

## بررسی آزمایشگاهی پدیده خود ترمیمی رس در سدهای خاکی و عوامل مؤثر بر آن

کیومرث روشنگر\*<sup>۱</sup>، محمدتقی اعلمی<sup>۲</sup>، یعقوب هوشیار<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۶

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران آب، دانشکده فنی و مهندسی عمران دانشگاه تبریز

۲- استاد، گروه مهندسی عمران آب، دانشکده فنی و مهندسی عمران دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی عمران دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kroshangar@yahoo.com

### چکیده

لایه‌های رسی متراکم از متداول‌ترین انواع لایه‌های نفوذناپذیر در سدهای خاکی به شمار می‌روند. از مهمترین عوامل شکست سدهای خاکی پدیده رگاب می‌باشد که وجود ترک در هسته از دلایل عمده شکل‌گیری این پدیده می‌باشد. این لایه‌ها بدلیل ماهیت رسی و خواص ژئوتکنیکی خاص، در طول زمان بوسیله ترک خوردگی دچار آسیب می‌گردند. خاصیت خود ترمیمی رس باعث بسته شدن ترک‌های خارجی ایجاد شده در آن می‌گردد. خود ترمیمی خاک‌های رسی به عنوان یکی از ویژگی‌های مثبت رس مورد توجه محققین بوده است. در این تحقیق با آزمایش پین هول، روش جدیدی جهت ارزیابی خود ترمیمی خاک‌های رسی ارائه شده است. برای رسیدن به محدوده مناسبی از نشانه خمیری ( $PI < 26$ )، سه حالت از منابع قرضه سد و نیار، با ترکیب ۱۰ و ۲۰ درصد بنتونیت و نمونه با خاک طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با اضافه کردن بنتونیت، برای رطوبت‌های بهینه و ۲ درصد زیر آن، واگرایی خاک کاهش یافته و به خاک غیر واگرا تبدیل می‌شود. همچنین با افزایش بنتونیت به خاک طبیعی، پدیده خود ترمیمی قابل مشاهده و پیش‌بینی است. این پدیده برای نمونه با ۲۰ درصد بنتونیت بدلیل داشتن نشانه خمیری و پتانسیل تورم بالا، از سنین پایین مشاهده گردید. نمونه دارای ۲۰ درصد بنتونیت و رطوبت ۲ درصد کمتر از رطوبت بهینه دارای بیشترین کاهش دبی خروجی نسبت به خاک طبیعی بوده است و دبی خروجی ۲۸ درصد کاهش یافت. بنابراین افزایش نشانه خمیری در محدوده مناسب سبب غیر واگرا شدن خاک رس و افزایش توان خاصیت خود ترمیمی خاک رس می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش پین هول، بنتونیت، خاک رس، خود ترمیمی، هسته رسی

## Experimental Investigation of Self-healing Phenomenon of Clay in Earth Dams and its Influencing Factors

K Roushangar<sup>\*1</sup>, M.T Alami<sup>2</sup>, Y Houshyar<sup>3</sup>

Received: March 13, 2018 Accepted: December 16, 2018

<sup>1</sup> Assoc. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Civil Eng., University of Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Civil Eng., University of Tabriz, Iran

<sup>3</sup> PhD Candidate in Hydraulic Structures. University of Tabriz, Tabriz, Iran

\* Corresponding author, Email address: kroshangar@yahoo.com

### Abstract

Compact clay layers are the most impermeable layers in earth dams. One of the most important factors in the failure of earth dams is the piping that the existence of cracks in the dam core is one of the major reasons for the formation of this phenomenon. Due to the nature of clay and its unique geotechnical properties, these layers are damaged over time by cracking. The cracks healing property in clays closes its external cracks. Self-healing of clays has been considered by researchers as one of the positive characteristics of clays. In this research, a new method is presented to assess the self-healing of clays using pinhole test. In order to reach the appropriate range of plasticity index ( $7 < PI < 26$ ), three soil samples are prepared from the Vanyar dam borrow pit as follows: first sample with 10% bentonite, second sample with 20% bentonite and third one just natural soil. The results showed that by adding bentonite, for optimum moisture content and 2% below, soil dispersion reduced and the soil became non-dispersive. Moreover, self-healing phenomenon was visible and predictable with increasing of bentonite in the natural soil. This phenomenon was observed for 20% bentonite having high plasticity index and swelling from early age. The sample with 20% bentonite and moisture content 2% lower than optimum showed the most reduction in outflow (38%) compared to the natural soil sample. Thus, plasticity index increment in the suitable range could cause the non-dispersivity of clay and increasing of self-healing ability.

Keywords: Bentonite, Clay Core, Clay Soil, Pinhole Test, Self-healing.

### مقدمه

که بر اثر آن، چسبندگی ذرات خاک از بین رفته و با جریان یافتن آب در داخل درزها و ترکها ذرات رس بتدریج شسته شده و به وسیله جریان آب از محیط خارج می‌شوند. رس دارای ویژگی مثبتی است که موجب ترمیم ترکهای ایجاد شده می‌شود. این خاصیت خود ترمیمی کانی‌های رسی در لایه‌های با نفوذ ناپذیری بسیار کم، عملاً امتیاز ویژه‌ای برای این لایه‌ها به شمار می‌رود (بدو و فرشباغ ۱۳۹۵). مطالعات مختلفی در زمینه پدیده خود ترمیمی و پتانسیل ترمیمی انواع خاک‌های رسی انجام گرفته است (سکو و همکاران ۲۰۱۱؛ پرستار و همکاران ۲۰۱۷؛ وانگ و همکاران ۲۰۱۸). بندهامن و همکاران (۲۰۰۸) در یک مطالعه آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که شناسایی و فهم

هر ساله سدهای زیادی در اثر رگاب و یا ترک‌هایی که در هسته ایجاد می‌شود، دچار خسارت می‌شوند. در حالی که اغلب این پدیده‌ها غیرقابل کنترل بنظر می‌رسد، شناخت عوامل متعدد که موجب بروز این پدیده می‌شود، سبب کنترل و کاهش احتمال وقوع پدیده رگاب می‌گردند. از عواملی که منجر به پدیده رگاب می‌گردد رس‌های واگرا یا پدیده واگرایی خاک‌ها است. این خاک‌ها، خاک‌هایی هستند که خاک رس قسمتی از حجم آن را فرا گرفته و در مجاورت آب به سهولت قابلیت شکست و وارفتن را دارند. بر اساس تحقیقات انجام گرفته، شستگی ناشی از پدیده واگرایی در خاک‌های رسی، حاصل فرآیند فیزیکی-شیمیایی است

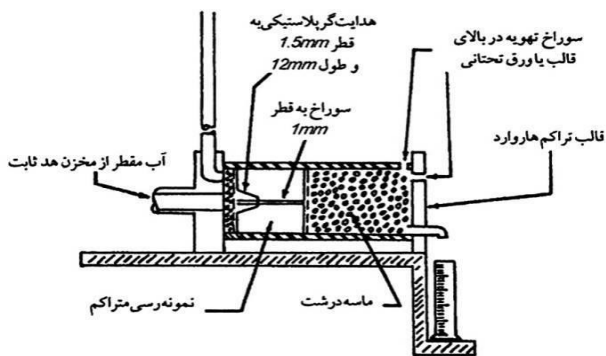
می‌شود؛ ولی افزودن ساروج به خاک تأثیر چندانی بر روی فشار و درصد تورم نداشت. بهمیاری و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ساختار اولیه رس‌های آماسی بر روی رفتار هیدرومکانیکی آن‌ها نشان دادند که با افزایش دوره‌های ترسازگی و خشکاندازی، درصد تورم و انقباض کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد رطوبت اولیه پتانسیل تورم کاهش می‌یابد. با توجه به اهداف تحقیق در این پروژه، پژوهش‌های آزمایشگاهی ژئوتکنیکی به تفکیک آزمایش‌های شاخص فیزیکی و پین هول در قالب این تحقیق انجام گرفته است. آزمایش‌های فیزیکی و شناسایی مشتمل بر آزمایش‌های دانه‌بندی، هیدرومتری، اتربرگ و تراکم بوده که به منظور شناسایی خاک‌های مورد بررسی و نیز تعیین مشخصات شاخص آن‌ها جهت امکان ارتباط با آزمایش‌های پین هول انجام گرفته است.

#### مواد و روش‌ها

سد مخزنی ونیار به منظور تامین آب کشاورزی دشت تبریز بر روی رودخانه آجی چای، بزرگترین رودخانه آذربایجان شرقی در ۵ کیلومتری شمال شرقی تبریز در پایین دست روستای ونیار احداث شده است. در تحقیق حاضر نمونه‌ای از منابع قرصه آب‌بندهای فرعی سد ونیار شامل خاک‌های رسی با خاصیت خمیری کم ( $CL$ ) بر اساس طبقه‌بندی متحد ( $USCS$ ) تهیه شده است. به منظور تعیین مشخصات فیزیکی خاک‌های مورد بررسی، آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی بر اساس استانداردهای  $ASTM$  انجام شده است. در این تحقیق آزمایش‌های دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود اتربرگ جهت تعیین حد روانی، درصد رس، عدد فعالیت و پتانسیل تورم خاک‌ها انجام شده است. نمونه خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق با اضافه کردن ۲۰ درصد بنتونیت محدوده مناسبی از نشانه خمیری رس (در حدود  $26 < PI < 7$ ) ایجاد شده است. این نمونه‌ها به

مکانیزم فرسایش داخلی به دلیل پیچیدگی‌های بسیار سخت است. با فرسایش داخلی، ویژگی‌های هیدرولیکی و مکانیکی خاک تغییر می‌کند. برای مثال نفوذپذیری

مواد ممکن است تغییر کند و ممکن است که فشار آب حفره‌ای افزایش یابد و پایداری شیب سازه را کم کند. داس نوز (۱۹۸۹) فرسایش ترک در هسته سدها را با استفاده از آزمایش ترک با ایجاد ترک نمونه با عرض ۵ میلی‌متر و برقراری جریان افقی در آن مورد تحلیل قرار داده و نشان داد که هنگامی که سرعت جریان رد شده از میان ترک کم باشد، فرسایش قابل توجهی نخواهد بود، در حالیکه در جریان‌های شدید فرسایش نقش مهم‌تری خواهد داشت. هونجو و ونزیانو (۱۹۸۹) با بهره‌گیری از مدل آماری معیارهای فیلتر موجود را مورد مقایسه و مطالعه تحلیلی قرار دادند؛ آن‌ها نشان دادند که پارامترهای مربوط به خود ترمیمی در طراحی فیلتر مفید خواهند بود بطوریکه برای خاک‌های چسبنده به عنوان خاک مبنا مناسب خواهد بود. مدیلتون در سال ۱۹۳۰ برای اولین بار موضوع پدیده واگرایی را به عنوان یکی از عوامل موثر در فرسایش خاک‌های ریزدانه معرفی نموده و بالا بودن درصد املاح سدیم در خاک‌های واگرا را یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن بیان کرد. وانگ و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی آزمایشگاهی روی خود ترمیمی ترک رس در سد نشان دادند که خود ترمیمی ترک، به مدت زمان آزمایش تحت فشار آب  $200 Kp$  وابسته است. همچنین نرخ دبی بحرانی با افزایش عمق ترک یا مقدار  $D_{15}/D_{85}$  افزایش می‌یابد. الرواس و همکاران (۲۰۰۵) با چند آزمایش ادنومتریک، رفتار تورمی خاک را با افزودن درصد‌های مختلف آهک، سیمان، ساروج، ترکیب آهک و سیمان بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که با اضافه کردن ۳ و ۶ درصد آهک، فشار تورمی خاک از  $249kp$  به  $158kp$  و صفر کاهش می‌یابد. آن‌ها نتیجه گرفتند که آهک و سیمان و ترکیب آن‌ها باعث کاهش فشار تورم و درصد تورم



شکل ۲- شمای کلی آزمایش پین هول

بصورت طبیعی در اثر حل شدن، ذرات نمونه تحت بار هیدرولیکی از میان رس‌های واگرا و غیرواگرای مختلف خارج می‌شوند. نتایج آزمایش نمونه‌ها، بر اساس میزان حل شدگی خارج شده از نمونه و سرعت جاری شدن و میزان دبی خروجی و اندازه نهایی سوراخ نمونه و بر اساس مشاهدات انجام گرفته، قابل بررسی و طبقه‌بندی است (جدول ۱). کلاس‌بندی نمونه‌های خاک در رده‌های واگرایی در آزمایش پین هول بشرح زیر می‌باشد:

## روش A

$D1$  و  $D2$  رس‌های واگرایی که تحت بار آبی ۵۰ میلی‌متر سریعاً وا رفته و شکست پیدا می‌کنند.  $ND3$  و  $ND4$  رس‌ها با واگرایی متوسط و کم که تحت بار آبی ۵۰ یا ۱۸۰ میلی‌متر به آهستگی فرسوده می‌شوند.  $ND1$  و  $ND2$  رس‌های غیر واگرا که تحت بار آبی ۳۸۰ یا ۱۰۲۰ میلی‌متر بصورت غیرکلوئیدی و خیلی آهسته فرسوده می‌شوند.

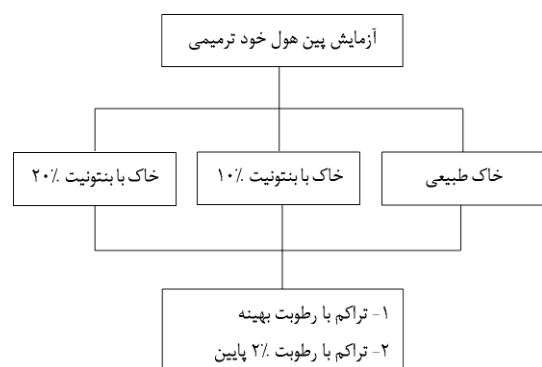
## روش B

$D$  رس‌های واگرایی که تحت بار آبی ۵۰ میلی‌متر سریعاً شکسته می‌شوند.  $SD$  رس‌ها با واگرایی متوسط و کم که تحت بار آبی ۱۸۰ میلی‌متر به آرامی فرسوده می‌شوند.  $ND$  رس‌های غیر واگرا که بصورت غیرکلوئیدی تحت بار آبی ۳۸۰ خیلی آهسته فرسوده می‌شوند.

## روش C

سه صورت نمونه‌های خاک طبیعی، نمونه خاکی طبیعی با ۱۰ درصد بنتونیت و نمونه خاکی طبیعی با ۲۰ درصد بنتونیت در رطوبت‌های مختلف در محدوده رطوبت بهینه تهیه شده است (شکل ۱). برای آزمایش تراکم نیز، پس از خشک شدن نمونه‌ها در معرض هوا قرار گرفته و سپس دانه‌ها خرد شده و جهت انجام آزمایش تراکم استاندارد  $ASTM D698$  و تعیین درصد رطوبت بهینه تراکم و وزن مخصوص خشک مورد استفاده قرار گرفته است ( $ASTM D698, 2000$ ).

در این تحقیق از دستگاه پین هول ساخت شرکت (DOTEK İLERİ TEKNOLOJİ) برای انجام آزمایش پین هول مطابق با استاندارد ( $ASTM D4647-93, 1998$ ) جهت ارزیابی خود ترمیم خاک‌های رسی استفاده شده است. این آزمایش، روش مستقیمی جهت توصیف اندازه‌گیری قابلیت واگرایی و فرسایش کلوییدی در خاک‌های رسی است که بدلیل حرکت آب از میان حفره‌های کوچک در نمونه سوراخ شده ایجا می‌گردد. این آزمایش با آب مقطر که به صورت افقی تحت بار هیدرولیکی ۵۰ میلی‌متر از میان یک حفره سوراخ شده به قطر ۱ میلی‌متر که از یک نمونه خاک رد می‌شود، شروع می‌گردد (شکل ۲).



شکل ۱- فلوچارت نمونه‌ها و رطوبت‌های مورد آزمایش

می‌شوند.  $ND1$  و  $ND2$  رس‌های غیر واگرا که تحت بار آبی ۳۸۰ میلی متر بصورت غیرکلویدی و خیلی آرام فرسوده می‌شوند.

$D1$  و  $D2$  رس‌های واگرایی که تحت بار آبی ۵۰ میلی‌متر سریعاً وا رفته و شکست پیدا می‌کنند.  $ND3$  و  $ND4$  رس‌ها با واگرایی متوسط و کم که تحت بار آبی ۵۰، ۱۸۰ و یا ۳۸۰ میلی‌متر به آرامی فرسوده

جدول ۱- کلاس‌بندی خاک‌ها در آزمایش پین هول (ASTM Standard D4647-93, 1998)

| اندازه حفره بعد از آزمایش<br>$mm$ | تیرگی جریان در پایان آزمایش |                       | دبی عبوری از نمونه<br>$ml\ s^{-1}$ | زمان آزمایش<br>$min$ | بار آب<br>$mm$ | کلاس بندی |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------|----------------|-----------|
|                                   | از کنار                     | از بالا               |                                    |                      |                |           |
| $\geq 2$                          | کدر                         | خیلی کدر              | ۱-۱/۴                              | ۵                    | ۵۰             | $D1$      |
| $> 1/5$                           | کدر متوسط                   | کدر                   | ۱-۱/۴                              | ۱۰                   | ۵۰             | $D2$      |
| $\leq 1/5$                        | اندکی کدر                   | کدر متوسط             | ۰/۸-۱                              | ۱۰                   | ۵۰             | $ND4$     |
| $\geq 1/5$                        | کاملاً واضح                 | اندکی کدر             | ۱/۴-۲/۷                            | ۵                    | ۱۸۰            | $ND3$     |
|                                   |                             |                       | ۱/۸-۳/۲                            | ۵                    | ۳۸۰            |           |
| $< 1/5$                           | شفاف                        | واضح                  | $> 3$                              | ۵                    | ۱۰۲۰           | $ND2$     |
| ۱                                 | کاملاً شفاف                 | کاملاً شفاف           | $\leq 3$                           | ۵                    | ۱۰۲۰           | $ND1$     |
| <b>روش B</b>                      |                             |                       |                                    |                      |                |           |
| $\geq 1/5$                        | اندکی کدر به کدری           | خیلی کدر به اندکی کدر | -                                  | ۱۰                   | ۵۰             | $D$       |
| $\geq 1/5$                        | کاملاً واضح                 | اندکی کدر             | -                                  | ۵                    | ۱۸۰-۳۸۰        | $SD$      |
| $< 1/5$                           | شفاف                        | اندکی کدر به شفاف     | -                                  | ۵                    | ۳۸۰            | $ND$      |

بنتونیت ۱۰ درصد و خاک با بنتونیت ۲۰ درصد) قابل مشاهده و تطبیق است. که این افزایش غیرخطی نشانه خمیری و حد روانی، سبب تسریع در روند خود ترمیمی خاک رس می‌گردد.

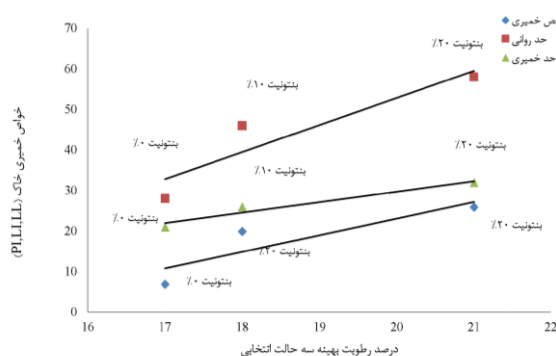
مطابق جدول ۲ برای درصد ریزدانه ثابت با تغییر کانی‌های تشکیل دهنده رس، تغییرات وسیعی در چگالی خشک و رطوبت بهینه ایجاد می‌گردد، بنابراین نوع رس و خواص آن تأثیر مهمی بر مشخصات تراکم خاک‌های رسی دارد که به تبع روند خود ترمیمی نیز بر اساس خواص رس متغیر خواهد بود.

وجود کانی‌های مونت موریلونیت پتانسیل خود ترمیمی زیادی را در خاک رس و در شرایط مختلف ایجاد می‌نماید.

بر اساس مشاهدات آزمایش پین هول، کلاس‌بندی نمونه‌های خاک در رده‌های واگرایی و خود ترمیمی مطابق جدول ۳ می‌باشد. بر اساس میزان کاهش یا افزایش مقادیر دبی خروجی و نرخ سرعت جریان و مشاهدات عینی میزان خود ترمیمی قابل ارزیابی و پیش‌بینی است. به عنوان مثال با آزمایش ۳

## نتایج و بحث

شکل ۳ خواص ژئوتکنیکی نمونه‌های مورد آزمایش در مقابل درصد رطوبت بهینه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تغییرات درصد رطوبت بهینه در مقابل حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری

بررسی شکل حاکی از این است که درصد رطوبت بهینه تراکم خاک‌های رسی، با افزایش حد روانی و حد خمیری، به صورت خطی افزایش و با افزایش شاخص خمیری و حد روانی به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد، که این امر در نمونه‌های مورد آزمایش، در سه حالت مختلف (خاک طبیعی، خاک با

خروجی در ۷ روز نشانگر افزایش روند خودترمیمی در نمونه‌ها می‌باشد. مدت زمان آزمایش برای هرکدام از نمونه‌ها ۲۵ دقیقه و ارتفاع آبی ۹۰۰-۵۰ mm می‌باشد.

روز بعد از نمونه‌گیری و اندازه‌گیری دبی خروجی و آزمایش ۷ روز بعد از نمونه‌گیری و اندازه‌گیری دبی خروجی و مقایسه مقادیر هر دو آزمایش کاهش دبی

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود اتربرگ نمونه‌های خاک

| وزن مخصوص<br>مخصوص<br>ظاهری<br>خشک<br>( $gr\ cm^{-3}$ ) | درصد<br>رطوبت<br>بهینه<br>(%) | پتانسیل<br>تورم | عدد<br>فعالیت | درصد ذرات<br>کوچکتر از ۲<br>میکرون (%) | درصد<br>عبوری از<br>الک ۲۰۰ | طبقه‌بندی | شاخص<br>خمیری<br>$PI(\%)$ | حد<br>خمیری<br>$PL(\%)$ | حد<br>روانی<br>(%)<br>LL | خاک                   |
|---|-------------------------------|-----------------|---------------|--|-----------------------------|-----------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
| ۱/۸   | ۱۷                            | ۰/۰۳            | ۰/۷۷          | ۹                                      | ۸۰/۸                        | CL        | ۷                         | ۲۱                      | ۲۸                       | خاک طبیعی             |
| ۱/۷۲۵   | ۱۸                            | ۱/۰۹            | ۱/۱۷          | ۱۸                                     | ۸۱/۲                        | CL        | ۲۰                        | ۲۶                      | ۴۶                       | خاک با بنتونیت<br>۱۰٪ |
| ۱/۶۵  | ۲۱                            | ۲/۶             | ۱/۰           | ۲۶                                     | ۸۱/۴                        | CH        | ۲۶                        | ۳۲                      | ۵۸                       | خاک با بنتونیت<br>۲۰٪ |

خمیری بالا با درصد رطوبت بهینه تراکم مکانیزم خود ترمیمی را در مدت زمان اندکی فعال می‌نماید. بنابراین تأثیر مستقیم خواص خمیری و عوامل وابسته به آن در میزان پتانسیل تورم قابل مشاهده است. بطوریکه نمونه با بنتونیت ۲۰ درصد با دارا بودن بالاترین میزان پتانسیل تورم برای تمامی سنین در تمامی رطوبت‌های مورد بررسی خود ترمیمی قابل مشاهده و پیش‌بینی است. همچنین در این نمونه در رطوبت‌های مختلف، کاهش قطر سوراخ از اولین آزمایش مشهود بوده و با گذشت زمان این میزان کاهش، روند افزایشی را طی می‌نمود بطوریکه بعد از حدود ۲ ماه، بنظر می‌رسد که سوراخ کاملاً ترمیم شده است. در میان نمونه‌های که با رطوبت ۲ درصد زیر رطوبت بهینه تهیه شده بودند، خود ترمیمی مطلوب‌تری را نشان می‌دادند و کاهش قطر محسوس‌تری داشتند. روند دبی خروجی با گذشت زمان نگهداری بیشتر نمونه‌ها در رطوبت مورد نظر این میزان کاهش می‌یافت. نمونه با رطوبت ۲ درصد زیر رطوبت بهینه (۱۹٪)، خود ترمیمی و کاهش قطر محسوس‌تری داشته است (جدول ۳). شکل ۴ میانگین دبی خروجی از نمونه با بنتونیت ۲۰ درصد در سنین و رطوبت‌های مختلف و شکل ۵ دبی خروجی از نمونه با

بررسی نتایج جدول ۳ و مشاهدات آزمایش که شامل افزایش یا کاهش قطر سوراخ‌های ایجاد شده در نمونه‌ها و همچنین نرخ سرعت دبی خروجی و ارزیابی آب خروجی براساس رنگ، اندازه ذرات دانه‌ها، زمان و بار آبی‌های مختلف است، نشان می‌دهد که برای نمونه‌ها با ۱۰٪ و ۲۰٪ بنتونیت در تمامی حالت‌ها غیر واگرا بوده و برای خاک طبیعی تنها برای رطوبت بهینه ۱۷٪ واگرایی رخ نداده است. برای نمونه با بنتونیت‌های ۱۰٪ و ۲۰٪ خود ترمیمی برای تمامی حالت‌ها مشاهده شده است. بررسی نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که برای نمونه با بنتونیت ۲۰٪ خود ترمیمی از سنین پایین نمونه شروع گردیده است که ناشی از بالا بودن نشانه خمیری این نمونه می‌باشد. در این تحقیق همانطوری که مولینو و همکاران ۲۰۱۴ نیز اشاره کرده‌اند منظور از سنین پایین نمونه بدین مفهوم می‌باشد که آزمایش در روزهای اولیه بعد از نمونه‌گیری انجام گرفته است (۳ روزه). همچنین برای نمونه با بنتونیت ۱۰٪ در رطوبت بهینه ۱۸٪ خود ترمیمی در مدت زمان اندکی فعال گردیده است.

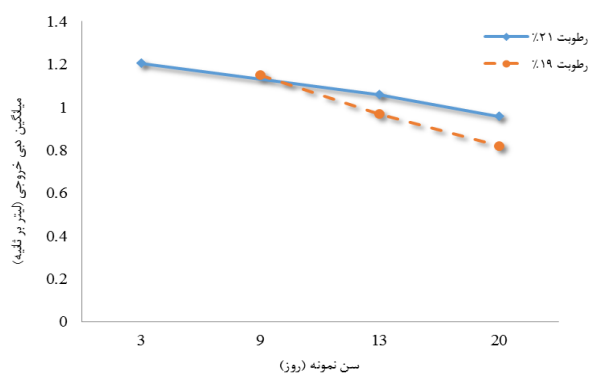
نمونه‌هایی با دامنه خمیری بالاتر، در شرایط تراکمی و رطوبتی یکسان، میزان خود ترمیمی بالاتری در زمان کوتاه از خود نشان می‌دهند، یعنی نشانه

بتونیت ۲۰ درصد در زمان‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ دقیقه آزمایش در سنین مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج کلاس‌بندی و خود ترمیمی نمونه‌ها.

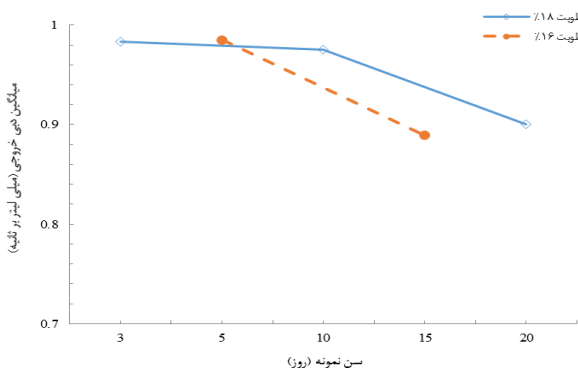
| رطوبت نمونه (%)     | سن نمونه (day) | ارتفاع آبی (mm) | زمان آزمایش (min) | تیرگی جریان | کلاس‌بندی       | خود ترمیمی                   |
|---------------------|----------------|-----------------|-------------------|-------------|-----------------|------------------------------|
| نمونه با ۲۰٪ بتونیت |                |                 |                   |             |                 |                              |
| ۲۱                  | ۳              | ۲۸۰             | ۲۰                | کدر شفاف    | غیر واگرا (ND2) | خود ترمیمی قابل پیش‌بینی است |
| ۲۱                  | ۱۳             | ۹۰۰             | ۲۱                | کدر شفاف    | غیر واگرا (ND2) | خود ترمیمی قابل پیش‌بینی است |
| ۲۱                  | ۲۰             | ۲۸۰             | ۲۰                | کدر شفاف    | غیر واگرا (ND2) | خود ترمیمی قابل مشاهده است   |
| ۱۹                  | ۹              | ۹۰۰             | ۲۱                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND1) | خود ترمیمی قابل پیش‌بینی است |
| ۱۹                  | ۱۳             | ۹۰۰             | ۲۱                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND1) | خود ترمیمی قابل پیش‌بینی است |
| ۱۹                  | ۲۰             | ۹۰۰             | ۲۱                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND1) | خود ترمیمی قابل پیش‌بینی است |
| نمونه با ۱۰٪ بتونیت |                |                 |                   |             |                 |                              |
| ۱۸                  | ۳              | ۹۰۰             | ۲۱                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND1) | -                            |
| ۱۸                  | ۱۰             | ۹۰۰             | ۲۱                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND1) | خود ترمیمی قابل مشاهده است   |
| ۱۸                  | ۲۰             | ۹۰۰             | ۲۱                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND2) | خود ترمیمی قابل مشاهده است   |
| ۱۶                  | ۵              | ۲۸۰             | ۲۱                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND1) | -                            |
| ۱۶                  | ۱۵             | ۳۸۰             | ۱۸                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND1) | خود ترمیمی قابل پیش‌بینی است |
| نمونه با خاک طبیعی  |                |                 |                   |             |                 |                              |
| ۱۵                  | ۳              | ۳۸۰             | ۲۰                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND1) | -                            |
| ۱۵                  | ۱۴             | ۳۸۰             | ۲۰                | کدر شفاف    | واگرا (ND3)     | -                            |
| ۱۵                  | ۲۰             | ۳۸۰             | ۲۰                | کدر شفاف    | واگرا (ND2)     | -                            |
| ۱۷                  | ۱۰             | ۳۸۰             | ۲۰                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND2) | -                            |
| ۱۷                  | ۲۰             | ۳۸۰             | ۲۰                | کاملاً شفاف | غیر واگرا (ND2) | -                            |

بررسی شکل حاکی از این است که با گذشت سن نمونه‌ها، میانگین دبی خروجی کاهش یافته است. همچنین برای نمونه با رطوبت ۲ درصد زیر رطوبت بهینه میانگین دبی خروجی برای تمامی سنین کمتر از نمونه با رطوبت بهینه می‌باشد.

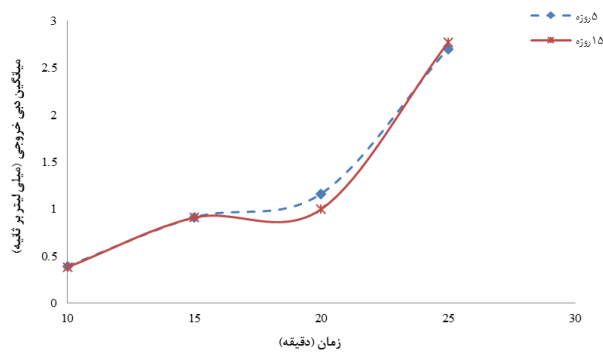


شکل ۴- میانگین دبی خروجی از نمونه‌ها در سنین مختلف در بتونیت ۲۰٪

برای نمونه با ۱۰ درصد بنتونیت مشاهده گردید که با گذشت سن نمونه‌ها میانگین دبی خروجی برای رطوبت بهینه و ۲ درصد زیر آن کاهش می‌یابد (شکل ۷ و ۸).

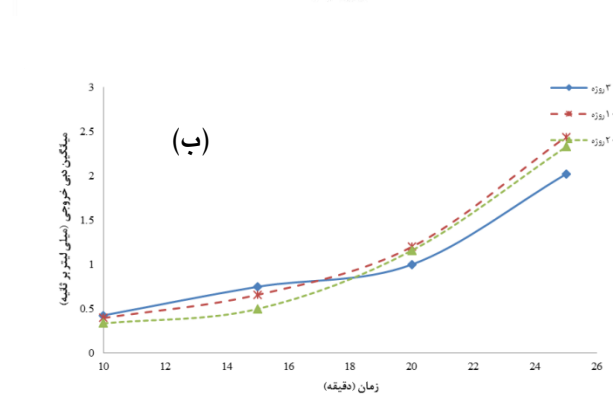
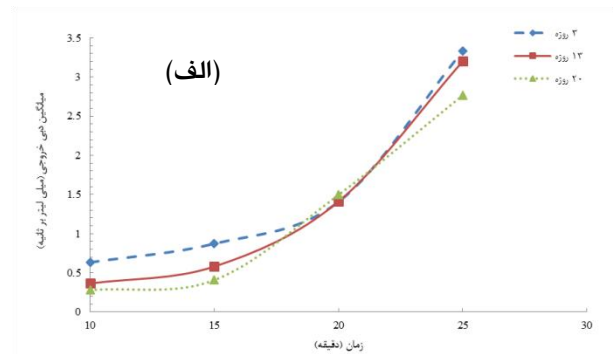


شکل ۷- میانگین دبی خروجی از نمونه‌ها در سنین مختلف در بنتونیت ۱۰٪

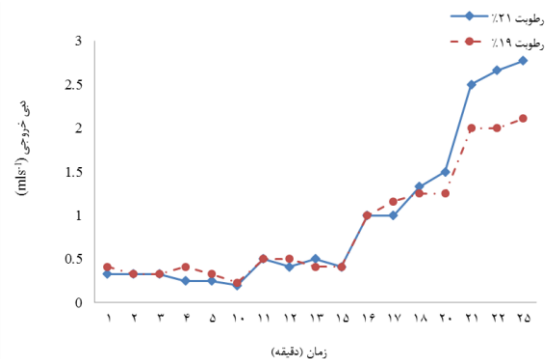


شکل ۸- میانگین دبی خروجی در طول آزمایش در سنین مختلف با بنتونیت ۱۰٪ (الف) رطوبت ۱۸٪ (ب) رطوبت ۱۶٪

هر چند که با گذشت زمان، خود ترمیمی عملاً اتفاق می‌افتد. ولی این خود ترمیمی در ارتفاع آبی پایین خود را نشان می‌دهد و با افزایش میزان بار آبی، نمونه حالت واگرایی بخود گرفته و دبی خروجی افزایش یافته و بیشتر از دبی خروجی رطوبت بهینه می‌باشد (شکل ۹). البته این روند با گذشت سن نمونه‌ها، این روند کاهش یافته و خود ترمیمی بطور کامل ایجاد می‌گردد. با وجود اینکه نمونه با بنتونیت ۱۰ درصد خود ترمیمی قابل توجه و یکنواختی را با افزایش بار آبی و سن نمونه‌ها از خود نشان نمی‌دهد ولی می‌توان عنوان کرد که خاک

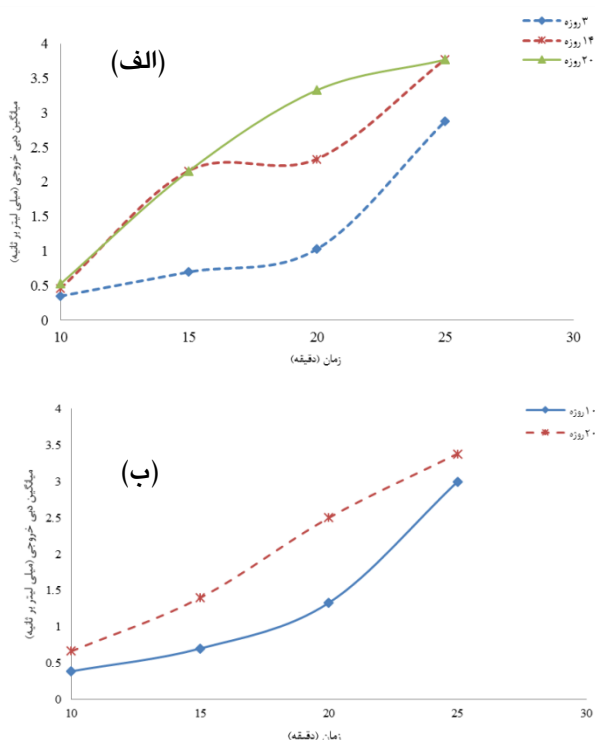


شکل ۵- میانگین دبی خروجی در طول آزمایش در سنین مختلف با بنتونیت ۲۰٪: (الف) رطوبت ۲۱٪ (ب) رطوبت ۱۹٪  
شکل ۶ میزان دبی خروجی در نمونه با بنتونیت ۲۰٪ در طول آزمایش در سن ۲۰ روزه برای رطوبت‌های مختلف را نشان می‌دهد. میزان دبی خروجی برای هر دو نمونه تا پنج دقیقه آخر زمان آزمایش بسیار نزدیک می‌باشد. در پنج دقیقه آخر زمان آزمایش میزان دبی خروجی برای نمونه با رطوبت ۱۹٪ پایین‌تر از نمونه با رطوبت ۲۱٪ می‌باشد.

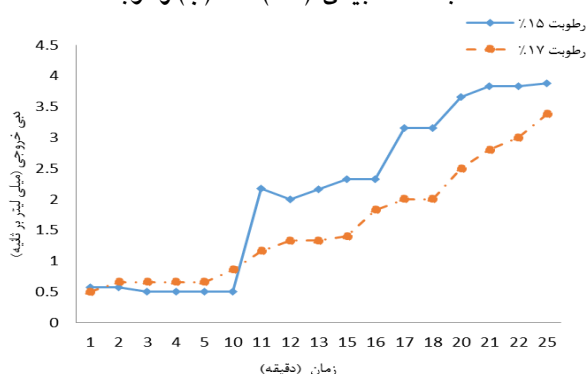


شکل ۶- میزان دبی خروجی در نمونه با بنتونیت ۲۰٪ در طول آزمایش در سن ۲۰ روزه.





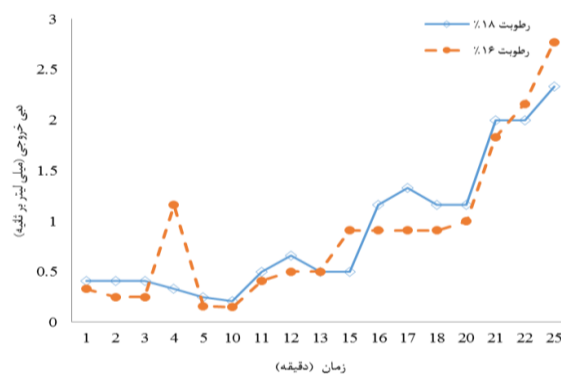
شکل ۱۱- میانگین دبی خروجی در طول آزمایش در سنین مختلف با خاک طبیعی: (الف) ۱۵٪ (ب) رطوبت ۱۷٪



شکل ۱۲- میزان دبی خروجی در نمونه با خاک طبیعی در طول آزمایش با رطوبت‌های ۱۵ و ۱۷ درصد در سن ۲۰ روزه

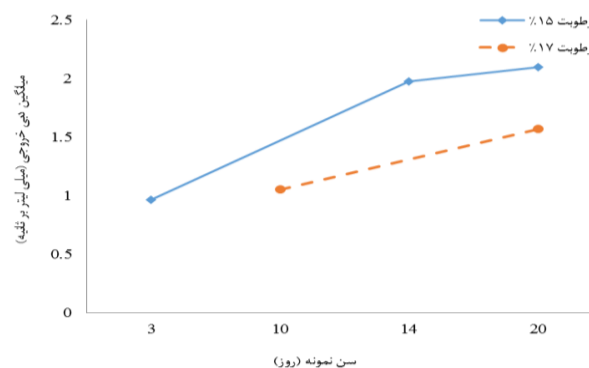
شکل ۱۳ ماکزیمم دبی خروجی برای نمونه‌ها با درصد بنتونیت‌های مختلف را نشان می‌دهد. بررسی نتایج حاصله حاکی از این است که برای رطوبت بهینه با افزایش ۱۰ درصدی بنتونیت به خاک طبیعی، میزان دبی خروجی ۳۱ درصد کاهش یافته و با افزایش ۲۰ درصدی بنتونیت میزان دبی خروجی نسبت به نمونه

با رطوبت ۲ درصد زیر رطوبت بهینه، نسبت به حالت رطوبت بهینه خود ترمیمی مطلوب‌تری یعنی کاهش قطر و دبی بیشتری نشان داده است (اشکال ۷ و ۸).



شکل ۹- میزان دبی خروجی در نمونه با بنتونیت ۱۰٪ در طول آزمایش در سن ۲۰ و ۱۵ روزه

در مورد خاک طبیعی بدون بنتونیت، نمونه‌هایی که با رطوبت بهینه متراکم شده‌اند در طول زمان، روند خود ترمیمی مطلوب‌تری را از خود نشان می‌دهد. هرچند این موضوع به صورت کاهش قطر قابل مشاهده نیست، ولی دبی خروجی نشان دهنده این واقعیت است. در حالی‌که در نمونه‌های ۲ درصد زیر رطوبت بهینه، این روند حالت عکس داشته و نمونه بیشتر به سمت واگرایی حرکت می‌نماید (اشکال ۱۰، ۱۱ و ۱۲).



شکل ۱۰- میانگین دبی خروجی از نمونه‌ها در سنین مختلف در خاک طبیعی

نمونه‌های دارای بنتونیت برای هر دو حالت رطوبت بهینه و ۲ درصد زیر آن غیر واگرا بوده، در حالی که برای خاک طبیعی تنها برای رطوبت بهینه ۱۷٪ غیر واگرا می‌باشد.

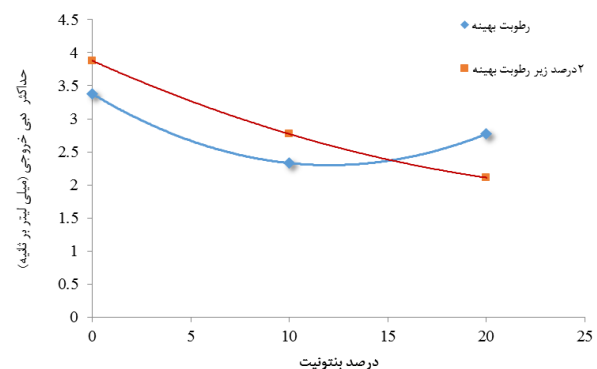
در آزمایشات انجام گرفته با افزایش نشانه خمیری در محدوده مناسب خاک طبیعی پدیده خود ترمیمی مشاهده گردید. این پدیده برای نمونه با ۲۰ درصد بنتونیت از سنین پایین شروع شده که حاکی از این است که نمونه با دامنه خمیری بالاتر، در شرایط تراکمی و رطوبتی یکسان، میزان خود ترمیمی بالاتری در زمان کوتاه‌تر از خود نشان می‌دهد.

با افزایش بنتونیت به خاک طبیعی حداقل ۱۸ درصد و حداکثر ۳۸ درصد کاهش در دبی عبوری مشاهده گردید. که بیشترین کاهش مربوط به بنتونیت ۲۰ درصد با رطوبت ۲ درصد زیر رطوبت بهینه می‌باشد. بنابراین می‌توان عنوان کرد که با افزایش نشانه خمیری بیشترین کاهش دبی در رطوبت‌های پایین‌تر از رطوبت بهینه قابل مشاهده است.

نمونه‌های با دامنه خمیری بالاتر، در شرایط تراکمی و رطوبتی یکسان، میزان خود ترمیمی بالاتری در زمان کوتاه از خود نشان می‌دهند، یعنی نشانه خمیری بالا سبب تسریع در روند خود ترمیمی خاک رس می‌گردد. بطوریکه نمونه با ۲۰ درصد بنتونیت با داشتن شاخص خمیری بالا ( $PI=26$ )، بیشترین کاهش قطر و دبی خروجی را از خود نشان داد.

نفوذپذیری لایه‌های نفوذناپذیر رسی، در شرایط متفاوتی از رطوبت و تراکم و کانی‌های تشکیل دهنده دچار تغییر می‌گردد. اگر ترک‌های در لایه نفوذناپذیر به وجود آمده باشد، با گذشت زمان ترمیم شده و نفوذپذیری کاهش پیدا خواهد کرد. این موضوع در خاک‌هایی که پتانسیل تورمی بالایی را دارند، مشاهده می‌شود که در آزمایش‌های انجام گرفته، بهترین حالت خاک در بنتونیت ۲۰ درصد و ۲ درصد زیر رطوبت بهینه و در تراکم استاندارد با داشتن بالاترین میزان

بدون بنتونیت حدود ۱۸ درصد کاهش یافته است. برای ۲ درصد زیر رطوبت بهینه نیز با افزایش ۱۰ درصد بنتونیت دبی خروجی ۳۳ درصد کاهش یافته، و با افزایش میزان بنتونیت به ۲۰ درصد دبی خروجی، ۳۸ درصد نسبت به نمونه بدون بنتونیت کاهش یافته است. بنابراین می‌توان عنوان کرد که بیشترین میزان کاهش دبی مربوط به بنتونیت ۲۰ درصد و رطوبت ۲ درصد زیر رطوبت بهینه می‌باشد. همچنین کاهش میزان دبی خروجی از نمونه‌ها با اضافه کردن بنتونیت قابل نتیجه‌گیری است.



شکل ۱۳- ماکزیمم دبی خروجی از نمونه‌ها در سنین آخر آزمایش برای رطوبت بهینه و ۲ درصد زیر آن با درصد بنتونیت‌های مختلف

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی خود ترمیمی، در هسته سدهای خاکی مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور نمونه‌ای از منابع قرضه سد و نیار واقع در استان آذربایجان شرقی و در ۵ کیلومتری شمال شرقی شهر تبریز تهیه شد. این نمونه به سه صورت، با ترکیب ۱۰ و ۲۰ درصد بنتونیت، و خاک طبیعی با استفاده از آزمایش پین هول مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق حاکی از این است که برای

پتانسیل تورم ( $S=۲/۰۶$ ) دیده می‌شود. به طوری که روند خود ترمیمی در زمان‌های طولانی‌تر ادامه یافته و ترک‌های موجود ترمیم می‌شوند. بنابراین با توجه به خصوصیات تورمی هر خاک، اثر خود ترمیمی متفاوت است.

#### منابع مورد استفاده

- Al-Rawas AA, Hago AW, Al-Sarmi H, 2005. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment Journal*, 40: 681–687.
- Anonymous, 1998. Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test. American Society for Testing and Materials (ASTM D4647-93). Philadelphia, PA.
- Anonymous, 2000. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort American Society for Testing and Materials (ASTM D698, 2000). West Conshohocken, PA.
- Badv K, Frashbaf M, 2016. Effect of consolidation on chloride diffusion coefficient in a clayey soil. *Water and Soil Science*, University of Tabriz 26: 119–132. (In Persian).
- Behamyari H, Azhdari M, Zomorrodian SMA, 2011. Laboratory studying of the effect of the initial structure of the swelling clays on their hydromechanical behavior. 6th National Congress on Civil Engineering. 26–27 April. University of Semnan, Semnan. (In Persian).
- Bendhamane F, Marot D, Alexis A, 2008. Experimental parametric study of suffusion and backward erosion, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 134: 57–67.
- Das Neves EM, 1989. Analysis of crack erosion in dam cores: the crack erosion test. Editora Edgard Blucher Ltda, Sao Paulo.
- Honjo Y, Veneziano D, 1989. Improved filter criterion for cohesion less soils. *Journal of Geotechnical Engineering* 115: 75–94.
- Molino B, Vincenzo AD, Ferone C, Messina F, Colangelo F, Cioffi R, 2014. Recycling of clay sediments for geopolymer binder production. A new perspective for reservoir management in the framework of Italian legislation: The Occhito Reservoir case study. *Materials* 7: 5603–5616.
- Seco A, Ramírez F, Miqueleiz L, García B, 2011. Stabilization of expansive soils for use in construction. *Applied Clay Science* 51: 348–352.
- Parastar F, Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Alirezazadeh A, 2017. A parametric study on hydraulic conductivity and self-healing properties of geotextile clay liners used in landfills. *Journal of Environmental Management* 202: 29–37.
- Wang JJ, Zhang, HP, Zhang L, Liang Y, 2013. Experimental study on self-healing of crack in clay seepage barrier. *Engineering Geology* 159: 31–35.
- Wang W, Li W, Fan W, Zhang X, Song L, Xiong C, Gao X, Liu, X, 2018. Accelerated self-healing performance of magnetic gradient coating. *Chemical Engineering Journal* 332: 658–670.