

طراحی، ساخت و ارزیابی الکتروُد ژئوسینتتیک برای زهکشی به روش الکتروکینتیک

ثمر بهروزی‌نیا^۱، حجت احمدی^۲، نادر عباسی^۳ و اکبر عرب‌پورجوادی^۴

۱ و ۲- به ترتیب: دانشجوی دکترای سازه‌های آبی؛ و دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- استاد موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۴- استاد دانشکده مهندسی، دانشگاه Exeter، انگلستان

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۸/۲/۱۵

چکیده

زهکشی و بهبود پارامترهای مقاومتی خاک در اکثر پروژه‌های معدنی و ژئوتکنیکی اجتناب‌ناپذیر است. از این‌رو، الکتروکینتیک ژئوسینتتیک به‌عنوان یک فناوری بنیادین، قادر به افزایش پایداری و تثبیت خاک‌های ریزدانه است و از ترکیب عملکرد الکتروکینتیک و جریان الکترواسمز، به‌همراه کاربرد ژئوسینتتیک‌ها به‌دست می‌آید. در این پژوهش، برای ارتقا و بهبود فرآیند الکتروکینتیک ژئوسینتتیک، الکتروُدی بر پایه ژئوتکستایل و به روش پلیمریزاسیون شیمیایی ساخته شد. بدین منظور، الیاف نارسانای ورقه ژئوتکستایل با بهره‌گیری از پوشش‌دهی با پلیمر رسانی پیرو (با استفاده از دو نوع اکسیدان) و پلیمر رسانی آنیلین، به‌همراه افزودن چهار نوع نانو ذره متفاوت، به الیاف رسانی تبدیل گردید. برای ارزیابی کارایی الکتروُد ژئوسینتتیک، در مقایسه با الکتروُد مسی، مدلی فیزیکی طراحی و از رس کائولینیت اشباع پُر شد و تحت تاثیر فرآیند الکترواسمز زهکشی گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که پوشش‌دهی با پلیمر پیرو، تنها به‌صورت تشکیل لایه در اطراف الیاف ژئوتکستایل بود و انسدادی در تخلخل الیاف ایجاد نکرد. بنابراین، غشای مذکور پس از پوشش‌دهی، قابلیت همزمان به‌کارگیری به‌عنوان فیلتر و الکتروُد را داراست و پس از اتمام فرآیند الکتروکینتیک و بدون خارج‌سازی از محیط، می‌تواند به‌عنوان فیلتر در محیط خاکی باقی بماند. نتایج این بررسی همچنین نشان داد که در شرایط فرآیند الکترواسمز، الکتروُد ژئوسینتتیک با حداقل مقاومت اندازه‌گیری شده ۶۷۰ اهم در حداکثر فشار ۰/۰۸۳ (کیلوگرم نیرو بر سانتی‌مترمربع)، قادر به زهکشی ۴۳ میلی‌لیتر آب است که در مقایسه با الکتروُد مسی و شرایط مشابه، تنها ۱۴ درصد کاهش داشته است.

واژه‌های کلیدی

الکترواسمز، پیرو، فیلتر، نانو ذره

مقدمه

طراحی یک سیستم زهکشی است. زهکش‌ها در واقع مسیرهای کنترل‌شده‌ای برای جریان آب هستند که باعث کاهش فشار تراوش در سدهای خاکی، دامنه‌ها، سازه‌های نگه‌دارنده، راه‌ها، خاکریزهای واقع در سطح دامنه‌ها و تونل‌ها می‌شوند (Ghasemitabar *et al.*, 2016). زهکش‌ها را می‌توان بر مبنای شکل و

یکی از چالش‌های اساسی در پروژه‌های ژئوتکنیکی، روبه‌رو شدن با آب زیرزمینی است که باعث افزایش فشار آب حفره‌ای و تضعیف پارامترهای مقاومت برشی می‌شود و به کاهش ضریب اطمینان پایداری می‌انجامد. از راه‌حل‌های موثر، انتخاب و

کیلوپاسکال افزایش یافت. تقویت و تسلیح شیروانی‌های حاکی با هدف کاهش سریع فشار آب حفره‌ای و تحقق نکات زیست محیطی و نیز استفاده طولانی مدت از مصالح ژئوسینتتیک در شیب‌های حاکی برای فیلتراسیون و زهکشی مداوم، از دیگر کاربردهای مهم الکتروکینتیک ژئوسینتتیک است (Lamont-Black *et al.*, 2012; Jones *et al.*, 2014; Mumtaz & Girish, 2014; Lamont-Black *et al.*, 2016). لامونت- بلک و همکاران (Lamont-Black *et al.*, 2015) کاهش حجم زباله‌های هسته‌ای را با استفاده از کیسه‌های الکتروکینتیک ژئوسینتتیک، برای ذخیره کردن سریع و ارزان آنها عملی کردند. نتایج حاکی از آن است که کاهش حجم به دلیل آبیگری الکترواسمز در حدود ۵۵ تا ۷۵ درصد بیشتر است تا در روش آبیگری معمولی. تحکیم لجن سیال‌گونه، کاهش مقدار رطوبت و بهبود ظرفیت باربری تا ۷۰ کیلوپاسکال در ۳۶ روز (Zhuang *et al.*, 2014) و نیز افزایش مقاومت برشی خاک‌های رسی بسیار نرم تا بیش از ۵۰ کیلو پاسکال (Kaniraj & Yee, 2011) از دیگر هدف‌هایی بوده که تاکنون با فناوری الکتروکینتیک ژئوسینتتیک به سرانجام رسیده است.

بنا بر تحقیقات ملک‌زاده و همکاران (Malekzadeh *et al.*, 2016)، مصالح مبتکرانه‌ای که به‌عنوان الکتروکینتیک ژئوسینتتیک شناخته می‌شود، شامل پلیمر رسانایی است که محققان ابتدا آن را در سال ۱۹۹۰ در دانشگاه نیوکاسل ساختند. پلیمرهای رسانا به پلیمرهایی گفته می‌شود که مانند فلزات یا نیمه‌رساناها قادر به هدایت جریان الکتروسیسته هستند (Ferrero *et al.*, 2006). ایده استفاده از پلاستیک رسانای الکتروکینتیک به‌عنوان ماده

سطح مقطع به ورقه‌ای، ترانشه‌ای، مثلثی، چندوجهی و دایره‌ای تقسیم کرد. روش زهکشی، متناسب با نفوذپذیری و اندازه ذرات محیط متخلخل، به انواع نواری ژئوکامپوزیتی، سطحی، لوله‌های زهکش و سیستم زهکشی ژئودرین^۱ تقسیم می‌شود (Lazarte *et al.*, 2015). زهکشی به کمک جریان برق با استفاده از اعمال گرادیان الکتروکینتیک، از روش‌هایی است که سبب تسریع در عملیات فوق می‌شود.

در مهندسی ژئوتکنیک، از میان پدیده‌های الکتروکینتیک (الکترواسمز^۲، الکتروفورز^۳، پتانسیل ته‌نشینی^۴ و پتانسیل جریان^۵)، پدیده الکترواسمز اهمیت بیشتری دارد، زیرا این پدیده در خاک‌هایی با نفوذپذیری کم، حجم زیادی از آب را انتقال می‌دهد. در پدیده الکترواسمز تحت یک ولتاژ مستقیم (DC)، آب از الکتروود مثبت (آند) به سمت الکتروود منفی (کاتد) جریان می‌یابد (Mitchell & Soga, 2005). با پیشرفت‌های حاصل شده در روش الکترواسمز، استفاده از الکتروودهای با پوشش ژئوسینتتیک رسانا مبنای روش الکتروکینتیک ژئوسینتتیک^۶ (EKG) قرار گرفت و جایگزین الکتروودهای فلزی (از جنس مس، پلاتینیم، آلومینیم، آهن، نقره و تیتانیم) شد. هدف از این کار، رفع مشکل خوردگی شدید در آند، رفع مشکل افت ولتاژ شدید در محل الکتروودها و در نتیجه حصول حداکثر زهکشی با صرف حداقل انرژی الکتروکینتیک به منظور بهینه کردن شرایط آزمایش است.

بورژه- گستد و همکاران (Bourgès-Gastaud *et al.*, 2017) با به‌کارگیری فرآیند الکتروکینتیک ژئوسینتتیک، به زهکشی در جای مناطق در معرض باطله‌های نفتی پرداختند که در پی آن، مقاومت برشی از صفر کیلوپاسکال به مقدار متوسط ۲۵

1- Geodrain
3- Electrophoresis
5- Streaming Potential

2- Electroosmosis
4- Sedimentation Potential
6- Electrokinetic Geosynthetics (EKG)

سیم‌های فلزی برای توزیع بهتر جریان باشند. همیر و همکاران (Hamir *et al.*, 2001) مصالح ژئوسینتتیک با پانچ سوزنی، حاوی سیم مسی و نیز ژئوسینتتیک حاوی قطعه استیل ضد زنگ را برای اتصال به میدان الکتریکی معرفی کردند.

با توجه به کاربردهای وسیع فرآیند الکتروکینتیک ژئوسینتتیک و ساختار الکترودهای ژئوسینتتیکی رایج در تحقیقات، به‌کارگیری فیلتر همراه الکترودها امری است اجتناب‌ناپذیر تا از بسته شدن سوراخ‌های الکتروود و مهاجرت ذرات ریز خاک به داخل آن جلوگیری شود. از این‌رو، ساخت الکتروود ژئوسینتتیک رسانا با خوردگی کمتر از الکترودهای فلزی در میدان الکتریکی و قابلیت همزمان فیلترینگ، در به‌کارگیری فرآیند الکتروکینتیک راهگشاست که می‌توان پس از قطع میدان الکتریکی، از آن به‌عنوان فیلتر درجا استفاده کرد و نیازی به خارج‌سازی آن از محل وجود ندارد.

در این تحقیق، الکتروود ژئوسینتتیک رسانا از طریق پلیمریزاسیون شیمیایی و با الیاف ژئوتکستایل ساخته و عملکرد آن در میدان الکتریکی، و در مقایسه با الکتروود مسی به منظور زهکشی جریان، در مدل فیزیکی ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده

در این تحقیق از کائولینیت صنعتی تهیه شده از صنایع خاک چینی ایران و با جرم مخصوص ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب (در حالت خشک)، استفاده شد. آنالیز شیمیایی (تجزیه عنصری) و کانی‌شناسی این نوع محصول در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. برای حصول اطمینان از عملکرد مناسب فرآیند الکتروکینتیک و از حضور ترکیبات یونی در

اصلی برای حل کردن مشکل خوردگی الکتروود برای تحکیم الکترواسمز شکل گرفت. نمونه‌ای از EKG با میله‌های پلاستیکی رسانای الکتریکی دوخته شده روی ژئوتکستایل غیربافته ساخته شد. در ادامه، نمونه‌ای جدید از EKG شبیه زهکش عمودی پیش ساخته کلاسیک (PVD) تولید شد. دو برآمدگی به عرض ۶ میلی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر در هر دو طرف این نمونه وجود دارد که دو سیم مسی به قطر یک میلی‌متر در داخل آنها جاگذاری شده که هدف از آن توزیع بهتر جریان الکتریکی در داخل خاک و سهولت در سیم‌کشی است (Zhuang *et al.*, 2014). ژئوسینتتیک مورد استفاده در تحقیقات فوریه و جونز (Fourie & Jones, 2010)، ژئونت رسانای الکتریکی بود که از ترکیب ویژه کربن سیاه رسانای پخش شده در رزین پلی‌اتیلن با چگالی بالا به‌دست آمده است. شکل فیزیکی این الکترودها به‌صورت غیربافته و بدنه آن مشبک است. داخل این الکترودها مغزه‌ای از جنس مفتول است تا جریان را در کل بدنه یکسان پخش کند. کالومبا و همکاران (Kalumba *et al.*, 2009)، می‌گویند کربن داخل ترکیب الکتروکینتیک ژئوسینتتیک‌ها الکتروود را رسانا می‌سازد و به‌دلیل پوشش دادن آن، هیچ بقایای کربنی در خاک وجود ندارد. ریتیرانگ و همکاران (Rittirong *et al.*, 2008)، برای به‌کارگیری فرآیند الکتروکینتیک، از الکتروودی با ساختاری متشکل از پلیمر رسانای حاوی مغزی از فویل مسی استفاده کردند. بنابر تحقیقات جونز و همکاران (Jones *et al.*, 2008)، ژئوسینتتیک‌ها با جاسازی عناصر رسانای الکتریکی مانند پودر کربن سیاه و با استفاده از روش‌هایی مانند بافتن یا پانچ سوزنی ساخته می‌شوند و می‌توانند شکل مواد ژئوسینتتیک معمولی به‌خود گیرند یا به‌صورت دو یا سه‌بعدی و حاوی

محللول حفره‌ای، نمک کلرید سدیم به نمونه خاک کم (۲ یا کمتر از ۲ گرم نمک کلرید سدیم بر لیتر) اضافه شد. تجربیات علمی (Micic *et al.*, 2001; Eriksson, 2014) نشان داده است که کاربردهای موفقیت‌آمیز الکتروکینتیک در خاک‌های با شوری

حفره‌ای نمونه‌ها برابر ۱/۵ گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است و از این‌رو، نمک کلرید سدیم در آب حفره‌ای نمونه‌ها برابر ۱/۵ گرم بر لیتر در نظر گرفته شد.

جدول ۱- تجزیه عنصری خاک کائولینیت (صنایع خاک چینی ایران)

Table 1. Chemical analysis of the kaolinite (IRAN China Clay Industries)

Parameter	L.O.I*	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
(%)	8.5	65	22	0.75	0.04
Parameter	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₄
(%)	1.5	0.35	0.35	0.25	-

* Loss of Ignition

جدول ۲- آنالیز کانی‌شناسی خاک کائولینیت (صنایع خاک چینی ایران)

Table 2. Mineralogical analysis of the kaolinite (IRAN China Clay Industries)

Parameter	Kaolinite	Quartz	Calcite	Total Feldspar	Others
(%)	60	31	2.5	-	6.5

هیدرولیکی و مکانیکی مذکور، ضخامت قابل توجه آن (۴/۱ میلی‌متر) برای جلوگیری از انسداد زود هنگام در اثر به‌کارگیری در محیط خاکی است. با استفاده از پلیمر پیروول و آنیلین و با روشی مشابه روش ساتا و همکاران (Sata *et al.*, 1996)، فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی آغاز شد که تنها تفاوت عمده این روش با روش ساتا، در نوع غشای پایه است. به‌کارگیری این الیاف سبب شد تا بتوان علاوه بر فیلتراسیون، قابلیت رسانایی را نیز بدان اضافه کرد.

مشخصات الکترو

غشای پایه

برای ساخت غشای مورد نظر، ژئوتکستایل (یکی از انواع محصولات ژئوسینتتیک) از جنس پلی‌پروپیلن و بافت با پانچ سوزنی، بر مبنای مشخصات فنی ارائه شده در جدول ۳، از کارخانه سفید بافت خراسان تهیه و بدون ایجاد هرگونه تغییری در وضعیت قرارگیری الیاف و با حفظ بافت و ساختار اولیه، به‌کار گرفته شد.

دلیل انتخاب این نوع الیاف، علاوه بر مشخصات

جدول ۳- مشخصات فنی ژئوتکستایل (از شرکت سفید بافت خراسان)

Table 3. Technical specification of geotextile (Sefidbaft Khorasan Company)

Specification	Examination Method	Unit	Examination Result
Unit weight	ASTM D5261	g · m ⁻²	400
Thickness	ASTM D5199	mm	4.1
Punctured strength	ASTM D4833	N	908
Resistance in front of UV	ASTM D4355	%	90 <
Width traction	ASTM D29073	KN · m ⁻¹	18.2
Length traction	ASTM D29073	KN · m ⁻¹	48
Permeability	ASTM D4491	Cm · sec	0.32

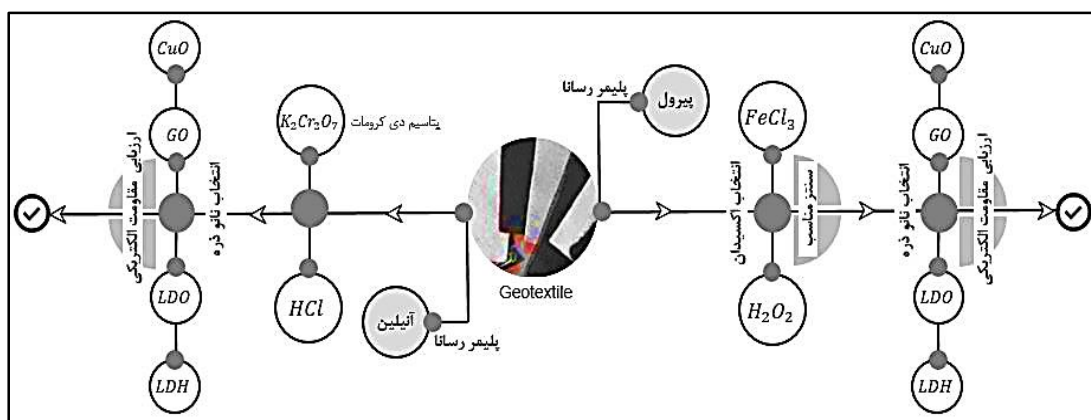
پلیمرهای رسانای مورد استفاده

از بین پلیمرهای رسانا که طی سال‌های گذشته به کار گرفته شده‌اند، پلی‌پیرول، پلی‌آنیلین و مشتقات آنها بیشتر مورد توجه‌اند (Ferrero *et al.*, 2006). بنابراین، از پلیمر پیرول با فرمول مولکولی C_4H_5N ، جرم مولی $67/09$ گرم بر مول، چگالی $0/967$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، نقطه ذوب و نقطه جوش به ترتیب $23-$ و 129 درجه سلسیوس و همچنین پلیمر آنیلین با فرمول مولکولی $C_6H_5NH_2$ ، جرم مولی $93/13$ گرم بر مول، چگالی $1/02$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، نقطه ذوب و نقطه جوش به ترتیب $6/2-$ و $184/13$ درجه سلسیوس برای ساخت الکتروودهای رسانا استفاده شد.

فرآیند ساخت الکتروود

الکتروود ژئوسینتتیک، مطابق شکل ۲، بر پایه محصول ژئوتکستایل انتخابی و با به‌کارگیری پلیمرهای رسانای پیرول و آنیلین در آزمایشگاه مکانیک خاک موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی (کرج) ساخته شد. در این حالت، غشای ژئوتکستایل توسط پلیمرهای تعیین شده و با اکسیدان‌های مناسب، تحت پلیمریزاسیون شیمیایی

درجا قرار گرفت. در این تحقیق، برای پلیمریزاسیون شیمیایی، از اکسیدکننده‌های آهن (III) کلرید، هیدروژن پراکسید و پتاسیم دی کرومات استفاده شد. از آنجایی که فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی اکسایشی معمولاً با تغییر رنگ قابل رویت محلول پلیمریزاسیون همراه است (Malinauskas, 2001)، با پیشروی فرآیند پلیمریزاسیون، رنگ محلول از بی‌رنگی به آبی تیره یا سبز کدر تغییر یافت که با کامل شدن پلیمریزاسیون، پلیمر پلی‌پیرول به رنگ سیاه درآمد. در انتها، چهار نانو ذره اکسید مس، اکسید گرافن، LDO^1 و LDH^2 با قطر متوسط $40-60$ نانومتر و محصول شرکت نانو تک هند^۳ مطابق شکل ۱، به پلیمر رسانا اضافه شد. علت انتخاب نانو ذرات مذکور، توانایی آنها در افزایش رسانایی الکتریکی و جذب آلودگی احتمالی شیرابه‌های عبوری از الکترودهاست. در نتیجه، بر اساس ارزیابی این فرآیند بر مبنای تغییر رنگ رخ داده شده و نیز اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی الکتروودهای ساخته شده، پلیمر برتر و غشای نهایی انتخاب شد.

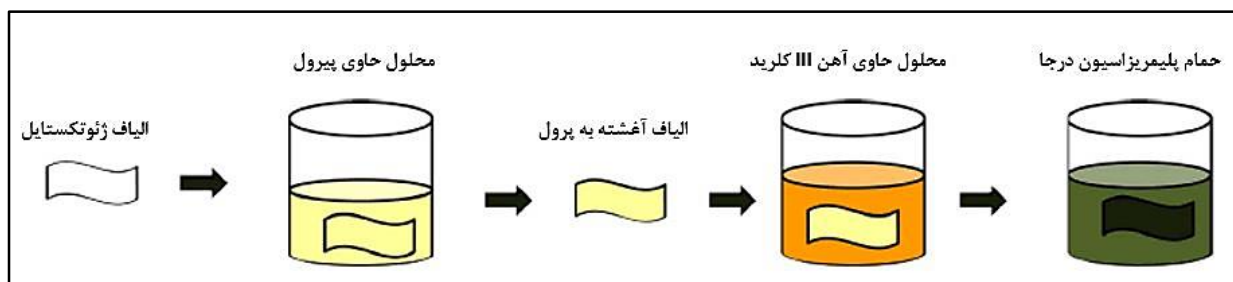


شکل ۱- روندنمای ساخت الکتروود ژئوسینتتیک بر مبنای پلیمریزاسیون شیمیایی

Fig. 1. Flowchart of fabrication geosynthetic electrode based on chemical polymerization

آهن (III) کلرید فرو برده شد. در این حالت، پس از خارج کردن غشا از پیرول، با فرصت داده شده، محلول اضافی موجود روی سطح غشا از آن جدا شد و در نهایت الیاف پوشش داده شده، به منظور خارج سازی مواد اضافی، با آب مقطر شسته و در دمای اتاق خشک گردید.

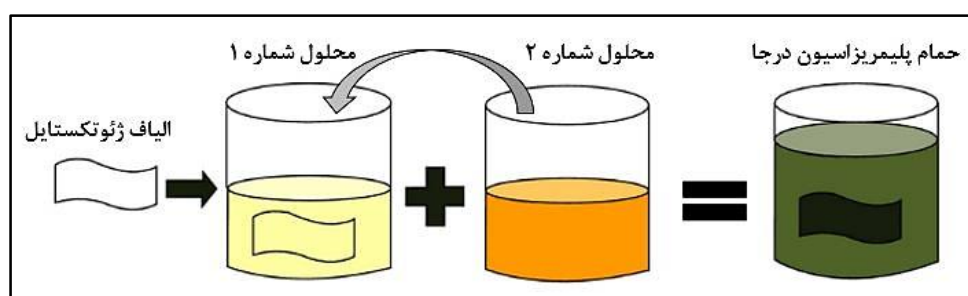
مراحل پلیمریزاسیون شیمیایی پلیمر پیرول، در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق این روند، غشای پایه به مدت حداقل ۴۰ ساعت در داخل محلول پیرول غوطه ور شد. پس از طی شدن مدت زمان لازم، غشا از محلول پیرول بیرون آورده و در داخل محلول



شکل ۲- پلیمریزاسیون شیمیایی در جای پلیمر رسانای پیرول
Fig. 2. In-situ chemical polymerization of conductive pyrrole polymer

محلول شماره ۱ غوطه ور و پس از آن محلول شماره ۲ به تدریج به آن اضافه گردید و به مدت ۳ ساعت در دستگاه شیکر برای ایجاد واکنش قرار داده شد (Pirsa *et al.*, 2013). پس از اتمام واکنش، الیاف از داخل محلول خارج و با آب مقطر شسته شدند.

برای پوشش دهی ژئوتکستایل با پلیمر رسانای آنیلین، از دو نوع محلول استفاده شد: محلول شماره ۱ حاوی پلیمر آنیلین و آب مقطر و محلول شماره ۲ حاوی هیدروکلریک اسید (HCL) و پتاسیم دی کرومات ($K_2Cr_2O_7$) به عنوان اکسیدان و آغازگر واکنش. ژئوتکستایل مطابق شکل ۳ در



شکل ۳- پلیمریزاسیون شیمیایی در جای پلیمر رسانای آنیلین
Fig. 3. In-situ chemical polymerization of conductive aniline polymer

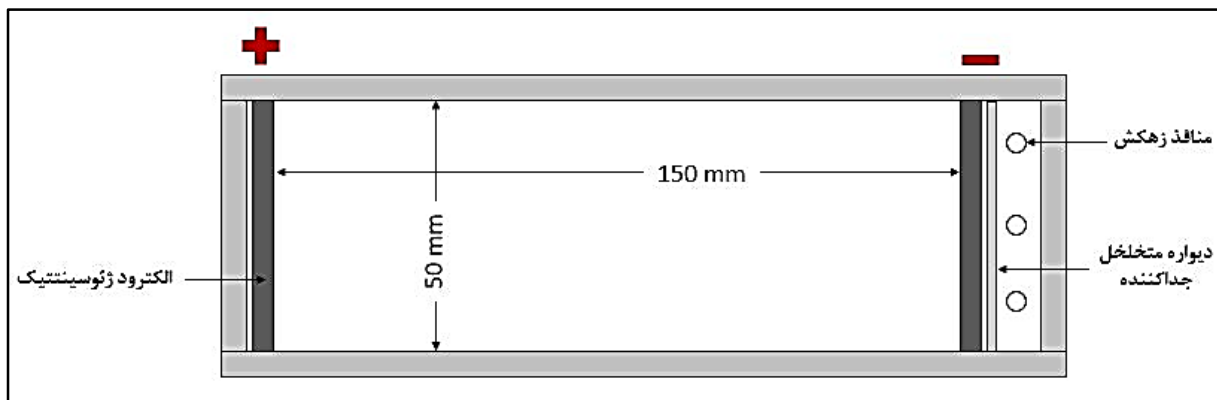
خارج کردن آب در حد فاصل الکترودهای کار گذاشته شده در محیط خاک بود. از سوی دیگر، این نوع سامانه آزمایشگاهی، برای بررسی در شرایط

مدل آزمایشگاهی در این تحقیق، انتشار جانبی (عرضی) مد نظر قرار نگرفت زیرا هدف اصلی این تحقیق، زهکشی و

مقایسه با مقطع طولی (۱۸×۵ سانتی‌متر) مدل، جریان یک بعدی را تقریباً در آن حاکم می‌کند. با توجه به محدودیت‌های فنی و بهره‌برداری، مقطع طولی مدل به صورت مستطیل طراحی شد. به دلیل ساختار متخلخل الکتروود، نیازی به استقرار مجدد فیلتر در مجاورت الکتروودها وجود ندارد و پایه ژئوتکستایل به کار گرفته شده، قابلیت فیلتراسیون و جلوگیری از ورود ذرات خاک به درون زهکش را دارد.

خاک اشباع و نیمه اشباع، بدون استفاده از مخازن الکتروولیت طراحی گردید. مطابق شکل ۴، این مدل از جنس پلکسی گلاس به ضخامت ۵ میلی‌متر و دارای یک محفظه به شکل مکعب مستطیل به ابعاد داخلی ۱۸×۵×۵ سانتی‌متر ساخته شد و خاک مورد نظر در این محفظه و به طول ۱۵ سانتی‌متر در میان دو عدد الکتروود ژئوسینتتیک رسانا متراکم شد (Yousefi-Kebria *et al.*, 2009).

مقطع عرضی کوچک (۵×۵ سانتی‌متر)، در



شکل ۴- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

Fig. 4. The experimental apparatus used in this study

رطوبت مذکور به تدریج به خاک خشک اضافه و به صورت مداوم هم زده شد تا کاملاً یکنواخت شود. در پایان مراحل فوق، مخلوط تهیه شده به صورت لایه‌ای در مدل ریخته و متراکم شد تا از این طریق، از ورود هوا به داخل نمونه جلوگیری شود. برای اتصال بهتر لایه‌ها به یکدیگر، روی هر لایه و قبل از قرارگیری لایه فوقانی، شیارهایی به صورت عمود بر هم ایجاد شد تا لایه‌ها پس از برخورد ضربات به طور کامل در هم فرو روند و در یکدیگر ادغام شوند. برای زهکشی نمونه به روش الکترواسمز، میدان الکتریکی از نوع ولتاژ ثابت (جریان مستقیم) و از طریق منبع تغذیه به نمونه اعمال شد. مناسب‌ترین اختلاف پتانسیل، کمتر از یک ولت در هر سانتی‌متر طول

برنامه آزمایش‌ها برای ارزیابی الکتروود

پس از آماده‌سازی مدل آزمایشگاهی، مقدار کاتولینیت مورد نیاز با توجه به ابعاد مخزن (۱۸×۵×۵ سانتی‌متر) و جرم مخصوص خشک خاک محاسبه و با درصد رطوبت مشخص (۴۸ درصد معادل ۱/۷ برابر رطوبت حالت اشباع) حاوی شوری مصنوعی (۱/۵ گرم سدیم کلرید بر لیتر) درون مخزن مدل بازسازی شد. به دلیل زهکشی در طول فرآیند الکترواسمز، لازم است درصد رطوبت اولیه بیش از درصد رطوبت اشباع در نظر گرفته شود و گرنه نمونه‌ها خیلی سریع از حالت اشباع خارج می‌شوند و در ساعات اولیه، ترک در آن ایجاد می‌گردد (Shahsavand *et al.*, 2013).

ژئوتکستایل در دو سمت دیواره‌های جانبی مدل برای اعمال میدان الکتریکی در مجاورت خاک قرار داده شد و آزمایش تا زمانی ادامه یافت که جریان خروجی از زهکش جانبی صفر شود.

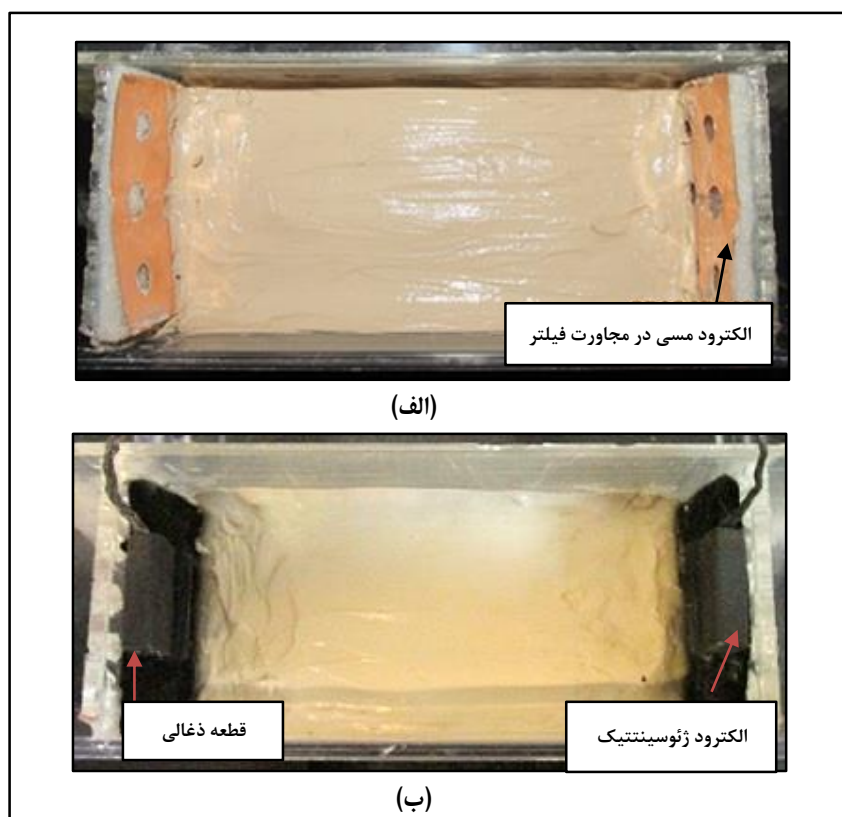
- آزمایش سوم (شکل ۵-ب): الکترود رسانای ساخته شده با پلیمرهای رسانا به‌عنوان قطب مثبت و منفی در مجاورت خاک قرار داده شد. در این حالت، به‌سبب ساختار متخلخل الکترود، نیازی به جاگذاری فیلتری مجزا به‌همراه الکترود نبود.

برای بررسی کارایی الکترود، میزان جریان خروجی از نمونه در اثر فرآیند الکترواسمز طی زمان ثبت گردید. گفتنی است برای اتصال الکترود ژئوسینتتیک به میدان الکتریکی، از قطعات زغالی استفاده شد.

نمونه خاک است (Gray, 1970). از این رو، در این پژوهش نیز سعی شد که همین گرادیان ولتاژ در طول نمونه برقرار گردد. سه نوع آزمایش مجزا با دو تکرار، برای ارزیابی الکترود ساخته شده در فرآیند زهکشی به روش الکترواسمز برنامه‌ریزی گردید که هر یک به‌صورت مجزا در زیر ارائه شده است.

- آزمایش اول (آزمایش کنترل): در این آزمایش، نمونه بازسازی شده رس کائولینیت به‌مدت سه روز بدون جاگذاری الکترود در داخل مخزن باقی ماند تا از این طریق بتوان میزان جریان خروجی تحت تاثیر نیروی ثقل را اندازه گرفت.

- آزمایش دوم (شکل ۵-الف): در این آزمایش، پس از آماده‌سازی نمونه در داخل مخزن، الکترود مسی با مقاومت ویژه الکتریکی $10^{-8} \times 68$ اهم‌متر به ابعاد 5×7 سانتی‌متر، به‌همراه فیلترهایی از جنس



شکل ۵- زهکشی به روش الکترواسمز: الف) آزمایش دوم: به‌کارگیری الکترود مسی و ب) آزمایش سوم: به‌کارگیری الکترود ژئوسینتتیک

Fig. 5. Drainage by electrokinetic method: a) Second experiment: Application of copper electrode, b) Third experiment: Application of geosynthetic electrode

نتایج و بحث

اثر پلیمر رسانای پیروول در پلیمریزاسیون

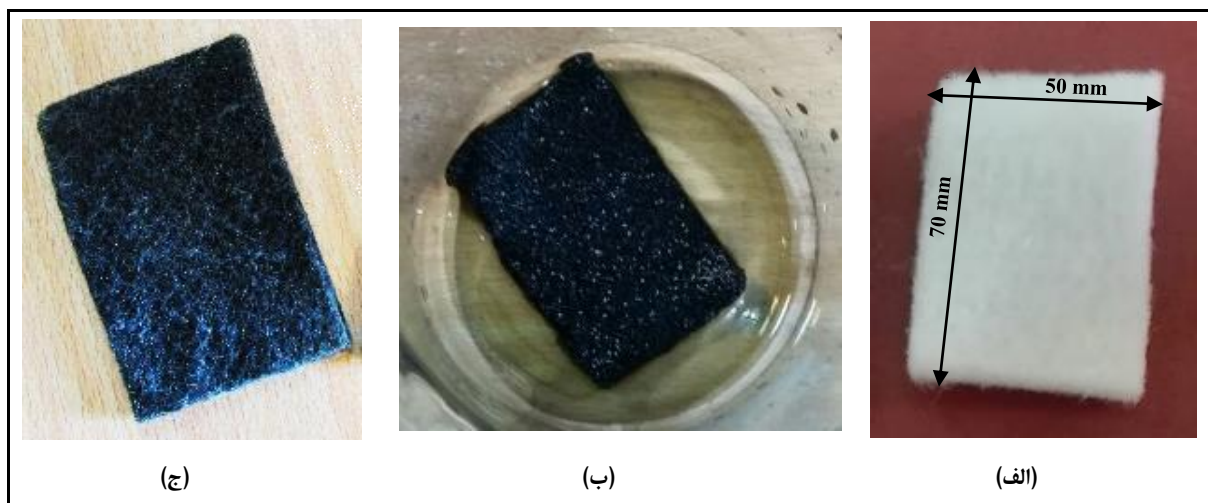
شیمیایی ژئوتکستایل

نتایج پوشش‌دهی الیاف ورقه ژئوتکستایل با پلیمر رسانای پیروول و با استفاده از اکسیدان آهن (III) کلرید در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل، ژئوتکستایل اولیه با ابعاد 7×5 سانتی‌متر برای قرارگیری در مدل آماده شد. با جذب محلول پیروول و اضافه کردن اکسیدان آهن (III) کلرید، واکنش پلیمریزاسیون آغاز شد. با گذشت ۲۴ ساعت و تغییر رنگ محلول (مشکی شدن آن)،

واکنش به اتمام رسید.

غشای تهیه شده با آب مقطر شسته و در هوای آزاد قرار داده شد تا به‌طور کامل خشک شود. مطابق شکل ۶، رنگ محلول از بی‌رنگ به مشکی کاملاً یکنواخت تغییر کرد و حاکی از تکمیل فرآیند پوشش‌دهی با پلیمر پیروول است.

در مرحله بعد، به‌جای به‌کارگیری اکسیدان آهن (III) کلرید، از اکسیدان هیدروژن پراکسید (H_2O_2) سه درصد (شکل ۷) استفاده شد با این تفاوت که در این حالت، از کلریک اسید (HCL) نیز برای فعال‌سازی واکنش استفاده شد.



شکل ۶- مراحل پلیمریزاسیون شیمیایی با پلیمر پیروول و اکسیدان آهن (III) کلرید: الف) نمونه ژئوتکستایل اولیه، ب) ژئوتکستایل در انتهای فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی و ج) ژئوتکستایل پوشش داده شده پس از شستشو با آب مقطر و خشک شدن

Fig. 6. Chemical polymerization steps with pyrrole polymer and Fe (III) chloride polymer:
a) Primary geotextile sample, b) Geotextile at the end of chemical polymerization process, c) Geotextile coated after washing with distilled water and drying



شکل ۷- پلیمریزاسیون شیمیایی الیاف ژئوتکستایل با پلیمر پیرول و اکسیدان هیدروژن پراکسید

Fig. 7. Chemical polymerization of geotextile fibers with pyrrole polymer and hydrogen peroxide oxidant

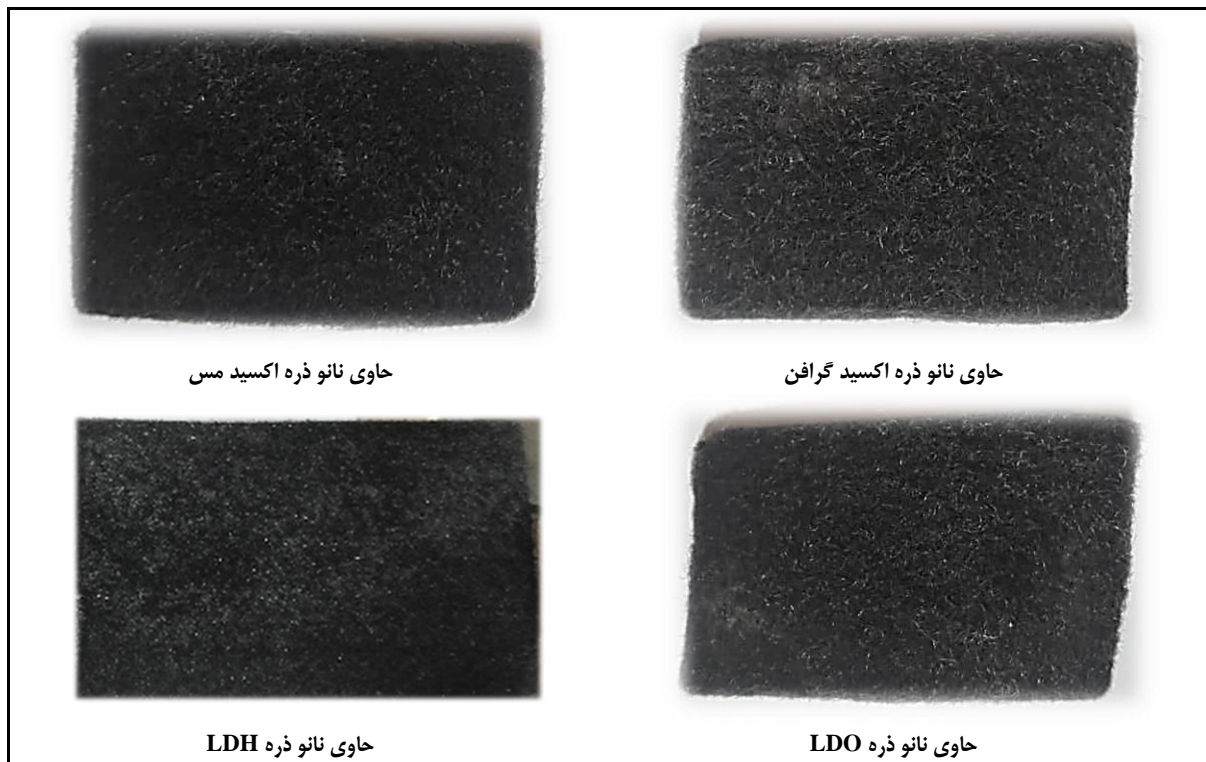
برابر شکل ۷، همان‌طور که از رنگ ظاهری غشای پایه مشخص است، اکسیدان به‌کار گرفته شده نتوانسته واکنش پلیمریزاسیون را به‌خوبی فعال کند. در نتیجه، فرآیند پلیمریزاسیون چندان موفقیت‌آمیز نبوده است و بدین ترتیب اکسیدان هیدروژن پراکسید قابلیت استفاده در سایر مراحل ساخت الکتروود را نخواهد داشت.

برای افزایش قابلیت رسانایی ژئوتکستایل، از چهار نانو ذره اکسید مس، اکسید گرافن، LDO و LDH با غلظت ۰.۰۰۵ گرم بر میلی‌لیتر برابر شکل ۷، همان‌طور که از رنگ ظاهری غشای پایه مشخص است، اکسیدان به‌کار گرفته شده نتوانسته واکنش پلیمریزاسیون را به‌خوبی فعال کند. در نتیجه، فرآیند پلیمریزاسیون چندان موفقیت‌آمیز نبوده است و بدین ترتیب اکسیدان هیدروژن پراکسید قابلیت استفاده در سایر مراحل ساخت الکتروود را نخواهد داشت.

برای افزایش قابلیت رسانایی ژئوتکستایل، از چهار نانو ذره اکسید مس، اکسید گرافن، LDO و LDH با غلظت ۰.۰۰۵ گرم بر میلی‌لیتر

Barari-Gangaraj *et al.*, 2014) و به‌طور هم‌زمان با لایه‌نشانی پلیمر استفاده شد. با مقایسه نتایج حاصل از پلیمریزاسیون توسط پلیمر پیرول و با استفاده از اکسیدان‌های آهن (III) کلرید و هیدروژن پراکسید (به ترتیب شکل ۶ و ۷)، مشخص شد که بهترین اکسیدان، آهن (III) کلرید است. در نتیجه، کاربرد چهار نانو ذره مذکور با ترکیب پیرول و آهن (III) کلرید ارزیابی شد که نتایج نهایی آن در شکل ۸ نشان داده شده است.

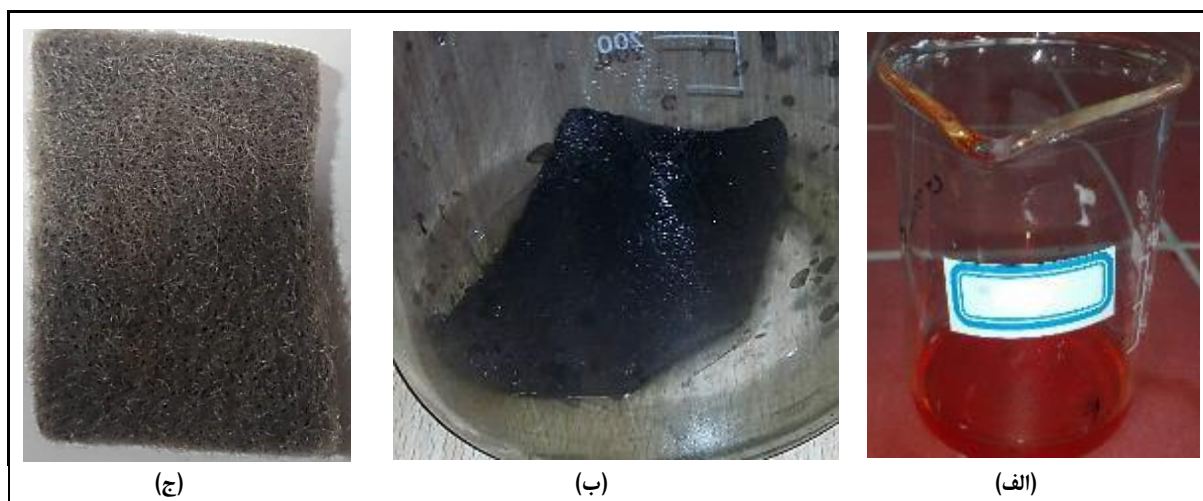
برای افزایش قابلیت رسانایی ژئوتکستایل، از چهار نانو ذره اکسید مس، اکسید گرافن، LDO و LDH با غلظت ۰.۰۰۵ گرم بر میلی‌لیتر



شکل ۸- پلیمریزاسیون شیمیایی الیاف ژئوتکستایل بر اثر افزودن چهار نوع نانو ذره به پلیمر پیرول
Fig. 8. Chemical polymerization of geotextile fibers by the addition of four types of nanoparticles to pyrrole polymer

فاحشی در نمونه دیده می‌شود که حاکی از دشواری پلیمریزاسیون شیمیایی پلیمر آنیلین نسبت به پیرول است. پلیمر آنیلین، به دلیل شکل نگرفتن واکنش‌ها، به راحتی بر اثر سایش از غشا جدا می‌شود. برای ارزیابی تاثیر نانو ذرات بر فرآیند پلیمریزاسیون، چهار نانو ذره‌ای که در ارتباط با پیرول به کار گرفته شد در این قسمت نیز وارد محلول گردید که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

اثر پلیمر رسانای آنیلین در پلیمریزاسیون شیمیایی ژئوتکستایل نتایج پوشش‌دهی الیاف ژئوتکستایل با پلیمر رسانای آنیلین در شکل ۹ نشان داده شده است؛ تبدیل شدن رنگ الیاف در انتهای واکنش به مشکی این احتمال را می‌دهد که پوشش‌دهی الیاف با موفقیت همراه باشد. منتها، پس از شستن نمونه با آب مقطر، مشاهده می‌شود که حجم زیادی از محلول با شستشو از غشا خارج شده و تغییر رنگ



شکل ۹- مراحل پلیمریزاسیون شیمیایی با پلیمر آنیلین: الف) محلول پتاسیم دی کرومات و کلریک اسید، ب) انتهای فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی، ج) ژئوتکستایل پوشش داده شده پس از شستشو با آب مقطر و خشک شدن

Fig. 9. Chemical polymerization steps with aniline polymer: a) Potassium dichromate and chloric acid solution, b) End of chemical polymerization process, c) Geotextile coated after washing with distilled water and drying



شکل ۱۰- پلیمریزاسیون شیمیایی الیاف ژئوتکستایل بر اثر افزودن چهار نوع نانو ذره به پلیمر آنیلین

Fig. 10. Chemical polymerization of geotextile fibers by the addition of four types of nanoparticles to aniline polymer

پلیمریزاسیون شیمیایی و در حین عملیات شستشو خارج می‌شود همچنان بسیار زیاد است. بدین معنا

نتایج ظاهری نشان می‌دهد با به‌کارگیری نانو ذرات مذکور، حجم پلیمری که پس از پایان فرآیند

و پس از آن مقاومت الکتریکی (R) اندازه گرفته شد (شکل ۱۱). مقاومت صفحه‌ای (R_s) دوعدی ($x-y$) را می‌توان برای غشاهای نازک که از لحاظ الکتریکی یکنواخت هستند، مطابق رابطه ۱ تعیین کرد. گفتنی است که جریان الکتریکی باید در امتداد صفحه و نه عمود بر آن وجود داشته باشد. یکای مقاومت صفحه‌ای بر حسب $k\Omega$ بیان می‌شود، ولی در این استاندارد باید یکای $k\Omega/sq$ را نشان دهد (Anon, 2015).

$$R_s = R / \left(\frac{L}{W} \right) \quad (1)$$

که در آن، L = فاصله بین الکترودهای موازی و W = طول الکترودهاست. نسبت $\left(\frac{L}{W} \right)$ بیانگر تعداد مربع‌های نمونه غشاست.

مطابق شکل ۱۱، حداقل مقاومت در زمان اعمال حداکثر فشار حاصل شد و با افزایش فشار وارد شده، مقاومت غشا کاهش یافت. بنابراین، حداقل مقاومت اندازه‌گیری شده و حداقل مقاومت صفحه‌ای ژئوتکستایل پوشش داده شده با پلیمر پیرو (حاوی نانو ذره اکسید مس) در حداکثر فشار 0.083 کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع به ترتیب 0.67 کیلوهم و $2/55$ کیلوهم/مربع بود.

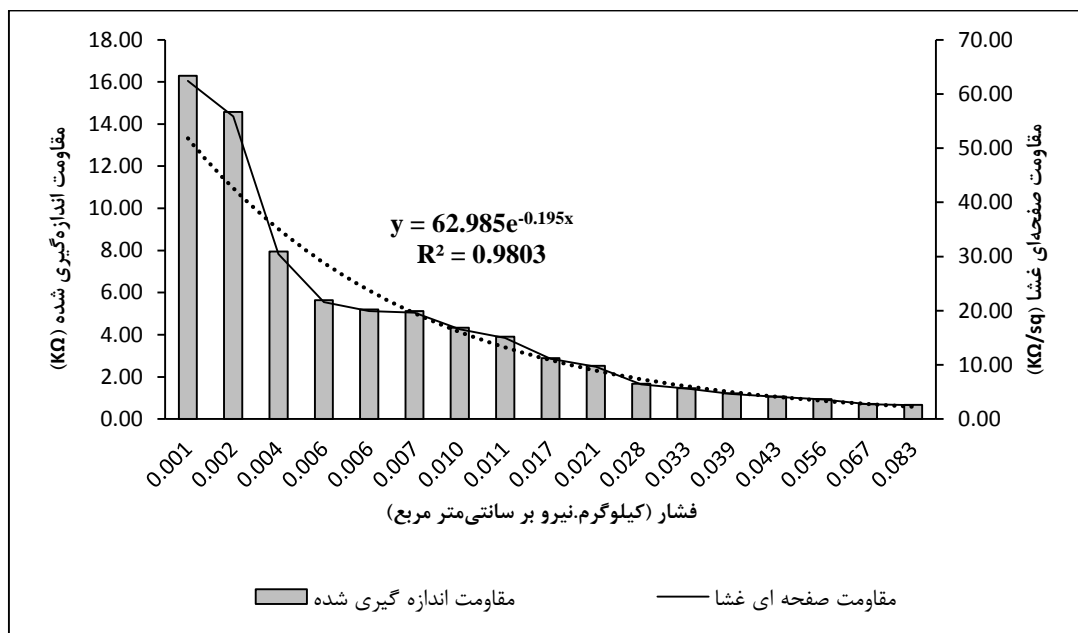
گفتنی است که در ارتباط با سایر غشاهای پوشش داده شده با پلیمر پیرو (حاوی نانو ذرات اکسید گرافن، LDO و LDH) و اکسیدان آهن (III) کلرید، به دلیل ناهمگنی در پوشش‌دهی و دارا بودن مقاومتی بیش از ترکیب مذکور، به جزئیات میزان مقاومت الکتریکی غشا اشاره نمی‌شود و در ادامه کار نیز از غشای حاوی نانو ذره اکسید مس استفاده خواهد شد.

که به کارگیری نانو ذرات در فرآیند پلیمریزاسیون شیمیایی، در مقایسه با پلیمر رسانای پیرو، چندان موثر نبوده است.

تعیین مقاومت الکتریکی الیاف پوشش داده شده با پلیمر رسانا

با جمع‌بندی نتایج به دست آمده از پلیمریزاسیون شیمیایی روی الیاف غیررسانای ژئوتکستایل، می‌توان بهترین ترکیب برای ساخت الکتروُد را به دست آورد. پلیمر رسانای پیرو حاوی نانو ذرات اکسید مس به همراه اکسیدان آهن (III) کلرید، توانست پوشش‌دهی چشمگیری را در الیاف غیررسانای ژئوتکستایل ایجاد کند. از این‌رو، مقاومت الکتریکی این نوع ترکیب اندازه‌گیری شد.

مقاومت الکتریکی الیاف پوشش داده نشده بسیار بالاست و با مولتی‌متر قابل اندازه‌گیری نیست. از این‌رو بر پایه مراجع (Bajaj et al., 2000)، مقاومت الکتریکی الیاف پلی‌پروپیلن در حدود 10^{16} اهم در نظر گرفته می‌شود. به منظور اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ژئوتکستایل رسانا شده، از استاندارد AATCC76¹ استفاده شد که مختص تعیین مقاومت الکتریکی بسترهای پارچه‌ای است. بدین منظور دو الکتروُد ورقه‌ای مسی مستطیل شکل به ابعاد 3×2 سانتی‌متر ساخته و در فاصله دو سانتی‌متری از یکدیگر قرار داده شد و از طریق سیم‌های مسی به سنسورهای مولتی‌متر متصل گردید. الکترودهای مذکور روی غشای رسانا شده به ابعاد 6×3 سانتی‌متر قرار داده شدند و از آنجا که فشار روی میزان رسانایی الیاف پوشش داده شده موثر است، با استفاده از وزنه‌های متعدد، فشارهای متفاوتی بر حسب کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع به سطح لایه‌ها اعمال شد (Hakansson et al., 2004).

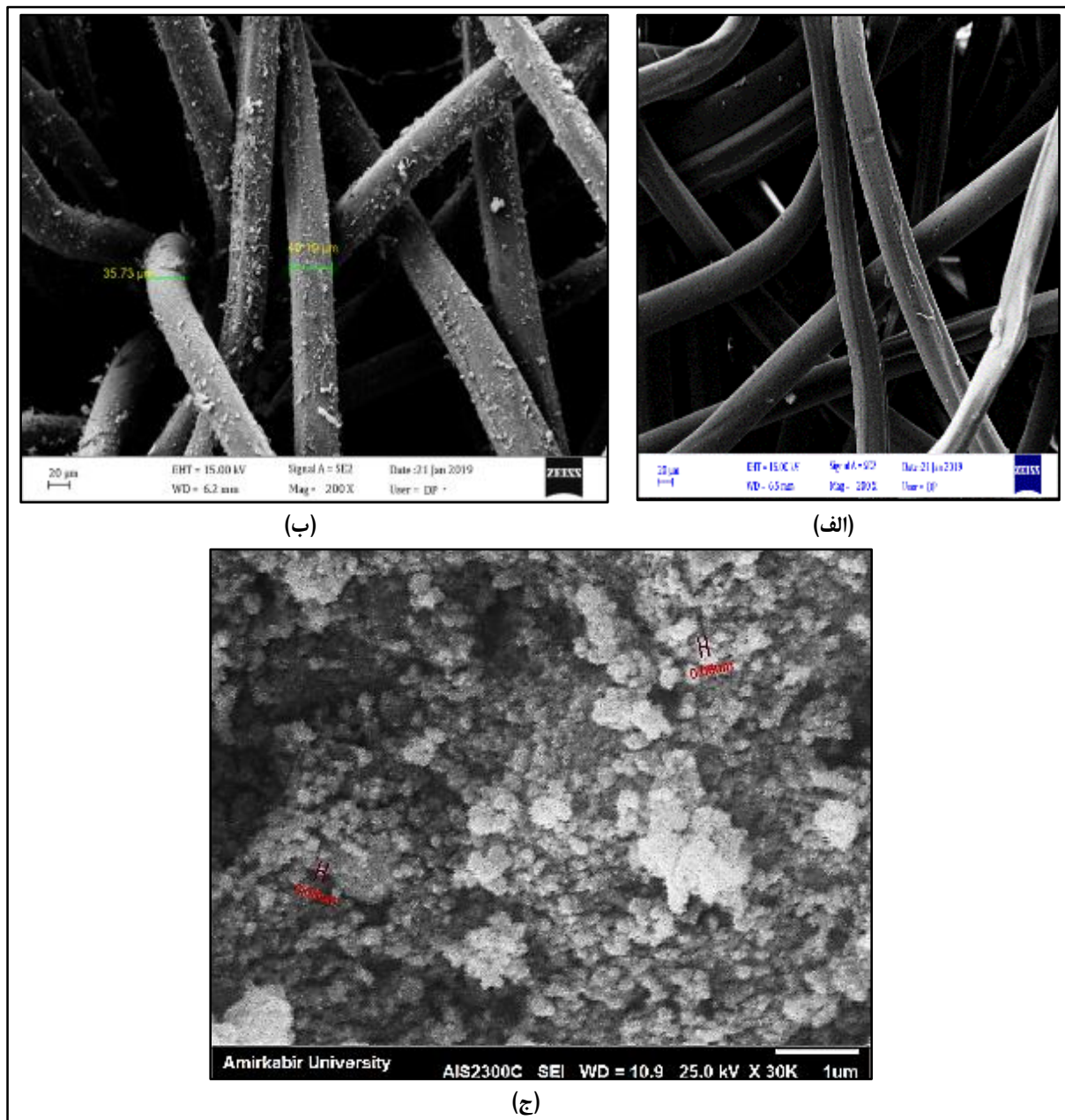


شکل ۱۱- مقاومت اندازه گیری شده و مقاومت صفحه ای الکترود ساخته شده در فشارهای متفاوت

Fig. 11. Measured resistance and surface resistance of fabricated electrode in different pressures

بررسی تصویرهای SEM الیاف ژئوتکستایل پوشش داده شده نشان می‌دهد که طی پلیمریزاسیون شیمیایی، لایه‌ای سیاه رنگ از پیرول همراه با توده‌ای تجمعی، روی سطح الیاف تشکیل می‌شود. یادآوری می‌گردد که پلیمریزاسیون با اکسایش مونومر آغاز و نهایتاً پلیمر انحلال ناپذیر روی الیاف و نیز در محلول به صورت توده ایجاد می‌شود.

ارزیابی تصویرهای SEM نانو ذره اکسید مس، الیاف خام و پوشش داده شده با پیرول تصویرهای SEM نانو ذره مس، الیاف خام و الیاف پوشش داده شده با پیرول حاوی نانو ذره اکسید مس در شکل ۱۲ نشان داده شده است. قطر نانو ذرات اکسید مس ۶۰ نانومتر است و بر اساس نتایج تحقیقات، قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر جزء ذرات با ابعاد نانو محسوب می‌شود و می‌توان از خصوصیات آنها در تحقیقات استفاده کرد.



شکل ۱۲- تصویرهای SEM: (الف) الیاف پوشش داده نشده ژئوتکستایل، (ب) الیاف پوشش داده شده ژئوتکستایل با پیرول، (ج) نانو ذرات اکسید مس

Fig. 12. Scanning electron micrographs a) Uncoated geotextile fiber, b) Geotextile coated fiber by pyrrole, c) Copper oxide nanoparticles

نیز دیده می‌شود. تحقیقات کایناک و هاکانسون (Kaynak & Hakansson, 2005) نشان داده است که پلیمریزاسیون شیمیایی در جای الیاف با پیرول، توده‌هایی از پلیمر روی الیاف تشکیل می‌دهد؛ این توده‌ها در این تحقیق هم مشاهده شد. توده‌های پلیمری مذکور ممکن است به سطح الیاف بچسبند،

در تصویرها می‌بینیم که تشکیل لایه پیرول که دور تا دور الیاف را پوشش داده و موجب افزایش قطر شده است، کاملاً یکنواخت نیست. تشکیل لایه پلیمری به سطح الیاف محدود شده و تخلخل بین الیاف بسته نشده است. علاوه بر این، توده‌هایی در برخی نقاط روی الیاف پوشش داده شده

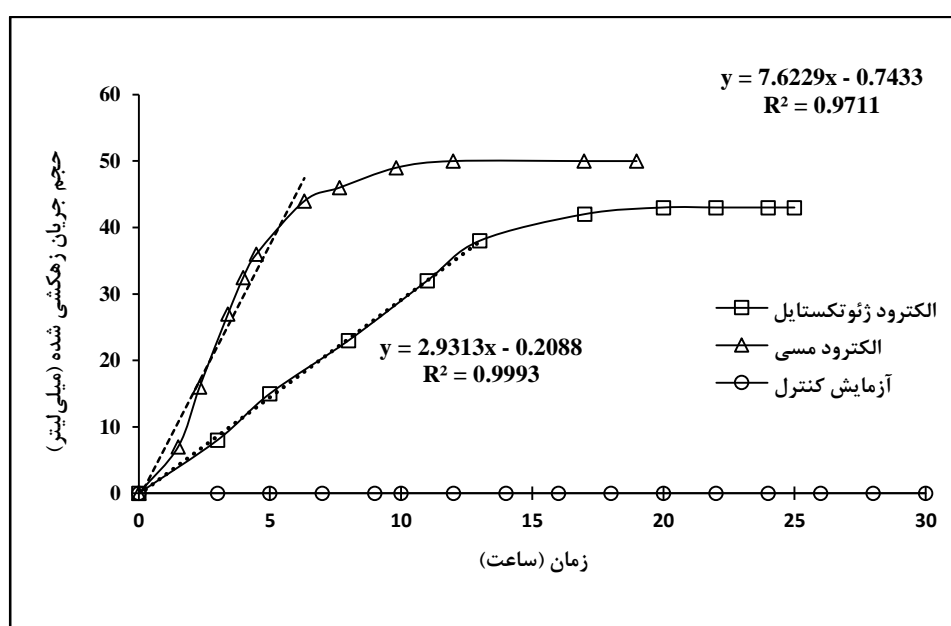
قبل از آغاز فرآیند الکترواسمز بوده‌است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد در صورت اعمال نشدن میدان الکتریکی، هیچ‌گونه جریانی تحت تاثیر نیروی ثقل از مدل زهکشی نمی‌شود. به سخنی دیگر، میزان جریان ثقلی خروجی از مدل طی ۳۰ ساعت صفر بود.

از نظر میزان جریان تجمعی زهکشی شده از کاتولینیت اشباع (مطابق شکل ۱۳)، عملیات زهکشی تحت تاثیر فرآیند الکترواسمز در صورت جاگذاری الکتروود مسی در ۱۹ ساعت و در صورت جاگذاری الکتروود ساخته شده به روش پلیمریزاسیون شیمیایی، در مدت ۲۵ ساعت به اتمام رسید.

اما اتصال آنها محکم نیست و بخشی از آنها در شستشو یا سایش، از الیاف جدا می‌شوند. یادآوری می‌شود که این تصویرها پس از شستشو دادن غشا با آب مقطر و خشک شدن آنها گرفته شده است.

تعیین میزان جریان زهکشی شده در اثر اعمال فرآیند الکترواسمز

نتایج آزمایش‌ها برای ارزیابی و مقایسه کارایی الکتروودهای مسی و ژئوتکستایل در زهکشی نمونه خاک کاتولینیت اشباع از طریق اعمال فرآیند الکترواسمز، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. هدف از آزمایش کنترل، تعیین حجم جریان ثقلی خروجی



شکل ۱۳- جریان زهکشی شده در فرآیند الکترواسمز

Fig. 13. Drainage flow in the electroosmosis process

این حقیقت را به وضوح نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، در ۵ ساعت اول، الکتروودهای مسی ۷۴ درصد (۳۷ میلی‌لیتر) از کل جریان خروجی و الکتروودهای ژئوتکستایل ۳۵ درصد (۱۵ میلی‌لیتر) از کل جریان خروجی را زهکشی کردند.

با به کارگیری الکتروود مسی و در شرایطی مشابه، عملیات زهکشی تحت تاثیر فرآیند الکترواسمز در حدود ۲/۵ برابر سریع‌تر از وضعیت به کارگیری الکتروود ساخته شده بر پایه ژئوتکستایل به انجام رسید؛ در شکل ۱۳، شیب اولیه نمودارها

نسبت به سایر ترکیب‌های مورد استفاده، توانسته رسانایی قابل قبولی را در بستر نارسانا ایجاد کند.

- قابلیت رسانایی ایجاد شده در غشای نارسانای ژئوتکستایل، به روش پلیمریزاسیون شیمیایی با استفاده از پلیمر رسانای پیرو، توانست ۸۶ درصد از کل جریان خروجی توسط الکتروُد مسی را تحت تاثیر فرایند الکترواسمز خارج کند که حاکی از موفقیت الکتروُد ساخته شده در رطوبت اعمالی و در عملیات زهکشی است.

- به‌کارگیری پلیمر رسانای پیرو برای ساخت الکتروُد ژئوسینتتیک، تنها به‌صورت لایه‌ای اطراف الیاف پلیمری را پوشش می‌دهد و تخلخل غشا را مسدود نمی‌کند. از این‌رو، قابلیت فیلترینگ همزمان با اعمال جریان الکتریکی در این الکتروُد وجود دارد و جریان زهکشی شده، به‌واسطه پدیده الکترواسمز، فاقد ذرات خاک است.

- زنگ‌زدگی الکتروُد مسی و افت ولتاژ شدید، حاکی از ناکارایی الکتروودهای فلزی در به‌کارگیری فرآیند الکترواسمز است.

- ایجاد نشدن تغییر در ساختار الکتروُد ژئوتکستایل، پس از اتمام فرآیند الکترواسمز، نشان دهنده کارایی این نوع غشا به‌عنوان الکتروُد در میدان الکتریکی و نیز قابلیت فیلتراسیون پس از قطع جریان الکتریکی در محیط خاکی است.

به دلیل رسانایی قابل توجه الکتروُد مسی، جریان زهکشی شده از مدل در ۱۲ ساعت به بیشینه مقدار خود می‌رسد و از این زمان به بعد دیگر جریانی از مدل تخلیه نمی‌شود. به‌عبارت دیگر، در ۱۹ ساعت، با تخلیه ۵۰ میلی‌لیتر از آب موجود در محیط متخلخل، فرآیند الکترواسمز متوقف شد. بیشترین میزان جریان زهکشی شده با به‌کارگیری الکتروُد ژئوسینتتیک، ۴۳ میلی‌لیتر است که به‌صورت تدریجی و طی ۲۲ ساعت از محیط متخلخل تخلیه شد. الکتروُد مسی در انتهای فرآیند الکترواسمز و پس از ۱۹ ساعت دچار زنگ‌زدگی شد، در صورتی‌که الکتروُد ژئوتکستایل در انتهای فرآیند الکترواسمز و پس از ۲۵ ساعت دچار هیچ‌گونه زنگ‌زدگی نگردید.

نتیجه‌گیری

بر مبنای مجموعه نتایج حاصل از آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام شده، یافته‌های کلی زیر قابل استنتاج است:

- پوشش‌دهی الیاف ورقه ژئوتکستایل به روش پلیمریزاسیون شیمیایی با استفاده از پلیمر رسانای پیرو، حاوی نانو ذرات اکسید مس و اکسیدان آهن (III) کلرید، با ایجاد مقاومت الکتریکی ۰/۶۷ کیلو اهم در حداکثر فشار ۰/۰۸۳ (کیلوگرم.نیرو بر سانتی‌مترمربع)

مراجع

- Anon. 2015. Nanotechnology – Nanomanufacturing- Key Control Characteristics–Part 2-1: Carbon nanotube materials–film resistance. Iran. Iranian National Standardization Organization (INSO). (in Persian)
- Bajaj, P., Gupta, A. P. and Ojha, N. 2000. Antistatic and hydrophilic synthetic fibers: a critique. Polym. Rev. 40(2): 105-138.
- Barari-Gangaraj, S. A., Eisazadeh, H. and Sadeghi, E. 2014. Synthesis of polypyrrole composite and nano composite by using iron (III) oxide and Stabilizer such as poly (vinyl alcohol)

- (PVA), sodium dodecyl benzen sulfonate (DBSNa) and investigation the characteristics of products such as morphology and chemical structure in aqueous media. M. Sc. Thesis. Chemical Engineering, University of Shomal, Mazandaran, Iran. (in Persian)
- Bourgès-Gastaud, S., Dolez, P., Blond, E. and Touze-Foltz, N. 2017. Dewatering of oil sands tailings with an electrokinetic geocomposite. *J. Miner. Eng.* 100, 177–186.
- Eriksson, F. 2014. Electro-osmotic treatment of soil—a laboratory investigation of three Swedish clays. M. Sc. Thesis. Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Ferrero, F., Napoli, L., Tonin, C. and Varesano, A. 2006. Pyrrole chemical polymerization on textiles: kinetics and operating conditions. *J. Appl. Polym. Sci.* 102, 4121-4126.
- Fourie, A. B. and Jones, C. J. F. P. 2010. Improved estimates of power consumption during dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics (EKGs). *J. Geotext. Geomembranes.* 28, 181-190.
- Ghasemitabar, F., Arjomandi, M. A., Jalali, B. and Arzani, H. 2016. Evaluation of the effects of the groundwater level changes on drainage in the stabilization of the urban depths. M. Sc. Geotechnical Engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran. (in Persian)
- Gray, D. H. 1970. Electrochemical hardening of clay soils. *J. Geotechnique.* 20(1): 81-93.
- Hakansson, E., Kaynak, A., Lin, T., Nahavandi, S., Jones, T. and Hu, E. 2004. Characterization of conducting polymer coated synthetic fabrics for heat generation. *J. Synth. Met.* 144(1): 21-28.
- Hamir, R. B., Jones, C. J. F. P. and Clarke, B. G. 2001. Electrically conductive geosynthetics for consolidation and reinforced soil. *J. Geotex. Geomembranes.* 19, 455-482.
- Jones, C. J. F. P., Lamont-Black, J., Glendinning, S., White, Ch. and Alder, D. 2014. The environmental sustainability of electrokinetic geosynthetic strengthened slopes. *Eng. Sustain.* 167(3): 95-107.
- Jones, C. J. F. P., Lamont-Black, J., Glendinning, S., Bergado, D., Eng, T., Fourie, A., Liming, H., Pugh, C., Romantshuk, M., Simpanen, S. and Yang-Feng, Z. 2008. Recent research and applications in the use of electrokinetic geosynthetics. Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference. Jan 1. International Geosynthetics Society UK Chapter, United Kingdom.
- Kalumba, D., Glendinning, S., Rogers, C., Tyrer, M. and Boardman, D. 2009. Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics. *J. Environ. Eng.* 135(11): 1227-1236.
- Kaniraj, S. and Yee, J. H. S. 2011. Electroosmotic consolidation experiments on an organic soil. *J. Geotech. Geolog. Eng.* 29(4): 505-518.
- Kaynak, A. and Hakansson, E. 2005. Generating heat from conducting polypyrrole-coated PET fabrics. *J. Adv. Polym. Technol.* 24, 194-207.
- Lamont-Black, J., Hall, J. A., Glendinning, S., White, Ch. and Jones, C. J. F. P. 2012. Stabilization of a railway embankment using electrokinetic geosynthetics. *Eng. Geol. Special Publications.* 26, 125-139.
- Lamont-Black, J., Jones, C. J. F. P. and Alder, D. 2016. Electrokinetic strengthening of slopes-Case history. *J. Geotex. Geomembranes.* 44, 319-331.

- Lamont-Black, J., Jones, C. J. F. P. and White, Ch. 2015. Electrokinetic geosynthetic dewatering of nuclear contaminated waste. *J. Geotex. Geomembranes*. 43, 359-362.
- Lazarte, C. A., Robinson, H., Gómez, J. E., Baxter, A., Cadden, A. and Berg, R. 2015. Soil nail walls reference manual (No. FHWA-NHI-14-007). U.S. Department of Transportation. U.S. Department of Transportation. Pub. No. FHWA-NHI-14-007.
- Malekzadeh, M., Lovisa, J. and Sivakugan, N. 2016. An overview of electrokinetic consolidation of soils. *J. Geotech. Geol. Eng.* 34(3): 759-776.
- Malinauskas, A. 2001. Chemical deposition of conducting polymers. *J. Polymer*. 42, 3957-3972.
- Micic, S., Shang, J. Q., Lo, K. Y., Lee, Y. N. and Lee, S. W. 2001. Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current. *Can. Geotech. J.* 38, 287-302.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*. Third Edition, Wiley.
- Mumtaz, M. and Girish, M. S. 2014. Electrokinetic geotextiles stabilization of embankment slopes. *Int. J. Eng. Res.* 3(12): 766-768.
- Pirsa, S., Afshar-Asl, A., Khani, A. and Allahverdipour, A. 2013. Fabrication of 1, 1-dimethylhydrazine gas sensor based on nano structure conducting polyaniline. *J. Sci. Islamic Republic of Iran*. 24(3): 209-215. (in Persian)
- Rittirong, A., Douglas, R. S., Shang, J. Q. and Lee, E. C. 2008. Electrokinetic improvement of soft clay using electrical vertical drains. *Geosynth. Int. J.* 15(5): 369-381.
- Sata, T., Yamagushi, T. and Matsusak, K. 1996. Preparation and properties of composite membranes composed of anion- exchange membranes and polypyrrole. *J. Physic. Chem.* 100, 16633-16640.
- Shahsavand, M., Pak, A. and Shariatmadari, N. 2013. Laboratory and numerical modeling of hydraulic behavior of saturated fine grained soils dewatered by electrokinetic geosynthetic. M. Sc. Thesis. Geotechnical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (in Persian)
- Yousefi-Kebria, D., Khodadadi, A., Ganjidoust, H. and Badkoubi, A. 2009. Ioremediation of petroleum hydrocarbons-contaminated soil by non-uniform electrokinetic (NUE). Ph. D. Thesis. Environmental Engineering, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran. (in Persian)
- Zhuang, Y. F., Huang, Y., Liu, F., Zou, W. and Li, Z. 2014. Case study on hydraulic reclaimed sludge consolidation using electrokinetic geosynthetics. 10th International Conference on Geosynthetics. Sep. 21-25. DGGT, Berlin, Germany.

Design, Construction, and Evaluation of Geosynthetic Electrode for Drainage by Electrokinetic Method

S. Behrouzinia*, H. Ahmadi, N. Abbasi and A. A. Javadi

* Corresponding Author: Associate Professor of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. Email: h.ahmadi@urmia.ac.ir.

Received: 28 January 2019, Accepted: 5 May 2019

Abstract

The necessity of drainage and improvement of soil resistance parameters are unavoidable in the most mineral and geotechnical projects. Therefore, electrokinetic geosynthetic, as a fundamental technology, is capable of increasing the stability and stabilization of fine-grained soils and derive from the combination of electrokinetic performance and electroosmosis flow along with the application of geosynthetics. In this study, to enhance and improve the electrokinetic geosynthetic process, an electrode based on geotextile by chemical polymerization was developed. For this purpose, non-conductive fibers of geotextile sheet was converted to the conductive fibers by coating with a pyrrole conductive polymer (using two types of oxidants) and aniline conductive polymer, along with the adding four different types of nanoparticles. Then, to evaluate the efficiency of the geosynthetic electrode comparing to the copper electrode, a physical model was designed and filled by saturated kaolinite clay and drained by the electroosmosis process. According to the results, coating with Pyrrole polymer was only in the form of a layer around the geotextile fiber and did not obstruct the porosity of the fiber. Therefore, this fiber, after the coating, has the capability of simultaneously applying as a filter and electrode, and after the completion of the electrokinetic process, it can remain as a filter in the soil without removing. In this study, the results demonstrated that the geosynthetic electrode with a minimum measured, 670 ohms, at a maximum pressure, 0.083 (kg·f/cm²), by applying electroosmosis process was capable of draining 43 milliliters of water, which was only 14 percent lower compared to the copper electrode and similar conditions.

Keywords: Electroosmosis, Filter, Nanoparticle, Pyrrole