ارزیابی تأثیر دامنه‌ی خمیری بر میزان آبشستگی و خاصیت خودترمیمی خاک‌های رسی با مواد افزودنی نانورس

مقاله پژوهشی

احمدرضا مظاهری، استادیار، گروه عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران
شهاب حسن‌پور*، استادیار، گروه عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران
امید خالقی پور، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sh.hassanpour@abru.ac.ir

دریافت: ٩٩/٠٤/٢٩- پذیرش: ٩٩/١٠/٠٥
صفحه ٢٦٥-٢٥١

چکیده

لایه‌های رسی متراکم به عنوان یکی از متداول‌ترین لایه‌های نفوذناپذیر در اکثر سازه‌های ژئوتکنیکی مانند سدهای خاکی و مراکز دفن زباله‌های شهری و رادیواکتیو کاربرد دارند. به دلیل خصوصیات ژئوتکنیکی خاص، این لایه‌ها در طول عمر خود به‌وسیله ترک‌خوردگی دچار آسیب می‌گردند این ترک‌ها باعث افزایش نفوذپذیری لایه و کاهش کارایی آن می‌گردد. با توجه به لزوم آگاهی و شناخت عوامل موثر بر پایداری سازه‌های ژئوتکنیکی ساخته شده با این لایه‌ها در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از خاصیت خودترمیمی خاک‌های رسی گامی در جهت بهبود عملکرد خاک‌ها در شرایط مختلف برداشته شود. در تحقیق حاضر با انجام آزمایشات متعدد نشان داده شده است که می‌توان با افزایش دامنه خمیری خاک‌های رسی، سرعت ترمیم ترک را افزایش داد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزودن نانورس مونت‌موریلونیت به خاک باعث افزایش فرآیند خودترمیمی ترک‌ها می‌شود؛ گذشت زمان تاثیر این افزایش را در روند ترمیم ترک‌های ایجاد شده در نمونه‌ها را کاملاً آشکار می‌کند. میزان دبی خروجی نمونه‌ها نسبت به زمان سپری شده در طی خودترمیمی اندازه‌گیری می‌شوند و با توجه به نمودارها مورد بررسی قرار می‌گیرند. آزمایشات نشان دادند که میزان درصدهای نانورس مونت‌موریلنیت بی‌تأثیر نبوده و باعث کاهش میزان جریان در نمونه‌ها هستند، که این نشانه‌ی خود ترمیمی ترک بوسیله افزودنی نانورس است. میزان کل دبی خروجی در نمونه‌های حاوی نانورس از نمونه‌های غیرافزودنی بسیار کمتر بود و می‌توان از نانورس به عنوان ترمیم کننده ترک‌ها به‌وجود آمده در خاک‌های رسی با عمق ۵ سانتی متر استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، ترک، خودترمیمی، دامنه خمیری، مونت‌موریلنیت، نانورس

١-مقدمه

خاک همواره به‌عنوان یکی از مصالح اصلی پروژه‌های عمرانی از زمان‌های گذشته مورد توجه انسان بوده است و با پیشرفت علوم، پژوهش‌های مختلفی از سوی محققان بر رفتار خاک و خواص مهندسی مرتبط با آن انجام گرفته است. در طبیعت خاک‌هایی وجود دارد که با کوچک‌ترین تغییری در ساختار و بافت آن تحت شرایط مختلف محیطی یا بارگذاری، منجر به وقوع تغییرشکل و نشست‌های زیادی گشته که در نتیجه این عامل، سبب کاهش مقاومت و پیوند بین ذرات خاک می‌شود. به این قبیل خاک‌ها، خاک‌های مسئله‌دار گفته می‌شود(Sarli, Hadadi, and Bagheri, 2020). در صورت شناسایی

نکردن این نوع خاک‌ها، اگر سازه‌ای روی آنها احداث شود، سازه احداث شده در صورت اشباع شدن و تغییرات رطوبت خاک دچار آسیب و زیان می‌شود. در این رابطه استفاده از عناصر کمکی در تقویت و اصلاح خاک از زمان‌های گذشته مورد توجه بشر بوده است. به‌طوری‌که با پیدایش مصالح جدید و نیاز انسان به پروژه‌های مختلف عمرانی موجب شده تا زمینه و بستر مناسبی برای کشف روش‌های نوین در علم مهندسی ژئوتکنیک خصوصاً روش‌های به‌سازی و اصلاح خواص مهندسی خاک فراهم شود و متعاقباً تئوری خاک مسلح و روش‌های مرتبط با آن دارای اهمیت شایانی شود. در این راستا محققان به استفاده از نانومواد در به‌سازی خاک‌های ضعیف توجه کرده‌اند به‌طوری که در دهه‌ی گذشته استفاده از نانوتکنولوژی رشد چشمگیری در بسیاری از علوم داشته است (Wilson et all, 2008). در این خصوص استفاده از نانومواد در مهندسی ژئوتکنیک کاربرد بسیار زیادی پیدا کرده است (Persoff et al., 1999). نتایج بررسی‌های مختلف نشان داده است که با افزایش درصد نانوسیلیس مقاومت فشاری و ضریب نفوذپذیری خاک به‌ترتیب افزایش و کاهش یافته و همچنین باعث تغییر رفتار نمونه‌های خاک از حالت الاستیک به الاستوپلاستیک می‌گردد (Gallagher, and Lin, 2005). تایپودیا و همکاران به بررسی تأثیر نانوذرات دی-کلرید کلسیم، اکسیدکلسیم و نیترات‌پتاسیم روی خواص خاک پرداختند. نتایج آنها حاکی از افزایش مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و کاهش تراکم‌پذیری تحت افزودن نانوذرات بوده است..(Taipodia, Dutta and, Dey, 2011). طاها و طاها تأثیر افزودن انواع مختلف نانوذرات شامل نانوآلومینیوم، نانومس و نانورس را بر رفتار تورمی و انقباضی خاک‌های مختلف ریزدانه بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانورس دارای تأثیر نامحسوسی روی مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم نمونه‌ها بوده است و همچنین با افزودن نانورس شاخص خمیری و حد انقباض خاک زیاد می‌شود (Taha and Taha, 2012). نتایج پژوهش‌های مجید و همکاران نشان داد که افزودن نانومواد به خاک منجر به کاهش حدروانی، حدخمیری و شاخص خمیری نمونه‌ها شده است(Majeed, Taha, and Jawad.,2014). همچنین با توجه به اهمیت تأثیر بهسازی بر خواص خمیری خاک‌های ریزدانه در این زمینه نتایج بررسی‌های مختلف نشان داده است که با افزودن نانومواد، حدود اتربرگ خاک نیز افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2004).تأثیر افزودن نانورس بر کنترل فرسایش خاک‌ها بررسی شده است. در این خصوص نتایج حاکی از بهبود کنترل فرسایش خاک در اثر افزودن نانورس است (Padidar et all ,2014). با توجه به اهمیت بررسی‌های ژئوتکنیک زیست محیطی و تأثیر شیرآبه‌ها در طراحی مدفن بهداشتی زباله‌ها، پژوهش‌های جامعی در این زمینه انجام شده است (Kananizadeh et al., 2011). نتایج این پژوهش‌ها نشان داده است که با افزودن نانورس به خاک در اثر نفوذ شیرآبه‌ها به خاک زیرین، مقادیر فلزات سنگین جذب خاک شده و به‌عبارت دیگر تأثیر افزودن نانورس، ضمن کاهش نفوذپذیری مخلوط، موجب کاهش غلظت فلزات سنگین و جذب آلاینده‌ها و بهبود عملکرد زیست محیطی می‌شود. همچنین افزودن نانورس موجب کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز شده است (Ohadi, and chobchian.a, 2010) نتایج آزمایشات پیشین نشان می‌دهد که افزودن درصد کمی نانورس مونت‌موریلونیت به خاک رس باعث افزایش چشمگیر مقاومت آن می‌شود (Gazi, 2010) از طرف دیگر خاک رس دارای ویژگی مثبتی است که موجب ترمیم ترک‌های به‌وجود آمده در آن می‌شود. خاصیت ترمیم ترک رس به معنای بسته شدن ترک‌های ایجاد شده در آن می‌باشد(Wang et al., 2013). عوامل موثر بر خودترمیمی خاک رس مخصوصاً خصوصیات خمیری خاک‌ها در شرایط مختلف تراکمی- تحکیمی و رطوبتی سبب رفتارهای خاص مربوط به خاک رس می‌گردد(Hoshyiar, 2008) بیشتر آزمایش‌های انجام شده در زمینه خودترمیمی رس‌ها آزمایشات نفوذپذیری و اصلاح ویژگی و رفتار بوده و یا محدود به انقباض و انبساط در مراکز دفن زباله یا ترک‌های ناشی از فرسایش‌درونی در سدهای خاکی بوده‌اند در حالی‌که از این خاصیت رس‌ها می‌توان در سایر پدیده‌های ژئوتکنیکی که تحت یک سربار مشخص و قابل پیش‌بینی به وقوع می-پیوندند نیز استفاده کرد. (Batiaens et al., 2007). با توجه به پژوهش دانشمندان در حیطه‌ی فرسایش داخلی که ممکن است بر اثر ترک باشد، استفاده ذرات نانورس در بهبود شرایط خاک و عواملی که باعث خود ترمیمی ترک می‌شوند، در پژوهش حاضر با ساخت یک دستگاه ابداعی دو ترک با ضخامت‌ها ۰،۵میلی‌متر و۱میلی‌متر در یک نوع خاک رس با

افزودنی نانو رس مونت‌موریلونیت در حالت مختلف در زمان‌های متفاوت طبق یک برنامه طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در پی ارزیابی افزودنی نانورس چهار پارامتر نوع خاک، ضخامت ترک، فشار و زمان نیز بررسی شده‌اند.

۲-روش تحقیق

۱-۲- شرح بیان مسئله

تثبیت رس‌ها با استفاده از افزودنی‌های متداول همچون سیمان، آهک، خاکستربادی و ... همواره در مطالعات پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است. در کنار آن نانو مواد که حائز ویژگی‌های منحصر به‌فردی هستند کمتر مورد توجه بوده‌اند. نتایج آزمایشات پیشین نشان می‌دهد که افزودن درصد کمی نانورس مونت‌موریلونیت به خاک رس باعث افزایش چشمگیر مقاومت آن می‌شود. (به همین دلیل ماده افزودنی مورد استفاده در این پژوهش نانورس مونتموریلونیت انتخاب شده است). از طرف دیگر خاک رس دارای ویژگی مثبتی است که موجب ترمیم ترک‌های به‌وجود آمده در آن یا اصطلاحا" خودترمیمی می‌شود. خاصیت ترمیم ترک رس به معنای بسته شدن ترک‌های ایجاد شده در آن می‌باشد. عوامل موثر بر خودترمیمی خاک رس مخصوصا خصوصیات خمیری خاک‌ها در شرایط مختلف تراکمی- تحکیمی و رطوبتی سبب رفتارهای خاص مربوط به خاک رس می‌گردد. بیشتر آزمایش‌های انجام شده در زمینه خودترمیمی رس‌ها آزمایشات نفوذپذیری و اصلاح ویژگی و رفتار بوده و یا محدود به انقباض و انبساط در مراکز دفن زباله، یا ترک‌های ناشی از فرسایش‌درونی در سدهای خاکی بوده‌اند. در حالی‌که از این خاصیت رس‌ها می‌توان در سایر پدیده‌های ژئوتکنیکی که تحت یک سربار مشخص و قابل پیش‌بینی به وقوع می‌پیوندند نیز استفاده کرد. برای رسیدن به این مطلوب در این تحقیق با ایجاد یک ترک به‌وسیله آزمایش تراکم و حدود اتربرگ در خاک تقویت شده با نانورس مونت‌موریلونیت و نگهداری از آن در جهت ترمیم شدن در بررسی روند تاثیر نانورس را بر خودترمیمی ترک در ۳ نمونه از خاک‌های رسی با شاخص پلاستیک متفاوت وجود دارد.

۲-۲- مصالح مورد استفاده

به منظور بررسی خاصیت خود ترمیمی برای جلوگیری از فرسایش داخلی به وجود آمده از ترک، مصالح مورد استفاده در این پژوهش برای ترک‌هایی به ضخامت ۰,۵ میلی‌متر و۱ میلی‌متر در خاک‌های رسی با دامنه خمیری متفاوت، نانورس مونت‌موریلنیت و در حالت مختلف باشد. خاک‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه پژوهشی سه نمونه خاک رس با دامنه خمیری متفاوت است که خواص فیزیکی و مکانیکی آن با توجه به استانداردهای معتبر ASTM به شرح جدول (۱) و حدود اتربرگ آنها برابر آنچه در جدول (۲) بیان شده است، می‌باشد.

جدول۱. مشخصات فیزیکی نمونه خاک‌های مورد استفاده

شماره نمونه خاک	۱	۲	۳
چگالی ویژه	۲/۵۵	۲/٦٦	۲/٥١
نفوذپذیری(m/s)	2.45×10^{-6}	7.34×10^{-7}	1.95×10^{-6}
حداکثر چگالی خشک	۱/۸	۱/۸۲	۱/۸
رطوبت بهینه	٪ ۱۷	٪ ١٦	٪۱۷

جدول۲. حدود اتربرگ خاک‌های استفاده شده در این تحقیق

شماره نمونه خاک	۱	۲	۳
حد خمیری	۱۸/۱	۱۸	۱۹/۸
دامنه خمیری	۸/۳	۱۳/۸	۱۸/۵۵
حد روانی	٢٦/٤	۳۱/۸	۳۸/۳۵

در این پژوهش با توجه به حالت مختلف اعمال فشار، خاک مورد آزمایش برای تمام نمونه‌ها، با تراکم 98٪ در نظر گرفته شود تا ترک در همه حالت مقاوم باشد و همچنین الگوی شبیه سازی تراکم خاک سد نیز در این آزمایش تجربی رعایت شده است. همچنین آزمایش نفوذپذیری برای این تراکم انجام شد که ضریب نفوذپذیری آنها بدین معناست که درجه نفوذپذیری در محدوده قابل قبول برای خاک های رسی قرار دارد. به منظور بررسی تأثیر اندازه‌ی دانه‌ها طبق مطالعات پیشین در خودترمیمی، خاک دانه‌بندی شده است خاک های مورد آزمایش از الک ١٦ به پایین در نظر گرفته شد یعنی حداکثر اندازه دانه‌های بزرگ خاک هسته برابر با ۱,۱۹ میلی‌متر است که درصد بسیار کمی از دانه‌های خاک هسته را تشکیل می‌دهند. در حقیقت می‌توان این گونه تصور کرد که خاک ریزدانه یا به عبارت دیگر نزدیک به محدوده ریزدانه است.

هم‌چنین نانورس مورد استفاده در نمونه‌های متراکم شده، نانورس مونت‌موریلونیت (١٠)K از شرکت سیگمای آلدریچ آمریکا است که مشخصات آن در جداول (٣) و (٤) مطرح شده است.

جدول٣. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانو رس مونتموریلونیت

نوع کانی	مونتموریلونیت
چگالی	٠,٥-٠,٧ گرم بر متر مکعب
اندازه ذرات	١-٢ نانومتر
مساحت سطح ویژه	٢٢٠-٢٧٠ متر مربع بر گرم
مقدار تبادل الکتریکی	٢٥٠ MV
ضریب تبادل یونی	٤٨٠ میلی گرم در ١٠٠ گرم
فاصله‌ی خالی بین ذرات	٦٠A°
رنگ	زرد کمرنگ
رطوبت	١-٢ درصد

جدول٤. آنالیز شیمیایی نانو رس مونت موریلونیت

ردیف	نام مواد تشکیل‌دهنده	درصد
١	Na2O	٩٨
٢	MgO	٢٩/٣٠
٣	Al2O3	٦٠/١٩
٤	SiO2	٩٥/٥٠
٥	K2O	٨٦/٠٠
٦	Cao	٩٧/١٠
٧	TiO2	٦٢/٠٠
٨	Fe2O3	٦٢/٥٠
٩	LOI	٤٥/١٥

٣-بررسی‌های آزمایشگاهی

٣-١- روش آزمایش

مطابق با ساختار هسته‌ی رسی سد خاکی با شرایط واقعی آن در برابر فشار، یک نمونه هسته رسی در مقیاس کوچک برای خاک رس طراحی شد. ابعاد تمام نمونه‌ها بطور یکسان در نظر گرفته شده است که قطر و ارتفاع هر نمونه به ترتیب ١٥٠ میلی‌متر و ٥٠ میلی متر هستند. هم چنین لایه‌ای از ماسه با دانه بندی یکنواخت از الک شماره ٤ تا ٣٠ در قسمت تحتانی نمونه با ارتفاع ٣٠ میلی‌متر به عنوان یک لایه زهکش و محافظ برای جلوگیری از آبشستگی شدید در برابر فشار همانند فیلتر تعبیه شد. دو ترک به ضخامت‌های ٠,٥ میلی‌متر و١ میلی‌متر بوسیله تیغه‌های فلزی محکم بعد از فشردگی با تراکم ١٠٠ درصد در هر نمونه به طور جداگانه ایجاد شد. قابل ذکر است که دو ترک

از نظر طول یکسان هستند و هر نمونه با ترک‌های مختلف با افزودنی و بدون افزودنی نانورس تهیه شدند. در تمام آزمایشات آب در حالت اعمال فشار و بدون اعمال فشار، به خاک هسته وارد می‌شود. مدت زمان برای هر آزمایش در حالت فشار ۵ دقیقه و با فشار۵۰ کیلوپاسکال و در حالت عدم اعمال فشار به مدت ٦۰ دقیقه در نظر گرفته شده است. میزان جریان خروجی از ترک با مدت زمان سپری شده تحت فشارهای مختلف به آسانی قابل اندازه‌گیری است که منجر به رسم منحنی دبی نسبت به زمان می‌شود. با توجه به منحنی می‌توان هر آزمایش را نسبت به هم مقایسه کرد. به طور کلی آزمایش ٤ مرحله انجام می شود: ۱- آماده کردن دستگاه آزمایش ۲- تهیه نمونه طبق برنامه آزمایشی ۳- اندازه‌گیری دبی خروجی ٤- رسم منحنی با استفاده از نتایج بدست آمده است.

۳-۲- ابزار آزمایش

به منظور بررسی خودترمیمی ترک در خاک رس، در شرایط تجربی آزمایشگاه یک دستگاه آزمایش برای هسته رسی سد خاکی طراحی شده است. سه بخش اصلی این دستگاه عبارت است از: ۱-سیستم اعمال سربار ۲-سیستم جریان نفوذپذیری ۳-سیستم اندازه‌گیری.

سیستم اعمال سربار خود به سه قسمت تقسیم می‌شود که عبارتند از : ۱- منبع تأمین فشار ۲- مخزن ذخیره فشار در دستگاه آزمایش ۳- مخزن ذخیره آب. روند کار این بخش از دستگاه به این صورت است که بعد از تأمین فشار توسط یک کمپراسور هوا، فشار به هر اندازه دلخواه توسط یک شیلنگ فشار قوی و شیر تنظیم کننده به داخل مخزن ذخیره فشار یا به عبارت دیگر قسمت فوقانی دستگاه هدایت می‌شود که موجب ایجاد سربار در قسمت مخزن ذخیره آب شده و در نهایت آب با فشار مورد نیاز به خاکِ نمونه تزریق می‌شود. سیستم جریان نفوذ پذیری قسمتی از دستگاه است که خاک با تراکم ۱۰۰ درصد در آن کوبیده می‌شود که وظیفه‌ی محافظت از نمونه و جلوگیری از نشت‌های غیرمستقیم را انجام می‌دهد. در سیستم اندازه‌گیری، فشاری که از بالا نمونه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب خروج آب از نمونه می‌شود توسط یک رگلاتور، ساعت و یک قیف نصب شده بر روی دستگاه اندازه گیری می‌شود. نکات مهمی که در طراحی و ساخت دستگاه مورد توجه قرار گرفتن عبارتند از:

۱- ابعاد دستگاه به گونه‌ای انتخاب شده است که بتوان به هنگام تهیه نمونه جای کار برای ریختن خاک به داخل نمونه، متراکم کردن نمونه، بیرون آوردن نمونه به راحتی، باز و بسته کردن دستگاه را انجام داد، و از همه مهم‌تر ایجاد ترک در محدوده‌ای از نمونه که هیچ صدمه‌ای تا هنگام انجام آزمایش اصلی بر آن وارد نشود.

۲- جای کافی برای ذخیره آب و تزریق آن به نمونه به صورت عمودی (بالا به پایین) موجود باشد.

۳- مخزنی برای ذخیره فشار تا ۵۰۰ کیلو پاسکال برای تزریق آب اعمال گردد.

٤- خروجی دبی Q قابل اندازه‌گیری باشد.

۵- خروج و ورود آب و فشار به نحوی باشد که در لحظه‌های ابتدایی آزمایش به نمونه صدمه نزند.

٦- اتصالات اجزای دستگاه به طور ثابت از جوش الکتریکی گرم باشد.

۷- ضخامت دیواره‌ی مخزن‌های دستگاه با توجه به فشار و تراکم ۱۰۰ درصد برای هر نوع خاک مورد استفاده باشد.

۸- انتقال فشار به مخزن از یک منبع فشار قوی و ایمن باشد.

۹- اتصالاتی که با پیچ هستند با توجه به استانداردهای کارخانه‌ای بهم متصل می‌شوند.

۱۰- هزینه ساخت دستگاه مقرون به صرفه باشد.

۱۱-قطعات طوری انتخاب شوند که بتوان آنها را به راحتی حمل و نقل، تمیز و پاک نگه داشت و در بازار موجود باشد.

۱۲-طول عمر قطعات زیاد باشد.

۳-۳- برنامه آزمایش

پارامترها و عوامل مختلفی می‌توانند در خودترمیمی نقش داشته باشند اما در این پژوهش بیشترین ارزیابی بر روی نانورس مونت‌موریلنیت است. در این آزمایش شاخص خمیری خاک‌ها، ضخامت ترک و زمان نیز بسیار مهم هستند که در کنار این بررسی این سه پارامتر هم ارزیابی می‌شوند. عامل فشار طبق مطالعات پیشین، باعث ایجاد تنش سطحی بر روی نمونه می‌شود که باعث فشردگی لبه‌های ترک و نزدیک شدن آنها به یکدیگر خواهد شد. اما این نکته را باید در نظر داشت که عامل فشار در هر تراکمی که نمونه در آن ساخته شده است نمی تواند مفید باشد. اما زمان بر خلاف فشار از پارامترهایی است که در عمل خود ترمیمی نقش مهمی را ایفا می‌کند، چرا که هر خاک ریزدانه‌ای برای واکنش با آب نیازمند زمان است و همچنین ضخامت ترک در فرسایش داخلی اهمیت فراوانی دارد. پس از انجام۲٤ آزمایش با شرایط یکسان فیزیکی و مکانیکی برای هر دو ترک طراحی شده است. تمام آزمایشات در دو مرحله زمانی پس از ساخت نمونه و بعد از گذشت ۲٤ ساعت انجام شدند تا فرصت کافی برای واکنش آب با خاک وجود داشته باشد در هر ۲٤ آزمایش بالای هر نمونه ۲ لیتر آب قرار داده شد با اعمال فشار که می‌توان از فشار ناچیز دو لیتر صرف نظر کرد و آن را صفر در نظر گرفت که بعد از گذشت ۵ دقیقه آزمایش، آب بالای نمونه خالی می‌شود تا ۲٤ ساعت از زمان واکنش نانورس با آب بگذرد و دوباره همان آزمایش برای ۵ دقیقه با اعمال فشار۵۰ کیلوپاسکال انجام داده می‌شود. هدف از زمان۲٤ ساعت اثرگذاری نانو رس است ولی هدف از

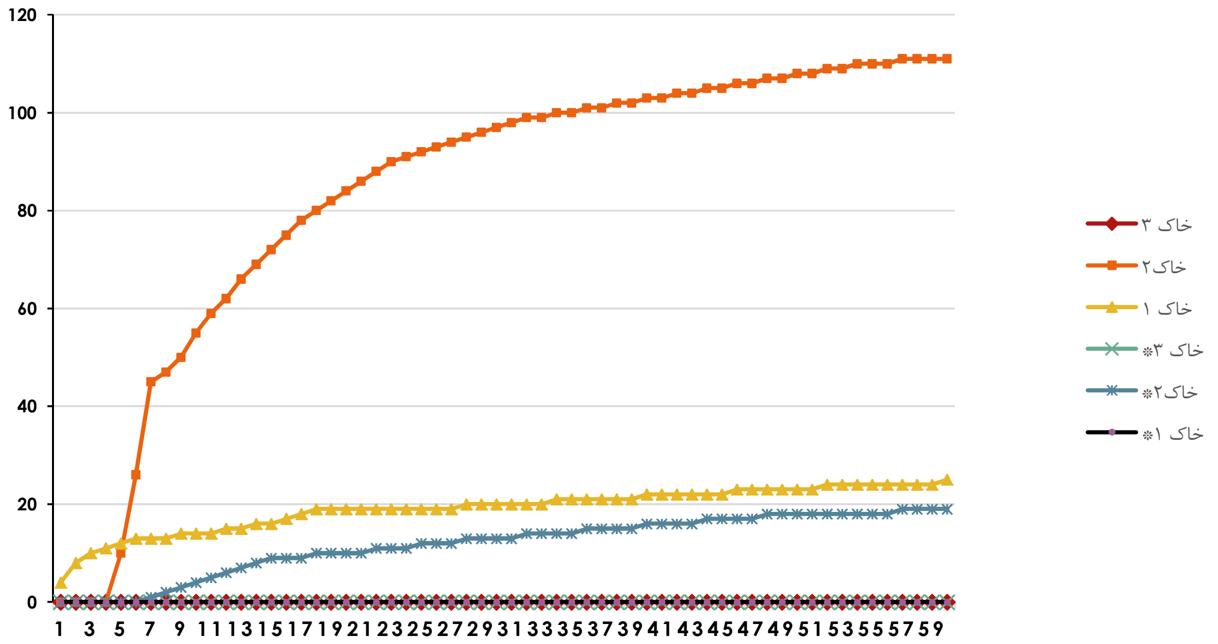
۵ دقیقه‌ی زمان آزمایش به خاطر بودن فشار آب است زیرا آب با سرعت و فشار خیلی زیاد موجب تخریب ترک و نمونه‌های آزمایش می‌شود و در حالت عدم اعمال فشار، بالای هر نمونه ۲ لیتر آب قرار داده شده و زمان محاسبه دبی خروجی را ٦٠ دقیقه محاسبه در نظر گرفته می‌شود.

٤-بحث و بررسی نتایج

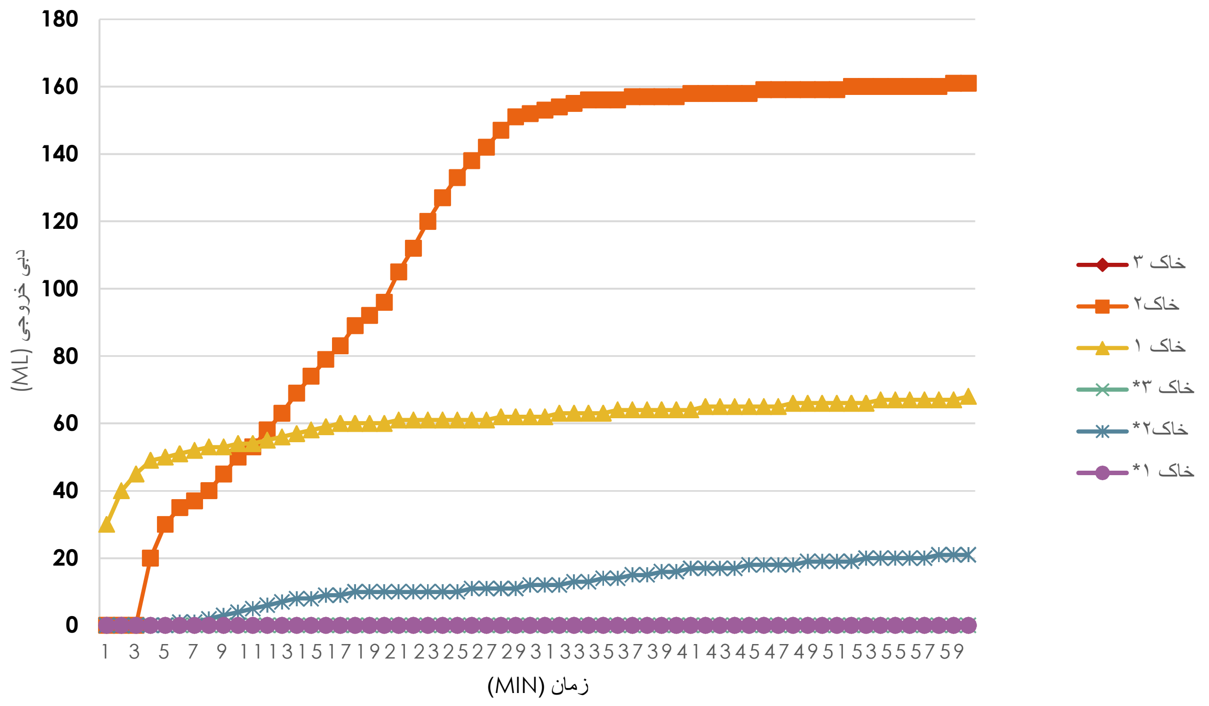
به منظور بررسی نانورس مونت‌موریلونیت بر خاصیت خودترمیمی، آزمایش برای دو نوع ترک با ضخامت‌های ۰٫۵ میلی‌متر و۱ میلی‌متر و با طول یکسان۱۰ میلی‌متر هستند درحالت بدون نانورس و حالت ۵ درصد نانورس مورد ارزیابی قرار گرفتند. هر نوع ترک به صورت جداگانه با توجه به نمودار، میزان دبی خروجی شان توصیف شده است. همچنین هر کدام از عوامل مثل فشار، زمان، ضخامت، دامنه‌ی خمیری خاک، می‌توانند در خود ترمیمی با نانو رس تأثیر داشته باشند.

٤-۱- بررسی تاثیر دامنه‌ی خمیری بر میزان آبشستگی با ترک‌های ایجاد شده

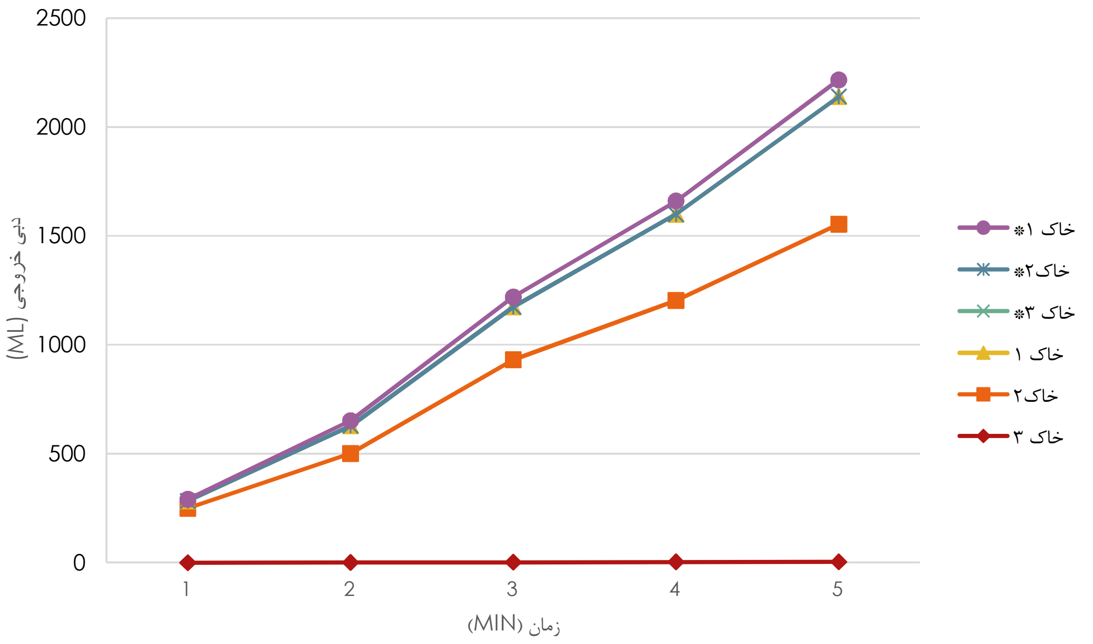
در شکل‌های (۱ تا ٤) مشخص است که فرسایش داخلی در آزمایش‌های بدون نانورس برای نمونه‌ها که در مرحله اولیه پس از ساخت در دقایق اولیه فرسایش داخلی بیشترین سرعت جریان را دارد و به مرور زمان تا پایان آزمایش کاهش می‌یابد. همین فرآیند پس از گذشت زمان ٢٤ ساعت پس از ساخت نمونه ادامه می‌یابد ولی سرعت جریان و میزان دبی خروجی از نمونه‌ها بطور محسوسی کاهش یافته است. نمونه خاک شماره۲ شکل‌های (۱تا٤) با توجه به اینکه دامنه خمیری بیشتری نسبت به نمونه خاک شماره۱ دارد و در مرحله اولیه آزمایش دبی خروجی بالاتری نسبت به نمونه خاک شماره۱ از خود نشان داده است که این امر ممکن است به‌دلیل فقدان برخی از دانه‌بندی در ساختار نمونه خاک و یا نفوذپذیری بیشتر این خاک باشد اما در مراحل آزمایشات بعد از٢٤ ساعت دبی خروجی نمونه خاک شماره ۲ کمتر از نمونه خاک شماره۱ مشاهده شده است که بیانگر آن است که دامنه خمیری بعد از گذشت زمان تاثیر خود را بر روند خودترمیمی نمونه خاک جبران خواهد کرد. اما در شکل‌های(۵تا ۸) نمونه‌های بعدی که حاوی ۵درصد نانورس هستند عمل فرسایش داخلی به نسبت‌های زیادی کاهش یافته‌اند بطوری که ترک۰٫۵ میلی‌متر در مرحله بعد از ٢٤ ساعت بطور کامل بسته شده و هیچ‌گونه دبی خروجی مشاهده نگردیده است. اما در ترک۱ میلی‌متر جریان دبی خروجی به نسبت حالت اولیه به طور محسوسی کاهش یافته که بیان‌گر فرآیند خودترمیمی در حاالت اعمال فشار می‌باشد. نمونه خاک شماره۳ به‌دلیل بالا بودن دامنه خمیری خود، از همان ابتدای آزمایش بطور کاملا طبیعی بسته شد و هیچ‌گونه جریان دبی خروجی از آن مشاهده نشد. افزودن نانورس باعث بالا رفتن سطح ویژه نمونه خاک رسی و افزایش دامنه خمیری نمونه‌ها شده است که این امر موجب فرآیند تورم ذرات ریز رس و خودترمیمی می‌شود و این فرآیند را تسریع می‌بخشد.



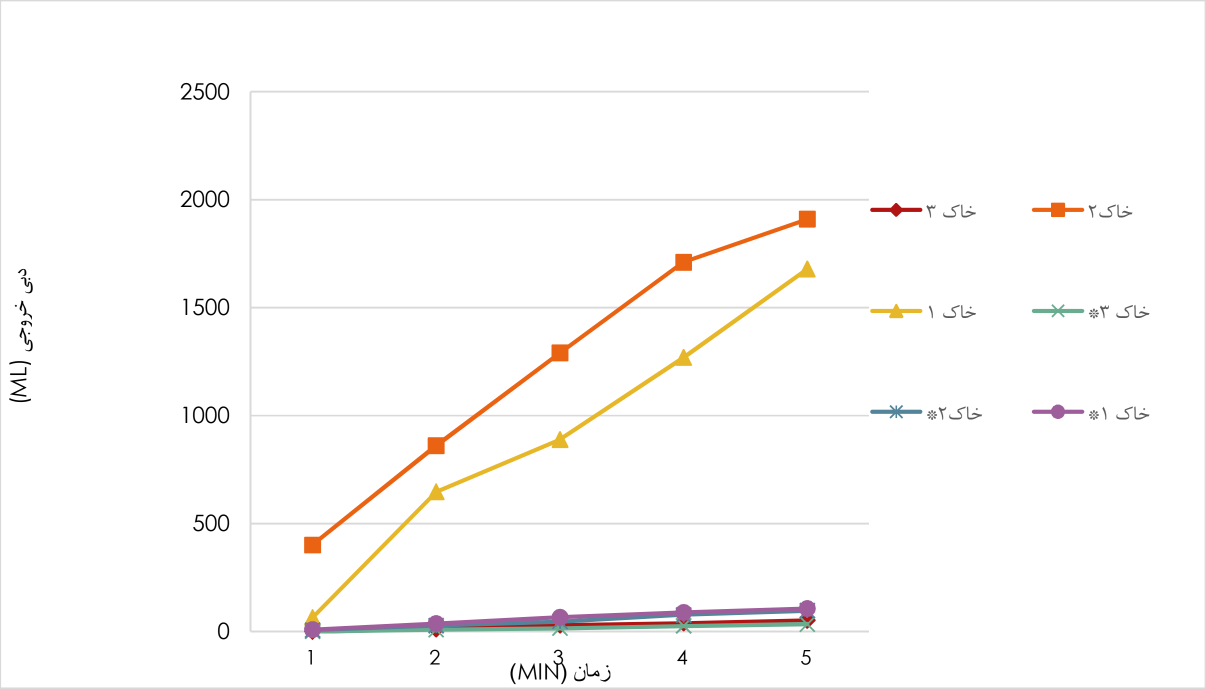
شکل۱. ترک (۰٫۵ میلی‌متر) نمونه بدون نانورس و بدون اعمال فشار- نمونه‌های ستاره‌دار بعد از ٢٤ ساعت انجام شده است.



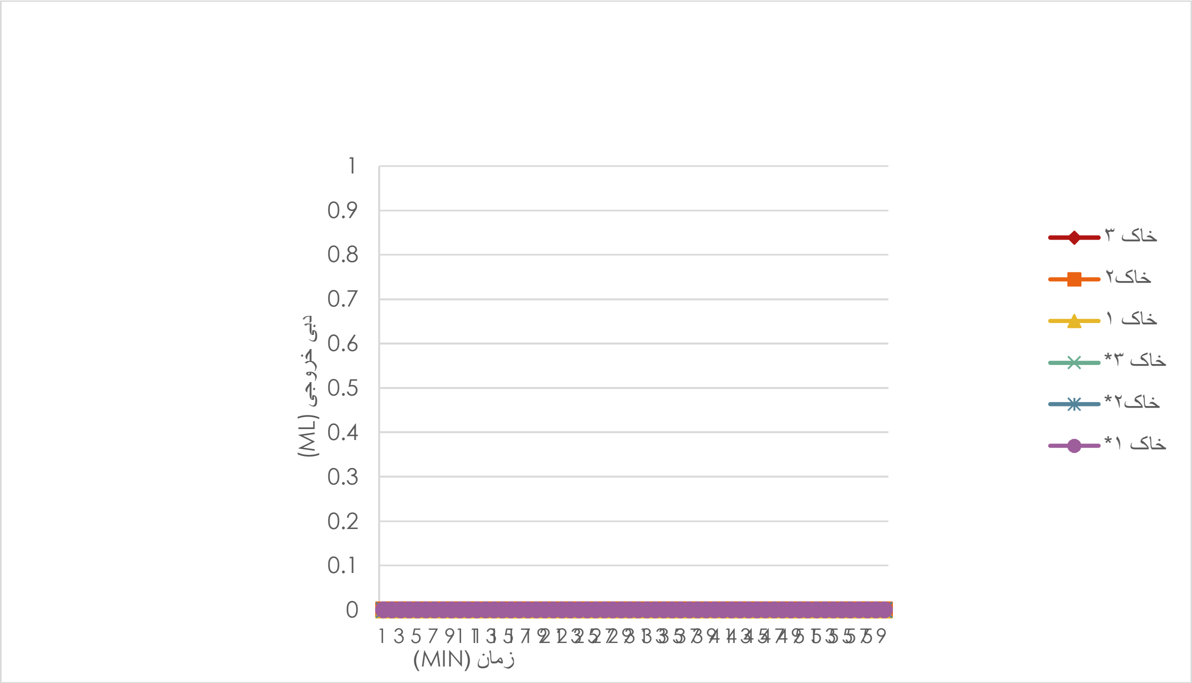
شکل۲. ترک (۱ میلی‌متر) نمونه بدون نانورس و بدون اعمال فشار – نمونه‌های ستاره‌دار بعد از ۲٤ ساعت انجام شده است.



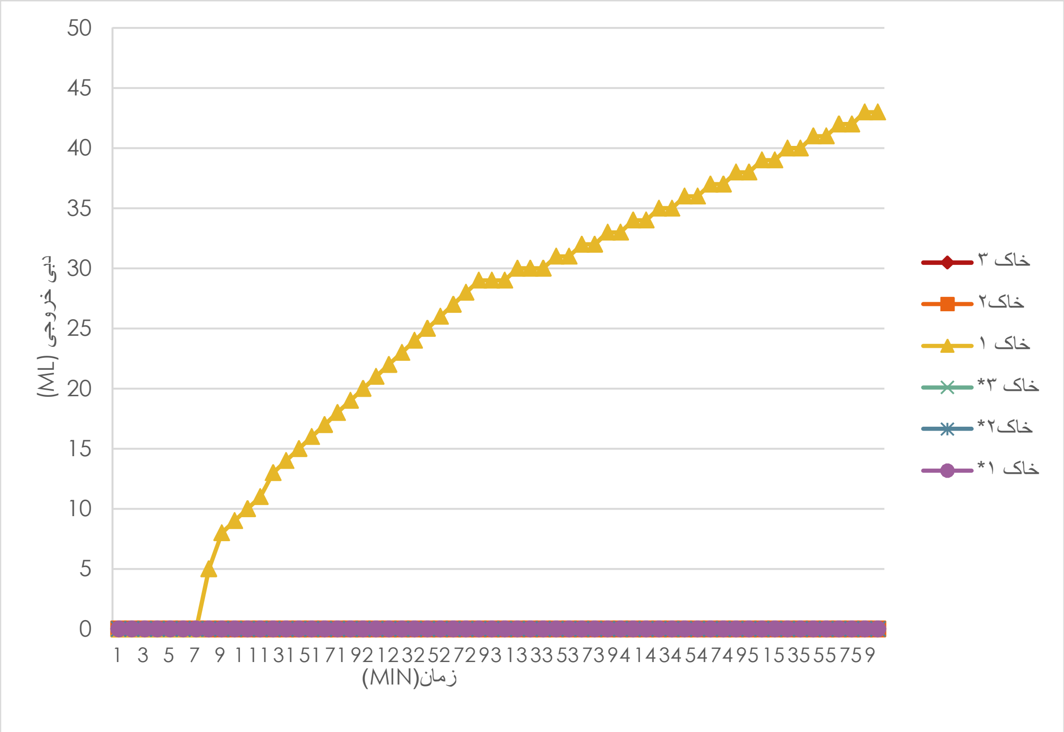
شکل۳. ترک (۰٫۵میلی‌متر) نمونه بدون نانو رس و با اعمال فشار



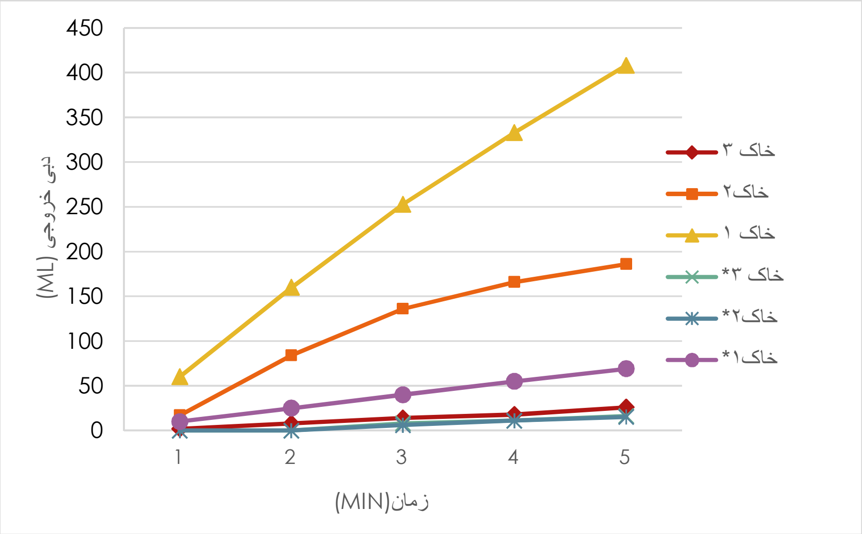
شکل٤. ترک (۱میلی‌متر) نمونه بدون نانو رس و با اعمال فشار ٥۰ کیلو پاسکال



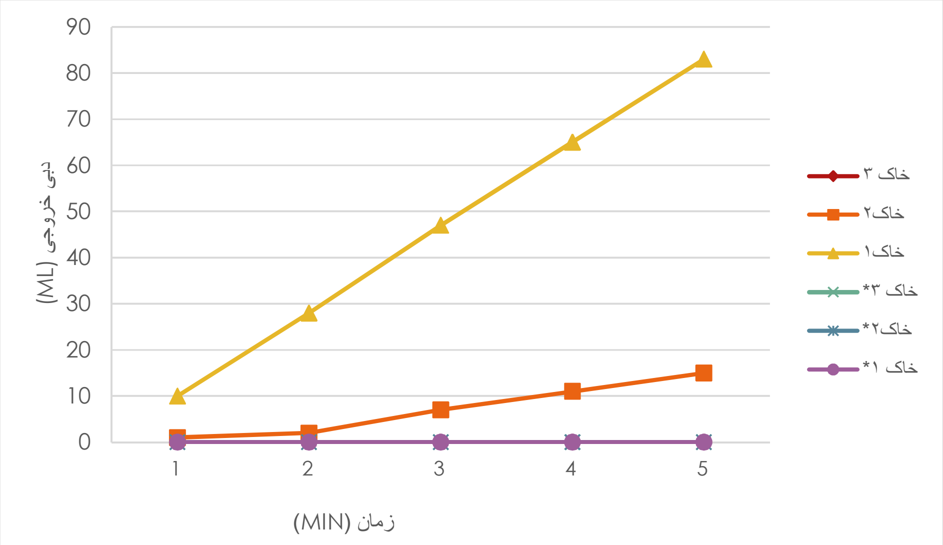
شکل٥. ترک (۰,٥میلی‌متر**) نمونه با نانو رس و بدون اعمال فشار- نمونه‌های ستاره‌دار بعد از ۲٤ ساعت انجام شده است.**



شکل٦. ترک (١ میلی‌متر) نمونه با نانو رس و بدون اعمال فشار- نمونه‌های نمونه‌های‌ستاره‌دار بعد از ٢٤ ساعت انجام شده است.



شکل٧. ترک (٠,٥میلی‌متر) نمونه با نانو رس و با اعمال فشارکیلو پاسکال٥٠ نمونه‌های ستاره‌دار بعد از ٢٤ ساعت انجام شده است.



شکل ۸. ترک (۱ میلی‌متر) نمونه با نانورس و با اعمال فشار کیلوپاسکال۵۰ نمونه‌های‌ستاره‌دار بعد از ۲٤ ساعت انجام شده است.

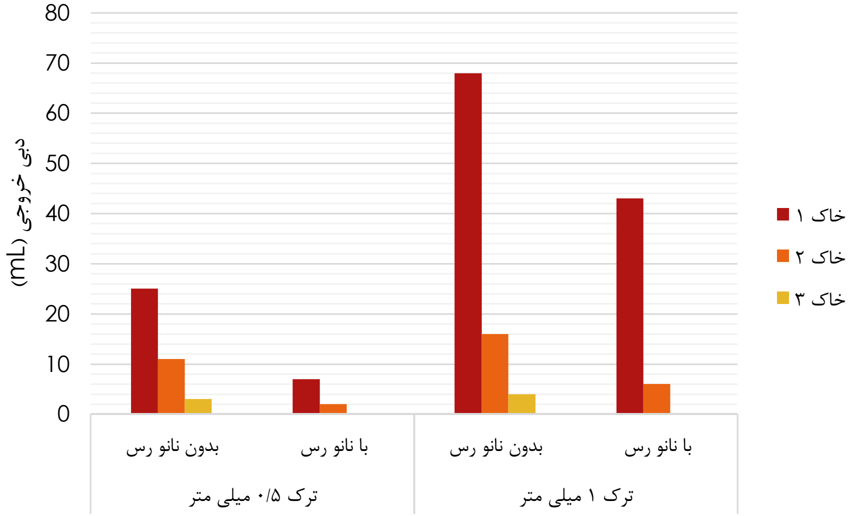
٤-۲- مقایسه تغییرات دبی خروجی در آزمایشات بدون اعمال فشار

با توجه به تغییرات مشاهده شده در آزمایش‌ها شکل(۹)، روند خودترمیمی بدون افزودن نانورس در تمامی خاک‌ها در گذر زمان اتفاق افتاده است. با توجه به عدم اعمال فشار در مدت زمان ٦۰ دقیقه، نمونه خاک شماره۳ از همان ابتدای آزمایش به‌دلیل دامنه خمیری بالا هیچ‌گونه دبی خروجی مشاهده نشد و ترک آن کاملا به‌صورت طبیعی بسته شد. به دلیل نبود برخی ریزدانه در دانه‌بندی نمونه خاک شماره ۲ تغییرات دبی نمونه خاک شماره۲ نسبت به نمونه خاک شماره۱ با توجه به دامنه خمیری بالاتر، بیشتر بود. در مرحله بعد آزمایش‌ها با افزودن نانورس به نمونه‌ها روند خودترمیمی به صورت قابل محسوسی افزایش یافت که با توجه به نتایج مشاهده شد که در اکثر نمونه‌ها از همان مرحله اولیه دبی خروجی کاهش زیادی داشته و حتی پس از گذشت زمان ترک همه‌ی نمونه‌ها کاملا بسته شد. واکنش‌پذیری و خودترمیمی در ترک‌های ۰/۵ میلی‌متری با توجه به تغییرات مشاهده شده در آزمایش‌ها، روند خودترمیمی بدون افزودن نانورس در تمامی خاک‌ها در گذر زمان اتفاق افتاده است. نمونه خاک شماره ۳ از همان ابتدای آزمایش به‌دلیل دامنه خمیری بالا هیچ‌گونه دبی خروجی مشاهده نشد و ترک آن کاملا به‌صورت طبیعی بسته شد. به دلیل نبود برخی ریزدانه در دانه‌بندی نمونه خاک شماره ۲ تغییرات دبی نمونه خاک شماره ۲ نسبت به نمونه خاک شماره ۱ با توجه به دامنه خمیری بالاتر، بیشتر بود. در مرحله بعد آزمایش‌ها با افزودن نانورس به نمونه‌ها روند خودترمیمی به صورت قابل محسوسی افزایش یافت که با توجه به نتایج مشاهده شد که در اکثر نمونه‌ها از همان مرحله اولیه دبی خروجی کاهش زیادی داشته و حتی پس از گذشت زمان ترک همه‌ی نمونه‌ها کاملا بسته شد. واکنش‌پذیری و خودترمیمی در ترک‌های ۰/۵ میلی‌متری زودتر و سریع‌تر از ترک‌های۱ میلی‌متری رخ داده است همچنین نتایج بیانگر آن است که هر چه دامنه خمیری نمونه خاک بیشتر باشد فرآیند خودترمیمی سریع‌تر مشاهده می‌شود. بیانگر آن است که هر چه دامنه خمیری نمونه خاک بیشتر باشد فرآیند خودترمیمی در حالت بدون اعمال فشار به راحتی صورت می‌پذیرد.

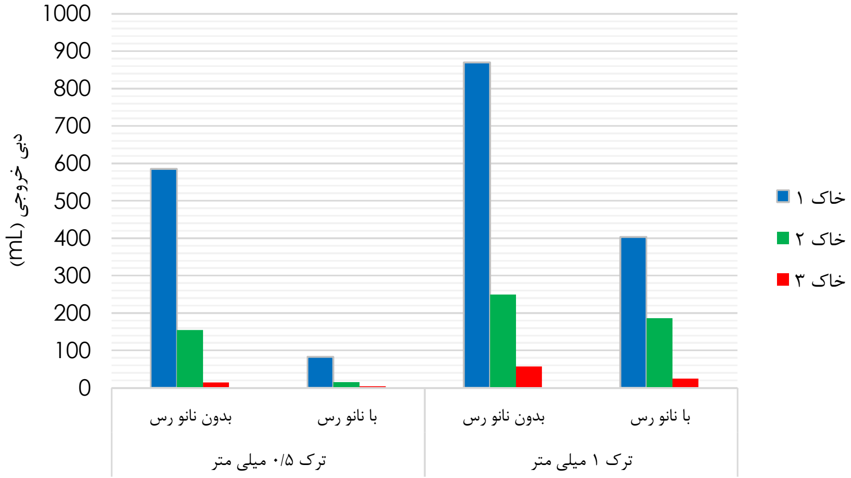
٤-۳- مقایسه تغییرات دبی خروجی در آزمابشات در حالت اعمال فشار

در مرحله بعد آزمایش‌ها ارزیابی میزان آبشستگی و فرآیند خودترمیمی خاک‌های رسی در دامنه خمیری مختلف در زمان بعد از ساخت نمونه و در زمان ٢٤ ساعت پس از ساخت نمونه تعیین شده است، برای این منظور در ابتدا میزان آبشستگی به حالت بدون افزودنی نشان داده شده است سپس میزان

آبشستگی بعد از گذشت زمان ٢٤ ساعت محاسبه شده است و توانایی واکنش‌پذیری نمونه‌ها در حالت اعمال فشار ٥٠ کیلوپاسکال در مدت زمان ٥ دقیقه به عنوان فرآیند خوترمیمی در نظر گرفته شده است. با توجه به تغییرات مشاهده شده در آزمایش‌ها شکل (١٠)، روند خودترمیمی بدون افزودن نانورس در تمامی خاک‌ها در گذر زمان اتفاق افتاده است. نمونه خاک شماره ٣ از همان ابتدای آزمایش به‌دلیل دامنه خمیری بالا با دبی خروجی کمتری همراه بود. به دلیل نبود برخی ریزدانه در دانه‌بندی نمونه خاک شماره ٢ تغییرات دبی نمونه خاک شماره ٢ نسبت به نمونه خاک شماره ١ با توجه به دامنه خمیری بالاتر، بیشتر بود. در مرحله دوم آزمایش‌ها با افزودن نانورس به نمونه‌ها روند خودترمیمی به صورت قابل محسوسی افزایش یافت که با توجه به نتایج مشاهده شد که در اکثر نمونه‌ها از همان مرحله اولیه دبی خروجی کاهش زیادی داشته است و حتی پس از گذشت زمان ترک همه‌ی نمونه‌ها تنگ‌تر شد و این کاهش دبی خروجی به طور کاملا محسوسی مشاهده شد. همچنین اعمال فشار در کوتاه مدت خود منجر به تخریب ترک و حتی به بسته شدن آن کمک می‌کند. واکنش‌پذیری و خودترمیمی در ترک‌های بیانگر آن است که هر چه دامنه خمیری نمونه خاک بیشتر باشد و فشار اعمال شود تغییرات فرآیند خودترمیمی سریع‌تر مشاهده می‌شود.



شکل ٩. تغییرات دبی خروجی در آزمایش‌های بدون اعمال فشار

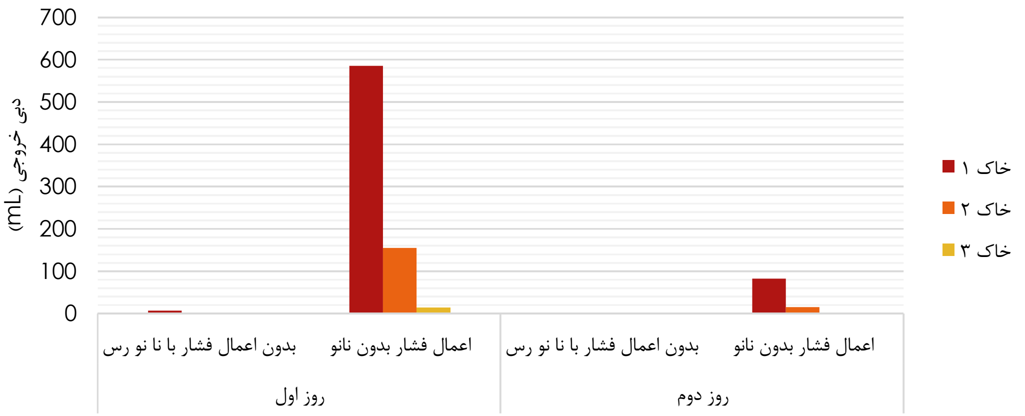


شکل ١٠. تغییرات دبی خروجی در آزمایش‌های با اعمال فشار

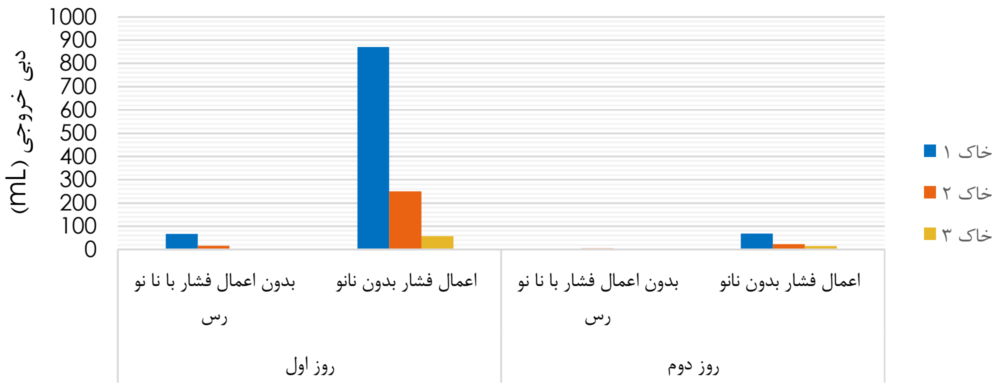
تأثیر فشار ثابت ٥٠ کیلوپاسکال در این پژوهش به ترتیب با توجه به بررسی‌های انجام همان طور که گفته شود فشار ناچیز برابر با دو لیتر با ارتفاع ٢٠ سانتی‌متر است که تنش سطحی روی هیچ خاکی ایجاد نمی‌کند بخصوص خاکی که دارای تراکم ١٠٠٪ باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که کم شدن دبی خروجی در نمونه‌های بر اثر واکنش ذرات رس و نانورس در مقابل خروج آب از ترک است که در نمونه‌های دارای نانو رس این واکنش بیشتر است. اما در نمونه‌هایی با ترک ٠،٥ میلی‌متر که تحت فشار٥٠ کیلوپاسکال هستند دبی خروجی در تمام نمونه‌ها روند مشابهی دارند اما با ین تفاوت که فشار در نمونه بدون نانو رس تأثیر کمتری دارد.از طرفی با توجه به شکل(١٠) کاملا آشکار است که بعد از ٢٤ ساعت، با اعمال فشار٥٠ کیلوپاسکال میزان دبی خروجی از هر نمونه بسیار کاهش یافته است و این به این معناست که ترکِ نسبتاً بسته شده اما در ترک١ میلی‌متر روند تغییرات در مرحله اولیه بعد از ساخت نمونه بصورت یکنواخت است ولی پس از انجام گذشت ٢٤ ساعت و انجام مجدد آزمایش تغییرات دبی خروجی بطور کاملا محسوسی کاهش یافت که بیان‌گر آغاز فرآیند خودترمیمی است.

٤-٤- بررسی تأثیر ضخامت ترک در فرسایش داخلی با ترک

با توجه به نمودارهای شکل‌های(١٢و١١) که تأثیر ذرات نانو رس و فشار در فرسایش داخلی در ترک ٠،٥ میلی متر را نشان می‌دهند می‌توان چنین بررسی کرد که دبی خروجی از این ترک خیلی کم است، چراکه نمودارها واضح نشان می‌دهند که نانو رس و فشار تأثیر بیشتری روی ترک گذاشته و زود خود را ترمیم می‌کند اما در ترک ١ میلی‌متر جریان دبی خروجی به نسبت حالت اولیه به طور محسوسی کاهش یافته که بیان‌گر فرآیند خودترمیمی در حاالت اعمال فشار می‌باشد. مشخص است که فرسایش داخلی در آزمایش‌های بدون نانورس برای نمونه‌های ترک٠،٥ میلی‌متر که در مرحله اولیه پس از ساخت در دقایق اولیه فرسایش داخلی بیشترین سرعت جریان را دارد و به مرور زمان تا پایان آزمایش کاهش می‌یابد. همین فرآیند پس از گذشت زمان٢٤ ساعت پس از ساخت نمونه ادامه می‌یابد ولی سرعت جریان نسبتا کاهش یافته و میزان دبی خروجی از نمونه‌ها بطور محسوسی کاهش یافته است. اما در نمونه‌های بعدی که حاوی ٥ درصد نانورس هستند عمل فرسایش داخلی به نسبت‌های زیادی کاهش یافته‌اند بطوری که ترک ٠،٥ میلی‌متر در مرحله بعد از٢٤ ساعت بطور کامل بسته شده و هیچ‌گونه دبی خروجی مشاهده نگردیده است. افزودن نانورس باعث بالا رفتن سطح ویژه نمونه خاک رسی و افزایش دامنه خمیری و چسبندگی نمونه‌ها شده است که این امر موجب تورم ذرات ریزرس و خودترمیمی می‌شود و این فرآیند را تسریع می‌بخشد و نشان می‌دهد که اگر ترک کوچک‌تر، زودتر مشاهده شود فرآیند خودترمیمی در زمان کوتاه‌تری صورت می‌پذیرد.



شکل ١١. بررسی تغییرات در ترک ٠،٥ میلی‌متر



شکل۱۲. بررسی تغییرات در ترک ۱ میلی‌متر

۵-نتیجه گیری

۱- از آزمایشات می‌توان نتیجه گرفت تاثیر دامنه خمیری نمونه خاک نقش بسزایی در روند خودترمیمی نمونه خاک‌ها دارد، هر چه دامنه خمیری نمونه خاک بیشتر باشد چسبندگی بین دانه و تورم ذرات ریز بیشتر می‌شود که این امر با افزودن نانومواد رسی منجر به بالا رفتن سطح ویژه نمونه خاک رسی و باعث تسریع در عمل خودترمیمی ترک‌ها می‌شود. افزودن نانورس باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود که منجر به کاهش آبشستگی و بسته شدن ترک می‌شود.

۲- از آزمایشاتی که فاقد نانورس بودند می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند خودترمیمی ترک در حین عبور آب بدون افزودنی نسبتاً رخ داده شده است که بستگی به نوع خاک دارد. اما تأثیر نانورس مونت‌موریلنیت در آزمایشات نشان می‌دهد که خودترمیمی ترک خیلی زودتر رخ می‌دهد و کمترین دبی خروجی را نسبت به نمونه‌های غیرافزودنی دارد و عملکرد این نانورس به دلیل ویژگی‌های منحصر به‌فرد آن است. از جمله ویژگی‌هایی که می‌توان برای نانورس مونت‌موریلونیت در فرآیند خود ترمیمی نام برد، سطح ویژه‌ی بسیار بالای آن است.

۳- همان طور که مشاهده شد میزان دبی خروجی از ترک‌های۱ میلی‌متر نسبت به ترک‌های۰،۵ میلی‌متر بیشتر است پس می‌توان نتیجه گرفت که فرایند خود ترمیمی در ترک‌های کوچک‌تر زودتر رخ می‌دهد چرا که ذرات نانورس و خاک به‌راحتی بعد از تورم می‌توانند یکدیگر را لمس کنند.

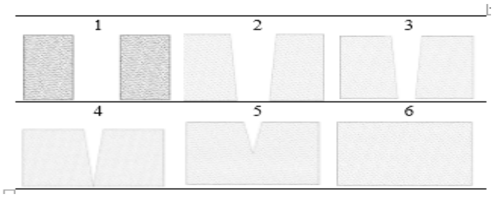
٤- در۲٤ آزمایش پارامتر مشترک زمان در خود ترمیمی نقش بسزایی داشت چرا که ذرات خاک به خصوص ذرات نانورس برای تورم کافی، یا به حداکثر رسیدن تورم، نیازمند زمان لازم برای جذب آب هستند که در مرحله اولیه آزمایش نمونه‌ها به طور کامل اشباع نمی‌شوند و گذشت زمان ٢٤ ساعت این فرصت را به ذرات خاک و بخصوص نانورس می‌دهد. نانورس مونت‌موریلونیت بهترین جذب کننده آب از نظر حجمی است که باعث ایجاد تورم و رسیدن ذرات به یکدیگر در ترک می‌شود و در نهایت فراهم کننده‌ی خودترمیمی ترک در خاک‌های رسی است. از طرفی می‌توان این‌گونه توصیف کرد که وقتی آب از ترک در حال عبور است ذرات نانورس به جذب آب می‌پردازند که موجب نگه داشتن جریان آب در ترک می‌شوند و همین دلیل بعد از جذب آب تورم اولیه صورت می‌گیرد که کمترین دبی خروجی را نسبت به نمونه‌های غیر افزودنی دارد.

٥- آزمایشاتی که دارای فشار بودند میزان دبی خروجی بیشتری داشتند که طبیعی است. که به مرور زمان با ایجاد تنش سطحی به ترک دبی خروجی در طی زمان در نظر گرفته شده آرام آرام بسته شد. اما اثر فشار در نمونه‌هایی که نانو رس داشتند در خود ترمیمی بهتر عمل کرده بودند و می‌توان نتیجه گرفت که فشار در مشارکت نمونه‌های حاوی نانورس خیلی بهتر عمل می‌کنند. نکته قابل توجه دیگر این است که وقتی ترک با فشار کمتر بسته می‌شود، نمی‌تواند در برابر فشارهای بالاتر دوام بیاورد اما عکس این عمل شدنی است.

٦- می‌توان از نانورس٥ درصد مونت‌موریلنیت برای بستن ترک در تراکم ١٠٠٪ اطمینان حاصل کرد. در نمونه‌هایی که تراکمی زیر١٠٠ ٪ دارند فضای خالی بین ذرات خاک زیاد می‌باشد و تورم نانورس از جذب آب صرف پر کردن این فضاهای خالی می‌شود که خاک یک حالت روانگرایی به خود می‌گیرد و باعث فرسایش بیش از حد یا آبشستگی ترک می‌شود.

٧- از تصاویر آزمایشات می‌توان نتیجه گرفت که ترک با نانورس و بدون نانورس از پایین به بالا بسته می‌شود چرا که اثر ترک بعد از خودترمیمی در پایین نمونه‌ها کمتر دیده

می‌شود. در شکل (۱۳) این فعل به صورت واضح نشان داده شده است.



شکل ۱۳. روند بسته شدن ترک از پایین به بالا به ترتیب از شماره ۱ تا ٦

٦- مراجع

-Batiaens,W.Bernier,F.Ling Li, X., (2007), “Experiments and conclusions on fracturing, self-healing and self-sealing processes in clays”, Physics and Chemistry of earth, 32, pp.600-615.

-Gallagher P. M., Lin Y., (2005), "Column testing to determine colloidal silica transport mechanisms", Proceedings Sessions of the Geo-Frontiers Congress of Innovations in Grouting and Soil Improvement, Texas Vol.162, pp.1-10.

-Gazi H. (2010), "Investigation the effect of materials in the size of Nano on geotechnical properties of soil", Master thesis, Iran University of Science & Technology.

-Hoshyiar. Y. (2008), "Investigation of self-healing soils for controlling piping in core of earth dams", Master thesis, IAUCTB Faculty of Technology and Engineering.

-Kananizadeh N., Ebadi T., Khoshniat S. A., Mousavirizi S. E., (2011), "The positive effects of nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate", Clean–Soil, Air, Water Vol.39 (7), pp.605-611.

-Majeed Z. H., Taha M. R., Jawad I. T., (2014), "Stabilization of soft soil using nanomaterils", Research Journal of Appiled Sience, Engineering and Technology Vol. 8(4), pp.503-509.

-Ouhadi V, Choobchian S I. (2010), "Geo-Environmental Behaviour of Montmorillonite Treated with Cations in Retention of Pb", IQBQ. 2010; 10 (2) URL: http://mcej.modares.ac.ir/article-16-4669-fa.html

-Padidar M., Jalalian A., Abdouss M., Najafi P., Honarjoo N., Fallahzade J., (2014), "Effect of nanoclay on soil erosion control", NANOCON2014, 5-7 November, Brno, Czech Republic.

-Persoff P., Apps J., Moridis G., Whang J. M., (1999), "Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica gel", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.125 (6), pp.461-469.

- Sarli JM., Hadadi F, Bagheri RA. (2020)" Stabilizing geotechnical properties of loess soil by mixing recycled polyester fiber and nano-SiO 2", Geotechnical and Geological Engineering Vol. 38(2), pp. 1151-1163.

- Taha M. R., Taha O. E., (2012), "Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior", Journal of Nanoparticle Research Vol. 14(10), pp.1-13.

-Taipodia J., Dutta J., Dey A.K., (2011), "Effect of nanoparticles on properties of soil, Proc", of Indian Geotechnical Conference, December, Kochi.

-Wang JJ., Zhang HP., Zhang L, Liang Y. (2013), "Experimental study on self-healing of crack in clay seepage barrier", Engineering geology, 159, pp. 31-35.

-Wilson, M. A., Tran N. H., Milev A. S., Kannangara G. S., Volk H., Lu G. Q., (2008), "Nanomaterials in soils", Geoderma Vol. 146 (1), pp.291-302.

-Zhang G., Geraine J. T., Whittle A. J., Ladd C. C., (2004), "Index properties of a highly weathered old alluvium", Geotechnique, Vol. 54 (7), pp.441- 451.

Evaluate of Different Plasticity Index Effective on Scouring and Self-Resilience of Clay Soils with Nanoclay Additives

Ahmadreza Mazaheri, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Borujerdi University, Iran.

Shahab Hassanpour, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Borujerdi University, Iran.

Omid KhaleghiPour, M.Sc.,Grad. Department of Civil Engineering, Ayatollah Borujerdi University, Iran.

Email: sh.hassanpour@abru.ac.ir

Received: June 2020-Accepted: January 2021

ABSTRACT

Dense clay layers are one of the most common impermeable layers in most geotechnical structures such as earth dams and urban and radioactive waste landfills. Due to the specific geotechnical properties, these layers are damaged by cracking over their lifetime. These cracks increase the permeability of the layer and reduce its efficiency. Considering the necessity of knowledge and understanding of factors affecting the stability of geotechnical structures made with these layers, in this research, it has been tried to use a self-resilient property of clay soils to improve soil yield in different conditions. In the present study, it has been shown by numerous experiments that increasing the plasticity index's clay soils can increase the crack restoration rate. The results show that the addition of nanomorillonite to soil improves the self-healing process of the cracks; the time elapses the effect of this increase in the process of repairing cracks created in the specimens. The discharge rate of the samples is measured relative to the time elapsed during the self-repair and are examined according to the graphs. The experiments showed that the percentage of nano-clay montmorillonite is unaffected and reduces the amount of flow in the specimens, which is the self-restorative symptom of cracking by the addition of nano-clay. The total amount of discharge outflow in nano-clay samples from the non-additive samples was much lower, and nano-clay can be used as repairing cracks in clay soils at a depth of 5 cm.

Keywords: Scouring, Cracking, Self-Resurfacing, Dough Range, Montmorillinite, Nano Clay