نشریه علمی

پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران

جلد ۲، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹٤، صص ۲۵ الی ۳۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۱۲/۱۰
تاریخ تصویب نهایی: ۹۳/۸/۵
پایگاه نشریه: http://jerce.srttu.edu

بررسی اثر تغییرات درجه pH شیرابه بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک رس کائولینیت در حضور بنتونیت

محمدمهدی احمدی[۱]، محمود حسنلوراد[۲]* و سیدمحمدحسین خاتمی[۳]

۱- **دانشیار**، گروه آموزشی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۲- **استادیار**، گروه آموزشی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی (ره)، قزوین، ایران
۳- **دانشجو آموخته مهندسی ژئوتکنیک**، گروه آموزشی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خمینی (ره)، قزوین، ایران
hassanlou@eng.ikiu.ac.ir

چکیده: معمولا لایه‌های آب بند به کار رفته در مدفن‌های بهداشتی زباله، از لایه‌های رس کوبیده شده و یا لایه های رس- ژئوسینتتیکی می‌باشند. از آنجا که کانی‌های رس در مواجهه با مواد شیمیایی حساسند و حضور مواد شیمیایی در این نوع خاک می‌تواند بر ساختار و خصوصیات آن تأثیر بگذارد، لذا با توجه به ماهیت اسیدی / قلیایی شیرابه، بررسی تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رس تحت تاثیر این مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله با انجام یک سری آزمایش‌های حدود اتربرگ، تحکیم، نفوذپذیری و سه محوری بر روی خاک رس کائولینیت و مخلوط کائولینیت با بنتونیت، اثر تغییرات pH بر خواص فیزیکی و مکانیکی آن بررسی می‌گردد. در آزمایش‌ها، اسید استیک و هیدروکسید سدیم به عنوان مواد شیمیایی نماینده شیرابه مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد، وجود هر دوی اسید و باز در خاک رس کائولینیت باعث افزایش حد روانی، دامنه خمیری و نفوذپذیری و کاهش پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌گردد. همچنین اسیدی و یا بازی شدن محیط خاک رس می‌تواند منجر به افزایش مقدار نشست و تسریع زمان تحکیم گردد.

کلمات کلیدی: اسید استیک و هیدروکسید سدیم، مقاومت برشی، نفوذپذیری، تحکیم.

An Investigation on the Effect of Variations in the pH of Leachate on the Physical and Mechanical Properties of Kaolinite Clay Soil in Presence of Bentonite

M.M. Ahmadi, M. Hasanlourad and M.H. Khatami

Abstract: Today, sanitary landfills are one of the basic needs for human societies. Clay liners are used frequently in landfills in order to prevent leachate's leaking into the outside environment. Existence of different chemicals in leachate can affect the geotechnical properties of clay liners and arise their need for a more conservative design. Therefore, investigation of the possible changes in geotechnical properties of clay liners because of the chemicals of leachate, will be important. The main purpose of this research is to probe different effects of the variations in the pH between 3 to 11 on hydraulic conductivity, shear strength and one dimensional swell or settlement potential of cohesive soils. The coefficient of hydraulic conductivity and one dimensional swell or settlement potential have been measured by conducting the falling head and one-dimensional consolidation tests, and parameters of shear strength of soil have been evaluated by conducting triaxial compression tests. The experiments have been performed on kaolinite and the blend of kaolinite and bentonite with different percentages of Bentonite. Acetic acid was used to lower the pHs below 7 however, sodium hydroxide was used to produce pHs above 7. The type of chemicals, the content of chemicals, the type of soil minerals, and the spending time are some of the important parameters for understanding the effect of changes in pH on properties of clayey soil. In these considerations, an increase in hydraulic conductivity and settlement potential of cohesive soil with changes in pH has been detected. Moreover, it has been concluded that shear strength of cohesive soils will be decreased in pHs above or below 7.

Key words: Compacted Clay Liners, pH, Shear Strength, Hydraulic Conductivity, Settlement.

۱–مقدمه

یکی از روش‌های رایج دفع زباله، دفن بهداشتی آن است. از دهه ۱۹۵۰ اولین تلاش‌ها برای ایجاد و ساخت محل‌های دفن بهداشتی و مهندسی آغاز شد، به طوری که اولین کتاب راهنما در این زمینه در سال ۱۹۵۹ توسط انجمن آمریکایی مهندسین عمران به چاپ رسید. اما ساخت و اجرای محل‌های دفن زباله به صورت مهندسی و پیشرفته امروزی بعد از سال ۱۹۷۰ و در جریان ساخت نیروگاه اتمی آمریکا آغاز شد. یکی از مباحث مهم در این مورد تأثیری است که شیرابه‌های حاصل از مواد زاید شهری بر خواص خاک‌های محل دفن می‌گذارند. خاک رس استفاده شده در مدفن‌های بهداشتی زباله جهت آستر کردن زیر محل دفن و یا حتی جهت پوشش روی آنها و آب‌بند کردن این مکان‌ها را به عهده دارد. اگر مواد شیمیایی بر نفوذپذیری و مقاومت برشی خاک تأثیر بگذارد عملکرد پوشش رسی زیر سؤال خواهد رفت.

شیرابه به دو صورت کوتاه مدت و بلند مدت روی خواص مختلف پوشش رسی تأثیر می‌گذارد. از جمله معیارهای تعیین کیفیت شیرابه، ترکیبات شیمیایی و pH آن است. کیفیت شیرابه از زمان تولید به مرور زمان تغییر می‌کند. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط "Henry و همکاران" در سال ۱۹۹۶، شیرابه زباله‌های شهری دفن شده در دو سال ابتدایی دارای pH مابین ۵ و ۸ و در دراز مدت (بیش از ۱۰ سال) دارای pH مابین ۶/۶ تا ۷/۵ (تقریبا خنثی) است. این مقادیر در مورد زباله‌های خاص و خطرناک می‌تواند بسیار متفاوت باشد[۱]. اثر کوتاه مدت شیرابه مربوط به لزجت بیشتر شیرابه نسبت به آب و تولید گاز توسط آن است. تأثیر بلند مدت شیرابه، تغییر نفوذپذیری، مقاومت برشی و دیگر پارامترهای خاک بر اثر کلوخه شدن و یا تورم خاک است. بر اساس تحقیقات انجام شده در سال ۱۹۹۹ توسط "Ourth و Verbrugge"، شیرابه زباله‌های دفن شده در محل دفن کهریزک در ابتدا خنثی و pH آن برابر ۷ است، اما با گذشت زمان خاصیت اسیدی آن افزایش یافته و پس از دو ماه pH تقریبا برابر ۴/۸ می‌شود. از این زمان به بعد pH دوباره افزایش یافته و حتی شیرابه خاصیت بازی پیدا می‌کند. بر این اساس توصیه می شود انجام آزمایش‌های مربوط به شیرابه در کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت انجام گردد[۲].

هدف از طراحی یک پوشش رسی به طور کلی به تعویق انداختن زمان عبور شیرابه از داخل آن و در نتیجه کاهش میزان نفوذ شیرابه به خارج از لایه پوشش است. طبق استاندارد USEPA پوشش‌های رسی در محل دفن زباله‌های شهری باید چنان اجرا گردند که نفوذپذیری آن‌ها برابر یا کوچکتر از 10^{-9} m/s باشد[۳]. براساس تحقیقات صورت گرفته توسط USEPA برای دست‌یابی به نفوذپذیری مجاز، شاخص خمیری خاک پوشش باید بزرگتر از ۱۰ باشد. به علاوه بهتر است دامنه خمیری از (۴۰ـ۳۰) تجاوز نکند.

"Benson و همکاران" یک بررسی آماری در سال ۱۹۹۸ بر روی ۸۵ محل مدفن ساخته شده در آمریکا انجام دادند که تنها ۷۴٪ آن‌ها پس از ساخت دارای نفوذپذیری کمتر از 10^{-9} m/s بودند[۴]. براساس این بررسی از میان تمام عوامل مؤثر بر نفوذپذیری، اجرای پوشش در سمت خشک منحنی تراکم بیشترین نقش را در افزایش نفوذ پذیری این پوشش‌ها داشته است. از عوامل مؤثر در تغییرات پارامترهای فیزیکی و مکانیکی پوشش‌های رسی در محل‌های دفن زباله‌ها تغییرات pH و تولید گاز در داخل آن‌هاست. با توجه به موضوع تحقیق حاضر، تعدادی از تحقیقاتی که در زمینه اثر تغییرات pH انجام شده است مورد بررسی قرار می‌گیرند.

"Benson و همکاران" در سال ۱۹۹۴ بیان کردند، مواد شیمیایی هدایت هیدرولیکی رس‌ها را به واسطه اثرشان بر ساختار خاک و همچنین فضاهای خالی تحت تأثیر قرار می‌دهند[۵]. این دگرگونی‌ها می‌تواند نتیجه تغییرات در تمرکز یون‌ها، تبادل یون‌ها، جذب و یا حل شدن آنیون‌ها باشند. به طور کلی افزایش در غلظت و ظرفیت شیمیایی کاتیون باعث لخته شدن ذرات ریز می‌شود و تورم مواد معدنی منبسط شونده را محدود می‌کند[۶]. "Mitchell" نتیجه گرفت که اسیدها به شبکه کریستالی آن‌ها حمله می‌کنند. به خصوص صفحات هشت ضلعی رس های معدنی بیشتر در معرض این پدیده قرار دارند در حالی که بازها تمایل به پراکندن صفحات چهارضلعی سیلیکا در رس‌های معدنی را دارند[۷].

از محققینی که بر اهمیت تأثیر pH آب حفره‌ای بر خواص فیزیکی- شیمیایی و رفتار مکانیکی رس‌ها بحث کرده‌اند می‌توان به "Santamarina و همکاران، Gajo و Maines، Gori، Brandenburg وLagaly، Gratchev و Sass"[۸، ۹، ۱۰، ۱۱و۱۲] اشاره نمود. اکثر تحقیقات انجام شده بر اثرات مخرب تغییرات زیاد pH (خواه اسیدی خواه بازی) بر رفتار ژئوتکنیکی رس‌ها تاکید کرده‌اند [۹و ۱۳]. یک خاکریز بنتونیتی و یک دیواره دوغابی، درسال ۱۹۸۰ توسط "Appolonia" با استفاده از محلول ۵٪ اسید هیدرو کلریدریک مورد آزمایش قرار گرفتند و افزایش هدایت هیدرولیکی تا بیش

از دو برابر اندازه‌گیری شد[۱۴]. همچنین در سال ۱۹۸۱ "Gordon و Forrest" آزمایش‌هایی بر روی رس متراکم شده شامل کربنات با استفاده از اسید سولفوریک در pH برابر ۱/۵ انجام دادند، که به دلیل تجزیه ناگهانی سولفات کلسیم به دی اکسید کربن و آب، تغییرات چندانی در هدایت هیدرولیکی دیده نشده است[۱۵].

براساس نتایج یک تحقیق کاهش pH از ۷ به ۳ در یک نوع خاک رس موجب کلوخه شدن و افزایش نفوذپذیری آن به میزان ۸۷٪ شده است. در همان خاک افزایش pH از ۷ به ۱۱ نفوذپذیری را به اندازه ۴۷٪ زیاد کرده است. همچنین با تغییرات pH حد روانی و خمیری خاک افزایش یافت [۱۶]. "Lentz و همکاران" در سال ۱۹۸۵ با عبور دادن ۶ برابر حجم منفذی از اسید کلریدریک با pH های ۱، ۳ و ۴ از نمونه‌های تحکیم یافته کائولینیت، مخلوط بنتونیت و کائولینیت و مونت موریلونیت منیزیم دار تغییری در هدایت هیدرولیکی نمونه‌ها گزارش نکردند [۱۷]. رس‌های طبیعی متراکم با محلول ۵٪ شامل مقادیر مساوی اسید هیدرو کلریدریک، اسید سولفوریک و اسید نیتریک توسط "Madsen و همکاران" در سال ۱۹۸۴ مورد آزمایش قرار گرفتند. این آزمایش‌ها ۳۰۰ روز به طول انجامید و افزایشی در حدود ۵ برابر مقدار هدایت هیدرولیکی پس از ۱۲۰ روز در هدایت هیدرولیکی حاصل شد. در بعضی موارد تجزیه رس‌های معدنی مشاهده شد به خصوص در مورد کائولینیت که از هم پاشیدگی حاصل شد[۱۸].

"Rahul و Daniel" در سال ۱۹۹۷ و "Kashir و Yanful" در سال ۲۰۰۱ افزایش در هدایت هیدرولیکی آب بندهای رسی را بعد از اختلاط با محلول‌های اسید و باز، به علت افزایش در ضخامت لایه دوگانه اطراف ذرات رس گزارش کردند[۱۹و ۲۰]. اگرچه "Peterson و Gee، Bowders و Daniel، Broderick و Daniel" رفتاری برخلاف آنچه شرح داده شد برای رس‌ها و خاک‌های حاوی رس در حضور اسید گزارش کرده‌اند[۲۱، ۲۲و ۲۳]. کاهش K برای رس را در مجاورت اسید دیده‌اند.

مطابق تحقیقات "Huang و Keller" در سال ۱۹۷۱، 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 مسأله‌ای بلند مدت برای لایه‌های رسی باشد [۲۴]. اثر هیدرو اکسید سدیم در pH های ۹، ۱۱ و ۱۳ توسط "lentz" بر روی همان خاکی که اثر اسید را بر آن بررسی کرده بود مورد تحقیق قرار گرفت. تأثیرات کوچکی روی هدایت هیدرولیکی مشاهده شد. نتایج این آزمایش‌ها حاکی از آن بود که حتی غلظت‌های کم مواد شیمیایی هم می‌توانند اثرات مهمی داشته باشند [۱۷].

تحقیقات انجام گرفته در سال ۲۰۰۱ توسط "Kashir و Yanful" بر روی بنتونیت تحت تأثیر اسید زهکشی شده از معدن با pH =3 بعد از عبور سه برابر حجم حفره‌ای نظر "Madsen و Mitchel" را تأیید کردند چرا که آزمایش‌ها نشان داد، که هر چه نمونه‌ها تحت فشار همه جانبه بیشتری محصور شده باشد، باعث افزایش کمتری در هدایت هیدرولیکی می‌شود. هدایت هیدرولیکی در نمونه‌هایی که تحت تنش همه جانبه‌ای معادل ۳۰ و ۵۰ kPa قرار داشت و به میزان ۵ برابر و در نمونه‌ای که تحت تنش همه جانبه صفر بود حدود ۲۰ برابر افزایش نشان داد[۲۰]. اسیدهای آلی باعث حل شدن ذرات رس می‌شود که ممکن است، منجر به افزایش هدایت هیدرولیکی تا بیش از ۱۰ برابر گردد. قدرت حل کنندگی این اسیدها به نظر کمتر از اسیدهای غیر آلی به نظر می‌رسد[۱۷].

"Siu" در سال ۲۰۰۶ مشاهده کرد که در pH های بالا به علت اجتماع دانه‌ها، تراکم پذیری کائولینیت افزایش می‌یابد[۱۳]. Gori در سال ۱۹۹۴ اثر تاثیر pH را بر روی حدود اتربرگ کائولینیت بررسی کرد و نتیجه گرفت که حد روانی آن به pH آب منفذی بستگی ندارد، چون حد روانی به لایه مضاعف این رس‌ها وابسته نیست[۱۰]. "Sridharan و همکاران" و "Gori" بیان کردند که حد روانی اسمکتیت به شدت به pH آب منفذی وابسته است این موضوع توسط "Di Maio، Gajo و Maines" [۹و ۲۵] تایید شد [۱۰و ۲۶].

"Gates و Bouazza" در سال ۲۰۱۰ به بررسی اثرات بلند مدت بازها بر روی بنتونیت پرداختند[۲۷]. "Liu" و همکاران در سال ۲۰۱۳ اثر اسیدسولفوریک را بر روی پارامترهای حدود اتربرگ و کانی‌های رس بنتونیت بررسی کردند[۲۸].

در زمینه تأثیر مواد اسیدی و بازی بر مقاومت برشی خاک، تاکنون تحقیقات محدودی صورت گرفته است و بیشتر توجه محققان بر اثرات این مواد در نفوذپذیری خاک رس معطوف شده است. در تحقیقات صورت گرفته در مورد تأثیرات شیرابه در پایداری مدفن‌های بهداشتی زباله، نتیجه گرفته شده که شیرابه‌ها تأثیر نگران کننده‌ای به وجود نمی‌آورند و تنها با طراحی مناسب و محافظه کارانه و همچنین با به کارگیری سیستم‌های مناسب زهکشی شیرابه، می‌توان از اثرات نامطلوب آن بر پایداری مدفن‌های بهداشتی زباله جلوگیری به عمل آورد [۲۹]. همچنین طی پژوهشی که در این زمینه در کشور صورت گرفته است، اثر تغییر pH خاک رس تهران در مجاورت اسید

سولفوریک، اسید کلریدریک و همچنین هیدروکسید سدیم مورد بررسی قرار گرفته است و محدوده تغییرات pH از ۳ تا ۱۱ بوده است. که این تغییرات موجب افزایش حد روانی و دامنه خمیری گردیده است[۳۰].

۱–جمع بندی تحقیقات گذشته

نقش درجه pH به طور گسترده‌ای بر نفوذپذیری پوشش رسی مورد بررسی قرار گرفته است. نوع رس و ترکیب آن، دامنه خمیری، رطوبت تراکم، شرایط تنش، گرادیان هیدرولیکی، نوع اسید از موضوعات مورد تحقیق بوده‌اند. طبق این بررسی‌ها، افزودن مواد اسیدی و بازی به خاک سبب افزایش حدود روانی و خمیری خاک می‌گردد. همچنین تأثیر این مواد بر نفوذپذیری خاک با توجه به نوع خاک و اسید و باز مورد استفاده در آزمایش‌های مختلف، متفاوت بوده است ولی به طور کلی می‌توان گفت که مواد اسیدی و بازی عموما سبب افزایش نفوذپذیری شده‌اند. ولی افزایش نفوذپذیری عمدتا کم و قابل چشم پوشی بوده است. همچنین مواد اسیدی و بازی سبب کاهش در پارامترهای مقاومت برشی خاک شده‌اند.

اکثر مطالعات گذشته اثر درجه اسیدی را به طور جداگانه بر روی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی بررسی نموده‌اند. لذا در این مقاله اثرات درجه اسیدی و بازی شیرابه‌ها به طور جامع بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بررسی می‌شود. از آن جا که امکان تفکیک اجزای شیرابه مخصوصا در عمرهای مختلف و با pH متفاوت وجود نداشت، لذا استفاده از شیرابه واقعی در مجموعه بررسی‌ها امکان پذیر نبود. بنابراین دو عامل اسید اسیتیک و هیدرواکسید به عنوان نمایندگان شیرابه استفاده شد.

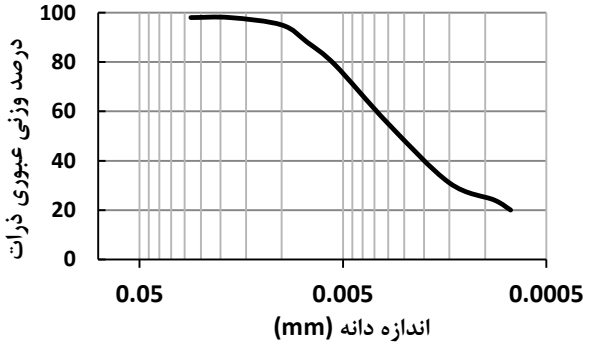
۳– مصالح مصرفی

۳–۱–خاک

خاک رس مورد استفاده در این مطالعه کائولینیت بوده که از اطراف شهر مرند استخراج شده است. سه نمونه خاک کائولینیت با مقادیر بنتونیت صفر، ۵ و ۱۰ درصد برای انجام مطالعات فراهم گردید که به ترتیب با نام خاک‌های A، B و C شناخته می‌شوند. در جدول ۱ مقادیر بنتونیت افزوده شده برای دستیابی به این خاک‌ها بیان گردیده است.

آزمایش دانه بندی بنتونیت مورد استفاده به روش هیدرومتری مطابق با استاندارد ASTM D422-63 انجام شده است.

منحنی دانه بندی خاک در شکل ۱ ارائه شده است[۳۱].



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک[۳۱]

همچنین آزمایش تعیین حدود اتربرگ با توجه به استاندارد ASTM D4318-84 که شامل تعیین حد روانی و حد خمیری خاک است، انجام شده و نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است[۳۱]. بر این اساس خاک A و B به صورت CL و خاک C به صورت CH در طبقه بندی یونیفاید نام‌گذاری می‌گردند.

برای به‌دست آوردن منحنی تراکم خاک‌ها، آزمایش تراکم بر اساس استاندارد (ASTM D 698-91) به روش پراکتور استاندارد برای هر ۳ نمونه خاک انجام گردید. مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک هر یک از نمونه‌ها مطابق جدول ۲ به دست آمد. آزمایش تعیین G_s نیز براساس استاندارد ASTM 854-92 انجام گردید که نتیجه آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول۱. مقادیر حدود اتربرگ سه خاک مورد مطالعه[۳۱]

نوع خاک	LL	PL	PI	USCS
کائولینیت خالص	۴۴	۲۷	۱۷	CL
کائولینیت + ۵٪ بنتونیت	۴۸	۲۸	۲۰	CL
کائولینیت +۱۰٪ بنتونیت	۵۰	۲۸/۵	۲۴	CH

جدول ۲. رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر

خاک	(γ_d) (gr/cm^3)	(ω_{opt})
A	۱/۶۳۵	۱۹
B	۱/۶۲۵	۲۱
C	۱/۶۲۰	۲۲/۵

جدول -۳ مقادیر Gs

نوع خاک	G_s
A	۲/۶۰
B	۲/۶۸
C	۲/۷۸

۳–۲ مواد شیمیایی

به منظور شبیه‌سازی اثر شیرابه در زمان‌های مختلف بر روی نفوذپذیری، حدود اتربرگ، ضریب تحکیم و مقاومت برشی خاک از اسید استیک و هیدروکسید سدیم با pHهای مختلف استفاده شد. مقدار pH اسید استیک و هیدروکسید سدیم بین ۳ تا ۱۱، انتخاب شد. لازم به ذکر است درصد خلوص اسید استیک انتخابی (CH_3COOH) ۹۵٪ و هیدروکسید سدیم ($NaOH$) ۹۸ـ ۹۵٪ بود.

۴– برنامه آزمایشگاهی

در مجموع ۴ دسته آزمایش به صورت زیر انجام گرفت:

۴–۱ آزمایش حدود اتربرگ

۴–۲ آزمایش سه محوری

به منظور تعیین تأثیر pH بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رس کائولینیت از آزمایش سه محوری در حالت UU طبق استاندارد ASTM D 2850-87 و CU طبق استاندارد ASTM D 4767-88انجام گردید.

آزمایش‌ها بر روی نمونه‌هایی که در درصد رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک به دست آمده از آزمایش تراکم انجام شدند. نمونه‌ها به مدت یک روز بعد از ساخت در محیط آزمایشگاه عمل آوری شده و سپس آزمایش بر روی نمونه صورت گرفت. جهت اشباع کردن از پس فشار kg/cm^2 ۰/۵ استفاده شده است. که این عدد به صورت تجربی انتخاب شده است. پس از خارج کردن نمونه بعد از گذشت ۲۴ ساعت و اندازه گیری درصد رطوبت آن، درصد اشباع یک‌بار ۹۳ درصد و بار دوم ۹۸ درصد به دست آمد و نتیجه گرفته شد که مدت زمان ۲۴ ساعت برای اشباع نمونه کافی است.

۴–۳– آزمایش تحکیم

در این آزمایش‌ها پس از ساخت نمونه‌ها، مقدار آب مورد نیاز برای اشباع کردن نمونه‌ها با pH مورد نظر ساخته و در دستگاه تحکیم قرار گرفتند. پس از مرحله اشباع سازی نمونه‌ها که دو روز به طول انجامید، بارگذاری در پنج مرحله و به ترتیب با مقادیر ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ kPa اعمال شدند. مدت زمان هر مرحله بارگذاری و ثبت نتایج نشست خاک تا ۲۴ ساعت ادامه یافت.

۴–۴ آزمایش نفوذپذیری

برای بررسی تأثیر pH بر پارامتر نفوذپذیری خاک، از آزمایش نفوذپذیری به روش هد افتان با استفاده از قالب نفوذپذیری با جداره صلب طبق آیین‌نامه ASTM D 5856-95 استفاده شد. در این آزمایش پس از ساخت نمونه‌ها، مقدار آب مورد نیاز برای اشباع کردن نمونه‌ها را با pH مورد نظر ساخته و در دستگاه نفوذپذیری قرار گرفت.

۵– نتایج آزمایش‌ها

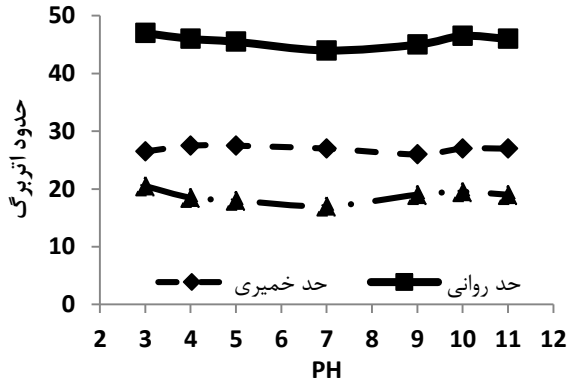
۵–۱–اثر pH بر روی حدود اتربرگ

اشکال ۲ تا ۴ تغییرات حد روانی، حد خمیری و اندیس خمیری را در برابر pH برای کائولینیت خالص و مخلوط‌های کائولینیت و بنتونیت نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که اسیدی و بازی شدن در هر سه نوع خاک، به صورت افزایش حد روانی خاک می‌باشد. اگرچه در pH بیشتر از ۱۰ مقدار آن تقریبا ثابت مانده است و حتی در مخلوط کائولینیت و ۱۰ درصد بنتونیت شاهد کاهش حد روانی خاک رس در pH بالاتر از ۱۰ هستیم. البته همان‌طور که دیده می‌شود خاک کائولینیت خالص حساسیت کمتری نسبت به اسید و باز نشان داده است و با اضافه شدن درصد بنتونیت حساسیت خاک در مقابل اسید استیک و هیدروکسید سدیم افزایش یافته است. "Gori" اثر pH را بر روی حدود اتربرگ کائولینیت بررسی کرد و نتیجه گرفت که حد روانی آن به pH آب منفذی بستگی ندارد چون حد روانی به لایه مضاعف این رس‌ها وابسته نیست[۱۰]. شکل ۲ حاکی از این نتیجه گیری است. همچنین مشاهده می‌شود، که اثر تغییرات pH بر حد خمیری خاک ناچیز است و تغییرات حد خمیری روال منظمی را دنبال نمی‌کند. در نتیجه تغییرات شاخص خمیری با pH مشابه تغییرات حد روانی است.

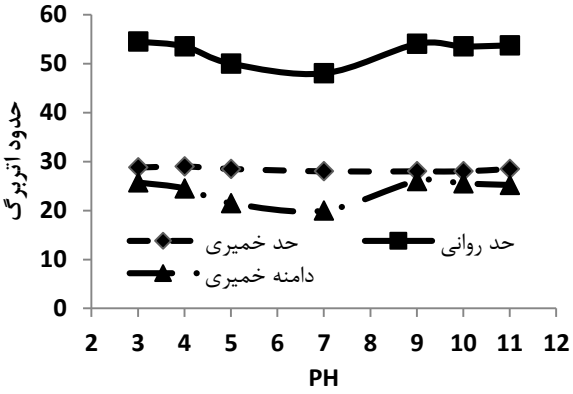
۵–۲–اثر pH بر پارامترهای مقاومت برشی

جدول ۴ اثر pH را بر پارامترهای مقاومت برشی خاک رس کائولینیت خالص حاصل از آزمایش سه محوری UU شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را ارائه می‌دهد.

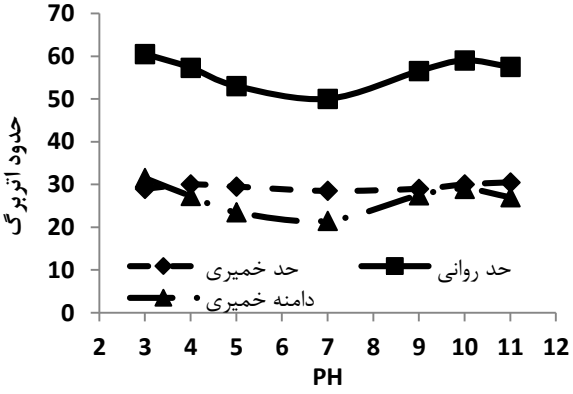
بر خلاف انتظار، مقداری زاویه اصطکاک داخلی در حالت UU به دست آمده است که این امر احتمالا به دلیل اشباع نبودن کامل نمونه‌ها بوده است. به طور کلی می‌توان بیان نمود که چسبندگی زهکشی نشده در مجاورت اسید و باز تمایل به کاهش دارد اگرچه در pH=9 کمترین میزان چسبندگی مشاهده می‌گردد و پس از آن با اضافه شدن درجه بازی شاهد افزایش چسبندگی هستیم. ظاهرا هیدروکسید سدیم تاثیر بیشتری در کاهش چسبندگی نسبت به اسید استیک دارد.



شکل ۲- تغییرات حدود اتربرگ در مقابل تغییر pH برای خاک کائولینیت خالص



شکل ۳- تغییرات حدود اتربرگ در مقابل تغییر pH برای مخلوط کائولینیت و ۵ درصد بنتونیت



شکل ۴- تغییرات حدود اتربرگ در مقابل تغییر pH برای مخلوط کائولینیت و ۱۰ درصد بنتونیت

جدول ۴- تغییرات چسبندگی زهکشی نشده و زاویه اصطکاک داخلی نسبت به تغییر pH

Φ_{cu}	C_{cu} ,kPa	pH
۵/۱	۵۲/۰	۳
۶/۵	۵۲/۵	۵
۸/۱	۵۴/۷	۷
۷/۴	۴۸/۳	۹
۵/۷	۴۸/۸	۱۱

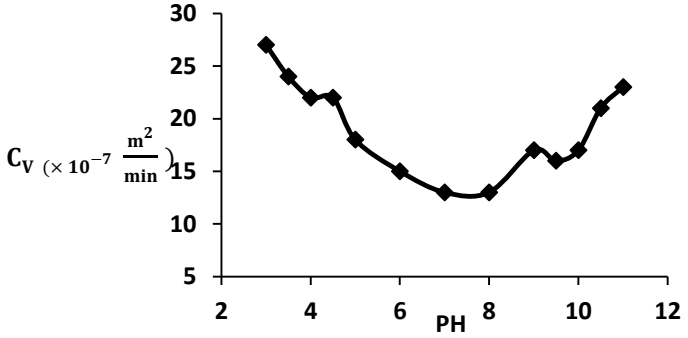
جدول ۵- تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در برابر تغییر pH در آزمایش CU

Φ_{cu}	C_{cu} ,kPa	pH
۱۳/۹	۴۶	۳
۱۶/۹	۵۰/۶	۵
۱۷/۱	۵۷/۹	۷
۱۵/۱	۵۳/۷	۹
۱۳/۴	۴۴/۸	۱۱

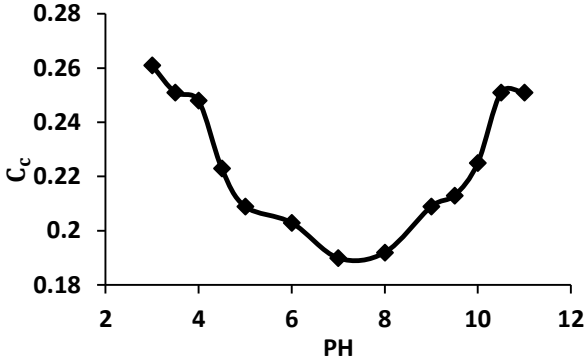
جدول ۵ نتایج حاصل از اثر pH بر پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمایش سه محوری CU شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی را ارائه می‌دهد. ملاحظه می‌گردد، زاویه اصطکاک داخلی خاک رس با افزایش باز کاهش تقریبا خطی داشته است ولی در اثر اضافه شدن اسید در غلظت‌های کم تغییر چندانی نداشته و با زیاد شدن غلظت به طور ناگهانی کاهش یافته است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که همان روند نتایج آزمایش‌های UU، در آزمایش‌های CU هم به طور کلی شاهد کاهش چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک در اثر اضافه کردن اسید و باز تکرار شده است. این نتایج منطبق بر کار "Gratchev و Sassa" که کاهش مقاومت سیکلی را برای مخلوط ماسه و کائولینیت، ماسه و بنتونیت در اثر تغییر pH دیدند، است[۱۲]. همچنین با نتایج مقاومت برشی استاتیکی در تحقیق ghadak سازگاری دارد[۳۱].

۵-۳- اثر تغییر pH بر پارامترهای تحکیم

شکل ۵ تغییرات ضریب تحکیم خاک کائولینیت را در برابر تغییرات pH نشان می‌دهد. این نتایج با استفاده از روش لگاریتمی و برای Tv=50% به دست آمده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در pH بین ۷ و ۸، تقریبا مقدار ضریب تحکیم ثابت مانده است و با زیادتر و یا کمتر شدن pH ضریب تحکیم خاک به صورت سریع افزایش می‌یابد. این پدیده می‌تواند ناشی از تخریب ساختمان خاک رس در اثر فعل و انفعالات کانی‌های رسی در مواجهه با اسید و باز باشد که منجر به سریع‌تر شدن نشست خاک می‌گردد. شکل ۶ تغییرات شاخص فشردگی خاک رس کائولونیت را در برابر تغییرات pH نشان می‌دهد. این شکل نیز نشان می‌دهد که افزایش باز و اسید منجر به افزایش مقدار نشست تحکیم خواهد شد.



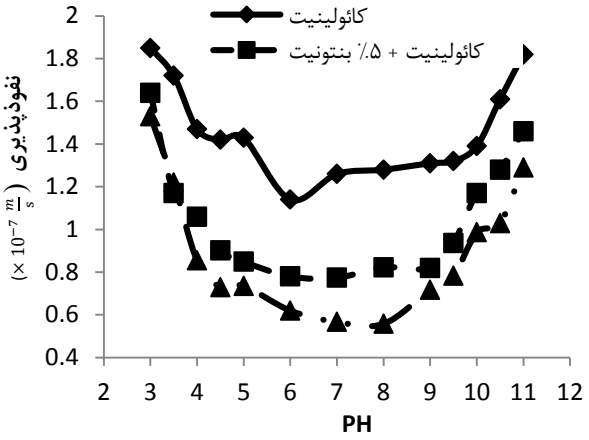
شکل ۵- تغییرات ضریب تحکیم بر حسب تغییرات pH در فشار ۲۵ kPa



شکل ۶- تغییرات شاخص تراکم پذیری بر حسب تغییرات pH

۵-۴- اثر pH بر نفوذپذیری

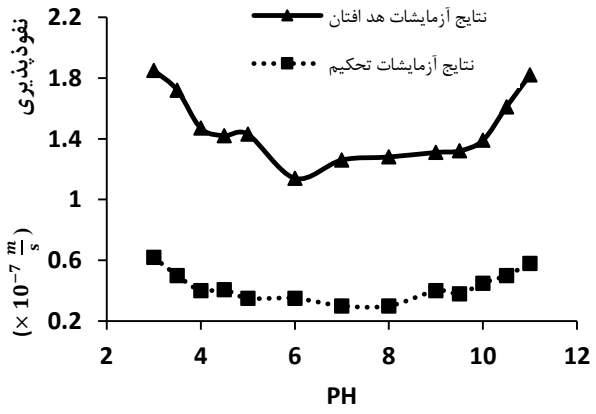
در شکل ۷ تغییرات نفوذ پذیری سه نوع خاک مقایسه شده است. همان طور که از شکل نشان می‌دهد با وجود اینکه خاک کائولینیت به خودی خود دارای نفوذپذیری کمی است، اضافه کردن ۵ و ۱۰ درصد بنتونیت، نفوذپذیری آن را به ترتیب ۵۷ و ۱۲۴ درصد کاهش داده است. علاوه بر این اسید استیک نسبت به هیدروکسید سدیم تاثیر بیشتری در تغییر نفوذپذیری خاک داشته است. مخصوصا این موضوع در حضور بنتونیت مشهودتر است. وقتی که درجه pH در محدوده ۴ تا ۱۰ قرار دارد، مقدار نفوذپذیری خاک تقریبا ثابت است و پس از آن با زیادتر و یا کمتر شدن pH خاک افزایش ناگهانی در نفوذپذیری رخ می‌دهد. همچنین اثر اسید مورد استفاده در افزایش نفوذپذیری کائولینیت اندکی بیشتری از باز بوده است.این نتایج با تحقیقات "Rahul و Daniel" در سال ۱۹۹۷ و "Kashir و Yanful" در سال ۲۰۰۱ تطابق دارد که افزایش در هدایت هیدرولیکی آب بندهای رسی را بعد از اختلاط با محلول‌های اسید و باز، به علت افزایش در ضخامت لایه دوگانه اطراف ذرات رس گزارش کردند[۱۹و ۲۰].



شکل ۷- تغییرات نفوذپذیری در مقابل تغییر pH

۵-۵ مقایسه نتایج آزمایش‌های تحکیم و نفوذپذیری

از نتایج آزمایش تحکیم نیز می‌توان مقدار نفوذپذیری خاک را اندازه‌گیری نمود. شکل ۸ به صورت مقایسه‌ای تغییرات ضریب نفوذپذیری کائولینیت را در دو آزمایش تحکیم و نفوذپذیری در حضور اسید و باز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار نفوذپذیری حاصل از آزمایش تحکیم، کمتر از مقدار به دست آمده از آزمایش هد افتان است. دلیل این امر می‌تواند احتمال وجود نشت از جداره‌ها در آزمایش نفوذپذیری با هد افتان باشد. همچنین حضور اسید و باز، تأثیر بیشتری بر تغییرات مقدار نفوذپذیری در آزمایش تحکیم نسبت به آزمایش هد افتان داشته است. دلیل این امر احتمالا مدت زمان بیشتر آزمایش تحکیم پس از مرحله اشباع شدن نسبت به آزمایش نفوذپذیری است. در نتیجه اسید یا باز وقت بیشتری داشته‌اند تا در ساختار خاک تغییر ایجاد نمایند. از این نتایج می‌توان دریافت نمود که پارامتر زمان نیز بر میزان تأثیر مواد شیمیایی بر خاک مؤثر است.



شکل ۸- مقایسه نتایج آزمایش‌های تحکیم و نفوذپذیری

۶–نتیجه گیری

براساس انجام یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی مانند حدود اتربرگ، نفوذپذیری، تحکیم و سه محوری بر روی خاک رس ترکیب کائولینیت با بنتونیت در حضور اسید اسیتیک و هیدروکسید سدیم نتایج زیر ملاحظه گردید:

اضافه کردن ۱۰ درصد بنتونیت به کائولینیت سبب افزایش میزان اندیس خمیری آن از ۱۷ درصد به ۲۴ درصد می‌شود. دلیل این مسأله افزایش فعالیت خاک و در نتیجه بیشتر شدن توانایی آن برای جذب و نگهداری آب سطحی است.

مجاورت اسید استیک و هیدروکسید سدیم با خاک رس کائولینیت تغییر چندانی در حدود اتربرگ آن به‌وجود نمی‌آورد در حالی که این مواد شیمیایی باعث افزایش قابل توجهی در حد روانی و اندیس خمیری ترکیب کائولینیت با بنتونیت می‌شوند. لذا حساسیت بنتونیت نسبت به کائولینیت در مقابل مواد اسیدی و یا بازی بیشتر است.

بر اساس نتایج آزمایش‌های سه محوری UU بر روی خاک کائولینیت ملاحظه گردید که چسبندگی خاک در مجاورت اسید و باز کاهش می‌یابد. تاثیر هیدروکسید سدیم بر کاهش چسبندگی خاک بیشتر از اسید استیک می‌باشد. همچنین با افزایش یا کاهش pH در خاک، در آزمایش سه محوری CU زاویه اصطکاک و چسبندگی کاهش می‌یابد.

به طور کلی افزودن اسید و یا باز به خاک کائولینیت سبب افزایش، ضریب تحکیم و شاخص فشردگی می‌گردد. هر چقدر درجه pH آب حفره‌ای خاک از هفت دورتر گردد شاخص فشردگی به صورت تقریبا خطی افزایش می‌یابد در حالی که ضریب تحکیم تقریبا ثابت می‌ماند و فقط در pH های خیلی زیاد یا خیلی کم مقداری افزایش در ضریب تحکیم خاک به وجود می‌آید.

طبق نتایج آزمایش‌های تحکیم، ضریب هدایت هیدرولیکی خاک کائولینیت تا مقدار ۹۵ درصد در مجاورت اسید استیک و تا مقدار ۷۳ درصد در مجاورت هیدروکسید سدیم زیاد می‌گردد.

مطابق نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری به روش هد افتان، اسید و یا باز اضافه شده به کائولینیت به مقدار ۴۶ درصد نفوذپذیری آن را افزایش می‌دهد. این افزایش نفوذپذیری به مراتب از مقدار به دست آمده در آزمایش تحکیم کمتر می‌باشد. به نظر می‌رسد دلیل این امر زمان طولانی‌تر انجام آزمایش تحکیم پس از مرحله اشباع شدن خاک می‌باشد. بنابراین در آزمایش تحکیم زمان بیشتری برای انجام فعل و انفعالات بین مواد شیمیایی و خاک وجود دارد.

اثر اسید و باز در افزایش نفوذپذیری مخلوط‌های کائولینیت و بنتونیت به مراتب بیشتر از اثر آن در افزایش نفوذپذیری کائولینیت خالص می‌باشد. همچنین اسید استیک نسبت به هیدروکسید سدیم تاثیر بیشتری در تغییر نفوذپذیری خاک داشته است.

مراجع

[1] Henry, J. Glynn, Heinke, Gary W. "*Environmental Science And Engineering, Prentice- Hall International*", 601,**1996**.

[2] Ourth, A.S. and Verbrugge, J.C. "*First Results about the Influence of Leachates on the Properties of Boom Clay*", International Conference on Geoenvironmental Engineering, London, pp.47-53 ,**1999**.

[3] EPA Seminar publication, "*Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction and Closure*".

[4] Benson,C.H. and Daniel, D.E. and Boutwell, G.P. "*Field Performance of Compacted Clay*", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(5), pp.390-403,**1999**.

[5] Benson,H. Huaming , zhai. "*Estimated Hydraulic conductivity of compacted clay liners*" ASCE, 110(6), pp.1063-1083, **1994**.

[6] Farster, H.Heick,L. "*Influence of Anion Competition on Boron Adsorption By clays and soils*", Soil Science, 161(2), pp.99-103, **1996**.

[7] Mitchell.James. "*Chemical Effects on clay Hydraulic conductivity*", **1995**.

[8] Santamarina JC, Klein KA, Palomino A, Guimaraes MS" *Micro-scale aspects of chemo-mechanical coupling: Interparticle forces and fabric. In: Di Maio, Hueckel and Loret (eds) Chemomechanical coupling in clays: from nano-scale to engineering applications*", Swets & Zeitlinger, Lisse , **2002**.

[9] Gajo A, Maines M "*Mechanical effects of aqueous solutions in organic acids and bases on a natural active clay*", Geotechnique, 57(8), pp.687–699, **2007**.

[10] Gori U "*The pH influence on the index properties of clays*". Bull Int Assoc Eng Geo 50, pp.37–42, **1994**.

[11] Brandenburg U, Lagaly G "*Rheological properties of sodium montmorillonite dispersions*", Appl Clay Sci, 3, pp.263–279, **1988**.

[12] Gratchev IB, Sassa K "*Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values*", J Geotech Geoenviron Eng ASCE, 135(2), pp.271–279, **2009**.

[13] Wang YH, Siu WK "*Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils I. Surface charges and structural Characterizations*",Can Geotech J, 43(6), pp.587–600, **2006**.

[14] D Appolonia , D."*Soil – bentonite slurry trench cutoffs*", J.Geotech.Eng , ASCE,106(4), pp.399-417, **1980**,

[15] Gordon, B.B., and Forrest, M.” *Permeability of soils using contaminated permeants. Permeability and Ground Water Contaminant Transport*”, ASTM STP 746, pp. 101-120, **1981**.

[۱۶] مهدوی، علی؛ بررسی تأثیر تغییرات pH روی برخی از پارامترهای مکانیکی خاک رس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی اراک،۱۳۷۶.

[17] Lentz,R.W.Horst,W.D, AND Uppot, O “*the permeability of Clay to Acidic and Custic Permeants, Hydraulic Barriers in Soil and Rock*” , ASTM STP 874, pp.127-139, **1985**.

[18] Madsen,F.T.and Mitchel,J.KChemical “*Effects on Clay Hydraulic Conductivity and their Determination*”, open file Report, Environmental Institute for Waste Management Studies, University of Alabama, Tuscaloosa, **1987**.

[19] Ruhl JL, Daniel DE “*Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates*”, J Geotech Geoenviron Eng, 123(4), pp.369–381, **1997**.

[20] Kashir M, Yanful EK “*Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage*”, Can Geotech J. , 38(5), pp.1034–1048, **2001**.

[21] Peterson SR, Gee GW “*Interactions between acidic solutions and clay liners: permeability and neutralization*”. In: Johnson AI, Frobel RK, Cavalli NJ, Petterson CB (eds)*Hydraulic barriers in soil and rock*. ASTM STP 874. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, **1985**.

[22] Bowders JJ, Daniel DE “*Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals*”, J Geotech Eng. , 113, pp.1432–1448, **1987**.

[23] Broderick GP, Daniel DE “*Stabilizing compacted clay against chemical attack*”, J Geotech Eng, 116(10), pp.1549–1567, **1990**.

[24] Huang,W.H. and Keller,W.D. “*Dissolution of clay minerals in organic acids at room temperature*”, Am. Mineral., 56, pp.1080-1094, **1971**.

[25] Di Maio C “*Exposure of bentonite to salt solution*”, Geotechnique, 46, pp.695–707, **1996**.

[26] Sridharan A, Rao SM, Murthy NS “ *Liquid limit of montmorillonite soils*”, Geotech Test J. , 9(3), pp.156–159, **1986**.

[27] Gates, W.P., Bouazza, A.” *Bentonite transformations in strongly alkaline solutions*”, Geotextiles and Geomembranes, 28 (2), pp. 219-225, **2010**.

[28] Yang Liu, Will P. Gates, Abdelmalek Bouazza” *Acid induced degradation of the bentonite component used in geosynthetic clay liners*”, Geotextiles and Geomembranes, 36, pp. 71-80, **2013**.

[29] Koerner,Rsoong,T “*Leachate in landfills; the stability issues*”, Elevier Geotextile and Geomembrane, 18(2000) , pp. 293-309, **1999**.

[۳۰] قدک، آرمین؛ تاثیر تغییرات pH بر خواص مکانیکی خاک رس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف،۱۳۸۲

[۳۱] ساسانیان، سعید؛ بررسی اثر تغییرات pH شیرابه بر خصوصیات مکانیکی پوششهای رسی(CCLها)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف،۱۳۸۳