

مقاله علمی-پژوهشی

توسعه مدل‌های ریاضی جهت تعیین تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر پارامترهای فیزیکی مکانیکی خاک‌های ریزدانه

خشیایار خداشناس^۱، سعیدرضا خداشناس^{۲*}، نفیسه سید نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۳

خلاصه

با توجه به طبیعت آسیب‌پذیر سدهای خاکی در مقایسه با سدهای بتنی، باید تمامی عوامل مؤثر بر پایداری این سدها مورد بررسی و مطالعه قرار بگیرند. تر و خشک شدن متوالی هسته سد خاکی از عوامل مهمی است که می‌تواند روی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی هسته و بدنه سد مؤثر باشد که این تغییرات باعث افزایش خطرات بعدی مانند نشست، پایداری و نشست می‌شوند. این موضوع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران بسیار محتمل است. تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام شده است و بعضی از این تحقیقات مدل‌های ریاضی مناسب برای داده‌های خود ارائه کرده‌اند، ولی به دلیل اینکه نتایج هر تحقیق مرتبط با خاک مورد بررسی اختصاصی همان مطالعه می‌باشد، این مدل‌ها برای داده‌های سایر محققین قابل استفاده نیست. در تحقیق حاضر، پس از جمع‌آوری ۸۶۶ داده‌ی آزمایشگاهی از ۲۳ تحقیق گذشته، تأثیر تر و خشک شدن متوالی هسته رسی سدهای خاکی بر پارامترهای فیزیکی مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت و روابط ریاضی چند متغیره بین پارامترهای فیزیکی مکانیکی و تعداد دورتر و خشک شدن به دست آمد. این تحقیق نشان داد که اثر تر و خشک شدن روی پارامترهای مکانیکی بسیار مهم بوده و باید در تحلیل سازه‌ای سد نیز مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: چسبندگی، خاک رس، سد خاکی، منحنی مشخصه آب-خاک، هدایت هیدرولیکی

مقدمه

جدول ۱- دلایل شکست سدهای خاکی و درصد هر کدام بر اساس تحقیق انجام شده توسط ICOLD (پناهی، ۱۳۹۵)

30%	عبور آب از روی بدنه سد
25%	شسته شدن خاک بدنه در اثر وجود زهاب
14%	گسیخته شدن دامنه‌ها
13%	شسته شدن کناره تونل‌ها
6%	تراکم نامناسب
7%	زلزله
5%	علل نامشخص

سدهای خاکی و سنگریزه‌ای جزو متداول‌ترین سدها هستند که بیش از ۷۵ درصد سدهای جهان را تشکیل می‌دهند. از جمله دلایل رشد چشمگیر احداث سدهای خاکی می‌توان به طبیعی بودن و کم‌هزینه بودن مصالح مورد استفاده در ساخت این نوع سدها، قابلیت شکل‌پذیری آن‌ها نسبت به سدهای بتنی و عدم نیاز به پی بسیار مستحکم می‌باشد. با توجه به طبیعت آسیب‌پذیر سدهای خاکی، مسئله پایداری آن‌ها دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) با مطالعه بر روی ۲۰۰۰ سد، دلایل تخریب سدهای خاکی را به شرح جدول ۱ اعلام کرده است (پناهی، ۱۳۹۵).

انجمن ژئوتکنیک نروژ (NGI) نیز دلایل شکست سدهای خاکی در سال‌های مختلف بهره‌برداری را مطابق جدول ۲ ارائه داده است (پناهی، ۱۳۹۵). از این آمار می‌توان نتیجه گرفت که خطرهای تهدیدکننده سد در ۵ سال اول شروع بهره‌برداری بیشترین مقدار را دارند (مهر موسوی، ۱۳۹۲). با توجه به آمارهای ارائه شده در جدول‌های ۱ و ۲ می‌توان نتیجه گرفت که سدهای خاکی پس از احداث، طی مراحل آگیری و بهره‌برداری لازم است که به‌طور مرتب و دقیق بررسی شوند (پناهی، ۱۳۹۵).

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

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

۳- دانشجوی دکتری، گروه امار، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(* نویسنده مسئول (Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.2.10.9

جدول ۲- دلایل شکست سدهای خاکی در سال‌های مختلف بهره‌برداری بر اساس تحقیق انجام‌شده توسط NGI (پناهی، ۱۳۹۵)

سال‌های بهره‌برداری	عبور آب از روی بدنه سد	شسته شدن کناره تونل‌ها	شسته شدن خاک بدنه سد در اثر وجود زه‌آب	گسیخته شدن دامنه‌ها
۰ - ۱	٪۹	٪۲۳	٪۱۶	٪۲۹
۱ - ۵	٪۱۷	٪۵۰	٪۳۴	٪۲۴
۵ - ۱۰	٪۹	٪۹	٪۱۳	٪۱۲
۱۰ - ۲۰	٪۳۰	٪۹	٪۱۳	٪۱۲
۲۰ - ۳۰	٪۱۳	٪۵	٪۱۲	٪۱۲
۳۰ - ۴۰	٪۱۰	٪۴	٪۶	٪۱۱
۴۰ - ۵۰	٪۹	-	٪۶	-
۵۰ - ۱۰۰	٪۳	-	-	-

طولانی‌مدت دارد، اهمیت پیدا می‌کند. جدول ۳ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه بررسی تر و خشک شدن رس آورده شده است.

یکی از مواردی که کمتر مورد توجه قرار گرفته است، تأثیر تر و خشک شدن‌های متوالی هسته سد خاکی می‌باشد. این مسئله به‌ویژه در ایران که اکثراً دارای اقلیم خشک می‌باشد و خشک‌سالی‌های

جدول ۳- خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام‌شده توسط محققان در زمینه بررسی تر و خشک شدن رس

تغییرات	آزمایش	خاک	محقق
۲,۱ برابر شده است.	هدایت هیدرولیکی	رس	آذری (۱۳۸۵)
٪۳۶ کاهش زاویه اصطکاک داخلی	برش مستقیم	رس	صالحیان و همکاران (۱۳۹۱)
٪۸,۴ کاهش چسبندگی	برش تک‌محوری	رس	مقدس و همکاران (۱۳۹۱)
٪۶۰ کاهش مقاومت فشاری	پایداری خاکدانه‌ها	رس	صفا دوست (۱۳۹۴)
٪۱۳,۸ کاهش مقاومت	برش تک‌محوری	رس	(O'Brien, 2007)
٪۴۳ کاهش مقاومت فشاری	برش تک‌محوری	رس	(Kampala et al., 2013)
٪۴۲ کاهش مقاومت فشاری	هدایت هیدرولیکی	رس	(Akanca and Aytekin, 2014)
۱۳ برابر شده است	برش تک‌محوری	رس	(Shi et al., 2015)
٪۷۵ کاهش مقاومت فشاری	برش سه محوری	رس	(Sayem et al., 2016)
٪۱۵ افزایش زاویه اصطکاک داخلی			
٪۱۴ کاهش چسبندگی			

کاهش ۲۷/۵ درصدی چسبندگی، افزایش ۳/۵ درصدی در زاویه اصطکاک داخلی و افزایش ۹۰ درصدی هدایت هیدرولیکی می‌گردد، همچنین نتیجه گرفت این تغییرات باعث کاهش پایداری سد نیز خواهد شد. با آزمایش منحنی مشخصه آب-خاک که بیانگر رابطه میان درصد رطوبت و مکش در خاک‌های غیراشباع است او مشخص کرد که 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 می‌یابد (طالب العلم، ۱۳۹۹).

با توجه به اهمیت تأثیر نامطلوب تر و خشک شدن متوالی هسته رسی سدهای خاکی بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک، این تحقیق جهت دستیابی به مدل آماری مناسب و جامع برای بررسی این

علاوه بر موارد اشاره‌شده در جدول ۳، چند تحقیق در زمینه اثر تر و خشک شدن متوالی بر هسته سد خاکی انجام شده است. پناهی در سال ۱۳۹۵ با انجام آزمایشاتی، تأثیر سیکل‌های تر و خشک شدن را بر هسته رسی سد شهید یعقوبی مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که این پدیده باعث کاهش ۲۷ درصدی مقاومت فشاری، کاهش ۸۰ درصدی چسبندگی، افزایش ۲,۷ درصدی در زاویه اصطکاک داخلی و افزایش ۵۸ درصدی هدایت هیدرولیکی نمونه‌های موردبررسی می‌شود (پناهی، ۱۳۹۵).

طالب العلم در سال ۱۳۹۹، با انجام آزمایشاتی، تأثیر سیکل‌های تر و خشک شدن را بر هسته رسی سد دوستی مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که این پدیده باعث کاهش ۳۲ درصدی مقاومت فشاری،

تحقیق مورد بررسی قرار گرفت، جدول ۴ تحقیق‌های مورد استفاده و تعداد داده‌های اخذ شده از هر یک آورده شده است. جدول ۵ مجموع داده‌های اخذ شده در مورد هر پارامتر آورده شده است. به دلیل اختلاف در خواص فیزیکی و مکانیکی انواع خاک‌های رسی بررسی شده، نرم‌افزار SPSS برای به دست آوردن روابط دقیق‌تر، بخشی از داده‌ها را حذف کرده و داده‌های مشابه هم را مورد بررسی قرار می‌دهد. در جدول ۵ مجموع داده‌های استخراج شده و مجموع داده‌های غربال شده به وسیله SPSS نشان داده شده است.

تغییرات و تعیین ارتباط بین آن‌ها انجام شد. در تحقیق حاضر، با جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی ۲۳ تحقیق گذشته، مدل ریاضی مناسبی با استفاده از نرم‌افزار SPSS، که بتواند اثر تر و خشک شدن متوالی خاک بر هر یک از پارامترهای فیزیکی مکانیکی هسته را نشان دهد به دست آمده است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش در مجموع تعداد ۸۶۶ داده مختلف از ۲۳

جدول ۴- تحقیقات مورد استفاده در این پژوهش

نویسنده مقاله	داده‌های استفاده شده	تعداد داده
(Dong et al., 2019)	چسبندگی	۲۸
(Ling and Song., 2016)	چسبندگی	۱۴
(Khan., 2016)	چسبندگی	۱۴
(Liu et al., 2015)	چسبندگی	۲۴
(Wang et al., 2016)	چسبندگی SWCC ^۱	۱۵ ۵۰
(Wan and Xu., 2015)	چسبندگی مقاومت برشی SWCC	۵ ۲۰ ۴۵
(Hosseini.Md et al., 2016)	چسبندگی مقاومت برشی	۵ ۲۰
(Wang et al., 2016)	چسبندگی مقاومت برشی	۸ ۱۲
(Ye et al., 2010)	چسبندگی	۱۲
(Ma et al., 2015)	چسبندگی مقاومت برشی	۵۶ ۵۶
(Estabragh and Moghadas., 2015)	مقاومت فشاری	۶۰
(De Camilis., 2016)	مقاومت فشاری	۱۸
(Kampala and Horpibulsuk., 2014)	مقاومت فشاری	۳۶
(Rayhani et al., 2007)	هدایت هیدرولیکی	۴۲
(Lu et al., 2015)	هدایت هیدرولیکی	۲۵
(Nowamooz and Masrouri., 2008)	هدایت هیدرولیکی	۵۴
(Ozbek., 2014)	مقاومت برشی	۳۰
(Goh and Rahardjo., 2013)	مقاومت برشی	۵۶
(Naeini and Gholampoor., 2015)	مقاومت برشی	۴
(Sayem and Kong., 2016)	SWCC	۶۵
(Wang and Hu., 2016)	SWCC	۳۲
(Stoltz and Masrouri., 2014)	SWCC	۴۵
(Tang and Wang., 2016)	SWCC	۱۵

جدول ۵- مجموع تعداد داده‌های مربوط به هر پارامتر

نام داده	تعداد کل
چسبندگی	۱۸۱
مقاومت برشی	۱۹۸
مقاومت فشاری	۱۱۴
هدایت هیدرولیکی	۱۲۱
SWCC	۲۵۲
تعداد کل داده‌ها	۸۶۶

معمولاً در تحقیقات آزمایشگاهی، همه اطلاعات داده‌های مورد

استفاده آورده نمی‌شوند. در جدول ۶ اطلاعات موجود در پژوهش‌های استفاده‌شده در این تحقیق آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، همه داده‌های آزمایشگاهی در این تحقیقات به‌صورت کامل ارائه نشده‌اند. با توجه به آنکه تعداد تحقیقاتی که حاوی دو پارامتر محدوده حد روانی (LL) و محدوده حد خمیری (PL) بودند بیشتر بود، این دو پارامتر به همراه تعداد دور تر و خشک شدن به‌عنوان متغیرهای مستقل و پارامترهای مکانیکی مورد بررسی به‌عنوان متغیر-های وابسته در روابط ریاضی در نظر گرفته شدند.

جدول ۶- مجموعه اطلاعات مورد نیاز در پژوهش‌های استفاده‌شده

نام محقق	نوع پارامتر	تعداد چرخه تر و خشک شدن (N)	محدوده رطوبت بهینه	محدوده D ₅₀	محدوده حد روانی Liquid limit	محدوده حد خمیری Plastic limit
(Dong et al., 2019)	چسبندگی	۶	۱۷,۵	-	۴۵,۳۰	۲۲,۱۰
(Ling and Song., 2016)	چسبندگی	۶	۹۷,۵۱	-	۴۵,۳۰	۲۲,۱۰
(Khan, 2016)	چسبندگی	۵	-	-	۶۰	۲۷
(Liu et al., 2015)	چسبندگی	۱۲	۱۷,۰۹	۰,۶	۳۳,۴۲	۱۹,۷۱
(Wang et al., 2016)	چسبندگی SWCC	۴	-	-	-	-
(Wan and Xu, 2015)	مقاومت برشی SWCC	۴	۱۸	۰,۵۵	۳۸	۲۸
(Hosseini.Md et al., 2016)	چسبندگی مقاومت برشی	۸	-	۰,۹۵	۵۷,۱	۳۰,۷
(Wang et al., 2016)	چسبندگی مقاومت برشی	۶	-	-	۴۷,۳۰	۲۶,۵
(Ye et al., 2010)	چسبندگی	۵	۱۲	۰,۷	-	-
(Ma et al., 2015)	چسبندگی مقاومت برشی	۸	-	-	-	-
(Estabragh and Moghadas, 2015)	مقاومت فشاری	۱۵	-	۰,۸	۴۶,۶	۲۲,۱
(De Camilis, 2016)	مقاومت فشاری	۵	۱۵	-	۳۷	۲۰
(Kampala and Horpibulsuk, 2014)	مقاومت فشاری	۶	-	-	-	-
(Rayhani et al., 2007)	هدایت هیدرولیکی	۲	۲۰	۰,۵۵	۴۰	۲۲
(Lu et al., 2015)	هدایت هیدرولیکی	۴	۱۹	-	۴۸,۵	۲۶,۲
(Nowamooz and Masrouri, 2008)	هدایت هیدرولیکی	۴	۲۵	-	۵۵	۲۵
(Ozbek, 2014)	مقاومت برشی	۴	-	-	۵۴	۲۵
(Goh and Rahardjo, 2013)	مقاومت برشی	۸	۱۵,۴۵	۰,۵۵	۳۸,۷۵	۱۹,۰۲
(Naeini and Gholampoor, 2015)	مقاومت برشی	۵	۳۲,۵	-	۵۷	۳۶
(Sayem and Kong, 2016)	SWCC	۸	-	۰,۴۵	۵۷,۱	۳۰,۷
(Wang and Hu, 2016)	SWCC	۶	-	-	۴۰	۲۲
(Stoltz and Masrouri, 2014)	SWCC	۴	۱۷,۹	-	۴۸,۵	۲۶,۲
(Tang and Wang, 2016)	SWCC	۸	-	۰,۶۰	۳۸,۵	۱۹,۲

خمیری با مقاومت فشاری، مقاومت برشی، چسبندگی، ضریب هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه آب-خاک با استفاده از نرم‌افزار SPSS و آزمون پیرسون مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۷ آورده شده است.

مطابق جدول ۷ تمامی پارامترهای مورد بررسی در آزمون کولموگروف-اسمیرنوف از توزیع نرمال برخوردارند (Sig=0.000). بنابراین برای تحلیل همبستگی آن‌ها از روش پیرسون استفاده شد. بر اساس تحلیل همبستگی پیرسون در همه پارامترهای فوق، شماره چرخه تر و خشک شدن، حد روانی (LL) و حد خمیری (PL)، همبستگی معنی‌داری با پارامتر موردنظر داشتند (Sig= 0.000). در ادامه تحلیل واریانس رگرسیون انجام شد، به عبارت دیگر وجود رابطه خطی بین متغیرهای مستقل (تعداد چرخه تر و خشک شدن، PL و LL) و متغیر وابسته (چسبندگی، مقاومت فشاری، ...) بررسی شد. در نتایج این تحلیل مشاهده شد، معنی‌داری آزمون آنالیز واریانس^۵ (ANOVA) کمتر از ۰,۰۵ می‌باشد، بنابراین نتیجه گرفته شد که متغیرهای مستقل دارای رابطه خطی با متغیر وابسته می‌باشند. در ادامه، مدل‌های ریاضی به دست آمده برای پارامترهای مختلف ارائه شده است.

جدول ۷- نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (K-S)

Kolmogorov smirnov			
	Statistic	dif	Sig
Cohesion	۰,۱۰۸	۱۶۰
Compressive Strength	۰,۴۱۰	۱۱۴
Hydrolic Conductivity	۰,۳۷۳	۱۱۵
Shear Strength	۰,۱۸۳	۱۴۲
SWCC	۰,۱۰۵	۳۷۶

مدل ریاضی چسبندگی

بر اساس جدول ۸ شماره چرخه تر و خشک شدن، حد روانی (LL) و حد خمیری (PL)، همبستگی معناداری با پارامتر چسبندگی دارند

نتایج رگرسیون برای پارامتر چسبندگی نشان می‌دهد، پارامتر R^2 دارای مقدار قابل قبول ۰/۸۲ است. بهترین الگوی ریاضی در معادله رگرسیون پارامتر چسبندگی به صورت زیر به دست آمد.

$$C = -282.07 - 2.189 N - 11.269 LL + 37.251 PL \quad (4)$$

شکل ۲، مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از مدل ریاضی چسبندگی در محدوده خطای ۲۵٪ را نشان می‌دهد.

همان‌طور که قبلاً بیان شد، هدف از این پژوهش تعیین روابطی ریاضی بین پارامترهای مختلف و تعداد سیکل تر و خشک شدن، می‌باشد. جهت تعیین مدل ریاضی از نرم‌افزار SPSS 26 استفاده شد. برای بررسی دقت و صحت مدل‌ها از ۴ پارامتر ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE)، ضریب تبیین R^2 ، متوسط مطلق درصد خطا^۲ (MAPE)، تابع هدف نرمال شده^۳ (NOF) و ضریب ناش-ساتکلیف^۴ (NSC) و مطابق روابط زیر استفاده می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$NOF = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (3)$$

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (4)$$

در روابط بالا P_i مقادیر محاسباتی و O_i مقادیر مشاهداتی، n تعداد داده‌های مشاهداتی یا محاسباتی و \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشند. هرچه RMSE و NOF کوچک‌تر و نزدیک به صفر باشد نشان‌دهنده دقت بهتر مدل می‌باشد. مقادیر صفر تا یک برای NOF در مواقعی که اطلاعات مدل برای واسنجی موجود باشند قابل قبول می‌باشد. (ICOLD, 1995) بازه تغییرات NSC می‌تواند بین عدد یک تا $-\infty$ متغیر باشد و پایین‌ترین مقدار قابل قبول آن ۰/۵ است و هر چه این ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد دقت بهتر مدل را نشان می‌دهد. (US Department of the Interior, 1987)

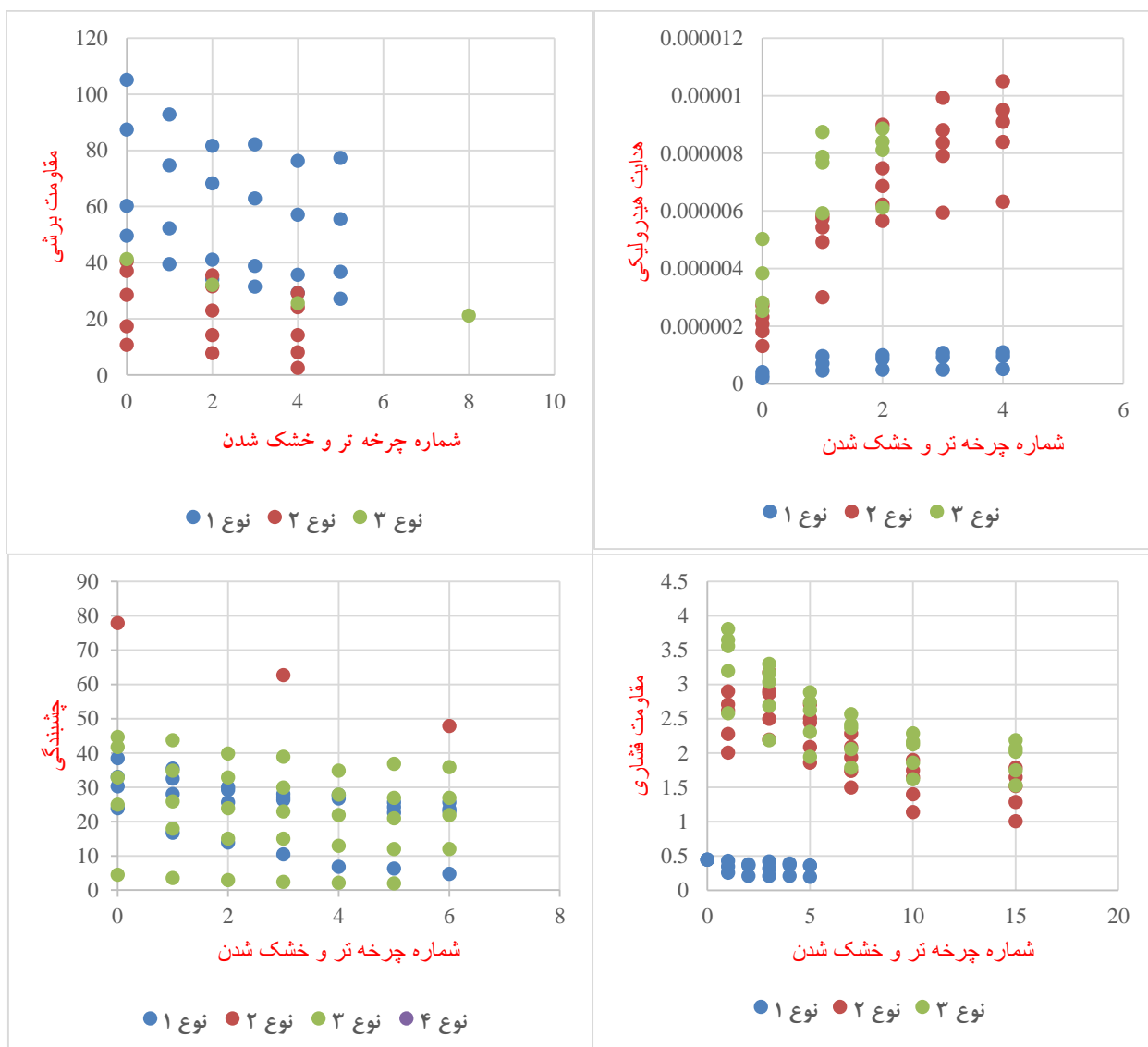
نتایج و بحث

غربالگری داده‌ها: در ابتدای پژوهش برای بررسی وجود داده‌های پرت، داده‌ها مورد غربالگری قرار گرفتند. طبق بررسی انجام شده که در شکل ۱ آورده شده است، برای چهار متغیر چسبندگی، مقاومت فشاری، مقاومت برشی و هدایت هیدرولیکی ملاحظه شد که روند تغییرات داده‌ها و روند متوسط داده‌ها غیرمتعارف نیست و داده پرت دیده نمی‌شود.

لازم به ذکر است که در شکل ۱ منظور از نوع ۱، ۲، ۳ و ۴ انواع مختلف خاک‌های رسی است که در پژوهش‌های پیشین مورد بررسی قرار گرفته است.

تعیین رابطه ریاضی بین پارامترها: پس از غربالگری داده‌ها، ارتباط سه عامل تعداد چرخه تر و خشک شدن، حد روانی و حد

- 1- Root Mean Square Error
- 2- Mean Absolute Percentage Error
- 3- Normalize Objective Function
- 4- Nash-Sutcliffe



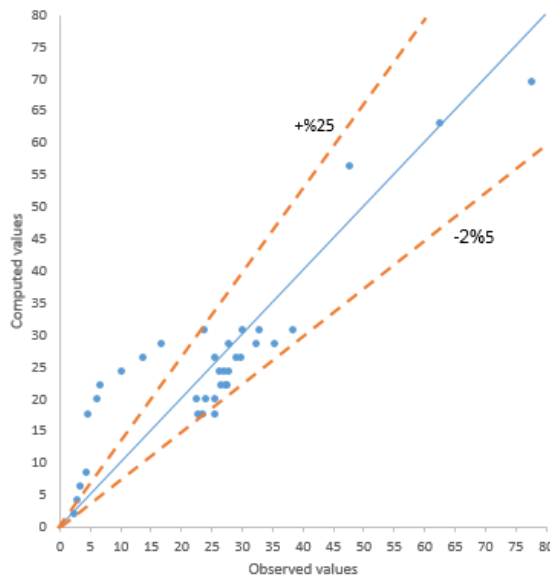
شکل ۱- پراکندگی داده‌های مورد بررسی در نمونه‌های مختلف به منظور تعیین داده‌های پرت

جدول ۸- نتایج همبستگی پیرسون برای پارامتر چسبندگی

		cohesion	LL	PL	Cycle
Cohesion	Pearson correlation	۱	-.۷۵۵	-.۷۵۵	-.۷۷۷
	sig		.۰۰۰	.۰۰۰	.۰۰۰
	N	۶۵	۳۷	۳۷	۳۷

جدول ۹- نتایج همبستگی پیرسون برای پارامتر مقاومت فشاری

		Compressive strength	LL	PL	cycle
Compressive Strength	Pearson correlation	۱	.۸۳۳	.۸۳۳	-.۴۰۹
	sig		.۰۰۰	.۰۰۰	.۰۰۰
	N	۱۱۴	۷۸	۷۸	۱۱۴



شکل ۲- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای چسبندگی

خارج شد و در رابطه نهایی قرار نگرفت. رابطه نهایی مقاومت فشاری به صورت زیر به دست آمد:

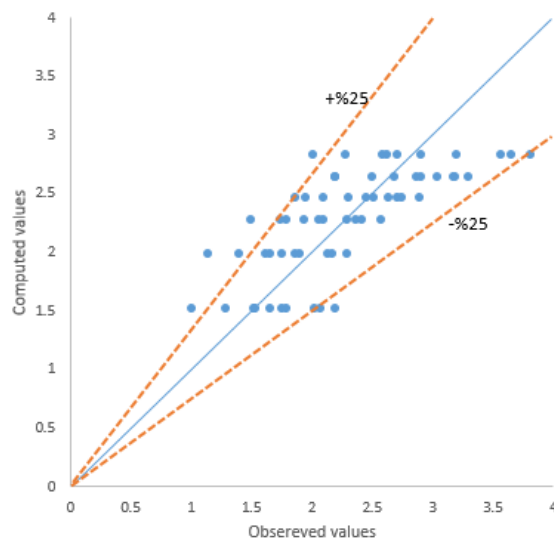
$$\sigma = -21.779 - 0.094 N + 1.118 PL \quad (5)$$

شکل ۳، مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی با استفاده از مدل ریاضی مقاومت فشاری در محدوده خطای ۲۵٪ را نشان می‌دهد.

مدل ریاضی مقاومت فشاری

بر اساس جدول ۹ شماره چرخه تر و خشک شدن، حد روانی (LL) و حد خمیری (PL)، همبستگی معناداری با پارامتر مقاومت فشاری دارند

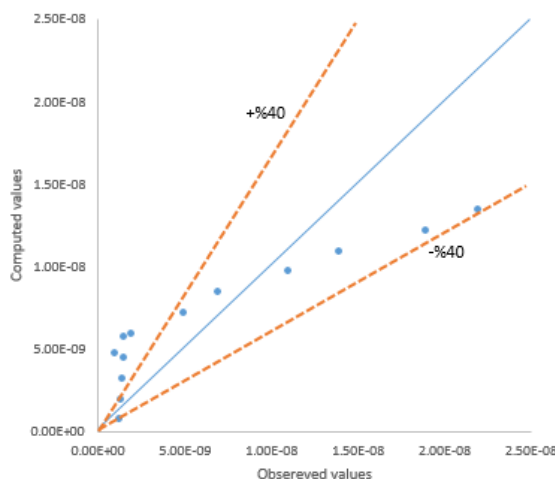
نتایج رگرسیون برای پارامتر مقاومت فشاری نشان داد که ضریب تبیین (R^2) برابر ۰/۸۵ است. پس از آنالیز در نرم‌افزار، پارامتر LL به دلیل ثابت بودن مقدار آن در اکثر نمونه‌ها از آنالیز رگرسیون



شکل ۳- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای مقاومت فشاری

جدول ۱۰- نتایج همبستگی پیرسون برای پارامتر مقاومت فشاری

Compressive Strength	Pearson correlation	Compressive strength		
		LL	PL	cycle
	sig	۱	۰.۸۳۳	-۰.۴۰۹
	N	۱۱۴	۷۸	۷۸



شکل ۴- مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای هدایت هیدرولیکی

و رابطه نهایی پارامتر مقاومت برشی به صورت زیر به دست آمد:

$$\tau = 30.756 - 4.236 N + 0.742 PL \quad (۷)$$

شکل ۵، مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای مقاومت برشی در محدوده خطای ۳۰٪ را نشان می‌دهد.

مدل ریاضی منحنی مشخصه آب-خاک

بر اساس آنالیزهای انجام شده، Matric Suction، حد روانی (LL) و حد خمیری (PL)، همبستگی معناداری با پارامتر مقدار حجمی آب (VWC^v) دارند. (sig<0.05) با توجه به نتایج رگرسیون، ضریب تبیین (R²) در پارامترهای منحنی مشخصه آب-خاک برابر با ۰.۸۶۵ به دست آمد.

پس از آنالیز در نرم افزار، پارامتر LL به دلیل ثابت بودن مقدار آن در اکثر نمونه‌ها از آنالیز رگرسیون خارج شد و رابطه ریاضی پارامترهای منحنی مشخصه آب-خاک به صورت زیر به دست آمد

$$VWC = -3.507 + 0.139 PL - 6. \times 10^{-5} MS \quad (۸)$$

شکل ۶، مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای مشخصه آب-خاک در محدوده خطای ۳۳٪ را نشان می‌دهد.

پارامترهای خطاهای مدل‌های ریاضی

در جدول ۱۲، مقادیر ۴ پارامتر RMSE, R², MAPE, NOF، NSC برای مدل‌های به دست آمده، ارائه شده است.

مدل ریاضی هدایت هیدرولیکی

در مورد پارامتر هدایت هیدرولیکی، تحقیق نشان داد که شماره چرخه تر و خشک شدن و حد خمیری (PL)، همبستگی معنی‌داری با پارامتر هدایت هیدرولیکی دارند (sig< 0.05) اما حد روانی (LL) رابطه معناداری با هدایت هیدرولیکی ندارد (sig> 0.05).

پس از آنالیز در نرم افزار، پارامتر LL به دلیل ثابت بودن مقدار آن در اکثر نمونه‌ها از آنالیز رگرسیون خارج شد و در رابطه نهایی قرار نگرفت و رابطه نهایی برای پارامتر هدایت هیدرولیکی به صورت زیر به دست آمد:

$$K = 2.28 \times 10^{-5} + 1.18 \times 10^{-6} N - 8.76 \times 10^{-7} PL \quad (۶)$$

در شکل ۴، مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای هدایت هیدرولیکی در محدوده خطای ۴۰ درصد نشان داده شده است.

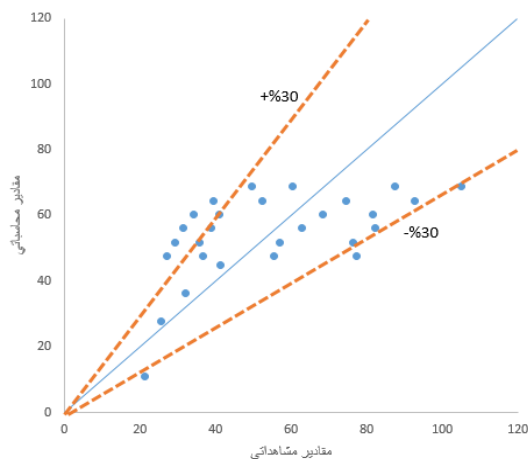
مدل ریاضی مقاومت برشی

بر اساس جدول نتایج همبستگی پیرسون برای پارامتر مقاومت برشی، شماره چرخه تر و خشک شدن، حد روانی (LL) و حد خمیری (PL)، همبستگی معناداری با پارامتر مقاومت برشی دارند (sig<0.05).

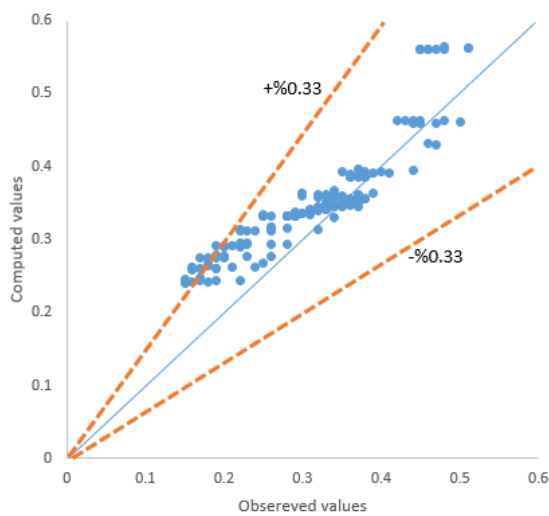
پس از آنالیزهای انجام شده مشاهده شد که پارامتر LL به دلیل ثابت بودن مقدار آن در اکثر نمونه‌ها از آنالیز رگرسیون خارج می‌شود

جدول ۱۱- نتایج همبستگی پیرسون برای پارامتر مقاومت فشاری

Compressive Strength	Pearson correlation	Compressive strength			
		LL	PL	cycle	
		۱	۰.۸۳۳	۰.۸۳۳	-۰.۴۰۹
	sig		.۰۰۰	.۰۰۰	.۰۰۰
	N	۱۱۴	۷۸	۷۸	۱۱۴



شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای مقاومت برشی



شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای SWCC

جدول ۱۲- مقدار خطاهای محاسبه‌شده در مدل‌های آماری

نام پارامتر	RMSE	R ²	NOF	NSC
Cohesion	۷,۰۴	۰,۸۱۸	۰,۲۸	۰,۸۱
Compressive Strength	۰,۴۲	۰,۸۵۳	۰,۱۸	۰,۵۳
Hydrolic Conductivity	3.7E-09	۰,۳۱۰	۰,۶۰	۰,۷۱
Shear Strength	۱۸,۹۰	۰,۳۱۶	۰,۳۵	۰,۳۱
SWCC	۰,۰۵	۰,۸۶۵	۰,۱۸	۰,۹۴

خاکی و مطالعه خصوصیات مکانیکی مصالح هسته در نوسانات شدید و خشکی طولانی مدت مخزن و تغییر متوالی درجه اشباع هسته سد. رساله دکتری، دانشگاه فردوسی، مشهد.

مقدس، م.، رئیسی استبرق، ع. و عبداللهی بیک، ج. ۱۳۹۱. مسیره‌های تورمی-انقباضی یک خاک متورم شونده در چرخه‌های تر و خشک با آب شور. نشریه دانش آب و خاک. ۲۲(۳). ص ۱۳۸-۱۲۸.

مهرموسوی، ز.، بهمنش، ج. و محمدنژاد، ب. 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(1): 59-66.

De Camillis, M., Di Emidio, G., Bezuijen, A. and 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*.

Dong, j., LV, H. and Wu, W. 2018. Development and application of an instrument for simulating wetting-drying cycles of expansive soils under loads. *Journal of Mountain Science*. 15(11): 2552-2560.

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): 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.

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): 633-643.

Khan, A. 2016. Impact of wet-dry cycle on mechanical properties of expansive clay under low overburden stress. Master Thesis, THE UNIVERSITY OF TEXAS AT ARLINGTON.

با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول ۸، می‌توان گفت که مدل‌های به دست آمده جهت چسبندگی، مقاومت فشاری و منحنی مشخصه آب و خاک نتایج بهتری را ارائه می‌کنند.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش تعداد چرخه تر و خشک شدن و حد روانی، پارامتر چسبندگی کاهش می‌کند و با افزایش حد خمیری، چسبندگی افزایش می‌یابد. در رابطه با مقاومت فشاری، با افزایش تعداد چرخه تر و خشک شدن، مقاومت فشاری کاهش و با افزایش حد خمیری، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در مورد ضریب هدایت هیدرولیکی، تعداد چرخه تر و خشک شدن با این ضریب رابطه مستقیم و حد خمیری با ضریب هدایت هیدرولیکی رابطه معکوس دارند. در مورد پارامتر مقاومت برشی، تعداد چرخه رابطه عکس با مقاومت برشی و حد خمیری رابطه مستقیم با مقاومت برشی دارند. در منحنی مشخصه آب-خاک، حد خمیری رابطه مستقیم اما پارامتر matric suction رابطه معکوس با volumetric water content دارند. در این پژوهش مدل‌های ریاضی جهت تعیین رابطه بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک با تعداد چرخه تر و خشک شدن به دست آمد. این روابط در مورد چسبندگی، مقاومت فشاری و منحنی مشخصه آب-خاک دارای دقت مناسبی بودند ولی در مورد هدایت هیدرولیکی و مقاومت برشی دقت مناسب نداشتند که این می‌تواند به علت تنوع خاک‌های مورد استفاده در تحقیقات باشد.

منابع

آذری، ا. ۱۳۸۵. مبانی زهکشی در اراضی جزر و مدی جزیره آبادان (مطالعه موردی در ساحل رودخانه بهمن شیر). چهارمین کارگاه فنی زهکشی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی. تهران. ایران.

پناهی، ق. ۱۳۹۵. تأثیر چرخه خیس و خشک شدن بر خواص فیزیکی خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، مشهد.

صالحیان دستجردی، م. و همت، ع. ۱۳۹۱. برآورد پارامترهای مقاومت برشی یک خاک ریزبافت تحت چرخه‌های تر و خشک شدن. هفتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون. دانشگاه شیراز. فارس. ایران.

صفا دوست، آ. ۱۳۹۴. اثر تعداد چرخه‌های خیس و خشک شدن در بر پایداری ساختمان، توزیع اندازه ذرات و سیستم منافذ خاک. مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۶(۴). ص ۷۶۷-۷۵۹.

طالب العلم، ا. ۱۳۹۹. بررسی عوامل و ریسک‌های شکست سدهای

- Effect of Drying-Wetting Cycles on Saturated Shear Strength of Undisturbed Residual Soils. *American Journal of Civil Engineering*. 4(4): 159-166.
- Shi, A., Yan, N. and Marschner, P. 2015. Cumulative respiration in two drying and rewetting cycles depends on the number and distribution of moist days. *Geoderma*. 243: 168-174
- Stoltz, G., Cuisinier, O. and Masrouri, F. 2014. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles. *Engineering Geology*, 181, pp.281-289.
- 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.
- US Department of the interior. 1987. Design of small dams. Denver CO: Bureau of Reclamation.
30. Wan, H. and Xu, X. 2016. Shear strength of unsaturated completely decomposed granite soil under different stress state conditions. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2(4): 230-235.
- Wang, B., Hu, B. 2016. Dynamics of aggregate stability under drying and wetting cycles for yellow soil in China.
- Wang, D.Y., Tang, C.S., Cui, Y.J., Shi, B. and Li, J. 2016. Effects of wetting-drying cycles on soil strength profile of a silty clay in micro-penetrometer tests. *Engineering Geology*. 206: 60-70.
- Wang, Y.-K., Guo, L., Gao, Y.-F., Qiu, Y., Hu, X.-Q. & Zhang, Y. 2016. Anisotropic drained deformation behavior and shear strength of natural soft marine clay. *Marine Georesources & Geotechnology*. 34: 493-502.
- Ye, W., Zhang, Y., Chen, B., Zhou, X. & Xie, Q. 2010. Shear strength of an unsaturated weakly expansive soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2: 155-161.
- Z. Lu, X. Wu, Z. Hu, S. Xian, and R. Fang. 2018 .Electric resistance tests on compacted clay material under dynamic load coupled with dry-wet cycling. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 5387540, 6 pages.
- Liu, W., Yang, Q., Tang, X. and Yang, G. 2015. Effect of Drying and Wetting on the Shear Strength of a Low-Plasticity Clay With Different Initial Dry Densities. *Journal of Testing and Evaluation*. 44(4).
- Lu, H., Li, J., Wang, W. and Wang, C. 2015. Cracking and water seepage of Xiashu loess used as landfill cover under wetting-drying cycles. *Environmental Earth Sciences*.74(11): 7441-7450.
- Ma, R., Cai, C., Li, Z., Wang, J., Xiao, T., Peng, G. and Yang, W. 2015. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. *Soil and Tillage Research*. 149: 1-11.
- 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): 143-150.
- Naeni, 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): 2818.
- Nowamooz, H. and Masrouri, F. 2008. Hydromechanical behaviour of an expansive bentonite/silt mixture in cyclic suction-controlled drying and wetting tests. *Engineering Geology*. 101(3): 154-164.
- O'Brien, A. 2007. Rehabilitation of urban railway embankments: investigation, analysis and stabilization
- Özbek, A. 2014. Investigation of the effects of wetting-drying and freezing-thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 73(2): 595-609.
- R. Chen, T. Xu, W. Lei, Y. Zhao, and J. Qiao. 2018 .Impact of multiple drying-wetting cycles on shear behaviour of an unsaturated compacted clay. *Environmental Earth Sciences*.vol. 77: 683
- Rayhani, M., Yanful, E. and Fakher, A. 2007. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran. *Canadian Geotechnical journal* 44: 276-283.
- Sayem hassein, M., Kong Ling, W. and Yin, S. 2016.

Development of Mathematical Models to Determine the Effect of Wet and Drying Cycles on Physical-Mechanical Parameters of Fine-Grained Soils

Kh. Khodashenas¹, S.R.Khodashenas*², N. Seyyednejad³

Received: Nov.07, 2021

Accepted: Jan.23, 2021

Abstract

Due to the vulnerable nature of earthen dams, all factors affecting the stability of these dams should be studied. Consecutive wetting and drying of the earthen dam core is one of the important factors that can affect the physical and mechanical parameters of the dam core. These changes increase the subsequent risks such as leakage, piping and subsidence. This is especially happen in arid and semi-arid regions such as Iran. Various researches have been done in this field and some of these researches have provided suitable mathematical models for their data, but because the results of each research related to the studied soil are specific to the same study, these models can be unusable for other data. In the present study, after collecting 866 laboratory data from 23 researches, the effect of wetting and successive drying of clay dam cores on physical-mechanical parameters was investigated and multivariate mathematical relationships between physical-mechanical parameters and number of wetting and drying were investigated. This study showed that the effect of wetting and drying on mechanical parameters is very important and should be considered in the analysis of embankment dam structures.

Keywords: Clay, Cohesion, Earth dam, Hydraulic conductivity, Water-soil characteristic curve

1- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Mashhad Branch, Mashhad, Iran

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

3- PhD. Student, Department of Statistics, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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