هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

بررسی تاثیر افزودن بنتونیت بر پارامترهای مقاومتی پوشش چندلایه دفن پسماند پرتوزا؛ مطالعه موردی پسماندگاه انارک

ابوالفضل یعقوبی[۱،۲]، دانیال قدیانی[۱،۳]، سعید زارع گنجارودی[۱،۳]، صابر حسنلو[۱]، امیرمسعود طاهریان[۱]، علی مالکی فارسانی[۱]

۱- شرکت مدیریت پسماندهای پرتوزای ایران، کد پستی: ۱۴۳۹۹۵۵۹۳۱، تهران، ایران
۲- گروه زمین‌شناسی نفت، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
abolfazlyaghoubi2@gmail.com
۳- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران
d.ghadyani@aut.ac.ir، szareganjaroodii@aut.ac.ir، shassanlou@aeoi.org.ir، ataherian@aeoi.org.ir، amaleki@aeoi.org.ir

چکیده

بحث مدیریت، نگهداری و دفن پسماند پرتوزای تولیدی در صنعت هسته‌ای همواره یکی از چالش‌های مهم این صنعت به شمار می‌آید. یکی از روش‌های دفن پسماند پرتوزا دفن نزدیک سطح می‌باشد که اجرای پوشش‌های چندلایه از خاک در محل دفع پسماند می‌تواند از انتشار آلودگی های پرتوی جلوگیری نماید. در این مطالعه، خاک محل پسماندگاه انارک در استان اصفهان از طریق انجام آزمایش‌های مورد نیاز بررسی شده و دو نمونه همگن از خاک محل تهیه سپس دو نمونه بنتونیت از بین هفت نمونه بنتونیت جهت اختلاط با خاک برای رسیدن به نیازهای طرح برای پوشش چندلایه محل دفن پسماند انتخاب شد تا پارامترهای مکانیکی نظیر مقاومت فشاری تک محوری، برش مستقیم، تحکیم و خصوصیات تراکمی همچنین به بررسی شاخص خمیری و جهت جلوگیری از نشت مایعات به درون ترانشه دفن به بررسی ضریب نفوذپذیری پرداخته شد. نتایج نشان داد، با اضافه شدن بنتونیت شاخص خمیری افزایش پیدا کرده و این امر باعث افزایش چسبندگی خاک می‌شود. همچنین مشاهده شد با افزودن بنتونیت مقاومت فشاری تک محوری افزایش یافت که این میزان با بالا رفتن شاخص خمیری رابطه مستقیم دارد. روند افزایش درصد بنتونیت و شاخص خمیری خاک را می‌توان با تقریب مناسبی بصورت یک رابطه خطی نشان داد. پس از انجام آزمایش نفوذپذیری مشاهده شد که با افزایش میزان بنتونیت نفوذپذیری کاهش می‌یابد، اگرچه افزایش تراکم تاثیر مستقیم بر این امر دارد. در نهایت، نتایج برخی از آزمایشات انجام شده با گزارشات و مقالات موجود جهت صحت‌سنجی مقایسه شد.

واژه‌های کلیدی: دفن، پسماند پرتوزا، بنتونیت، مقاومت فشاری، شاخص پلاستی

مقدمه

دفن پسماندهای پرتوزا امروزه یکی از چالش‌های صنایع هسته‌ای است. از این رو لازم است تا پسماندهای مدیریت شده و به روش مطمئن دفن شوند تا از آسیب به مردم و محیط زیست در حال و آینده جلوگیری گردد [۱]. با توجه به اهمیت دفن نزدیک سطح پسماند پرتوزا، طراحی محافظه‌کارانه سیستم دفن پسماند و پوشش آن در دستورکار قرار گرفته شد. اجرای پوشش‌های چندلایه از خاک اصلاح شده در محل دفع پسماند می‌تواند از انتشار آلودگی جلوگیری نماید. استفاده از خاک‌های محل دفن پسماندها جهت اجرای پوشش از جهات مختلف از جمله جنبه

اقتصادی اهمیت دارد. اما استفاده از خاک‌های محل جهت ساخت پوشش تنها در شرایطی مجاز است که خاک‌های مورد استفاده با مشخصات استاندارد پوشش‌های لازم برای تامین اهداف پروژه منطبق باشد. به عنوان مثال لازم است مشخصات مقاومتی، تغییر شکل پذیری و مقاومت در برابر تغییرات محیطی را نیز ارضا نماید. به‌همین دلیل شناخت مشخصات ژئوتکنیکی خاک با استفاده از آزمون‌های استاندارد آزمایشگاهی برای تعیین سایر خصوصیات خاک جهت اجرای پوشش ایمن نیز لازم است.

بنتونیت نوعی خاک رس بوده که شامل مقادیر چشم‌گیری از کانی مونت‌موریلونیت است. بنتونیت دارای خاصیت متورم‌شوندگی در تماس با آب و جذب آب بالا است. از این خاصیت بنتونیت می‌توان به عنوان یک بهبوددهنده خواص مسدودسازی خاک‌های رسی در محل‌های دفن پسماندهای شهری یا هسته‌ای استفاده می‌شود. بنتونیت‌های مختلفی از لحاظ کانی و مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها وجود دارند. به‌عنوان مثال می‌توان از بنتونیت سدیم‌دار، بنتونیت کلسیم‌دار، بنتونیت آلومینیوم‌دار و دیگر موارد نام برد. در این میان بنتونیت سدیم‌دار به‌دلیل قابلیت بالای تعویض یونی، اندازه کوچکتر ذرات، مساحت سطحیِ بالا نسبت به سایر بنتونیت‌ها و در نتیجه افزایش حجم بیشتر در تماس با آب در فرآیند عایق‌سازی پوشش‌های رسی کاربرد بیشتری دارد [۲]. افزودن بنتونیت به خاک محل باعث تغییر خصوصیات مختلف آن مانند مقاومت برشی، نفوذپذیری، سختی و مدول تغییر شکل، خصوصیات تراکمی، وزن حجمی و دیگر موارد می‌شود. همچنین در دهه‌های اخیر، خاصیت خود ترمیمی و بسته‌شدن ترک‌ها در خاک‌های مخلوط شده با بنتونیت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. براساس بررسی‌های صورت گرفته، افزایش نشانه خمیری و خاصیت تورم‌پذیری و کاهش نفوذپذیری خاک‌های رسی باعث ایجاد خاصیت خودترمیمی می‌گردد. اکثر پژوهش‌های پیشین نشان داده است که افزودن بنتونیت به خاک‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوره، چسبندگی، رطوبت بهینه جهت رسیدن به تراکم حداکثر، تورم‌پذیری، اندکس خمیری و تغییر (معمولاً به صورت کاهشی) در زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌گردد. نوع و میزان تغییرات ذکر شده به نوع خاک پایه و همچنین نوع و درصد بنتونیت افزوده شده نیز بستگی دارد. معمولاً با افزایش مقدار بنتونیت، میزان تغییرات ذکر شده افزایش می یابد.

آپولینا در سال ۱۹۸۰ میلادی با بررسی دیوارهای آب‌بند بنتونیتی به این نتیجه رسید که همواره تراکم‌پذیری و نفوذپذیری یک نمونه‌ی خاک با یکدیگر رابطه عکس دارند. او همچنین گزارش کرد که با افزایش شاخص خمیری خاک، نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد [۳]. در مطالعه‌ای دیگر، دی در سال ۱۹۹۶ میلادی، با مخلوط کردن ۳۰ درصد بنتونیت با خاک ماسه‌ای، خودترمیمی خاک حاصل شده را با استفاده از چرخه‌ی ذوب–انجماد ارزیابی کرد. او جهت تعیین شاخص خمیری خاک، آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ را بر روی کل نمونه، و نه تنها بر روی بخش عبوری از الک ۴۰ طبق روش معمول، انجام داد [۴]. کومار و یانگ در سال ۲۰۰۲ میلادی، خواص مخلوط خاک رس و بنتونیت را جهت اجرای لایه محافظ محل دفن پسماند بررسی نمودند. بررسی خاک اصلی انتخاب شده نشان می‌دهد که بر اساس روش طبقه‌بندی متحد نمونه خاک CL با حد روانی ۴۳ درصد و حد خمیری ۱۸ درصد است. همچنین، بنتونیت استفاده شده دارای عنصر غالب سدیم بوده و حد روانی و حد خمیری آن به ترتیب ۵۵۰ و ۵۵ درصد است. میزان بنتونیت استفاده شده در این آزمایش ۳، ۵ و ۷ درصد است [۵].

در این مطالعه، خاک محل پسماندگاه دفن پسماندهای پرتوزا انارک در استان اصفهان از طریق انجام آزمایش‌های مورد نیاز بررسی شده و دو نوع بنتونیت مختلف جهت اختلاط با خاک محل برای رسیدن به خصوصیات موردنظر برای پوشش چندلایه محل دفن پسماندها بررسی شده و همچنین درصد بنتونیت مناسب جهت اختلاط با خاک محل بررسی خواهد شد. برای این‌کار خصوصیاتی مانند مقاومت فشاری تک محوری، تحکیم، خصوصیات تراکمی و دیگر موارد مدنظر خواهد بود.

روش کار

پسماندگاه انارک به عنوان محل دفن پسماندهای پرتوزا انتخاب گردیده است. پسماندگاه انارک در استان اصفهان و در ۲۲ کیلومتری شمال‌غربی شهرستان انارک واقع شده است.

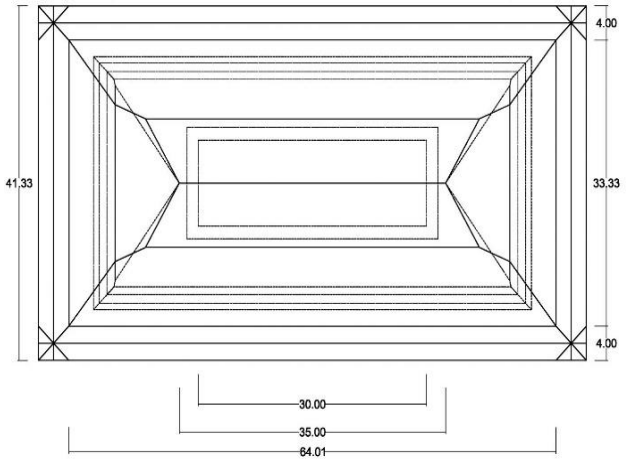
جهت آماده‌سازی خاک مورد نیاز برای انجام آزمایش، تعداد ۱۳ چاهک شناسائی با عمق‌هایی بین ۰/۳ تا ۶ متر جهت بررسی لایه‌های خاک و شناخت لایه‌های آبرفتی در محل پسماندگاه حفاری شده و ۳۴ نمونه خاک از عمق‌های مختلف این چاهک‌ها تهیه و تحویل آزمایشگاه شده است. نمونه‌برداری از چاهک‌ها از عمق ۰/۳ متر از سطح زمین و به فواصل هر یک متر تا عمق حداکثر ۶ متر صورت گرفته است. پس از تشریح نظری نمونه‌های ارسالی به آزمایشگاه و با توجه به شباهت بعضی از آن‌ها به همدیگر، این نمونه‌ها به ۵ دسته کلی، هر دسته شامل نمونه‌های مشابه خاک محل تقسیم گردیدند. بخش اعظم خاک محل را ماسه قرمز رنگ متمایل به قهوه‌ای یا خاکستری با دانه‌بندی خوب، همراه با حدود ۱۰ تا ۲۵ درصد شن و مقداری لای تشکیل می‌دهد. دربعضی محل‌ها نیز مقدار کمی گچ و قلوه سنگ در خاک دیده می‌شود. لایه قرمز رنگ رس با پلاستیسیته کم تا متوسط و سنگ رس (مارن) در پایین‌ترین عمق بعضی چاهک‌ها نیز دیده شده، و در یک محل نیز ماسه با دانه‌بندی یکنواخت به رنگ قهوه‌ای متمایل به صورتی در عمق ۳۰ سانتیمتری و نزدیک سطح زمین مشاهده شده است. مشخصات پوشش چندلایه با توجه به طراحی‌های صورت پذیرفته دارای ۴ لایه می‌باشد، که خصوصیات هر لایه در جدول ۱(۱) آورده شده است. لازم

به ذکر است که، لایه اول که لایه نفوذناپذیر بوده، پایین‌ترین لایه خواهد بود.

جدول ۱: مشخصات لایه‌های مختلف پوشش چندلایه

نام لایه	جنس لایه	ارتفاع (cm)	نفوذپذیری (cm/s)	چسبندگی (کیلوپاسکال)	زاویه اصطکاک (درجه)
لایه نفوذناپذیر	ریزدانه مخلوط با بنتونیت زیر الک ۴	۸۳	۷×۱۰^{-۷}	۱۱-۱۰۳	۱۹
زهکش	ترکیب شن و ماسه ریز و درشت	۳۰	۳×۱۰^{-۱}	۰	۳۲-۴۴
قلوه سنگ	سنگ شکسته درشت	۲۰	کاملا نفوذپذیر	۰	۳۲-۴۴
خاک طبیعی	خاک آبرفت	۱۰۰	۳×۱۰^{-۶}	۲۲-۵۰	۲۷-۳۴

پوشش چندلایه پس از اجرا دارای عرض ۳۳/۳۳ متر طول ۶۴ متر خواهد بود. پلان پوشش طراحی شده در شکل (۱) ارائه شده است که مجموع ارتفاع ۵ لایه در مرکز پوشش ۲/۳۴ متر می‌باشد.



شکل ۱: نمایی از پوشش چندلایه دفن پسماند پرتوزا

نتایج

آزمایش دانه‌بندی

در این آزمایش نمونه خاک با استفاده از الک‌های استاندارد بر اساس اندازه ذرات و درصد دانه‌های با اندازه‌های مختلف در توده خاک، دانه‌بندی می‌شود. این روش آزمون، برای تعیین کمّی توزیع ذرات با اندازه‌های مختلف در خاک‌ها کاربرد دارد. در جدول (۲) پارامترهای دانه‌بندی نمونه‌های خاک مخلوط به‌صورت خلاصه آمده است.

جدول ۲: پارامترهای دانه‌بندی (اندازه دانه ها برحسب میلی‌متر)

نمونه خاک	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	C_u	C_c	رد شده از الک ۲۰۰ (درصد)
۱	۰/۰۱۷	۰/۱۴۵	۰/۵۲۵	۰/۹۸۸	۵۸/۵	۱/۳	۲۳/۶۲
۲	۰/۰۱۷	۰/۱۱۶	۰/۴۰۴	۰/۷۰۸	۴۲	۱/۱	۲۵/۹۲

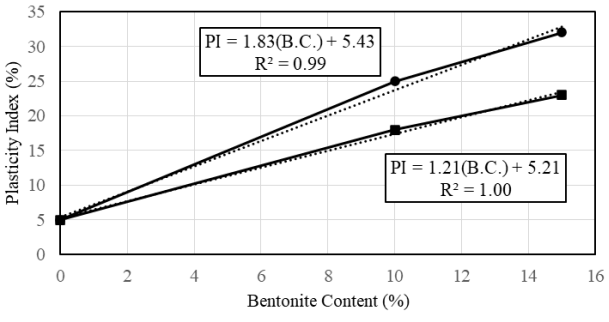
تعیین حدود اتربرگ

برای هفت نمونه خاک و هفت نمونه بنتونیت انجام شد، دو نوع بنتونیت با حدود اتربرگ بیشتر و دو نمونه مخلوط همگن از خاک محل با توجه به نیاز طراحی برای انجام فاز اصلی آزمایشات انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. جدول (۳) نشان‌دهنده شاخص خمیری نمونه‌های خاک و بنتونیت مورد استفاده در آزمایشات می‌باشد.

جدول ۳: حدود اتربرگ خاک و بنتونیت و مخلوط آن‌ها

نمونه	شاخص خمیری
مخلوط خاک شماره ۱	۵
مخلوط خاک شماره ۲	۴
نمونه بنتونیت A1	۲۰۱
نمونه بنتونیت E2	۴۰۰
مخلوط خاک با ۱۰ درصد بنتونیت A1	۱۸
مخلوط خاک با ۱۰ درصد بنتونیت E2	۲۵
مخلوط خاک با ۱۵ درصد بنتونیت A1	۲۳
مخلوط خاک با ۱۵ درصد بنتونیت E2	۳۲

در شکل (۲)، رابطه بین درصد دو نوع بنتونیت مورد استفاده (B.C.) و شاخص پلاستیک خاک مخلوط (PI) نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که رابطه بین افزایش درصد بنتونیت و شاخص پلاستیک خاک را می‌توان با تقریب مناسبی بصورت یک رابطه خطی نشان داد.



شکل ۲: رابطه بین درصد بنتونیت و شاخص پلاستیک نمونه‌های مخلوط

با توجه به روابط خطی نشان داده شده در شکل بالا می‌توان دریافت که درصورت اضافه شدن بنتونیت پودر انارک (A1) به خاک محل، مقدار شاخص خمیری مخلوط را می‌توان با استفاده از رابطه (۱)

و درصورت اضافه شدن بنتونیت پارس (E2) شاخص خمیری مخلوط را می‌توان با استفاده از رابطه خطی (۲) محاسبه کرد.

$$PI = 1.21(B.C.) + 5.21 \quad (۱)$$

$$PI = 1.83(B.C.) + 5.43 \quad (۲)$$

طبقه‌بندی و نامگذاری خاک

با استفاده از نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی و تعیین حدود اتربرگ، طبقه‌بندی و نامگذاری نمونه‌های خاک براساس روش متحد (Unified Soil Classification System, USCS) انجام شد. نتایج نام‌گذاری خاک‌ها در جدول (۴) لیست شده است. همانگونه که در این جدول دیده می‌شود، بخش اعظم خاک منطقه را ماسه لای‌دار یا رس‌دار تشکیل می‌دهد. یک گروه از خاک‌ها نیز شامل رس با پلاستیسیته کم هست که به صورت قطعاتی از سنگ رس (مارن) بوده و در محل سه تا از چاهک‌ها دیده شده است.

جدول ۴: نتایج طبقه‌بندی نمونه‌های خاک

نام نمونه	۱	۲	G1	G2	G3	G4	G5
نتیجه طبقه‌بندی	SC-SM	SC-SM	SM	SC-SM	SM	SM	CL

پارامترهای تراکم خاک

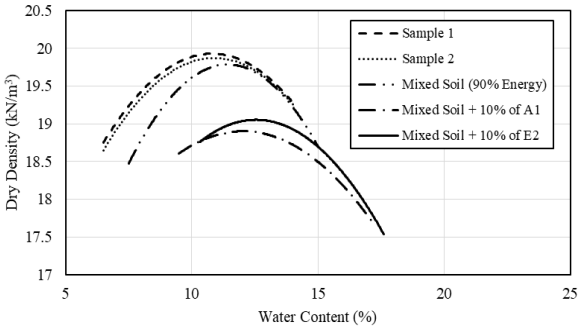
در این آزمایش رابطه بین درصد رطوبت و وزن مخصوص خشک خاک کوبیده شده به وسیله یک چکش با وزن و ارتفاع سقوط مشخص تعیین می‌شود. با استفاده از نتایج این آزمایش، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک و میزان رطوبت بهینه آن مشخص می گردد. در جدول (۵)، وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه نمونه‌های ۱، ۲، مخلوط خاک با ۱۰ درصد بنتونیت پودر انارک (A1) و پارس (E2) تعیین شده است. لازم به‌ذکر است که حداکثر اندازه دانه‌های نمونه‌های خاک آزمایش شده برابر با سه هشتم اینچ بوده است.

جدول ۵: نتایج آزمایش تعیین وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه

جدول شماره نمونه‌ی خاک مخلوط	وزن مخصوص خشک حداکثر (kN/m^3)	رطوبت بهینه (درصد)
۱	۲۰/۰۲	۱۰/۰۴
۲	۲۰/۰۵	۱۰/۳۷
مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت A1	۱۹/۱	۱۳/۳
مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت E2	۱۹/۱	۱۱/۸

در شکل (۳) منحنی‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های تراکم بر روی تمامی نمونه‌های مختلف خاک محل و مخلوط با بنتونیت نشان داده شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود که با افزودن بنتونیت منحنی تراکم به سمت راست و پایین کشیده شده است. به عبارت دیگر با اضافه شدن بنتونیت وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه کاهش ولی درصد رطوبت بهینه افزایش پیدا کرده است. این نتایج با نتایج تحقیقات گذشته منطبق نیست. عدم انطباق موجود با دو تحقیق ذکر شده ممکن است به‌دلیل جنس خاک پایه، ریزدانه یا درشت‌دانه بودن آن یا جنس بنتونیت استفاده شده باشد.

از سوی دیگر، در شکل (۳) منحنی تراکم مخلوط نمونه‌ها با اعمال ۹۰ درصد انرژی نشان داده شده است. با مقایسه منحنی‌ها مشخص می‌شود که با کاهش انرژی تراکم، منحنی به سمت راست و پایین منتقل می‌شود. یعنی وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش و درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.



شکل ۳: منحنی‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های تراکم بر روی تمامی نمونه‌ها

آزمایش تک محوری

برای این آزمایش از درصد رطوبت بهینه خاک استفاده شد و پس از ساخت نمونه‌ها، آنها را به مدت ۷ روز در شرایط رطوبت ثابت (درون پوشش پلاستیکی) قرار داده، سپس بارگذاری بر روی آن‌ها انجام شد. درصدهای تراکم نمونه‌ها در جدول (۶) ذکر شده است.

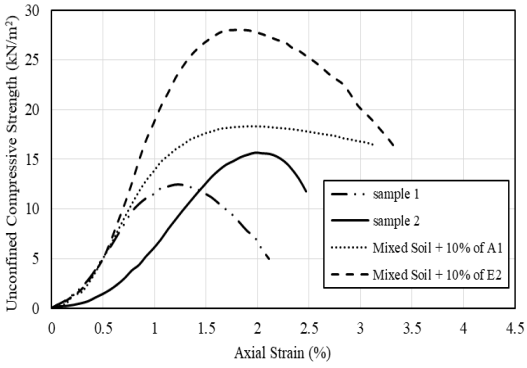
جدول ۶: نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری محصور نشده

شماره نمونه خاک مخلوط	درصد تراکم نسبی	مقاومت فشاری تک محوری (کیلوپاسکال)
۱	۹۵	۱۲/۴۵
۲	۹۵	۱۵/۶۹
مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت A1	۹۵	۱۸/۳
مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت E2	۹۵	۲۸/۰۲

شکل (۴) نشان‌دهنده منحنی‌های به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری بر روی ۴ نمونه می‌باشد. با توجه به این شکل مشخص است که افزودن بنتونیت، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها را افزایش و برای بنتونیت با شاخص خمیری بیشتر، این افزایش بیشتر بوده است.

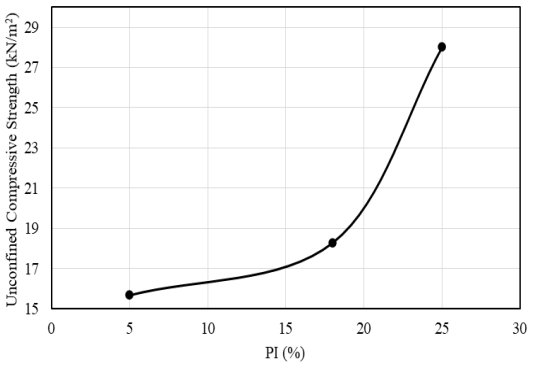
همچنین با توجه به شیب منحنی‌های رسم شده، می‌توان نتیجه گرفت که به جز در یک مورد، مدول تغییر شکل نمونه‌ها تا کرنش مشخصی مشابه بوده و پس از آن، نمونه‌های دارای بنتونیت مدول تغییر شکل‌پذیری بیشتری از خود نشان داده‌اند و این افزایش مدول در خاک مخلوط با بنتونیت با شاخص خمیری بیشتر، بیشتر بوده است. این نتایج با نتایج گذشته همخوانی مناسبی دارد [۶].

مقایسه شکل منحنی‌های تنش-کرنش نشان می‌دهد که به جز نمونه ۲ که در مراحل اولیه بارگذاری، تغییر شکل و کرنش بیشتر و مدول تغییر شکل کمتری داشته است، نمونه‌های دیگر در مراحل اولیه بارگذاری کرنش‌های مشابه را تجربه کرده‌اند. این موضوع می‌تواند بیان‌گر نقش عمده‌تر اسکلت اصلی درشت دانه خاک بر رفتار آن در کرنش‌های کم باشد. با توجه به آن‌که بنتونیت اضافه شده به خاک ۱۰ درصد بوده است، نقش عمده را در رفتار تنش-کرنش اولیه بخش درشت‌دانه داشته است و لذا خاک پایه محل و نمونه‌های شامل هر دو نوع بنتونیت رفتار مشابه در کرنش‌های کمتر از خود نشان داده‌اند. با افزایش بارگذاری و رسیدن به کرنش‌های بیشتر، تاثیر وجود بنتونیت و نوع آن بیشتر نمایان گشته و باعث ایجاد تفاوت در رفتار نمونه‌های شامل بنتونیت و بدون آن و همچنین نمونه‌های با بنتونیت دارای پلاستیسیته متفاوت شده است.



شکل ۴: منحنی‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری بر روی تمامی نمونه‌ها

در شکل (۵) نمودار مشخص‌کننده اثر شاخص خمیری بر روی مقاومت فشاری تک محوری نمونه نمایش داده شده است. با توجه به این شکل دیده می‌شود که با افزایش شاخص خمیری، مقاومت فشاری تک محوری خاک افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت با افزایش شاخص خمیری به مقدار بیش از ۲۰ درصد چشم‌گیرتر است.



شکل ۵: نمودار رابطه بین شاخص خمیری و مقاومت فشاری تک محوری

آزمایش برش مستقیم

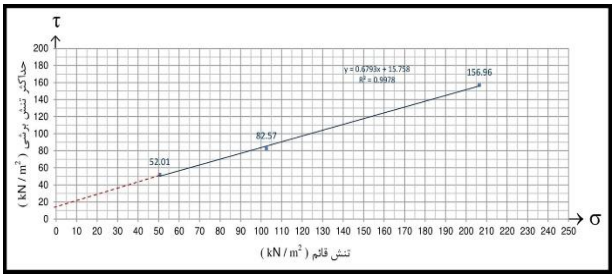
نمونه‌های خاک محل در تراکم ۱۰۰ درصد و نمونه‌های مخلوط شده با بنتونیت در تراکم ۹۰ درصد تحت برش قرار گرفتند. با توجه به لزوم ایجاد شرایط زهکشی‌شده در حین برش و مطابق دستورالعمل ASTM D3080/D3080M-11 [۶] به‌عنوان مبنای انجام آزمون سرعت برش نمونه ۰/۰۲۵ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. جنس خاک، درشت یا ریزدانگی آن و خواص خمیری خاک از جمله عوامل تاثیرگذار بر انتخاب سرعت برش نمونه هستند. در جدول (۶) نتایج آزمایش برش مستقیم در درصد تراکم‌های نشان داده شده برای نمونه‌های ۱، ۲ از خاک محل و نمونه‌های مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت پودر انارک (A1) و پارس (E2) مشخص شده است.

جدول ۷: نتایج آزمایش برش مستقیم

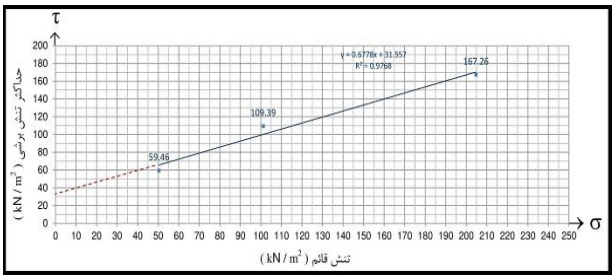
نمونه خاک مخلوط	درصد تراکم	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (کیلوپاسکال)
۱	۱۰۰	۳۴	۱۵/۷۶
۲	۱۰۰	۳۴	۳۱/۵۸
مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت A1	۹۰	۲۵	۶/۵۹
مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت E2	۹۰	۲۶	۱۴/۷۱

با توجه به این‌که درصد تراکم نمونه‌های بدون بنتونیت با نمونه‌های مخلوط با بنتونیت یکسان نیست، نمی‌توان از مقایسه این نتایج، اثر بنتونیت بر روی مشخصات مقاومتی خاک را با اطمینان تعیین نمود. اما با توجه به تفاوت در شاخص خمیری بنتونیت‌های افزوده شده به نمونه‌ها (بیشتر بودن شاخص خمیری بنتوینت E2 نسبت به A1)، در مورد نمونه‌های مخلوط با بنتونیت می‌توان نتیجه گرفت که بیشتر بودن شاخص خمیری باعث افزایش چسبندگی نمونه‌ی خاک می‌شود. این درحالیست که زاویه اصطکاک داخلی خاک در مخلوط‌های با بنتونیت دارای شاخص‌های خمیری متفاوت، تفاوت چندانی نداشته است. افزایش چسبندگی، که از نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر بوده با گزارشات و مقالات گذشته همخوانی مناسبی دارد [۷]. نمودار تنش‌های وارده بر نمونه‌های خاک‌های همگن و مخلوط خاک با بنتونیت در اشکال (۶) تا

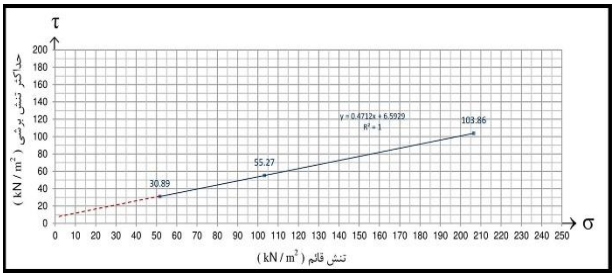
(۹) قابل مشاهده است. لازم به ذکر است عرض از مبدأ نمودار بیانگر چسبندگی و زاویه نمودار برش مستقیم نسبت به تنش قائم بیانگر زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد.



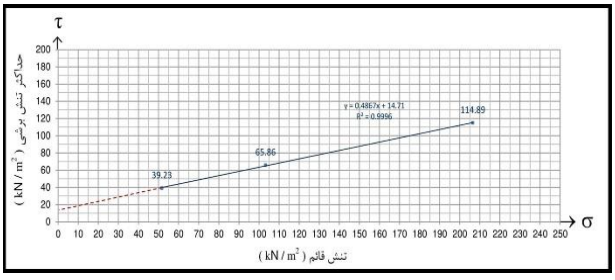
شکل ۶: نمودار آزمایش برش مستقیم خاک مخلوط ۱



شکل ۷: نمودار آزمایش برش مستقیم خاک مخلوط ۲



شکل ۸: نمودار آزمایش برش مستقیم خاک مخلوط با ۱۰٪ بنتونیت A1



شکل ۹: نمودار آزمایش برش مستقیم خاک مخلوط با ۱۰٪ بنتونیت E2

آزمایش نفوذپذیری

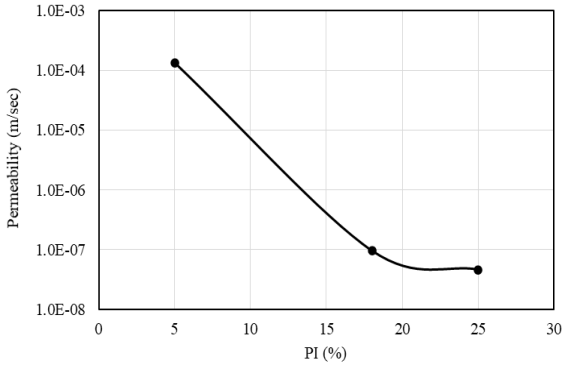
با توجه به نوع خاک‌های مورد آزمایش در پروژه حاضر و نفوذپذیری کم این خاک‌ها، برای تعیین نفوذپذیری آنها از آزمایش هد افتان استفاده شده است. این آزمون برای تعیین ضریب نفوذپذیری خاک در ضمن عبور جریان آرام آب از خاک‌های ریزدانه انجام می‌گیرد. در جدول (۷) نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها برای درصد تراکم‌های مشخص و مدت زمان اشباع‌سازی نمونه‌های خاک و نمونه‌های مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت پودر انارک (A1) و پارس (E2) مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد که خاک محل پس از اختلاط با هر دو نوع بنتونیت نفوذپذیری قابل قبولی برای استفاده در پوشش نفوذناپذیر خواهند داشت زیرا مقدار نفوذپذیری در هر دو مخلوط حاوی بنتونیت از مقدار توصیه شده در استاندارد برای این پوشش‌ها، یعنی ۷×۱۰^{-۷} سانتیمتر بر ثانیه کمتر است. نتایج جدول (۷) همچنین نشان می‌دهد که افزودن بنتونیت به خاک محل باعث کاهش نفوذپذیری خاک به میزان حدود ۱۰۰۰ برابر شده است. همچنین مخلوط حاوی بنتونیت E2 با شاخص خمیری بیشتر حدوداً نصف نفوذپذیری مخلوط حاوی بنتونیت A1 با شاخص خمیری کمتر می‌باشد.

جدول ۸: نتایج آزمایش تعیین نفوذپذیری

نمونه خاک مخلوط	بزرگترین سنگدانه (میلی‌متر)	شماره الک	زمان اشباع‌سازی (روز)	درصد تراکم	نفوذپذیری (سانتی‌متر بر ثانیه)
مخلوط کل نمونه‌ها	۹/۵	*۳:۸	۵	۹۰	$۱/۳۵\times۱۰^{-۶}$
مخلوط کل نمونه‌ها	۴/۷۵	۴	۱	۹۰	$۱/۹۸\times۱۰^{-۵}$
مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت A1	۹/۵	*۳:۸	۵ یا ۹	۹۰	$۹/۴۶\times۱۰^{-۸}$
مخلوط با ۱۰ درصد بنتونیت E2	۹/۵	*۳:۸	۵ یا ۹	۹۰	$۴/۵۸\times۱۰^{-۸}$

* الک با اندازه سه هشتم اینچ

با توجه به یکسان بودن درصد تراکم و بزرگ‌ترین اندازه سنگدانه نمونه‌ها می‌توان اثر بنتونیت بر روی نفوذپذیری نمونه‌ها را با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها بررسی نمود. در شکل (۱۰) اثر شاخص خمیری بر روی میزان نفوذپذیری نمونه‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که افزودن بنتونیت و در نتیجه افزایش شاخص خمیری باعث کاهش چشم‌گیر تراوایی نمونه خاک می‌گردد؛ لیکن تفاوت شاخص خمیری بنتونیت تاثیر کمتری نسبت به اثر وجود بنتونیت بر کاهش نفوذپذیری دارد.



شکل ۱۰: نمودار رابطه بین شاخص خمیری و نفوذپذیری نمونه‌های خاک

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

هدف اصلی از ارائه این مقاله، انجام آزمایشات مختلف نظیر دانه بندی، حدود اتربرگ و تک‌محوری با اضافه کردن دو نوع بنتونیت مختلف با خاک محل پسماندگاه برای رسیدن به خصوصیات موردنظر برای پوشش چندلایه دفن می باشد. در این راستا، پارامترهایی نظیر مقاومت فشاری تک محوری، تحکیم، خصوصیات تراکمی ارزیابی گردید. نتایج آزمایشات نشان‌داد، رابطه بین افزایش درصد بنتونیت و شاخص خمیری خاک به صورت خطی است، با افزودن بنتونیت تراکم پذیری نمونه‌ها افزایش داشته همچنین به دلیل پایین بودن وزن مخصوص بنتونیت باعث کاهش وزن مخصوص خشک نمونه‌ها شده اگرچه این موضوع باعث افزایش رطوبت بهینه می‌شود. در ازمایش مقاومت فشاری تک محوری مشاهده شد، با افزایش بنتونیت مقاومت فشاری افزایش می‌یابد تاثیر افزایش شاخص خمیری بنتونیت در این تغییر چشمگیر است البته انتظار می‌رود با افزایش میزان بنتونیت رفته رفته از شیب افزایش مقاومت کاسته شود. از آزمایش برش مستقیم می‌توان نتیجه گرفت افزایش شاخص خمیری تغییری در زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها ندارد اما افزایش آن باعث افزایش چسبندگی می‌شود. افزودن بنتونیت همانطور که تصور می‌شد در کاهش نفوذپذیری تاثیر چشمگیری دارد، با توجه آزمایشات در نمونه دارای شاخص خمیری بالاتر تا حدود نیمی از نمونه دیگر کاهش نفوذپذیری را شاهد هستیم.

مراجع

[1] W. Bastiaens, F. Bernier and X. Li, "SELFRAC: Experiments and Conclusions on Fracturing, Self-healing and Self-sealing Processes in Clays," Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, vol. 32, no. 8-14, pp. 600-615, 2007.

[2] M. H. Gleason, D. David E. and E. Gerald R., "Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications," Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, vol. 123, no. 5, pp. 438-445, 1997.

[3] D. J. D'Appolonia, "Soil-bentonite slurry trench cutoffs," Journal of the Geotechnical Engineering Division, vol. 106, no. 4, pp. 399-417, 1980.

[4] R. W. Day, "Discussion: Winter Effects on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay," Journal of Geotechnical Engineering, vol. 122, no. 1, pp. 85-88, 1996.

[5] S. Kumar and W.-L. Yong, "Effect of bentonite on compacted clay landfill barriers," Soil and sediment contamination, vol. 11, no. 1, pp. 71-89, 2002.

[6] ASTM D3080/D3080M-1, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, 2012.

[7] A. F. Ghazi, Engineering characteristics of compacted sand-bentonite mixtures, Edith Cowan University, 2015.