

بررسی کاربرد بنتونیت در سد زیرزمینی به کمک مدل آزمایشگاهی

نادرقلی ابراهیمی^{۱*} و محمد تاج‌بخش^۲

۱- دانشجویار پژوهش پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۹/۲۵

چکیده

در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمبود منابع آب‌های سطحی به صورت پایه و دائمی، استفاده بهینه را از منابع آب‌های زیرزمینی ضروری ساخته است. در این راستا، ذخیره‌سازی جریان‌های زیر سطحی درون مخازن آبرفتی سدهای زیرزمینی در مقیاس کوچک به نظر می‌رسد اقتصادی و مقرون به صرفه خواهد بود. گاهی به علت نبود منابع قرضه در محل، هزینه احداث سد افزایش می‌یابد؛ در این موارد، ترکیبی از مصالح موجود و بنتونیت می‌تواند معیارهای مورد نیاز را تأمین کند. در این تحقیق، با ساخت مدل فیزیکی مقطعی از سد زیرزمینی، تأثیر افزودن بنتونیت در کاهش ضریب آبگذری اشباع افقی در خاک غیر چسبیده بررسی شده است. برای این منظور، نمونه‌ای از خاک غیر چسبیده انتخاب و بنتونیت به میزان ۲، ۴ و ۶ درصد وزن خاک خشک به آن اضافه شد و پس از تراکم در مدل فیزیکی، مورد آزمایش نفوذپذیری قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داده است که افزودن بنتونیت، به علت سطح مخصوص بالا و تورم‌پذیری زیاد، ضریب آبگذری را کاهش می‌دهد. با افزایش بنتونیت تا ۴ درصد، هدایت هیدرولیکی با شیب تندی کاهش می‌یابد و در مقدار بالاتر بنتونیت، شدت کاهش هدایت هیدرولیکی کندتر می‌شود به گونه‌ای که می‌توان گفت نمودار لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع در برابر مقدار بنتونیت تابعی است خطی. بر اساس این تابع، مقدار بنتونیت مورد نیاز برای کاهش آبگذری خاک غیر چسبیده مورد آزمایش به مقدار آبگذری نمونه خاک استفاده شده در هسته سد زیرزمینی سنگانه در یک تراکم نسبی مشابه ۴/۶ درصد است.

واژه های کلیدی

بنتونیت، سد زیرزمینی، ضریب آبگذری اشباع، مدل آزمایشگاهی

مقدمه

به صرفه خواهد بود. با این روش می‌توان جریان‌ات زیر قشری را در فصل‌های پر باران که نیاز به آب کمتر است، ذخیره کرد و در مواقع کم آبی از آنها برای شرب، کشاورزی، صنعت و ... بهره برد. سد زیرزمینی دیواره‌ای آب‌بند و تقریباً نفوذناپذیر است که به صورت مانعی در برابر جریان طبیعی آب زیرزمینی عمل می‌کند و باعث ذخیره‌سازی آب در خلل و فرج خاک و در نتیجه توسعه

با توجه به قرارگیری کشور ایران روی کمربند خشک زمین، کمبود بارندگی و در دسترس نبودن منابع آب‌های سطحی به صورت پایه و دائمی، استفاده بهینه از منابع آب‌های زیرزمینی که گاهی از دسترس خارج می‌شوند، موضوعی مهم و قابل بررسی است. در این راستا، ذخیره‌سازی جریان‌های زیر بستری درون مخازن آبرفتی سدهای زیرزمینی در مقیاس کوچک، اقتصادی و مقرون

هزینه‌ی احداث سد به شدت افزایش می‌یابد. در این حالت ترکیبی از مصالح موجود و بنتونیت به‌عنوان هسته‌ی سد زیرزمینی، نفوذ ناپذیری مورد نیاز را تأمین خواهد کرد. بنتونیت با خصوصیتی مانند سطح مخصوص بالا (۸۰۰-۱۰۰ متر مربع بر گرم)، بار منفی خالص (به‌طور معمول ۸۰-۱۵۰ میلی‌اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم)، و کاتیون‌های سطحی قابل تبادل شناخته می‌شود (Mitchell & Soga, 2005). این ویژگی‌ها باعث جذب شدید آب توسط بنتونیت و در نتیجه تورم‌پذیری زیاد و آب‌گذری کم می‌شود (Eisenhour & Brown, 2009; Gates *et al.*, 2009). طبق مطالعات لن‌دیس و مابگ (Landis & Maubeuge, 2004)، بنتونیت عمدتاً بر دو نوع است: متورم‌شونده^۱ یا سدیمی و غیر تورمی^۲ یا کلسیمی. بنتونیت سدیمی بنتونیتی تعریف می‌شود که بیش از ۵۰ درصد ظرفیت تبدالی آن با یون‌های Na^+ اشغال شده است. این نوع بنتونیت توانایی بالایی در نگهداشت آب، تورم‌پذیری طولانی‌مدت، و در نتیجه کمینه کردن انتقال آلاینده‌ها دارد. بر اساس مطالعات گیتس و همکاران (Gates *et al.*, 2009)، بنتونیت مناسب برای ایجاد موانع زیست‌محیطی شامل حداقل ۷۰ درصد وزنی مونت‌موریلونیت و حداقل کانی‌های غیر تورمی است. این ترکیب قابلیت تورم تا چند برابر حجم خود را پس از جذب آب دارد. این نوع بنتونیت در محیط‌هایی ناپایدار است که در آنها پساب حاوی فلزات سنگین (مانند شیرابه‌های محل دفن زباله‌ها، زه‌کش معادن اسیدی و مواد رادیواکتیو) با کاتیون‌های چند ظرفیتی مانند Ca^{2+} و Mg^{2+} حضور دارند. در چنین شرایطی، گذاشتن کاتیون‌های چند ظرفیتی به جای Na^+ منجر به افزایش نفوذپذیری خواهد شد (Gates *et al.*, 2009).

نکته مهم در این مقاله، اندازه‌گیری ضریب آب‌گذری اشباع افقی نمونه‌هاست. یادآوری می‌شود که در منابع،

پایدار منابع آب می‌شود (Ishida *et al.*, 2011). تاج‌بخش و همکاران (Tajbakhsh *et al.*, 2015) برای اندازه‌گیری ضریب آب‌گذری اشباع، چهار نمونه خاک درشت‌دانه غیر چسبنده را به‌صورت المانی با حجم مشخص درون جعبه‌ای از جنس پلاکسی‌گلاس متراکم کرده و در نقاط ارتفاعی ۰/۵ تا ۱/۵ متر تحت ارتفاع هیدرواستاتیک آب قرار دادند. به کمک رابطه داری برای نمونه‌های مذکور ضریب آب‌گذری اشباع به دست آمد. با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی با معادلات متداول، مشخص شد معادلاتی که کوزنی-کارمن (Carman, 1939) و چاپیوس و آبرتین (Chapuis & Aubertin, 2003) ارائه داده‌اند نسبت به دیگر روابط در تخمین ضریب آب‌گذری دقت مناسب‌تری دارند. مؤلفین دلیل دقیق‌تر بودن این معادلات را به کاربرد مؤلفه‌های مؤثر در معادله و استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی دقیق در استخراج معادلات مذکور نسبت دادند (Tajbakhsh *et al.*, 2015). بر اساس مطالعات ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi *et al.*, 2015) روی چند نمونه خاک در یک مدل آزمایشگاهی، منحنی‌های ضریب آب‌گذری اشباع خاک متراکم به‌صورت خطی رسم شد. با استفاده از این نمودارها می‌توان با توجه به رطوبت و وزن مخصوص خشک، تخمین مناسبی از ضریب آب‌گذری اشباع و درجه اشباع در خاک‌های متراکم چسبنده به دست آورد. یکی از نیازهای اساسی در طراحی و اجرای سدهای زیرزمینی، تخمین و کنترل میزان آب‌گذری هسته سد است. ارزیابی مصالح به کار رفته در هسته سدهای زیرزمینی در ارتباط با معیارها و اصول طراحی این سدها عاملی مهم و تعیین‌کننده است. از آنجا که سد زیرزمینی سازه‌ای اقتصادی شناخته می‌شود، وجود منابع قرضه مناسب در محل احداث سد، هزینه‌ها را به‌میزانی چشم‌گیر کاهش می‌دهد. در برخی موارد به علت نبود مصالح محلی مناسب و نیز به دلیل فاصله زیاد بین خواستگاه سد و منابع قرضه،

(نمونه ۱) و یک نمونه خاک ریزدانه چسبنده (نمونه ۲) از منابع قرضه خاک استفاده شده در هسته سد زیرزمینی سنگانه استفاده شد. این سد در منطقه چاهک سنگانه کلات، در استان خراسان رضوی و در فاصله چند کیلومتری مرز ترکمنستان واقع شده است. با استفاده از روش آزمایشگاهی، ضریب آبگذری افقی اشباع نمونه‌های ۱ و ۲ اندازه‌گیری و تاثیر افزودن بنتونیت در آبگذری نمونه غیر چسبنده (نمونه ۱) بررسی شد و مقدار بنتونیت لازم برای کاهش آبگذری نمونه غیر چسبنده (نمونه ۱) تا حد آبگذری نمونه به‌کار رفته در هسته سد زیرزمینی سنگانه (نمونه ۲) بررسی گردید.

با توجه به اینکه جریان عبوری از هر مقطع سد تابعی از ارتفاع آب در مخزن است، در این تحقیق المانی دلخواه از سد زیرزمینی با سطح مقطع 20×20 سانتی‌متر و طول ۹۰ سانتی‌متر (شامل هسته سد و مصالح درشت‌دانه اطراف آن با دانه‌بندی متفاوت از هسته) در سه تراز ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ متر از سطح آزاد آب در نظر گرفته شد (شکل ۱).

مدل ساخته شده با سطح مقطع مربع از جنس پلاکسی‌گلاس، دارای سه جعبه مجزا به ابعاد $20 \times 20 \times 30$ سانتی‌متر است (شامل جعبه ورودی که به مخزن تأمین تراز آب متصل می‌شود، جعبه مرکزی که مصالح در آن متراکم می‌شود، و جعبه خروجی که دبی عبوری از آن اندازه‌گیری می‌شود). این سه قسمت به‌صورت تو رفته و بیرون‌زده روی پایه‌ای قرار دارد که با توجه به شاسی طراحی شده و استفاده از گریس سیلیکونی کاملاً آب‌بندی و محکم می‌شود. منبع تأمین ارتفاع آب، مخزنی است با قطر ۵۵ و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر که به‌واسطه نصب شناور سطح آب در آن ثابت می‌ماند. این منبع قابلیت تغییر ارتفاع را دارد و ۳ تراز مختلف آب (۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲) را روی محور مدل تأمین می‌کند.

ضریب آبگذری اشباع با آزمایش سه محوری، بار ثابت یا بار افتان اندازه‌گیری شده که در واقع ضریب آبگذری عمودی نمونه‌هاست، اما در این مطالعه با توجه به نحوه ساخت مدل فیزیکی و تراکم نمونه‌ها، اندازه‌گیری ضریب آبگذری افقی مدنظر است، مانند آنچه در واقعیت مثلاً در ساخت یک سد اتفاق می‌افتد. هدف تحقیق حاضر را می‌توان این‌گونه گفت: بررسی تأثیر بنتونیت در کاهش ضریب آبگذری خاک غیر چسبنده به کمک مدل فیزیکی مقطعی از سد زیرزمینی.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، برای تخمین ضریب آبگذری اشباع از قانون داریسی طبق رابطه ۱ استفاده شده است:

$$Q = kAi \quad (1)$$

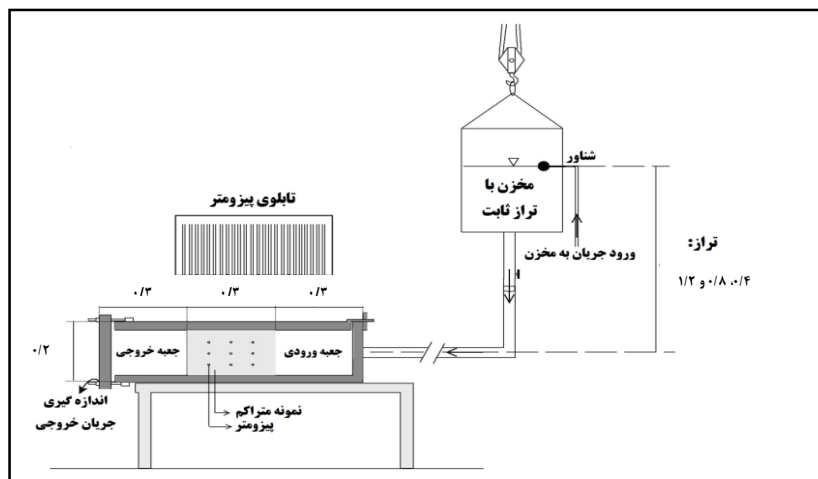
که در آن،

Q = دبی عبوری $[L^3T^{-1}]$; A = سطح مقطع عمود بر جریان $[L^2]$; k : ضریب هدایت هیدرولیکی (ضریب آبگذری) $[LT^{-1}]$; و $i = \frac{h_1}{L}$ = گرادیان هیدرولیکی (Shamsaei, 2012). قانون داریسی در شرایطی معتبر است که جریان در محیط متخلخل، آرام^۱ (ورقه‌ای $Re < 1$) باشد زیرا در جریان‌های متلاطم^۲ انرژی در اثر تلاطم هدر می‌رود و این در قانون داریسی لحاظ نشده است. طبق تعریف عدد رینولدز (رابطه ۲):

$$Re = \frac{\rho V d_{10}}{\mu} \quad (2)$$

که در آن،

Re = عدد رینولدز؛ ρ = جرم مخصوص سیال $[ML^{-3}]$ ؛ V = سرعت داریسی $[LT^{-1}]$ ؛ d_{10} = قطر مؤثر ذرات خاک $[L]$ ؛ و μ ، لزوجت دینامیکی سیال $[ML^{-1}T^{-1}]$.
در این تحقیق، از یک نمونه خاک غیر چسبنده

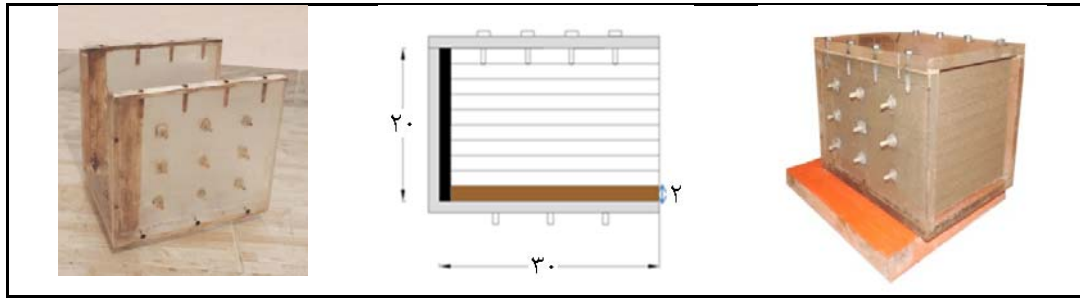


شکل ۱- مدل آزمایشگاهی سد زیرزمینی (ابعاد بر حسب متر)

فیزیکی آب (لزوجت) و در نتیجه ضریب آبگذری تأثیرگذار است، تمام آزمایش‌ها در دمای ۲۰ درجه سلسیوس اجرا شد.

متراکم کردن نمونه‌های حاوی مواد افزودنی در مدل
افزودن بنتونیت به خاک باعث تغییر در خصوصیات آن از جمله خصوصیات تراکمی می‌شود. از آنجا که میزان انرژی تراکم در آبگذری تأثیرگذار است (Benson et al., 1994)، سعی شد انرژی تراکم برای ساخت تمام نمونه‌ها یکسان باشد. با توجه به اینکه هدف متراکم کردن تمام نمونه‌ها در ۹۰ درصد وزن مخصوص خشک بیشینه به‌دست آمده از آزمایش تراکم پروکتور استاندارد ($RC \approx 90\%$) است، برای ثابت ماندن انرژی تراکم و اینکه نمونه‌ها در بخش تر منحنی تراکم، متراکم شوند لازم بود نمونه‌ها در رطوبتی بیشتر از مقدار بهینه متراکم شوند. با توجه به رطوبت و وزن مخصوص مورد نیاز هر نمونه در ۱۰ لایه، هر یک به ضخامت ۲ سانتی‌متر، در جعبه میانی مدل به‌طور یکنواخت متراکم گردید. شکل ۲، جعبه مدل قبل و بعد از تراکم نمونه را نشان می‌دهد.

در واقعیت، جهت لایه‌های متراکم موازی جهت جریان است، از این‌رو برای ایجاد شرایط مشابه، قسمت فوقانی جعبه میانی به‌صورت متحرک با قابلیت باز و بسته شدن طراحی گردید. برای متراکم کردن مصالح، قسمت فوقانی برداشته شد و با توجه به وزن مخصوص مورد نیاز، نمونه در جعبه متراکم گردید. پس از اتمام عملیات تراکم، مجدداً قسمت فوقانی جعبه با هشت عدد پیچ روی مدل ثابت و به‌کمک درز انبساط و گریس سیلیکونی آب‌بندی شد. برای جلوگیری از جابه‌جایی ناشی از فشار آب، در قسمت ورودی جعبه میانی لبه‌ای به ضخامت ۱/۵ سانتی‌متر برای قرار گرفتن قاب توری تعبیه شده است. همچنین، یک عدد قاب توری فلزی نیز در انتهای نمونه (جعبه) قرار می‌گیرد که با زبانه ایجاد شده در جعبه انتهایی خاک متراکم را در محل خود ثابت می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، در دیواره و کف این جعبه ۹ عدد پیزومتر به‌صورت شبکه ۳×۳ با فاصله‌های ۷/۵ سانتی‌متر در طول و ۵ سانتی‌متر در عرض برای اندازه‌گیری فشار تعبیه شده است. در کف جعبه ورودی و خروجی نیز هر یک ۳ پیزومتر به فاصله ۷/۵ سانتی‌متر قرار دارد. با توجه به اینکه دما بر خصوصیات



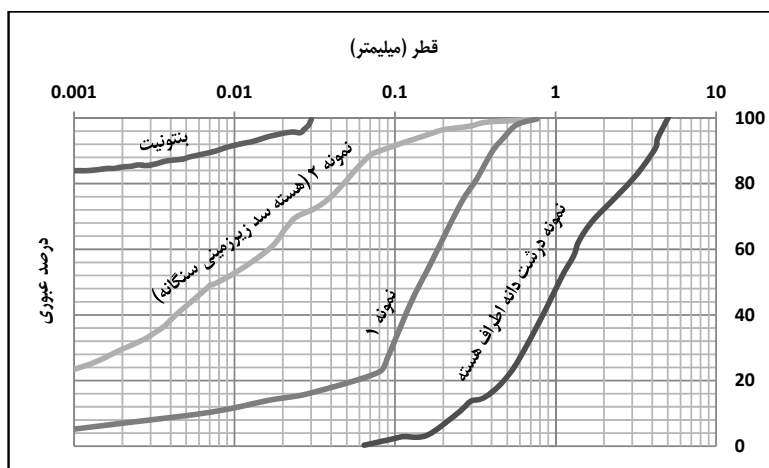
شکل ۲- تصویر جعبه میانی مدل (ابعاد بر حسب سانتی متر)

عبور جریان از مرز لایه‌های متراکم، به‌جای عبور از نمونه، از عواملی است که می‌تواند بالقوه باعث ایجاد خطا شود. برای حل این مشکل و قفل شدن بهتر لایه‌ها در یکدیگر، پس از تراکم هر لایه روی آن خراش ایجاد و پس از آن لایه بالاتر ریخته و متراکم می‌شد. گفتنی است که اختلاف قابل توجهی بین قرائت پیژومترها، که نشان‌دهنده تأثیر لایه‌های تراکم در فشار پیژومتریک باشد، مشاهده نگردید. همچنین، برای افزایش زبری دیواره و کاهش عبور جریان از بین نمونه متراکم و بدنه قالب، در ابتدای قالب میانی مقطع کنترلی به عرض ۲ سانتی‌متر با چسب و ماسه بادی ایجاد شد. از دیگر عوامل خطا، وجود اختلاف در قرائت پیژومترهای نصب در یک مقطع است. برای حل این مشکل، در کف و دیواره قالب میانی هر یک ۹ پیژومتر (جمعاً ۱۸ پیژومتر در شبکه‌ای ۳×۳) تعبیه شده است؛ بدین ترتیب تراز آب به‌دست آمده در هر مقطع، حاصل قرائت ۶ عدد پیژومتر است که مسلماً در آن پیژومترهای مشکل‌دار حذف گردیده است.

نتایج و بحث

در شکل ۳ منحنی دانه‌بندی و در جدول ۱ خصوصیات مصالح مورد استفاده آورده شده است.

انتظار می‌رفت که با افزایش درصد ذرات رس مدت‌زمان لازم برای اشباع شدن نیز افزایش یابد، از این‌رو در این بخش نمونه ۲ (به‌علت بالاترین درصد رس) و نمونه ۱ با ۶ درصد بنتونیت به‌عنوان ماده افزودنی (به‌علت درصد بالای بنتونیت)، تحت ارتفاع آب ۰/۴ متر قرار گرفتند. دبی خروجی به‌صورت حجمی با استوانه مدرج در مدت‌زمان مشخص اندازه‌گیری شد. در واقع پس از عبور جریان از نمونه متراکم، آب وارد جعبه خروجی مدل می‌شود که انتهای آن به‌صورتی ساخته شده است که جمع‌آوری و اندازه‌گیری دقیق جریان را ممکن می‌سازد. همچنین، تغییرات تراز پیژومتریک به‌صورت روزانه تا رسیدن به یک مقدار ثابت ثبت گردید. بر این اساس، مدت‌زمان لازم که در آن تمام نمونه‌ها اشباع خواهند بود تعیین شد. پس از اشباع شدن نمونه و ثبت دبی خروجی و تراز آب در پیژومترها، مجدداً تراز مخزن برای تأمین ارتفاع بالاتر آب (۰/۸ و ۱/۲ متر) تنظیم و پس از گذشت یک روز اطلاعات مربوطه ثبت شد. در این تحقیق، مجموعاً ۱۵ آزمایش انجام گرفت. در این تحقیق تمام شرایط آزمایش برای نمونه‌های مختلف از جمله نحوه اختلاط، انرژی تراکم (تراکم نسبی تمام نمونه‌ها ۹۰ درصد است)، دمای آب و ... یکسان و تنها عامل متفاوت درصد بنتونیت افزوده شده به نمونه‌ها بود.

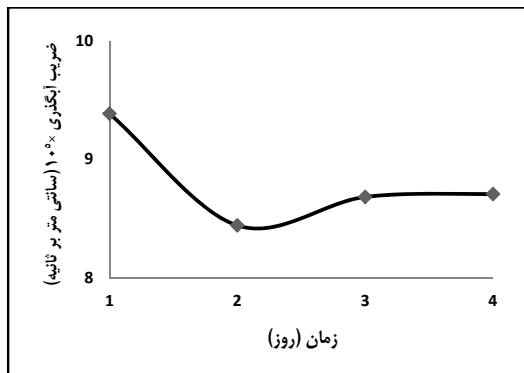


شکل ۳ - منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده

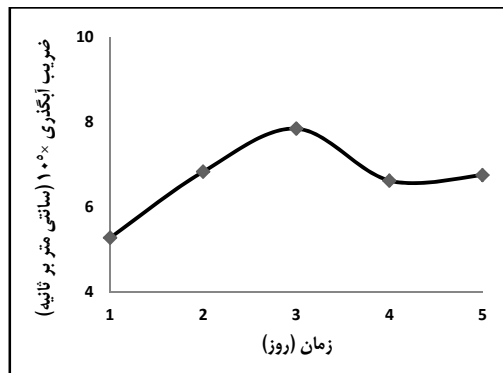
جدول ۱- خصوصیات نمونه‌های مورد استفاده

بنتونیت	نمونه ۲ (هسته سد زیرزمینی سنگانه)	نمونه ۱	خصوصیت
۰	۱۰	۸۰	درصد ماسه
۱۵	۶۰/۸	۱۳/۵	درصد سیلت
۸۵	۲۹/۲	۶/۵	درصد رس
مونت‌موریلونیت، کوارتز، کلسیت	ایلیت-کلریت	ایلیت-کلریت	نوع کانی رس
۵۸۱	۳۹	-	حد روانی (LL)
۳۸	۲۰	-	حد خمیری (PL)
۵۴۳	۱۹	-	شاخص خمیری (PI)
CH	CL	SM	طبقه‌بندی
۲/۷۸	۲/۷۲	۲/۶۵	Gs
-	۱/۷۲	۲/۰۱	حداکثر جرم مخصوص خشک pdmax (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
-	۱۸/۵	۱۰/۳	رطوبت بهینه تراکم Wopt (%)
۴۱۰	۱۲۴/۶	۳۵/۴	سطح مخصوص اندازه‌گیری شده به روش EGME (متر مربع بر گرم)

در شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات ضریب آگذری با زمان به ترتیب برای نمونه ۱ با ۶ درصد بنتونیت و نمونه ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، نمونه ۱ با ۶ درصد بنتونیت پس از گذشت ۵ روز به ضریب آگذری تقریباً ثابتی معادل $۶/۶۳ \times ۱۰^{-۵}$ سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد. برای نمونه دوم این شرایط پس از گذشت ۴ روز با رسیدن به ضریب آگذری $۸/۶۸ \times ۱۰^{-۵}$ سانتی‌متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد.



شکل ۵- تغییرات زمانی ضریب آبگیری برای نمونه ۲



شکل ۴- تغییرات زمانی ضریب آبگیری برای نمونه ۱ با ۶ درصد بنتونیت

۶ و ۷ مشخص است، با افزایش مقدار بنتونیت، حداکثر جرم مخصوص خشک نمونه غیر چسبیده کاهش و رطوبت بهینه آن افزایش می‌یابد. برای ۶ درصد بنتونیت، جرم مخصوص خشک بیشینه به ۹۲ درصد مقدار اولیه (فاقد بنتونیت) می‌رسد، همچنین، رطوبت بهینه تراکم در این درصد بنتونیت، ۱/۱۵ برابر مقدار اولیه است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از مطالعات کومار و یانگ (Kumar & Yong, 2002) مطابقت دارد.

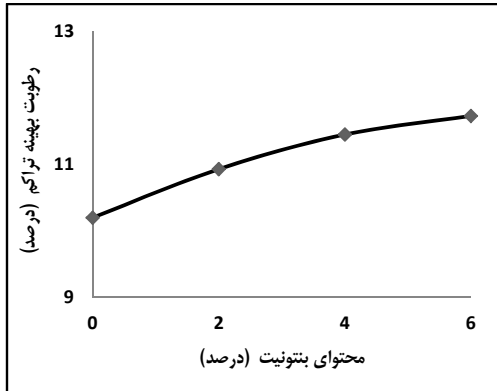
علت کاهش در حداکثر جرم مخصوص خشک با افزایش درصد بنتونیت می‌تواند به ویژگی تورم‌پذیری بالای بنتونیت نسبت داده شود. با افزودن بنتونیت به خاک و تورم آن با جذب رطوبت، ماده‌ای ژل مانند در اطراف ذرات خاک ایجاد می‌شود. تشکیل این ماده باعث افزایش قطر مؤثر ذرات و در نتیجه افزایش حجم منافذ خاک خواهد شد و موجب کاهش در جرم مخصوص خشک می‌گردد. به بیان دیگر، بنتونیت نیروی دافعه بین ذرات خاک را کاهش و ساختمان فلوکوله (منعقد) خاک را افزایش می‌دهد. از طرفی، با جذب بخشی از آب اضافه‌شده به نمونه جهت تورم بنتونیت، نیاز به آب بیشتری برای تراکم می‌باشد که این امر در افزایش رطوبت بهینه مؤثر است (Kumar & Yong, 2002).

در نمونه ۱ با ۶ درصد بنتونیت به‌عنوان افزودنی، ضریب نفوذپذیری ابتدا به‌مقدار حداکثر می‌رسد که می‌توان علت آن را خروج هوا و اشباع شدن نمونه دانست، پس از آن به مقداری تقریباً ثابت می‌رسد که به‌دلیل آن تورم ذرات بنتونیت با گذشت زمان است. طبق مطالعات سالفورز و هوستا (Salfors & Hogsta, 2002)، ۲ تا ۷ روز زمان برای هیدراته شدن و تورم کامل نمونه‌ای شنی حاوی بنتونیت تحت گرادیان ۵ لازم خواهد بود که برای نمونه مورد آزمایش این مدت زمان ۴ روز تحت گرادیان تقریباً ۲ به‌دست آمد. در مورد نمونه دوم، با گذشت زمان منحنی تغییرات نفوذپذیری از یک نقطه حداقل می‌گذرد و مجدداً پس از افزایش مختصری به مقداری تقریباً ثابت می‌رسد. کاهش اولیه نفوذپذیری معمولاً به‌علت مهاجرت ذرات خیلی ریز و تورم رس است. افزایش نفوذپذیری در مراحل بعدی آزمایش نیز می‌تواند به‌دلیل حل شدن و خروج حباب‌های هوای محبوس داخل خاک باشد که پیشتر در خاک وجود داشته است. مطابق جدول ۲، بررسی آماری با نرم‌افزار SPSS نشان می‌دهد که ضریب همبستگی پیرسون بین درصد بنتونیت اضافه شده با جرم مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه تراکم به ترتیب ۰/۹۷۶- و ۰/۹۸۱ است و همبستگی معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ بین آنها وجود دارد. همان‌طور که از شکل‌های

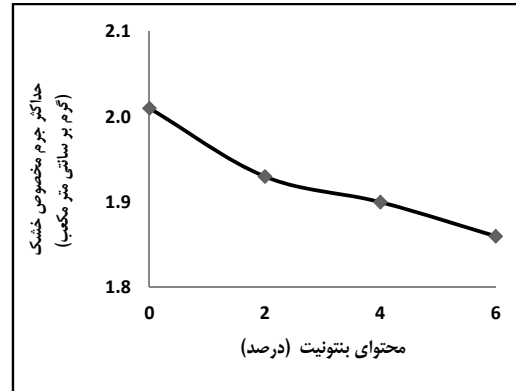
جدول ۲- ضریب همبستگی بین درصد بتونیت و مؤلفه‌های تراکم

بتونیت	حداکثر جرم مخصوص خشک	رطوبت بهینه تراکم
ضریب همبستگی پیرسون	*-۰/۹۷۶	*۰/۹۸۱
Sig. (2-tailed)	۰/۰۲۴	۰/۰۱۹
تعداد	۴	۴

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد



شکل ۷- تأثیر مواد افزودنی بر درصد رطوبت بهینه تراکم نمونه ۱



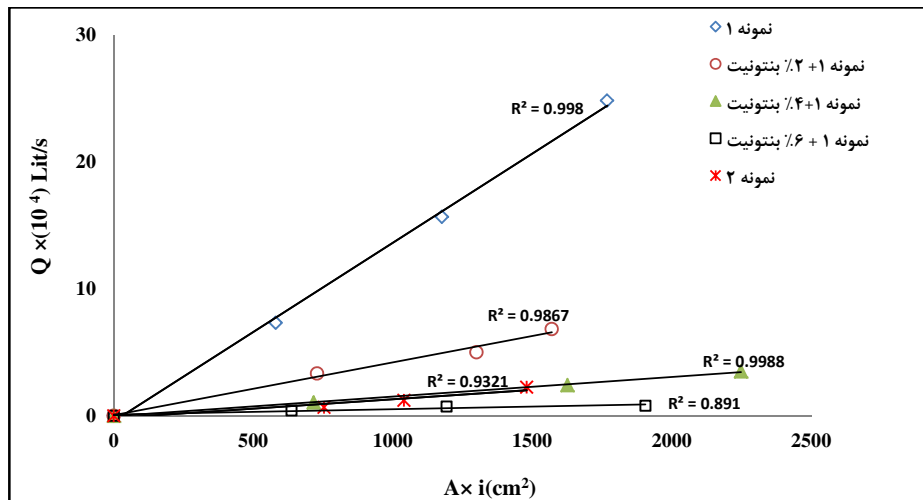
شکل ۶- تأثیر مواد افزودنی بر جرم مخصوص خشک بیشینه نمونه ۱

تأثیر مواد افزودنی بر نفوذپذیری نمونه ۱: نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، تراکم نسبی جدول ۳، خصوصیات تراکمی نمونه‌ها را در مدل فیزیکی (RC) برای تمام نمونه‌ها ۹۰ درصد است.

جدول ۳- خصوصیات نمونه‌های متراکم در مدل

نمونه	درصد بتونیت	رطوبت وزنی نمونه‌های متراکم در جعبه (درصد)	جرم مخصوص خشک نمونه‌های متراکم در جعبه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	حداکثر جرم مخصوص خشک حاصل از آزمایش تراکم استاندارد پروکتور (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	تراکم نسبی
نمونه ۱	۲	۱۳/۷	۱/۷۵	۲/۰۱	۰/۹۰
(خاک غیر چسبنده)	۴	۱۴/۲	۱/۷۲	۱/۹۰	۰/۹۰
	۶	۱۵/۰	۱/۶۸	۱/۸۶	۰/۹۰
نمونه ۲	۰	۲۱/۲	۱/۵۵	۱/۷۲	۰/۹۰
(خاک چسبنده)					

برابر شکل ۸، برای هر آزمایش نمودار دبی خروجی (Q) در مقابل حاصل‌ضرب گرادیان در سطح مقطع جریان (A×i) خطی با شیب منحصر به فرد است که نشان می‌دهد آزمایش‌ها از قانون داریسی پیروی می‌کنند. همچنین، عدد رینولدز برای تمام آزمایش‌ها بسیار کوچکتر از یک و نشان‌دهنده آرام بودن جریان و قابلیت به‌کارگیری رابطه داریسی است.



شکل ۸- دبی خروجی در مقابل حاصل ضرب گرادیان در سطح مقطع جریان برای نمونه‌های مختلف

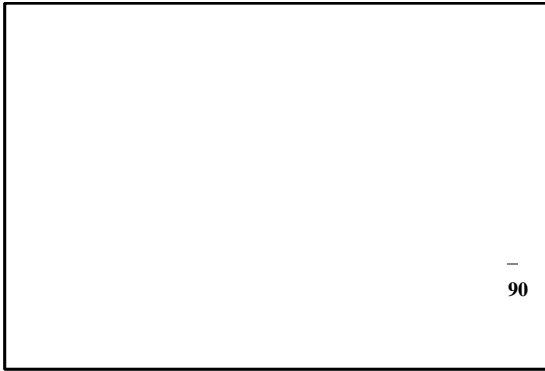
و دبی عبوری ندارد. در برخی از نمونه‌ها مقطع به صورت کاملاً پر عمل نمی‌کند و از این رو برای این نمونه‌ها مطابق جدول ۴ از میانگین سطح مقطع در رابطه داری استفاده شد.

خروج آب زلال و فاقد ماسه و ذرات ریزدانه در حین آزمایش در تمام نمونه‌ها نشان می‌دهد فرسایش داخلی رخ نداده است.

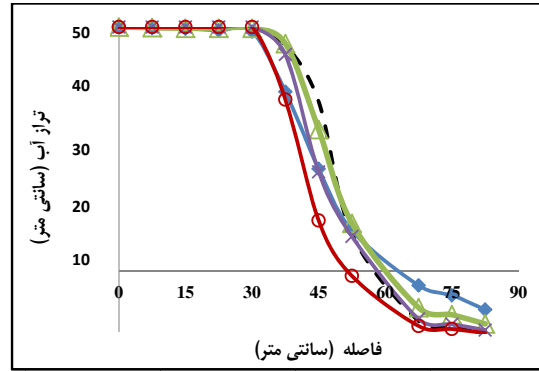
شکل ۹، مدل را حین اجرای آزمایش و شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ تراز پیژومتریک را برای نمونه‌های ۱ و ۲ و نمونه ۱ با مقدار ۲، ۴ و ۶ درصد بتونیت نشان می‌دهد. گرادیان افت فشار حد فاصل پیژومترهای موجود در فاصله ۳۷/۵ و ۵۲/۵ از ابتدای مدل اندازه‌گیری شد. با توجه به خطوط پیژومتریک، هسته سد مقطع کنترل‌کننده جریان است و مصالح درشت‌دانه اطراف تأثیری قابل توجه در افت انرژی



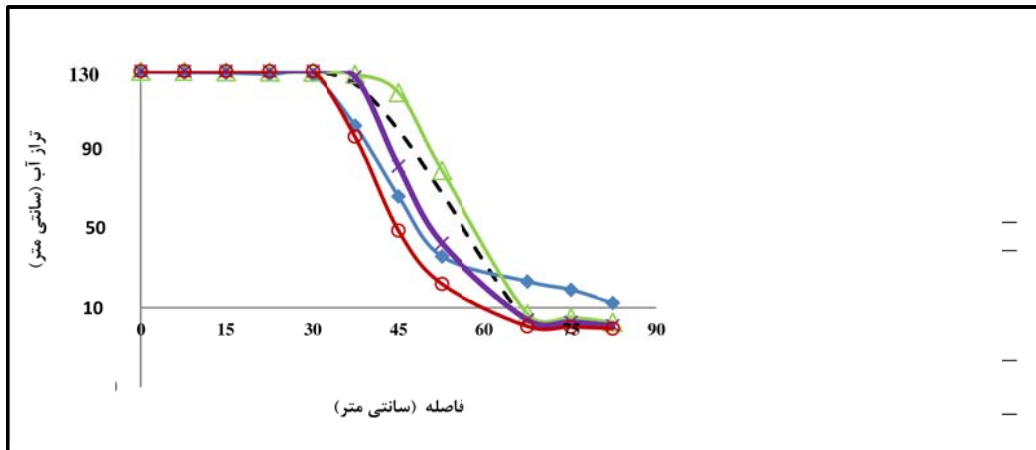
شکل ۹- مدل حین آزمایش



شکل ۱۱- فشار پیژومتریک تحت تراز ۰/۸ متر



شکل ۱۰- فشار پیژومتریک تحت تراز ۰/۴ متر



شکل ۱۲- فشار پیژومتریک تحت تراز ۱/۲ متر

جدول ۴- میانگین سطح مقطع جریان در آزمایش های مختلف

نمونه	متوسط سطح مقطع جریان (سانتی‌متر مربع)		
	۱/۲	۰/۸	۰/۴
نمونه ۱ (خاک غیرچسبنده)	۴۰۰	۴۰۰	۳۸۲
نمونه ۲ بنتونیت نمونه ۱+	۴۰۰	۴۰۰	۳۷۰
نمونه ۴+۱ بنتونیت	۴۰۰	۳۹۰	۳۶۰
نمونه ۶+۱ بنتونیت	۳۸۳/۴	۳۳۵	۳۳۰
نمونه ۲ (خاک چسبنده)	۴۰۰	۴۰۰	۳۶۴

برای هر تراز ورودی، مقادیر ضریب آبگذری اشباع افقی به کمک رابطه داری محاسبه و میانگین آن به‌عنوان ضریب آبگذری اشباع در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- ضریب آبگذری افقی اشباع (k_{sat-h}) برای نمونه‌های مختلف

(k_{sat-h}) ($\times 10^{-4}$) (سانتی‌متر بر ثانیه)	هد آب (متر)			درصد بنتونیت	نمونه
	۱/۲	۰/۸	۰/۴		
۱۳/۳۳	۱۴/۰۵	۱۳/۳۰	۱۲/۶۴	۰	
۴/۵۳	۵/۲۳	۳/۸۴	۴/۵۳	۲	نمونه ۱
۱/۵۰	۱/۵۶	۱/۴۹	۱/۴۷	۴	(خاک غیرچسبنده)
۰/۵۷	۰/۴۱	۰/۶۱	۰/۶۸	۶	
۱/۱۸	۱/۵۲	۱/۱۵	۰/۸۷	۰	نمونه ۲ (خاک چسبنده)

ضریب آبگذری اشباع به حدود 10^{-5} سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد و می‌توان گفت بنتونیت تقریباً تمام منافذ خاک را اشغال کرده است. خاک مخلوط شده با بالاترین درصد بنتونیت (۶ درصد) دارای ضریب آبگذری اشباع $5/7 \times 10^{-5}$ سانتی‌متر بر ثانیه است که در مقایسه با آبگذری نمونه شاهد (نمونه ۱)، تقریباً ۲۳ برابر کوچک‌تر است.

شکل ۱۳ تأثیر مقدار بنتونیت را در ضریب آبگذری اشباع نمونه ۱ نشان می‌دهد. بر این اساس، هدایت هیدرولیکی با افزایش بنتونیت تا ۴ درصد با شیب تندی کاهش می‌یابد و در مقادیر بیشتر، شدت کاهش هدایت هیدرولیکی کندتر می‌شود. ضریب آبگذری پس از درصد خاصی از بنتونیت تغییر چندانی ندارد، در این حالت،



شکل ۱۳- تأثیر مقدار بنتونیت بر ضریب آبگذری اشباع افقی نمونه ۱

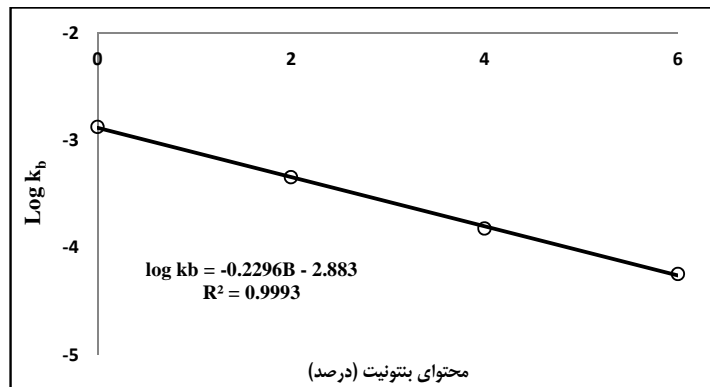
ثانیه) و درصد بنتونیت اضافه شده است. این روند با روند مطالعات سولماز و همکاران (Solmaz et al., 2008) هماهنگی دارد. با توجه به رابطه ۳، ۴/۶ درصد بنتونیت می‌تواند ضریب آبگذری نمونه غیر چسبنده (نمونه ۱) را به ضریب آبگذری اشباع نمونه چسبنده به کار رفته در هسته سد زیرزمینی سنگانه (نمونه ۲) در تراکم نسبی مشابه ($RC=0/90$) برساند.

می‌توان گفت نمودار لگاریتم هدایت هیدرولیکی در برابر مقدار بنتونیت (شکل ۱۴) به صورت خطی با رابطه ۳ است.

$$\log k_b = -2.88 - 0.23B \quad (3)$$

$$R^2=0.99$$

که در آن، k_b و B به ترتیب ضریب آبگذری افقی (سانتی‌متر بر



شکل ۱۴- مقدار بنتونیت در مقابل لگاریتم ضریب آبگذری اشباع افقی نمونه ۱

نتیجه‌گیری

در سازه‌های ذخیره آب، میزان ضریب آبگذری از مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر در عملکرد است. در این تحقیق با ساخت مدل مقطعی از سد زیرزمینی تحت ۳ تراز ثابت آب در بالادست، تأثیر افزودن بنتونیت در آبگذری بررسی گردید. نتایج بررسی‌ها نشان داده است که افزایش بنتونیت به‌علت سطح مخصوص بالا و تورم‌پذیری زیاد، ضریب آبگذری را به‌شدت کاهش می‌دهد و بنتونیت این قابلیت را دارد که برای کاهش آبگذری در منابع قرضه دور از خواستگاه سد به‌کار رود. هدایت هیدرولیکی با افزایش بنتونیت تا ۴ درصد با شیب تندی کاهش می‌یابد و در مقدار بالاتر بنتونیت، شدت کاهش هدایت هیدرولیکی کندتر می‌شود. برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود تأثیر بنتونیت در کنترل نشت شیرابه‌های حاصل از فاضلاب‌های خانگی و صنعتی به‌صورت بلندمدت بررسی شود. در این تحقیق، تأثیر بنتونیت بر خاک غیر چسبنده بررسی گردید؛ پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده تأثیر این ماده در نمونه‌های چسبنده نیز بررسی شود. همچنین، تأثیر استفاده از مواد جدیدتر مانند مواد نانو شامل (نانو رس، نانو سیلیس و نانو منگنز و ...)، خاکستر لجن فاضلاب و... در آبگذری خاک‌های چسبنده و غیر چسبنده به‌همراه تأثیر زیست محیطی آنها بررسی شود.

کاهش هدایت هیدرولیکی با افزایش مقدار بنتونیت می‌تواند با سطح مخصوص بسیار بالای ذرات بنتونیت توجیه گردد. سطح مخصوص بالای ذرات بنتونیت به آنها این اجازه را می‌دهد که بخشی از آب را در اطراف خود نگه دارند، این بخش از آب قادر به جریان آزادانه، مانند آب موجود در فضای منافذ، نخواهد بود.

عامل تأثیرگذار دیگر در کاهش نفوذپذیری می‌تواند پتانسیل تورم بالای بنتونیت باشد. بنتونیت اشباع می‌تواند آب را تا ۵ برابر جرم خود جذب کند و به‌صورت ماده ژل مانند تا ۱۵ برابر حجم خشک خود برسد (Abeeel, 1986). بنابراین، با افزودن بنتونیت هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد زیرا ماده ژل مانند بسیاری از منافذ و حفره‌های خاک را پر می‌کند. عامل مؤثر دیگر می‌تواند کاهش اندازه خاکدانه، به‌علت افزودن ذرات ریز بنتونیت، باشد. بنسون و دانیل (Benson & Daniel, 1990) نشان دادند که کاهش اندازه خاکدانه‌ها و حذف منافذ داخلی آنها باعث ایجاد منافذ کوچک‌تر و در نتیجه کاهش آبگذری می‌شود. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که سطح مخصوص بالای بنتونیت، پتانسیل بالای تورم و ذرات ریزدانه آن در کاهش آبگذری نمونه‌های حاوی بنتونیت تأثیرگذار است.

قدردانی

از کارشناسان و مدیریت محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، به‌ویژه از کارکنان بخش فنی این پژوهشکده به‌دلیل همکاری در اجرا شدن این پروژه پژوهشی صمیمانه قدردانی می‌شود.

مراجع

- Abeele, W. V. 1986. The influence of bentonite on the permeability of sandy silts. Nucl. Chem. Waste Man. 6, 81-88.
- Benson, C. H., Zhai, H. and Wang, X. 1994. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. Geotech. Eng. ASCE. 120(2): 366-387.
- Benson, C. and Daniel, D. 1990. Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay. Geotech. Eng. ASCE. 116(8): 1231-1248.
- Carman, P. C. 1939. Permeability of saturated sands, soils and clays. J. Agr. Sci. 29, 262-273.
- Chapuis, R. P. and Aubertin, M. 2003. On the use of the Kozeny-Carman's equation to predict the hydraulic conductivity of a soil. Can. Geotech. J. 40(3): 616-628.
- Ebrahimi, N., Tajbakhsh, M., Fathi-Moghadam, M. and Musavi-Jahromi, S. H. 2015. Determination of permeability coefficient for compacted saturated cohesive soils in underground dams using physical parameters. J. Agric. Eng. Res. 16(3): 1-14. (in Persian)
- Eisenhour, D. D. and Brown, R. K. 2009. Bentonite and its impact on modern life. Elements. 5(2): 83-88.
- Gates, W. P., Bouazza, A. and Churchman, G. J. 2009. Bentonite clay keeps pollutants at bay. Elements. 5(2): 105-110.
- Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S. and Imaizumi, M. 2011. Sustainable use of groundwater with underground dams. JARQ-Jpn. Agr. RES. Q. 45(1): 51-61.
- Kumar, S. and Yong, W. 2002. Effect of bentonite on compacted clay landfill barriers. Soil Sediment Contam. 11(1): 71-89.
- Landis, C. R. and von Maubeuge, K. 2004. Activated and natural sodium bentonites and their markets. Min. Eng. 56, 17-22.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. 2005. Fundamentals of Soil Behavior. 3rd Ed. Wiley, New York, NY.
- Sallfors, G. and Oberg-Hogsta, A. 2002. Determination of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures for engineering purposes. Geotech. Geol. Eng. 20, 65-80.
- Shamsaei, A. 2012. Hydraulic of Flow in Porous Media (Vol. II). Amirkabir University Press. (in Persian)
- Solmaz, P., Gedik, A. G., Lav, M. A. and Lav, A. H. 2008. Utilization of waste foundry sand (WFS) as impermeable layer (drainage blanket) for pavement structures. 1st ISSMGE International Conference on Transportation Geotechnics. Aug. 25-27. Nottingham, UK.
- Tajbakhsh, M., Fathi-Moghadam, M. and Ebrahimi, N. 2015. Laboratory evaluation of permeability coefficient relationships for saturated sandy soils. J. Pajouhesh Sazandegi. 109: 1-14. (in Persian)

Investigation on Application of the Bentonite for Underground Dam: Using Laboratory Model

N. Ebrahimi* and M. Tajbakhsh

* Corresponding Author: Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Iran. Email: n.ebrahimi@areo.ir

Received: 10 December 2016, Accepted: 16 December 2017

In arid and semi-arid regions, due to shortage of permanent surface water resources the optimal use of groundwater becomes important. In this regard, the storage of sub-surface flow within alluvial reservoirs of underground dams appears to be economical, and cost-effective. In some cases, because of the lack of construction materials at the site, the cost increases. In this case a combination of available construction materials and bentonite can meet the required criteria. In this research, by constructing a physical model of underground dam the effect of adding bentonite on decreasing horizontal saturated hydraulic conductivity in non-cohesive soil was investigated. For this purpose, 2, 4 and 6% (by weight of dry soil) of bentonite was added to the soil and after compaction by using a model, hydraulic permeability was measured. The results indicated that the hydraulic conductivity decreases with increase in the bentonite content due to the high specific surface area and high swelling potential of bentonite. Also hydraulic conductivity was reduced because of steep slope (up to 4% of bentonite) and with further increase in hydraulic conductivity the reduction rate was slowed down so it can be said that the relationship between the logarithmic graph of hydraulic conductivity and the bentonite content can be represented by a linear model. Based on this model, 4.6 percent of bentonite is required to reduce the saturated hydraulic conductivity of a noncohesive soil equal to the saturated hydraulic conductivity of the soil used in the core of the Sanganeh underground dam (in a similar relative compaction).

Key words: Bentonite, Laboratory Model, Saturated Hydraulic Conductivity, Underground Dam