

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ریزدانه

افشین طالب‌العلم<sup>۱</sup>، سعیدرضا خداشناس<sup>۲\*</sup>، علی اخترپور<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵

### چکیده

تأثیر فرایند تر و خشک شدن متوالی بر پارامترهای مکانیکی خاک از جمله مسائل مهمی است که باید در انتخاب منبع قرضه خاک ریزدانه مورد توجه قرار گیرد. این مهم، در بسیاری از سازه‌ها از جمله هسته سدهای خاکی، خاک بستر کانال‌های آبیاری و زیرسازی جاده‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق تأثیرات تر و خشک شدن متوالی خاک رس بر مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفت. آزمایش‌های برش تک محوری، برش سه محوری، برش مستقیم، پتانسیل تورم، هدایت هیدرولیکی و صفحات فشاری بر روی نمونه خاک رس صورت گرفت و طی شش مرحله تر و خشک شدن متوالی، نمونه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث بوجود آمدن تغییرات عمده‌ای در مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها می‌شود به گونه‌ای که پس از شش چرخه تر و خشک شدن، مقاومت فشاری نمونه‌ها ۳۲ درصد کاهش یافت. نتایج آزمایش‌ها برش مستقیم و سه محوری نیز نشان دادند که اعمال ۶ چرخه تر و خشک شدن باعث می‌شود چسبندگی خاک حدود ۴۰ درصد کاهش پیدا کند اما تأثیر زیادی بر زاویه اصطکاک داخلی خاک ندارد. آزمایش هدایت هیدرولیکی نشان داد که نفوذپذیری خاک نیز پس از تر و خشک شدن حدود ۱/۹ برابر افزایش می‌یابد. با انجام آزمایش صفحات فشاری که بیانگر رابطه میان درصد رطوبت و مکش در خاک‌های غیر اشباع است مشخص شد که با افزایش تعداد چرخه، منحنی مشخصه آب - خاک به سمت پایین تغییر مکان پیدا می‌کند و قابلیت نگهداشت آب توسط خاک کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: برش مستقیم، پتانسیل تورم، چرخه تر و خشک شدن، مقاومت تک محوری، مقاومت سه محوری

### مقدمه

اثر بالا آمدن مجدد تراز آب مخزن همانند اولین آبیاری سد است و به همین علت بررسی آن ضروری است (ICOLD, 1995). ابرین با بررسی اثر تر و خشک شدن متوالی بر روی چند نمونه خاک رسی نشان داد که این فرآیند منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های خاک‌ها می‌شود (O'Brien, 2007). گوه و همکاران با استفاده از دستگاه برش سه‌محوری مقاومت برشی خاک را در تر و خشک شدن مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در تر شدن، مقاومت برشی خاک نسبت به خشک شدن در رطوبت‌های یکسان، مقدار کمتری است (Goh et al., 2013). هیتور و همکاران با مطالعه‌ی تغییرات مقاومت فشاری خاک یک نمونه خاک تحت اثر چرخه تر و خشک شدن متوالی، دریافتند که این فرآیند موجب کاهش چشمگیر مقاومت فشاری نمونه خاک می‌شود (Heitor et al., 2014). در پژوهشی که توسط ازبک انجام شد، اثر اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن خاک‌های رسی مورد بررسی قرار گرفت که طی آن کاهش مقاومت فشاری خاک گزارش شد (Özbek, 2014). تحقیقی

تأثیر فرایند تر و خشک شدن متوالی بر پارامترهای مکانیکی خاک از جمله مسائل مهمی است که باید در انتخاب منبع قرضه خاک ریزدانه مورد توجه قرار گیرد و در بسیاری از سازه‌ها از جمله هسته سدهای خاکی، خاک بستر کانال‌های آبیاری و زیرسازی جاده‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج تحلیل آماری کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ نشان می‌دهد که عامل اصلی تخریب نیمی از سدهای خاکی یا سنگریزه‌ای فرسایش درونی است که معمولاً در اولین آبیاری از مخزن سد رخ می‌دهد. همچنین بنا بر این تحلیل، خشک شدن هسته سدهای خاکی بر اثر خشکسالی و تر شدن مجدد آن در

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی آب و سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران  
(\* نویسنده مسئول: Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

چهار نمونه خاک با درصد‌های مختلف رس، پایداری ساختاری خاک و توزیع منافذ آن را بررسی کرد. نتایج مطالعه او نشان داد که اثر چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی خاک بر روی نمونه‌هایی بیشتر است که درصد رس بالاتری دارند و اعمال این چرخه‌ها سبب ایجاد درز و ترک در نمونه‌ها و در نتیجه کاهش مقاومت و پایداری در خاک می‌شود (صفادوست، ۱۳۹۴).

به منظور کنترل و کاهش اثر چرخه‌های تر و خشک شدن نیز پژوهش‌هایی صورت گرفته است. کامپالا و همکاران با اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی بر روی یک نمونه خاک رسی که با خاکستر کلسیم کربنات تثبیت شده بود، نتیجه گرفتند که وجود خاکستر کلسیم کربنات در خاک‌های تحت اثر تر و خشک شدن متوالی، باعث کنترل تورم خاک شده و از کاهش مقاومت فشاری خاک جلوگیری می‌کند (Kampala et al., 2013). الداود و همکاران با اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی بر روی یک نمونه خاک تثبیت شده با آهک، نتیجه گرفتند که وجود آهک در خاک منجر به افزایش مقاومت خاک می‌گردد و بنابراین می‌توان از آهک جهت کنترل کاهش مقاومت خاک در برابر چرخه‌های متوالی تر و خشک بهره برد (Aldaoud et al., 2014).

برای مطالعه رفتار هیدرومکانیکی در محیط‌های چند فازی مانند خاک‌های اشباع و غیر اشباع لازم است که شناخت کاملی از خصوصیات مصالح وجود داشته باشد. مکش و درصد رطوبت پارامترهای هستند که می‌توانند خصوصیات ژئوتکنیکی مختلفی از خاک‌های غیراشباع مانند نفوذپذیری، تغییر حجم، و مقاومت برشی را تحت تاثیر قرار دهند. از این رو شناخت منحنی مشخصه آب-خاک که بیانگر رابطه میان درصد رطوبت و مکش در خاک‌های غیر اشباع است برای بررسی این تأثیرات ضروری است.

مطالعات انجام شده در مورد اثر تر و خشک شدن خاک‌های رسی نشان می‌دهد که در عمده این تحقیقات مقاومت برشی، مقاومت فشاری و نفوذپذیری خاک مورد بررسی قرار گرفته و در آن‌ها منحنی مشخصه آب-خاک در نظر گرفته نشده است. منحنی مشخصه آب-خاک یکی از مهم‌ترین منحنی‌های کاربردی در مکانیک خاک غیر اشباع است که با استفاده از آن می‌توان مقاومت برشی خاک و تغییر حجم آن را به دست آورد.

هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر چرخه‌های تر و خشک شدن‌های متوالی خاک رس بر مقاومت فشاری، چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی و هدایت هیدرولیکی خاک و نیز بررسی اثر رطوبت بر مقاومت فشاری خاک، چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی است. به این منظور، با اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی (شش چرخه) بر روی نمونه‌های تهیه شده از منبع قرضه خاک رسی، مقاومت فشاری خاک تعیین شد. همچنین، چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی نیز با انجام آزمایش برش مستقیم به دست آمد

که توسط ونگ و وی صورت گرفت، نشان داد که اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن منجر به ایجاد تغییراتی در منافذ ریز و درشت خاک می‌شود. همچنین، تغییرات بوجود آمده در منافذ ریز حالت برگشت‌پذیر دارند ولی منافذ درشت حالت برگشت‌پذیر نداشته و حالت ایجاد شده در آن باقی می‌ماند (Wang and Wei, 2014). در تحقیق نائینی و همکاران اثر چرخه‌های رطوبتی تر و خشک شدن متوالی بر روی مقاومت فشاری و ظرفیت باربری خاک بررسی شد. نتایج آن‌ها نشان داد که اعمال این چرخه‌ها کاهش مقاومت فشاری و ظرفیت باربری نمونه‌های خاک را در پی دارد (Naeini et al., 2015). استبرق و همکاران اثر کیفیت آب در چرخه تر و خشک شدن خاک را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که چرخه تر و خشک شدن متوالی موجب افزایش پتانسیل تورم خاک می‌شود. همچنین، افزایش پتانسیل تورم با آب مقطر بیشتر از آب‌های اسیدی و شور است. علاوه بر این، پتانسیل تورم خاک با آب شور قابل کنترل است، در حالی که پتانسیل تورم خاک با آب مقطر و اسیدی قابل کنترل نیست (Estabragh et al., 2015). ام دی و همکاران اثر چرخه تر و خشک شدن متوالی خاک را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که اعمال این چرخه‌ها سبب کاهش چسبندگی خاک و نیز کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود. کاهش این مقادیر در چرخه‌های ابتدایی با شدت بیشتری رخ داده است، ولی از چرخه چهارم به بعد، روند کاهش مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با شدت کمتری بوده است (Md et al., 2016). مهرموسوی و همکاران تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن را بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی رس تثبیت شده با سیمان و آهک مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اعمال چرخه‌های رطوبتی بر روی رس‌های تثبیت شده با سیمان و آهک، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها را کاهش می‌دهد (مهر موسوی و همکاران، ۱۳۹۲).

سلطانی و رئیسی استبرق اثر چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی خاک‌های متورم‌شونده را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اعمال چرخه‌های رطوبتی تر و خشک شدن متوالی خاک، باعث افزایش حجم نمونه‌ها می‌شود، اما با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن، این افزایش حجم کاهش می‌یابد. در نهایت در چرخه پنجم تغییر حجم نمونه‌ها مقداری ثابت پیدا کرده و دیگر تغییر حجمی در نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود (سلطانی و رئیسی استبرق، ۱۳۹۳).

پناهی اثر چرخه‌های تر و خشک شدن را بر مشخصات مکانیکی خاک رسی مورد بررسی قرار داد. او نشان داد با اعمال ۶ سیکل تر و خشک شدن بر روی خاک رسی، مقاومت برشی و چسبندگی خاک به ترتیب ۲۷ و ۸۰ درصد کاهش می‌یابد و از طرف دیگر هدایت هیدرولیکی خاک ۵۸ درصد افزایش پیدا می‌کند (پناهی، ۱۳۹۵). صفادوست با اعمال چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن بر روی

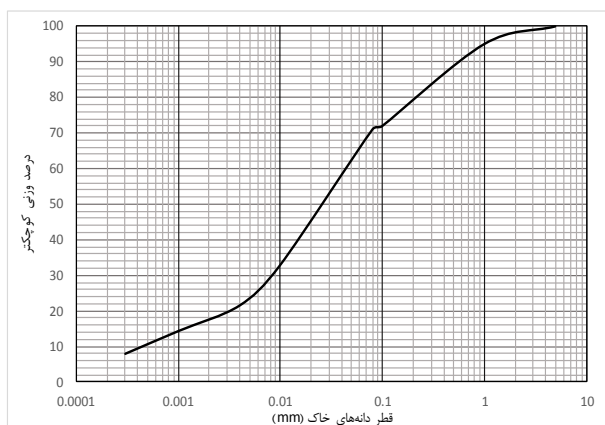
آزمایش دانه‌بندی با الک و هیدرومتر بر اساس استاندارد ASHTO T-88-70 انجام شد. همچنین، آزمایش تراکم استاندارد به منظور تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص حداکثر خشک بر اساس استاندارد ASTM D 698-00a انجام گردید.

منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید، خاک مورد بررسی در این پژوهش، در گروه CL (رس با خاصیت خمیری کم) قرار گرفته است.

و برای تعیین هدایت هیدرولیکی خاک از آزمایش هدایت هیدرولیکی با بار افتان استفاده گردید. همچنین با استفاده از دستگاه صفحات فشاری، منحنی مشخصه آب-خاک در چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن نیز بدست آمد.

## مواد و روش‌ها

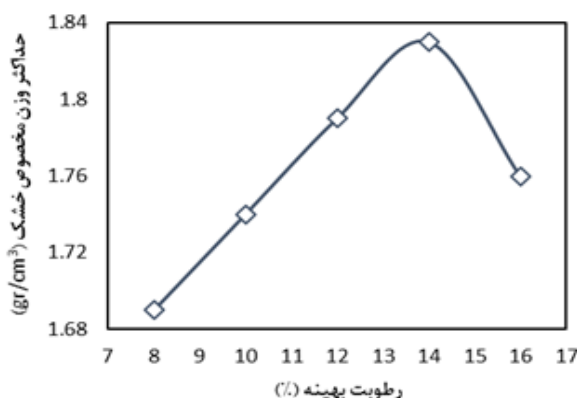
جهت انجام آزمایش دانه بندی بعد از تهیه نمونه خاک از منبع قرصه ریزدانه، خاک مورد نظر الک شده تا کلوخه‌ها و نخاله‌های آن جدا شوند. سپس نمونه خاک در مجاورت هوا خشک شده و پس از آن



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی خاک مورد بررسی در این پژوهش

مورد بررسی در این پژوهش است.

شکل ۲ بیانگر درصد رطوبت بهینه (حدود ۱۴ درصد) و وزن مخصوص حداکثر خشک خاک (حدود ۱/۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب)



شکل ۲- نمودار تراکم خاک

زهکشی شده، بدست آورد. همچنین، به منظور سنجش ضریب آب‌گذری یا هدایت هیدرولیکی روش‌های گوناگونی وجود دارد. اگر چه با هیچ یک از این روش‌ها نمی‌توان مقدار واقعی هدایت هیدرولیکی را بدست آورد، ولی با

در این پژوهش به منظور تعیین مقاومت برشی خاک، از دستگاه برش مستقیم استفاده شد. با استفاده از دستگاه برش مستقیم می‌توان پارامترهای مقاومت برشی خاک را در حالت‌های مختلف تحکیم نیافته-زهکشی نشده، تحکیم یافته-زهکشی نشده و تحکیم یافته-

انجام شد.

همچنین، اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D 599-96 انجام شد. برای اشباع کردن نمونه‌ها، آن‌ها را در مخزن آبی قرار دادند.

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین در این زمینه، تعداد مناسب چرخه‌های تر و خشک شدن برای نمایش روند تغییرات پارامترهای مختلف برای خاک‌های مشابه، شش چرخه به دست آمده است (پناهی، ۱۳۹۵). به این ترتیب، در این پژوهش با اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی (۶ چرخه) بر روی نمونه‌های خاک رسی، مقاومت فشاری، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه آب- خاک تعیین شد.

همچنین، پتانسیل تورم نمونه‌های رسی با استفاده از آزمایش پتانسیل تورم تعیین شد. برای این منظور، نمونه مورد نظر در قالب پر از آب قرار داده شد تا به حالت اشباع برسد. سپس، پتانسیل تورم برای نمونه مورد نظر از رابطه (۱) محاسبه شد. برای بررسی پتانسیل تورم نمونه‌ها از دستگاه تحکیم یک بعدی بدون اعمال بار به نمونه‌ها استفاده شد.

$$S_{wp} = (\Delta h / H) \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه،  $S_{wp}$  همان پتانسیل تورم و  $\Delta h$  و  $H$ ، به ترتیب، تغییر ارتفاع نمونه و ارتفاع اولیه نمونه هستند.

افزون بر این‌ها، آزمایش‌های سه محوری انجام شده در این پژوهش طبق استاندارد ASTM D4767 انجام گرفت. مقاومت فشاری خاک اشباع در فشار سه محوری بستگی به تنش‌های اعمالی، زمان تحکیم، سرعت کرنش و تاریخچه تنش‌های وارده بر خاک دارد. در این آزمایش، مقاومت فشاری خاک تحت شرایط زهکشی شده اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۳، نمای کلی دستگاه سه محوری را نشان می‌دهد.

انتخاب روشی که مناسب نوع و شرایط خاک باشد، می‌تواند با دقت قابل قبولی برای کارهای عملی مقدار آن را تعیین کرد. با توجه به نوع خاک مورد استفاده در این پژوهش که خاک ریزدانه رس با خاصیت خمیری کم است برای انجام این پژوهش از روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با بار افتان استفاده شد که برای خاک‌های ریزدانه با نفوذپذیری کم مناسب است.

منحنی مشخصه‌ی آب-خاک مطابق با روش استاندارد آزمایش برای تعیین منحنی مشخصه آب-خاک با استفاده از ستون معلق، سایکرومتر آینه سرد، صفحات فشاری یا سانتیفریوژ که در ASTM D6836-02 آمده است، تعیین گردید. به منظور انجام این آزمایش، در پژوهش حاضر از دستگاه صفحات فشاری آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد بهره‌گیری شد که دارای ۴ صفحه سرامیکی با مقدار هوای ورودی ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال است.

به منظور رسم منحنی مشخصه آب - خاک، به ازای هر چرخه تر و خشک شدن، دو نمونه مورد آزمایش صفحات فشاری جهت اعمال مکش قرار گرفت. لازم به ذکر است که در محاسبه رطوبت وزنی نمونه‌های خاک، میزان آب موجود در کاغذ صافی در هر مکش در نظر گرفته شد تا میزان رطوبت وزنی بدست آمده برای هر نمونه دارای حداقل خطای اندازه‌گیری باشد. بدین ترتیب، در پژوهش پیش رو مقدار چگالی ظاهری نمونه خاک برابر با ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب بدست آمد.

همچنین، برای ساخت نمونه‌ها در این پژوهش، خاک مورد نظر از الک شماره ۱۰ عبور داده شد و رطوبتی برابر با رطوبت بهینه به خاک اضافه شد. سپس خاک مرطوب در داخل قالب‌ها، در ۵ لایه تا رسیدن به درصد تراکم ۹۸٪، کوبیده شد. آزمایش‌های تک محوری، برش مستقیم و پتانسیل تورم، به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D 2166-00، ASTM D 3080-03 و ASTM D4829 - 11



شکل ۳- نمای کلی دستگاه سه‌محوری فشاری

متخلخل و فیلتر کاغذی در دوسر نمونه استفاده می‌شود. نمونه را به دو صورت مرطوب و خشک می‌توان در دستگاه سه محوری قرار داد. در این آزمایش از روش مرطوب استفاده شده است. بدین منظور باید صفحات متخلخل قبل از قرار دادن نمونه داخل دستگاه به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوشانده شود تا کاملاً اشباع گردد و سپس در محیط آزمایشگاه قرار گیرد تا سرد شود. فیلتر کاغذی نیز باید در آب فرو رود. در شکل ۴ نمونه صفحات متخلخل و فیلتر کاغذی نشان داده شده است.



شکل ۴- نمونه صفحات متخلخل و فیلتر کاغذی

برای انجام آزمایش سه محوری، ابتدا نمونه‌ها به وسیله نمونه‌گیر سه محوری تهیه شدند. این نکته را باید به خاطر داشت که هنگام خارج کردن نمونه، خارج‌کننده باید قادر به اخراج مغزه خاک از لوله نمونه‌گیر با سرعتی یکنواخت از همان جهتی که نمونه به لوله وارد شده و با حداقل دستخوردگی نمونه باشد. در صورتی که مغزه خاک به صورت قائم خارج نگردد باید دقت کرد که در اثر نیروی وزن بر روی مغزه تنش‌های خمشی به وجود نیاید. برای زهکشی مناسب نمونه حین انجام آزمایش از صفحات فلزی

موضوع مرحله تحکیم این آزمایش این است که نمونه اجازه یابد در حالت زهکشی شده تحت تنش تحکیمی مؤثری که برای تعیین مقاومت لازم است، به تعادل دست یابد. برای انجام تحکیم باید درحالی که شیرهای زهکشی نمونه بسته است، حداکثر فشار متقابل، ثابت نگه داشته شود و فشار محفظه تا آنجا که اختلاف بین فشار محفظه و فشار متقابل برابر با فشار تحکیمی مؤثر مورد نظر گردد، افزایش یابد. پس از آن، قرائت اولیه بورت ثبت می‌گردد و سپس شیرهای زهکشی مربوطه باز می‌شود بطوری که نمونه از هر دو انتها به داخل بورت زهکشی شود.

آخرین مرحله در روند آزمایش سه محوری، اعمال بار محوری تفاضلی و برش نمونه است. در حین برش، فشار محفظه باید ثابت نگه داشته شود. این درحالی است که پیستون بارگذاری محوری در مقابل کلاهک نمونه یا کرنش محوری کنترل شده‌ای به عنوان معیار بارگذاری به سمت پایین پیش می‌رود. در این حالت، اجازه زهکشی به نمونه در حین برش داده نمی‌شود. این آزمایش در سه تنش همه‌جانبه‌ی ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بر روی سه نمونه انجام شده است.

جهت انجام دادن چرخه‌های تر و خشک شدن بر روی نمونه‌ها ابتدا همه سطح جانبی نمونه‌ها به وسیله کاغذ فیلتر پوشانده شد تا از به هم ریختن نمونه هنگام اشباع سازی جلوگیری شود. سپس

اولین مرحله از مراحل انجام آزمایش سه محوری اشباع کردن نمونه است. موضوع اصلی مرحله اشباع آزمایش، پر کردن تمامی منافذ موجود در نمونه با آب است، بدون آنکه پیش تنش غیرقابل قبولی برای نمونه پیش آید و یا به نمونه اجازه تورم داده شود. اشباع معمولاً با اعمال فشار متقابل به آب منفذی نمونه همراه است تا هوا به داخل محلول رانده شود که این رانش پس از اشباع سیستم زهکشی با جوشاندن صفحات متخلخل در آب و اجازه جریان آب در سیستم قبل از قرار دادن نمونه می‌باشد. باید توجه داشت که قرارگیری هوا در داخل محلول فرآیندی زمانبر است. از این رو، استفاده از آب هواگیری شده باعث کاهش زمان و کاهش فشار متقابل لازم برای اشباع خواهد شد.

نمونه وقتی کاملاً اشباع می‌شود که پارامتر فشار منفذی،  $B$ ، بزرگتر از  $0.95$  باشد یا در نمودار  $B$  در مقابل فشار متقابل، با افزایش فشار متقابل هیچ افزایش بعدی در  $B$  اتفاق نیفتد. پارامتر فشار منفذی  $B$  طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$B = \Delta U / \Delta \sigma_3 \quad (2)$$

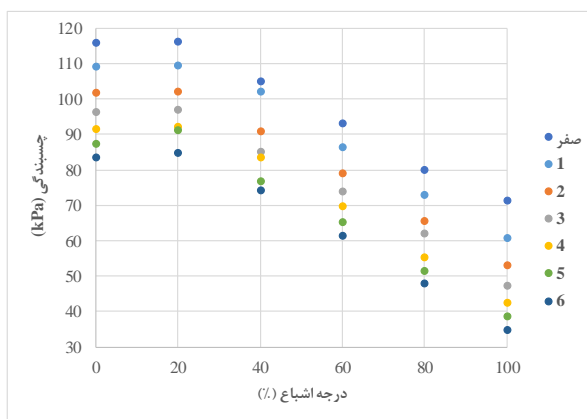
که در این رابطه  $\Delta U$  تغییر در فشار منفذی نمونه است که در اثر تغییر در فشار محفظه، هنگامی که شیرهای زهکشی نمونه بسته هستند رخ می‌دهد و  $\Delta \sigma_3$  تغییر در فشار محفظه است. بعد از اشباع شدن نمونه، آزمایش وارد فاز تحکیم می‌شود.

کاهش مقدار چسبندگی آن‌ها شده است. با افزایش درصد رطوبت نمونه‌ها، مولکول‌های آب بین ذرات خاک قرار گرفته و باعث افزایش فاصله بین ذرات خاک می‌شوند. این امر باعث کاهش ایجاد پیوند بین ذرات خاک شده و در نتیجه موجب کاهش مقدار چسبندگی می‌شود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تر و خشک شدن اثرات منفی بر چسبندگی نمونه‌ها داشته و مقدار این پارامتر را کاهش داده است. اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن باعث ایجاد تورم در نمونه‌های مورد بررسی می‌شود. این تورم باعث افزایش حجم خلل و فرج شده و رفته رفته تراکم نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش تراکم نمونه‌ها موجب کاهش چسبندگی نمونه‌ها می‌شود. شکل ۶ تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

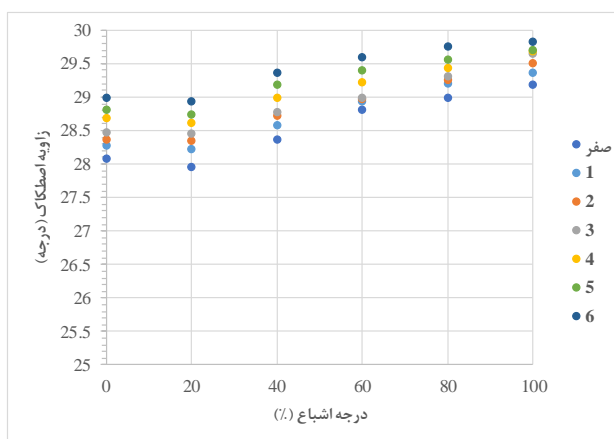
نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر مستغرق شد تا به طور کامل اشباع گردد. در مرحله بعد نمونه‌ها به گرمخانه منتقل شد تا به رطوبت ۲۰ درصد برسد. شش چرخه تر و خشک شدن به همین ترتیب بر روی نمونه‌ها انجام شد و پس از آن تحت آزمایش سه محوری تحکیم یافته زهکشی شده قرار گرفت.

## نتایج و بحث

اثر رطوبت و چرخه‌های تر و خشک شدن‌های متوالی بر مقاومت برشی خاک در شکل‌های ۵ و ۶ را نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، بیشترین مقدار چسبندگی مربوط به رطوبت‌های ۲۰ درصد و صفر درصد بوده و کم‌ترین مقدار آن در رطوبت اشباع بوده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش رطوبت نمونه‌ها باعث



شکل ۵- چسبندگی نمونه‌ها در اثر تر و خشک شدن متوالی آن‌ها



شکل ۶- زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها در اثر تر و خشک شدن متوالی آن‌ها

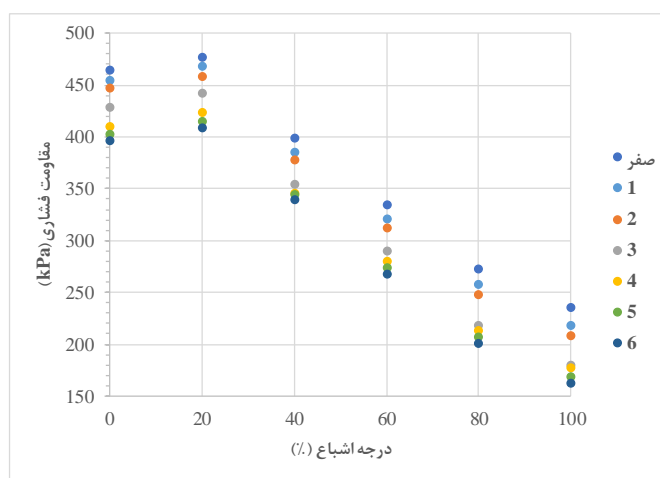
اشباع و کمترین مقدار آن مربوط به رطوبت ۲۰ درصد نمونه‌ها است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که مقدار زاویه اصطکاک رابطه مستقیمی با درصد رطوبت دارد.

نتایج تحقیق پناهی در خصوص خاک هسته سد شهید یعقوبی نیز بیانگر تطبیق خوب بین روند نتایج می‌باشد. همانطور که از نتایج پیداست، بیشترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی مربوط به رطوبت

به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، از آزمایش فشاری تک محوری استفاده شد. آزمایش فشاری تک محوری این مزیت را نسبت به آزمایش برش مستقیم دارد که تنش و کرنش‌ها به شکل یکنواخت در آن ایجاد می‌شود (Das and Sobhan, 2016). همچنین سطح شکست، در ضعیف‌ترین قسمت رسی اتفاق می‌افتد. در این آزمایش نیز مانند آزمایش برش مستقیم تعداد ۴۲ نمونه در چرخه‌های تر و خشک شدن مختلف و رطوبت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از آزمایش فشاری تک محوری که در شکل ۷ ارائه شده است. مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی در قالب نموداری برای نمونه‌های تحت اثر چرخه‌های تر و خشک مشاهده می‌شود.

به این ترتیب، می‌توان دریافت که مشخصه‌های چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها با هم نسبت عکس دارند. این رابطه عکس بر اساس رابطه موهر-کولمب قابل توجیه است. با توجه به این رابطه، به ازای یک تنش برشی یکسان، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک رابطه عکس دارند.

برای درک بهتر تغییرات بوجود آمده در زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها، از نسبت تغییرات بوجود آمده در هر چرخه نسبت به حالت بدون چرخه تر و خشک شدن استفاده شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مورد بررسی با اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی، ۳/۵ درصد افزایش یافته است.



شکل ۷- مقاومت فشاری نمونه‌ها در اثر تر و خشک شدن متوالی آن‌ها

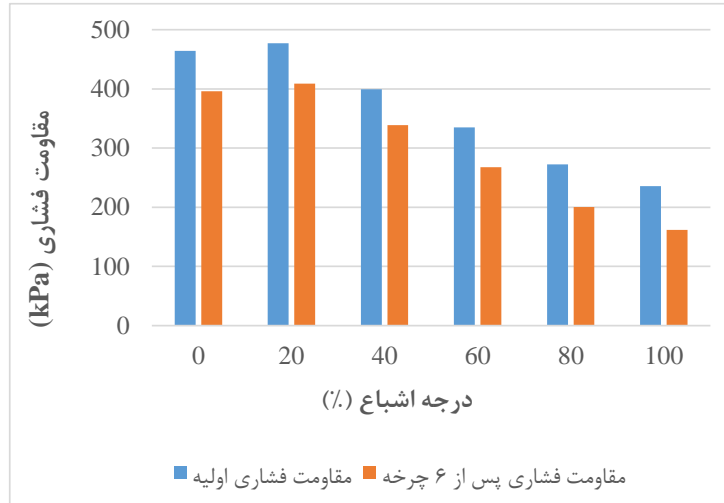
فشاری نمونه‌های مورد بررسی در چرخه ششم تر و خشک شدن رخ داده است. شکل ۸، مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش را در دو حالت بدون چرخه تر و خشک شدن و پس از اعمال ۶ چرخه را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری این پژوهش با نتایج محققین قبلی در تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن مختلف مقایسه شده است که در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

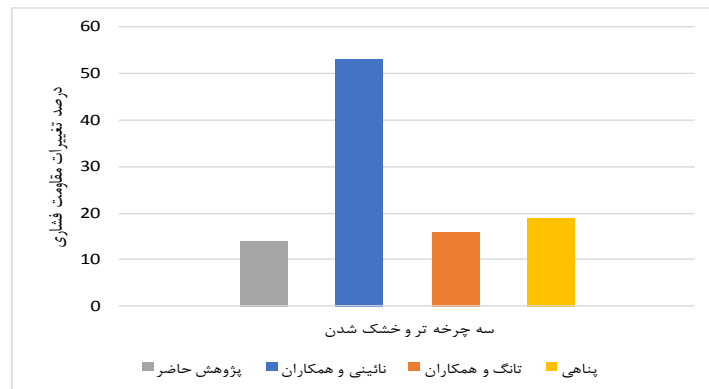
چنانکه مشاهده می‌شود نتایج این پژوهش با نتایج تانگ و همکاران تنها با ۱۲٪ اختلاف با یکدیگر تطابق خوبی با هم دارند. همچنین تطبیق خوبی بین نتایج پژوهش حاضر و نتایج پناهی مشاهده می‌شود. این در حالی است در سایر موارد اختلافات زیادی بین نتایج محققین مختلف و پژوهش حاضر مشاهده می‌شود (Tang et al. 2016 و پناهی، ۱۳۹۵).

مطابق شکل ۷، از آنجا که مقاومت فشاری تک محوری از مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ناشی می‌گردد، با افزایش تعداد چرخه‌ها و با افزایش درصد رطوبت، مقدار مقاومت فشاری کاهش یافته است. بر اساس نتایج ارائه شده، مشاهده می‌شود که بیشترین مقاومت فشاری به ترتیب مربوط به رطوبت ۲۰ و صفر درصد در نمونه‌ها است. باید توجه کرد که دلیل اصلی این امر، کاهش چسبندگی با افزایش درصد رطوبت در خاک غیر اشباع است و به اصطکاک مربوط نیست چرا که با افزایش رطوبت، زاویه اصطکاک چندان دچار تغییر نخواهد شد.

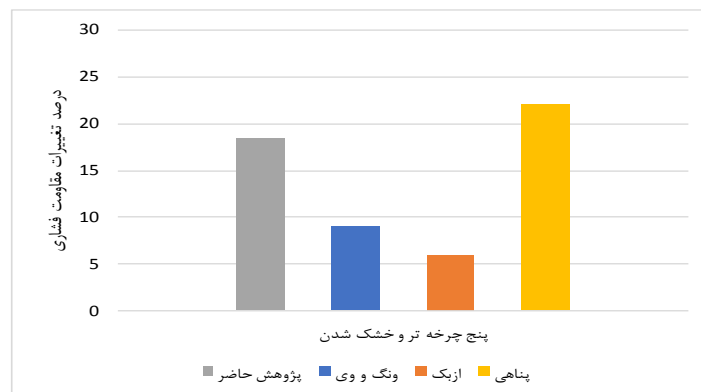
از دیگر دلایل کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی می‌توان به درز و ترک‌های ایجاد شده در اثر تر و خشک شدن‌های متوالی اشاره کرد. درز و ترک‌های بوجود آمده در نمونه‌های ساخته شده در اثر انبساط و انقباض نمونه در اثر تر و خشک شدن متوالی نمونه‌ها است. مشاهده می‌شود که بیشترین اثر کاهش در مقاومت



شکل ۸- تغییر مقاومت فشاری نمونه مورد آزمایش



شکل ۹- مقایسه نتایج مقاومت فشاری در سه چرخه تر و خشک شدن

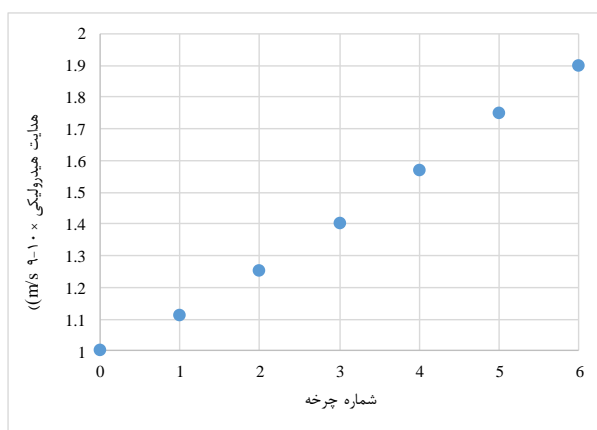


شکل ۱۰- مقایسه نتایج مقاومت فشاری در پنج چرخه تر و خشک شدن

است. این امر به دلیل افزایش حجم خلل و فرج در نمونه‌های مورد بررسی است که تحت اثر تر و خشک شدن متوالی قرار گرفته‌اند. این افزایش حجم خلل و فرج باعث می‌شود تا حجم منافذ خاک افزایش یافته و متعاقباً موجب افزایش هدایت هیدرولیکی شود.

همچنین، اثر چرخه‌های تر و خشک شدن‌های متوالی بر هدایت هیدرولیکی در رطوبت اشباع در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث افزایش ۱/۹ برابری هدایت هیدرولیکی نمونه‌های مورد بررسی شده

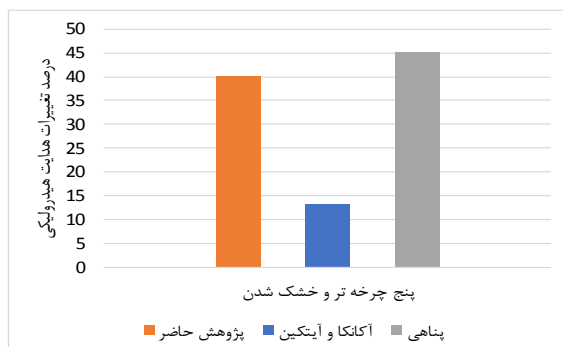




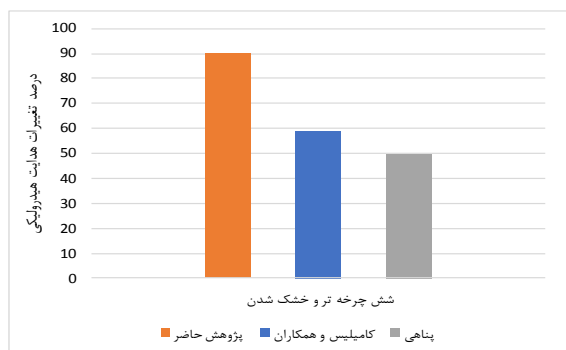
شکل ۱۱- تغییرات هدایت هیدرولیکی نمونه‌ها در اثر تر و خشک شدن متوالی آن‌ها

تفاوت تطبیق مناسب این دو روش را نشان می‌دهد. این در حالی است که نتایج حاصل از پژوهش کامیلیس و همکاران ۳۴٪ با نتایج پژوهش حاضر اختلاف دارد (De Akcanca and Aytekin, 2014, Camillis et al. 2016 و پناهی، ۱۳۹۵).

نتایج آزمایش هدایت هیدرولیکی این پژوهش با نتایج آکانکا و آیتکین در پنج چرخه تر و خشک شدن و با نتایج کداملیس و همکاران و پناهی در شش چرخه تر و خشک شدن مقایسه شد که به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. چنانکه مشاهده می‌شود نتایج پژوهش حاضر ۱۲/۵٪ با نتایج پناهی تفاوت دارد که این میزان



شکل ۱۲- مقایسه نتایج هدایت هیدرولیکی در پنج چرخه تر و خشک شدن

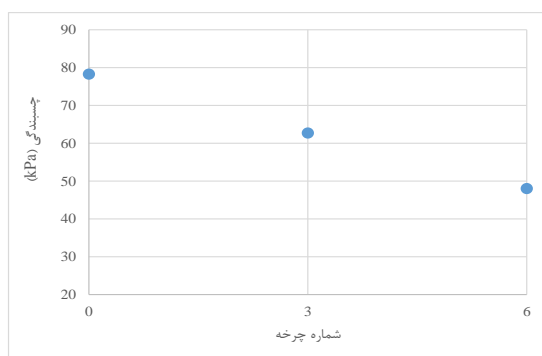


شکل ۱۳- مقایسه نتایج هدایت هیدرولیکی در شش چرخه تر و خشک شدن

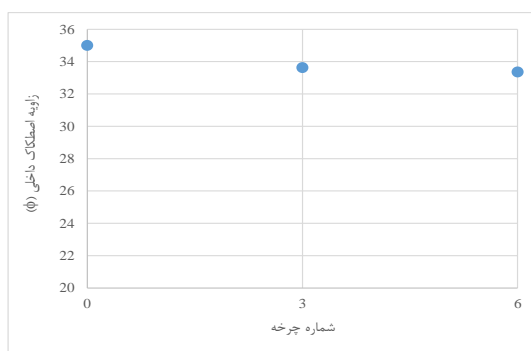
نمونه انجام شده است که سه نمونه بدون چرخه تر و خشک شدن، سه نمونه با سه چرخه تر و خشک شدن و سه نمونه با شش چرخه

افزون بر این، آزمایش سه‌محوری فشاری تحکیم‌یافته زهکشی شده در سه تنش همه جانبه ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال بر روی ۹

مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۱۴، مقادیر چسبندگی به دست آمده از آزمایش سه محوری فشاری تحکیم یافته زهکشی شده در چرخه های مختلف نسبت به صفر چرخه نشان می دهد.



شکل ۱۴- مقادیر چسبندگی در چرخه های مختلف تر و خشک شدن



شکل ۱۵- مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در چرخه های مختلف تر و خشک شدن

افزایش تعداد چرخه های تر و خشک شدن قابلیت نگهداشت آب توسط خاک کاهش پیدا کرده که این موضوع با نتایج آزمایش نفوذپذیری این پژوهش نیز مطابقت دارد. با افزایش تعداد چرخه ها، میزان افت درصد رطوبت کاهش پیدا می کند چنانچه بیشترین افت در دو چرخه اول تر و خشک شدن مشاهده می شود و با افزایش تعداد چرخه ها فاصله بین منحنی های مشخصه آب-خاک کاهش می یابد. در این بخش، نتایج تحلیل های همبستگی و رگرسیون بر روی آزمایش های انجام شده ارائه شده است. متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده در اینجا به صورت زیر است:

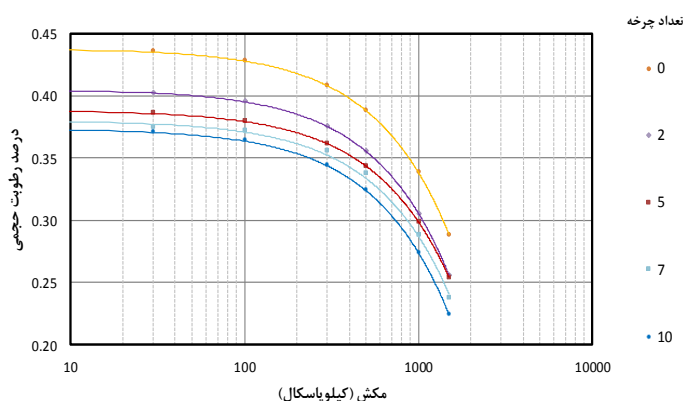
ضریب هدایت هیدرولیکی (H)، شماره چرخه (n) و درصد رطوبت داخلی (φ) و چسبندگی (C) و مقاومت فشاری (σ).

برای انجام این تحلیل ها، بر روی ۷۰ درصد داده های حاصل از آزمایش ها تحلیل همبستگی انجام شده که با توجه به نتایج جدول ANOVA معادلات رگرسیون زیر به دست آمده است:

همچنین، شکل ۱۵ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش سه محوری فشاری تحکیم یافته زهکشی شده در چرخه های مختلف ارائه می دهد.

چنانکه مشاهده می شود بعد از شش چرخه تر و خشک شدن چسبندگی ۳۸ درصد کاهش پیدا کرده و زاویه اصطکاک داخلی حدود ۴/۵ درصد کاهش پیدا کرده است. از مقایسه نتایج آزمایش سه محوری با آزمایش برش مستقیم نتیجه می شود که چرخه های تر و خشک شدن تأثیر زیادی بر کاهش چسبندگی خاک دارد اما اثر آن بر زاویه اصطکاک داخلی ناچیز است.

منحنی های مشخصه آب-خاک بدست آمده در این پژوهش را به ازای چرخه های مختلف تر و خشک شدن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. بر اساس این شکل به خوبی مشخص است که درصد رطوبت حجمی در تمام چرخه ها به ازای افزایش مکش، کاهش یافته است. چنانکه در شکل ۱۶ دیده می شود، هر چه تعداد چرخه های تر و خشک شدن افزایش پیدا کند منحنی مشخصه خاک و آب به سمت پایین تغییر مکان پیدا می کند که گویای این موضوع است که با



شکل ۱۶- منحنی مشخصه آب-خاک به ازای چرخه‌های مختلف

چرخه تر و خشک شدن (n) به دست آمده است.

$$\theta = -1.208 \times 10^{-4} \psi - 1.104 \times 10^{-4} n^3 + 0.002308 n^2 - 0.01771 n + 0.4383 \quad (7)$$

تصویر رابطه (7) در فضای سه بعدی درصد رطوبت حجمی - مکش - تعداد چرخه تر و خشک شدن در شکل ۱۷ ارائه شده است.

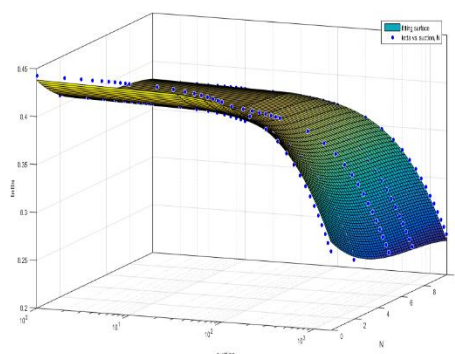
$$c = 119.979 - 5.22n - 0.512\omega \quad (3)$$

$$\phi = 28.019 + 0.132n + 0.011\omega \quad (4)$$

$$\sigma = 495.796 - 11.708n - 2.695\omega \quad (5)$$

$$3.61 \times 10^9 n - 2.05 \times 10^9 \quad (6)$$

با استفاده از پکیج curve fitting نرم افزار MATLAB، معادلات جدول فوق در رابطه (7) خلاصه شد. در رابطه حاصل شده، درصد رطوبت حجمی خاک ( $\theta$ ) به صورت تابعی از مکش ( $\psi$ ) و تعداد



شکل ۱۷- تصویر رابطه (7) در فضای سه بعدی درصد رطوبت حجمی - مکش - تعداد چرخه تر و خشک شدن

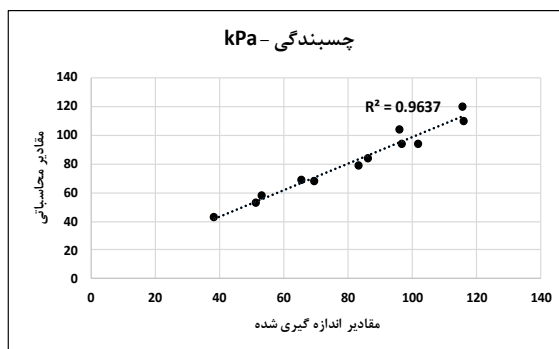
### نتیجه گیری

در این پژوهش اثر رطوبت و چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی خاک رسی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی اثر چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن بر مقاومت فشاری خاک نشان داد که با اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی بر روی نمونه‌های تهیه شده، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن نمونه‌ها، سبب افزایش شدت کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود به طوری که بیشترین میزان کاهش مقاومت فشاری

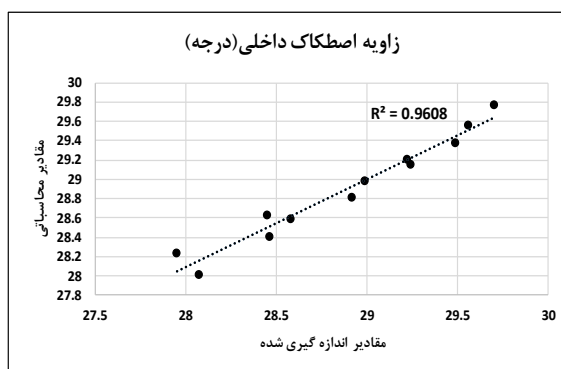
با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش‌ها روابط (3) تا (6) با استفاده از تحلیل رگرسیون بر روی 70 درصد داده‌ها حاصل شد. در نهایت روابط حاصله با 30 درصد باقی‌مانده داده‌ها صحت سنجی شد که نتایج آن در شکل‌های 18 تا 20 ارائه شده است. چنانکه در این شکل‌ها دیده می‌شود مقدار ضریب همبستگی ( $R^2$ ) در رابطه چسبندگی برابر 0/96، در رابطه زاویه اصطکاک داخلی برابر 0/96 و در رابطه مقاومت فشاری برابر 0/92 به دست آمده است که بیانگر تطبیق مناسب روابط به دست آمده با داده‌های حاصل از آزمایش‌ها است.

چسبندگی، انتظار می‌رفت تا اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های مورد بررسی شود. نتایج بدست آمده از انجام پژوهش حاضر همین امر را نشان داد. نتایج بدست آمده با انجام آزمایش برش مستقیم نشان داد که اعمال شش چرخه متوالی تر و خشک شدن باعث افزایش ۳/۵ درصدی این پارامتر می‌شود.

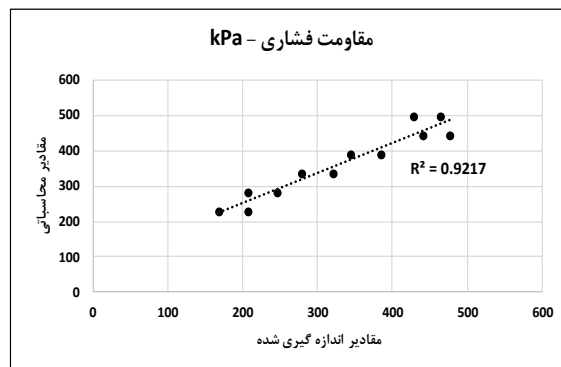
در چرخه سوم رخ می‌دهد. اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن بر روی نمونه‌های مورد بررسی نشان داد که اعمال چنین چرخه‌هایی باعث کاهش میزان چسبندگی خاک می‌شود. بیشترین کاهش میزان چسبندگی نمونه‌ها در سه چرخه اول رخ داد و در چهار چرخه بعدی شدت کاهش پارامتر چسبندگی کاهش یافت. به طوری که میزان چسبندگی نمونه‌ها با اعمال شش چرخه تر و خشک شدن ۵۰ درصد کاهش یافت. بر اساس رابطه موهر-کولمب و همچنین کاهش پارامتر



شکل ۱۸- صحت‌سنجی رابطه چسبندگی



شکل ۱۹- صحت‌سنجی رابطه چسبندگی



شکل ۲۰- صحت‌سنجی رابطه مقاومت فشاری

پایداری ساختمان، توزیع اندازه ذرات و سیستم منافذ خاک. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۶(۴). ص ۷۵۹-۷۶۷.

مهرموسوی، ز.، بهمنش، ج.، و محمدنژاد، بایرامعلی. ۱۳۹۲. تأثیر دوره‌های تر-خشک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس تثبیت شده با سیمان و آهک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷(۵). ص ۹۴۸-۹۴۰.

Akcanca, F. and Aytakin, M. 2014. Impact of wetting-drying cycles on the hydraulic conductivity of liners made of lime-stabilized sand-bentonite mixtures for sanitary landfills. *Environmental Earth Sciences*, 72, 59-66.

Aldaoood, A., Bouasker, M. and Al-Mukhtar, M. 2014. Impact of wetting-drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils. *Engineering Geology*, 174, pp.11-21.

Das, B. and Sobhan, K. 2016. *Principles of Geotechnical Engineering* 8th Ed. Instructor.;201601.

De Camillis, M., Di Emidio, G., Bezuijen, A. & Verástegui-Flores, R.D. 2016. Hydraulic conductivity and swelling ability of a polymer modified bentonite subjected to wet-dry cycles in seawater. *Geotextiles and Geomembranes*, 44, 739-747.

Estabragh, A.R., Moghadas, M. and Javadi, A.A., 2015. Mechanical behaviour of an expansive clay mixture during cycles of wetting and drying inundated with different quality of water. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(3), pp.278-289.

Goh, S.G., Rahardjo, H. and Leong, E.C., 2013. Shear strength of unsaturated soils under multiple drying-wetting cycles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(2), p.06013001.

Heitor, A., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C., 2014. Aspects related to the small strain shear modulus behaviour of compacted soils subjected to wetting and drying. In *Proceedings of the 2014 Geo-congress: Geo-characterization and Modelling for sustainability* (pp. 1433-1442).

ICOLD. 1995. *Dam failures statistical analysis*. International commission on Large Dam (ICOLD), Bulletin 99.

Kampala, A., Horpibulsuk, S., Prongmanee, N. and Chinkulkijniwat, A. 2013. Influence of wet-dry cycles on compressive strength of calcium carbide residue-fly ash stabilized clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(4), pp.633-643.

Md, S.H., Ling-wei, K. and Song, Y. 2016. Effect of

همچنین، نتایج بدست آمده از انجام آزمایش هدایت هیدرولیکی با بار افتان نشان داد که اعمال شش چرخه تر و خشک شدن متوالی هدایت هیدرولیکی نمونه‌های مورد بررسی را  $1/9$  برابر می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش رطوبت نمونه‌ها، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که مقاومت فشاری نمونه‌ها در رطوبت ۲۰ درصد یک افزایش نسبی داشته است. این افزایش نیز به دلیل نزدیک بودن این رطوبت به رطوبت بهینه خاک استفاده شده برای انجام این پژوهش بوده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که میزان رطوبت نمونه‌های مورد بررسی بر پارامتر چسبندگی آن‌ها نیز تأثیرگذار است. نمونه‌های با درصد رطوبت بالاتر چسبندگی کمتری نسبت به نمونه‌های با درصد رطوبت کمتر دارد. این امر برای تمامی رطوبت‌ها صادق بوده ولی برای رطوبت ۲۰ درصد به دلیل نزدیک بودن این مقدار رطوبت به رطوبت بهینه خاک مورد بررسی، صادق نیست. مطابق آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده، افزایش رطوبت نمونه‌ها باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌شود. بیشترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها مربوط به حالت اشباع نمونه‌ها بوده و کمترین مقدار آن مربوط به رطوبت ۲۰ درصد است. در پژوهش حاضر، اعمال شش چرخه تر و خشک شدن، موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها بین ۱۰ تا ۶۰ درصد شده است که این میزان کاهش، با افزایش میزان رطوبت افزایش یافته است.

همچنین، منحنی‌های مشخصه بدست آمده در این پژوهش به ازای چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن نشان داده است و بیانگر آن است که درصد رطوبت حجمی در تمام چرخه‌ها به ازای افزایش مکش، کاهش یافته است. همچنین با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن منحنی مشخصه آب - خاک به سمت پایین تغییر مکان پیدا می‌کند و قابلیت نگهداشت آب توسط خاک کاهش یافته است.

## منابع

پناهی، ق، ۱۳۹۵. تأثیر چرخه خیس و خشک شدن بر خواص فیزیکی خاک (مطالعه موردی: سد شهید یعقوبی). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی مشهد.

سلطانی، ا.، و رئیسی استبرق، ع. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی بهسازی یک خاک متورم شونده با استفاده از اعمال چرخه‌های مرطوب و خشک شدن متناوب. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۴(۱). ص ۴۹-۶۲.

صفادوست، آ. ۱۳۹۴. اثر تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن در بر

- drying and freezing–thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), pp.595-609.
- Wang, G. and Wei, X. 2014. Modeling swelling–shrinkage behavior of compacted expansive soils during wetting–drying cycles. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(6), pp.783-794.
- Tang, C.-S., Wang, D.-Y., Shi, B. and Li, J. 2016. Effect of wetting–drying cycles on profile mechanical behavior of soils with different initial conditions. *Catena*, 139, 105-116.
- Drying-Wetting Cycles on Saturated Shear Strength of Undisturbed Residual Soils. *American Journal of Civil Engineering*, 4(4), pp.143-150.
- O'Brien, A. 2007. Rehabilitation of urban railway embankments: investigation, analysis and stabilisation.
- Naeini, S.A., Gholampoor, N. and NajmosadatyYazdy, S.A. 2015. The Effect of Wetting-Drying Cycles and Plasticity Index on California Bearing Ratio of Lime Stabilized Clays. *Journal of Engineering Geology*, 9(2), p.2818.
- Özbek, A. 2014. Investigation of the effects of wetting–

## Investigation on Effect of Wetting and Drying Cycles on Mechanical Characteristics of Clay Materials

A. Talebolelm<sup>1</sup>, S.R. Khodashenas<sup>2\*</sup>, A. Akhtarpour<sup>3</sup>

Recived: Jan.21, 2020

Accepted: Mar.05, 2020

### Abstract

Impact of frequent wetting and drying cycles process on soil mechanical parameters is important issue that should be considered in selecting the borrow area of fine-grained soil in many structures such as earth dams' core, irrigation canal bed soil and road subbase. In this study, the effects of sequential wetting and drying cycles on physical and mechanical properties of clay soil is investigated. The uniaxial shear, triaxial shear, direct shear, swelling potential, hydraulic conductivity, and pressure plates tests were conducted on clay samples during wetting and drying cycles. The results showed that the wetting and drying cycles resulted in significant changes in the physical and mechanical properties of the soils and the compressive strength of the samples decreased by 32% after six wetting and drying cycles. The results of direct and triaxial shear tests also showed that application of 6 wetting and drying cycles reduced soil cohesion by about 40% but had no significant effect on the internal friction angle of the soil. Hydraulic conductivity tests showed that soil permeability increased about 19 times after wetting and drying. The pressure plates test, which shows the relationship between moisture content and suction in unsaturated soils (SWCC), revealed that as the number of cycles increased, the soil-water characteristic curve shifted downward and soil water retention capacity decreased.

**Keywords:** Cycle wetting and drying, Permeability, Shear strength, Compressive strength, Hydraulic conductivity, Soil Water Characteristic Curve

---

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(\*- Corresponding Author Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)