



University Of Qom



Investigation of Acid Effect on the Strength Behavior of Fine-Grained Soil

Seyyed Mohammad Hosein Khatami¹ , Abdolhosein Haddad² , Adel Asakereh³

1. Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. E-mail: mkhatami@tvu.ac.ir
2. Corresponding author, Professor, Faculty of Civil Engineering of Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: ahadad@semnan.ac.ir
3. Associate Professor, Faculty of Civil Engineering of Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: asakereh@semnan.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 03 May 2023
Revised 06 Oct 2023
Accepted 14 Oct 2023

Keywords:
Static Triaxial Test,
Shear Strength
Parameters,
Acidic Contamination,
Sand-Bentonite Mixture.

ABSTRACT

Due to the ever-increasing growth of fossil pollution in the air of big cities or any other place, the resulting rain will be acidic. The reason for the formation of acid rain particles is nitrogen group compounds. That is, the combination of existing water with nitrate causes the phenomenon of acid rain. The soil may be exposed to various pollutants over time, including acidic pollutants and its shear resistance changes. Therefore, this issue is investigated in this research. On the other hand, investigating the behavior of soil under the effect of acidic contamination is so important because the excessive using of the sand-bentonite mixture in the Landfills. According to this subject in this research Sand of Firoozkooh with different percentages (0, 10%) Bentonite to carry out the undrained consolidated triaxial tests is use to investigate the effect of nitrat acid solution with (1, 3) pH for investigating the influence of acidic contamination on shear strength parameter. Results that comes out from experiments indicates that Presence of acid lead to reduction of shear strength of clean sand. Although in sand-bentoni mixture with pH=3 shear strength increased but rising of acid in pH=1 lead to decrease of shear strength. Also presence of acid makes the positive pore pressure higher.

Cite this article: Khatami SMH, Haddad A, Asakereh A. Investigation of Acid Effect on the Strength Behavior of Fine-Grained Soil. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 33-47. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9393.1479>



تأثیر آلاینده اسیدنیتریک بر روی مقاومت برشی خاک ریزدانه

سید محمد حسین خاتمی^۱، عبدالحسین حداد^۲✉، عادل عساکره^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران. رایانامه: mkhatami@tvu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: ahadad@semnan.ac.ir

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: asakereh@semnan.ac.ir

چکیده

با توجه به رشد روزافزون آلودگی فسیلی در هوای کلان شهرها یا هر نقطه دیگری، باران به وجود آمده به صورت اسیدی خواهد بود. از طرفی به دلایل استفاده زیاد از مخلوط ماسه و بنتونیت در مراکز دفن زباله و وجود شیرآبه در آن، بررسی رفتار این خاک‌ها تحت اثر آلاینده اسیدی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. به این منظور، اثر آلاینده اسیدنیتریک با pHهای ۷، ۳ و ۱ بر روی مقاومت برشی ماسه تمیز و ماسه حاوی ۱۰ درصد وزنی بنتونیت متراکم به کمک آزمایش‌های سه محوی تحکیم یافته- زهکشی نشده بررسی گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که حضور اسید در آب منفذی، باعث کاهش مقاومت برشی ماسه تمیز می‌شود. در مخلوط ماسه و بنتونیت حضور اسیدنیتریک با pH=3 منجر به افزایش مقاومت برشی و با pH=1 باعث کاهش مقاومت برشی می‌گردد. همچنین حضور اسید باعث کاهش مدول الاستیسیته و افزایش فشار آب حفره‌ای منفی می‌گردد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

کلیدواژه‌ها:

آزمایش سه محوری، پارامترهای مقاومت برشی، آلاینده اسیدی، مخلوط ماسه و بنتونیت.

استناد: خاتمی سیدمحمدحسین، حداد عبدالحسین، عساکره عادل. تأثیر آلاینده اسید نیتریک بر روی مقاومت برشی خاک ریزدانه. پژوهش‌های

زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۳؛ ۱۰(۱): ۳۳-۴۷. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9393.1479>

۱- مقدمه

می‌کنند. به خصوص صفحات هشت ضلعی رس‌های معدنی بیشتر در معرض این پدیده قرار دارند. در حالی که بازها تمایل به پراکندن صفحات چهارضلعی سیلیکا در رس‌های معدنی را دارند [۸]. برخی منابع بر اهمیت تأثیر pH آب حفره‌ای بر خواص فیزیکی- شیمیایی و رفتار مکانیکی رس‌ها بحث کرده‌اند [۹، ۱۰ و ۱۱]. اکثر تحقیقات انجام شده، بر اثرات مخرب تغییرات pH، بر رفتار ژئوتکنیکی رس‌ها تأکید کرده‌اند [۱۰ و ۱۲]. براساس نتایج یک تحقیق دیگر، کاهش pH از ۷ به ۳ در یک نوع خاک رس، موجب کلوخه شدن و افزایش نفوذپذیری آن به میزان ۸۷ درصد شده است. در همان خاک با افزایش pH از ۷ به ۱۱ نفوذپذیری به اندازه ۴۷ درصد زیاد شده است. همچنین با تغییرات pH حد روانی و خمیری خاک افزایش یافت [۱۳]. رس‌های طبیعی متراکم با محلول ۵٪ اسید هیدروکلریک، اسید سولفوریک و اسید نیتریک توسط مادسن^۳ و همکاران، مورد آزمایش قرار گرفتند و پس از ۱۲۰ روز، هدایت هیدرولیکی در حدود ۵ برابر افزایش یافت [۱۴]. کشیر و یانفول^۴، افزایش هدایت هیدرولیکی آب‌بندهای رسی را بعد از اختلاط با محلول‌های اسید و باز، به علت افزایش ضخامت لایه دوگانه اطراف ذرات رس، گزارش کردند. تحقیقات انجام گرفته بر روی بنتونیت تحت تأثیر اسید pH برابر با سه، بعد از عبور دادن محلول به اندازه سه برابر حجم حفره‌ای خاک، نظر میشل و مادسن را تأیید کردند و آزمایش‌ها نشان دادند که هرچه نمونه‌ها تحت فشار همه جانبه بیشتری محصور شده باشند، هدایت هیدرولیکی افزایش کمتری می‌یابد [۱۵].

سیو^۵، مشاهده کرد که در pHهای بالا به علت اجتماع دانه‌ها، تراکم‌پذیری کاتولینیت افزایش می‌یابد [۱۲]. سریده‌اران^۶ و همکاران بیان کردند که حد روانی

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 می‌گردد. ورود آلاینده‌های فلزی و ترکیبات اسیدساز از قبیل ترکیبات گوگرددار، نیتروژن‌دار و یا نتیجه واکنش‌های آنها در اتمسفر به باران یا هر فرم دیگر بارندگی، موجب افزایش اسیدیته بارندگی‌ها، تشکیل باران‌های اسیدی و تغییر در کیفیت بارش‌های جوی خواهد شد. باران اسیدی اثرات زیست‌محیطی متعددی دارند که اغلب اثرات آن منفی بوده و از جمله می‌توان به تخریب بناها و برخی ابزارهای انسان‌ساخت اشاره کرد [۱]. همچنین باران اسیدی می‌تواند باعث فرسایش خاک شده و اثرات مخربی را بر خاک داشته باشد، بنابراین باران اسیدی به عنوان یکی از منابع آلودگی خاک قلمداد می‌شود [۲]. یکی از مشکلات حاصل از آلودگی هوا، بارش باران‌های اسیدی است. باران اسیدی هنگامی به وجود می‌آید که pH باران بر اثر حل شدن گازهایی مانند دی‌اکسید گوگرد (SO_2) و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) کاهش یافته و به مقدار کمتر از ۵ برسد [۳ و ۴]. سولفات (SO_4) و نترات (NO_3) از آلاینده‌های شاخص اتمسفرهای شهری هستند که در زوال‌پذیری بناهای تاریخی و ساختمان‌ها نقش مهمی را دارند [۵].

بنسن^۱ و همکاران در سال ۱۹۹۴ بیان کردند، مواد شیمیایی هدایت هیدرولیکی رس‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۶]. این تغییرات می‌تواند نتیجه تغییرات در تمرکز یون‌ها، تبادل یون‌ها، جذب و یا حل شدن آنیون‌ها باشند. به‌طور کلی، افزایش در غلظت و ظرفیت شیمیایی کاتیون باعث لخته شدن ذرات ریز می‌شود و تورم مواد معدنی منبسط شونده را محدود می‌کند [۷]. میشل^۲ نتیجه گرفت که اسیدها به شبکه کریستالی رس‌ها حمله

³- Madsen

⁴- Kashir and Yanful

⁵- Siu

⁶- Sridharan

¹- Benson

²- Mitchell

اسیدیته محلول و رسیدن pH به ۴، مقاومت زهکشی نشده خاک دارای کانی کائولینیت کاهش پیدا می‌کند [۲۳].

احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر شیرابه بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک رس کائولینیت و مخلوط کائولینیت با بنتونیت پرداختند. نتایج نشان داد وجود هر دو ماده اسید (اسید استیک) و باز (هیدروکسید سدیم)، منجر به کاهش پارامترهای مقاومت برشی می‌شود. همچنین اسیدی و یا بازی شدن آب حفره‌ای درون خاک بر روی خصوصیات تحکیمی نیز مؤثر بوده و افزایش مقدار نشست و تسریع زمان تحکیم را در پی دارد. به طور کلی، افزودن اسید و یا باز به خاک کائولینیت سبب افزایش ضریب تحکیم و ضریب فشردگی می‌گردد [۲۴]. در تحقیقی دیگر، تحکیم‌پذیری سه نوع خاک، شامل رس و سیلت طبیعی حاوی کائولینیت تحت اثر اسید سولفوریک را در زمان‌های مختلف، بررسی کردند. بعد از انجام آزمایش‌های تحکیم مشخص شد که ساختار خاک، در معرض محلول با pH پایین، تأثیر چشمگیری بر روی خاصیت فشردگی خاک دارد. هر سه نوع خاک، نمونه‌های دست‌نخورده و دست‌خورده، با کاهش مقدار pH، ضریب فشردگی بیشتری را نسبت به آب حفره‌ای خنثی از خود نشان دادند. تغییرات ضریب فشردگی در نمونه‌های دست‌نخورده بیشتر بود، اما نتایج آزمایش نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده کاملاً همسو بود [۲۵]. مؤمنی و همکاران در سال ۲۰۲۰، تأثیر pH در بازه ۳ الی ۸ را بررسی کردند و دریافتند که با کاهش مقادیر pH، مقاومت تک‌محوری و CBR خاک کاهش و مقادیر حدود اتربرگ و نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد [۲۶]. خدابنده و همکاران، اثر محلول‌های اسیدی و بازی را روی رفتار خاک‌های رمبنده بررسی کردند و نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش اسیدیته محلول، پتانسیل رمبندگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مقادیر pH (محلول بازی) پتانسیل رمبندگی خاک کاهش

اسمکتیت، به شدت به pH آب منفذی وابسته است این موضوع توسط سایر محققین تأیید شد [۱۰، ۱۶ و ۱۷].

گیتز و بوزا^۷، به بررسی اثرات بلندمدت بازها بر روی بنتونیت پرداختند [۱۸]. محققان اثر اسیدسولفوریک را بر روی پارامترهای حدود اتربرگ رس بنتونیت، بررسی کردند [۱۹]. سانیل^۸ و همکاران، حاکی که از الک ۲۰ میلیمتر عبور داده بودند را به حالت بلوک در سه مخزن با pH های ۵، ۷ و ۸ نگهداری کردند و اثر زمان را بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک بررسی نمودند. آنها دریافتند که با گذشت زمان، مقاومت فشاری کاهش و وزن مخصوص افزایش می‌یابد. با افزایش زمان در pH ۵ و ۷، حد خمیری افزایش ولی در pH برابر ۸، حد خمیری کاهش می‌یابد [۲۰]. پژوهشگران، اثرات تغییر pH را بر روانگرایی خاک‌های ریزدانه بررسی کردند. به این منظور، از ترکیب ماسه با سه نوع رس کائولن، ایلیت و بنتونیت استفاده شد. نتایج نشان داد که اثر pH اسید سولفوریک و هیدروکسید سدیم بر روانگرایی به نوع کانی تشکیل‌دهنده خاک‌های ریزدانه بستگی دارد. به عنوان مثال، در شرایط اسیدی متوسط ترکیب ماسه- کائولن کمی افزایش مقاومت در برابر روانگرایی پیدا می‌کند؛ در حالی که در ترکیب ماسه- ایلیت و ماسه- بنتونیت مقاومت روانگرایی کاهش می‌یابد [۲۱]. در سال ۲۰۱۲، مقاومت برشی زهکشی نشده رس کائولینیت و اسمکتیت در اثر تغییر pH آب حفره‌ای مطالعه شد. نتایج حاکی از آن است که با کاهش pH تا مقدار ۳، مقاومت برشی زهکشی نشده افزایش یافته است [۲۲]. گراچو و توواتا^۹، به بررسی اثر بلندمدت آلاینده اسیدی بر رفتار تنش- کرنش دو خاک با کانی‌های متفاوت کائولینیت و مونت موریلونیت پرداختند. نتایج حاکی از آن است که با کاهش pH از ۷/۳ به ۶، مقاومت هر دو خاک افزایش اما با کاهش مجدد

⁷ - Gates and Bouazza

⁸ - Sunil

⁹ - Gratchev and Towhata

مخلوط خاک و بنتونیت مورد بررسی قرار گرفته است. در زمینه تأثیر مواد اسیدی بر مقاومت برشی خاک، تاکنون تحقیقات محدودی صورت گرفته است. همچنین در این مطالعه اثر آلاینده اسید نیتریک با انجام آزمایش سه محوری زهکشی نشده ماسه و مخلوط ماسه و بنتونیت دیده شده است که در مطالعات پیشین انجام نشده است. بنابراین در این مطالعه سعی بر آن است که با انتخاب pHهای مناسب به بررسی رفتار تنش- کرنش و تغییرات فشار آب حفره‌ای پرداخته شود.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- خصوصیات مصالح استفاده شده

در این تحقیق، از ماسه تمیز ۱۶۱ فیروزکوه و رس بنتونیت استفاده شد. ماسه مورد استفاده، ماسه سیلیکاتی شکسته می‌باشد. بنتونیت مورد استفاده، شناخته‌شده‌ترین بنتونیت موجود در ایران به نام بنتونیت شرکت باریت فلات، که در پروژه‌های صنعت نفت برای آب‌بندی استفاده می‌شود، در این مطالعه استفاده شد. مشخصات فیزیکی ماسه فیروزکوه در جدول ۱ ارائه شده است. خصوصیات فیزیکی بنتونیت مانند وزن مخصوص، توزیع اندازه ذرات، حدود اتربرگ و مقدار رطوبت طبق روش‌های آیین‌نامه ASTM2016 در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی ماسه تمیز فیروزکوه

C _c	C _u	D ₅₀ (mm)	e _{min}	e _{max}	G _s	مشخصات ماسه
۰/۹۴	۱/۷۲	۰/۲۹	۰/۶۰۳	۰/۹۴۳	۲/۶۸۵	ماسه فیروزکوه ۱۶۱

می‌شود وزن مخصوص خاک افزایش یابد.

۲-۲- آلاینده مورد استفاده

آلاینده اسید نیتریک با مشخصات جدول ۴ در این پژوهش استفاده شده است. محلول‌های اسیدی با pHهای ۱ و ۳ از این آلاینده تهیه شد. به این منظور برای تهیه محلول خنثی از آب مقطر، برای ساخت محلول با pH=3

یافته است [۲۷]. آلودگی خاک در اثر عوامل مختلف یکی از معضلات دنیا در کشورهای مختلف به خصوص کشورهای صنعتی است که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در پژوهش کاظم‌زاده و همکاران، از خاک آلوده به نترات سرب و نترات روی استفاده شده است [۲۸].

مخلوط‌های متراکم شده از خاک‌های دانه‌ای با مقدار کمی بنتونیت برای ساخت سازه‌های ژئوتکنیکی مثل پوشش‌های نفوذناپذیر در مراکز دفن زباله و همچنین در هسته سدهای خاکی به کار می‌روند. در مخلوط ماسه- بنتونیت، ماسه نقش اسکلت را ایفا نموده و مقاومت و پایداری مخلوط را ایجاد می‌کند، بنتونیت نیز فضای بین ذرات ماسه را پر کرده و مخلوط را نفوذناپذیرتر می‌کند. توصیه شده است که جهت ارضای اقتصادی بهینه پروژه، مقدار بنتونیت در مخلوط به مقدار حداقل ممکن (بین ۴- ۱۲ درصد) محدود شود [۲۹]. با توجه به اینکه مخلوط ماسه و بنتونیت در مراکز دفن زباله و سایر محل‌ها ممکن است تحت تأثیر آلاینده قرار گیرد، در این مطالعه خاک ماسه با ۱۰ درصد بنتونیت نیز علاوه بر خاک ماسه، انتخاب شد.

همان‌طور که ملاحظه شد اثر درجه pH به‌طور گسترده‌ای بر نفوذپذیری، حدود اتربرگ، تورم و تراکم خاک‌های رسی مونت موریلونیت، اسمکتیت، کائولینیت و

آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ماسه‌ای با مقدار بنتونیت صفر و ۱۰ درصد انجام شدند. وزن مخصوص حداقل و حداکثر ماسه و مخلوط ماسه- بنتونیت در جدول ۳ آمده است. همان‌طور که مشخص است با افزودن بنتونیت وزن مخصوص خاک افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل این است که با ثابت ماندن حجم قالب، ذرات ریز بنتونیت حفرات مابین ماسه را پر کرده و باعث

با اضافه کردن تدریجی محلول اسید با غلظت ۰/۰۱ مولار به آب مقطر تا رسیدن به pH مورد نظر و برای ساختن محلول با pH=1 با اضافه کردن مستقیم اسید نیتریک ۶۸٪ استفاده شده است.

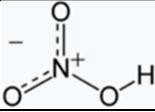
جدول ۲- مشخصات نمونه بنتونیتی

مقادیر اندازه‌گیری شده	خصوصیات
۷۶٪	رس
۲۳٪	سیلت
۱٪	ماسه
۳۲۱٪	حد روانی
۳۵٪	حد خمیری
۲۸۶٪	شاخص خمیری
۰/۳۷٪	فعالیت
CH	طبقه‌بندی خاک
۷/۱۰٪	میزان آب (خشک شده در هوای آزاد)
۲/۷۹	G _s

جدول ۳- وزن مخصوص حداقل و حداکثر ترکیبات ماسه و بنتونیت

نوع خاک	γ_{min} (gr/cm ³)	γ_{max} (gr/cm ³)
ماسه	۱/۳۸	۱/۶۷
ماسه با ۱۰ درصد بنتونیت	۱/۴۶	۱/۷۵

جدول ۴- مشخصات آلاینده مورد استفاده

اسید نیتریک	نام شیمیایی
اسید معدنی	خانواده شیمیایی
HNO ₃	فرمول شیمیایی
	آرایش مولکولی
۶۳/۰۱	وزن مولکولی (g/mol)

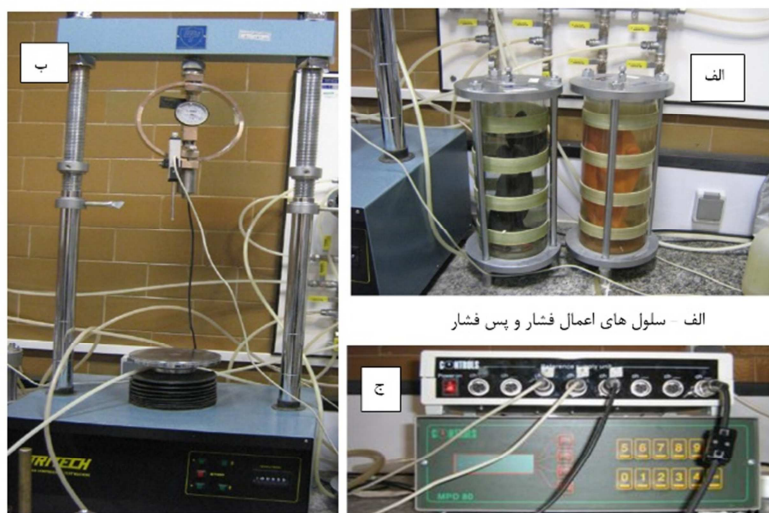
دستگاه سه محوری استاتیکی که آزمایش‌های سه محوری توسط آن انجام گردیدند، مطابق شکل ۱ به‌طور کلی به سه بخش اعمال فشار، بارگذاری و ثبت اطلاعات تقسیم می‌گردد. سامانه تأمین فشار این دستگاه بادی و سامانه اعمال بار آن برقی و سامانه ثبت و جمع‌آوری اطلاعات انجام آزمایش در آن به وسیله یک رایانه و سامانه ثبت اطلاعات انجام می‌گردد. فشارهای اعمالی به نمونه آزمایش شامل فشار سلول و پس فشار می‌باشد که هر دو به وسیله یک کمپرسور بادی تأمین گشته و توسط آب به نمونه اعمال می‌گردد. سامانه اعمال بار به نمونه به صورت

یکی از مشکلات سر راه این پروژه، کار با اسید بود. جهت اطمینان خاطر از اینکه کار با اسید به دستگاه‌ها آسیب نمی‌رساند لازم بود تا آزمایش‌هایی روی بعضی از دستگاه‌های آزمایشگاه و همین‌طور وسایل جانبی آنها صورت گیرد. از آنجاکه دستگاه اصلی که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است، دستگاه سه محوری بود، روی قطعات مختلف این دستگاه اسید نیتریک تست شد که خوشبختانه این دو ماده واکنشی با هم نداشتند.

۲-۳- دستگاه سه محوری

قرائت بار، تغییرشکل، فشار آب حفره‌ای و تغییر حجم نمونه از طریق سیم‌های رابط به یک دستگاه ثبت اطلاعات، متصل می‌شوند. این دستگاه که داده‌ها را از حالت آنالوگ به حالت دیجیتال تبدیل می‌کند به یک رایانه متصل می‌باشد. رایانه مذکور توسط یک نرم‌افزار به نام ژئولب داده‌ها را ثبت می‌کند.

کنترل کرنش با سرعت بارگذاری قابل تنظیم، انجام می‌گیرد. ظرفیت اسمی موتور در حرکت رو به سمت بالا پنج تن می‌باشد که دامنه جابه‌جایی پایه متحرک و کفی متصل به آن در امتداد قائم ۱۲ سانتیمتر می‌باشد. محدوده سرعت قابل تنظیم موتور بین ۰/۰۰۱ تا ۹ میلیمتر بر دقیقه در بارگذاری می‌باشد. کلیه حسگرهای



الف - سلول‌های اعمال فشار و پس فشار

ب- سامانه بارگذاری

ج- دستگاه مبدل دیجیتال

شکل ۱- دستگاه سه محوری

تسریع عمل اشباع‌سازی نمونه، اقدام به عبور گاز دی اکسیدکربن قبل از عبور محلول با pH موردنظر از نمونه از آن شده و با اعمال پس‌فشاری در حدود ۲۰۰ کیلوپاسکال اشباع شدند. در این تحقیق برای اشباع‌سازی نمونه از محلول با pH مورد نظر استفاده شده است. درجه اسیدی آب منفذی برابر ۷، ۳ و ۱ انتخاب شد. در این روش برای اینکه از واکنش اسید با خاک اطمینان حاصل شود، آنقدر اجازه عبور محلول از نمونه داده می‌شود تا pH محلول خروجی از نمونه با pH محلول ورودی به نمونه یکسان باشد. این روش در سال ۲۰۰۹ توسط محققان نیز استفاده شده است [۲۱]. جدول ۵ مشخصات آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۳- نتیجه مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱- تأثیر اسید بر روی رفتار تنش-کرنش و فشار آب حفره‌ای

۲-۴- آزمایش‌های انجام شده

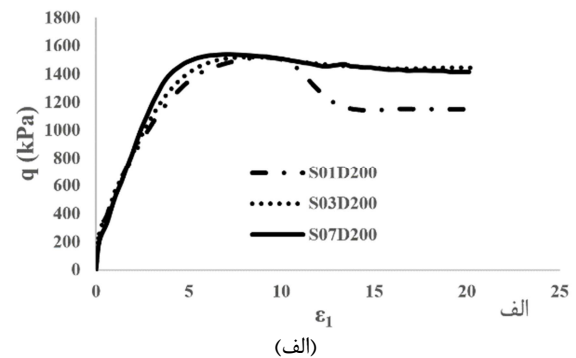
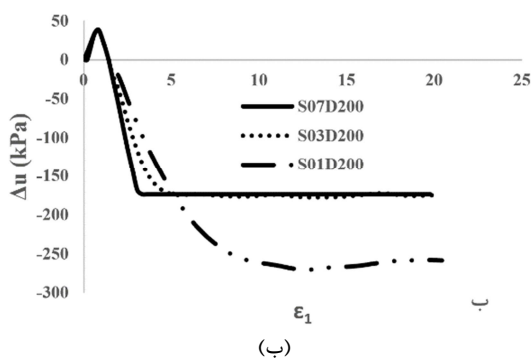
برای بررسی تأثیر آلاینده اسیدی بر روی رفتار برشی ماسه و مخلوط ماسه- بنتونیت، ۱۸ آزمایش سه محوری تحکیم‌یافته- زهکشی‌نشده طبق استاندارد ASTM D4767-11، تحت تنش‌های همه جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال، بر روی نمونه‌ها در حالت متراکم انجام شد. نمونه‌ها با چگالی نسبی ۸۰ درصد (قبل تحکیم) به روش ریزش خشک ساخته شدند. نمونه‌ها به شکل استوانه و به قطر ۳/۸ و ارتفاع ۷/۶ سانتی‌متر انتخاب شدند. برای ایجاد نمونه‌هایی همگن، خاک به پنج لایه تقسیم شده و هر لایه نیز به صورت جداگانه با نسبت وزنی مشخص به داخل قالب ریخته شده و با وارد آوردن ضربه‌های ملایم به قالب نمونه توسط چکش پلاستیکی، ساخته شدند. نمونه‌ها به صورت اشباع با درجه اشباع‌شدگی بالای ۹۵ درصد آزمایش شدند. برای

مقاومت و رفتار برشی خاک شده است؛ ولی در ادامه، رفتار دو نمونه خاک بر هم منطبق شده است، ولی افزایش درجه اسیدی از ۳ به ۱ منجر تغییرات شدیدتر و افت بیشتر مقاومت باقیمانده و رفتار برشی ماسه شده است.

نتایج آزمایش‌ها در حالت ماسه خالص، تحت تنش همه جانبه ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال، به ترتیب در اشکال ۲ و ۳ نشان داده شده است. در نمودارهای قسمت الف شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود که در ماسه تمیز، افزایش درجه اسیدی از ۷ تا ۳ منجر تغییر اندکی در

جدول ۵- مشخصات آزمایش‌های سه محوری زهکشی نشده

pH	خاک	تنش همه جانبه	کد آزمایش
۷	ماسه	۱۰۰	S07D100
		۲۰۰	S07D200
		۳۰۰	S07D300
	مخلوط ماسه- بنتونیت	۱۰۰	10B07D100
		۲۰۰	10B07D200
		۳۰۰	10B07D300
۳	ماسه	۱۰۰	S03D100
		۲۰۰	S03D200
		۳۰۰	S03D300
	مخلوط ماسه- بنتونیت	۱۰۰	10B03D100
		۲۰۰	10B03D200
		۳۰۰	10B03D300
۱	ماسه	۱۰۰	S01D100
		۲۰۰	S01D200
		۳۰۰	S01D300
	مخلوط ماسه- بنتونیت	۱۰۰	10B01D100
		۲۰۰	10B01D200
		۳۰۰	10B01D300



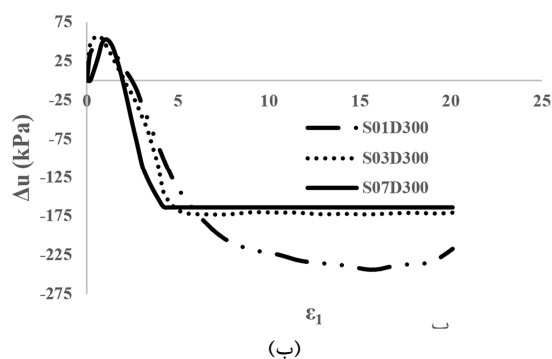
شکل ۲- (الف) نمودار تنش انحرافی و (ب) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در برابر کرنش محوری در تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال (ماسه تمیز)

نرم‌شوندگی قابل‌توجهی در حدود ۱۸ و ۲۰ درصد به ترتیب در تنش همه جانبه ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال شده

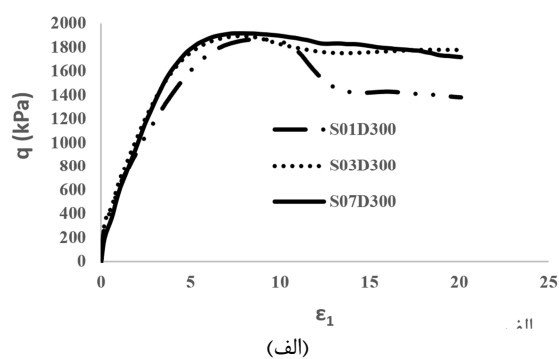
بدین ترتیب که از کرنش محوری ۱۱ به بعد، نمونه ماسه آلوده به اسید نیتریک به درجه اسیدی ۱، دچار

اتساعی‌تر شده است و مقدار فشار آب حفره‌ای منفی از ۱۷۴- به ۲۶۰- کیلوپاسکال رسیده است. این الگوی رفتاری به رفتار تنش- کرنش نیز انطباق دارد.

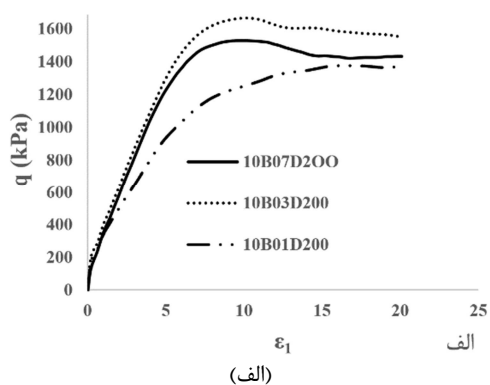
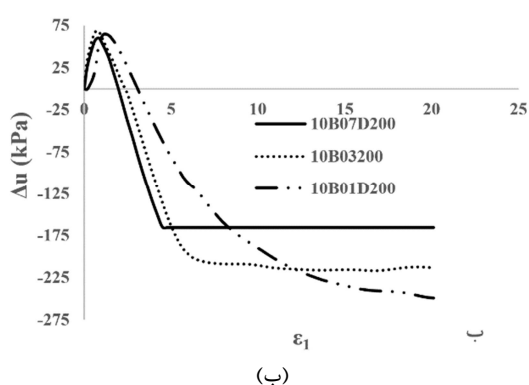
شکل ۴- الف نشان می‌دهد که افزایش درجه اسیدی از ۷ به ۳ منجر به افزایش مقاومت برشی مخلوط ماسه- بنتونیت شده است، ولی در ادامه با افزایش درجه اسیدی آب منفذی از ۳ به ۱ روند معکوس شکل گرفته و مقاومت برشی خاک مخلوط کاهش یافته است. ولی در کل به نظر می‌رسد که افزایش درجه اسیدی الگوی رفتار تنش- کرنش را از روند نرم‌شوندگی کرنش به سمت سخت‌شوندگی سوق داده است.



است. این الگو تقریباً در بقیه نمونه‌ها نیز مشاهده شد. حضور اسید باعث کم شدن زبری سطوح ماسه می‌شود که این تغییرات در $pH=3$ محسوس نمی‌باشد، ولی با افزایش میزان اسید این تغییرات مشهود می‌باشد و این باعث شده است که مقاومت برشی نهایی در فشار همه جانبه یکسان، برای ماسه تمیز بیشتر از ماسه در حضور اسید باشد. بخش ب در شکل‌های ۲ و ۳ نیز نشان می‌دهد که تغییر درجه اسیدی از ۷ تا ۳، تغییرات محسوسی در روند تغییرات و مقدار فشار آب حفره‌ای نشده است؛ ولی افزایش درجه اسیدی از ۳ به ۱ تغییرات زیادی در روند تغییرات و مقدار فشار آب حفره‌ای ایجاد نموده است. بدین ترتیب که رفتار خاک با افزایش درجه اسیدی،



شکل ۳- الف) نمودار تنش انحرافی و ب) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در برابر کرنش محوری در تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال (ماسه تمیز)



شکل ۴- الف) نمودار تنش انحرافی و ب) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در برابر کرنش محوری در تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال (مخلوط ماسه- بنتونیت)

رفتاری چندان تحت تأثیر قرار نگرفته است. در ادامه، افزایش درجه اسیدی از ۳ به ۱ روند و نرخ تغییرات فشار آب حفره‌ای را دچار تغییر نموده است. بدین ترتیب که

شکل ۴- ب نیز نشان می‌دهد که افزایش درجه اسیدی از ۷ به ۳ منجر به افزایش فشار آب حفره‌ای منفی از ۱۶۵/۵- به ۲۱۶- کیلوپاسکال شده است، ولی الگوی

در ادامه، شکل ۵، رفتار تنش- کرنش و تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای برای مخلوط ماسه و بنتونیت در تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال را تحت تأثیر اسیدی‌شدن محلول آب حفره‌ای نشان می‌دهد که مطابق با الگوی رفتاری خاک تحت تنش همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد.

۳-۱- مسیر تنش $p'-q$

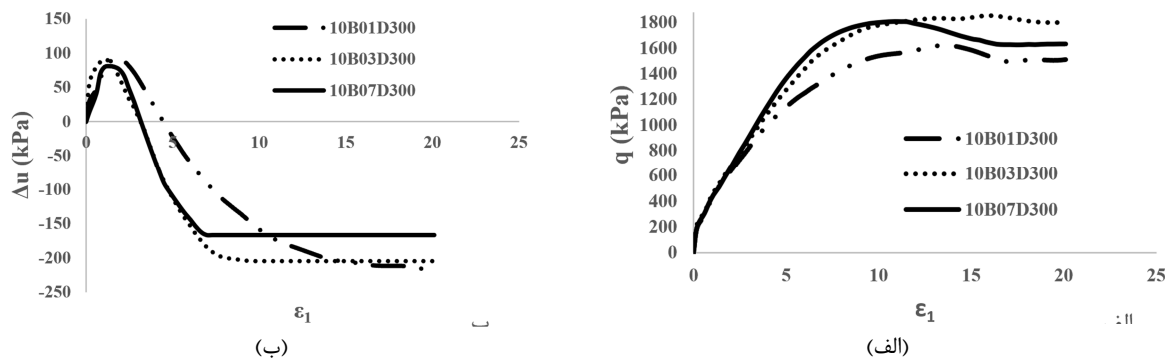
در شکل ۶، مسیر تنش $p'-q$ در برابر در حالت زهکشی‌نشده برای ماسه‌های آلوده و غیرآلوده در حالت متراکم و در تنش‌های همه‌جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است، که q تنش انحرافی و p' میانگین تنش مؤثر $P' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این نمودار، ابتدا منحنی‌های مسیر تنش برای دو نمونه آلوده، نسبت به نمونه غیرآلوده اندکی به سمت چپ رفته (به دلیل افزایش در فشار آب حفره‌ای مثبت) و دوباره به سمت راست بازگشته (به دلیل کاهش فشار آب حفره‌ای مثبت و تولید فشار آب حفره‌ای منفی) و با شیب‌های یکسان افزایش یافته است. در ماسه تمیز، حضور کمی از اسید ($pH=3$) تغییری در طول مسیر ایجاد نمی‌کند ولی با افزایش اسید ($pH=1$) در انتهای آزمایش به دلیل پیک به‌وجود آمده در نمودار تنش انحرافی- کرنش محوری، نمودارهای مسیر تنش به عقب بازگشته‌اند یعنی مقادیر q آنها کم شده است.

در شکل ۷، مسیر تنش $p'-q$ در حالت زهکشی‌نشده برای مخلوط ماسه و بنتونیت آلوده و غیرآلوده در حالت متراکم و در تنش‌های همه‌جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. مسیر تنش در این خاک شبیه رفتار ماسه می‌باشد، بدین صورت که در ابتدا نمودارهای مسیر تنش به دلیل ایجاد فشار آب حفره‌ای مثبت اندکی به سمت چپ نمودار حرکت کرده (مقدار p' کاهش یافته) و این موضوع در محلول با $pH=3$ محسوس‌تر از محلول با $pH=1$ می‌باشد.

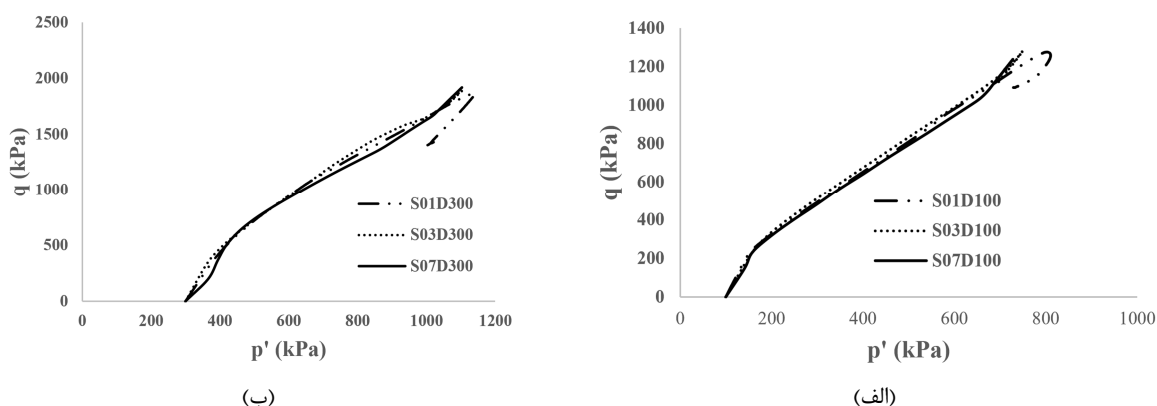
ابتدا مقدار فشار آب حفره‌ای مثبت را افزایش و سپس در ادامه، آزمایش کاهش داده و در انتهای آزمایش با کرنش محوری ۲۰ درصد به ۲۴۹- کیلوپاسکال رسانده است. پژوهشگران در تحقیقی با بررسی اثر اسید بر روی خاک کاوازاکی حاوی کانی مونت موریونیت مشاهده کردند که با کاهش pH از ۶/۹ به ۶ مقاومت خاک در آزمایش سه محوری زهکشی نشده افزایش یافت [۲۳]. برای خاک‌های حاوی کانی مونت موریونیت تأثیر pH در درجه اول بر روی لایه مضاعف پراکنده دیده می‌شود [۳۰ و ۳۱]. افزایش مقاومت خاک را اینگونه می‌توان فرض کرد، که با افزایش غلظت H^+ در آب حفره‌ای (با کاهش pH از حالت خنثی به اسیدیته در حدود کم) منجر به کاهش ضخامت لایه پراکنده می‌شود و در نتیجه، نیروی دافعه بین ذرات رس کاهش می‌یابد. به‌طوری که نیروی واندروالسی جاذب افزایش یافته و منجر به تشکیل مجموعه بزرگتری از ذرات رس می‌شود که ذرات در آن به هم نزدیک‌تر می‌باشند [۳۲]. این آرایش باعث ساختار چگال‌تر رس می‌شود که انتظار می‌رود مقاومت خاک افزایش یابد. گیجو و ماینز^{۱۰} زمانی که مقاومت برشی بنتونیت در حضور اسید افزایش یافت، این فرض را به‌طور گسترده تأکید کردند [۱۰]. محققان دیگری با انجام آزمایش سه محوری زهکشی‌نشده بر روی خاک سیلنتی به این نتیجه رسید که با کاهش pH از ۶/۹ به ۴ مقاومت خاک به‌طور قابل‌محسوسی کاهش یافته است [۲۳]. با کاهش شدید pH ، بار مثبت در لبه‌های ذرات رس کاتولینیت افزایش می‌یابد و این فرایند منجر به تشکیل ساختار فلوکوله و باز می‌شود [۲۸ و ۳۰]. تشکیل این نوع ساختار باز و فلوکوله در خاک منجر به تولید اضافه فشار منفی می‌شود و خاک رفتار اتساعی از خود نشان می‌دهد. وانگ و سیو^{۱۱} نشان دادند که در مقادیر کم pH ، کاهش مقاومت خاک مربوط به آرایش رس به صورت فلوکوله می‌باشد [۳۳].

¹⁰- Gajo and Maines

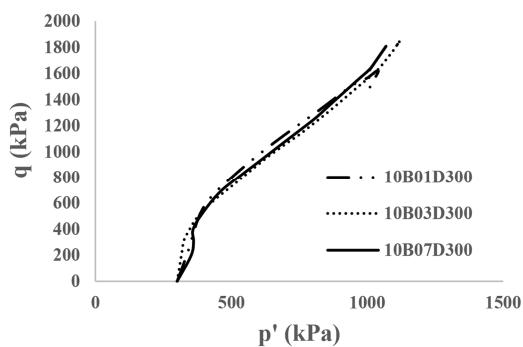
¹¹- Wang and Siu



شکل ۵- (الف) نمودار تنش انحرافی و (ب) تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در برابر کرنش محوری در تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال (مخلوط ماسه- بنتونیت)



شکل ۶- نمودار مسیر تنش p' - q در تنش همه جانبه (الف) ۱۰۰ و (ب) ۳۰۰ کیلوپاسکال برای pHهای مختلف اسید (ماسه)



شکل ۷- نمودار مسیر تنش p' - q در تنش همه جانبه ۳۰۰ کیلوپاسکال برای pHهای مختلف اسید (مخلوط ماسه- بنتونیت)

برشی خاک

تغییرات حداکثر تنش انحرافی بسیج شده در برابر pH در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش درجه اسیدی آب منفذی در خاک ماسه تمیز از ۷ به ۳، مقدار تنش انحرافی بسیج شده تقریباً تغییری نمی‌کند ولی با افزایش غلظت اسید و رسیدن درجه pH به ۱، از مقدار آن کاسته می‌شود. در مخلوط ماسه- بنتونیت با افزایش

در ادامه آزمایش، با کاهش فشار آب حفره‌ای مثبت و تولید فشار آب حفره‌ای منفی، نمودار مسیر تنش با شیب‌های تقریباً یکسان به سمت راست حرکت کرده‌اند. در pH=3 طول مسیر تنش بیشتر از حالتی است که آب منفذی نمونه آب مقطر باشد و این نشان‌دهنده مقاومت بیشتر آن می‌باشد؛ ولی در pH=1 با افزایش تنش همه‌جانبه طول مسیر کوتاه‌تر می‌شود.

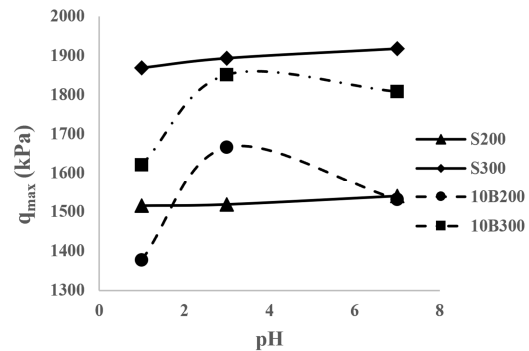
۳-۳- اثر آلاینده اسیدی بر الگوی رفتاری و مقاومت

می‌باشد. به عنوان نمونه، مقدار زاویه اصطکاک داخلی تحت تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال در درجات اسیدی ۷، ۳ و ۱ به ترتیب برابر است به ۳۹/۹، ۴۰/۱۸ و ۳۶/۲ درجه. از شکل ۸ ملاحظه می‌گردد که در ماسه تمیز و در مخلوط ماسه- بنتونیت از نظر درجه اسیدی یکسان، با افزایش تنش همه جانبه، زاویه اصطکاک داخلی کل، کمی افزایش یافته است. حضور اسید باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی کل شده است. به بیان دقیق‌تر، با افزودن اسید به خاک و با افزایش آن، ویسکوزیته سیال منفذی، متأثر از ویسکوزیته اسید، افزایش یافته و در نتیجه، لغزش ذرات افزایش می‌یابد. این پدیده در نهایت منجر به افزایش ناچیزی (قابل اغماض) چسبندگی ظاهری شده و توأم با آن، کاهش زاویه اصطکاک داخلی را موجب می‌گردد.

۳-۵- اثر اسید بر مدول الاستیسیته

روش‌های مختلفی برای محاسبه مدول الاستیسیته در ماسه‌ها وجود دارد. در این تحقیق، مدول الاستیسیته سکانت ۵۰ درصد استفاده گردیده است. طبق این روش، مدول سختی یا مدول الاستیسیته در ۵۰ درصد تنش انحرافی حداکثر، به عنوان سختی خاک انتخاب می‌گردد. در شکل ۱۰، مدول الاستیسیته سکانت برای ماسه تمیز و مخلوط ماسه- بنتونیت غیرآلوده و آلوده به اسید نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که حضور بنتونیت منجر به کاهش مدول الاستیسیته ماسه شده است. از طرفی، اسیدی شدن آب منفذی منجر به کاهش مدول الاستیسیته و نشست‌پذیری خاک می‌گردد. به عنوان نمونه، در تنش همه جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، مدول الاستیسیته سکانت در ماسه تمیز از ۳۳/۴۴ مگاپاسکال در pH برابر با ۷، به ۲۷/۴ مگاپاسکال (۱۸٪ کاهش) در درجه اسیدی ۱ رسیده است و در مخلوط ماسه- بنتونیت از ۲۶/۱۷ به ۱۶/۴۶ مگاپاسکال (۳۷٪ کاهش) رسیده است.

درجه اسیدی، مقاومت برشی بسیج شده افزایش می‌یابد. این روند در کار محققانی دیگر از جمله اسپاگنلی^{۱۲} و همکاران نیز دیده شده است [۲۲]. در ادامه، با رسیدن میزان pH به ۱، حداکثر مقاومت برشی بسیج شده به شدت بیشتری نسبت به حالت خنثی کاسته می‌گردد.



شکل ۸- تنش انحرافی حداکثر بسیج شده در برابر pH

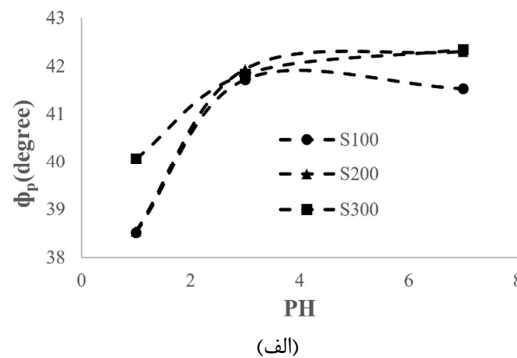
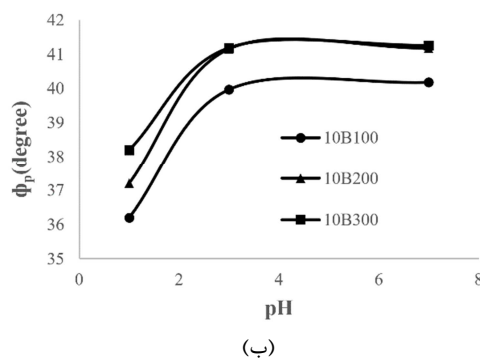
۳-۴- زاویه اصطکاک داخلی

مقدار زاویه اصطکاک داخلی (ϕ_p) طبق تئوری رو از رابطه شماره (۱) در نقطه پیک تنش محاسبه گردیده و در شکل ۹ ارائه گردیده است [۳۴]:

$$\frac{\sigma_1'}{\sigma_3} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi_p}{2} \right) \quad (1)$$

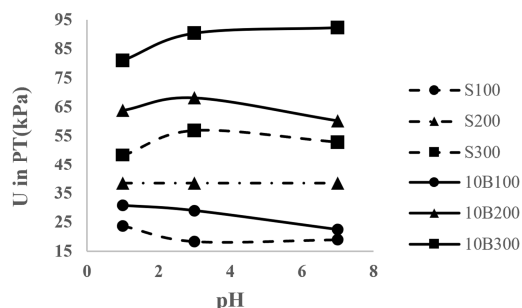
از شکل ۹- الف، ملاحظه می‌گردد که در ماسه تمیز مقدار زاویه اصطکاک داخلی در درجه اسیدی از ۷ تا ۳ چندان تغییر نکرده است؛ ولی با افزایش درجه اسیدی به ۱، مقدار زاویه اصطکاک داخلی کل حدوداً ۴ درجه کاهش یافته است. احتمالاً این موضوع به دلیل این است که درجه اسیدی در ۱ منجر به فرسایش سطحی دانه‌ها و صاف‌تر شدن سطح ذرات می‌گردد، بنابراین مقدار زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. شکل ۹- ب نیز نشان می‌دهد که در مخلوط ماسه- بنتونیت در حالت کلی با افزایش درجه اسیدی از ۷ به ۳ و ۱، مقدار زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد؛ ولی نرخ کاهش با افزایش درجه اسیدی از ۳ به ۱، شدیدتر از حالت کاهش pH از ۷ به ۳

¹²- Spagnoli



شکل ۹- تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در برابر درجه اسیدی در (الف) ماسه تمیز و (ب) مخلوط ماسه- بنتونیت

به عبارت دیگر، حضور دانه‌های بنتونیت در بین دانه‌های ماسه منجر به افزایش پتانسیل بسیج فشار آب حفره‌ای مثبت می‌شود. وجود آلاینده اسیدی نیز تغییراتی در مقدار فشار آب حفره‌ای مثبت در نقطه انتقال فاز ایجاد نموده است که این تغییرات تابع تنش همه‌جانبه و حضور بنتونیت بین دانه‌های ماسه می‌باشد؛ ولی به طور کلی، می‌توان گفت که وجود آلاینده اسیدی موجب افزایش فشار آب حفره‌ای مثبت در نقطه انتقال فاز می‌گردد. همچنین با افزایش تنش همه‌جانبه، فشار آب حفره‌ای نظیر نقطه انتقال فاز، افزایش یافته است.

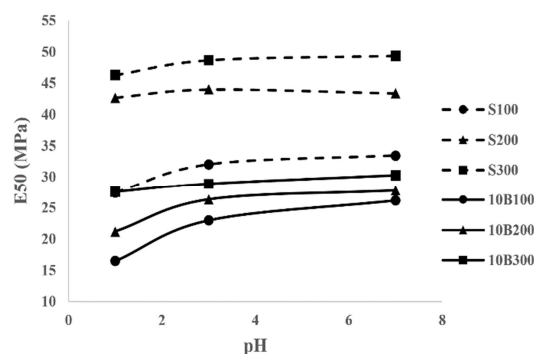


شکل ۱۰- تغییرات مدول الاستیسیته سکانت در برابر درجه اسیدی

۷-۳- مقدار کرنش محوری در نقطه انتقال فاز

نمودار کرنش محوری در نقطه انتقال فاز در برابر درجه اسیدی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. از این شکل ملاحظه می‌گردد که در هر دو خاک ماسه تمیز و مخلوط ماسه- بنتونیت با افزایش درجه اسیدی از ۷ به ۳، ابتدا کرنش نظیر نقطه انتقال فاز کاهش یافته است. سپس از درجه اسیدی ۳ به ۱ مجدداً افزایش یافته است. به عبارت دیگر، درجه اسیدی ۱ باعث می‌شود که بخش

در واقع، حضور اسید باعث نرم‌تر شدن نمونه گردیده است. با توجه به شکل می‌توان گفت که به طور کلی با افزایش تنش همه‌جانبه و عدم حضور بنتونیت، میزان سختی ماسه‌ها افزایش یافته است.



شکل ۱۱- تغییرات مدول الاستیسیته سکانت در برابر درجه اسیدی

حسن‌لرود و همکاران با بررسی اثر آلاینده اسید سولفوریک بر خاک ریزدانه به این نتیجه رسیدند که تحت فشار همه جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال با افزایش اسیدیته خاک، مدول الاستیسیته در ماسه و مخلوط ماسه- بنتونیت به ترتیب ۱۶ و ۴۹ درصد کاهش یافته است [۳۵]. این موضوع نشان‌دهنده اثر بیشتر اسید سولفوریک نسبت به اسید نیتریک بر روی خاک ریزدانه می‌باشد.

۳-۶- فشار آب حفره‌ای نظیر نقطه انتقال فاز

نمودار فشار آب حفره‌ای در نقطه انتقال فاز در برابر pH اسید در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به صورت کلی، فشار آب حفره‌ای نظیر نقطه انتقال فاز در تنش همه‌جانبه یکسان در مخلوط ماسه- بنتونیت بیشتر از ماسه تمیز می‌باشد.

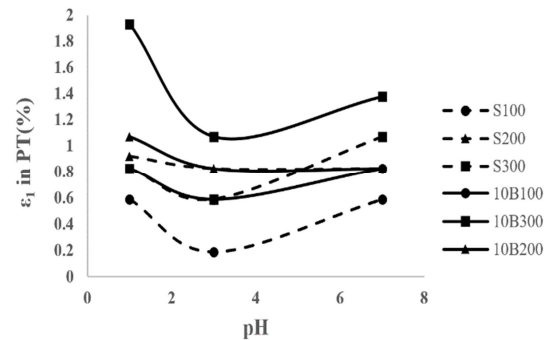
نمونه‌ها به دلیل متراکم بودن آنها ابتدا اندکی اضافه فشار مثبت و سپس فشار آب حفره‌ای منفی ایجاد می‌شود. حضور اسید باعث افزایش اضافه فشار مثبت می‌شود.

۳- در خاک ماسه‌ای مقاومت خاک در بازه درجه اسیدی ۷ تا ۱ با روند ملایمی دچار افت می‌شود. در مخلوط ماسه و بنتونیت در صورتی که pH آب منفذی برابر با ۳ باشد، نسبت به حالت خنثی، افزایش مقاومت ایجاد می‌شود، در حالی که در pH برابر با یک کاهش مقاومت برشی رخ می‌دهد.

۴- حضور اسید منجر به کاهش زاویه اصطکاک داخلی در هر دو خاک ماسه تمیز و مخلوط ماسه- بنتونیت می‌شود. به عنوان نمونه در تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال و در شرایط درجه اسیدی ۱، مقدار زاویه اصطکاک داخلی حدوداً به اندازه ۴ درجه، در ماسه تمیز و مخلوط ماسه- بنتونیت نسبت به حالت خنثی کاهش می‌یابد.

۵- با اسیدی شدن آب حفره‌ای، مدول الاستیسیته سکانت ماسه و مخلوط ماسه- بنتونیت کاهش پیدا می‌کند. به عنوان نمونه در تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال، مدول الاستیسیته سکانت در ماسه تمیز از ۳۳/۴۴ مگاپاسکال در pH برابر با ۷، به ۲۷/۴ مگاپاسکال (۱۸٪ کاهش) در درجه اسیدی ۱ رسیده است و در مخلوط ماسه- بنتونیت از ۲۶/۱۷ به ۱۶/۴۶ مگاپاسکال (۳۷٪ کاهش) رسیده است.

انقباضی اولیه خاک افزایش یابد. کرنش نظیر نقطه انتقال فاز در مخلوط ماسه- بنتونیت بیشتر از ماسه تمیز است. همچنین با افزایش تنش همه‌جانبه، کرنش نظیر نقطه انتقال فاز، افزایش یافته است.



شکل ۱۴- کرنش محوری در لحظه انتقال فاز در برابر درجه اسیدی

۴- نتیجه‌گیری

برای بررسی تأثیر آلاینده اسیدی بر رفتار و مقاومت برشی خاک ماسه تمیز و مخلوط ماسه- بنتونیت در حالت متراکم، ۱۸ آزمایش سه محوری تحکیم یافته- زهکشی نشده انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که:

- ۱- الگوی رفتار برشی خاک در محدوده درجه اسیدی ۷ تا ۳ چندان تغییر نمی‌کند، ولی درجه اسیدی ۱ منجر به تغییر رفتار سخت‌شونده تنش- کرنش به نوع نرم‌شوندگی کرنش می‌شود. این وضعیت در ماسه تمیز شدیدتر است.
- ۲- اثر آلاینده اسیدی بر روی الگوی تغییرات فشار آب حفره‌ای نیز در محدوده درجه اسیدی ۷ تا ۳ چندان بارز نیست، ولی در درجه اسیدی ۱، روند و مقدار تغییرات فشار آب حفره‌ای چه در بخش مثبت و چه منفی، شدیدتر می‌گردد. در اکثر

References

- [1] Umeha TS, Dinesh SV, Sivapulliah PV. Lime to improve the unconfined compressive strength of acid contaminated soil. *International Journal of Geology*. 2013; 7: 49-57.
- [2] Lu H, Wei F, Tang J, Giesy JP. Leaching of metals from cement under simulated environmental conditions. *Journal of environmental management*. 2016 Mar 15; 169: 319-327. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.12.008
- [3] Winkler EM. *Stone in Architecture*. Third Edition, Springer-Verlag, Printed in Germany, 1994.
- [4] Bell FG. *Engineering geology and construction*. CRC Press; 2004 Feb 3. doi: 10.1201/9781482264661

- [5] Zappia G, Sabbioni C, Riontino C, Gobbi G, Favoni O. Exposure tests of building materials in urban atmosphere. *Science of the total environment*. 1998 Dec 11; 224(1-3): 235-244. doi:10.1016/S0048-9697(98)00359-3
- [6] Benson CH, Zhai H, Wang X. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of geotechnical engineering*. 1994 Feb; 120(2): 366-387. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:2(366)
- [7] Goldberg S, Forster HS, Lesch SM, Heick EL. Influence of anion competition on boron adsorption by clays and soils. *Soil Science*. 1996 Feb 1; 161(2): 99-103.
- [8] Mitchell JK. Chemical effects on clay hydraulic conductivity. *Geotechnical practice for waste disposal'87*. 1987: 87-116.
- [9] Santamarina JC, Klein KA, Palomino A, Guimaraes MS. Micro-scale aspects of chemical-mechanical coupling: Interparticle forces and fabric. In *Chemo-mechanical coupling in clays: from nano-scale to engineering applications 2018* May 8; 47-58.
- [10] Gajo A, Maines M. Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on a natural active clay. *Géotechnique*. 2007 Oct; 57(8): 687-699. doi:10.1680/geot.2007.57.8.687
- [11] Gratchev IB, Sassa K. Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2009 Feb; 135(2): 271-279. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:2(271)
- [12] Wang YH, Siu WK. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characterizations. *Canadian Geotechnical Journal*. 2006 Jun 1; 43(6): 587-600. doi: 10.1139/t06-026
- [13] Mahdavi A. Effect of pH changes on some mechanical parameters of clay. M.Sc thesis, Islamic Azad University of Arak, Iran; 1997. [In Persian]
- [14] Madsen FT. Chemical effects on clay hydraulic conductivity and their determination. *Environmental Institute for Waste Management Studies, the University of Alabama*; 1987.
- [15] Kashir M, Yanful EK. Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage. *Canadian Geotechnical Journal*. 2001 Oct 1; 38(5): 1034-1048. doi: 10.1139/t01-027
- [16] Di Maio C. Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects. *Géotechnique*. 1996 Dec; 46(4): 695-707. doi: 10.1680/geot.1998.48.3.433
- [17] Sridharan A, Rao SM, Murthy NS. Liquid limit of montmorillonite soils. *Geotechnical Testing Journal*. 1986 Sep 1; 9(3): 156-159. doi: 10.1520/GTJ10623J
- [18] Gates WP, Bouazza A. Bentonite transformations in strongly alkaline solutions. *Geotextiles and Geomembranes*. 2010 Apr 1; 28(2): 219-225. doi:10.1016/j.geotexmem.2009.10.010
- [19] Liu Y, Gates WP, Bouazza A. Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay liners. *Geotextiles and Geomembranes*. 2013 Feb 1; 36: 71-80. doi: 10.1016/j.geotexmem.2012.10.011
- [20] Sunil BM, Nayak S, Shrihari S. Effect of pH on the geotechnical properties of laterite. *Engineering geology*. 2006 May 26; 85(1-2): 197-203. doi: 1016/j.enggeo.2005.09.039
- [21] Gratchev IB, Sassa K. Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2009 Feb; 135(2): 271-279. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:2(271)
- [22] Spagnoli G, Rubinos D, Stanjek H, Fernández-Steeger T, Feinendegen M, Azzam R. Undrained shear strength of clays as modified by pH variations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2012 Feb; 71: 135-48. doi: 10.1007/s10064-011-0372-9
- [23] Gratchev I, Towhata I. Stress-strain characteristics of two natural soils subjected to long-term acidic contamination. *Soils and foundations*. 2013 Jun 1; 53(3): 469-76. doi: 10.1016/j.sandf.2013.04.008
- [24] Ahmadi MM, Hasanlourad M, Khatami M. An investigation of the effect of variations in the pH of leachate on the physical and mechanical properties of kaolinite clay soil in presence bentonite. *Experimental Research in Civil Engineering*. 2015 Mar 21; 2(3): 25-33. [In Persian]
- [25] Gratchev I, Towhata I. Compressibility of soils containing kaolinite in acidic environments. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2016 Mar; 20: 623-30. doi: 10.1007/s12205-015-0141-6
- [26] Momeni M, Bayat M, Ajalloeian R. Laboratory investigation on the effects of pH-induced changes on geotechnical characteristics of clay soil. *Geomechanics and Geoengineering*. 2022 Jan 2; 17(1): 188-196. doi: 10.1080/17486025.2020.1716084
- [27] Khodabandeh MA, Nokande S, Besharatinezhad A, Sadeghi B, Hosseini SM. The effect of acidic and alkaline chemical solutions on the behavior of collapsible soils. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2020 Jul 16; 64(3): 939-950. doi: 10.3311/PPci.15643
- [28] Kazemzadeh M, Zad A, Yazdi M, Chamani A. Stabilization of Lead and Zinc Contaminated Clay Soils with Metakaolin. *Civil Infrastructure Researches*. 2023 Feb 20; 8(2): 69-83. doi: 10.22091/cer.2022.7756.1349 [In Persian]
- [29] EPA PD. Land Application of Municipal Sludge, Municipal Environmental Research Laboratory. EPA-625/1-83-016, New York. 1983.

- [30] Van Olphen H. An introduction to clay colloid chemistry. Soil Science. 1964 Apr 1; 97(4): 290.
- [31] Mitchell JK, Soga K. Fundamentals of soil behavior. New York: John Wiley & Sons; 1993 May 25.
- [32] Anandarajah A, Zhao D. Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2000 Feb; 126(2): 148-156. **doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:2(148)**
- [33] Wang YH, Siu WK. Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. II. Effects of structure on mechanical properties. Canadian Geotechnical Journal. 2006 Jun 1; 43(6): 601-617. **doi: 10.1139/t06-027**
- [34] Rowe PW. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1962 Oct 9; 269(1339):500-527. **doi: 10.1098/rspa.1962.0193**
- [35] Hassanlourad M, Khatami MH, Ahmadi MM. Effects of sulphuric acid pollutant on the shear behaviour and strength of sandy soil and sand mixed with bentonite clay. International Journal of Geotechnical Engineering. 2017 Mar 15; 11(2): 114-119. **doi:10.1080/19386362.2016.1193662**