

## اثر آلاینده اسید سولفوریک بر مقاومت برشی و پارامترهای تحکیمی خاک رس

علیرضا ترابی، محمود حسنلوراد\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۶  
بازنگری: ۲۷ تیر ۱۳۹۶  
پذیرش: ۲۴ شهریور ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۱ مهر ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

خاک‌های رسی  
آلاینده اسیدی  
اسید سولفوریک  
پارامترهای تحکیمی  
مقاومت فشاری محصور نشده

**چکیده:** آلودگی محیط زیست از بزرگترین دغدغه‌های پیش‌روی بشر در عصر حاضر است. استفاده گسترده از محصولات شیمیایی و حجم زیاد پسماندهای تولید شده توسط انسان و رهاسازی آنها در محیط، موجب آلودگی بخش قابل ملاحظه‌ای از منابع خاک و آب‌های زیرزمینی شده است. یکی از انواع آلاینده‌ها، آلاینده‌های اسیدی است که از راه‌های مختلف مانند پساب کارخانه‌ها و صنایع و باران‌های اسیدی وارد چرخه طبیعت و خاک می‌شوند. این آلاینده‌ها در کنار تبعات زیست محیطی، از منظر ژئوتکنیکی نیز حائز اهمیت و نیازمند بررسی هرچه بیشتر می‌باشند. در این مطالعه به بررسی تاثیر آلاینده اسیدی بر مقاومت و پارامترهای تحکیمی نوعی خاک رس پرداخته شده است. برای این منظور با استفاده از اسید سولفوریک، تعدادی آزمایش تحکیم یک بعدی و آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده در pH های ۱، ۳، ۵، و همچنین آب شرب (pH=۷/۸) روی یک خاک رسی تهیه شده از شهرستان آبیگ استان قزوین انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حضور آلاینده اسیدی، با افزایش خاصیت اسیدی و کاهش pH، مقاومت برشی خاک رس کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش pH، ضرایب فشردگی و تورم در خاک رس تحت تاثیر آلاینده اسیدی افزایش می‌یابد. مقدار ضرایب تحکیم در حضور اسید سولفوریک نسبت به حالت بدون حضور آلاینده، بیشتر خواهد بود که نشان دهنده سرعت تحکیم بیشتر است.

### ۱- مقدمه

آلودگی خاک عبارت است از وجود، پخش یا آمیختن یک یا چند ماده خارجی به خاک به مقدار و مدتی که کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن را تغییر دهد، به طوری که برای انسان، سایر موجودات زنده و یا آثار و ابنیه زبان آور باشد. خاتمی در سال ۲۰۱۴، طبقه ورود مواد شیمیایی به خاک را به طور کلی به دو دسته تقسیم کرد:

الف) مواد شیمیایی که به طور مستقیم وارد خاک شده و به عنوان مواد زاید در خاک دفن می‌شوند. بیشترین آسیب وارده به ساختمان خاک نیز ناشی از این مواد است که باعث شده در کشورهای صنعتی پیشرفته که مقررات و ملاحظات زیست محیطی به درستی با شدت و جدیت بیشتری اعمال می‌شوند، چاه‌های مخصوصی در نقاط از پیش تعیین شده به دور از تماس و یا حتی مجاورت سفره‌های آب زیرزمینی حفر شده و از آن‌ها به عنوان محل‌های دفع استفاده شود. تولید شیرابه‌ها در این دسته قرار می‌گیرد چراکه ناشی از دفن مواد زاید در خاک است.

ب) مواد شیمیایی که به طور غیرمستقیم وارد خاک می‌شوند و در اثر واکنش‌های ناقص و یا کامل شیمیایی به صورت گاز در هوا معلق و پراکنده شده و در حضور بخار آب و کاتالیزور محیطی مناسب، باردیگر به صورت اسید یا باز وارد خاک می‌شوند. باران‌های اسیدی که حاوی اسید سولفوریک

هستند و SO<sub>2</sub> آن‌ها ناشی از تصفیه نفت خام است، در این دسته جای می‌گیرند و تاثیرات مخرب این پدیده در شاخه محیط زیست نیز از موضوعات مورد بحث همیشگی است [۱].

هوانگ و کلر<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۱، در مطالعات خود اعلام کردند، اسیدهای آلی رقیق می‌توانند کانی‌های رسی را در خود حل کنند. بسته به نوع کانی رسی و اسید، ترجیحا سیلیکا یا آلومینا حل خواهد شد. این امر می‌تواند مساله‌ای بلند مدت برای لایه‌های رسی باشد، اگرچه به نظر می‌رسد که تاکنون هیچ تحقیقی بر روی اثر بلندمدت اسیدهای آلی بر خاک صورت نگرفته است [۲].

سپریدهاران و ونکا تاپا<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۹، رفتار مقاومت برشی خاک‌های آلوده را بسیار پیچیده دانسته و به عوامل متعددی از قبیل نوع کانی رسی، درصد رطوبت، طبیعت سیال حفره‌ای، تاریخچه تنش، زهکشی در حین برش، مسیر تنش، نرخ بارگذاری، دما و بافت خاک نسبت داده‌اند. بنابراین بررسی اثر مستقیم سیال آلاینده بر مقاومت برشی خاک به طور مجزا مشکل می‌باشد [۳]. سانتامارینا و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۲، گوری<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۴، وانگ و سیو<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۶، گراچو و ساسا<sup>۶</sup> در سال ۲۰۰۹، از جمله پژوهشگرانی

- 1 Huang and Keller
- 2 Sridharan and Venkatappa
- 3 Santamarina et al.
- 4 Gori
- 5 Wang and Siu
- 6 Gratchev and Sassa

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hassanlou@eng.ikiu.ac.ir

مقاومت روانگرایی ترکیب ماسه-ایلیت و ماسه-بتنویت کاهش می‌یابد [۷].  
مادسن و میشل<sup>۹</sup> در سال ۱۹۸۷، روی رُس‌های طبیعی متراکم با محلول ۵٪ شامل مقادیر مساوی اسید هیدروکلریک، اسید سولفوریک و اسید نیتریک آزمایشاتی انجام دادند که ۳۰۰ روز به طول انجامید. پس از ۱۲۰ روز افزایشی در حدود ۵ برابر مقاومت هیدرولیکی در هدایت الکتریکی حاصل شد. با در نظر گرفتن این تحقیقات می‌توان گفت که اثر اسیدها در صورتی که ذرات خاک در برابر حرکت مقید نشده باشند مهم است و اسیدها می‌توانند باعث حل شدن خاک یا انقباض‌های شدید و ترک خوردگی شوند، البته در صورتی که زمان کافی برای این واکنش‌ها به آن‌ها داده شود [۱۴].  
سانیل و همکاران<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۰۶، خاک سواحل غربی هند تحت اثر آلایندگی اسید هیدروکلریک با pHهای ۷٫۵ و ۸ را مورد بررسی قرار دادند. اثر زمان بر پارامترهای مختلف خاک رس این منطقه بررسی گردید. نتایج آزمایش‌های تک‌محوری نشان داد که با گذشت زمان مقاومت فشاری محصور نشده خاک کاهش می‌یابد [۱۵]. طی مطالعه‌ای که توسط آمش و همکاران<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۱۱، روی اثر اسید سولفوریک بر تراکم و خواص مقاومتی سه نوع خاک انجام شد، اثر آلودگی اسید سولفوریک بر رفتار سه نوع خاک، پنبه سیاه، خاک سودها و خاک رس قرمز بررسی شده است. مقدار خاک رس از ۲ تا ۶۰ درصد و آلودگی اسیدی از صفر تا ۱۵ درصد متفاوت است. خاک‌ها با ۲/۵، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد اسید سولفوریک مخلوط شد. در قسمتی از این مطالعه به بررسی اثرات غلظت آلایندگی بر مقاومت فشاری محصور نشده پرداخته شده است. با افزایش غلظت اسید برای هر ۳ نوع خاک، مقاومت فشاری محصور نشده کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت خاک ناشی از آلودگی، به امکان شکست پیوندهای داخلی نسبت داده شده است [۱۶]. گراچو و توواتا<sup>۱۲</sup> در سال ۲۰۱۱، با انجام تحقیقات گسترده خود اعلام کردند که وجود ترکیبات اسیدی در منافذ خاک‌های طبیعی بر روی تراکم‌پذیری آن‌ها موثر است. کانی‌شناسی رس و ساختار خاک اثر قابل توجهی بر تراکم‌پذیری خاک رس در pH کم دارد. کانی‌شناسی رس، ساختمان خاک، از جمله سیمان‌تاسیون، و طول مدت آلودگی اسیدی از عوامل کلیدی برای تعیین میزان تغییرات در تراکم‌پذیری که در خاک رس و در طول شسته شدن (با اسید) رخ می‌دهد به نظر می‌رسد [۱۷]. در مطالعات حمیدی و جداری در سال ۲۰۱۱، با ازدیاد درصد آلودگی خاک، افزایش اندک ضریب فشردگی مشاهده شد. این موضوع بیانگر افزایش تراکم‌پذیری خاک آلوده با توجه به لغزندگی سطوح و سهولت امکان حرکت دانه‌ها در خلل و فرج مابین آن‌ها می‌باشد. با ازدیاد تراکم نسبی نمونه، ضرایب فشردگی و به عبارتی تحکیم‌پذیری خاک کاهش یافته است. تاثیر آلودگی بر ویژگی‌های تحکیمی خاک رسی در تراکم‌های نسبی پایین کم است؛ گرچه آلودگی خاک در تراکم نسبی بالا می‌تواند به عاملی تاثیرگذار تبدیل شود [۱۸]. نوعی خاک

هستند که اثرات میزان pH سیال منفذی را بر خواص فیزیکی-شیمیایی و همچنین رفتار مکانیکی خاک‌های رسی مطالعات کاربردی مطالعه نموده‌اند [۷-۴]. اکثر این پژوهشگران به تاثیر مخرب تغییر pH بر رفتار ژئوتکنیکی رُس اذعان داشته‌اند و مطالعات تکمیلی گاجو و ماینز<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۷، نیز بر نتایج کار این محققین صحت گذاشته است [۸]. کاشیر و یانفول<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۱، با مطالعه خاک رس مخلوط شده با محلول‌های اسیدی و بازی نتایجی مشابه با پژوهش رول و دنیل<sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۷، به دست آوردند. به عبارتی دیگر، افزایش هدایت هیدرولیکی خاک‌های رسی تحت اثر آلایندگی اسیدی و بازی ناشی از افزایش ضخامت لایه دوگانه پیرامون ذرات تشکیل دهنده کانی‌های رسی می‌باشد [۹ و ۱۰]. دیلارد و کاپلمن<sup>۴</sup> در سال ۱۹۸۲، در مطالعات خود به بررسی رفتار آب سطحی در رس‌ها و همچنین مطالعه لایه دوگانه آب پرداختند. نتایج حاکی از آن است که تغییرات pH بر آب سطحی و ضخامت لایه دوگانه تاثیر قابل توجهی دارد و تحقیق در این رابطه در درک رفتار خاک به دلیل تغییر pH بسیار مهم می‌باشد [۱۱]. وانگ<sup>۵</sup> و سیو در سال ۲۰۰۶، در مطالعات خود مشاهده کردند در مقادیر بالای pH، تراکم‌پذیری خاک رسی کائولینیت ناشی از انباشتگی ذرات آن افزایش می‌یابد [۶]. گوری در سال ۱۹۹۴، اعلام کرد که حد روانی کائولینیت به مقدار pH آب حفره‌ای خاک بستگی ندارد چرا که حد روانی در این رس‌ها ارتباطی با لایه پخش دوگانه ندارد [۵]. گوری<sup>۶</sup> در سال ۱۹۹۴، براساس مطالعات سیریدهاران و همکاران<sup>۷</sup> در سال ۱۹۸۶، اعلام کردند که حد روانی اسمکتیک به شدت به مقدار pH آب حفره‌ای وابسته است که بعدها گاجو و ماینز در سال ۲۰۰۷، نیز این نتیجه را تایید کردند [۵، ۱۲ و ۸]. مهدوی در سال ۱۹۹۷، با بررسی تغییرات pH بر برخی از خواص مکانیکی خاک رس نشان داد که، کاهش pH از ۷ به ۳ در خاک رس، ذرات آن را به کلوخه تبدیل کرده و نفوذپذیری خاک را تا ۸۷٪ افزایش می‌دهد. در همان خاک افزایش pH از ۷ به ۱۱ نفوذپذیری را تا ۴۷٪ افزایش داد. همچنین تغییرات pH منجر به افزایش حدود روانی و خمیری شده است [۱۳]. گراچو و ساسا<sup>۸</sup> در سال ۲۰۰۹، اثرات تغییر pH بر روانگرایی خاک‌های ریزدانه با انجام آزمایش سه محوری پیچشی سیکلیک با استفاده از ترکیب ماسه با سه نوع رس شامل کائولن، ایلیت و بتنویت را بررسی کردند. این محققین از اسید سولفوریک و سدیم هیدروکسید برای تغییر pH استفاده کردند. نتایج نشان داد که اثر pH بر روانگرایی به نوع کانی تشکیل دهنده خاک‌های ریزدانه بستگی دارد. برای مثال در شرایط اسیدی متوسط ترکیب ماسه-کائولن کمی افزایش مقاومت در برابر روانگرایی پیدا می‌کند، حال آنکه

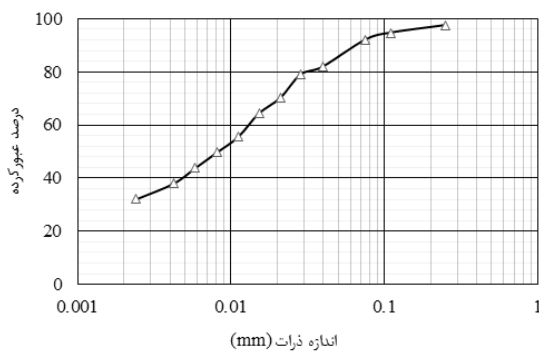
- 1 Gajo and Maines
- 2 Kashir, M. and Yanful
- 3 Ruhl and Daniel
- 4 Dillard and Koppelman
- 5 Wang
- 6 Gori
- 7 Sridharan et al.
- 8 Gratchev and Sassa

- 9 Madsen and Mitchell
- 10 Sunil et al.
- 11 Umesh et al.
- 12 Gratchev and Towhata

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- خاک مورد استفاده

رس مورد استفاده در این مطالعه، از منطقه آبیگ استان قزوین تهیه شده است که بر اساس طبقه بندی خاک‌ها به روش متحد، در ردیف خاک‌های رسی با پلاستیسیته پایین (CL) قرار می‌گیرد. آزمایش‌های هیدرومتری، تعیین چگالی ویژه، تراکم استاندارد و حدود اتربرگ بر روی این خاک انجام شد. منحنی دانه‌بندی خاک در شکل ۱ نشان داده شده و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است در آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری و آزمایش تحکیم، خاک رس عبوری از الک نمره ۴۰ استفاده شده است.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی خاک رس استفاده شده

Fig. 1. Particle size distribution of the used soil

### جدول ۱: خصوصیات فیزیکی خاک رس استفاده شده

Table. 1. Physical properties of the used soil

مقدار	خصوصیات
۳۶	حد روانی (LL)
۲۲	حد خمیری (PL)
۱۴	شاخص خمیری (PI)
۲/۷۷	چگالی ویژه (Gs)
۱۷/۵ (kN/m <sup>3</sup> )	وزن مخصوص خشک حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ )
۱۷/۲۵ (%)	رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ )

رُس با پلاستیسیته بالا (CH) جهت بررسی تاثیر آلاینده‌های اسیدی و بازی روی خواص ژئوتکنیکی خاک‌های رسی توسط پراکاش و آرومیراج<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۳، مورد مطالعه قرار گرفت. از اسید هیدروکلریک، اسید نیتریک و اسید سولفوریک به عنوان آلاینده‌های اسیدی و هیدروکسید سدیم، هیدروکسید پتاسیم و هیدروکسید کلسیم به عنوان آلاینده‌های بازی در این مطالعه استفاده شده است. فارغ از نوع آلاینده، با افزایش غلظت اسید مقاومت خاک کاهش چشم‌گیری داشته است، در حالی که، در هر آلاینده بازی، افزایش غلظت باعث افزایش مقاومت خاک شده است [۱۹]. در پژوهشی که استبرق و همکاران در سال ۲۰۱۴، روی ضریب فشردگی دو نوع خاک با پلاستیسیته بالا (CH) و پلاستیسیته پایین (CL) تحت اثر اتانول انجام دادند، این ضریب با افزایش غلظت افزایش یافته‌است. هر چند که این تغییرات در مورد نمونه‌های تحت اثر گلیسیرول چندان محسوس نبود. به طور کلی تغییرات ضریب فشردگی وابسته به نوع خاک و ماده شیمیایی محلول در آب منفذی آن اعلام شد [۲۰]. احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۵، اثر تغییرات درجه pH شربابه بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک رس کائولینیت در حضور بنتونیت را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد وجود هر دو ماده اسیدی (اسید استیک) و بازی (هیدروکسید سدیم)، منجر به کاهش پارامترهای مقاومت برشی می‌شود. همچنین اسیدی یا بازی شدن خاک بر روی خصوصیات تحکیمی نیز موثر 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 [۲۱].

گراچو و توواتا<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۶، در مطالعه‌ای تحکیم‌پذیری خاک‌های حاوی کائولینیت در محیط‌های اسیدی، سه نوع خاک رس و سیلت طبیعی حاوی کائولینیت تحت اثر اسید سولفوریک را در زمان‌های مختلف بررسی کردند. بعد از انجام آزمایش‌های تحکیم مشخص شد که ساختمان خاک در pH پایین، تاثیر چشمگیری بر روی خاصیت فشردگی خاک دارد. برای هر سه نوع خاک، نمونه‌های دست نخورده و دست خورده با کاهش مقدار pH، ضریب فشردگی بیشتری را از خود نشان دادند. تغییرات ضرایب و نتایج نمونه‌های دست نخورده بیشتر بود اما نتایج آزمایش با نمونه‌های دست خورده و دست نخورده کاملاً همسو بود [۲۲].

دامنه گسترده استفاده از اسید سولفوریک در صنایع و وجود این اسید در چرخه‌های طبیعی زیست محیطی، آن را در طبقه اسیدهای متداول و پر اهمیت جهت بررسی خواص و تاثیر آن بر محیط پیرامونی قرار می‌دهد. در این پژوهش به بررسی تاثیر آلاینده اسیدی بر مقاومت و پارامترهای تحکیمی در خاک ریزدانه پرداخته شده‌است. برای این منظور با استفاده از اسید سولفوریک، تعدادی آزمایش تحکیم یک بعدی و آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده در pH های ۱، ۳، ۵ و همچنین آب شرب (pH = ۷/۸) روی یک خاک رسی تهیه شده از شهرستان آبیگ استان قزوین انجام شده‌است.

1 Prakash and Arumairaj

2 Gratchev and Towhata

نگهداری شدند. مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز می‌باشد و در مجموع ۱۶ آزمایش انجام گرفت. به طور کلی مراحل انجام این آزمایش مطابق استاندارد ASTM 2166 صورت گرفته‌است.

### ۲-۳- آزمایش تحکیم یک بعدی

آزمایش تحکیم برای تعیین سرعت و مقدار فشرده‌گی خاک به کار می‌رود. در این آزمایش، در اثر بارگذاری محوری از تغییر شکل افقی خاک جلوگیری به عمل آمده و زهکشی نیز در جهت قائم انجام می‌شود. مقدار تراکم‌پذیری خاک که با این آزمایش مشخص می‌شود، از مهمترین خواصی است که از طریق تجربه‌های آزمایشگاهی حاصل می‌شود. اطلاعات به دست آمده از آزمایش تحکیم خاک می‌تواند در تخمین سرعت و مقدار نشست غیریکنواخت و نشست کل یک سازه یا توده خاک و همچنین انتخاب نوع پی مورد استفاده قرارگیرد.

برای تمام آزمایش‌ها شرایط مشابه در نظر گرفته شد. نمونه‌های تحکیم در ۳ لایه کوبیده شدند و همانند نمونه‌های تک محوری تراکم لایه‌ها کنترل گردید. تراکم نمونه‌ها در این آزمایش برابر ۹۵٪ بوده است. نمونه‌های تحکیم دارای ۷/۴ سانتیمتر قطر و ۲ سانتیمتر ارتفاع بودند. بعد از آماده شدن مجموعه دستگاه، به نمونه‌ها ۷۲ ساعت فرصت داده شد تا اشباع شوند، از مزایای این زمان اضافه، عمل‌آوری بیشتر نمونه‌ها در مجاورت محیط کاملاً اسیدی به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر اسید و محیط اسیدی بر نمونه‌ها و خواص آن‌ها در پایان آزمایش است. این آزمایش روی خاک رُس آلوده به اسیدسولفوریک با مقادیر pH برابر ۵، ۳ و ۱ و همچنین در حضور آب شرب (pH=۷/۸) انجام شد. در مجموع ۴ آزمایش تحکیم یک بعدی انجام شد. مراحل انجام این آزمایش مطابق استاندارد ASTM 2435 صورت گرفته‌است. بارگذاری در ۵ مرحله و به ترتیب با مقادیر سربار ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال اعمال شد. مدت زمان هر مرحله بارگذاری و ثبت نتایج نشست خاک تا ۲۴ ساعت ادامه یافت. در پایان روز ۵ فرآیند باربرداری در دو مرحله و با کاهش بار به ۰/۲۵ مرتبه قبل (۲۵ و ۱۰۰ کیلوپاسکال) انجام شد.

### ۴- نتایج آزمایش تکمحوری

#### ۴-۱- مقاومت تکمحوری

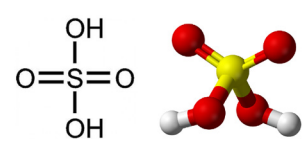
نمونه نمودار تنش- کرنش خاک رُس در معرض اثر اسید سولفوریک در pH=۱ در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش زمان عمل‌آوری و مدت زمان تماس خاک و اسید، نمودارها به سمت پایین حرکت کرده‌اند، به عبارت دیگر مقاومت و سختی نمونه‌ها کاهش یافته است. برای نمونه نحوه محاسبه مدول سکانتی در زمان عمل‌آوری ۱۴ روز در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار بیشینه تنش در این نمونه برابر با ۳۰۶/۴۶۳ kPa بوده است. برای محاسبه  $E_{50}$  مقدار ۰/۵ برابر تنش حداکثر برابر با kPa

### ۲-۲- آلاینده مورد استفاده

آلاینده اسید سولفوریک با مشخصات طبق جدول ۲ در این پژوهش استفاده شده‌است. محلول‌های اسیدی با pH های ۱، ۳ و ۵ از این آلاینده تهیه شد.

### جدول ۲: مشخصات آلاینده مورد استفاده

Table. 2. Physical properties of the used contaminate

نام شیمیایی	اسید سولفوریک (خلوص ۹۸٪)
خانواده شیمیایی	اسید غیرآلی، اسید معدنی
فرمول شیمیایی	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
آرایش مولکولی	
وزن مولکولی	۹۸/۰۷۹ g/mol

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت تکمحوری

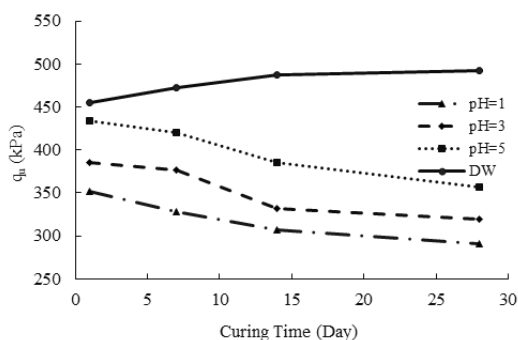
در همه مسائل مربوط به پایداری خاک از قبیل طراحی پی‌ها، دیوارهای حائل و خاکریزها، سدسازی، حفاری تونل و مترو و دیگر موارد، داشتن اطلاعات کافی راجع به مقاومت خاک ضروری است. اندازه‌گیری و تعیین مقاومت خاک‌های چسبیده اهمیت و کاربرد زیادی در مباحث مکانیک خاک دارد چراکه مقاومت برشی عمده ترین عامل تعیین رفتار خاک‌ها است.

آزمایش فشاری تکمحوری را می‌توان مشابه آزمایش سه محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU) با فشار همه جانبه صفر نامید. این آزمایش مانند بقیه آزمایش‌هایی که برای تعیین مقاومت برشی به کار می‌رود، به دو روش کنترل کرنش و کنترل تنش انجام می‌گردد. در این مطالعه از روش کرنش کنترل شده استفاده شده است. نمونه‌های به کار رفته در این آزمایش دارای قطری برابر ۳/۹ و ارتفاعی برابر ۷/۸ سانتی‌متر بودند. این آزمایش بر روی خاک رُس آلوده به اسیدسولفوریک با مقادیر pH برابر با ۳، ۵ و ۱ و همچنین در حضور آب شرب (pH=۷/۸) انجام شد. تراکم نمونه‌ها در این آزمایش برابر ۹۵٪ انتخاب شد. کلیه نمونه‌ها در ۴ لایه کوبیده شدند ضخامت لایه‌ها با استفاده از ریزسنج چک شد تا تراکم یکسان در فرآیند ساخت نمونه‌ها حفظ شود و در داخل کیسه زیپ دار بعد از تخلیه کامل هوای نمونه‌ها بسته‌بندی چندلایه شده و تا روز آزمایش در محیط آزمایشگاهی

**جدول ۳: مقاومت تک محوری خاک رُس بر حسب kPa تحت اثر آلاینده اسید سولفوریک**

Table. 3. Unconfined compressive strength (kPa) of contaminated samples

زمان عمل آوری	pH			
	۱	۳	۵	۷/۸ (آب شرب)
۱ روز	۳۵۲/۳	۳۸۵/۱	۴۳۳/۹	۴۵۵/۵
۷ روز	۳۲۸/۶	۳۷۶/۴	۴۱۹/۵	۴۷۲/۸
۱۴ روز	۳۰۶/۵	۳۳۱/۵	۳۸۵/۱	۴۸۷/۲
۲۸ روز	۲۹۱/۲	۳۱۸/۹	۳۵۶/۳	۴۹۱/۷

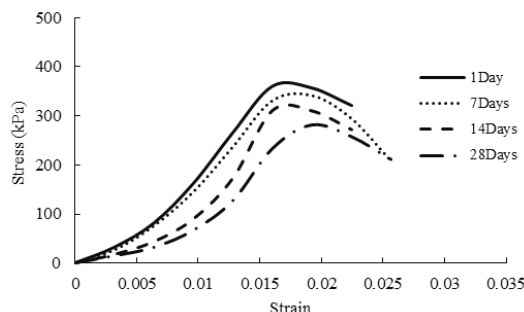


شکل ۴: مقاومت خاک رُس در حضور آلاینده اسید سولفوریک در زمان های متفاوت عمل آوری

Fig. 4. Unconfined compressive strength versus curing time

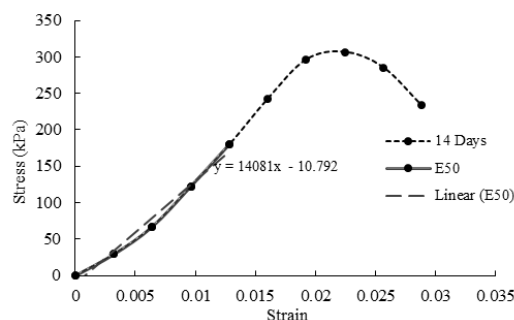
به طور کلی از مقایسه مقادیر مقاومت تک محوری خاک در pH ها و مدت زمان های عمل آوری مختلف می توان گفت، در حضور آلاینده اسید سولفوریک در زمان های عمل آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در بیشترین خاصیت اسیدی آلاینده (pH=۱)، که در واقع بحرانی ترین حالت می باشد، به ترتیب ۲۲/۶، ۳۰/۵، ۳۷/۱ و ۴۰/۸ درصد کاهش مقاومت نسبت به مقادیر نظیر آن ها در حضور آب شرب مشاهده شده است. از سوی دیگر با مقایسه جداگانه اثر هر pH آلاینده در زمان های مختلف، در pH های ۵، ۳ و ۱ به ترتیب ۱۷/۸۸، ۱۷/۲ و ۱۷/۳ درصد کاهش مقاومت از روز ۱ تا روز ۲۸ عمل آوری حاصل شده است. درحالی که در حضور آب شرب با این افزایش زمان عمل آوری، در نهایت ۸ درصد افزایش مقاومت در روز ۲۸ دیده شد.

۱۵۳/۲۳ می باشد. شیب نمودار رفتاری<sup>۱</sup> محاسبه شده و از تقسیم ۱۵۳/۲۳ بر کرنش نظیر حاصل از نمودار رفتاری نشان داده در شکل ۰/۱۱۸ مقدار  $E_{50}$  برابر با ۱۲/۹۸ MPa به دست می آید.



شکل ۲: نمودار تنش - کرنش نمونه های اسیدی با pH=1

Fig. 2. Contaminated samples stress-strain diagrams at pH=1



شکل ۳: محاسبه مدول سکانت ۵۰٪

Fig. 3. 50 % secant modulus calculation

مقادیر مقاومت تک محوری در هر دوره عمل آوری و pH مشخص آلاینده در جدول ۳ و نمودار شکل ۴ آورده شده است. مشاهده می شود که مقادیر مقاومت با افزایش زمان عمل آوری و کاهش pH آلاینده، نسبت به حالت استفاده از آب شرب، روند نزولی را طی می کند. با کاهش بیشتر pH این افت مقاومت محسوس تر است. در نمونه های رُس تمیز با افزایش زمان عمل آوری بر خلاف نمونه های آلوده افزایش مقاومت مشاهده می شود. افزایش مقاومت نمونه های تمیز با گذشت زمان را می توان ناشی از تیکسوتروپی خاک دانست.

1 Trend line

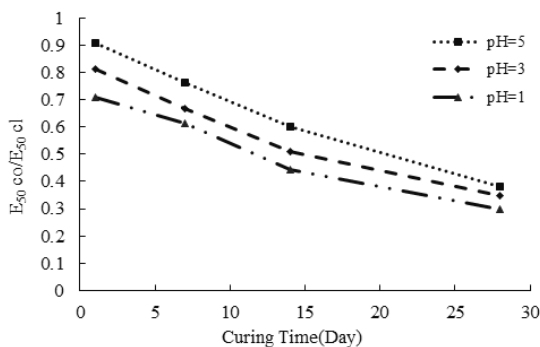
**جدول ۴: مدول سکانت ( $E_{50}$ ) بر حسب MPa برای خاک رس تحت اثر آلاینده اسید سولفوریک**

Table. 4. Secant modulus of the contaminated samples

زمان عمل آوری	pH			
	۱	۳	۵	(آب شرب) ۷/۸
۱ روز	۱۷/۲۷	۱۹/۸۵	۲۲/۱۴	۲۴/۴۱
۷ روز	۱۶/۱۱	۱۷/۵۱	۱۹/۹۸	۲۶/۲۳
۱۴ روز	۱۲/۹۸	۱۴/۹۳	۱۷/۶۶	۲۹/۳۵
۲۸ روز	۱۱/۶۵	۱۳/۵۷	۱۴/۸۵	۳۹/۰۲

در زمان‌های عمل آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در pH برابر با ۱، به ترتیب ۲۹/۳، ۳۸/۶، ۵۵/۸ و ۷۰/۱۴ درصد کاهش  $E_{50}$  نسبت به مقادیر نظیر آن‌ها در حضور آب شرب مشاهده شده است.

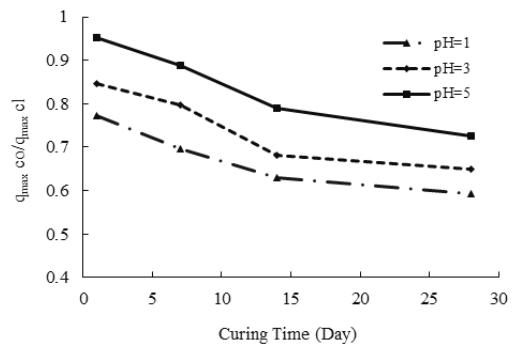
با مقایسه جداگانه اثر آلاینده در هر pH، در pH های ۱، ۳ و ۵ به ترتیب شاهد ۳۲/۹، ۳۱/۶ و ۳۲/۵ درصد کاهش  $E_{50}$  تا روز ۲۸ در حضور آب شرب ۵۹/۸ درصد افزایش  $E_{50}$  تا روز ۲۸ مشاهده می‌شود. شکل ۷ مقادیر نرمالیزه شده مدول سکانت خاک در pH های مختلف آلاینده را نسبت به حالت عدم حضور آلاینده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مدول سکانت تمام نمونه‌های آلوده از نمونه‌های غیرآلوده کمتر است. با افزایش زمان تماس و نفوذ بیشتر اسید در ساختار و بافت خاک افت مدول سکانت بیشتر شده است. به طور کلی با افزایش خاصیت اسیدی (کاهش pH) افت مقادیر شدیدتر شده اما میزان این افت در pH برابر با ۱ بیشتر محسوس است.



**شکل ۷: مدول سکانت نرمالیزه شده خاک رس در حضور آلاینده اسید سولفوریک**

Fig. 7. Normalized secant modulus of the contaminated samples

شکل ۵ مقادیر نرمالیزه شده مقاومت خاک در pH های مختلف آلاینده را نسبت به حالت عدم حضور آلاینده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقاومت تمام نمونه‌های آلوده از نمونه‌های غیرآلوده کمتر است. با افزایش زمان تماس و نفوذ بیشتر اسید در ساختار و بافت خاک افت مقاومت بیشتر شده است. به طور کلی با افزایش خاصیت اسیدی (کاهش pH) افت مقاومت شدیدتر شده اما میزان این افت در pH برابر با ۱ بیشتر محسوس است.

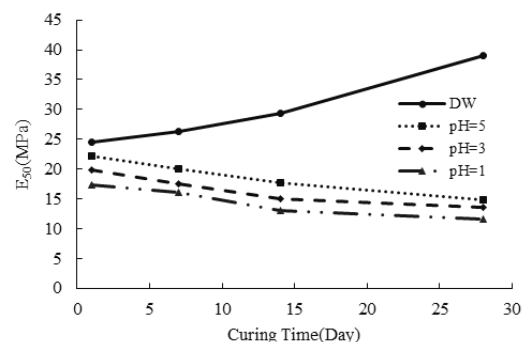


**شکل ۵: مقاومت نرمالیزه شده خاک رس در حضور آلاینده اسید سولفوریک**

Fig. 5. Normalized unconfined compressive strength of the contaminated samples versus curing time

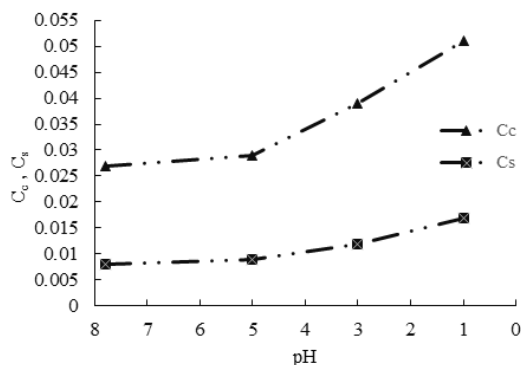
#### ۴-۲- مدول سکانت ( $E_{50}$ )

از دیگر مقایسه‌های رایج، بدست آوردن مقادیر مدول سکانت ( $E_{50}$ ) می‌باشد. بدین منظور مقادیر ( $E_{50}$ ) محاسبه شده از نمودارهای تنش-کرنش در جدول ۴ آورده شده است. شکل ۶ مقادیر مدول سکانت در برابر تغییرات pH و زمان عمل آوری متفاوت را نشان می‌دهد.



**شکل ۶: مقادیر مدول سکانت خاک رس در حضور آلاینده اسید سولفوریک در زمان‌های متفاوت عمل آوری**

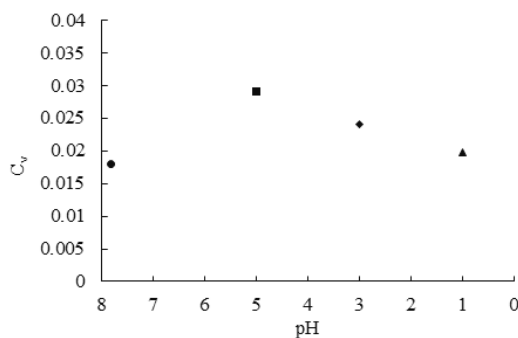
Fig. 6. Influence of pH and curing time on the secant modulus of soil



شکل ۹: تغییرات ضرایب فشردگی و تورم در مجاورت pH های مختلف آلاینده اسید سولفوریک

Fig. 9. Compressibility and swelling coefficients of the contaminated samples versus pH parameter

در نهایت از مقایسه ضرایب تحکیم ( $C_v$ ) در مجاورت و عدم حضور آلاینده شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که، در حضور آلاینده اسید سولفوریک با وجود افزایش این ضریب در غلظت‌های پایین‌تر آلاینده در  $pH = 1$  شاهد کاهش مجدد ضریب هستیم، اما با وجود این کاهش، کماکان نسبت به حالت حضور آب شرب افزایش ۹/۵ درصدی نشان می‌دهد. به طور کلی نتایج کلیه آزمایش‌های تحکیم در جدول ۵ آورده شده‌است.



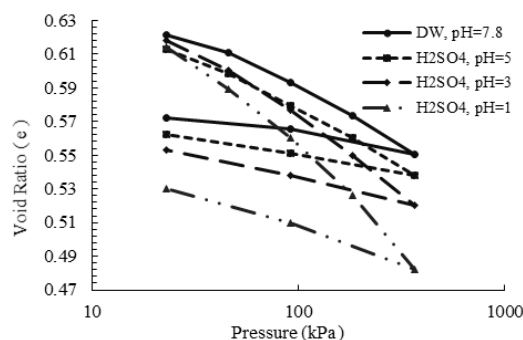
شکل ۱۰: تغییرات ضرایب تحکیم خاک رُس آبیگ بر حسب تغییرات pH آلاینده اسید سولفوریک

Fig. 10. Consolidation coefficient of the studied soil versus pH parameter

## ۵- نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی

شکل ۸ نمودار تغییرات نسبت تخلخل در برابر فشار را نشان می‌دهد. مطابق این شکل با افزایش خاصیت اسیدی و کاهش pH، مقدار نسبت تخلخل خاک کاهش می‌یابد. می‌توان گفت حضور و افزایش pH آلاینده نیروهای بین ذره‌های دانه‌های رس و ساختمان خاک را تغییر داده‌است. همچنین آهنگ کاهش نسبت تخلخل با افزایش خاصیت اسیدی افزایش یافته‌است.

ضرایب فشردگی و تورم به ترتیب شیب قسمت باربرداری و بارگذاری نمودار  $e - \log p$  خاک می‌باشند. برای محاسبه این ضرایب در نمودارهای شکل ۸ قسمت بارگذاری و باربرداری جداگانه بررسی می‌شود. شیب نمودار رفتاری این دو نمودار معرف ضرایب فشردگی ( $C_c$ ) در بارگذاری، و ضریب تورم ( $C_s$ ) در باربرداری است. مقدار محاسبه شده این ضرایب تحت اثر اسید سولفوریک و آب شرب در جدول ۵ آورده شده‌است.



شکل ۸: نمودار  $e - \log p$  تحت اثر آب شرب و اسید سولفوریک

Fig. 8.  $e - \log p$  diagrams of the clean and contaminated samples

با کاهش میزان pH، از محدوده آب شرب ( $pH = 7/8$ ) تا اسیدی‌ترین غلظت آلاینده ( $pH = 1$ )، افزایش شیب در هر دو قسمت بارگذاری و باربرداری و به تبع آن افزایش ضرایب فشردگی و تورم مشاهده می‌شود. این اثر مخرب می‌تواند ناشی از انحلال بخشی از کانی‌های رُسی و احتمالاً تغییر در انتشار نیروهای دافعه در لایه دوگانه باشند.

بعد از مقایسه ضرایب فشردگی در حالت حضور آب شرب و مجاورت اسید می‌توان گفت، در مجاورت آلاینده اسید سولفوریک مقدار  $C_c$  در بیشترین خاصیت اسیدی آلاینده ( $pH = 1$ ) نسبت به حالت عدم حضور آلاینده ۰/۹ برابر افزایش یافته‌است. میزان افزایش ضریب تورم ( $C_s$ ) در این pH از اسید سولفوریک، نسبت به محیط بدون آلاینده در حدود ۱/۲ برابر مشاهده شده‌است.

جهت مشاهده بهتر اثر تغییرات pH آلاینده اسید سولفوریک بر ضرایب فشردگی ( $C_c$ ) و تورم ( $C_s$ )، شکل ۹ مقادیر این ضرایب را در مجاورت آب شرب ( $pH = 7/8$ ) و pH های متفاوت آلاینده نشان می‌دهد. با افزایش خاصیت اسیدی افزایش ضرایب فشردگی و تورم کاملاً مشهود است.

جدول ۵: پارامترهای تحکیم بدست آمده از آزمایش‌های خاک رُس آبیک

Table. 5. Abyek clay soil consolidation parameters contaminated with sulfuric acid

ضریب تورم ( $C_s$ )			ضریب فشردگی ( $C_c$ )			ضریب تحکیم ( $C_v$ (cm <sup>2</sup> /min))			پارامترهای تحکیم
۱	۳	۵	۱	۳	۵	۱	۳	۵	pH
۰/۰۱۷	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	۰/۰۵۱	۰/۰۳۹	۰/۰۲۹	۰/۰۱۹	۰/۰۲۴	۰/۰۲۹	اسید سولفوریک
	۰/۰۰۸			۰/۰۲۷			۰/۰۱۸		آب شرب

۶- بحث و بررسی نتایج

براساس نتایج آزمایش‌های تک‌محوری ملاحظه می‌گردد که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری و همچنین خاصیت اسیدی آلاینده (کاهش pH) در تمامی آزمایش‌ها، مقادیر مقاومت خاک کاهش می‌یابد. مقادیر مقاومت در حالت استفاده از آب شرب با افزایش زمان عمل‌آوری برخلاف حالت وجود آلاینده اسیدی به دلیل خاصیت تیکسوتروپی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش pH و افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت محصور نشده روند نزولی را از خود نشان می‌دهد به طوری که در (pH=۵)، در مجاورت آلاینده، بیشترین مقدار و در اسیدی‌ترین حالت (pH=۱) کمترین مقدار مقاومت مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در مجاورت آلاینده اسید سولفوریک در زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در اسیدی‌ترین غلظت آلاینده (pH=۱)، به ترتیب ۲۲/۶، ۳۰/۵، ۳۷/۱ و ۴۰/۸ درصد کاهش مقاومت نسبت به مقادیر نظیر آن‌ها در حضور آب شرب مشاهده شد. از سوی دیگر با مقایسه جداگانه هر pH آلاینده در زمان‌های مختلف، در pH های ۵، ۳ و ۱ به ترتیب شاهد ۱۷/۸۸، ۱۷/۲ و ۱۷/۳ درصد کاهش مقاومت و در حضور آب شرب شاهد ۸ درصد افزایش آن تا روز ۲۸ عمل‌آوری خواهیم بود. برای مقادیر مدول سکانت ( $E_{50}$ ) برای آلاینده اسید سولفوریک، در زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، در بیشترین خاصیت اسیدی آلاینده (pH=۱)، به ترتیب ۲۹/۳، ۳۸/۶، ۵۵/۸ و ۷۰/۱۴ درصد کاهش نسبت به مقادیر نظیر آن‌ها در حضور آب شرب مشاهده شده است. با مقایسه جداگانه هر pH آلاینده، در pH های ۵، ۳ و ۱ به ترتیب شاهد ۳۲/۹، ۳۱/۶ و ۳۲/۵ درصد کاهش این مقادیر تا روز ۲۸ و در حضور آب شرب ۵۹/۸ درصد افزایش آن مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد وجود اسید در بین ذرات رُس منجر به تغییر ضخامت لایه دوگانه و انحلال بخشی از کانی‌های رُسی شده و تخریب ساختار رُس را در پی خواهد داشت.

با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده در این پژوهش و مطالعات محققین پیشین تشابهات زیادی در روند و نتایج

نهایی آزمایش‌ها مشاهده می‌شود. به‌طور مثال سانیل و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۶، آمش و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۱، پراکاش و آرومایراج<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۳، گزارشاتی همسو با نتایج و مشاهدات این پژوهش ارائه داده‌اند. در تمام مطالعات مذکور آلاینده‌های اسیدی با افزایش زمان عمل‌آوری و مجاورت بیشتر خاک با محیط اسیدی از یک طرف، و همچنان با افزایش خاصیت اسیدی محیط و کاهش pH اثر منفی بر روی مقاومت تک‌محوری خاک‌های ریزدانه داشته‌اند و اثر کاملاً مخرب آلاینده‌های اسیدی از قبیل اسید سولفوریک، اسید نیتریک، اسید فسفریک و دیگر موارد گزارش شده است.

نتایج آزمایش تحکیم یک بعدی نیز حکایت از این دارد که مقادیر ضریب فشردگی ( $C_c$ ) و ضریب تورم ( $C_s$ ) در حضور آب شرب دارای کمترین مقدار است. با افزایش خاصیت اسیدی خاک و کاهش pH در مجاورت آلاینده، مقدار این ضرایب افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد این تغییرات هم‌راستا با افت مقاومت رُس در حضور آلاینده اسیدی باشد. در مجاورت آلاینده اسید سولفوریک، مقدار افزایش ( $C_c$ ) در بیشترین خاصیت اسیدی آلاینده (pH=۱) نسبت به حالت عدم حضور آلاینده، ۰/۹ برابر مشاهده شد. میزان افزایش ضریب تورم ( $C_s$ ) برای آلاینده اسید سولفوریک در کمترین pH نسبت به محیط بدون آلاینده ۱/۲ برابر مشاهده شده است. از مقایسه ضرایب تحکیم ( $C_v$ ) در حضور و عدم حضور آلاینده اسید سولفوریک مشاهده می‌شود که، بعد از افزایش چشمگیر این ضریب در pH های ۵ و ۳ آلاینده اسیدی، در pH=۱ شاهد کاهش مجدد این ضریب هستیم، اما با وجود این کاهش، کماکان نسبت به حالت حضور آب شرب افزایش ۹/۵ درصدی نشان می‌دهد. به‌طور کلی می‌توان گفت محیط اسیدی در اثر تخریب ساختار خاک، سرعت تحکیم را افزایش و زمان تحکیم را کاهش داده است.

استبرق و همکاران در سال ۲۰۱۴ و پراکاش و آرومایراج در سال ۲۰۱۶ گزارشاتی مشابه با نتایج این پژوهش ارائه داده‌اند. افزایش ضرایب فشردگی

1 Sunil et al.

2 Umesh et al.

3 Prakash and Arumairaj



- [6] Y. H. Wang, and W. K. Siu, Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils I. Surface charges and structural characterizations, *Canadian Geotechnical Journal*, 43 (2006) 587–600.
- [7] I. B. Gratchev, and K. Sassa, Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 135 (2) (2009) 271–279.
- [8] A. Gajo, and M. Maines, Mechanical effects of aqueous solutions of inorganic acids and bases on a natural active clay, *Géotechnique*, 57 (8) (2007) 687–699.
- [9] M. Kashir, and E. Yanful, Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage, *Canadian Geotechnical Journal*, 38 (5) (2001) 1034–1048.
- [10] J. L. Ruhl, and D. E. Daniel, Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123 (4) (1997) 369–381.
- [11] J. G. Dillard, and M. H. Koppelman, X-Ray Photoelectron Spectroscopic (XPS) Surface Characterization of Cobalt on the Surface of Kaolinite, *Journal of Colloid and Interface Science*, 87.1 (1982) 46–55.
- [12] A. Sridharan, S. M. Rao, and N. S. Murthy, Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates, *Geotechnical Testing Journal*, 9 (3) (1986) 156–159.
- [13] A. Mahdavi, Effect of pH changes on some mechanical parameters of clay, M.Sc. Thesis. Islamic Azad University, 1997 (in Persian).
- [14] F. T. Madsen, and J. K. Mitchell, Chemical Effects on Clay Hydraulic Conductivity and Their Determination, Open file Report, Environmental Institute for Waste Management Studies, University of Alabama, Tuscaloosa (1987).
- [15] B. M. Sunil, S. Nayak, and S. Shrihari, Effect of pH on the Geotechnical Properties of Laterite, *Engineering Geology*, 85 (2006) 197–203.
- [16] T. S. Umesh, H. D. Sharma, S. V. Dinesh, P. V. Sivapullaiiah, and S. C. Basim, Physico-Chemical Changes in Soil due to Sulphuric Acid Contamination. Proceedings of Indian Geotechnical Conference, paper No.L-320, (2011).
- [17] I. Gratchev, and I. Towhata, Compressibility of Natural Soils Subjected to Long-Term Acidic Contamination, *Environmental Earth Sciences*, 64 (2011) 193–200.
- [18] A. Hamidi, and S. Jedari, Investigating the Consolidation Behavior of Contaminated Clay, *Sharif Civil Engineering Journal*, 29.2 (2011) 29–35 (in Persian).
- و تورم، تخریب بیشتر ساختمان خاک با افزایش خاصیت اسیدی و افزایش سرعت تحکیم و کاهش زمان تحکیم خاک رُس در مجاورت آلاینده‌های اسیدی از مهمترین این نتایج است.
- ### ۷- نتیجه‌گیری
- در این تحقیق اثر اسید سولفوریک بر روی خواص یک خاک رُسی به نام رُس آبیگ به کمک دو سری آزمایش تک محوری و تحکیم یک بعدی مطالعه شد. به طور کلی نتایج زیر ملاحظه گردید:
۱. با افزایش زمان عمل‌آوری و کاهش pH، مقاومت خاک اسیدی کاهش می‌یابد. در حالی که مقاومت نمونه‌های ساخته شده با آب شرب با زمان عمل‌آوری در اثر خاصیت تیکسوتروپی افزایش می‌یابد.
  ۲. با کاهش pH و افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت تک محوری نمونه‌های اسیدی احتمالاً در اثر انحلال بخشی از کانی‌های رُسی، تغییر ضخامت لایه دوگانه و تخریب ساختار خاک کاهش می‌یابد.
  ۳. مدول سکانت در نمونه‌های آلاینده اسیدی، نسبت به نمونه‌های غیر آلاینده کاهش می‌یابد.
  ۴. مقادیر ضرایب فشردگی و تورم با افزایش خاصیت اسیدی خاک افزایش می‌یابد.
  ۵. با افزایش درجه اسیدی خاک (اسید سولفوریک) از ۷/۸ تا ۵، ضریب تحکیم افزایش و سپس از ۵ تا ۱، کاهش می‌یابد.
- ### مراجع
- [1] M. H. Khatami, Investigation the effect of Acidic contaminants on the shear strength of fine-grained soils by Triaxial Test method. M.Sc. Thesis. Imam Khomeini International University, 2014 (in Persian).
- [2] W. H. Huang, and W. D. Keller, Dissolution of Clay Minerals in Organic Acids at Room Temperature, *American Mineralogist*, 56 (1971) 1080–1094.
- [3] A. Sridharan, and G. Venkatappa Rao, Shear Strength Behavior of Saturated Clays and the Role of the Effective Stress Concept, *Geotechnique*, 29.2 (1979) 177–193.
- [4] J. C. Santamarina, K. A. Klein, A. Palomino, and M. S. Guimaraes, Micro-Scale Aspects of Chemo-Mechanical Coupling: Interparticle Forces and Fabric, Chemomechanical Coupling in Clays: From Nano-Scale to Engineering Applications, Lisse, Swets & Zeitlinger (2002).
- [5] U. Gori, Influence du pH sur les propriétés des argiles, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 50 (1994) 37–42.

- [21] M. M. Ahmadi, M. Hassanlourad, and M. H. Khatami, 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, *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, 2.1 (2015) 25-33 (in Persian).
- [22] I. Gratchev, and I. Towhata, Compressibility of Soils Containing Kaolinite in Acidic Environment, *International Journal of Science and Research*, 20 (2) (2016) 623-630.
- [19] S. Prakash, and P. D. Arumairaj, Effects of Acid and Base Contamination on Geotechnical Properties of Clay, *International Journal of Science and Research*, 4.5 (2013) 2319-7064.
- [20] A. R. Estabragh, I. Beiytolahpour, M. Moradi, and A. A. Javadi, Consolidation Behavior of Two Fine-Grained Soils Contaminated by Glycerol and Ethanol, *Engineering Geology*, 178 (2014) 102-108.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Torabi, M. Hassanlourad, Effect of Sulfuric Acid on the Shear Strength and Consolidation Parameters of a Clayey Soil, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1127-1136.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12875.5281

