

تأثیر نانو ذرات بتونیت بر تغییر خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه

مینا صنایعی کرمانی^۱، محمدرضا نیکودل^{۲*}، علی ارومیه ای^۳

پذیرش مقاله: ۹۷/۰۷/۳۰

دریافت مقاله: ۹۷/۰۲/۰۳

چکیده

ویژگی‌های مهندسی مخلوط‌های خاکی مختلف، تحت تأثیر رفتار هر یک از اجزا می‌باشد. در این تحقیق تأثیر ذرات نانوبتونیت بر ویژگی‌های مهندسی مخلوط نانوبتونیت ماسه بررسی شده است. این مخلوط می‌تواند به عنوان مصالح مصرفی در ساخت لندفیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. برای ارزیابی تأثیر ذرات نانوبتونیت روی رفتار مکانیکی مخلوط نانوبتونیت ماسه (NBS)، آزمایشات تراکم استاندارد، برش مستقیم و نفوذپذیری بر روی ۱۰ نمونه انجام گردید. نمونه‌ها با نسبت ۰ تا ۱۰ درصد نانوبتونیت به ترتیب در مقابل ۱۰۰ تا ۹۰ درصد ماسه آماده سازی شده و مورد آزمایش تراکم قرار گرفت. وزن واحد حجم حداکثر و درصد رطوبت بهینه بدست آمده و سپس نمونه‌ها برای آزمایش برش مستقیم آماده سازی شدند. بر اساس نتایج برش مستقیم، بالاترین میزان چسبندگی مربوط به نمونه ۵ درصد نانوبتونیت و بالاترین زاویه اصطکاک داخلی مربوط به نمونه ۹ درصد نانوبتونیت بدست آمد. دو نمونه ۵ و ۹ درصد نانوبتونیت برای آزمایش نفوذپذیری به روش ثابت انتخاب شده و در ۴ حالت ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ درصد تراکم حداکثر، آزمایشات انجام شدند.

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانوبتونیت تا درصد مشخصی و همچنین افزایش درصد تراکم، میزان نفوذپذیری کاهش یافته و پارامترهای مقاومتی تغییر می‌نماید. بیشترین کاهش نفوذپذیری در ۹ درصد نانوبتونیت به دست آمده است. با افزایش درصد نانوبتونیت تا ۵ درصد، مقدار چسبندگی افزایش می‌یابد، اما افزایش بیشتر نانوبتونیت باعث افزایش زاویه اصطکاک داخلی می‌گردد. در نمونه ۵ درصد نانوبتونیت با افزایش تراکم، تا ۱۱۰ درصد، نفوذپذیری کاهش اندکی نشان می‌دهد، اما در ۱۲۰ درصد کاهش نفوذپذیری چشمگیر است. در نمونه ۹ درصد، کاهش نفوذپذیری با افزایش درصد تراکم کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: نانوبتونیت، ماسه، نفوذپذیری، تراکم، آزمایش برش مستقیم.

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران mona.sanayei@modares.ac.ir

۲. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۳. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس تهران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

در اکثر کشورها، روش اولیه برای دفن پسماندها، استفاده از لندفیل‌ها بوده که دارای خصوصیتی از جمله جلوگیری و کاهش مهاجرت مواد آلوده کننده به آب‌های زیرزمینی و محیط زیست را دارا می‌باشند (Steward et. al., 2003).

مخلوط ماسه بتونیت، یکی از مواردی است به طور وسیعی بعنوان آب‌بند برای جلوگیری از حرکت شیرابه‌ها در محل لندفیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ترکیب دارای مقاومت بالا و همچنین تراکم‌پذیری کم و هدایت هیدرولیکی پایین می‌باشد. این خصوصیت زمانی محقق می‌شود که مقدار کافی ماسه برای تامین پایداری مخلوط، و به اندازه کافی بتونیت برای نفوذناپذیر کردن منافذ ذرات ماسه، با یکدیگر ترکیب شده باشند (Tay et. al., 2001). مخلوط ماسه بتونیت بعلا کارآیی و صرفه اقتصادی بعنوان آب‌بند در لندفیل‌ها بوفور استفاده می‌شود (Dixon et. al., 1998). بتونیت موجود در مخلوط همچنین خاصیت کاهندگی شیمیایی بالایی دارد (Yong, 1999). مخلوط متراکم ماسه بتونیت نسبت به یخزدگی دارای حساسیت کم و در مقابل چرخه‌های خشک و تر شدن، پتانسیل تغییرات حجم پایینی دارد (Montanez, 1999). ماسه ساختار اصلی مخلوط متراکم را تشکیل می‌دهد (Iranian and Bilse, 2016).

هدایت هیدرولیکی مخلوط ماسه بتونیت، یکی از موارد مهم در استفاده از آنها بعنوان لایه آب بند در محل لندفیل می‌باشد. ضریب نفوذپذیری لایه لاینر لندفیل باید کمتر یا مساوی 10^{-9} متر بر ثانیه باشد (Dixon et. al., 1998; US EPA, 2012). مخلوط خاک ماسه بتونیت این شرایط را دارا می‌باشد. مقدار بتونیت در مخلوط می‌تواند بین ۵ تا ۲۰ درصد باشد. زیر ۵ درصد بتونیت، مخلوط خاک نفوذپذیری مناسب را تامین نمی‌کند و همچنین مستعد فرسایش است و بیشتر از ۲۰ درصد بتونیت خصوصیات مقاومتی مواد، تحت تأثیر بتونیت قرار می‌گیرد و تأثیر

مقاومتی ماسه کاهش می‌یابد (Dixon et. al., 1998). روند هدایت هیدرولیکی در مخلوط ماسه بتونیت بسیار متفاوت است. بتونیت هنگامی که در فضاهای خالی مخلوط قرار دارد دارای هدایت هیدرولیکی بالاتری نسبت به هدایت هیدرولیکی بتونیت به تنهایی است، علت این تفاوت توزیع متغیر بتونیت در فضاهای مخلوط و تفاوت در بافت می‌باشد (Borgesson et. al., 2002). بتونیت‌ها زمانی که در معرض آب قرار می‌گیرند، می‌توانند ده‌ها برابر حجم خشک‌شان متورم شوند (Jo et. al, 2001; Kolstad et. al., 2004; Komine, 2004). با تورم بتونیت فضاهای خالی کمی برای حرکت آب باقی‌مانده و در نتیجه هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد (Mitchel and Soga, 2005).

نوع بتونیت بر رفتار ذرات نانو تولیدی تأثیر دارد. بتونیت‌ها به دو دسته بتونیت‌های سدیم دار با تورم قابل ملاحظه و بتونیت‌های کلسیم دار با تورم کم تقسیم می‌شوند. (Murray, 1999; Manning, 1995).

بتونیت یک فیلسیلیکات آلومینیوم‌دار که عمدتاً از مونت-موریلونیت یا کانی‌های گروه اسمکتیت تشکیل شده است. مونت‌موریلونیت دارای ساختار ۲:۱ (۱ لایه تتراندری که توسط ۲ لایه اکتاندری دربرگرفته شده) می‌باشد (Grim, 1968; Mitchell, 1993; Manning, 1995; Brigatti et. al., 2006).

بتونیت‌ها بر اثر هوازگی و دگرسانی خاکسترهای آتش-فشانی و اغلب در حضور آب تشکیل می‌شوند. تجزیه خاکستر آتش فشان‌ی عمدتاً در محیط شور و باتلاقی انجام می‌شود و هر چه از آتش‌فشان دور شویم، ضخامت بتونیت کاهش می‌یابد (Van Olphen, 1977; Manning, 1995; Bergaya and Lagaly, 2006).

ریز ساختارهای بتونیت تأثیر مهمی روی رفتار تورمی آن دارد که این موضوع یک خصوصیت مهم در رابطه با اجرای مخلوط ماسه بتونیت به عنوان لایه آب‌بند در لندفیل می‌باشد. تراکم در محل با درصد رطوبت نزدیک به رطوبت

است. ذرات بنتونیت در مقیاس نانو ندرتاً مورد مطالعه قرار گرفته اند (Darvishi and Morsali, 2011). در این مطالعه با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی رفتار مهندسی مخلوط ماسه نانوبنتونیت در رابطه با استفاده از آنها به عنوان آب بند در لندفیل مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تغییراتی که در تراکم پذیری، مقاومت برشی و هدایت هیدرولیکی مخلوط رخ می‌دهد بررسی می‌شود.

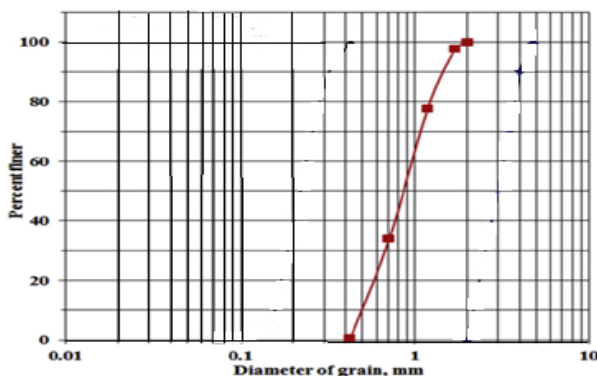
۲. مصالح مورد استفاده

۲-۱. ماسه

ماسه مورد استفاده در آزمایشات، ماسه سیلیسی با ذرات نیمه گرد شده است (شکل ۱). در شکل ۲ نمودار دانه بندی ماسه نشان داده شده است. آزمایشات تعیین خصوصیات فیزیکی طبق استاندارد (ASTM D422-63, D4253, D854) انجام شد.



شکل ۱. نمونه ماسه مورد استفاده در آزمایشات



شکل ۲. نمودار دانه بندی ماسه

بهینه انجام می‌شود. بیشتر آب موجود در مخلوط، در ارتباط با کانی رسی موجود در مخلوط است (BS 1377, 1990). امروزه از نانو تکنولوژی در شاخه های مختلف استفاده می‌شود. نانوذرات خاک با اندازه‌ای طور معمول بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر کوچکترین ذرات در محیط‌های خاکی می‌باشند (Yee et. al., 2009). نانوذرات بخاطر اندازه بسیار کوچکشان، مساحت سطح ویژه بالایی را دارا می‌باشند. از این رو بطور بسیار فعالی با دیگر ذرات خاک واکنش می‌دهند. به دلیل داشتن مساحت ویژه بالا، در صورت استفاده از آنها در محیط خاک، رفتار فیزیکی و شیمیایی و خصوصیات مهندسی خاک را بطور بسیار ویژه تحت تأثیر قرار می‌دهد (Gouping Zhang, 2000). اصلی ترین نانورس مورد استفاده در صنعت، مونت‌موریلونیت که دارای ساختار صفحه‌ای است، می‌باشد. مطالعات آزمایشگاهی قبلی بر روی انواع رس‌ها و مخلوط آنها با نانوذرات نشان می‌دهد که استفاده از نانورس سبب تغییرات حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده و هدایت هیدرولیکی رس می‌شود (رفیعی نیا و همکاران ۱۳۹۴، محمدزاده ثانی و همکاران ۱۳۸۹، kanalizade, et. al., 2011).

در سال‌های اخیر استفاده از نانوذرات بسیار مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از نانو ذرات در گل حفاری توسط محققین زیادی انجام شده است (Alzubaidi et. al., 2017). استفاده از نانورس در گل حفاری باعث کنترل فیلتر شدن و کاهش آن به میزان قابل توجهی می‌شود. (Taheri shakib, 2016). مطالعاتی در رابطه با استفاده از نانورس در مخلوط آسفالتی برای بهبود چسبندگی قیر و افزایش پایداری مارشال انجام شده است (جهرمی و همکاران، ۱۳۹۰). همچنین استفاده از نانوذرات در مهندسی شیمی و پلیمر مشاهده می‌شود. در مورد حذف آلاینده‌ها از خاک نیز مطالعاتی در استفاده از نانوذرات مشاهده شده

۲-۲. نانوبنتونیت

بنتونیت مورد استفاده، از فردوس در استان خراسان جنوبی تهیه شده است. برای تهیه نمونه نانوبنتونیت از دستگاه آسیاب گلوله سیاره ای استفاده شد. آزمایشات تعیین وزن واحد خشک حداکثر و حدود اتربرگ روی نمونه با از استاندارد ASTM (D698, D4318) تعیین شده است. بعضی از خصوصیات ماسه و بنتونیت در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خصوصیات ماسه و بنتونیت

بنتونیت	ماسه
حدروانی: ۳۶۵	درصد مواد ریز دانه: کمتر از ۱
حد خمیری: ۳۰	اندازه موثر ذرات (D10): ۰/۵
وزن مخصوص نسبی: ۲/۷	وزن مخصوص نسبی: ۲/۶۵
درصد رطوبت: ۱۱	درصد رطوبت: ۴/۵

برای تعیین ترکیب کانی شناسی و ترکیب شیمیایی نمونه بنتونیتی آزمایشات XRD و XRF انجام شد که در جدول ۲ اکسیدهای تشکیل دهنده نمونه بنتونیت، و در شکل ۳ طیف نگاری پراش اشعه ایکس نشان داده شده است.

وجود یون‌های سدیم و کلسیم بین لایه‌ای، تعیین کننده نوع مونت موریلونیت است. میزان Na₂O مربوط به یون‌های سدیم بین لایه‌ای در مونت موریلونیت و مقدار CaO مربوط به یون‌های کلسیم بین لایه‌ای مونت موریلونیت و همچنین

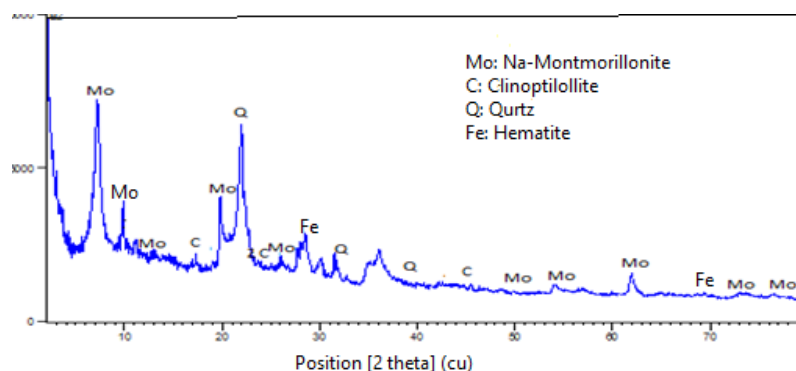
تشکیل دهنده کانی کلسیت است. با توجه به نتایج آنالیز شیمیایی این دو دارای مقدار نزدیک بهم هستند و مقداری از CaO بصورت کانی کلسیت نیز ظاهر شده است. با توجه به میزان Na₂O و همچنین میزان تورم نمونه که تورم ۲۲ میلی لیتر در ۲ گرم بنتونیت را نشان داده است، مونت-موریلونیت از نوع سدیم دار است

میزان SiO₂/Al₂O₃ برابر ۶/۸ است که این میزان بیشتر از ۵ است که نشان می‌دهد میزان سیلیس اضافه بر شبکه بلوری مونت موریلونیت وجود دارد. بنابراین کانی کوارتز نیز تشکیل می‌شود.

با توجه به طیف کانی شناسی که در شکل ۳ مشاهده می‌شود کانی‌های تشکیل دهنده نمونه بنتونیت شامل مونت-موریلونیت، کوارتز، کلینوپتیلولیت و هماتیت است.

جدول ۲. نتیجه آنالیز شیمیایی نمونه بنتونیت

عناصر	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	L.O.I
%	۷۰/۵	۱۰/۳	۲/۸	۳/۳	۱/۱	۰/۵	۳/۵	۰/۶	۰/۱	۶/۳



شکل ۳. طیف نگاری پراش اشعه ایکس نمونه بنتونیت

۳. آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام شده روی نمونه‌ها

۳-۱. آماده سازی نمونه

جمع‌آوری نمونه بتونیت در فصل خشک انجام شد و نمونه‌های مناسب و سالم تهیه شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس انتقال داده شد. با استفاده از چکش لاستیکی سنگ‌های بتونیتی به قطعات کوچک خرد شده و سپس با هاون پودر شدند. سپس نمونه بتونیت در قالب دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای قرار گرفته و بمدت ۱۰ ساعت به ذرات نانو تبدیل شدند. مخلوط ماسه بتونیت با نسبت‌های مختلف ۱۰۰، ۹۹، ۹۸، ... ۹۰ درصد ماسه به

ترتیب در مقابل ۲، ۱۰۰، ... ۱۰ درصد نانوبتونیت انتخاب شدند.

۳-۲. آزمایش تراکم استاندارد

آزمایش تراکم استاندارد طبق استاندارد ASTM D 698 روی نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف ماسه و نانوبتونیت انجام شد و درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر بدست آمد. نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نانوبتونیت، وزن واحد حجم و همچنین درصد رطوبت بهینه روند صعودی دارد. بالا رفتن درصد رطوبت بهینه، ناشی از خاصیت جذب آب نانوبتونیت است.

جدول ۳. نتایج آزمایش تراکم استاندارد

نانوبتونیت (%)	ماسه (%)	وزن واحد حجم خشک (kN/m ³ حداکثر)	درصد رطوبت بهینه (%)
0	100	16/5	5
1	99	16/52	7
2	98	16/56	9
3	97	16/58	12
4	96	16/61	13
5	95	16/64	15
6	94	16/66	17
7	93	16/66	18
8	92	16/7	19
9	91	16/73	20
10	90	16/77	22

۳-۳. آزمایش برش مستقیم

برای انجام آزمایشات برش مستقیم، ۱۱ نمونه مخلوط ماسه بتونیت با وزن واحد حجم خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه که از آزمایش تراکم بدست آمد، ساخته و بمدت ۲۴ ساعت در ظرف محصور قرار داده شد. شکل ۴ آماده سازی نمونه مخلوط ماسه نانوبتونیت و قرار گرفتن در قالب برش را نشان می‌دهد. سپس آزمایشات برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D 2080 انجام شدند.

آزمایشات در شرایط اشباع و با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفتند.

۳-۴. آزمایش نفوذپذیری

برای تعیین میزان هدایت هیدرولیکی آزمایش نفوذپذیری با روش ثابت طبق استاندارد ASTM D2434 انجام گرفت. ر این آزمایش میزان نفوذپذیری از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$K = QL/Aht \quad (1)$$



شکل ۴. آماده سازی نمونه برای آزمایش برش مستقیم

بیشترین مقدار را دارا می‌باشد. با افزایش ذرات نانوبنتونیت بیش از ۵ درصد میزان زاویه اصطکاک داخلی افزایش نشان می‌دهد. نانوبنتونیت موجود در مخلوط، باعث متصل کردن ذرات ماسه به یکدیگر و تشکیل ذراتی با قطر بیشتر شده و در نتیجه بالا رفتن زاویه اصطکاک داخلی و افزایش مقاومت مخلوط شده است.

نتایج مقدار چسبندگی روی نمودار نشان داده شده است. چسبندگی تا نمونه ۵ درصد روند افزایشی و پس از آن روند کاهشی نشان می‌دهد. در مقادیر کمتر از ۵ درصد نانوبنتونیت، نقش رفتار ذرات نانو برجسته‌تر می‌باشد. زیرا یک ذره با سطح ویژه بالا، رفتاری مشابه رفتار رسها از خود نشان می‌دهد.

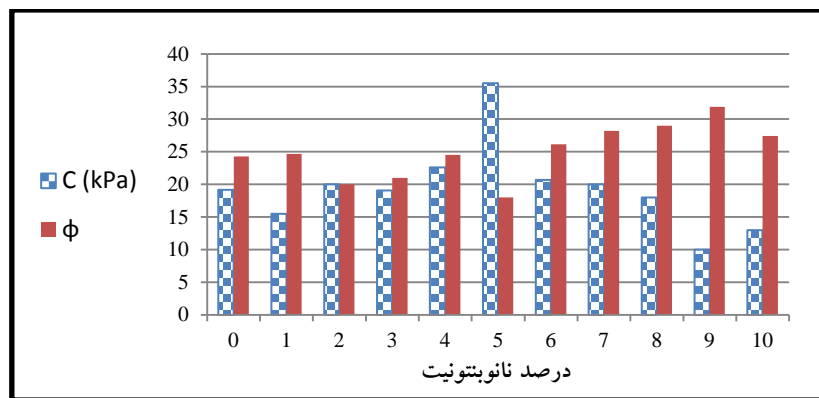
در این رابطه Q : حجم آب جمع آوری شده، L : طول ستون خاک، A : سطح مقطع ستون خاک، h : اختلاف هد هیدرولیکی و t زمان مورد نیاز برای جمع آوری حجم آب Q می‌باشد.

۴. بحث و نتایج

۴-۱. نتایج آزمایش برش مستقیم

آزمایشات برش مستقیم روی ۱۱ نمونه، با نسبت‌های مختلف ماسه نانوبنتونیت انجام شدند. تنش نرمال در ۳ سطح برابر با ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسگال اعمال شدند. نتایج پارامترهای مقاومت برشی شامل، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، در شکل ۵ آورده شده است.

همانطور که در شکل نشان داده شده است، زاویه اصطکاک داخلی در نمونه ۹٪ نانوبنتونیت در مقابل ۹۱ درصد ماسه،



شکل ۵. نتایج زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی حاصل از آزمایش برش مستقیم روی نسبت‌های مختلف مخلوط

۲-۴. نتایج آزمایش نفوذپذیری

با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم دو نمونه برای انجام آزمایش نفوذپذیری انتخاب شدند. نمونه ۱ با ۵ درصد نانوبتونیت در مقابل ۹۵ درصد ماسه که بالاترین چسبندگی را نشان داد و نمونه ۲ با ۹ درصد نانوبتونیت در مقابل ۹۱ درصد ماسه که بالاترین میزان زاویه اصطکاک داخلی را نشان داد. در شکل ۶ سلول نفوذپذیری شامل نمونه در حال انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

برای آزمایش نفوذپذیری چند حالت تراکم در نظر گرفته شد. آزمایشات روی نمونه ۱ و ۲ در حالت تراکم ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ درصد وزن واحد حجم حداکثر انجام شد. رطوبت در همه درصد های تراکم، رطوبت بهینه در نظر گرفته شده است. در جدول ۴ مقادیر وزن واحد حجم متناظر با درصد تراکم نشان داده شده است.

نتایج آزمایشات نفوذپذیری در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. شکل ۷ نمودار میزان نفوذپذیری برای نمونه ۱، را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است با افزایش تراکم از ۹۰ تا ۱۱۰ درصد کاهش نفوذپذیری به میزان کم صورت گرفته، اما با افزایش تا ۱۲۰ درصد تراکم، میزان نفوذپذیری کاهش قابل توجهی نشان داده است.

جدول ۴. مقادیر درصد تراکم و وزن واحد حجم خشک

برای نمونه ۱ و ۲

تراکم (%)	$\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	
	نمونه ۱	نمونه ۲
۹۰	۱۴/۹	۱۵
۱۰۰	۱۶/۶	۱۶/۷
۱۱۰	۱۸/۲	۱۸/۳
۱۲۰	۱۹/۹	۲۰

در شکل ۸ نمودار نفوذپذیری برای نمونه ۲، را نشان می‌دهد. با افزایش درصد تراکم، میزان نفوذپذیری کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان داده و در ۱۲۰ درصد تراکم، میزان نفوذپذیری به میزان $5/4 \times 10^{-9}$ متر بر ثانیه رسیده است. با توجه به اینکه میزان نفوذپذیری برای لاینرها در

محل لندفیل باید کوچکتر یا مساوی از 10^{-9} باشد، نمونه ۲، در تراکم ۱۲۰ درصد این شرط را دارا می‌باشد. تفاوت در هدایت هیدرولیکی می‌تواند متأثر از تخلخل و بافت ماسه و خصوصیات تورمی و توزیع ذرات نانوبتونیت در مخلوط باشد.

ریز ساختارهای نانوبتونیت تأثیر مهمی روی رفتار تورمی آنها نشان می‌دهد. با افزایش میزان نانوبتونیت و توزیع آن در فضاهای خالی بین ذرات ماسه، نانو ذرات بتونیتی با جذب آب، تبدیل به ساختارهای ژله ای و خوشه‌ای می‌شوند و فضاهای خالی را پر می‌کنند. با پر شدن فضاهای خالی میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

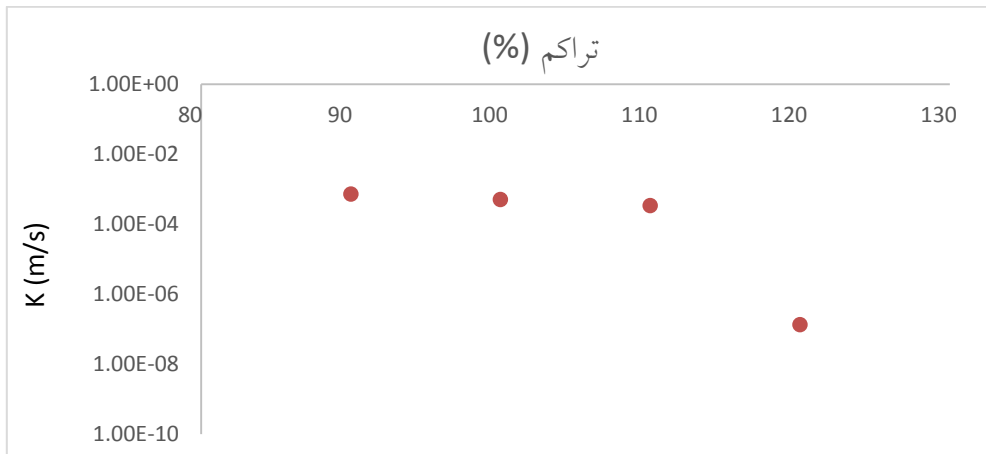
با افزایش درصد تراکم که با اعمال انرژی بیشتر، بدست می‌آید، فضاهای خالی در مخلوط کاهش پیدا می‌کند. با کاهش فضاهای خالی نسبت پوکی نمونه کاهش یافته و بافت پیوسته‌ای بین ذرات مخلوط، بوجود می‌آید. در این حالت سطح مقطع جریان کاهش یافته و مسیر جریان آب در نمونه، طولانی‌تر شده و در نتیجه میزان هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

با مقایسه نمودارها برای دو نمونه ۵ و ۹ درصد، در شرایطی که درصد تراکم یکسان را دارا می‌باشند، کاهش نفوذپذیری در نمونه ۲، با ۹ درصد نانوبتونیت بیشتر است. در ۱۱۰ درصد تراکم، نمونه ۲، چندین مرتبه کاهش نفوذپذیری بیشتری نسبت به نمونه ۱، را نشان می‌دهد.

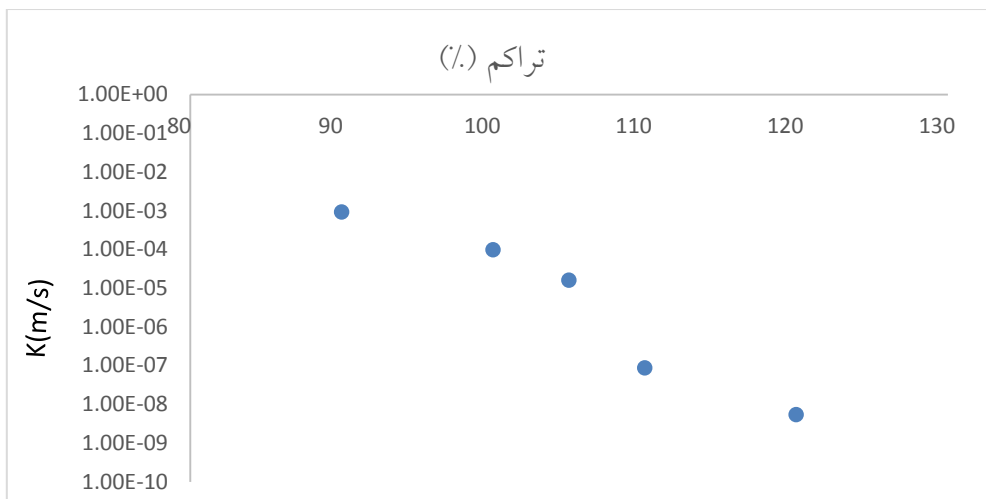
تفاوت کاهش نفوذپذیری در دو نمونه، حاکی از این است که کاهش نفوذپذیری با افزایش تراکم تأثیر کمتری نسبت به کاهش نفوذپذیری با افزایش نانوبتونیت دارد. با افزایش انرژی تراکم، میزان فضاهای خالی کاهش یافته و مسیر جریان طولانی‌تر شده اما کاملاً تراوایی را از دست نداده، در حالیکه با افزایش میزان ذرات نانوبتونیت و تلفیق با افزایش درصد تراکم میزان تراوایی، کاهش بیشتری یافته و هدایت هیدرولیکی کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان داده است.



شکل ۶. نمونه مورد آزمایش در سلول نفوذپذیری



شکل ۷. نمودار میزان هدایت هیدرولیکی برای نمونه دارای ۵ درصد نانوبنتونیت در مقابل ۹۵ ماسه در ۴ حالت ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰، و ۱۲۰ درصد تراکم



شکل ۸. نمودار میزان هدایت هیدرولیکی برای نمونه دارای ۹ درصد نانوبنتونیت در مقابل ۹۱ درصد ماسه در ۵ حالت ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰، و ۱۲۰ درصد تراکم

۶. نتیجه گیری

تأثیر نانوبنتونیت در مخلوط با ماسه از نظر تراکم پذیری، مقاومت برشی و نفوذپذیری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است:

۱. با افزایش درصد نانوبنتونیت، میزان درصد رطوبت

بعلت جذب بیشتر آب افزایش یافته و تراکم پذیری

و در نتیجه وزن واحد حجم مخلوط، افزایش پیدا

می کند.

۲. نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که بالاترین

میزان چسبندگی مربوط به نمونه ۵ درصد و

بالاترین درجه زاویه اصطکاک داخلی مربوط به

نمونه ۹ درصد نانوبنتونیت است. نانوبنتونیت باعث

چسبیدن ذرات ماسه به یکدیگر و تشکیل ذرات

بزرگتر شده و زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت

مخلوط را بالا برده است.

۳. آزمایش نفوذپذیری روی دو نمونه ۵ و ۹ درصد

نانوبنتونیت انجام شد. نتایج آزمایش نفوذپذیری

نشان داد که با افزایش درصد تراکم، میزان هدایت

هیدرولیکی کاهش نشان می دهد.

۴. با افزایش درصد نانوبنتونیت میزان هدایت

هیدرولیکی کاهش چشمگیری می یابد.

۵. میزان نفوذپذیری در شرایط یکسان درصد تراکم، در

نمونه ۹ درصد به میزان قابل توجهی کمتر از نمونه

۵ درصد نانوبنتونیت است.

۶. میزان کاهش هدایت هیدرولیکی با افزایش درصد

نانوبنتونیت، در مقایسه با افزایش درصد تراکم،

نشان دهنده تأثیر بیشتر نانوبنتونیت است.

۷. با توجه به نتایج به دست آمده، برای ساخت

لندفیل، افزودن بیش از ۵ درصد نانوبنتونیت به ماسه

می تواند کارایی لازم را داشته باشد. افزایش بیش از

۹ درصد ذرات نانو تأثیر مثبتی بر رفتار مخلوط

نخواهد گذاشت.

منابع

- رفیعی نیا، ا.، نیکودل، م. ر.، ارومیه‌ای، ع.، ۱۳۹۴. تأثیر کانی‌شناسی و اندازه ذرات رس‌های بتونیتی (میکرو تا نانو) بر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و کاربرد آن‌ها مطالعه موردی رس‌های دشت سه قلعه خراسان جنوبی، دانشگاه تربیت مدرس.
- محمدزاده ثانی، ا.، عربانی، م.، خداپرست حقی، ا.، جمشیدی چناری، ر.، ۱۳۸۹. تأثیر نانورس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه‌های رس‌دار. چهارمین همایش مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران.
- Al-zubaidi, N. S., Alwasiti, A. A., Mahmood, D., 2017. A comparison of nano bentonite and some nano chemical additives to improve drilling fluid using local clay and commercial bentonites. *Egyptian Journal of Petroleum*. 26, 811-818.
- ASTM., 2007. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken.
- Bergaya, F., Lagaly, G., 2000. General introduction: clays, clay minerals and clay science, in: F. Bergaya, B.K.G. Theng, G. Lagaly (Eds.), *Handbook of Clay Science*, Elsevier, Amsterdam, pp. 1–18.
- Borgesson, L., Johannesson, L.-E., Gunnarsson, D., 2002. Influence of soil structural in homogeneities on the behavior of backfill materials based on mixtures of bentonite and crushed rock. Presented at the Workshop on Clay Microstructure and its Importance to Soil Behavior, Lund, Sweden, Oct 15th to 17th.
- Brigatti, F., Galan, E., Theng, B.K.G. 2006. Structures and mineralogy of clay minerals, in: F. Bergaya, B.K.G. Theng, G. Lagaly (Eds.), *Handbook of Clay Science*, Elsevier, Amsterdam, pp. 19–86.
- British Standards Institute, BS 1377, 1990. *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes*. HMSO, London.
- Darvishi, Z., Morsali, A., 2011. Synthesis and characterization of nano bentonite by solvothermal method, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 377, pp. 15-19.
- Dixon, N., Murry, E J., Jones, D.R.V., 1998. *The design and control of bentonite enriched soils, geotechnical engineering of landfills*. Thomas Telford, London, 160p.
- Grim, R.E., 1968. *Clay Mineralogy*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York.
- Iravanian, A., Bilsel, H., 2016. Tensile Strength Properties of Sand-bentonite Mixtures Enhanced with Cement. *Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016)*
- Jo, H.Y., Katsumi, T., Benson, C.H., Edil, T.B., 2001. Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 127 (7), 557–567.
- Kanazadeh, N., Ebadi, T., Khoshniat, S. A., Mousavirizi, S. E., 2011. The positive Effects of nano clay on Hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate. *Clean-Soil, Air Water*, 39(7), 605-611.
- Kolstad, D., Benson, C., Edil, T., 2004. Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions. *J. Geotech.* 130, 1236–1249.
- Komine, H., 2004. Simplified evaluation for swelling characteristics of bentonites. *Eng. Geol.* 71, 265 279.
- Manning, D. A. C., 1995. *Introduction to Industrial Minerals*, Springer, Dordrecht. 276 p.
- Mitchell, J.K., 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*, 2nd ed. Wiley, New York.
- Mitchell, J.K., Soga, K., 2005. *Fundamentals of Soil Behavior*. 3rd Edition. John Wiley & Sons.
- Montanez, J.E.C., 2002. *Suction and Volume Changes of Compacted Sand-Bentonite Mixtures*. PhD thesis, University of London, Imperial College of Science, London, England.
- Murray, H. H., 1999. *Applied clay mineralogy today and tomorrow*. *Clay Mineral* 34, 39-49. . Nanoor.com
- Steward, D. I., Studds, P. G., Cousense, T. W., 2003. The factors controlling the engineering properties of bentonite-enhanced sand. *Applied Clay Science* 23, 97–110.
- Taheri Shakib, J., Kanani V., Pourafshari, P., 2016. Nano-clays as additives for controlling filtration properties of water– bentonite suspensions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138, 257-264.
- Tay, Y.Y., Stewart, D.I., Cousens, T.W., 2001. Shrinkage and desiccation cracking in bentonite– sand landfill liners. *Engineering Geology* 60, 263– 274.
- US EPA, 2012. *US Environmental Protection Agency. US Environ. Prot. Agency* 1, 1-15.
- Van Olphen, H., *An Introduction to Clay Colloid Chemistry for* John Wiley & Sons, New York, 1977.

-
- Yee Soong, Tran X. Phuoc, Minking K. Chyu, David K. Lyons, 2009. in: Technique Annual Meeting of AIChE.
- Yong, R.N., 1999b. Overview of modelling of clay microstructure and interactions for prediction of waste isolation barrier performance. *Engineering Geology* 54, 83–91.