدت زمان عمل آوری به صورت میانگین روی

حالت pH برابر با ۲ از بقیه موارد بیشتر قابل مشاهده است. در حالیکه در حالت خنثی (pH=5.6) پیوند ایجاد شده بین دانه‌ها به دلیل حضور ذرات آهک بین آنها بیشتر از سایر موارد است. در یک مقدار pH ثابت، مقدار آهک اضافه شده روی نقاط تماس و چسبندگی بین ذرات ماسه نیز اثرگذار بوده است. شکل (۱۱) اثر مقدار آهک را در یک مقدار ثابت pH برابر با ۵/۶ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این تصویر مشاهده می‌شود، افزایش مقدار آهک نیز باعث افزایش پیوند ایجاد شده بین دانه‌ها شده است. پژوهشگران گذشته نیز با استفاده از آزمایش طیف سنج پراش اشعه ایکس (X-ray diffraction) در حالت‌های قبل و بعد از قرار دادن نمونه‌ها در محیط اسیدی نشان دادند که قرار دادن نمونه‌ها در معرض جریان اسیدی موجب کاهش غلظت برخی عناصر در خاک می‌شود [8, 14].

شدن برای تهیه عکس میکروسکوپی مورد استفاده واقع شده-اند. قابل ذکر است که این نمونه‌ها برای عکس‌برداری از وسط نمونه گرفته شده است. مقیاس عکس‌های میکروسکوپی طوری تنظیم شده است که پیوند ایجاد شده بین دانه‌های ماسه تحت فرایندهای ناشی از آهک و pH بخوبی مشخص شود. تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه، به منظور مقایسه ساختار میکروسکوپی نمونه‌های تثبیت شده با آهک با مقادیر متفاوت pH در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) ارائه شده است. در شکل (۱۰) اثر pH روی ساختار میکروسکوپی نمونه‌های تثبیت شده با ۴٪ آهک در مدت زمان عمل‌آوری ۱۴ روز را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل می‌بینید، در محیط‌های اسیدی‌تر، چسبندگی بین دانه‌ها به دلیل حضور ذرات آهک کمتر است. این حالت کاهش چسبندگی در

شکل ۷. تاثیر مقدار آهک بر روی پارامترهای مقاومت برشی

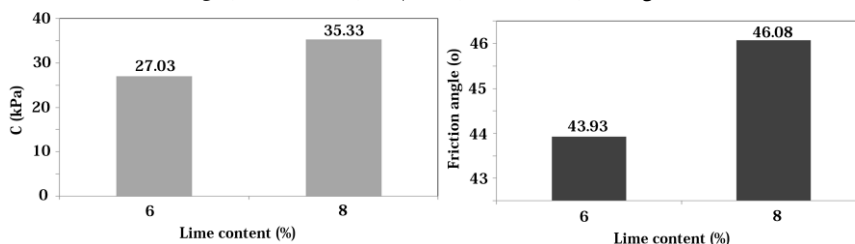


Fig. 7. Effect of lime content on shear strength parameters

شکل ۸. تاثیر pH بر روی پارامترهای مقاومت برشی

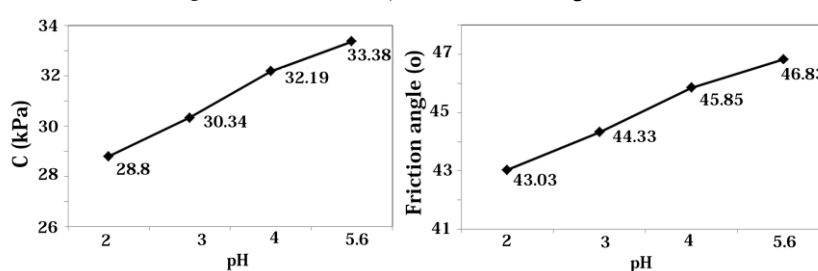


Fig. 8. Effect of pH on shear strength parameters

شکل ۹. اثر مدت زمان عمل‌آوری بر روی پارامترهای مقاومت برشی

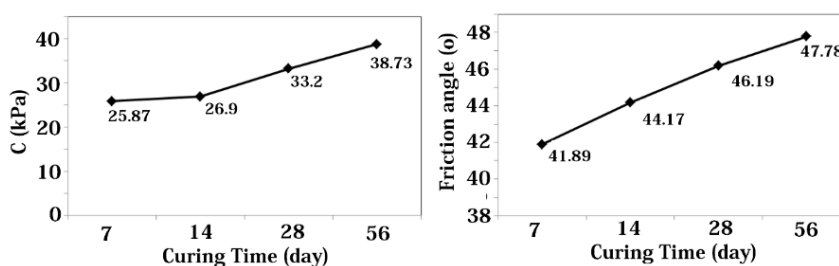


Fig. 9. Effect of curing time on shear strength parameters

شکل ۱۰. اثر pH بر روی چسبندگی ایجاد شده بین دانه‌ها

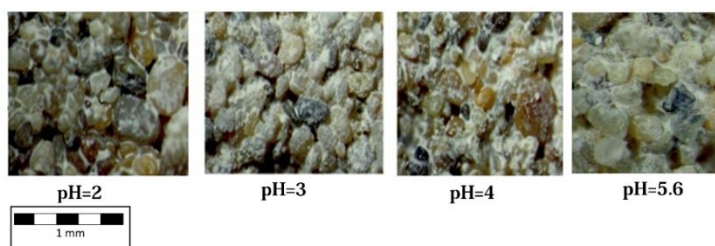


Fig. 10. Effect of pH on contact conditions of sand particles

شکل ۱۱. اثر مقدار آهک بر روی چسبندگی بین دانه‌ها

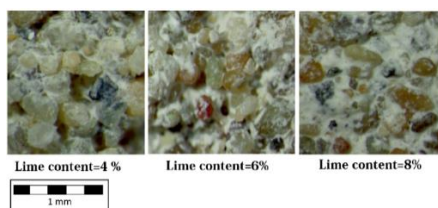


Fig. 11. Effect of lime content on contact conditions of sand particles

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، تاثیر باران اسیدی روی خاک تثبیت شده با آهک بررسی شده است. به این منظور مقدار اسیدی بودن خاک (ناشی از بارندگی باران اسیدی) را با قرار دادن نمونه در محیط با مقدار مورد نظر pH بررسی شده است. همچنین تثبیت خاک با درصدهای وزنی متفاوتی از آهک بررسی و مطالعه شد. هدف اصلی در این مطالعه بررسی تاثیر میزان اسیدیته، مقدار آهک در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت روی رفتار برشی نمونه‌ها مورد مطالعه بوده است. از طریق انجام آزمایش‌های تراکم، تک محوری و برش مستقیم روی نمونه خاک مورد مطالعه در شهرستان ورزنه واقع در شرق استان اصفهان، نتایج زیر بدست آمده است:

۱- نتایج آزمایش‌های تراکم پراکتور اصلاح شده نشان می‌دهد که افزایش درصد آهک، رطوبت بهینه و دانسیته خشک خاک را افزایش داده است. افزایش آهک تا ۶٪ موجب افزایش چشمگیر دانسیته خشک شده و پس از آن افزایش درصد آهک تاثیر قابل توجهی در افزایش دانسیته خشک خاک ندارد.

۲- با افزایش pH از حالت اسیدی به سمت حالت خنثی، باعث افزایش مقاومت می‌شود. در نمونه‌های تثبیت شده با ۴٪ آهک، افزایش pH کمترین تاثیر ممکن در افزایش مقاومت را داشته است. با افزایش میزان آهک موجود در خاک، متوسط مقاومت

فشاری نیز افزایش می‌یابد، به شکلی که مقاومت فشاری نمونه خاک حاوی ۶٪ آهک، ۲ برابر مقاومت فشاری نمونه خاک با ۴٪ آهک بوده و مقاومت فشاری نمونه حاوی ۸٪ آهک ۲/۷ برابر مقاومت فشاری نمونه خاک حاوی ۴٪ آهک است. نتایج آزمایش تک محوری نشان می‌دهد که نمونه‌ها با کاهش pH میزان مقاومت فشاری نیز کاهش یافته است. اما توجه به این مطلب ضروری است که با وجود کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط اسیدی‌تر میزان مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها با pHهای متفاوت با افزایش درصد آهک، افزایش یافته است. مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، افزایش می‌یابد. این افزایش در مدت زمان عمل‌آوری ۵۶ روزه به بیشترین مقدار خود می‌رسد، به گونه‌ای که مقاومت فشاری نمونه ۱۴ روزه ۱/۰۵ برابر نمونه ۷ روزه، مقاومت فشاری نمونه ۲۸ روزه ۱/۲۴ برابر نمونه ۷ روزه و نهایتاً مقاومت فشاری نمونه ۵۶ روزه تقریباً ۲/۵ برابر مقاومت برشی نمونه ۷ روزه است.

۳- نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان دهنده افزایش پارامترهای مقاومت برشی با افزایش مقدار آهک اضافه شده است، بطوری‌که افزایش ۲ درصدی آهک موجود در خاک، موجب افزایش ۲۳/۵٪ چسبندگی و افزایش ۴/۷٪ زاویه اصطکاک داخلی شده است. با افزایش pH خاک یا نزدیک شدن

cement stabilized lead-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 271, pp.131-140.

[7] Du, Y.J., Wei, M.L., Reddy, K.R. and Jin, F., 2014. Compressibility of cement-stabilized zinc-contaminated high plasticity clay. *Natural hazards*, 73(2), pp.671-683.

[8] Bakhshipour, Z., Asadi, A., Huat, B.B., Sridharan, A. and Kawasaki, S., 2016. Effect of acid rain on geotechnical properties of residual soils. *Soils and Foundations*, 56(6), pp.1008-1020.

[9] Ghobadi, M.H., Abdilor, Y. and Babazadeh, R., 2014. Stabilization of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), pp.611-619.

[10] Xu, X., Wang, Y., Bai, R., Zhang, H. and Hu, K., 2016. Effects of sodium sulfate content on mechanical behavior of frozen silty sand considering concentration of saline solution. *Results in physics*, 6, pp.1000-1007.

[11] Du, Y.J., Jiang, N.J., Shen, S.L. and Jin, F., 2012. Experimental investigation of influence of acid rain on leaching and hydraulic characteristics of cement-based solidified/stabilized lead contaminated clay. *Journal of hazardous materials*, 225, pp.195-201.

[12] Mckinley, J.D., Thomas, H.R., Williams, K.P. and Reid, J.M., 2001. Chemical analysis of contaminated soil strengthened by the addition of lime. *Engineering Geology*, 60(1-4), pp.181-192.

[13] Rechcigl, J.E. and Sparks, D.L., 1985. Effect of acid rain on the soil environment: a review. *Communications in soil science and plant analysis*, 16(7), pp.653-680.

[14] Bakhshipour, Z., Asadi, A., Huat, B.B. and Sridharan, A., 2016. Long-term intruding effects of acid rain on engineering properties of primary and secondary kaolinite clays. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(3), p.21.

[15] Momeni, M., Ajalloeian, R., and Bayat, M., 2019. Experimental study on the effect of acid and alkaline rains on geotechnical properties of fine-grained soil. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, Inpress.

محیط از حالت اسیدی به حالت خنثی نیز هردو پارامتر مقاومت برشی یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد. میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با افزایش مدت زمان عمل آوری نیز افزایش می‌یابد.

۴- تحلیل عکس‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که افزایش مقدار pH از حالت اسیدی به سمت حالت خنثی یا افزایش مقدار آهک اضافه شده به خاک باعث ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین دانه‌ها می‌شود که این پیوند در آزمایش‌های مقاومتی با افزایش پارامترهای مقاومتی خاک خود را نشان داده است.

References

۹- مراجع

[1] Jurado, W.C.C., Pérez, A.V., Quiroz, A.M.V. and Gámez, M.R., 2017. Environmental impact on electrical networks near the Manabita Litoral. *International journal of life sciences*, 1(2), pp.18-27.

[2] Lu, H., Wei, F., Tang, J. and Giesy, J.P., 2016. Leaching of metals from cement under simulated environmental conditions. *Journal of environmental management*, 169, pp.319-327.

[3] Kosari, Shahrzad, Azadeh Hojat, and Saeed Karimi Nasab. 2013. Laboratory measurements to investigate the effect of sulphuric acid on the electrical resistivity of soil samples, 1st National Conference on Exploration Engineering of Underground Resources. (In Persian).

[4] Kamon, M., Ying, C. and Katsumi, T., 1996. Leachate mechanism of lime and cement stabilized soils due to acid rain. *Materials science research international*, 2(1), pp.46-53.

[5] P. Sharma, S. Vyas, M. Kaushal, N.V.Mahuren. Sivakumar and M. Ratnam, 2011. Effect of the Intensity of the Acid Rain on the Geotechnical Properties of Soils of Different Plasticity, *Material Science Research India*, Vol. 8(2), 265-271.

[6] Du, Y.J., Wei, M.L., Reddy, K.R., Liu, Z.P. and Jin, F., 2014. Effect of acid rain pH on leaching behavior of

Shear behavior of sandy soil stabilized with lime under acidic conditions

Rahimi¹, M. Bayat^{*2}

1 MSc, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2-Assistant professor, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

*bayat.m@pci.iaun.ac.ir

Abstract

Soil pH is a measure of the acidity and alkalinity in soils, ranging from 0 to 14 that measured in a slurry of soil mixed with water. Soil pH normally falls between 3 and 10, with 7 being neutral, acid soils have a pH below 7 and alkaline soils have a pH above 7. Ultra-acidic soils have pH value less than 3.5 and very strongly alkaline soils have pH value more than 9 which are rare. Extremes in acidity or alkalinity may affect mechanical behaviour physical properties of soil. Recently, the rapid development of cities and the industrial revolution have caused enormous environmental impacts and become a serious environmental problem. About 80% of the pollutants in the atmosphere, including suspended particles and gases, result from vehicular traffic and industrial activities. Precipitation acts as a significant natural cycle to clean up atmospheric pollutants such as gases and particles in the air. The major sources of acid water are strong presence of SO₂ and NO_x gases in the atmosphere. One of the most important effects of acid water is its effect on soil, including washing nutrient cations, releasing toxic elements, and acidifying the soil. Also, acid mine drainage and the contaminants associated with it, is a common occurrence in waste dumps of mining sites results in acidic conditions with a pH of less than 4 develop over time. On the other hand, mineral deposits, over liming in some parts of the land and the use of limestone to improve the different soil natural and control the pH in waste dumps leads to alkaline conditions (pH more than 7) at mine sites. One of the most important effects of air pollution is acid rain. The increasing expansion of cities, the rapid growth of urbanization and the industrial revolution have caused enormous environmental impacts in and around cities. Industrial activities, production of energy and fuel, the use of fertilizers and pesticides cause significant amounts of contaminants to the atmosphere. The entry of metal contaminants and acidifying compounds such as sulfur, nitrogen compounds or their reaction to the atmosphere in the rain will increase the acidity of the rain which can change the quality of atmospheric precipitation. In general, it can be stated that the meaning of acid rain is a rain that has a pH of less than 5.5 which is a lower natural pH. In the current study, the effect of acid rain on the mechanical behavior and physical properties of lime stabilized sand with respect to the eastern regions of Isfahan has been investigated. At first, the various lime content was added to the soil and the specimens were tested after treatment and saturation under various pH values. The results show that adding lime increased the optimum moisture content, shear strength of the specimens, the cohesion and the friction angle of the soil. On the other hand, reducing the pH value results in continuously decreasing the shear strength parameters of the soil specimens. Finally, based on the scanning electron microscopy (SEM) image from the specimens, the effect of pH and lime content on the bonds between the sand grains was investigated.

Keywords: Acid rain, pH, Mechanical behavior, Shear strength, Stabilization, Lime