

## تأثیر باران اسیدی بر خصوصیات مکانیکی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان

بهزاد حاصلی\*، کارشناس ارشد زلزله، پژوهشگر گروه تخصصی شهید رجایی، تهران  
امید خیری نمین، دکترای پترولوژی، پژوهشگر همکار گروه تخصصی شهید رجایی، تهران

Email: std\_haseli@khu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸

### چکیده

وجود ترکیبات آلوده، حاوی نیتروژن و گوگرد در اتمسفر، pH باران طبیعی را کاهش داده و به آن خاصیت اسیدی می‌دهد. باران اسیدی، به‌عنوان یک آلاینده، می‌تواند آثار مخربی بر خاک داشته باشد. به منظور تثبیت انواع مختلف خاک، از مصالح و مواد طبیعی و شیمیایی فراوانی استفاده می‌شود. در این پژوهش، به بررسی تأثیر باران اسیدی بر رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است. در ابتدا، سیمان به مقدار ۳، ۵ و ۷ درصد به خاک ماسه‌ای اضافه شد. نمونه‌ها پس از اشباع شدن در محلول‌هایی شامل مقادیر pH برابر با ۱، ۳، ۵ و ۷/۸ مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج مطالعه نشان داد که افزایش درصد سیمان موجب افزایش درصد رطوبت بهینه، بیشینه وزن مخصوص خشک، مقاومت برشی، مدول سکانت ( $E_{50}$ ) و پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها شده است. در حالی که اسیدی شدن محیط، مدول سکانتی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک را کاهش می‌دهد. همچنین، بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده شد که افزایش پارامترهای مقاومت برشی در اثر افزایش مدت‌زمان عمل‌آوری و کاهش اسیدیته محیط، در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان نسبت به آهک، نمود بیشتری دارد. در نهایت، با استفاده از پردازش تصاویر و تهیه تصاویر باینری از نمونه‌ها، تأثیر pH و مقدار درصد سیمان بر چسبندگی بین دانه‌های ماسه و سیمان بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزایش اسیدیته و کاهش درصد سیمان، چسبندگی ایجاد شده بین دانه‌های ماسه توسط ذرات سیمان را به شدت کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: باران اسیدی، سیمان، مدول سکانت، مقاومت برشی، پردازش تصویر

### ۱. مقدمه

بارش اسیدی مربوط به اسید سولفوریک ( $H_2SO_4$ ) و حدود ۳۰٪ سهم اکسیدهای نیتروژن ( $HNO_3$ ) است. از جمله آثار منفی زیست‌محیطی ناشی از بارش‌های اسیدی، می‌توان به کاهش تنوع زیستی در اکوسیستم‌های آبی، کاهش رشد درختان در اثر جذب آلاینده‌های فلزی توسط ریشه گیاهان و اختلال در اکوسیستم‌های جنگلی

گسترش روزافزون جمعیت، افزایش فعالیت کارخانه‌های صنعتی و کارگاه‌های تولیدی و مصرف سوخت‌های فسیلی در وسایل نقلیه و صنایع بزرگ باعث ورود آلاینده‌های فلزی و مقادیر عظیمی از اکسید نیتروژن و اکسید گوگرد به اتمسفر می‌شود. بیش از ۶۰٪ اسیدیته در

اسیدی باعث کاهش مقاومت و بیشینه وزن مخصوص خشک خاک شده و ضریب نفوذپذیری در نمونه خاک را کاهش می‌دهد. لموس و همکاران (۲۰۱۸)، اثر اسیدی شدن و حضور آلاینده‌های آلی در مناطق شهری و صنعتی را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج این مطالعه، حضور آلاینده‌های اسیدی، تأثیر منفی درازمدتی بر خصوصیات اتمسفر و خاک داشته و موجب جهش‌زایی خاک می‌شوند. ترابی و حسنلوراد (۱۳۹۷) در پژوهشی، تأثیر اسید سولفوریک بر مقاومت برشی خاک رس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که در حضور آلاینده اسیدی، با افزایش خاصیت اسیدی و کاهش pH، مقاومت برشی خاک رس کاهش می‌یابد. پراکش و آمورایراج (۲۰۱۳) در پژوهشی، به بررسی تأثیر آلاینده‌های اسیدی و بازی روی خواص ژئوتکنیک خاک‌های رسی پرداختند. از اسید هیدروکلریک، اسید نیتریک و اسید سولفوریک به‌عنوان آلاینده‌های اسیدی در این مطالعه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که فارغ از نوع آلاینده، با افزایش غلظت اسید، مقاومت خاک کاهش چشم‌گیری داشته است. پارامترهای تنش و کرنش دو نمونه خاک طبیعی در معرض شرایط اسیدی، توسط گراتچف و توهاتا (۲۰۱۳) مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج این مطالعه، مشاهده شد که افزایش اسیدیته محیط منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های طبیعی خاک می‌شود. وی و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به بررسی تأثیر باران اسیدی بر واکنش‌های اسیدی در سه نوع خاک کشاورزی پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که باران اسیدی با اسیدیته معین موجب ایجاد واکنش‌های اسیدی یکسان در نمونه‌های مختلف خاک نخواهد شد، زیرا واکنش‌های اسیدی در هر نوع خاک با توجه به ساختار و محتوای خاک متغیر است. رحیمی و بیات (۱۳۹۸) رفتار برشی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با آهک در معرض محیط‌های اسیدی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش pH به سمت اسیدی شدن، پارامترهای مقاومت برشی نمونه خاک کاهش

و گیاهان خشک (دو و همکاران، ۲۰۱۷) و تخریب بناهای تاریخی اشاره‌کرد (سو و همکاران، ۲۰۱۰). با توجه به اهمیت موضوع مورد مطالعه، پژوهش‌های گسترده‌ای در این خصوص انجام شده است. کوثری و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی تأثیر 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، نشان‌دهنده کاهش قابل توجه مقاومت ویژه نمونه‌های خاک اشباع به علت حضور اسید سولفوریک است. سرکار و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر باران اسیدی بر خواص ژئوتکنیک خاک ریزدانه را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری محصور نشده و مقاومت برشی خاک، با افزایش باران اسیدی، کاهش می‌یابد. دو و همکاران (۲۰۱۴)، تأثیر باران اسیدی با شرایط pH مختلف را بر ویژگی‌های شستشویی خاک رس کائولین آلوده به سرب تثبیت شده با سیمان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که شرایط بسیار اسیدی، مقادیر سرب و کلسیم شسته شده را افزایش داده است. همچنین، افزایش ۵ درصدی مقدار سیمان، موجب کاهش مقادیر سرب و کلسیم شسته شده و ضرایب انتشار مؤثر آن‌ها می‌شود.

عبدالحسین سعید و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی، عملکرد سیمان و آهک را به عنوان تثبیت‌کننده در نمونه خاک‌های آلوده به آلاینده‌های فلزی بررسی کردند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده نشان داد که دخالت فلزات سنگین در عمل‌آوری به‌واسطه‌ی سیمان و آهک، انعکاس مستقیم در افزایش مقاومت نمونه‌های خاک دارد. بخشی‌پور و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی تأثیر باران اسیدی بر خواص ژئوتکنیک خاک‌های درجا پرداختند. در این پژوهش، سطوح مختلف pH باران اسیدی برای پوشش مختلف معادل ۱ تا ۲۰ سال بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که pH کم باران

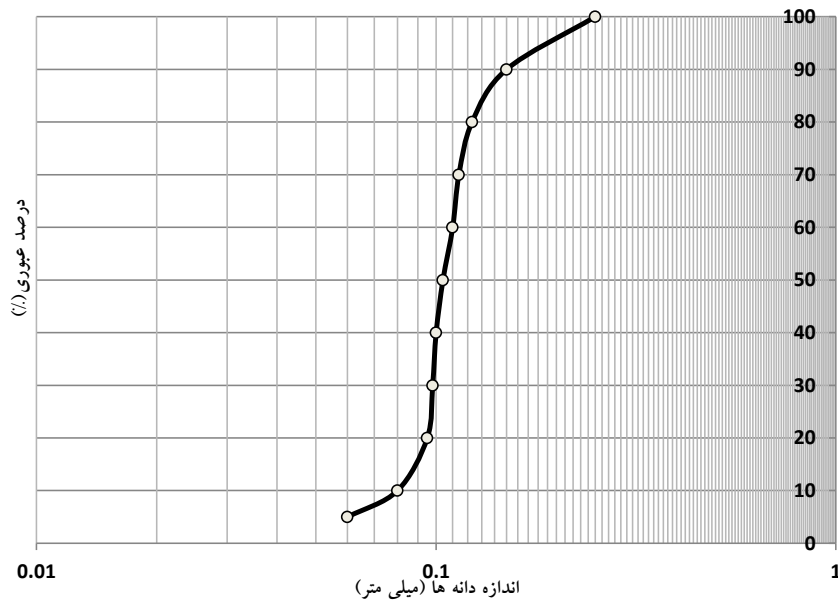
که در معرض شرایط مختلف اسیدی قرار گرفته، پس از زمان عمل‌آوری مد نظر، با انجام آزمایش‌های تراکم، برش مستقیم و تک‌محوری ارزیابی شده و در نهایت با استفاده از پردازش تصویر در محیط نرم‌افزار متلب، از نمونه‌ها تصاویر باینری تهیه شده است. در این پژوهش آزمایشگاهی، نمونه خاک مورد مطالعه از مناطق شرقی شهرستان ملایر واقع در استان همدان برداشت شده است.

## ۲. مواد و مصالح

وجود شهرک‌های صنعتی در شهرستان ملایر باعث تولید باران‌های اسیدی و قلیایی در این منطقه می‌شود. خاک مورد مطالعه در این پژوهش، بر اساس طبقه‌بندی خاک‌ها به روش یونیفاید، ماسه بدانه‌بندی شده (SP) است. مطابق منحنی دانه‌بندی خاک در شکل ۱، پارامترهای دانه‌بندی  $C_u=1/375$  و  $C_c=0/982$  به دست آمده‌اند.

می‌یابد. مطالعات نشان می‌دهد که با استفاده از پردازش تصویر می‌توان به‌خوبی رفتار فیزیکی و شیمیایی انواع خاک در معرض باران اسیدی را بررسی نمود (گارسیا ورا و لانزون، ۲۰۱۸).

مشاهده می‌شود که تا کنون مطالعات گسترده‌ای در حوزه بررسی تأثیر باران اسیدی بر خاک‌های مختلف انجام شده است. اما با توجه به عملکرد مطلوب سیمان در مقایسه با سایر مصالح به عنوان تثبیت‌کننده خاک (عابدی کوپایی و همکاران، ۱۳۹۴؛ طاهرخانی و سلامی، ۱۳۹۲) و افزایش قابل توجه آلاینده‌های اسیدی در اثر گسترش شهرک‌های صنعتی و فعالیت‌های انسانی، بررسی عوامل مؤثر مانند تأثیر مدت‌زمان عمل‌آوری، اسیدیته محیط، و درصد و نوع ماده تثبیت‌کننده بر رفتار مکانیکی خاک ضروری است. در پژوهش حاضر، برای نخستین بار، پارامترهای مکانیکی و مقاومت برشی نمونه خاک ماسه‌ای تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان،



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه

غرب به شهرهای تویسرکان و نهاوند محدود شده است. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۱۷۸۰ متر و فاصله‌اش از همدان ۸۶ کیلومتر است. با توجه به جهت وزش باد در استان همدان (از جنوب به شمال) و وجود شهرک‌های صنعتی متمرکز در نواحی جنوبی این منطقه، آلاینده‌ها به

شهر ملایر یکی از شهرستان‌های استان همدان، با وسعتی حدود ۳۲۱۰ کیلومتر مربع، در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۷ دقیقه شمالی واقع شده است. این شهر، از شمال به همدان، از شرق به اراک، از جنوب به بروجرد و از طرف

عمل‌آوری نمونه‌ها در این مطالعه ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در نظر گرفته شده است.

به منظور ساخت محلول اسیدی در این پژوهش، آلاینده با نام شیمیایی اسید سولفوریک از خانواده اسیدهای غیرآلی و معدنی، دارای فرمول شیمیایی  $H_2SO_4$  و وزن مولکولی ۹۸/۰۷۹ گرم بر مول استفاده شده است. محلول‌های اسیدی با pHهای ۱، ۳، ۵ و ۷/۸ از این آلاینده تهیه شده است.

### ۳. برنامه‌های آزمایشگاهی و ارائه نتایج

به منظور بررسی خصوصیات مکانیکی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان، در معرض محیط‌های اسیدی، نمونه‌های مورد استفاده، با مقادیر وزنی ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان تثبیت شدند و در محیط‌های اسیدی با pHهای ۱، ۳، ۵ و ۷/۸ قرار گرفتند. مدت‌زمان عمل‌آوری در این پژوهش ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های مورد مطالعه شامل تراکم، برش مستقیم و تک‌محوری است. روند انجام آزمایش‌ها به همراه نتایج به‌دست آمده در ادامه تشریح شده است. خلاصه آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. معرفی آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر

نام آزمایش	استاندارد مد نظر	هدف
تراکم	ASTM D1557	درصد رطوبت بهینه - بیشینه وزن مخصوص خشک
تک‌محوری	ASTM D2166	مقاومت نرمالیزه‌شده - نمودار تنش کرنش - مدول سکانت
برش مستقیم	ASTM D3080	پارامترهای مقاومتی: چسبندگی - زاویه اصطکاک داخلی

متفاوت سیمان ترسیم شده و بیشینه وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه‌ی هر یک از نمونه‌ها تعیین شده است. با توجه به نتایج آزمایش تراکم، مشاهده می‌شود، افزایش درصد سیمان، منحنی تراکم را به سمت بالا جابجا کرده است. بر اساس نتایج، اضافه شدن درصد سیمان باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و بیشینه وزن مخصوص خشک نمونه‌ها شده است.

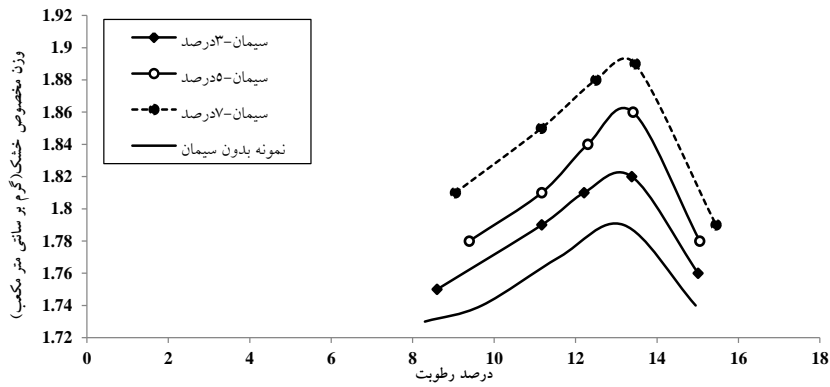
دلیل امتداد رشته‌کوه الوند در شمال و شمال شرق این شهرستان، امکان خروج از شهرستان را نداشته و استعداد آلودگی هوا و خاک در این منطقه را افزایش داده است. بنابراین، در این پژوهش، نمونه‌های خاک از نواحی جنوبی شهرستان ملایر انتخاب شده است.

سیمان مورد استفاده در این مطالعه، سیمان پرتلند نوع یک، با مقاومت فشاری ۲۸ روزه برابر با ۳۲/۵ مگاپاسکال بوده و هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر باران اسیدی بر رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان است. ابتدا خاک ماسه‌ای با مقادیر ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی سیمان به صورت خشک، کاملاً مخلوط شد و پس از تهیه خاک تثبیت شده با سیمان، دارای نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۵، به منظور حفظ درصد رطوبت، نمونه‌ها در کیسه‌های زیپ‌دار که هوای داخل آنها کاملاً خالی شده بود، قرار داده شدند. پس از آن، به منظور عمل‌آوری نمونه‌ها، کیسه‌های پلاستیکی برای مدت‌زمان عمل‌آوری مد نظر درون ظرف‌های آب در دمای طبیعی اتاق نگهداری شدند. در پایان زمان عمل‌آوری، همه‌ی نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در محلول اسیدی با اسیدیته متفاوت قرار گرفتند. مدت‌زمان

### ۳-۱. آزمایش تراکم

این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D1557 انجام شده است. منحنی تراکم، برای نمونه شاهد بدون سیمان و نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان (۳، ۵ و ۷ درصد) در شکل ۲ قابل مشاهده است. با انجام آزمایش‌های تراکم، تغییرات وزن مخصوص خشک با درصد رطوبت برای نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای

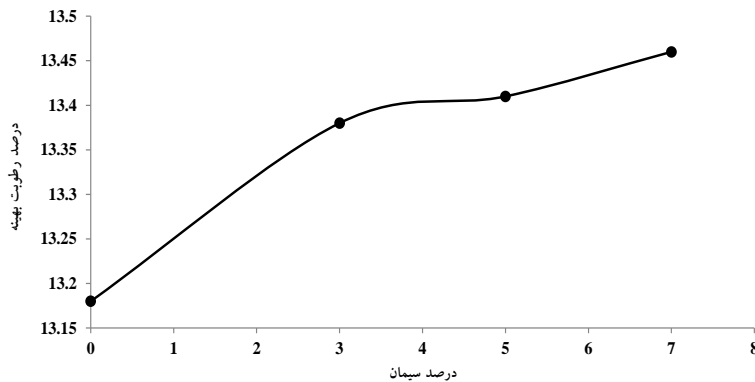
## حاصلی، خیری نمین



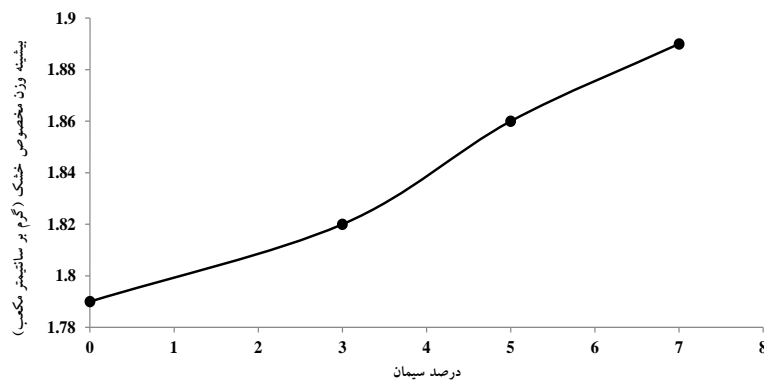
شکل ۲. نتایج آزمایش تراکم برای نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان

مخصوص زیاد است. افزایش بیشینه وزن مخصوص خشک با افزایش درصد سیمان، به علت تراکم سریع نمونه‌ها بلافاصله بعد از مخلوط شدن با آب است. این موضوع فرصت سخت‌شدگی و کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها را می‌گیرد

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب تغییرات درصد رطوبت بهینه و بیشینه وزن مخصوص خشک نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان را نشان می‌دهند. افزایش رطوبت بهینه با افزایش درصد سیمان، به دلیل نیاز نمونه‌ها به آب بیشتر، با افزایش دانه‌های سیمان با سطح



شکل ۳. تغییرات درصد رطوبت بهینه با درصد سیمان

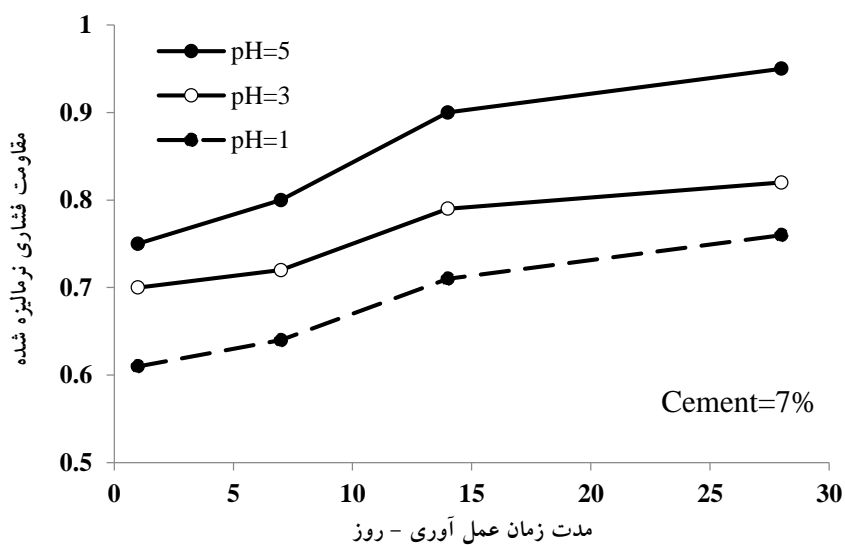
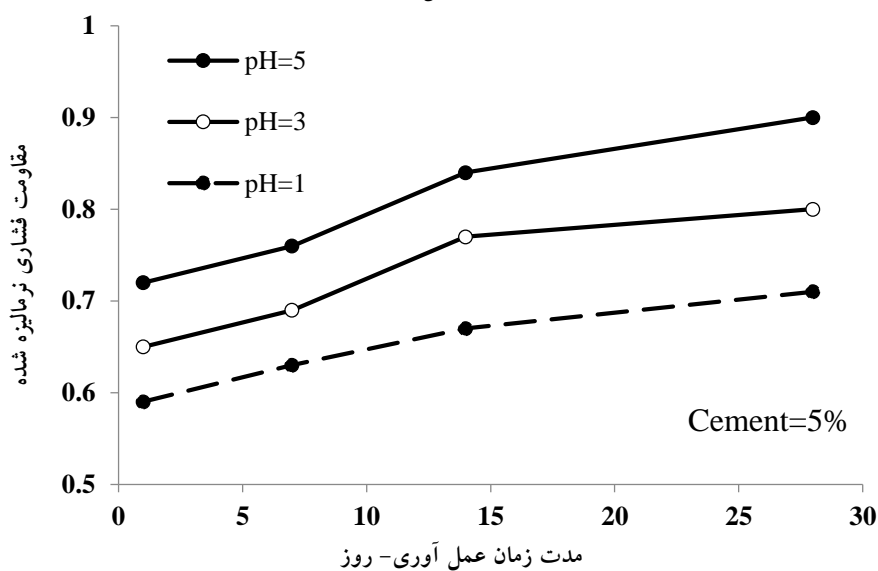
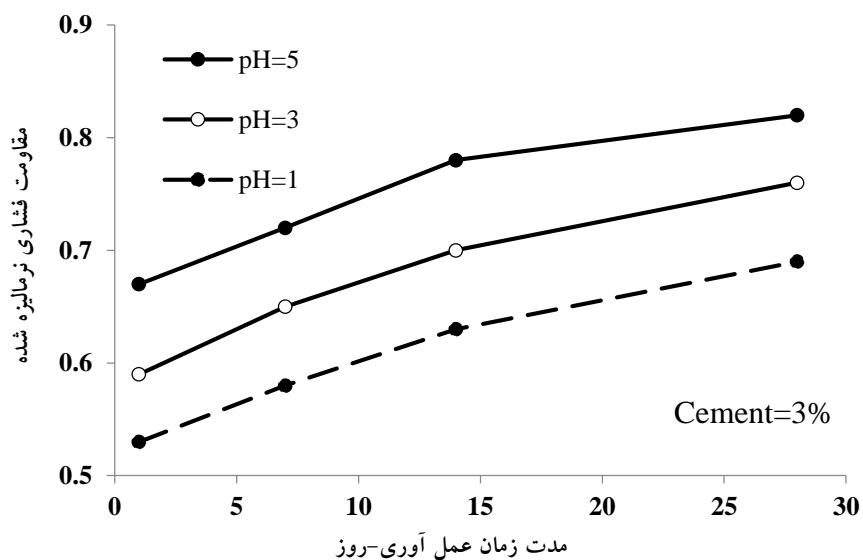


شکل ۴. تغییرات بیشینه وزن مخصوص خشک با درصد سیمان

## ۳-۲. آزمایش‌های تک‌محوری

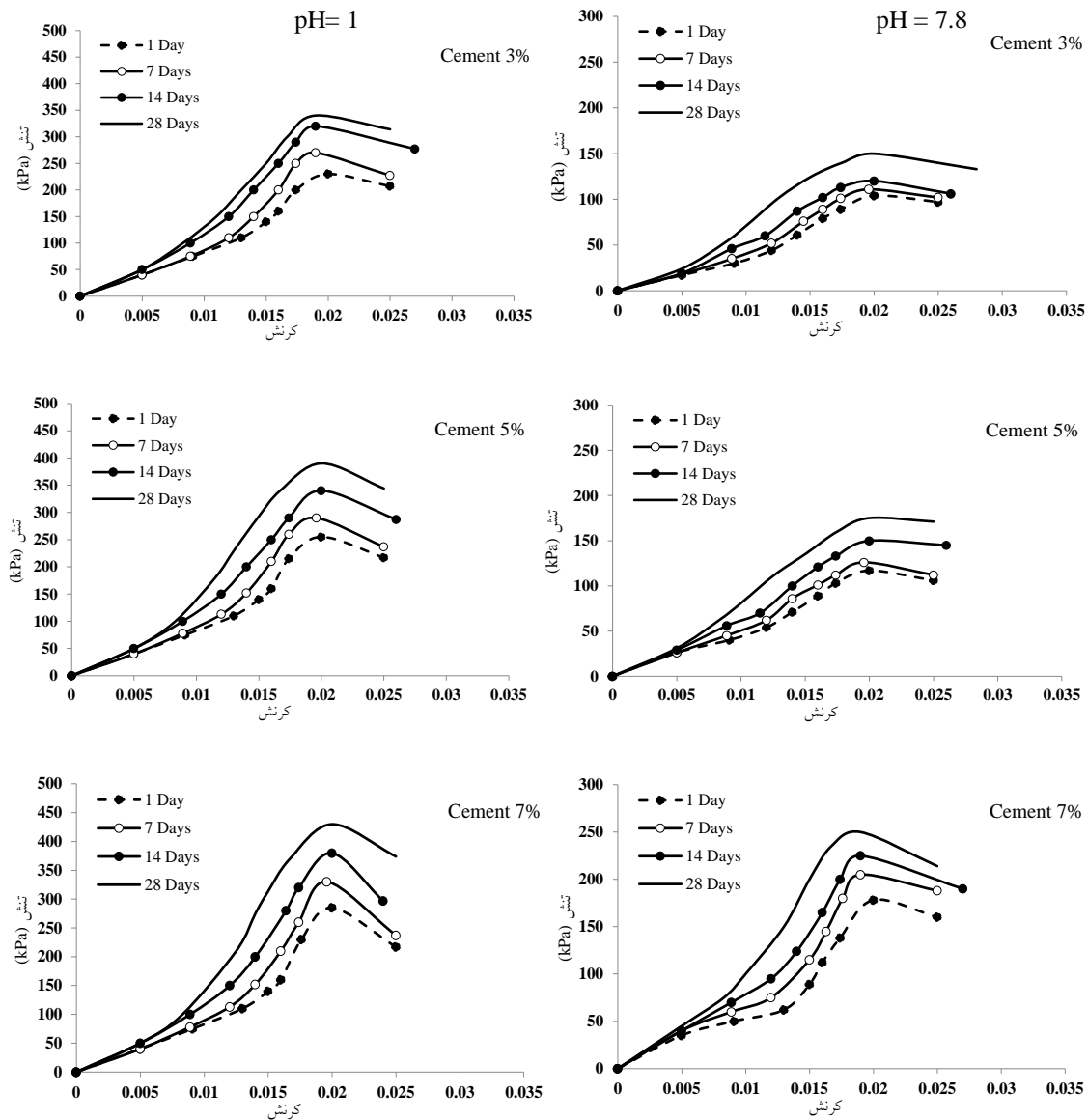
نمونه‌های عمل‌آوری شده، تحت pHهای ۱، ۳، ۵ و ۷/۸ و با مقادیر ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان تحت آزمایش تک‌محوری، مطابق با استاندارد ASTM D2166، مورد بررسی واقع شدند. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تهیه و به مدت زمان لازم عمل‌آوری شده و سپس تحت بارگذاری با سرعت بار یک میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. مقادیر نرمالیزه شده مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه خاک، در pHهای مختلف باران اسیدی نسبت به حالت عدم حضور باران اسیدی (pH=7.8)، در شکل ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که مقاومت تمام نمونه‌های آلوده به باران اسیدی، از نمونه‌های غیرآلوده کمتر است. با افزایش زمان تماس و درصد سیمان، مقاومت نمونه‌ها بیشتر شده است. به‌طور کلی، با افزایش خاصیت اسیدی (کاهش پارامتر pH) کاهش مقاومت شدیدتر شده، اما این افت مقاومت در pH برابر با یک، نمود بیشتری یافته است. شکل ۶، نمودار تنش کرنش نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان تحت مقادیر pH برابر با ۱ و ۷/۸ در مدت‌زمان‌های عمل‌آوری مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش زمان عمل‌آوری و مدت‌زمان تماس خاک ماسه‌ای و ذرات سیمان، نمودارها به سمت

بالا حرکت کرده‌اند. به عبارت دیگر، مقاومت نمونه‌ها با افزایش درصد سیمان و مدت‌زمان عمل‌آوری، افزایش یافته است. اسیدی‌تر شدن محیط، مقاومت فشاری تک‌محوری تمامی نمونه‌ها را کاهش داده است. در بحرانی‌ترین شرایط اسیدی (pH=1)، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه خاک تثبیت شده با ۷٪ سیمان نسبت به نمونه تثبیت شده با ۳٪ سیمان، ۲۰/۹ درصد افزایش یافته است. افزایش این نسبت برای شرایط اسیدی با pH=3، pH=5 و pH=7.8 به ترتیب برابر با ۲۶٪، ۳۲٪ و ۴۰٪ می‌باشد. در نمونه‌های با pH=1 مشاهده می‌شود که اثر مدت‌زمان عمل‌آوری در افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری در نمونه خاک تثبیت شده با ۷٪ سیمان نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با ۵٪ و ۳٪ نمود بیشتری دارد. افزایش مقاومت تمامی نمونه‌ها با گذر زمان را می‌توان ناشی از تیکسوتروپی خاک دانست که در نمونه تثبیت شده با ۷٪ سیمان، محسوس‌تر است. از دیگر مقایسه‌های رایج، مقایسه مقادیر مدول سکانت (E<sub>50</sub>) است. به همین منظور، شکل ۷، مقادیر مدول سکانت در برابر تغییرات pH و زمان عمل‌آوری متفاوت برای نمونه خاک تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان را نشان می‌دهد. مقادیر مدول سکانت محاسبه شده از نمودارهای تنش کرنش در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۵. مقاومت نرمالیزه شده خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان در حضور باران اسیدی

تأثیر باران اسیدی بر خصوصیات مکانیکی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان

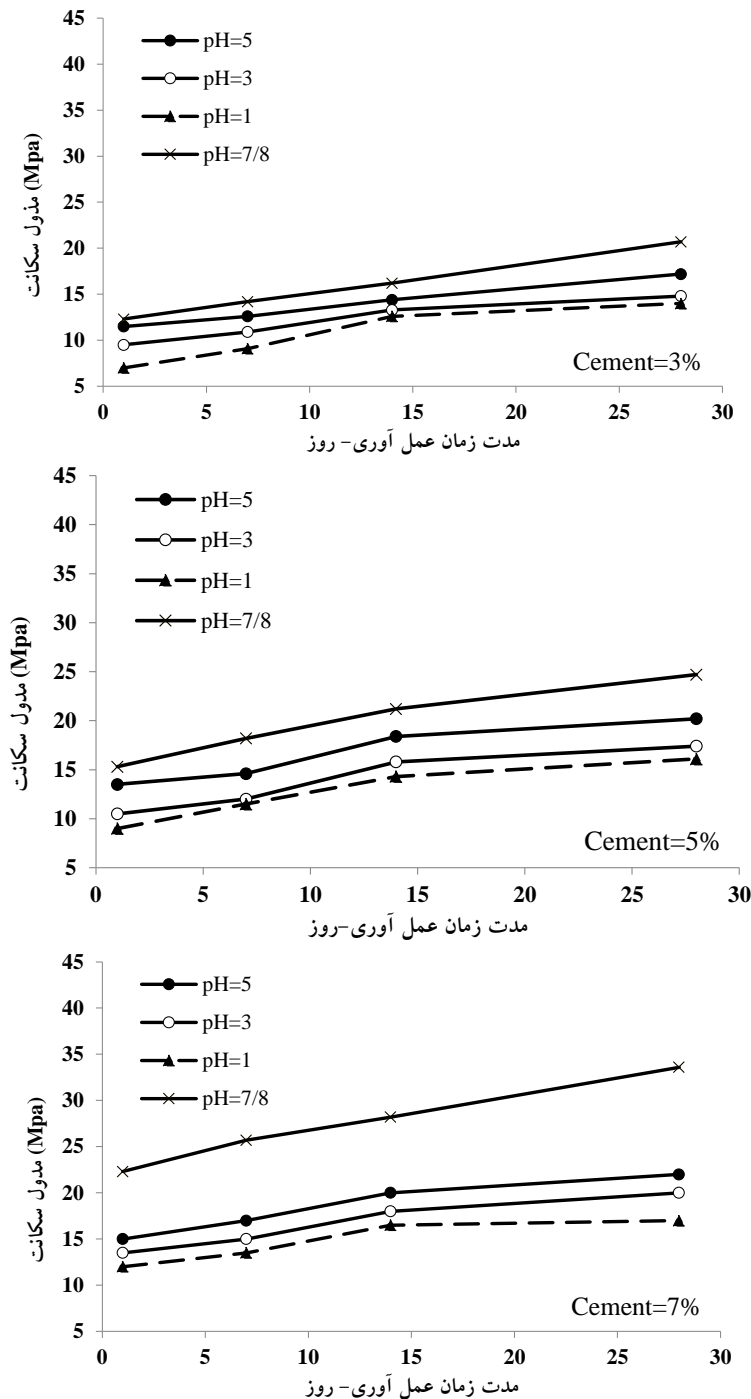


شکل ۶. نمودارهای تنش کرنش نمونه‌های اسیدی با  $pH=1$  و  $pH=7.8$

جدول ۲. مدول سکانت برای خاک ماسه‌ای تثبیت شده با ۷٪ سیمان در حضور باران اسیدی

روز	۲۸ روز	۱۴ روز	۷ روز	۱ روز	pH
۲۲/۱	۲۰/۴	۱۷/۳	۱۵/۱	۱	
۲۰/۵	۱۸/۱	۱۵/۴	۱۳/۵	۳	
۱۷/۴	۱۶/۴	۱۳/۵	۱۲/۱	۵	
۳۳/۶	۲۸/۲	۲۵/۷	۲۲/۳	۷/۸	





شکل ۷. مقادیر مدول سکانت خاک ماسه‌ای تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان

مدول سکانت (شیب نمودار تنش کرنش به ازای ۰/۵ برابر تنش حداکثر) با اسیدی‌تر شدن محیط، در نمونه‌های تثبیت شده با درصدهای بیشتر سیمان، نمود بیشتری دارد. به نحوی که با تغییر شرایط اسیدی محیط از pH=7.8 به pH=1، در نمونه‌های تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان، به ترتیب شاهد ۱۶/۹، ۱۸/۲ و ۳۴/۵ درصد

نتایج ارائه شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که به ازای شرایط ثابت اسیدی، مدول سکانت (E<sub>50</sub>) در تمامی نمونه‌ها با افزودن سیمان به خاک شاهد افزایش یافته است. همچنین، در تمام نمونه‌ها، با افزایش اسیدیته محیط (کاهش pH)، مقدار مدول سکانت کاهش پیدا کرده است. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش مقادیر

۸، دستگاه تک‌محوری به همراه نمونه استوانه‌ای ۷ روزه خاک تثبیت شده با ۰.۵٪ سیمان، در شرایط محیطی با اسیدیته  $pH=3$  قابل مشاهده است.

کاهش مدول سکانت هستیم. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها باعث افزایش مدول سکانتی نمونه‌ها شده است، که این افزایش در نمونه‌های با  $pH=1$  کمترین نمود را دارد. در شکل



شکل ۸. دستگاه تک‌محوری (سمت چپ) و نمونه استوانه‌ای خاک تثبیت شده با ۰.۵٪ سیمان (سمت راست)

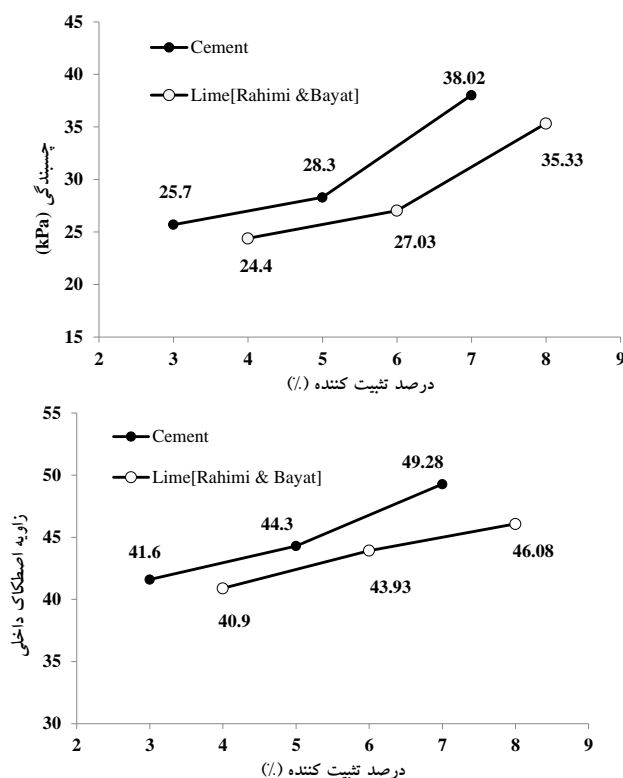
برشی نمونه‌ها، با توجه به نتایج مطالعات پیشین (رحیمی و بیات، ۱۳۹۸)، به بررسی اثر مدت زمان عمل‌آوری، درصد وزنی تثبیت‌کننده و میزان اسیدیته محیط بر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و آهک پرداخته شد. با میانگین‌گیری از مقادیر عددی پارامترهای مقاومت برشی در مدت زمان عمل‌آوری متفاوت و اسیدیته مختلف محیط، مشاهده می‌شود که افزایش ۴ درصدی سیمان، از ۳٪ به ۷٪، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها را به ترتیب ۳۲/۴ درصد و ۱۵/۶ درصد افزایش داده است (شکل ۱۰). مشاهده می‌شود که اثر سیمان در مقایسه با آهک، در افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک، بیشتر است. به نحوی که نرخ افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در مقایسه با آهک، به ازای افزایش ۲ درصدی ماده تثبیت‌کننده، ۵/۴ درصد و ۲/۱ درصد بیشتر است.

### ۳-۳. آزمایش برش مستقیم

در این پژوهش، آزمایش‌های برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D3080 روی نمونه‌های تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان، در شرایط محیطی با اسیدیته مختلف و مدت زمان عمل‌آوری متفاوت انجام شده است. برای انجام این آزمایش، نمونه‌ها به طور کامل با درصدهای سیمان در رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم، مخلوط شده و سپس با چکش در سه لایه درون قالب‌های استوانه‌ای به قطر داخلی ۸/۶ و ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متر، متراکم شده است. تراکم نمونه‌ها در این آزمایش ۹۵٪ انتخاب شد. در سطح هر لایه، بعد از تراکم، به منظور ایجاد پیوند مناسب، میان لایه‌ها خراش ایجاد شد. در شکل ۹، قالب‌های استوانه‌ای و خراش ایجاد شده در سطح هر لایه قابل مشاهده است. به منظور حفظ رطوبت نمونه‌ها، قالب‌های حاوی نمونه تا انجام زمان آزمایش در کیسه‌های پلاستیکی زیپ‌دار و درون ظرف آب قرار داده شدند. هدف از انجام این آزمایش، محاسبه پارامترهای مقاومت برشی نمونه خاک تثبیت شده با سیمان در شرایط متفاوت محیطی است. به منظور مقایسه عملکرد دو تثبیت‌کننده سیمان و آهک در بهبود رفتار



شکل ۹. قالب‌های استوانه‌ای (سمت چپ) و خراش ایجاد شده (سمت راست) در نمونه‌ها برای انجام آزمایش برش مستقیم



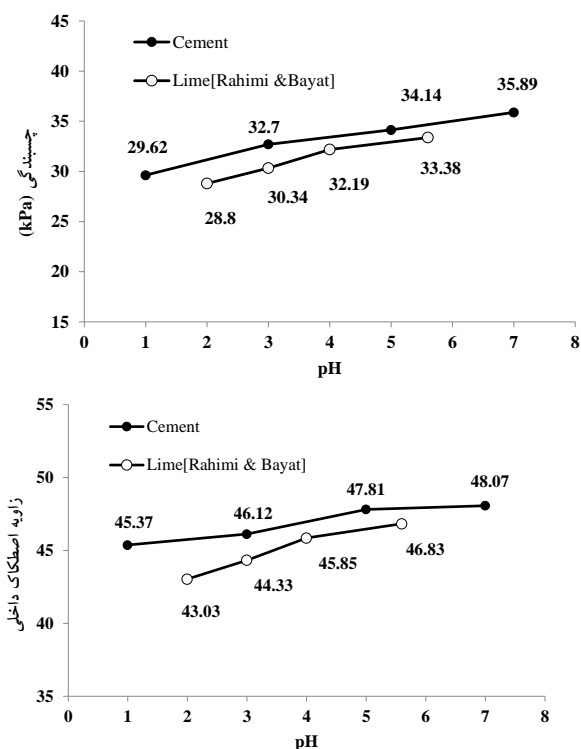
شکل ۱۰. مقایسه تأثیر سیمان و آهک بر پارامترهای مقاومت برشی به صورت متوسط

شکل ۱۱، روند تغییر پارامترهای مقاومت برشی به ازای مقادیر متفاوتی از pH را به صورت میانگین نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با اسیدی‌تر شدن محیط (کاهش pH)، هر دو پارامتر مقاومت برشی کاهش می‌یابند. این کاهش به ازای تغییر pH از مقدار عددی ۷/۸ به ۱، در مورد چسبندگی ۱۷/۵ درصد و در مورد زاویه اصطکاک داخلی ۵/۶ درصد است. بر اساس شکل ۱۱، مشاهده می‌شود که کاهش پارامترهای مقاومت برشی در اثر افزایش اسیدیته محیط، در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، در مقایسه با آهک، محسوس‌تر است.

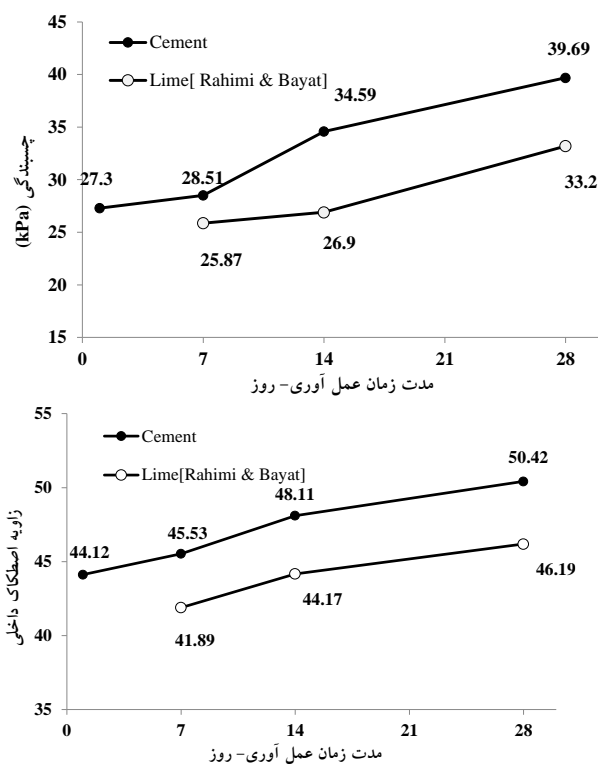
در شکل ۱۲، اثر مدت زمان عمل‌آوری به صورت متوسط، بر پارامترهای مقاومت برشی در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و آهک بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش مدت زمان عمل‌آوری از ۱ تا ۲۸ روز، موجب افزایش هر دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی شده است. مشاهده می‌شود که افزایش پارامترهای مقاومت برشی در اثر افزایش دوره عمل‌آوری در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در مقایسه با آهک، نمود بیشتری دارد. به نحوی که با تغییر دوره عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روز، در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، چسبندگی ۲۸٪ و زاویه اصطکاک داخلی ۹/۶ درصد افزایش یافته است. در حالی که

## تأثیر باران اسیدی بر خصوصیات مکانیکی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان

بر اساس نتایج مطالعات رحیمی و بیات (۱۳۹۸) در نمونه‌های تثبیت شده با آهک، این روند افزایشی در مورد چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۲۲٪ و ۹/۳ درصد گزارش شده است.



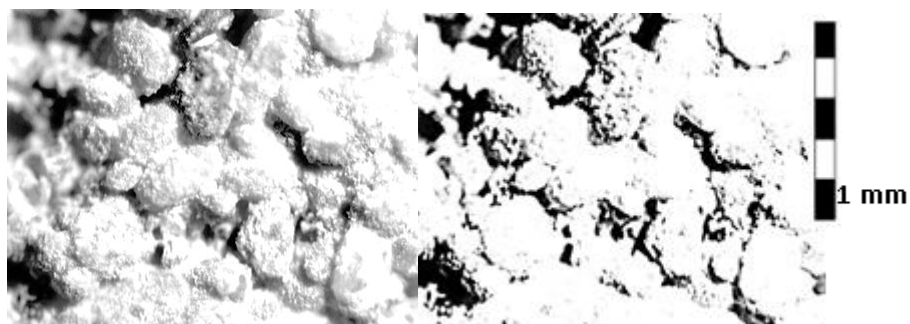
شکل ۱۱. مقایسه تأثیر اسیدیته محیط بر پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و آهک به صورت متوسط



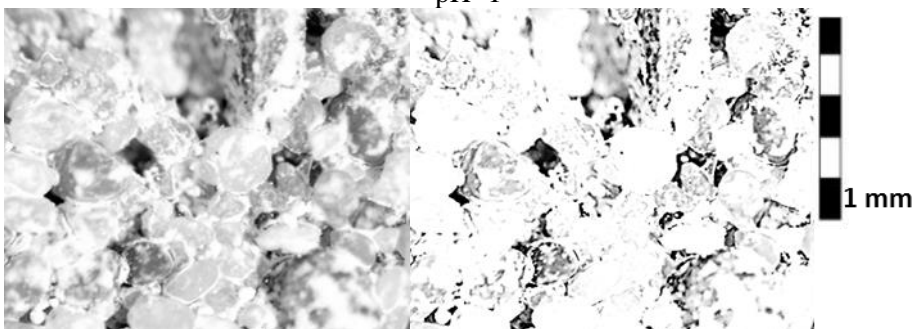
شکل ۱۲. مقایسه تأثیر مدت زمان عمل‌آوری بر پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و آهک به صورت متوسط

تثبیت شده با ۳٪ سیمان به ازای دو مقدار متفاوت از pH، به همراه تصاویر باینری متناظر، نمایش داده شده است. در تصاویر باینری، پیکسل‌ها فقط دو مقدار صفر (سیاه) و ۱ (سفید) را به خود می‌گیرند. با توجه به شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که تصاویر باینری متناظر نمونه با pH=1 دارای پیکسل‌های تیره‌رنگ است. اما در شرایطی که محیط اسیدی نیست (pH=7.8)، شاهد تصویر باینری با پیکسل‌های روشن هستیم. به نحوی که مساحت پیکسل‌های تیره در نمونه با pH=1، ۱۶ میلی‌متر مربع و در نمونه با pH=7.8، ۶ میلی‌متر مربع به دست آمده است. لذا، با اسیدی‌تر شدن محیط، چسبندگی بین دانه‌های ماسه کاهش یافته است. در شکل ۱۴، نمونه خاک تثبیت شده با ۱٪ و ۷٪ سیمان، در بحرانی‌ترین شرایط اسیدی (pH=1) مشاهده می‌شود. تصاویر باینری مربوط به نمونه تثبیت شده با ۷٪ سیمان کاملاً روشن است که این موضوع بیانگر چسبندگی بین دانه‌های ماسه به واسطه حضور سیمان است. ولی در نمونه تثبیت شده با ۱٪ سیمان، شاهد حضور پیکسل‌های تیره هستیم. با توجه به تصاویر باینری، مساحت مربوط به پیکسل‌های تیره در نمونه‌های ۱٪ و ۷٪ سیمان، به ترتیب ۲۳ و ۴ میلی‌متر مربع حاصل شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش درصد سیمان، چسبندگی بین دانه‌های ماسه را افزایش داده است.

نمونه‌هایی که تحت آزمایش برش مستقیم بوده‌اند، بلافاصله پس از انجام آزمایش، برای تصویربرداری از وسط نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. این نمونه‌ها شامل نمونه خاک تثبیت شده با ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان در دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و با شرایط محیطی با اسیدیته ۱، ۳، ۵ و ۷/۸ (۴۸ حالت = ۳×۴×۴) است. عکس‌های گرفته شده، در محیط نرم‌افزار متلب (متلب، ۲۰۱۴) پردازش شده است. به نحوی که برای کوچک‌ترین جزء ساختاری هر تصویر (پیکسل)، متناسب با شدت روشنایی آن، عددی از صفر تا ۱ اختصاص می‌یابد. برای هر عکس می‌توان تصاویر باینری (دودویی) را که نشان‌دهنده‌ی میزان روشنایی تصویر در بازه [۰، ۱] است، تهیه نمود. هرچه عدد اختصاصی به ۱ نزدیک‌تر باشد، پیکسل روشن‌تر می‌شود. در این شرایط، خلل و فرج بین دانه‌های ماسه در نمونه خاک، توسط سیمان پر شده و چسبندگی بین دانه‌های سیمان و ماسه بیشتر است. در حالی که عدد صفر (نقاط تیره) در تصاویر باینری نشان‌دهنده‌ی عدم چسبندگی در نمونه خاک است. با اندازه‌گیری مساحت نقاط سیاه و سفید، می‌توان نتایج حاصل از پردازش تصویر را به صورت عددی مقایسه کرد. مساحت هر یک از نمونه‌های تصویربرداری شده، ۶۴ میلی‌متر مربع است. با توجه به تعداد زیاد نمونه‌ها، در شکل ۱۳، تصویر مربوط به نمونه خاک



pH=1



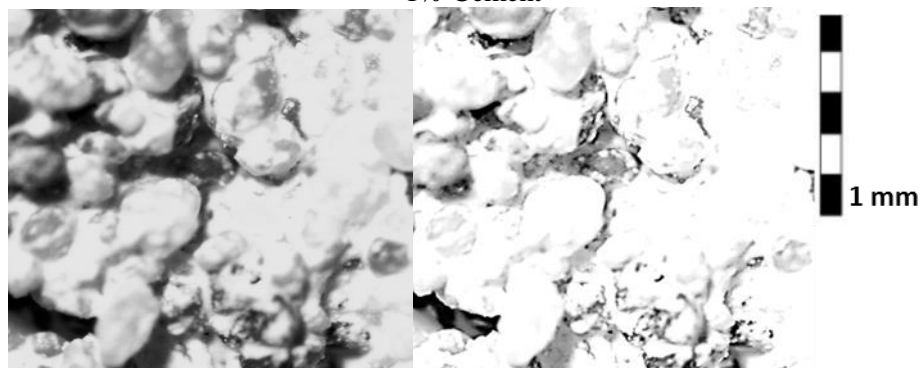
pH=7/8

شکل ۱۳. پردازش تصویر نمونه تثبیت شده با ۳٪ سیمان در دو محیط اسیدی با pH=1, 7.8

(سمت راست: تصویر باینری، سمت چپ: تصویر نمونه)



1% Cement



7% Cement

شکل ۱۴. پردازش تصویر نمونه تثبیت شده با ۱٪ و ۷٪ سیمان در بحرانی‌ترین شرایط اسیدی pH=1

(سمت راست: تصویر باینری، سمت چپ: تصویر نمونه)

#### ۴. نتیجه گیری

هدف اصلی در این مطالعه آزمایشگاهی، بررسی تأثیر باران اسیدی بر خصوصیات مکانیکی خاک تثبیت شده با سیمان است. به همین منظور، تثبیت خاک با درصدهای وزنی متفاوتی از سیمان انجام گرفت. همچنین، با قرار دادن نمونه خاک در محلول‌های اسیدی با مقادیر pH مختلف، تأثیر اسیدیته محیط بر نمونه‌های مد نظر، در زمان‌های عمل‌آوری مختلف، بررسی شده است. با انجام آزمایش‌های تراکم، تک‌محوری و برش مستقیم روی نمونه خاک مورد مطالعه در شهرستان ملایر واقع در استان همدان، نتایج زیر حاصل شده است:

- افزایش درصد سیمان باعث افزایش رطوبت بهینه و بیشینه دانسیته خشک نمونه خاک شده است. علت این دو موضوع، به ترتیب، افزایش نیاز آب و تراکم سریع نمونه‌ها است.

- افزایش اسیدیته محیط (کاهش مقدار عددی pH) باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول سکانتی نمونه‌ها شده است. در حالی که افزایش درصد سیمان و طولانی‌شدن زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری و مدول سکانتی در تمام نمونه‌ها را افزایش داده است. این

موضوع، با توجه به خاصیت تیکسوتروپی خاک توجیه‌پذیر است.

- افزایش درصد سیمان اضافه شده و مدت‌زمان عمل‌آوری، پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها را افزایش داده است. در حالی که اسیدی‌تر شدن محیط (کاهش pH)، پارامترهای مقاومت برشی نمونه خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) را کاهش داده است.

- اثر سیمان، در مقایسه با آهک، در افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک بیشتر است. به نحوی که نرخ افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان در مقایسه با آهک، به ازای افزایش ۲ درصدی ماده تثبیت‌کننده، به ترتیب ۵/۴ درصد و ۲/۱ درصد بیشتر است. علت این موضوع، استحکام بیشتر پیوند تشکیل شده بین دانه‌های ماسه و سیمان در مقایسه با دانه‌های ماسه و آهک است. این موضوع به ساختار شیمیایی مصالح ارتباط داده می‌شود.

- براساس تصاویر باینری به دست آمده از پردازش تصویر نمونه‌ها، مشاهده شد که با اسیدی‌تر شدن محیط، چسبندگی بین دانه‌های ماسه کاهش یافته، در حالی که افزایش درصد سیمان، چسبندگی بین دانه‌های ماسه را افزایش داده است.

#### ۵. مراجع

- ترابی، ع. و حسنلوراد، م. ۱۳۹۷. "اثر آلاینده اسید سولفوریک بر مقاومت برشی و پارامترهای تحکیمی خاک رس". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۰(۶): ۱۱۳۶-۱۱۲۷.
- رحیمی، ا. و بیات، م. ۱۳۹۸. "رفتار برشی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با آهک در معرض محیط‌های اسیدی". مجله مهندسی عمران مدرس، ۱۹(۴): ۶۹-۵۹.
- طاهرخانی، ح. و سلامی، ح. ۱۳۹۲. "مقایسه‌ی تثبیت‌کننده‌های آهک و سیمان و CBR PLUS برای تثبیت خاک رس". مجله مهندسی حمل و نقل، ۵(۲): ۲۷۴-۲۶۳.
- عابدی کویایی، ج.، نوروزیان، ک. و عباسی، ن. ۱۳۹۴. "ارزیابی دوام و پایداری خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک هیدراته در مجاورت سازه‌های آبی". نشریه علوم آب و خاک، ۱۹(۷۳): ۲۶۱-۲۴۹.
- کوثری، ش.، حجت، آ. و کریمی نسب، س. ۱۳۹۲. "اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به منظور بررسی تأثیر حضور اسید سولفوریک بر مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های خاک". اولین کنفرانس ملی مهندسی اکتشاف منابع زیرزمینی، شاهرود.

- Abdulhussein Saeed, Kh., Anuar Kassim, Kh., Nur, H. and Mohd Yunus, N. Z. 2014. "Strength of lime-cement stabilized tropical lateritic clay contaminated by heavy metals". *KSCE J. Civ. Eng.*, 19(4): 887-892.
- ASTM D 1557. 2007. "Standard test methods laboratory compaction characteristics of soil using modified effort". *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D 2166. 2007. "Standard test method for unconfined compressive strength cohesive soil". *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM D 3080. 2007. "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions". *Annual Book of ASTM Standards*.
- Bakhshipour, Z., Asadi, A., Huat, B. B., Sridharan, A. and Kawasaki, S. 2016. "Effect of acid rain on geotechnical properties of residual soils". *Soils Found.*, 56(6): 1008-1020.
- 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 cement stabilized lead-contaminated soil". *J. Hazard. Mater.*, 271: 131-140.
- Du, E., Dong, D., Zeng, X., Sun, Z., Jiang, X. and de Vries, W. 2017. "Direct effect of acid rain to leaf chlorophyll content of terrestrial plants in China". *Sci. Total Environ.*, 605-606: 764-769.
- Garcia-Vera, V. E. and Lanzon, M. 2018. "Physical-chemical study, characterisation and use of image analysis to assess the durability of earthen plasters exposed to rain water and acid rain". *Constr. Build. Mater.*, 187: 708-717.
- Gratchev, I. and Towhata, I. 2013. "Stress-strain characteristics of two natural soils subjected to long-term acidic contamination." *Soils Found.* 53(3): 469-476.
- Lemos, A. D., Rocha, J. A. and Ferra, V. M. 2018. "Soil mutagenicity- Effects of acidification and organic pollutants in urban/industrial areas". *Chemosphere*, 209: 666-674.
- MATLAB. 2014. Version 7.6, The Math Works.
- Prakash, S. and Arumairaj, P. D. 2013. "Effects of acid and base contamination on geotechnical properties of clay". *Int. J. Sci. Res.*, 4(5): 1440-1444.
- Sarkar, G., Islam, M. R., Alamgir, M. and Rokonuzzaman, Md. 2012. "Effect of acid rain on geotechnical properties of composite fine-grained soil". *Int. J. Appl. Sci. Eng. Res.*, 1(2): 64.
- Su, Z., Liu, J., Jin, Y., J., Hou, C. Nie, Y. 2010. "Cement/activated-carbon solidification/stabilization treatment of phenol-containing soil". 3<sup>rd</sup> International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Beijing, pp. 1-4.
- Wei, H., Liu, Y., Xiang, H., Zhang, J., Li, S. and Yang, J. 2019. "Soil pH responses to simulated acid rain leaching in three agricultural soils". *Sustainability*, 12: 280