

بهسازی آسترهای محل دفن زباله‌های جامد شهری با استفاده از الیاف سنتزی و دی‌کلسیم‌فسفات

مهناز اسکندری^{۱*}، امین فلامکی^۲، کامران محمدزاده‌بیر^۳، هادی منصورآبادی^۴

۱. استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲. دانشیار گروه مهندسی، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵ تهران، ایران afalamaki@yahoo.com
۳. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران kamibabr@gmail.com
۴. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران mr.hadimansourabadi@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

چکیده

ترک‌خوردگی سطحی آسترهای رسی خاکچال‌ها پس از اجرا، باعث افزایش هدایت هیدرولیکی آستر از طریق ایجاد جریان ترجیحی و در نتیجه کاهش طول عمر آستر و کیفیت آن می‌شود. هدف از این پژوهش، دستیابی به آستری بود که حین جذب آلاینده‌های بیشتر، پتانسیل ترک‌خوردگی اندکی داشته و در مقایسه با آسترهای ژئوسنتتیک، ساده‌تر و مقرون به صرفه‌تر باشد. بدین منظور، آستر رسی ساده با سه سطح مختلف از الیاف پلی‌پروپیلن شامل ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد وزنی خاک مسلح شد. برای افزایش جذب آلاینده‌ها نیز ۰/۲ درصد وزنی خاک، دی‌کلسیم‌فسفات به آستر افزوده شد. تغییرات رفتار رس در سه حالت آستر رسی ساده، آستر رسی با الیاف و آستر رسی الیاف‌دار همراه با ماده افزودنی در مقیاس آزمایشگاهی بررسی و هدایت هیدرولیکی و ترک‌خوردگی سطحی آن اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف به مقدار ۰/۷۵ درصد وزنی خاک می‌تواند مقدار ترک‌خوردگی سطحی و عمقی آستر را به اندازه‌ای چشمگیر کاهش دهد. کاربرد این درصد از الیاف در آستر، نفوذپذیری را در مقیاس آزمایشگاهی نسبت به حالت ساده افزایش داد، لیکن مقدار آن در دامنه قابل قبول برای آسترهای رسی بود. همچنین مقدار ضریب نفوذپذیری، مقاومت برشی و محو ترک‌خوردگی‌ها در حضور دی‌کلسیم‌فسفات و ۰/۷۵ درصد الیاف، در حالت بهینه قرار داشت.

کلیدواژه

آستر رسی، ترک‌خوردگی، شیرابه، فایبر پلی پروپیلن.

۱. مقدمه

هوا به شمار می‌رود. برای مثال، تجزیه زباله‌ها به تولید کربن و انتشار آن در محیط می‌انجامد که از عوامل اصلی تغییر اقلیم جهانی است. در حال حاضر، تغییر اقلیم تهدیدی فوری و برگشت‌ناپذیر برای جوامع بشری و زمین محسوب می‌شود. به گونه‌ای که برای مقابله با آن، موافقت‌نامه کنفرانس پاریس با حضور بسیاری از کشورهای جهان تشکیل شد. بر پایه این موافقت‌نامه، کشورها باید نسبت به کم‌کردن تولید کربن و حل مشکلات

مدیریت مواد زائد جامد شهری از مهمترین چالش‌های زیست‌محیطی در سراسر جهان است (Eskandari et al., 2011). آخرین جزء مدیریت مواد زائد، دفن زباله در خاک‌چال‌هاست که در حال حاضر غالب‌ترین روش دفع محسوب می‌شود (Eskandari et al., 2012). لیکن مواد زائد پس از دفن، تولید گاز و شیرابه می‌کنند که تهدیدی جدی برای عناصر مختلف محیط‌زیست یعنی آب، خاک و

ژئوسیتیتیکی به دلایل اقتصادی امکان‌پذیر نبوده و امکان ساخت آستر رسی متراکم در زیر تلبار زباله، محتمل‌تر و امکان‌پذیرتر است. آستر رسی متراکم به‌عنوان مانعی هیدرولیکی برای جریان سیالات به کار می‌رود. برای دستیابی به این هدف، آسترهای رسی متراکم باید هدایت هیدرولیکی اندکی در طولانی مدت داشته باشند که این محدوده می‌تواند از 1×10^{-7} تا 1×10^{-9} سانتیمتر بر ثانیه متغیر باشد (Daniel, 1993). آسترهای رسی باید به‌گونه‌ای انعطاف‌پذیر باشند که حین اجرا، پس از اجرا و در هنگام وقوع بلایایی مانند زلزله، ترک نخورند. یکی از مشکلات عمده آسترهای رسی، ترک خوردن سطحی آن به دلیل خاصیت خمیری رس است. ترک خوردن سطح آسترها باعث کاهش عمر مفید آستر، کاهش مقاومت خاک، افزایش نفوذ سطحی و در نتیجه آلودگی محیط‌زیست می‌شود. ترک خوردگی ناشی از خشک شدن در آسترها اثر نامطلوب چشمگیری بر نفوذپذیری آنها دارد. هدایت هیدرولیکی برخی از آسترهای رسی در اثر ترک خوردگی ۵۰۰ برابر گزارش شده است (Safari et al., 2014).

یسلر و همکاران (۲۰۰۰)، در بررسی رفتار انقباضی و ترک خوردگی سه نوع آستر رسی متراکم مشاهده کردند که مقدار ریزدانه‌های خاک، ترک خوردگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور کلی مقدار ترک خوردگی بیشتری در خاک‌ها با درصد بالای ریزدانه، مشاهده می‌شود. به‌منظور بهسازی عملکرد آسترهای رسی متراکم و همچنین افزایش سهولت ساخت، مواد افزودنی متفاوتی به آنها افزوده می‌شود. دسته‌ای از این مواد مانند الیاف و مسلح‌کننده‌ها، به‌منظور کاهش ترک خوردگی و افزایش مقاومت برشی هستند (Yesiller et al., 2000). میلر و رفایی در سال ۲۰۰۴ تسلیح آسترهای محل دفن زباله به‌وسیله الیاف را بررسی کرده و نشان دادند که درصد الیاف مناسب برای ثابت نگه داشتن هدایت هیدرولیکی، در بازه ۰/۴ تا ۰/۵ درصد وزنی خاک است (Miller & Rifai, 2004). هاریناتو و همکاران در سال ۲۰۰۸، اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن

زیست‌محیطی خود اقدام نمایند (Paris Agreement, 2015). یکی از چالش‌های این توافقنامه می‌تواند اختلاف سطح فناوری، ثروت و درآمد کشورها باشد. برای مثال در کشورهای در حال توسعه، هزینه‌هایی که برای مدیریت پسماندها و دفن آن پرداخت می‌شود، قابل مقایسه با کشورهای صنعتی نیست. در حالت ایدئال، برای دفع زباله‌ها باید خاکچالی با طراحی مناسب به روش مهندسی استفاده شود که در آن مواد زائد به گونه‌ای در زمین دفن می‌شوند که آسیب وارده به محیط حداقل باشد (Eskandari et al., 2015). لیکن در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، سازمان‌های ذی‌صلاح در امر مدیریت پسماند، قادر به پرداخت هزینه‌های مربوط به این فرایند نبوده و بخش عمده‌ای از زباله‌ها به‌صورت تلبار در محیط رها می‌شوند. در نتیجه، شیرابه و گاز حاصل نیز به درون محیط منتشر خواهد شد (Eskandari et al., 2016).

استفاده از فناوری‌های کم تا متوسط با هزینه‌های پایین راهکاری برای غلبه بر این چالش‌هاست. ممکن است احداث محل دفن کاملاً بهداشتی و مهندسی مطابق با آنچه در کشورهای توسعه یافته انجام می‌شود، در بسیاری از کشورهای در حال توسعه امکان‌پذیر نباشد، لیکن می‌توان با استفاده از روش‌های کم‌هزینه‌تر، نسبت به کاهش معضلات زیست‌محیطی اقدام کرد. برای مثال، آسترهای گران‌قیمت ژئوسیتیتیکی که در طراحی خاکچال‌ها به‌منظور جلوگیری از نشت شیرابه کاربرد دارند، با آستر رسی متراکم در کشورهای کم‌درآمد، قابل جایگزینی است. همچنین می‌توان با استفاده از روش‌های کم‌هزینه و آسان، نسبت به بهسازی این نوع آسترهای ساده اقدام کرد.

همان‌گونه که گفته شد، امروزه در کشورهای صنعتی استفاده از انواع آسترهای گران‌قیمت ساخته شده با مصالح ژئوسیتیتیکی متداول و اجباری است. البته در زیر این آسترهای مصنوعی، از آسترهای رسی طبیعی یا متراکم شده با ضخامت ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متر استفاده می‌شود. لیکن در کشورهای در حال توسعه، استفاده از آسترهای

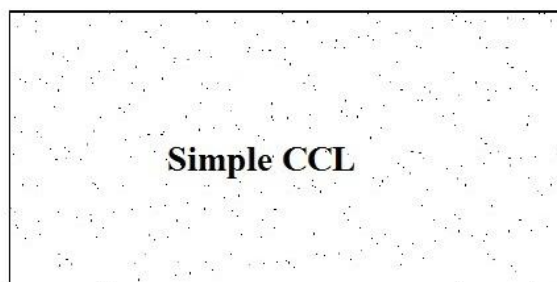
نمونه‌های مورد آزمایش است. وی همچنین اظهار داشت که درصد الیاف استفاده شده تا حد ۱/۲ درصد، هدایت هیدرولیکی را در محدوده قابل قبولی نگه می‌دارد. همچنین در این پژوهش محدوده‌ای به‌عنوان درصد بهینه استفاده از الیاف در خاک، برای تنش‌های فشاری محصور نشده، تنش‌های کششی، هدایت هیدرولیکی و فاکتور شدت ترک‌خوردگی ارائه شده است (Harianto, 2014). هی و همکاران در سال ۲۰۱۵، هدایت هیدرولیکی رس طبیعی و رس اصلاح‌شده با بنتونیت را در شرایط با و بدون ترک‌خوردگی بررسی کردند (He et al., 2015). در پژوهش آنها از سه نوع مایع برای عبور از رس استفاده شد. شیرابه‌های مصنوعی عبوری در مقایسه با آب، تأثیر نامطلوب چندانی بر هدایت هیدرولیکی نداشت. بر پایه نتایج این تحقیق، ترک‌خوردگی ناشی از خشک‌شدن و مقدار ریزدانه، دو عامل مهم در توانایی هیدرولیکی آسترهاست. با توجه به اینکه ترک‌خوردگی پوشش رسی خاکچال‌ها در درازمدت یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با دفن زباله است، لی و همکاران، ۲۰۱۶، اثر کشت گیاه و نفوذ ریشه‌های آن را بر ترک پوشش خاکچال بررسی کردند. این پژوهش نشان داد که ریشه‌های گیاه قادر است از مقدار ترک‌خوردگی آستر پس از مواجهه با چرخه خشک و تر شدن بکاهد. لیکن هدایت هیدرولیکی غیراشباع پس از کشت گیاه در نتیجه جریان ترجیحی، ده برابر افزایش داشت. بنابراین باید تأثیر ریشه گیاهان در هدایت هیدرولیکی، حین اجرای آسترها در نظر گرفته شود (Li et al., 2016).

با توجه به مطالب گفته شده به نظر می‌رسد که افزودن الیاف به آستر رسی می‌تواند دو اثر متضاد داشته باشد. از یک سو، الیاف باعث کاهش ترک‌خوردگی می‌شود و از دیگر سو، در دامنه‌ای از مقادیر، باعث افزایش نفوذپذیری آستر خواهد شد. بنابراین تعیین درصد بهینه الیاف که خود تابع جنس خاک و الیاف و سایز آن است، بسیار مهم است؛

بر خاک‌های رسی آکابوکو برای جلوگیری از افزایش ترک‌های انقباضی در آسترهای رسی را بررسی کرده‌اند. این پژوهش نشان داد که کاربرد الیاف در خاک برای کم‌کردن ترک‌های انقباضی بسیار مؤثر است (Harianto et al., 2008). عبدی و همکاران نیز در سال ۲۰۰۸ تأثیر الیاف با توزیع تصادفی را بر هدایت هیدرولیکی، تورم، حد انقباض و ترک‌های انقباضی در خاک‌های رسی بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که نشست‌های تحکیمی و تورمی نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد، درحالی‌که هدایت هیدرولیکی با افزایش مقدار و طول الیاف، مقدار اندکی افزایش می‌یابد (Abdi et al., 2008). کالکان (۲۰۰۹)، تأثیر فوم سیلیکا به‌عنوان افزودنی آستر رسی متراکم را بر میزان ترک‌های انقباضی بررسی کرد و نتیجه گرفت که در خاک مخلوط شده با فوم سیلیکا، پیشرفت ترک‌های انقباضی در سطح آسترهای متراکم شده رسی کاهش می‌یابد (Kalkan, 2009). پله و لی (۲۰۱۲)، تأثیر الیاف تقویتی پلی‌پروپیلن بر رفتار مکانیکی رس سیلتی را بررسی کردند و دریافتند که رس تقویت‌شده رفتار نرمی از خود نمایش می‌دهد که پتانسیل ترک‌خوردگی را کاهش می‌دهد (Ple & Le, 2012). فریرا و اکیچی نیز با بررسی تأثیر الیاف تقویتی بر رفتار برشی رس متراکم شده دریافتند که خاک مسلح شده با الیاف، تغییر شکل‌های حجمی کمتری داشته و همچنین ترک‌های انقباضی آن در مقایسه با خاک رس غیرمسلح محو شده است (Ekinci & Ferreira, 2012). هاریناتو (۲۰۱۴)، معیارهای طراحی از اختلاط‌های مختلف خاک و الیاف به‌عنوان یکی از مصالح سیستم‌های پوششی محل دفن زباله را معرفی نمود. وی برای نمونه‌های خاک از الیاف پلی‌پروپیلن به‌عنوان افزودنی استفاده کرده است. نتایج این پژوهش نشان داد که دامنه قابل قبول به‌منظور جلوگیری از ترک‌خوردگی، در محدوده ۰/۶ تا ۰/۸ درصد الیاف برای

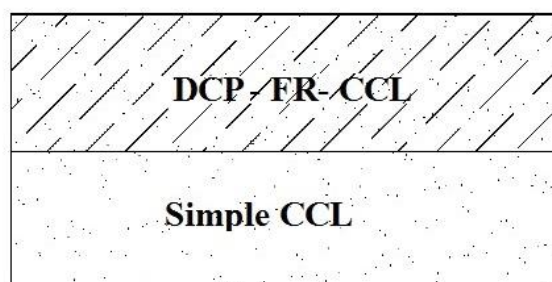
بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن مواد فسفاتی به آستر رسی محل دفن زباله، جذب انواع آلاینده‌های موجود در شیرابه و به‌ویژه فلزات سنگین، افزایش می‌یابد. با توجه به آنچه گفته شد به نظر می‌رسد، با افزودن مواد جاذب انواع آلاینده‌ها و همچنین الیاف، می‌توان آسترهای رسی تهیه کرد که به‌طور هم‌زمان دارای پتانسیل ترک‌خوردگی کم حین اجرا و پتانسیل جذب بالا برای آلاینده‌ها باشند. همچنین در مقایسه با آسترهای ژئوستتیک، دارای فناوری ساده‌تر و ارزان‌تری هستند. شایان ذکر است که این نوع آستر به دلیل ملاحظات اقتصادی می‌تواند چندلایه باشد. به عبارتی، تنها بخشی از آسترهای رسی متراکم دارای مواد افزودنی مورد اشاره باشند. شکل ۱، نمایی از این آستر پیشنهادی را نشان می‌دهد. هدف اصلی از انجام این پژوهش، ساخت آستر رسی متراکم دارای الیاف و ترکیب فسفاتی به‌طور هم‌زمان بود. برای این منظور، از خاک رس طبیعی محل دفن زباله‌های شهری شیراز استفاده شد و درصد بهینه الیاف برای این خاک به‌منظور کاربرد آن به‌عنوان آستر رسی، بررسی شد.

تا ضمن جلوگیری از ترک‌خوردگی، نفوذپذیری را در مقیاس آزمایشگاهی در محدوده قابل قبولی تغییر دهد. شیرابه تولید شده در محل‌های دفن زباله شهری، واجد آلاینده‌های بی‌شمار و خطرناکی از جمله فلزات سنگین است. به همین دلیل ورود شیرابه به خاک و آب، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و محیط به‌شمار می‌رود (Eskandari *et al.*, 2011). برخی دیگر از افزودنی‌ها مانند ترکیبات فسفاتی می‌توانند با هدف کاهش پتانسیل انتقال آلودگی به آسترها اضافه شوند. تاکنون تحقیقات بسیاری انجام شده که نشان می‌دهند ترکیبات فسفاتی قادر به تثبیت انواع آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین و رادیواکتیوها در خاک هستند (Roger *et al.*, 2004; Mignardi *et al.*, 2013; Ping *et al.*, 2013; Falamaki *et al.*, 2016). برای مثال فلامکی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهش خود تأثیر کاربرد دی‌کلسیم فسفات (DCP) را در تثبیت و جامدسازی کادمیوم و مس و جلوگیری از آبخوایی این دو فلز از خاک‌های سبک بافت به منابع آب زیرزمینی بررسی کردند. این پژوهشگران با توجه به نتایج پژوهش خود، استفاده از ترکیبات فسفاته در آسترهای متراکم رسی را پیشنهاد دادند.



الف

CCL= Compacted Clay Liner
DCP= DiCalcium Phosphate
FR= Fiber Reinforced



ب

شکل ۱. نمای کلی آستر رسی متراکم ساده (الف)، آستر رسی متراکم مسلح‌شده با الیاف و اصلاح شیمیایی شده با دی‌کلسیم فسفات (ب).

چشمگیری در تثبیت فلزات سنگین دارد (Falamaki *et al.*, 2013) و همچنین از نظر اقتصادی کاربرد این ماده به دلیل ارزان قیمت بودن، مقرون به صرفه است، از همین مقدار ماده افزودنی در این پژوهش استفاده شد.

تهیه نمونه‌ها

در این پژوهش سه نوع نمونه مختلف تهیه و آزمایش شد. روش ساخت هر یک از نمونه‌ها در زیر توضیح داده شده است.

برای تهیه نمونه آستر ساده، ۳۰۰۰ گرم خاک جدا شد و ۵۰۰ میلی‌متر مکعب آب به آن اضافه شد، به طوری که درصد رطوبت در نمونه‌های ساده، برابر با رطوبت بهینه و ۱۶/۶ درصد باشد. سپس نمونه ورز داده شد تا به حالت خمیری یکنواخت برسد. این نمونه در سلول آزمایش ریخته شد و در مدت زمان لازم تحت بارگذاری قرار گرفت تا برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری آماده شود. نمونه‌های الیاف‌دار مشابه حالت ساده تهیه شدند با این تفاوت که قبل از افزودن آب به خاک، مقدار لازم از الیاف به صورت تصادفی به خاک افزوده و به خوبی مخلوط شد. در این پژوهش، الیاف پلی‌پروپیلن در سه سطح با اندازه‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی خاک به کار رفت.

۲. مواد و روش‌ها

خاک رسی مورد استفاده در این پژوهش از محل دفن زباله‌های شهر شیراز تهیه شد. نمونه خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، خشک شده و برای انجام آزمایش آماده شد. بر پایه طبقه‌بندی متحد^۱، نمونه خاک دارای بافت لوم رسی (CL) است و حده روانی و حده خمیری آن به ترتیب ۲۵ و ۱۰ بود. وزن مخصوص نسبی این خاک ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. با انجام آزمایش تراکم پروکتور استاندارد (ASTM D698-12e1)، رطوبت بهینه خاک مورد مطالعه، در حدود ۱۶/۶ تعیین شد.

الیاف مورد استفاده در پژوهش از نوع پلی‌پروپیلن (C3H6) با طول تقریبی ۲/۵ سانتی‌متر انتخاب شد. این الیاف سفیدرنگ و به صورت رشته‌های بسیار نازک به هم چسبیده است. دلیل این انتخاب، ساختار ریز این الیاف و امکان درگیری بیشتر آن با دانه‌های ریز و درشت خاک بود. ساختار الیاف در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور مخلوط شدن بهتر الیاف با خاک، رشته‌های الیاف از هم جدا شده و به صورت رشته‌های تکی و پنبه‌ای در آمدند.

دی‌کلسیم فسفات (DCP) با فرمول شیمیایی $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، به عنوان ماده افزودنی فسفاته در این پژوهش به کار رفت. از آنجا که در پژوهش پیشین نشان داده شد که استفاده از این ماده به مقدار ۰/۲ درصد وزنی خاک، اثر



شکل ۲. الیاف مصنوعی پلی‌پروپیلن مورد استفاده در پژوهش

انجام آزمایش‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد آستر رسی متراکم مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن و بهسازی شیمیایی شده با دی‌کلسیم فسفات، آزمایش‌های نفوذپذیری، برش مستقیم و تعیین مقدار ترک خوردگی انجام شد. برنامه آزمایش‌ها در جدول ۱ آمده است.

آزمایش‌های نفوذپذیری بر پایه استاندارد ASTM-D2434 (2006)، در سلولی استوانه‌ای ساخته شده از پلکسی‌گلاس^۲ با قطر دهانه ۱۵۰ و ارتفاع ۱۳۰ میلی‌متر انجام گرفت. نمای سلول ساخته شده و تجهیزات متصل به آن در شکل ۳ آمده است. روی هر سلول به منظور ورود آب با توزیع مناسب در سطح سلول و عدم تمرکز جریان در بخش میانی، پنج شیر تعبیه شد و درون شیار سر سلول برای آب‌بندی، از اورینگ^۳ استفاده شد. برای اتصال دو سر سلول نیز پیچ‌های متری در اندازه‌های مناسب بریده و استفاده شدند.

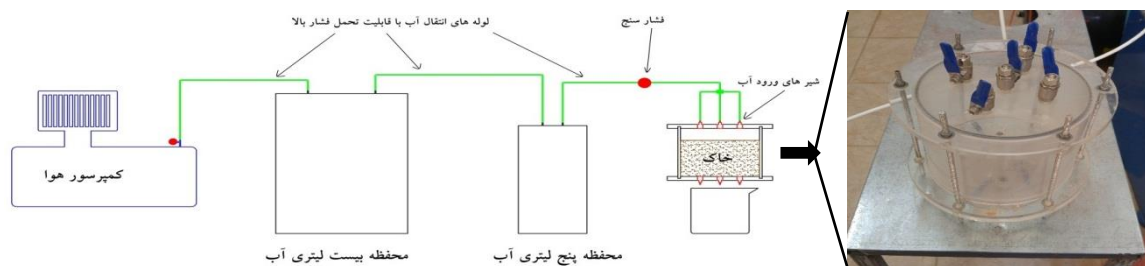
به منظور افزایش سرعت آزمایش، گرادیان هیدرولیکی افزایش داده شد، به طوری که فشار سرباری معادل 1bar به نمونه‌ها اعمال شد.

به نمونه‌های سوم، افزون بر الیاف، DCP نیز اضافه شد. برای تهیه این نمونه‌ها، قبل از اختلاط آب با خاک، دی‌کلسیم فسفات به آب افزوده شده و با دستگاه همزن به خوبی ترکیب شد تا مایعی خاکستری‌رنگ حاصل شود. سپس مایع حاصل شده به عنوان آب نمونه به آن اضافه شد. مقدار DCP در تمام آزمایش‌ها، ۰/۲ درصد وزنی نمونه در نظر گرفته شد. سپس نمونه‌های تهیه شده به مدت ۱۰ روز در دمای اتاق قرار داده شدند تا ماده فسفاتی اضافه شده با نمونه به تعادل شیمیایی برسد؛ همچنین اثر احتمالی ماده افزودنی بر رفتار خاک پایدار شود.

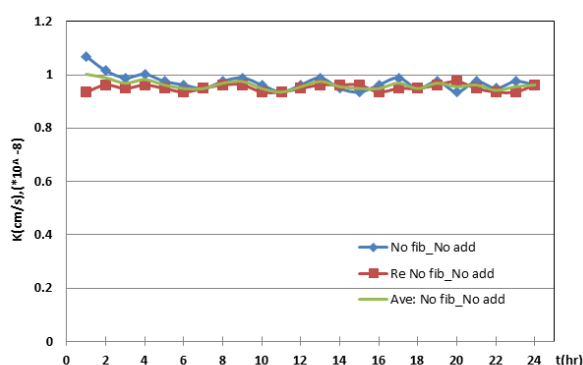
به منظور یکسان‌سازی، نمونه‌های ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت تحت سربار ۵۰۰ کیلو پاسکال قرار گرفتند. همچنین برای آزادسازی تنش‌های درونی به مدت ۴۸ ساعت، در اتاق رطوبت قرار داده شدند. وزن مخصوص نمونه‌ها پس از تحکیم اندازه‌گیری شد. این پارامتر بین ۲۰/۶ تا ۲۱/۷ کیلو نیوتن بر مترمکعب به دست آمد. رطوبت نمونه‌ها نیز در حدود ۱۶/۴۳ تا ۱۶/۶۰ درصد بود.

جدول ۱. برنامه آزمایش‌ها

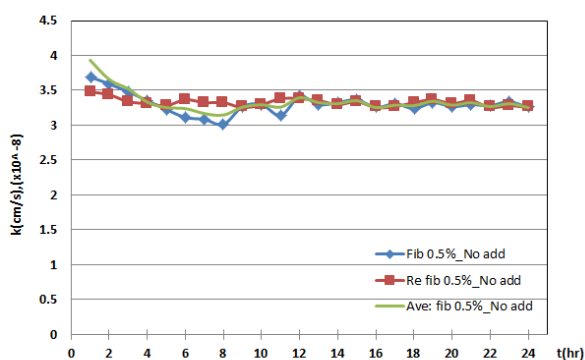
درصد الیاف	درصد DCP	نام نمونه	نام اختصاری نمونه	وزن مخصوص نمونه‌ها پس از تحکیم (KN/m ³)	درصد رطوبت نمونه
۰/۰	۰/۰	بدون الیاف-بدون ماده افزودنی	No fib- No Add	۲۲/۸۵	۱۶/۶
۰/۵	۰/۰	درصد الیاف-بدون ماده افزودنی	Fib 0.5%- No Add	۲۱/۷	۱۶/۵۷
۰/۷۵	۰/۰	درصد الیاف-بدون ماده افزودنی	Fib 0.75%- No Add	۲۰/۶	۱۶/۵۲
۱/۰	۰/۰	۱ درصد الیاف-بدون ماده افزودنی	Fib 1.0%- No Add	۲۰/۰۲	۱۶/۴۷
۰/۵	۰/۰۲	درصد الیاف-همراه با ماده افزودنی	Fib 0.5%+DCP	۲۱/۷۳	۱۶/۵۳
۰/۷۵	۰/۰۲	درصد الیاف-همراه با ماده افزودنی	Fib 0.75%+DCP	۲۰/۶۴	۱۶/۴۸
۱/۰	۰/۰۲	۱ درصد الیاف-همراه با ماده افزودنی	Fib 1.0%+DCP	۲۰/۰۶	۱۶/۴۳



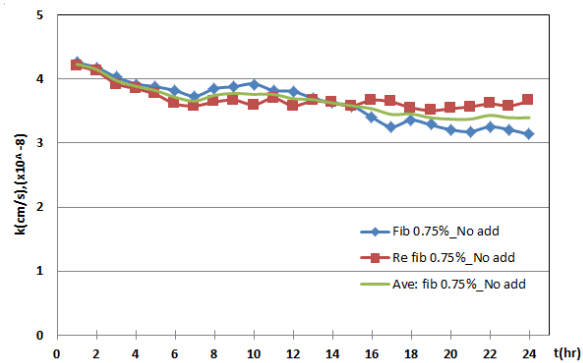
شکل ۳. نمای کلی دستگاه آزمایش نفوذپذیری و سلول ساخته شده در پژوهش



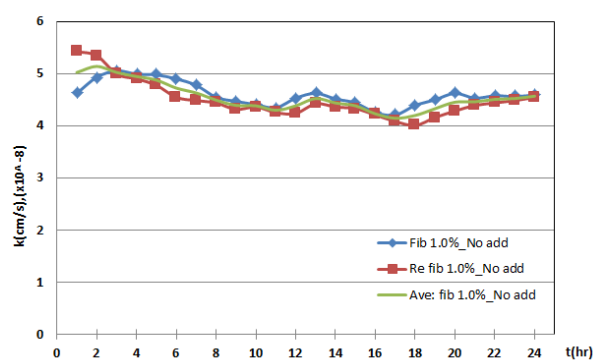
الف



ب



ج



د

شکل ۴ مقدار ضریب نفوذپذیری به دست آمده با تکرار آزمایش‌ها در نمونه‌هایی با: ۰/۰ درصد الیاف (الف)، ۰/۵ درصد الیاف (ب)، ۰/۷۵ درصد الیاف (ج) و ۱/۰ درصد الیاف (د)

متوسط در تکرارها در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که ضرایب نفوذپذیری آزمایش‌های مشابه، از تطابق مناسبی برخوردار است. آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های ساخته شده بر پایه دستورالعمل ASTM D3080 / D3080M-11 (2011)، انجام گرفت. پس از انجام آزمایش نفوذپذیری به منظور بررسی

نمونه‌سازی در آزمایش‌های نفوذپذیری از اهمیت بسیاری برخوردار است، به همین منظور آزمایش‌ها تکرار شدند. در هر آزمایش، تغییرات ضریب نفوذپذیری طی ۲۴ ساعت بررسی و در نمودار ترسیم شد. با توجه به اینکه آزمایش‌ها دو بار تکرار شدند، در تحلیل نتایج از متوسط ضرایب نفوذپذیری استفاده شد. صحت تکرارپذیری آزمایش نفوذپذیری در نمونه‌های ساخته شده و مقدار

ایجاد شده به یکدیگر پیوسته و با ایجاد جریان ترجیحی از ترک‌های عمیق و وسیع، باعث می‌شوند که هدایت هیدرولیکی چند ده برابر افزایش یابد.

اثر استفاده هم‌زمان الیاف و DCP بر نفوذپذیری آستر رسی در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزودن ۰/۵ درصد الیاف در حضور DCP، مقدار نفوذپذیری حدود 10^{-8} (۳-۲) سانتیمتر بر ثانیه به دست آمد. مشابه نمونه‌های بدون DCP، افزودن هم‌زمان DCP با الیاف در آستر رسی می‌تواند هدایت هیدرولیکی را نسبت به نمونه رسی ساده حدود ۳ برابر افزایش دهد. نفوذپذیری نمونه رسی با ۰/۷۵ درصد الیاف به همراه DCP در مقایسه با نمونه رسی ساده ۳ تا ۵ برابر بیشتر شده است. در نمونه‌های ۱/۰ درصد الیاف به همراه DCP، هدایت هیدرولیکی آستر رسی نسبت به حالت ساده در حدود ۴ تا ۶ برابر افزایش یافت. با مقایسه نتایج شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان استنتاج کرد که استفاده از الیاف موجب افزایش نفوذپذیری می‌شود، لیکن افزودن DCP تأثیر چندانی در تغییرات نفوذپذیری ندارد. به عبارت دیگر، افزایش مقدار نفوذپذیری در نمونه‌ها ناشی از حضور الیاف است.

نتایج آزمایش برش مستقیم که به منظور تعیین پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های آستر رسی انجام گرفت، در جدول ۲ آمده است. پس از انجام آزمایش‌ها، سه نمودار کرنش افقی - قائم، تنش برشی مقاوم - کرنش افقی و پوش گسیختگی رسم شد. تمامی آزمایش‌ها از نوع تحکیم یافته زهکشی نشده (CU) هستند. از تحلیل نتایج نمودار پوش گسیختگی، مقدار چسبندگی زهکشی نشده C_{cu} و زاویه اصطکاک داخلی زهکشی نشده φ_{cu} نمونه‌ها به دست آمد. تنش برشی حداکثر (τ_{max})، زاویه اصطکاک داخلی (φ) و چسبندگی (C)، پارامترهای مقاومت برشی به دست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم هستند که در جدول ۲ مشاهده می‌شوند. بر پایه این نتایج، مقاومت برشی حداکثر در حالتی که DCP حضور داشته باشد، نسبت به حالتی که الیاف به تنهایی استفاده شده است، اختلاف چندانی ندارد.

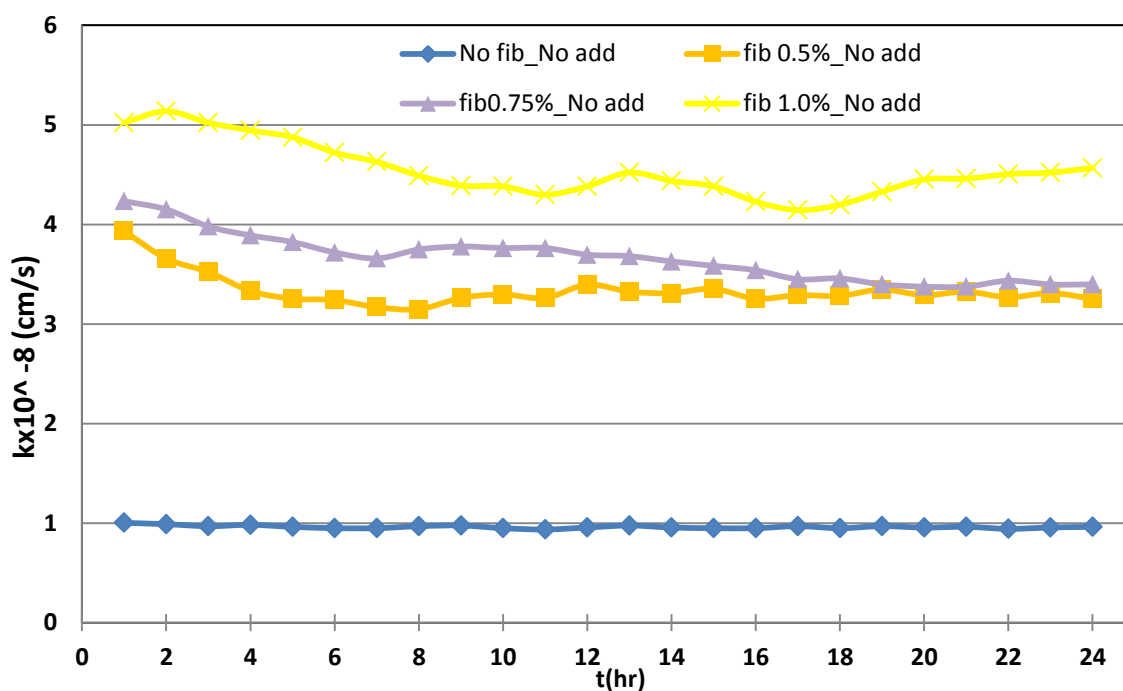
پتانسیل ترک خوردگی آستر، نمونه‌ها از سلول خارج شده و به مدت یک هفته در معرض نور خورشید قرار داده شدند تا به اندازه کافی خشک شوند. میزان ترک خوردگی به طور کیفی و با عکس برداری از نمونه‌ها، ارزیابی شد.

۳. نتایج و بحث

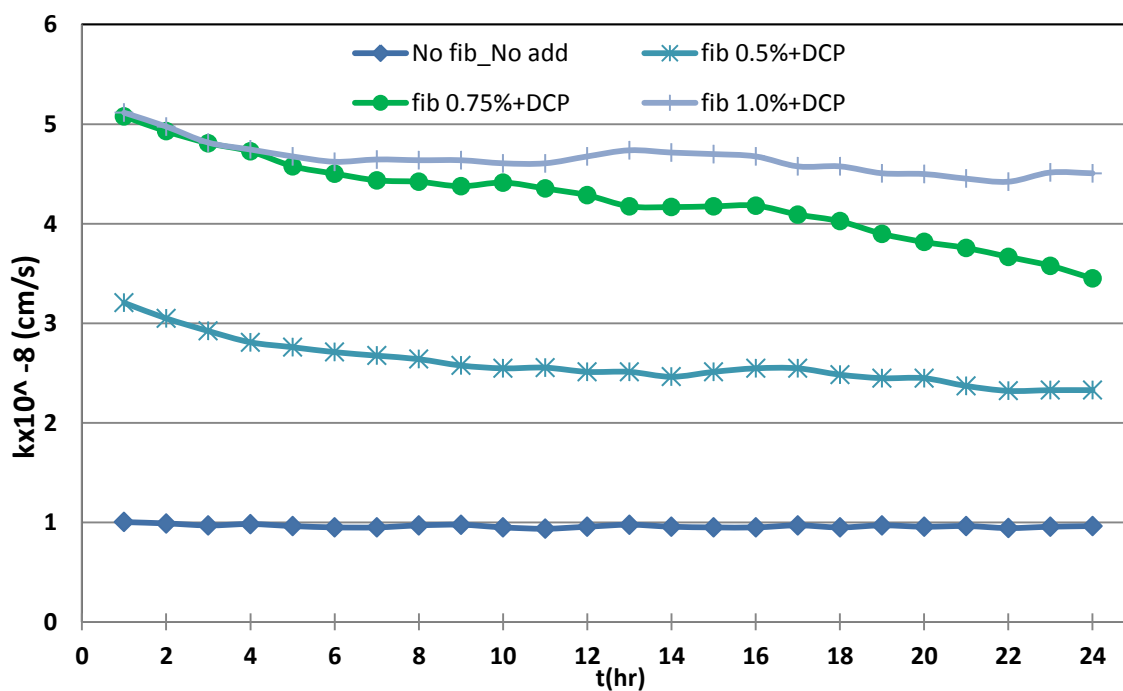
تغییرات نفوذپذیری نسبت به زمان

اثر افزودن الیاف بر ضریب نفوذپذیری آستر رسی در شکل ۵ نشان داده شده است. ضریب نفوذپذیری آستر رسی ساده در ۲۴ ساعت، مقداری در حدود 10^{-8} (۱-۰/۸) سانتیمتر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ضریب نفوذپذیری در نمونه‌هایی با ۰/۵ درصد الیاف نسبت به خاک رس بدون الیاف حدود چهار برابر افزایش یافته و مقداری بین 10^{-8} (۳-۳/۵) سانتیمتر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است. این روند برای کاربرد مقدار ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد الیاف نیز دیده می‌شود و تغییرات نفوذپذیری در این دو حالت به ترتیب بین 10^{-8} (۳-۴) و 10^{-8} (۴-۵) سانتیمتر بر ثانیه متغیر بود. به عبارتی، هدایت هیدرولیکی پس از کاربرد این دو مقدار از الیاف، به طور متوسط به ترتیب حدود ۳/۵ و ۴/۵ برابر شده است. میلر و رفایی، ۲۰۰۴ و پله و لی، ۲۰۱۲ نیز در پژوهش خود نشان دادند که با افزایش درصد الیاف کاربردی برای مسلح‌سازی آستر رسی، هدایت هیدرولیکی افزایش می‌یابد. هر چند که بر پایه شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد الیاف، مقدار نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش یافته است، لیکن مقدار آن در محدوده قابل قبول به عنوان آستر رسی متراکم قرار دارد (کمتر از 10^{-7} بر پایه استاندارد USEPA (۲۰۰۱) در مورد محل‌های دفن زباله).

در این پژوهش، ضریب هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده برای آسترهای رسی در مقیاس آزمایشگاهی است. بنابراین توجه به این نکته نیز ضروری است که پس از اجرای آستر رسی در شرایط واقعی و در مواجهه با چرخه خشک و تر شدن، ترک‌های انقباضی



شکل ۵. اثر کاربرد درصدهای مختلف الیاف بر نفوذپذیری آستر رسی ساده



شکل ۶. اثر کاربرد درصدهای مختلف الیاف در آستر رسی همراه با DCP بر نفوذپذیری

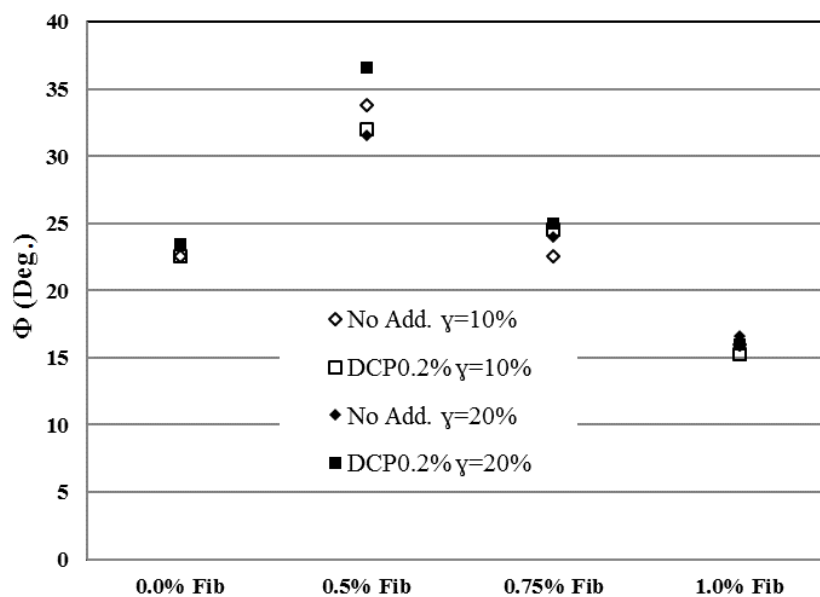
جدول ۲. پارامترهای مقاومت برشی به دست آمده از آزمایش برش مستقیم تحکیم یافته زهکشی نشده

(τ_{max}) (kpa)	C_{cu} (kpa)	ϕ_{cu} (deg)	نام اختصاری نمونه‌ها	نمونه‌ها
۲۱/۵	۱۳/۷	۲۲/۶	No Fib_No add ($\gamma=10\%$)	بدون الیاف-بدون افزودنی (کرنش ۱۰٪)
۲۶/۵	۱۸/۰	۲۳/۵	No Fib_No add ($\gamma=20\%$)	بدون الیاف-بدون افزودنی (کرنش ۲۰٪)
۲۸/۵	۱۵/۰	۳۳/۸	Fib 0.5 %_No add ($\gamma=10\%$)	۰/۵٪ الیاف-بدون افزودنی (کرنش ۱۰٪)
۳۳/۸	۲۱/۶	۳۱/۶	Fib 0.5%_No add ($\gamma=20\%$)	۰/۵٪ الیاف-بدون افزودنی (کرنش ۲۰٪)
۲۹/۴	۲۱/۰	۲۲/۶	Fib 0.75 %_No add ($\gamma=10\%$)	۰/۷۵٪ الیاف-بدون افزودنی (کرنش ۱۰٪)
۴۱/۵	۳۳/۲	۲۴/۰	Fib 0.75 %_No add ($\gamma=20\%$)	۰/۷۵٪ الیاف-بدون افزودنی (کرنش ۲۰٪)
۲۵/۸	۲۷/۲	۱۶/۰	Fib 1.0 %_N0 add ($\gamma=10\%$)	۱٪ الیاف-بدون افزودنی (کرنش ۱۰٪)
۳۵/۰	۲۹/۰	۱۶/۶	Fib 1.0 %_N0 add ($\gamma=20\%$)	۱٪ الیاف-بدون افزودنی (کرنش ۲۰٪)
۲۷/۲	۱۴/۵	۳۲/۰	Fib 0.5 % +DCP ($\gamma=10\%$)	۰/۵٪ الیاف-با افزودنی (کرنش ۱۰٪)
۳۴/۴	۱۹/۴	۳۶/۶	Fib 0.5 % +DCP ($\gamma=20\%$)	۰/۵٪ الیاف-با افزودنی (کرنش ۲۰٪)
۳۳/۰	۲۴/۲	۲۴/۵	Fib 0.75 % +DCP ($\gamma=10\%$)	۰/۷۵٪ الیاف-با افزودنی (کرنش ۱۰٪)
۴۱/۵	۳۲/۴	۲۵/۰	Fib 0.75 % +DCP ($\gamma=20\%$)	۰/۷۵٪ الیاف-با افزودنی (کرنش ۲۰٪)
۳۲/۲	۲۷/۰	۱۵/۳	Fib 1.0 % +DCP ($\gamma=10\%$)	۱٪ الیاف-با افزودنی (کرنش ۱۰٪)
۴۲/۲	۳۶/۷	۱۶/۰	Fib 1.0 % +DCP ($\gamma=20\%$)	۱٪ الیاف-با افزودنی (کرنش ۲۰٪)

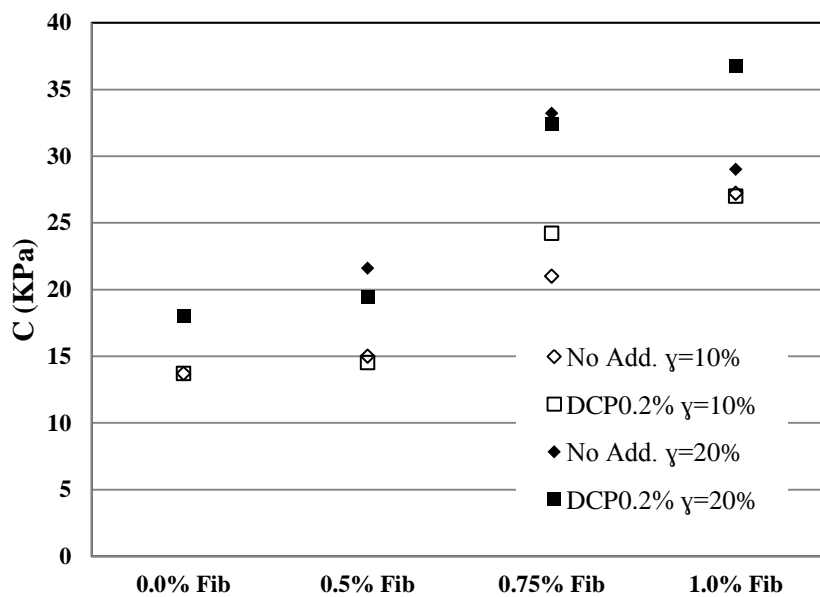
که الیاف در این دو نمونه دارد نسبت به حجم خاک زیاد بوده و نمی‌تواند به خوبی درون خاک قرار گیرد. بنابراین بخش عمده فضای داخلی خاک را رشته‌های الیاف پر کرده و اجازه درگیر شدن کامل با دانه‌های خاک را نمی‌دهند. در نتیجه اصطکاک بین ذرات خاک و رشته‌های الیاف کاهش یافته و زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد.

درباره چسبندگی وضعیت رفتاری خاک بدین گونه نبود. با نگاهی به شکل ۸ می‌توان دریافت که در هر مرحله افزایش الیاف، چسبندگی نیز افزایش یافته است. در واقع افزایش الیاف به افزایش چسبندگی آسترهای رسی کمک کرده است.

دو مقطع کرنش ۱۰ درصد و ۲۰ درصد برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در نظر گرفته شد. شکل ۷، زاویه اصطکاک داخلی تمامی نمونه‌های آزمایش شده را برای کرنش ۱۰ و ۲۰ درصد نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان به خوبی تغییرات ϕ را در حالتی که DCP حضور دارد نسبت به حالتی که این ماده استفاده نشده است، مقایسه کرد. به نظر می‌رسد که نخست با افزودن ۰/۵ درصد الیاف به خاک، ϕ نمونه افزایش یافته، لیکن در ادامه با زیاد شدن مقدار الیاف، یعنی در حالت‌های ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد الیاف، ϕ کاهش یافته است. دلیل این رفتار خاک را می‌توان حجم زیاد الیاف نسبت به وزن سبک آن دانست. به عبارتی دیگر، حجمی



شکل ۷. مقایسه زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها با و بدون حضور DCP در کرنش ۱۰ و ۲۰ درصد



شکل ۸. مقایسه تغییر چسبندگی نمونه‌ها با و بدون حضور DCP در کرنش ۱۰ و ۲۰ درصد

جدول ۳. مقایسه اثر افزودن DCP در مقاومت برشی حداکثر آستر رسی

τ_{max} (kpa),(with DCP)	τ_{max} (kpa),(no DCP)	Fiber content (%)
۳۹	۳۷	۰/۵
۴۵	۴۶	۰/۷۵
۴۶	۴۳	۱/۰

میلر و رفایی (۲۰۰۴)، نیز نشان دادند که بهینه‌ترین مقدار الیاف که می‌تواند ۹۰ درصد ترک‌های انقباضی را کاهش دهد، ۰/۸ درصد است. آخرین درصد الیاف مورد آزمایش برای محو ترک خوردگی، ۱/۰ درصد بود. مقایسه شکل ۹(ج) با ۹(د) نشان می‌دهد که کاربرد این مقدار الیاف کارایی کمتری نسبت به ۰/۷۵ درصد در محو ترک‌ها دارد. زیرا مجدداً ترک‌های بسیار کوچکی در آستر نمایان شد. با تکرار این آزمایش، این‌گونه به نظر رسید که دلیل این امر اختلاف زیاد حجم الیاف نسبت به خاک است. ۱/۰ درصد الیاف پلی‌پروپیلن حجم تقریباً زیادی بر مبنای وزن سبک خود دارد و این باعث می‌شود که به‌طور مناسب و همچون درصد‌های قبل در خاک پخش و توزیع نشود. به همین دلیل، نمی‌تواند به‌خوبی ذرات خاک را دربر گرفته و از ایجاد ترک‌های انقباضی به‌طور کامل جلوگیری کند. بررسی نرم‌افزاری سطح ترک‌های انقباضی مشاهده شده به سطح کل نمونه با نتایج مشاهده شده هم‌خوانی داشت؛ به این مفهوم که درصد سطح ترک‌ها به سطح کل، در نمونه‌های شکل ۹ (الف، ب، ج و د) به ترتیب برابر با ۲/۳۰، ۰/۹۹، ۰/۲۲ و ۰/۶۸ درصد بود.

نتایج مشاهده شده در نمونه‌های با الیاف، در حضور DCP نیز یکسان بودند. بدین معنا که در آستر رسی با ۰/۵ درصد الیاف و در حضور DCP، ترک‌های انقباضی رفتاری همانند حالت ۰/۵ درصد الیاف بدون افزودنی داشتند. شکل ۱۰ گویای این مسئله است.

همان‌گونه که در حالت الیاف ۰/۷۵ درصد، ترک‌های انقباضی به‌خوبی محو شدند و آستری رسی با ظاهری مناسب و منسجم به دست آمد، در حالت افزودنی دار نیز این درصد الیاف توانست ترک‌ها را به‌طور مناسبی محو نماید و سطحی عاری از ترک برای آستر رسی ارائه دهد. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که آستر رسی با حضور DCP نیز امکان محو و حذف ترک‌ها را داشته و حضور دی‌کلسیم فسفات نمی‌تواند تأثیر منفی بر حذف و بهبود ترک‌های انقباضی داشته باشد.

در جدول ۳، تأثیر افزودن دی‌کلسیم فسفات بر افزایش مقاومت برشی حداکثر خاک را می‌توان مشاهده کرد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف و DCP باعث افزایش مقاومت برشی حداکثر خاک می‌شود. افزون بر این، مشاهده تأثیر الیاف بر کاهش ترک خوردگی سطحی و عمقی آستر رسی نیز عامل بسیار مهمی است. چراکه این ترک‌ها اثر نامطلوب چشمگیری بر وضعیت مکانیکی و مقدار نفوذپذیری آستر دارند. همچنین باعث کاهش طول عمر و کارایی آستر رسی خواهند شد. یکی از اهداف مهم این پژوهش نیز یافتن درصدی از الیاف بود که هم‌قادر باشد ترک‌های سطحی و حتی عمقی آستر رسی را محو کند و هم نفوذپذیری را دستخوش تغییرات چشمگیری نکند. بنابراین نمونه‌های ساده و الیاف‌دار، با و بدون حضور افزودنی، از نظر میزان ترک خوردگی به‌طور کیفی بررسی شدند. مقدار ترک خوردگی نمونه‌ها در تصویر ۹ نشان داده شده است. نمونه ساده آستر، نخست ترک‌های مویی داشته که به مرور زمان و خشک شدن آن، ترک‌ها عمیق و گسترده شدند (شکل ۹، الف).

توجه به این نکته نیز ضروری است که نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش مقیاس بسیار کوچکی از آستر رسی را نشان می‌دهند و در واقعیت ابعاد آستر بسیار بزرگ‌تر است. در نتیجه ترک‌ها و شکاف‌ها نیز اندازه و عمق بسیار بیشتری خواهند داشت. بنابراین مقدار هدایت هیدرولیکی آستر در نتیجه جریان ترجیحی پس از اجرا به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با کاربرد ۰/۵ درصد الیاف، ترک‌های آستر به‌طور چشمگیری کاهش یافت. لیکن این ترک‌ها به‌طور کامل محو نشدند و همچنان ترک‌های مویی در آستر دیده می‌شد (شکل ۹، ب).

شکل ۹(ج) نشان می‌دهد که در نمونه‌ها با ۰/۷۵ درصد الیاف، ترک‌های انقباضی کاملاً محو شده و نمونه‌ای صاف و یکدست به دست آمده است. از یکپارچگی این نمونه می‌توان چنین نتیجه گرفت که این درصد الیاف قادر است ترک‌های عمقی را نیز به مقدار زیادی از بین ببرد.



ب



الف



د

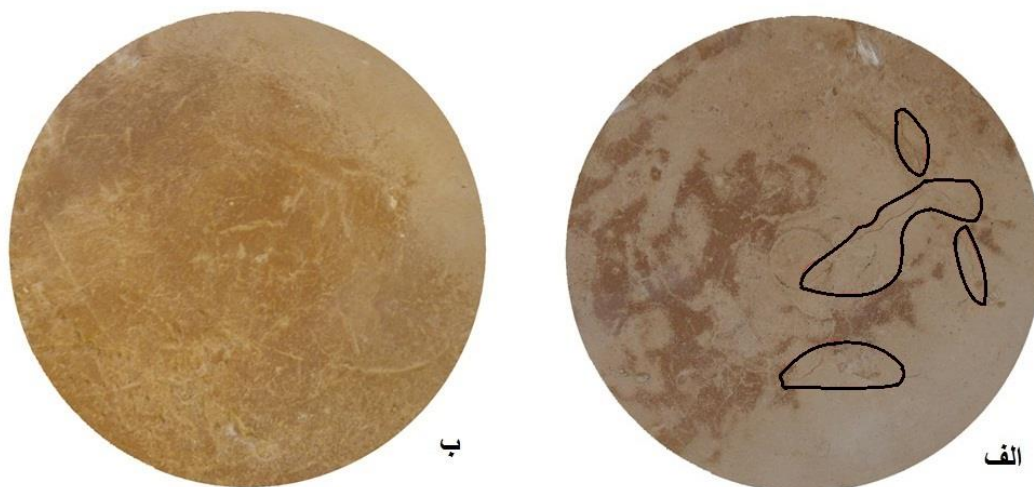


ج

شکل ۹. وضعیت ترک‌خوردگی آستر رسی ساده (الف)، آستر رسی با ۰/۵ درصد الیاف (ب)، آستر رسی با ۰/۷۵ درصد الیاف (ج) و آستر رسی با ۱/۰ درصد الیاف (د)

افزایش قابل توجه هدایت هیدرولیکی آستر در نتیجه جریان ترجیحی پس از اجرا باشند. در حالت کلی محو ترک‌های انقباضی با الیاف ۰/۷۵ درصد مشهودتر از حالت ۰/۵ درصد بود. بر پایه نتایج این پژوهش، محدوده مناسب برای استفاده از الیاف بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد تعیین شد. بررسی نرم‌افزاری سطح ترک‌ها به سطح کل نمونه نیز این نتیجه را تصدیق کرد. بدین ترتیب که در نمونه ارائه شده در شکل ۱۰ الف، این درصد برابر با ۰/۳۵ و در نمونه ارائه شده در شکل ۱۰ ب، حدود صفر درصد به دست آمد.

برای الیاف ۱/۰ درصد در حضور DCP نیز آستر رسی رفتار مشابهی نسبت به حالت بدون DCP در الیاف ۱/۰ درصد نشان داد. بنابراین با عبور از مقدار الیاف ۰/۷۵ درصد و استفاده از ۱/۰ درصد، باز هم ترک‌های کوچکی روی سطح آستر نمایان شد. تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که هدایت هیدرولیکی آستر رسی ساده از تمامی حالات الیاف‌دار کمتر است، لیکن مزیت استفاده از الیاف، کاهش ترک‌های انقباضی آستر است که خود می‌تواند عامل اصلی



شکل ۱۰. ترک خوردگی آستر رسی به همراه DCP با ۰/۵ درصد (الف) و ۰/۷۵ درصد (ب) الیاف

۴. نتیجه گیری

خاک‌های رسی متراکم به‌عنوان لایه مانع نشست و نفوذ مایعات در پوشش نهایی و آستر زیرین خاکچال‌ها به‌کار می‌روند. نفوذپذیری اندک این خاک‌ها مانع ورود آب ناشی از بارش به داخل محل دفن زباله و در نتیجه آن افزایش حجم شیرابه می‌شود. همچنین از خروج شیرابه و انتشار آن در محیط اطراف خاکچال نیز جلوگیری می‌کند. پس از اجرا و در مواجهه با چرخه خشک و تر شدن، ترک‌های انقباضی در آستر ایجاد می‌شود که باعث جریان ترجیحی^۴ مایعات شده و خاصیت آب‌بندی آستر را از میان می‌برد. شیرابه نفوذ یافته به دلیل داشتن آلاینده‌های بسیار، به عناصر محیط‌زیست اطراف خاکچال لطمات جبران‌ناپذیری وارد می‌کند. بنابراین در این پژوهش، کارایی آستر رسی بررسی شد که افزون بر سادگی و مقرون‌به‌صرفه بودن، پتانسیل ترک‌خوردگی کم، هدایت هیدرولیکی اندک و توانایی بیشتر در جذب آلاینده‌ها را داشته باشد. برای این منظور آستر رسی ساده با کاربرد الیاف پلی‌پروپیلن، مسلح و با دی‌کلسیم فسفات، بهسازی شد. نتایج نشان داد که بهینه‌ترین درصد الیاف برای محو ترک‌های انقباضی، افزایش مقاومت برشی و در نهایت عدم تغییر چشمگیر در ضریب نفوذپذیری آستر، ۰/۷۵ درصد وزنی خاک رس

است. ضریب نفوذپذیری نمونه‌های ساخته شده از آستر با ۰/۷۵ درصد الیاف به همراه دی‌کلسیم فسفات، در مقایسه با نمونه رسی ساده ۳ تا ۵ برابر بیشتر شده بود. لیکن مقدار آن در محدوده قابل قبول هدایت هیدرولیکی آسترهای رسی متراکم قرار داشت. از طرفی، مقاومت برشی را نیز تا حد مناسبی افزایش داد. در نهایت اینکه این درصد الیاف نسبت به دیگر درصدهای به کار برده شده در خاک رفتار مؤثرتری برای محو ترک‌خوردگی از خود نشان داد. در مورد استفاده از ماده افزودنی در کنار الیاف نیز باید گفت که افزودن دی‌کلسیم فسفات به آستر رسی برای کاهش و جذب آلودگی و تثبیت و جامدسازی فلزات سنگین، هیچ‌گونه اثر سوء و نامناسبی را برای آستر به همراه نداشت. بنابراین کاربرد آن به همراه الیاف برای ضریب نفوذپذیری، مقاومت برشی و محو ترک‌خوردگی مزاحمتی ایجاد نخواهد کرد.

یادداشت‌ها

1. Soil Classification System
2. Plexi glass
3. O'ring
4. Preferential flow

منابع

- Abdi, M.R., Parsapajouh, A. and Arjomand, M.A. 2008. Effects of random fiber inclusion on consolidation, hydraulic conductivity, swelling, shrinkage limit and desiccation cracking of clays, *International Journal of Civil Engineering*, 6(4): 284-292.
- ASTM D2434-68. 2006. Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080 / D3080M-11. 2011. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D698-12e1. 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- Daniel, D.E. 1993. *Geotechnical practice for waste disposal*. Springer US.
- Ekinci, A. and Ferreira, P.M.V. 2012. Effects of fibre reinforcement in the shrinkage behaviour of compacted clay. 3rd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering pp.455-461.
- Eskandari M., Homae, M., Mahmoodi, S. and Pazira, E. 2011. A New Landfill Siting Method Based on Land Classification Maps and GIS. *Environmental Sciences Journal* 11(2):121-132. [in Persian]
- Eskandari, M., Homae, M., Falamaki, A. 2016. Landfill site selection for municipal solid wastes in mountainous areas with landslide susceptibility. *Environmental Science and Pollution Research*, 23:pp.12423–12434.
- Eskandari, M., Homae, M. and Mahmodi, S. 2012. An integrated multi criteria approach for landfill siting in a conflicting environmental, economical and socio-cultural area. *Waste Management*, 32: 1528–1538.
- Eskandari, M., Homae, M., Mahmoodi, S., Pazira, E. and Van Genuchten, M. Th. 2015. Optimizing landfill site selection by using land classification maps. *Environmental Science and Pollution Research*, 22:7754–7765.
- Falamaki, A., Tavallali, H., Eskandari, M. and Moradi Estahbanati, M. 2013. Remediation of contaminated soils with cadmium and copper using dicalcium phosphate. *Journal of water and soil resources conservation*, 3(1):33-41. [in Persian]
- Falamaki, A., Tavallali, H., Eskandari, M. and Rezanejad Farahmand, Sh. 2016. Immobilizing some heavy metals by mixing contaminated soils and phosphate admixtures. *International Journal of Civil Engineering*, 14(2):75–81.
- Hariato Tri, Shigenori Hayashi, Yan-Jun Du, Daisuke Suetsugu. 2008. Effects of Fiber Additives on the Desiccation Crack Behavior of the Compacted Akaboku Soil as a Material for Landfill Cover Barrier. *Water Air Soil Pollut*, 194:141–149.
- Hariato Tri. 2014. Design criteria of soil-fiber mixtures as a material for landfill cover barrier system. *Lowland technology international*, 16(1): 1-8.
- He, J., Wang, Y., Li, Y. and Ruan, X. 2015. Effects of leachate infiltration and desiccation cracks on hydraulic conductivity of compacted clay. *Water Science and Engineering*, 8(2): 151-157.
- Kalkan, E. 2009. Influence of silica fume on the desiccation cracks of compacted clayey soils, *Applied Clay Science*, 43:296–302.
- Li, J.H., Li, L., Chen, R. and Li, D.Q. 2016. Cracking and vertical preferential flow through landfill clay liners. *Engineering Geology*, 206:33–41.
- Mignardi, S., Corami, A. and Ferrini, V. 2013. Immobilization of Co and Ni in mining-impacted soils using phosphate amendments. *Water Air Soil Pollut* pp.224:1447.
- Miller, C.J. and Rifai, S. 2004. Fiber reinforcement for waste containment soil liners. *ASCE Journal of Environmental Engineering*, 130(8):981–985.
- Paris Agreement, FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. UNFCCC secretariat. Retrieved 12 December 2015.
- Ping, T., Yong-chao, Z. and Zhen-miao, X. 2013. Immobilization of heavy metals in sludge using phosphoric acid and monobasic calcium phosphate. *J Zhejiang Univ Sci A*, 14(3):177–186.
- Ple, O. and Le, T.N.H. 2012. Effect of polypropylene fiber-reinforcement on the mechanical behavior of silty clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 32: 111–116.
- Roger, D. Spence, Caijun Shi. 2004. *Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes*. CRC Press, Boca Raton.

Safari, E., Jalili Ghazizade, M., Abduli, M.A. and Gatmiri, B. 2014. Variation of crack intensity factor in three compacted clay liners exposed to annual cycle of atmospheric conditions with and without geotextile Cover. *Waste Management*, 34:1408–1415.

USEPA, (2001) Geosynthetic Clay Liners Used in Municipal Solid Waste Landfills, Solid Waste and Emergency Response (5306w).

Yesiller, N., Miller, C.J, Inci, G. and Yaldo, K. 2000. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils. *Engineering Geology*, 57:105–121.

Archive of SID