

بررسی تغییرات متوالی درجه اشباع بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی هسته سد خاکی (مطالعه موردی: سد دوستی)

افشین طالب العلم^۱، سعید رضا خداشناس^{۲*}، علی اخترپور^۳

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی آب و سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

*khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۳

چکیده

یکی از عوامل تاثیرگذار بر مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی در سدهای خاکی، اثر تر و خشک شدن متوالی خاک هسته است که ناشی از نوسانات زیادتر از آب مخزن در دوره‌های خشک طولانی مدت و آبیگری‌های مجدد است. در این پژوهش اثر تر و خشک شدن متوالی هسته رسی سد دوستی بررسی شد. پس از نمونه‌برداری از محل قرضه سد، آزمایش‌های تراکم استاندارد، تک محوری، برش مستقیم، هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه آب- خاک انجام و شش مرحله تر و خشک شدن متوالی بررسی شد. نتایج نشان داد که پس از شش چرخه تر و خشک شدن مقاومت فشاری نمونه‌ها ۳۲ درصد کاهش و همچنین میزان نفوذپذیری هسته سد حدود ۱/۹ برابر افزایش یافت. با انجام آزمایش منحنی مشخصه آب- خاک 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. در نهایت با استفاده از نرم افزار GEOSTUDIO یک مدل عددی از سد دوستی ساخته و برای درستی‌آزمایی مدل عددی از نتایج ابزار دقیق موجود استفاده شد. سپس با استفاده از داده‌های بدست آمده از آزمایشها در مدل عددی نشست هسته سد پس از ۶ چرخه تر و خشک شدن پیش‌بینی شد. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد در حالت پس از اعمال شش چرخه تر و خشک شدن در مقایسه با حالت بدون اعمال چرخه، افزایش ۳۸/۳ درصدی نشست هسته سد بوجود می‌آید.

واژگان کلیدی: چرخه تر و خشک شدن، منحنی مشخصه خاک - آب، مدل‌سازی عددی سد خاکی، سد دوستی

۱- مقدمه

نسبت به سدهای بتنی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، به شکلی

که طبق آمار سایت رسمی کمیسیون بین المللی سدهای بزرگ

امروزه سدهای خاکی به دلیل خاصیت شکل‌پذیری و هزینه کمتر

خاک را در پی دارد (Nacini 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). امدی 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 چرخه-های 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). موسوی و همکاران تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن را روی خصوصیات ژئوتکنیکی رس تثبیت شده با سیمان و آهک بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اعمال چرخه‌های رطوبتی روی رس‌های تثبیت شده با سیمان و آهک، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها را کاهش می‌دهد (Mehrmousavi et al. 2013).

سلطانی و رئیس 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 (Soltani and Estabragh. 2014). صفادوست با اعمال چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن روی 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 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 (Safadoost. 2015).

حدود ۶۴ درصد کل سدهای بزرگ جهان را سدهای خاکی تشکیل می‌دهند. 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 آبیگری از مخزن سد رخ می‌دهد. پس، همواره باید شرایط پایداری و تراوش سدهای خاکی احداث شده مورد بررسی قرار گیرد. همچنین بنا بر این تحلیل، وقتی در اثر خشکسالی، هسته سدهای خاکی خشک می‌شود و پس از بالا آمدن مجدد تراز آب مخزن، تر می‌شود پس شرایط به وجود آمده مانند شرایط اولین آبیگری سد است بنابراین بررسی موضوع تر و خشک شدن متوالی مصالح هسته ضروری به نظر می‌رسد (ICOLD. 1995).

ابرین با بررسی اثر تر و خشک شدن متوالی روی چند نمونه خاک رسی نشان داد که این فرآیند منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های خاک‌ها می‌شود (O'Brien, A. 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 مطالعه 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 بررسی شد که طی آن کاهش مقاومت فشاری خاک گزارش شد (Özbek, A. 2014). پژوهشی 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 پژوهش نائینی و همکاران اثر چرخه‌های رطوبتی تر و خشک شدن متوالی روی مقاومت فشاری و ظرفیت باربری خاک بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که اعمال این چرخه‌ها کاهش مقاومت فشاری و ظرفیت باربری نمونه‌های

ویژگی‌های مصالح وجود داشته باشد. مکش و درصد رطوبت پارامترهایی هستند که می‌توانند ویژگی‌های 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 آثار ضروری است.

مطالعات انجام شده در مورد اثر تر و خشک شدن خاک‌های رسی نشان می‌دهد که بیشتر این پژوهش‌ها در مورد مصالح به کار رفته در غیر از سدهای خاکی انجام شده است و در آنها منحنی مشخصه آب-خاک در نظر گرفته نشده است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر چرخه‌های تر و خشک شدن‌های متوالی هسته سدهای خاکی 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) روی نمونه‌های تهیه شده از منابع قرضه هسته سد دوستی مقاومت فشاری خاک تعیین شد. همچنین، چسبندگی خاک و زاویه اصطکاک داخلی نیز با انجام آزمایش برش مستقیم به دست آمد و برای تعیین هدایت هیدرولیکی خاک از آزمایش هدایت هیدرولیکی با بار افتان استفاده شد. همچنین منحنی مشخصه آب-خاک هسته سد دوستی نیز بدست آمد. نتایج حاصل از این پژوهش در تحلیل پایداری شیب بالادست سد دوستی و همچنین میزان نشست از آن قابل استفاده خواهد بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مشخصات سد دوستی

سد دوستی در شمال شرق ایران و در مرز استان خراسان رضوی با ترکمنستان روی رودخانه مرزی هریرود واقع شده است. رودخانه هریرود از کوه‌های افغانستان سرچشمه می‌گیرد و مساحت حوضه آبریز آن تا محل پل خاتون بالا ۴۱۹۶۲ کیلومتر مربع است که حدود ۲۷۱۱۱ کیلومتر مربع آن در افغانستان، ۱۴۴۴۰ کیلومتر مربع آن در ایران و ۴۱۱ کیلومتر مربع در ترکمنستان واقع است. محل سد دوستی در حدود ۱۸۰ کیلومتری مشهد، ۷۵

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 روی یک نمونه خاک رسی که با خاکستر کلسیم کاربیت تثبیت شده بود، نتیجه گرفتند که وجود خاکستر کلسیم کاربیت 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 روی یک نمونه خاک تثبیت شده با آهک، نتیجه گرفتند که وجود آهک در خاک منجر به افزایش مقاومت خاک می‌شود و بنابراین می‌توان از آهک برای کنترل کاهش مقاومت خاک در برابر چرخه‌های متوالی تر و خشک بهره برد (Aldaood et al. 2014).

چن و همکاران اثر چرخه‌های تر و خشک شدن بر مقاومت برشی رس متراکم غیر اشباع را با استفاده از آزمایش برش مستقیم مکش کنترل بررسی کردند. آن‌ها دریافتند اولین چرخه تر و خشک شدن نسبت به چرخه‌های بعدی بیشترین اثر را بر مقاومت خاک دارد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد خاک در تنش‌های نرمال کم رفتاری شکننده و در تنش‌های نرمال زیاد رفتاری انعطاف پذیر از خود نشان می‌دهد (Chen et al., 2018).

در پژوهش دیگری اثر چرخه تر و خشک شدن بر مقاومت فشاری تک محوری مخلوط باطله آهن و خاک رس بررسی شد. یه و همکاران مشاهده کردند مقاومت ۱۴ روزه خاک با افزایش تعداد چرخه تر و خشک شدن ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد درحالی‌که مقاومت ۲۸ روزه خاک همواره با افزایش تعداد چرخه‌ها روند کاهشی دارد (Ye et al., 2018). همچنین کنسولی و همکاران اثر چرخه تر و خشک شدن بر مقاومت فشاری و مدول برشی ترکیب رس و سیمان را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش‌های آن‌ها نشان داد با افزایش تعداد چرخه تر و خشک شدن، مقاومت فشاری خاک تا سه چرخه افزایش می‌یابد و پس از آن مقدار ثابتی دارد اما مدول برشی تا سه چرخه کاهش یافته و سپس ثابت می‌شود (Consoli et al., 2018).

برای مطالعه رفتار هیدرومکانیکی در محیط‌های چند فازی مانند خاک‌های اشباع و غیر اشباع لازم است که شناخت کاملی از

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی سد دوستی (Rezaei and Khamechian, 2015)



Fig.1. Geographical location of Doosti dam

شکل ۲. مقطع سد دوستی (Toosab Consulting Engineering Co., 2015)

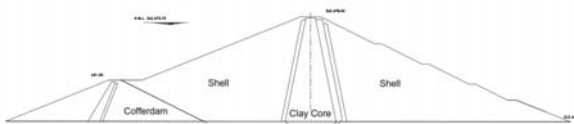


Fig. 2. Cross-section of Doosti dam 2000

جدول ۱. مشخصات کلی سد دوستی (Mozafari et al. 2012)

Height from Riverbed (m)	Height from foundation (m)	Crest length (m)	Crest width (m)	Length of reservoir (km)	Volume of dam body (MCM)	Total reservoir capacity (MCM)	Live capacity of the reservoir (MCM)
75	79	655	15	35	6.08	1250	950

Table 1. General characteristic of Doosti dam

جدول ۲. آزمایش‌های انجام شده روی نمونه خاک

Test	Standard	No. of Tests
Particle Size Analysis	AASHTO T-88-70	1
Compaction (standard effort)	ASTM D698-00a	3
Atterberg Limits	ASTM D4318	1
Direct Shear	ASTM D6528	42
Compressive Strength	ASTM D2166	42
Permeability	ASTM D5856	18
Soil-Water Characteristic Curve	ASTM D6836-02	33
Wetting – Drying Cycles	ASTM D559-15	6

Table 2. List of Tests performed on soil specimen

شد. همچنین، آزمایش تراکم استاندارد به منظور تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص حداکثر خشک بر اساس استاندارد ASTM D 698-00a انجام شد.

منحنی دانه‌بندی خاک استفاده شده در آزمایش‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.

کیلومتری جنوب شهر سرخس و ۴ کیلومتری بالادست پل خاتون در ۳۵ درجه و ۵۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی و ۶۱ درجه و ۹ دقیقه و ۵۰ ثانیه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). این سد از نوع خاکی-سنگریزه‌ای با هسته رسی است (شکل ۲) (Mozafari et al. 2012). حجم مخزن سد برابر ۱۲۵۰ میلیون متر مکعب، (MCM) و سایر مشخصات کلی سد دوستی در جدول (۱)، ارائه شده است.

خاک استفاده شده در این پژوهش از محل قرضه ریزدانه سد تهیه شد. نمونه‌های خاک برداشت شده از عمق ۲۰ سانتی-متری به بعد آن برداشت شد تا خاک زراعی تلقی نشود. آزمایش‌های انجام گرفته روی نمونه خاک و استاندارد مربوطه و تعداد هر آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است. بعد از تهیه نمونه خاک از منابع قرضه ریزدانه سد، خاک مورد نظر الک شده تا کلوخه‌ها و نخاله‌های آن جدا شوند. سپس در معرض هوا خشک شد و پس از آن آزمایش دانه‌بندی با الک و هیدرومتر بر اساس استاندارد ASHTO T-88-70 انجام

شکل ۳. نمودار دانه‌بندی خاک مورد بررسی در این پژوهش

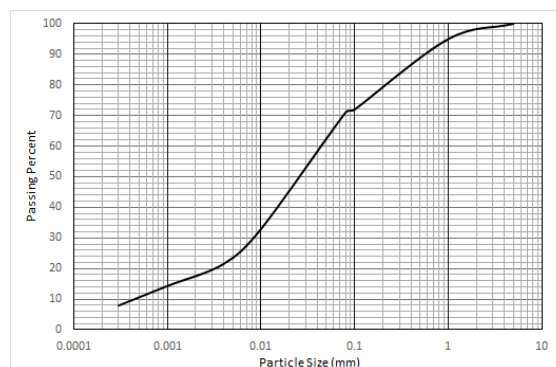


Fig. 3. Grading of the investigated soil

روی نمونه خاک بررسی شده آزمایش حدود اتربرگ نیز انجام شده است که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش حدود اتربرگ

Plasticity index (%)	Plastic limit (%)	Liquid limit (%)
8	17	25

Table 3. Atterberg limits test results

با توجه به نتایج فوق و بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید خاک بررسی شده در این پژوهش، در گروه CL قرار گرفته است. شکل (۴) بیانگر درصد رطوبت بهینه (حدود ۱۴ درصد) و جرم مخصوص حداکثر خشک خاک (حدود ۱/۸۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) مورد بررسی در این پژوهش است.

شکل ۴: نمودار تراکم خاک

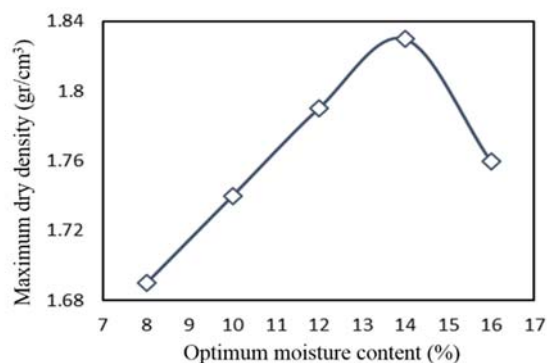


Fig. 4. Diagram of soil compaction

۲-۲- دستگاه‌های مورد نیاز

در این پژوهش به منظور تعیین مقامت برشی خاک، از دستگاه برش مستقیم که در شکل (۵) نشان داده شده است، استفاده شد. آماده سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش طبق استاندارد

شکل ۵. دستگاه برش مستقیم مورد استفاده در این پژوهش



Fig. 5. Direct shear machine used in this project

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری به صورت کرنش کنترل انجام شده است و کرنش ۱۵ درصد معادل کرنش شکست نمونه در نظر گرفته شده است. از آنجایی که نمونه آزمایش شده در معرض هوای آزمایشگاه قرار دارد، مدت زمان انجام نباید خیلی طولانی باشد. طولانی شدن مدت زمان آزمایش موجب کاهش رطوبت نمونه شده و موجب افزایش مقاومت آن می‌شود. توصیه شده است که مدت زمان انجام آزمایش حدود ۱۰ دقیقه باشد.

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 انتخاب روشی که مناسب نوع و شرایط خاک باشد، می‌توان با دقت قابل قبولی برای کارهای عملی مقدار آن را تعیین کرد. برای انجام این پژوهش، از روش بار افتان برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی استفاده شد. شکل (۶)، دستگاه مورد استفاده برای آزمایش هدایت هیدرولیکی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

شکل ۶. دستگاه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با بار افتان



Fig. 6. Hydraulic conductivity measurement apparatus

شکل ۷. دستگاه صفحات فشاری

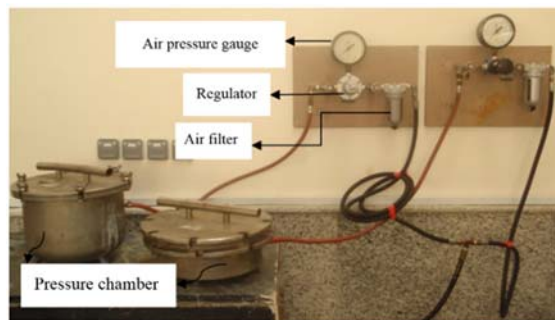


Fig. 7. Pressure Plates Apparatus

به منظور رسم منحنی مشخصه آب و خاک نمونه مورد نظر در این پژوهش، به ازای هر چرخه تر و خشک شدن، دو نمونه مورد آزمایش صفحات فشاری برای اعمال مکش قرار گرفت. به این صورت که ابتدا نمونه‌ها در دستگاه صفحات فشاری قرار گرفت و با اعمال مکش در فضای خلا سبب خروج آب از نمونه شد. ابتدا مکشی برابر با ۰/۳، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار (۳۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) به نمونه وارد شد و درصد رطوبت وزنی نیز در هر مکش بطور جداگانه بدست آمد. با توجه به نتایج آزمایشگاه و استفاده از روش کلوخه و پارافین، مقدار چگالی ظاهری نمونه خاک برابر با ۱/۴ گرم بر سانتی متر مکعب بدست آمد.

اعمال چرخه تر و خشک شدن متوالی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D 559-15 انجام شد. بر اساس استاندارد ASTM D 559-15، برای اشباع شدن نمونه‌ها، به مدت ۵ ساعت در مخزن آب نگهداری شدند. پس از آن برای اعمال خشک شدن، نمونه‌ها به آون منتقل شدند. بر اساس استاندارد ASTM D 559-15، دمای آون برای خشک کردن نمونه‌ها ۷۲ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴۲ ساعت، در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر رطوبت و چرخه‌های تر و خشک شدن-

های متوالی بر مقاومت برشی

شکل (۸ و ۹) اثر چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن را بر مقاومت برشی خاک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۸)، بیشترین مقدار چسبندگی مربوط به رطوبت‌های ۲۰ درصد و صفر درصد بوده و کمترین مقدار آن در رطوبت اشباع بوده است. بنابراین، می‌توان

منحنی مشخصه آب - خاک رابطه بین مکش بافتی با میزان آب حجمی موجود درون خاک یا درجه اشباع خاک است که با عنوان منحنی نگهداشت آب-خاک^۱ نیز معرفی می‌شود. اندازه‌گیری مکش بافتی به صورت مستقیم در آزمایشگاه‌های مکانیک خاک بیشتر با استفاده از روش جابه‌جایی محوری^۲ انجام می‌شود. اجزای دستگاه صفحات فشاری شامل محفظه فشار، صفحات سرامیکی متخلخل^۳ با مقدار هوای ورودی مشخص، مبدل‌های اندازه‌گیری فشار هوا در محفظه و فشار آب در خط زهکشی، شلنگ خروج آب از صفحه سرامیکی، شلنگ کاپیلاری و پمپ فشار هوا است. دیسک‌های سرامیکی بیشتر از مصالح سرامیکی از جنس کائولینیت ساخته می‌شوند. برای استفاده از دیسک سرامیکی باید دیسک مزبور را اشباع نمود. هنگامی که دیسک سرامیکی کاملاً با آب اشباع شده باشد، به واسطه وجود نیروهای کشش سطحی به وجود آمده درون حفره‌های آن، همچون غشایی که شامل مجموعه‌ای از پوسته‌های قابل انقباض است در مقابل عبور جریان هوای ایجاد شده درون محفظه فشار، مقاومت می‌کند. اختلاف فشار بین هوای بالای دیسک سرامیکی و آبی که در زیر دیسک قرار دارد اصطلاحاً مکش بافتی می‌نامند. بیشترین مکش قابل اندازه‌گیری در این روش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال است.

در این پژوهش، منحنی مشخصه آب-خاک مطابق با روش استاندارد ASTM D6836-02 آمده است، تعیین شد. به منظور اجرای این آزمایش، در پژوهش حاضر از دستگاه صفحات فشاری آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد بهره‌گیری شد. این دستگاه دارای ۴ صفحه سرامیکی با مقدار هوای ورودی ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال است. شکل ۷، دستگاه صفحات فشاری مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل (۹) می‌توان چنین نتیجه گرفت که با کاهش رطوبت، کاهش قابل توجهی در مقدار زاویه اصطکاک داخلی رخ نمی‌دهد زیرا زاویه اصطکاک داخلی بیشتر متأثر از تنش همه جانبه است و تغییرات رطوبت خاک اثر چندانی بر آن ندارد. چنانچه در شکل (۹) نشان داده شده، اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن تنها باعث حدود یک درجه تغییر در زاویه اصطکاک داخلی شده است پس می‌توان نتیجه گرفت اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن تأثیر چندانی بر زاویه اصطکاک داخلی خاک نداشته (۳/۵ درصد) و کاهش چشمگیر چسبندگی، سبب کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود.

۲-۳- اثر رطوبت و چرخه‌های تر و خشک شدن‌های متوالی بر مقاومت فشاری

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. 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 بررسی شدند. نتایج بدست آمده از آزمایش فشاری تک محوری که مقاومت فشاری نمونه‌های بررسی شده را نشان می‌دهد در شکل (۱۰) ارائه شده است.

شکل ۱۰. مقاومت فشاری نمونه‌ها در اثر تر و خشک شدن متوالی آن‌ها

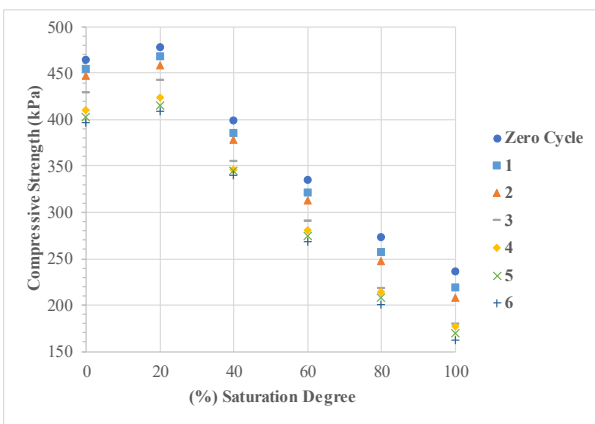


Fig. 10. Compressive strength of specimens during wetting-drying cycles

نتیجه گرفت که افزایش رطوبت نمونه‌ها باعث 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. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تر و خشک شدن آثار منفی بر چسبندگی نمونه‌ها داشته و مقدار این پارامتر را کاهش داده است. اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن باعث ایجاد تورم در نمونه‌های بررسی شده می‌شود. این تورم باعث افزایش حجم خلل و فرج شده و رفته رفته تراکم نمونه‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش تراکم نمونه‌ها موجب کاهش ۵۰ درصدی چسبندگی نمونه‌ها می‌شود.

شکل ۸. چسبندگی نمونه‌ها در اثر تر و خشک شدن متوالی آن‌ها

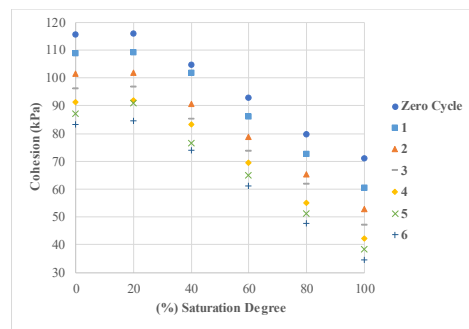


Fig. 8. Cohesion of specimens during wetting-drying cycles (شکل ۹) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های

بررسی شده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی مربوط به رطوبت اشباع و کمترین مقدار آن مربوط به رطوبت ۲۰ درصد نمونه‌ها است.

شکل ۹. زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها در اثر تر و خشک شدن متوالی

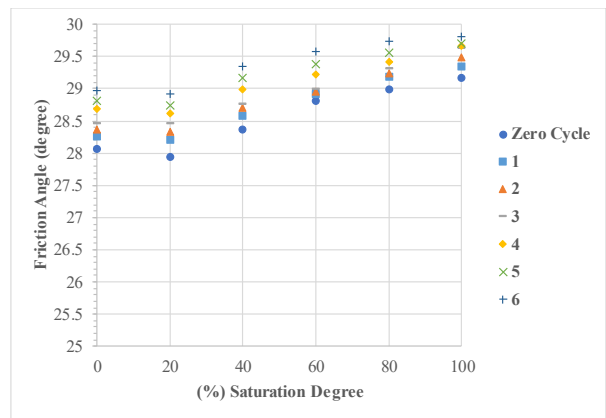


Fig. 9. Friction angle of specimens during wetting-drying cycles

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

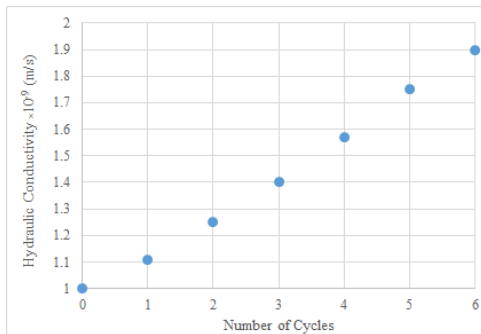


Fig. 11. Variations in hydraulic conductivity due to wetting–drying cycles

۴-۳- تعیین منحنی مشخصه آب - خاک

شکل (۱۲) منحنی‌های مشخصه بدست آمده در این پژوهش را به ازای چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن نشان داده است. بر اساس این شکل به خوبی مشخص است که درصد رطوبت حجمی در تمام چرخه‌ها به ازای افزایش مکش، کاهش یافته است. چنانکه در شکل (۱۲) دیده می‌شود هر چه تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن افزایش پیدا کند منحنی مشخصه خاک و آب به سمت پایین تغییر مکان پیدا می‌کند که گویای این موضوع است که با افزایش تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن قابلیت نگهداشت آب توسط خاک کاهش پیدا کرده که این موضوع با نتایج آزمایش نفوذپذیری این پژوهش نیز هم‌پوشی دارد. با افزایش تعداد چرخه‌ها میزان افت درصد رطوبت کاهش پیدا می‌کند چنانچه بیشترین افت در دو چرخه اول تر و خشک شدن مشاهده می‌شود و با افزایش تعداد چرخه‌ها فاصله بین منحنی‌های مشخصه آب - خاک کاهش می‌یابد. روابط ریاضی نمودارهای شکل (۱۲) در جدول (۴) ارائه شده است.

شکل ۱۲. منحنی مشخصه آب-خاک به ازای چرخه‌های مختلف

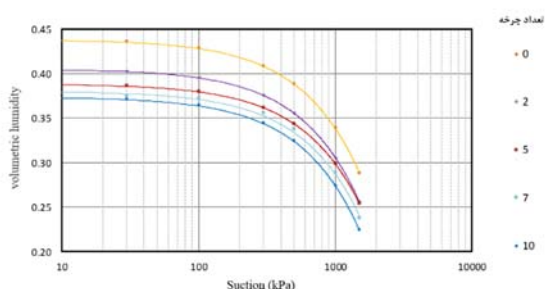


Fig. 12. Soil water characteristic curve for different numbers of wetting–drying cycles

مطابق شکل (۱۰)، از آنجا که مقاومت فشاری تک محوری از مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ناشی می‌شود، با افزایش تعداد چرخه‌ها و با افزایش درصد رطوبت، مقدار مقاومت فشاری کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که بیشترین مقاومت‌های فشاری به ترتیب مربوط به ۲۰ درصد و صفر درصد رطوبت در نمونه‌ها است. این افزایش نیز به دلیل نزدیک بودن این رطوبت به رطوبت بهینه خاک استفاده شده برای انجام این پژوهش بوده است. باید توجه نمود 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.

یکی از دلایل این امر، افزایش حجم نمونه‌ها در اثر تر شدن‌های متوالی خاک است. خلل و فرج خاک‌ها در اثر تر و خشک شدن‌های متوالی افزایش یافته و تراکم اولیه خود را از دست می‌دهند و رفته رفته سست می‌شوند. این موضوع یکی از مهمترین دلایل کاهش مقاومت فشاری در خاک‌ها است. از دیگر دلایل کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بررسی شده 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 کاهشی در مقاومت فشاری نمونه‌های بررسی شده در چرخه ششم تر و خشک شدن رخ داده است.

۳-۳- اثر چرخه‌های تر و خشک شدن‌های متوالی بر هدایت هیدرولیکی

شکل (۱۱) هدایت هیدرولیکی نمونه‌های تحت اثر تر و خشک شدن متوالی را در رطوبت اشباع نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی باعث افزایش ۱/۹ برابری هدایت هیدرولیکی نمونه‌های بررسی شده است. این امر به دلیل افزایش حجم خلل و فرج در نمونه‌های بررسی شده 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 به دنبال آن موجب افزایش هدایت هیدرولیکی شود.

۳-۵- مدل ریاضی و رگرسیون

روی نتایج آزمایش‌های انجام شده یک تحلیل همبستگی و رگرسیون انجام شد. متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده به صورت زیر است:

ضریب هدایت هیدرولیکی (H)، شماره چرخه (n) و درصد رطوبت (ω)؛ متغیرهای وابسته: زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) و مقاومت فشاری (σ)

روی ۷۰ درصد داده‌های حاصل از آزمایش‌ها و به کمک نرم‌افزار SPSS، تحلیل همبستگی انجام شده که معادلات رگرسیون زیر به دست آمده است:

$$c = 119.979 - 5.229n - 0.512\omega \quad (۱)$$

$$\phi = 28.019 + 0.152n + 0.011\omega \quad (۲)$$

$$\sigma = 495.796 - 11.708n - 2.695\omega \quad (۳)$$

$$H = 3.61 \times 10^9 n - 2.05 \times 10^9 \quad (۴)$$

۳-۶- درستی آزمایشی روابط

با توجه به داده‌های حاصل از آزمایش‌ها روابط ۱ تا ۴ با استفاده از تحلیل رگرسیون روی ۷۰ درصد داده‌ها حاصل شد. در نهایت روابط به دست آمده با ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها درستی آزمایشی شد که نتایج آن در اشکال (۱۴ تا ۱۶) ارائه شده است. چنانکه در این اشکال دیده می‌شود مقدار ضریب همبستگی (R^2) در رابطه چسبندگی برابر ۰/۹۶، در رابطه زاویه اصطکاک داخلی برابر ۰/۹۶ و در رابطه مقاومت فشاری برابر ۰/۹۲ به دست آمده است که بیانگر هم‌پوشی مناسب روابط به دست آمده با داده‌های حاصل از آزمایش‌ها است.

شکل ۱۴. درستی آزمایشی رابطه مقاومت فشاری

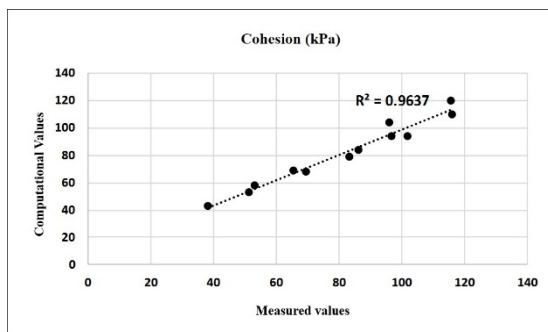


Fig. 14. Verification of cohesion equation

جدول ۴. رابطه خطوط مشخصه آب - خاک

Number of cycle	Equation
0	$y = 0.4427e^{-3 \times 10^{-4} x}$
2	$y = 0.4105e^{-3 \times 10^{-4} x}$
5	$y = 0.3952e^{-3 \times 10^{-4} x}$
7	$y = 0.3862e^{-3 \times 10^{-4} x}$
10	$y = 0.3795e^{-3 \times 10^{-4} x}$

Table 4. Equations of soil water characteristic curve

در جدول (۴)، پارامتر y معرف محور قائم یعنی درصد رطوبت حجمی و x معرف محور افقی یعنی مکش (کیلوپاسکال) است.

نتایج آزمایش تعیین منحنی مشخصه آب - خاک با نتایج پژوهش سایم و کنگ مقایسه شد که نتایج آن در شکل (۱۳) ارائه شده است (Sayem and Kong, 2016). چنانکه در این شکل مشخص است، روند کلی کاهش درصد رطوبت حجمی با افزایش مکش در تعداد سیکل مختلف در هر دو پژوهش یکسان است اما با توجه به متفاوت بودن مشخصات خاک آزمایش شده، نقطه شروع کاهش درصد رطوبت در این پژوهش با تحقیق سایم و کنگ متفاوت است. همچنین در این پژوهش با توجه به محدودیت دستگاه صفحات فشاری تا مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به نمونه‌ها اعمال شده در صورتی که در پژوهش سایم و کنگ تا مکش ۱۰۰۰۰ کیلوپاسکال به نمونه‌ها اعمال شده و روند کاهش درصد رطوبت بهتر نشان داده شده است.

شکل ۱۳. مقایسه نتایج آزمایش تعیین منحنی مشخصه آب - خاک

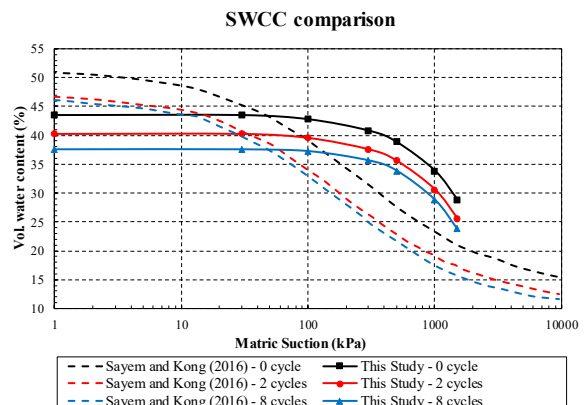


Fig. 13. SWCC test comparison

ساخت بدون چرخه تر و خشک شدن را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است این پارامترهای از گزارش منابع قرضه سد دوستی استخراج شده است (Toosab Consulting Engineering Co.) (2000).

با توجه به نتایج آزمایش برش مستقیم، پس از اعمال شش چرخه تر و خشک شدن، مقدار چسبندگی هسته به ۳۵ کیلوپاسکال کاهش یافت. البته این نکته قابل توجه است که نتایج مدل سازی عددی نشان داد که تغییر چسبندگی به تنهایی تاثیر ناچیزی روی نشست و آنالیز تنش و کرنش خواهد داشت. همچنین، به منظور درستی آزمایشی مدل عددی در شرایط پس از چرخه‌های تر و خشک شدن، مقدار مدول الاستیسیته به اندازه ۲۰ درصد که برابر مقدار درصد کاهش مقاومت فشاری است، کاهش یافت. شکل‌های (۱۷ تا ۲۰)، به ترتیب شکل کلی مدل عددی سد دوستی، کانتور تنش کل، کانتور تغییر مکان قائم (نشست) و کانتور تغییر مکان افقی حاصل از مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهند. چنانکه در شکل (۱۸) نشان داده شده بیشترین تنش، به دلیل افزایش سربار در نواحی زیر هسته سد اتفاق افتاده است. دلیل ناپیوستگی تنش در مرز بین هسته و پوسته پدیده قوس زدگی است که به دلیل تفاوت سختی مصالح هسته نسبت به پوسته اتفاق افتاده است. شکل (۱۹) تغییر مکان قائم سد را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه پی آبرفتی نفوذپذیری نسبتاً بالایی دارد، بیشترین نشست در مرکز هسته اتفاق افتاده است. شکل (۲۰) نیز نشان دهنده آن است که تغییر مکان افقی در سد به صورت متقارن اتفاق افتاده است.

جدول ۵. مشخصات مصالح به کار رفته در مدل عددی سد دوستی برای شرایط پایان ساخت بدون چرخه تر و خشک شدن

Material properties	Unit Weight (kN/m ³)	Saturated specific gravity (kN/m ³)	Internal friction angle	Cohesion (kPa)	Elastic modulus (kPa)	Poisson's ratio	Dilation angle
Core	18.5	1.9	30	70	7000	0.2	0
Shell	22	23	36.4	0	90000	0.2	6
Filter	21.4	23	40	0	50000	0.2	5
Drainage	21.4	23	40	0	50000	0.2	5
Foundation	22.6	26	35	0	1600000	0.27	0

Table 5. Specifications of materials used in the numerical model of Doosti dam for end of construction conditions without wetting-drying cycles

شکل ۱۵. درستی آزمایشی رابطه چسبندگی

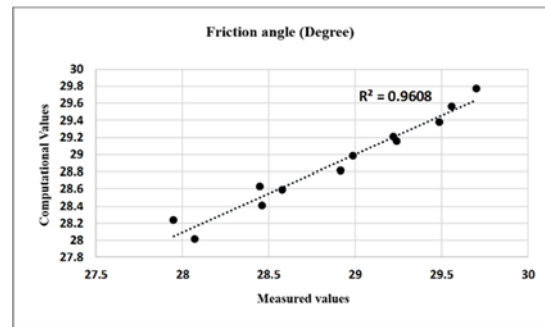


Fig. 15. Verification of internal friction angle equation

شکل ۱۶. درستی آزمایشی رابطه زاویه اصطکاک داخلی

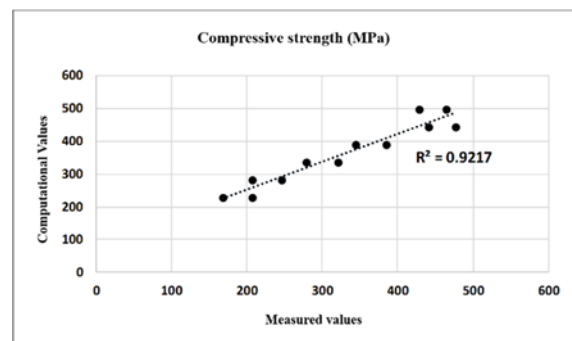


Fig. 16. Verification of compressive strength equation

۴- مدل سازی عددی

برای بررسی اثر تر و خشک شدن هسته بر رفتار سد دوستی، مدل عددی سد با استفاده از نرم افزار GEOSTUDIO ساخته شد. مدل رفتاری استفاده شده در این پژوهش، مدل موهر-کولمب است. برای درستی آزمایشی مدل، نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج ابزار دقیق قرائت شده مقایسه شد. این مدل‌سازی برای شرایط پایان ساخت و اعمال شش چرخه تر و خشک شدن روی هسته انجام شد. جدول (۵)، مشخصات مصالح به کار رفته در مدل نهایی سد دوستی برای شرایط پایان

شکل ۱۸: کانتور تنش کل در شرایط پایان ساخت

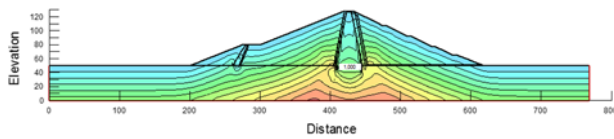


Fig. 18. Contour of total stress at end of construction condition

شکل ۲۰: کانتور تغییر مکان افقی در شرایط پایان ساخت

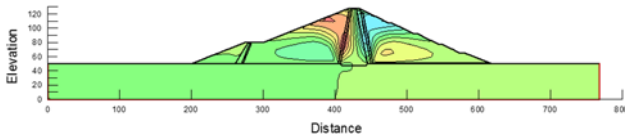


Fig. 20. Contour of horizontal displacement at end of construction condition

شکل ۱۷: نمای کلی مدل عددی سد دوستی در شرایط پایان ساخت

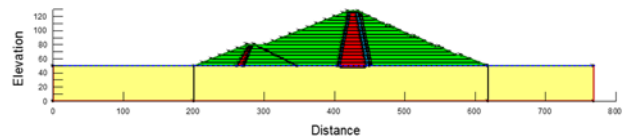


Fig. 17. General layout of numerical model of Doosti dam at end of construction condition

شکل ۱۹: کانتور تغییر مکان قائم (نشست) در شرایط پایان ساخت

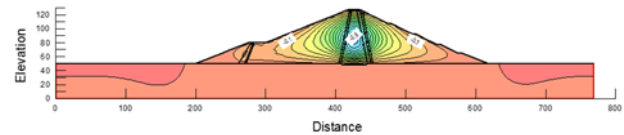


Fig. 19. Contour of vertical displacement (settlement) at end of construction condition

نشست پس از شش چرخه تر و خشک شدن را نسبت به حالت بدون اعمال چرخه نشان می‌دهد.

شکل ۲۲: مقایسه نشست هسته قبل از انجام چرخه تر و خشک شدن و پس از اعمال شش چرخه در مدل سازی عددی

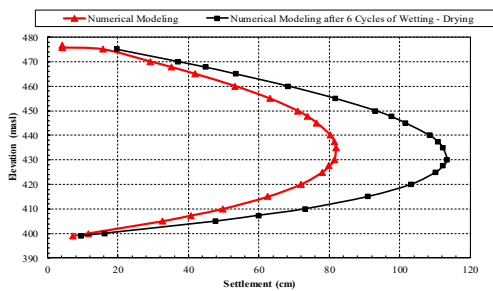


Fig. 22. Comparison of core settlement before application of wetting-drying cycles and after applying six cycles

۵- مقایسه با نتایج سایر محققین

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری این پژوهش با نتایج پژوهشگران قبلی در تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن مختلف مقایسه شده است که در شکل‌های (۲۳ و ۲۴) ارائه شده است. شکل ۲۳: مقایسه نتایج مقاومت فشاری در سه چرخه تر و خشک شدن

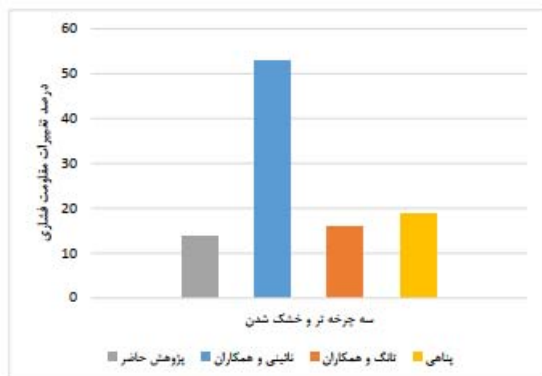


Fig. 23. Comparison of compressive strength for 3 during wetting-drying cycles

شکل (۲۱) مقایسه نشست هسته در مدل عددی با نتایج ابزار دقیق سد دوستی را نشان می‌دهد. براساس داده‌های نشان داده شده در این شکل، بیشترین مقدار نشست تقریباً در ارتفاع میانه هسته رخ داده که مقدار آن برابر ۸۲ سانتی‌متر است. همان‌گونه که در شکل (۲۱) دیده می‌شود، داده‌های به دست آمده از نتایج ابزار دقیق، هماهنگی خوبی با داده‌های به دست آمده از مدل عددی دارد. البته بیشترین نشست در مدل (۸۲ سانتی‌متر) نسبت به اندازه‌گیری‌ها (۹۲ سانتی‌متر) حدود ۱۱ درصد بیشتر است، ولی مدل رفتار سد را به دقت مناسبی نشان داده است.

شکل ۲۱: درستی آزمایشی نشست هسته در مدل عددی با نتایج ابزار دقیق سد دوستی در شرایط پایان ساخت

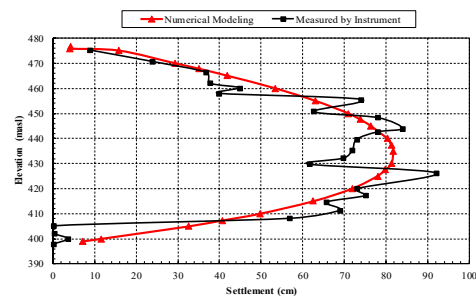


Fig. 21. Verification of core settlement in numerical model with instrumentation result at end of construction condition

شکل (۲۲) مقایسه نشست هسته قبل از انجام چرخه تر و خشک شدن و بعد از شش چرخه را در مدل سازی عددی انجام شده نمایش می‌دهد. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که پس از اعمال شش چرخه تر و خشک شدن، بیشترین مقدار نشست در همان ارتفاع میانه هسته رخ می‌دهد که مقدار آن به ۱۱۳/۴ سانتی‌متر تغییر می‌کند. این امر، افزایش ۳۸/۳ درصدی را در

شکل ۲۶. مقایسه نتایج هدایت هیدرولیکی در شش چرخه تر و خشک شدن

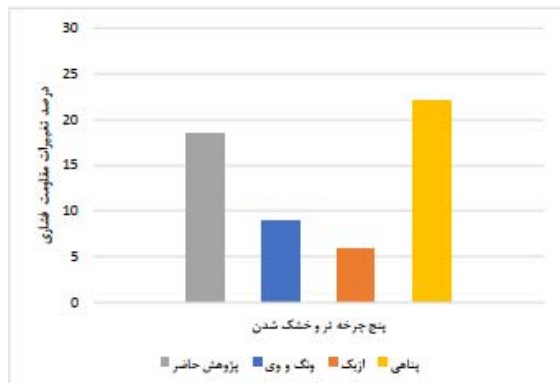


Fig. 26. Comparison of hydraulic conductivity for 6 wetting-drying cycles

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر رطوبت و تر و خشک شدن‌های متوالی هسته رسی سد دوستی بررسی شد. 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 از منابع قرضه هسته سد دوستی، 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 در چرخه سوم رخ می‌دهد. در حالت کلی اعمال شش چرخه، باعث کاهش ۳۲ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌های بررسی شده است.

اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن روی نمونه‌های بررسی شده 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 شکلی که میزان چسبندگی نمونه‌ها با اعمال شش چرخه تر و خشک شدن ۵۰ درصد کاهش یافت. نتایج نشان داد اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن حدود ۳/۵ درصد زاویه اصطکاک داخلی خاک را افزایش داده و تأثیر چندانی بر آن ندارد.

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 بررسی شده

شکل ۲۴. مقایسه نتایج مقاومت فشاری در پنج چرخه تر و خشک شدن



Fig. 24. Comparison of compressive strength for 5 during wetting-drying cycles

چنانکه مشاهده می‌شود نتایج این پژوهش با نتایج تانگ و همکاران تنها با ۱۲٪ اختلاف با یکدیگر هماهنگی خوبی با هم دارند. همچنین هماهنگی خوبی بین نتایج این پژوهش و نتایج پنهانی مشاهده می‌شود. این در حالی است در سایر موارد اختلافات زیادی بین نتایج پژوهشگران مختلف و این پژوهش مشاهده می‌شود (Tang et al. 2016 و پنهانی، 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 پنهانی در شش چرخه تر و خشک شدن مقایسه شد که به ترتیب در شکل‌های (۲۵ و ۲۶) ارائه شده است. چنانکه مشاهده می‌شود نتایج این پژوهش ۱۲/۵٪ با نتایج پنهانی تفاوت دارد که این میزان تفاوت هماهنگی 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 (Akanca and Aytekin, 2014 و De Camillis et al. 2016 و پنهانی، ۱۳۹۵).

شکل ۲۵. مقایسه نتایج هدایت هیدرولیکی در پنج چرخه تر و خشک شدن

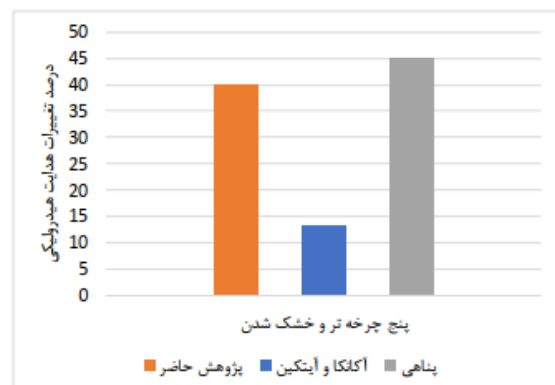


Fig. 25. Comparison of hydraulic conductivity for 5 wetting-drying cycles

- Portland cement blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018 Aug 1;30(8):04018174.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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).
- [7] ICOLD. 1995. Dam failures statistical analysis. International commission on Large Dam (ICOLD). Bulletin 99.
- [8] 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.
- [9] Md S.H. Ling-wei K. and Song Y. 2016. Effect of Drying-Wetting Cycles on Saturated Shear Strength of Undisturbed Residual Soils. *American Journal of Civil Engineering*, 4(4), pp.143-150.
- [10] Mehrmousavi Z. Behmanesh J. Mohammadnejad B. 2013. Effect of wetting - drying cycles on geomechanical properties of cement and lime stabilized clay. *water and soil journal (agricultural industries and sciences)*, 27(5), pp 940-948. (In Persian)
- [11] Mozafari M. Raeisi E. and Zare M. 2012. Water leakage paths in the Doosti Dam, Turkmenistan and Iran. *Environmental Earth Sciences*, vol. 65, pp. 103-117, 2012.
- [12] Naeini S.A. Gholampoor N. and Najmosadaty Yazdy 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.
- [13] O'Brien A. 2007. Rehabilitation of urban railway embankments. investigation, analysis and stabilisation.
- [14] Özbek A. 2014. Investigation of the effects of Portland cement blends. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018 Aug 1;30(8):04018174.
- را ۱/۹ برابر می‌کند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش رطوبت نمونه‌ها، مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که میزان رطوبت نمونه‌های بررسی شده بر پارامتر چسبندگی آن‌ها نیز تاثیر گذار 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. در این پژوهش، 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 و احتمال فرسایش درونی و ناپایداری سد را افزایش می‌دهد.
- مدل‌سازی عددی سد دوستی نشان داد نتایج مدل‌سازی با نتایج ابزار دقیق سد هماهنگی بسیار خوبی دارد و بر اساس نتایج مدل عددی پیش‌بینی می‌شود پس از اعمال ۶ چرخه تر و خشک شدن، نشست هسته سد ۳/۳۸ درصد افزایش یابد.

مراجع

- [1] Aldaood 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.
- [2] Chen R, Xu T, Lei W, Zhao Y, Qiao J. Impact of multiple drying-wetting cycles on shear behaviour of an unsaturated compacted clay. *Environmental earth sciences*, 2018 Oct 1;77(19):683.
- [3] Consoli NC, Quiñónez Samaniego RA, González LE, Bittar EJ, Cuisinier O. Impact of severe climate conditions on loss of mass, strength, and stiffness of compacted fine-grained soils-

- [18] Soltani A. Estabragh A. 2014. Experimental Investigations of expansive clay during wetting-drying cycles. *Journal of soil and water resources protection*. 4(1), pp 633-643. (In Persian)
- [19] Toosab Consulting Engineering Co. 2000. Harirrud Project. second phase studies of Doosti reservoir dam reports. (In Persian)
- [20] 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.
- [21] Ye H, Chu C, Xu L, Guo K, Li D. Experimental studies on drying-wetting cycle characteristics of expansive soils improved by industrial wastes. *Advances in Civil Engineering*. 2018;2018.
- wetting–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.
- [15] Rezaei H and Khamechian M. 2015. Investigation of position marlston in rock mass engineering classification system. case study: Doosti Dam. *engineering geology journal*. 10(2), pp 3427-3444. (In Persian)
- [16] Safadoost A. 2015. Effect of wetting-drying cycles on soil texture, grain size distribution and soil voids system. *Journal of Iran water and soil researches*. 46(4), pp 759-767. (In Persian)
- [17] Sayem HM, Kong LW. Effects of drying-wetting cycles on soil-water characteristic curve. *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*. 2016(peece).

Investigation of Frequently Changes in Degree of Saturation on Physical and Mechanical Characteristics of Core of Soil Dam (Case Study: Doosti Dam)

Afshin Talebolelm¹, Saeed Reza Khodashenas^{2*}, Ali Akhtarpour³

1. Ph.D. in Hydraulic structure, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,

*2. Professor, Department of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3. Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Today, the embankment dams are considered more prominent than concrete dams because of its formation and lower cost. According to the official site of the International Commission on Large Dams, embankment dams account for about 64 percent of the world's total dams. The results of the statistical analysis of the International Commission on Large Dams showed that the main cause of damage of half of the embankment dam is erosion that usually occurs during the first impounding of the dam reservoir. Therefore, the stability and leakage conditions of the embankment dam should always be examined. Moreover, the analysis showed that drying of the embankment dam due to drought and re-watering the reservoir is similar to the first dam impounding and therefore it is necessary to investigate it. One of the factors affecting the physical and mechanical properties of embankment dams is the effect of drying and wetting cycles of the core soil due to high fluctuations in reservoir water levels during prolonged dry periods and re-watering. In this study, the effects of frequent wetting and drying cycles of Doosti dam clay core were investigated. Investigation of the effect of frequent cycles of wetting and drying on compressive strength of soil showed that by applying drying and wetting cycles on specimens prepared from Doosti dam core borrow area, the compressive strength of specimens decreased. Increasing the number of wetting and drying cycles of the specimens increases the intensity of the compressive strength reduction of the specimens so that the greatest decrease in compressive strength occurred in the third cycle. Application of wetting and drying cycles on the specimens showed that application of such cycles reduced the amount of soil cohesion. The highest decrease in cohesion of the specimens occurred in the first three cycles and in the next four cycles, the intensity of cohesion parameter decreased. The cohesion of the specimens was reduced by 50% by applying six drying and wetting cycles. Results showed that with increasing number of drying – wetting cycles, there is no significant change in internal friction angle. Furthermore, the results of the hydraulic conductivity test showed that the application of six cycles of drying and wetting increased the hydraulic conductivity by 1.9 times. Furthermore, the characteristic curves obtained in this study showed different drying and wetting cycles, indicating that the percentage of volumetric water content in all cycles decreased due to increased suction. The soil-water characteristic curve also shifts downward with increasing number of wetting and drying cycles, decreasing soil water retention capacity and increasing the possibility of internal erosion and dam instability. Finally, Doosti dam numerical modeling was performed using GEOSTUDIO software in end of construction conditions and in two cases without drying and wetting cycle and with six drying and wetting cycles. The results obtained for numerical modeling in general were very consistent with Doosti dam instrument readings. Moreover, the results of the core settlement after the six drying and wetting cycles compared to the non-cycled state in numerical modeling showed a 38.3% increase in the dam core settlement.

KEYWORD: Drying and wetting cycle, Reservoir fluctuations, Soil-water characteristic curve, Numerical modeling, Doosti dam * **Corresponding Author: Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir**