

به کارگیری بنتونیت و آهک برای کاهش نفوذپذیری لایه آب بند مدفن زباله‌های شهری

محمودرضا عبدی^{۱*} و علی پارسا پژوه^۲

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک - مهندسین مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک (SES)

(تاریخ دریافت ۸۶/۲/۲۹، تاریخ دریافت اصلاح شده ۸۷/۴/۲۵، تاریخ تصویب ۸۷/۸/۲۴)

چکیده

مدفن مناسب باید با به کارگیری روش های اصولی مانع از نفوذ شیرابه و آلودگی خاک و آب های زیرزمینی شود. در این تحقیقات تأثیر آهک و بنتونیت بر نفوذ پذیری دو نوع خاک ماسه ای و رسی بررسی شده است. مصالح افزودنی بین صفر تا حداکثر ۹ درصد وزن خشک خاک متغیر بوده است. نتایج نشان داده که به کارگیری بنتونیت باعث کاهش نفوذپذیری ماسه شده است. در صورتی که آهک کارایی در کاهش این خصوصیت نداشته است. در نمونه رسی، آهک مصالح مؤثرتری نسبت به بنتونیت در کاهش نفوذ پذیری بوده و افزودن توأم بنتونیت و آهک، هر چند در کاهش نفوذپذیری مؤثر عمل کرده، اما در درصد های مشخص کارایی لازم را نسبت به آهک به تنهایی نشان نداده است. برای کاهش نفوذپذیری ماسه به کمتر از 10^{-7} cm/s مقدار بهینه بنتونیت ۸/۵ درصد و برای خاک رس مقادیر بهینه آهک و بنتونیت به ترتیب ۱/۷ و ۲/۷ درصد تعیین شده است.

واژه های کلیدی: مدفن، زباله، شیرابه، پوشش، آببند، بنتونیت، آهک

مقدمه

کار می‌روند، نفوذپذیری خیلی کم آنها بوده و طبق توصیه های مؤسسه USEPA باید کمتر از 10^{-7} cm/s باشد. رس متراکم به عنوان یکی از مهم ترین و ارزان ترین مصالح طبیعی برای ایجاد این لایه ها به کار می‌رود. در صورت نبود رس با نفوذپذیری کم در محل و در حالی که تهیه و حمل آن به محل مدفن نیز غیر اقتصادی تشخیص داده شود، اصلاح خاک طبیعی به عنوان یک گزینه مهم مطرح می‌شود. بدین منظور می‌توان خاک طبیعی را با افزودنی‌هایی از قبیل رس هایی با پلاستیسیته زیاد، بنتونیت، آهک و یا سیمان برای رسیدن به نفوذپذیری کم مخلوط و به عنوان مصالح لایه آب بند و یا پوشش به کار گرفت. مشخصات مورد نیاز یک لایه آب بند به این ترتیب است:

- در برابر نفوذ آب و شیرابه از نفوذ پذیری کمی داشته باشد.
- به مواد زائد که ممکن است باعث افزایش نفوذ پذیری شود، نفوذ پذیری کمی داشته باشد.
- قابلیت جذب اجزای آلوده کننده را داشته باشد.
- لایه های آب بند و پوشش باید قادر به تحمل تنش های زیاد ناشی از وزن توده زباله، نشست های نامتقارن، فشار

فعالیت های انسانی از همان روزگار اولیه همیشه منجر به ایجاد تغییرات در محیط زیست شده که در دهه‌های اخیر تأثیر این فعالیت ها سریع تر و مشخص تر شده است. با توجه به این که در حال حاضر امکان بازیافت تمامی زباله های تولید شده به دلیل هزینه زیاد و نیز محدودیت های تکنولوژی در عمل غیرممکن است، دفن زباله ها به عنوان یک راه حل عمومی برای دفع ضایعات به کار گرفته می‌شود. یک مدفن مناسب برای زباله ها باید با استفاده از روش های اصولی مانع از نفوذ شیرابه و آلودگی خاک و آبهای زیرزمینی در کوتاه مدت و دراز مدت شود [۳،۲۱]. یکی از مهم ترین مسائل در طراحی محل دفن به کار بردن تکنولوژیی است که از ورود شیرابه به محیط زیست جلوگیری و یا آن را کنترل کند. نقش مهندس ژئوتکنیک در این میان کنترل حرکت شیرابه ها و حفظ پایداری زمین در محل دفن است [۴،۲].

دفن زباله‌های شهری به صورت بهداشتی برای مدت طولانی بسیار پر اهمیت است. مهم ترین قسمت‌های یک مدفن بهداشتی برای کنترل آلودگی، وجود لایه آب بند و پوشش مناسب است. بارزترین مشخصه مصالحی که به عنوان لایه آب بند و پوشش به

ماسه انجام شده است [۱۳]. نتایج مطالعات نشان داده است که افزودن ۴ درصد آهک به خاک باعث کاهش در حدود ۵۰ درصدی انقباض حجمی و همچنین افزایش ضریب نفوذپذیری با 2 order of magnitude شده است. افزودن سیمان نیز باعث کاهش انقباض حجمی به میزان ۵۰ درصد و کاهش ضریب نفوذپذیری به میزان 2 order of magnitude شده است. همچنین افزودن ۴۰ تا ۵۰ درصد ماسه باعث کاهش انقباض و افزایش هدایت هیدرولیکی شده است. بر این اساس سیمان، مناسبترین مصالح برای کاهش انقباض و هدایت هیدرولیکی خاک‌های حاوی ایلیت و کائولینیت تا حد قابل قبول تشخیص داده شده است. ولی به کارگیری این مصالح به عنوان مصالح افزودنی باعث کاهش پلاستیسیته خاک و بنابراین ایجاد ظرفیت وقوع ترک در نتیجه تنش های برشی ناشی از سربار می‌شود.

نتایج تحقیقات انجام شده به منظور شناسایی راهکاری برای کاهش هدایت هیدرولیکی نمونه های ترک خورده گرفته شده از لایه های طبیعی رس و مخلوط رس و ماسه نشان داده است که هدایت هیدرولیکی از 10^{-5} cm/s به کمتر از 10^{-7} cm/s کاهش یافته است. برای این کار از گروت حاوی محلول ۸ درصد سیلیکات سدیم و گروت با ۲/۳ درصد بنتونیت استفاده شده است [۱۴].

با توجه به این توضیحات هدف از انجام این تحقیقات آزمایشگاهی به این ترتیب است:
- بررسی تأثیر درصدهای مختلف بنتونیت و آهک روی نفوذپذیری خاک‌های درشت دانه و ریزدانه.
- تعیین درصد بهینه مصالح افزودنی برای کاهش نفوذپذیری این خاک‌ها تا میزان 10^{-7} cm/s.

مصالح

در ارزیابی یک خاک بخصوص برای به کار گیری به عنوان لایه آب بند یا پوشش مدفن زباله، آزمایش‌های متفاوتی از قبیل حدود اتربرگ، نفوذپذیری در برابر آب، نفوذپذیری در برابر شیرابه و تعیین پارامترهای مقاومتی خاک مورد نیاز است. همچنین رابطه درصد رطوبت/دانسیتته خشک خاک به منظور مشخص کردن میزان رطوبتی که حداکثر دانسیته خشک خاک را به دست می‌دهد، الزامی است. تحلیل دقیق نتایج برای

هیدرواستاتیک، خزش و ترک های ناشی از خشک شدن و یخبندان-ذوب یخ نیز باشند [۵].

لایه‌های آب بند و به خصوص پوشش های رسی متراکم به شدت تحت تأثیر ترک های ناشی از خشک شدن قرار می‌گیرند. خصوصیات نفوذپذیری سازه‌های ساخته شده توسط این مصالح که به عنوان موانع غیرقابل نفوذ محیط زیستی به کار گرفته می‌شوند، می‌تواند تحت تأثیر ترک‌ها قرار گیرد. ترک‌ها باعث افزایش شبکه هدایت هیدرولیکی و سهولت نفوذ شیرابه و مایعات آلوده با نرخ بیشتری نسبت به محیط اطراف بدون ترک می‌شوند. به دلیل افزایش میزان رطوبت ناشی از نفوذ شیرابه و مایعات آلوده در خاک، تورم و نرم شدن آن حاصل می‌شود [۶]. تورم باعث اعمال نیروهای Up-lift در خاک و سازه‌های مستقر روی آن می‌شود، در حالی که نرم شدن، کاهش مقاومت برشی خاک را در پی دارد که ممکن است باعث بر هم خوردن پایداری سطوح شیبدار و یا تغییر در فشارهای جانبی خاک شود [۶،۷،۸]. مطالعات نشان داده که ضریب تراوایی لایه آب بند و پوشش غیر قابل نفوذ رسی به علت ترک خوردگی ناشی از خشک شدن و یا نشست نامتقارن به شدت افزایش و مقاومت خاک کاهش می‌یابد [۹،۱۰].

ترک‌های ناشی از خشک شدن، باعث تشکیل حفره‌ها در مقیاس ماکرو نیز می‌شوند. این پدیده در استفاده‌های محیط زیستی به دلیل تأثیر آن بر سفره آب زیرزمینی در ناحیه انتقالی پر اهمیت است. بر اساس مطالعات انجام گرفته، حفره‌ها در مقیاس ماکرو باعث تغییر در تمرکز آلاینده‌ها می‌شوند. این عمل به دلیل جریان عبوری که باعث افزایش نرخ انتقال می‌شوند اتفاق می‌افتد [۱۱].

پوشش‌های رسی در مدفن زباله ها نیز یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد مدفن است. خشک شدن باعث تشکیل ترک‌های انقباضی شده و از این راه مسیرهایی برای انتقال سهل تر و بیشتر رطوبت ناشی از بارندگی و غیره به درون مدفن و در نتیجه افزایش میزان شیرابه و نهایتاً افزایش ظرفیت آلاینده‌گی خاک و سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود [۱۲]. تحقیقاتی نیز به منظور کاهش انقباض حجمی خاک‌های رسی متراکم (حاوی کانی‌های Illite، Smectite و Kaolinite) با به کارگیری افزودنی های معمولی همانند آهک، سیمان و

با توجه به اینکه عامل واکنش را در آهک CaO موجود است، بنابراین تعیین مقدار آن الزامی بوده است. بر همین اساس آزمایش تجزیه حرارتی روی نمونه‌های معرف از آهک انجام و مشخص شد که مقدار اکسید کلسیم (CaO) موجود در حدود ۷۰ درصد است [۴]. عمده ترین ناخالصی‌های موجود در آهک مورد استفاده نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱: ناخالصی‌های موجود در آهک مورد استفاده.

مصالح	PI(%)	LL(%)	PL(%)
ماسه	NP	---	NP
رس	۱۷	۳۴	۱۷
بنتونیت	۱۸۰	۲۱۸	۳۸

جدول ۲: ناخالصی‌های موجود در آهک مورد استفاده.

نوع ناخالصی	(%)
Mg(OH) ₂	۲/۴۷۱
Al ₂ O ₃	۰/۴۲۹
SiO ₂	۰/۱۳۶
FeO	۰/۰۷۲
MgO	۰/۰۰۲

شرح و چگونگی انجام آزمایش‌ها

برای بررسی تأثیر مصالح افزودنی بر نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای و رسی، اختلاط‌های ارائه شده در جدول (۳) مطالعه شده‌اند.

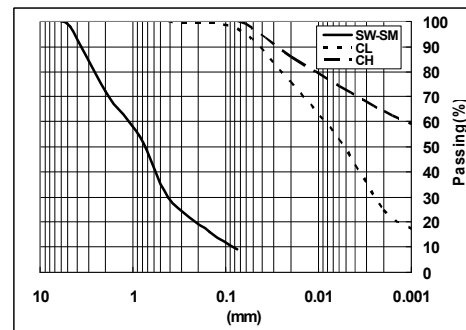
جدول ۳: اختلاط‌های مورد مطالعه.

افزودنی	(%)	ماسه	رس
بنتونیت (B)	۲	---	*
	۳	*	---
	۴	---	*
	۶	*	*
	۹	*	---
آهک (L)	۲	---	*
	۳	*	---
	۴	---	*
	۶	*	*
	۹	*	---
بنتونیت + آهک (B+L)	۲ B + ۲ L	---	*
	۳ B + ۳ L	*	*
	۴/۵ B + ۴/۵ L	*	---

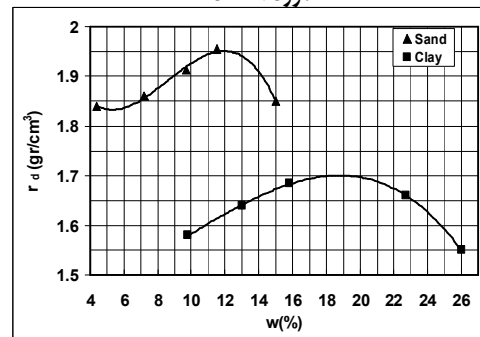
* اختلاط‌های مطالعه شده

شناسایی مشکلات احتمالی پر اهمیت بوده، چرا که بر اساس این نتایج، پیشنهادهایی درباره لایه آب بند و نحوه تراکم آن مشخص و ارائه می‌شود.

در این تحقیق دو نوع مصالح ماسه‌ای و رسی به عنوان نمونه‌ای از خاک‌های درشت دانه و ریزدانه و بنتونیت و آهک نیز به عنوان مصالح افزودنی برای کاهش نفوذپذیری مصالح مبنا تا مرز 10^{-7} cm/s مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای شناسایی خاک رس، ماسه و بنتونیت، آزمایش‌های مقدماتی از قبیل دانه بندی (ASTM: D422)، هیدرومتری (ASTM: D422-63)، حدود اتربرگ (ASTM: D4318-87)، درصد رطوبت (ASTM: D2216)، تراکم استاندارد (ASTM: D698) برای تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت بهینه خاک روی نمونه‌های معرف انجام گرفته است. نمودارهای توزیع دانه‌بندی در شکل (۱)، حدود اتربرگ و طبقه بندی خاک‌ها در جدول (۱) و منحنی‌های تراکم در شکل (۲) نشان داده شده است. بر اساس سیستم طبقه بندی یونیفاید (USCS) خاک ماسه‌ای در رده SW-SM یعنی ماسه خوب دانه بندی شده همراه سیلت، خاک رس در رده CL یعنی رس لای دار و بنتونیت در رده CH یعنی رس پر مایه طبقه بندی شده‌اند.



شکل ۱: منحنی دانه بندی، حدود اتربرگ و طبقه بندی مصالح مورد استفاده.



شکل ۲: منحنی تراکم نمونه‌های ماسه‌ای و رسی.

است. هدف از این عمل، جلوگیری از بروز اختلاف در نمونه ها و در نهایت نتایج تا حد امکان بوده است. آب مورد نظر برای تهیه نمونه ها مقدار رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش‌های تراکم استاندارد بوده که به طور تدریجی به خاک افزوده شده و عمل اختلاط تا به دست آمدن مخلوط یکنواخت و همگن با استفاده از همزن برقی ادامه یافته است. سپس مصالح طبق استاندارد ASTM D:698 در قالب ریخته و متراکم شده است.

آزمایش نفوذ پذیری

آزمایش سنجش نفوذپذیری طبق استاندارد ASTM D:2434 به روش ارتفاع متغیر و با استفاده از قالب پروکتور انجام شده است. ابعاد نمونه در قالب پروکتور دارای قطر ۱۰/۲ و ارتفاع ۱۱/۶ سانتی متر است. نمونه‌های ماسه‌ای همراه با افزودنی‌های مربوط به آن بعد از انجام عملیات تراکم، نصب متعلقات مربوط به آن روی قالب و سپس اشباع شدن مورد آزمایش قرار گرفته اند. با انجام حداقل پنج بار اندازه‌گیری با ارتفاع‌های مختلف، میانگین نتایج به عنوان ضریب نفوذپذیری نمونه ها تعیین شده است.

مطالعات مقدماتی انجام شده برای سنجش نفوذپذیری نمونه های رسی همراه با افزودنی‌های مربوط به آن نشان داد که به دلیل نفوذپذیری کم و ضخامت زیاد نیاز به زمانی به نسبت طولانی بیش از ۹۶ ساعت برای اشباع کردن نمونه‌ها است. به این دلیل نمونه‌های رسی به ضخامت ۲ سانتی‌متر با درصد رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک در قالب پروکتور تهیه و تحت عنوان نمونه‌های بازسازی شده آزمایش شدند. بدین ترتیب زمان مورد نیاز برای اشباع نمودن نمونه ها به ۲۴ ساعت تقلیل یافت که برای مقایسه در شکل (۳) نشان داده شده است. برای حصول اطمینان از درستی و همچنین تطبیق نتایج، از آزمایش تحکیم طبق استاندارد ASTM D:2435 نیز برای سنجش نفوذپذیری این نمونه‌ها استفاده شده است. آزمایش تحکیم طی دو مرحله بارگزاری تحت فشارهای ۲۵ و ۵۰ kN/m² انجام شده است.

با توجه به اینکه نفوذپذیری نمونه‌های غیر اشباع ممکن است تا حدود ۱۰ برابر کمتر از نمونه‌های کاملاً اشباع تعیین شوند (۱۶)، بر همین اساس تعیین زمان لازم برای اشباع کردن نمونه‌ها با طرح اختلاط متفاوت

افزودن آهک و بنتونیت با درصدهای مختلف باعث تغییر در میزان رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک خاک می‌شود. بر همین اساس آزمایش تراکم استاندارد ASTM D:698 روی نمونه های با طرح اختلاط‌های متفاوت انجام و خلاصه نتایج برای خاک ماسه‌ای و رسی در جدول (۴) ارائه و منحنی های تراکم مربوطه در بخش بعدی نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقادیر افزودنی کمتر از ۶ و ۴ درصد به ترتیب برای خاک ماسه‌ای و رسی تأثیر قابل ملاحظه ای بر رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک خاک نداشته، برای این طرح اختلاط ها از مقادیر پارامترهای به دست آمده برای ماسه و رس بدون مصالح افزودنی استفاده شده است. همچنین مشخصات تراکمی نمونه‌های رسی همراه با افزودنی بنتونیت به دلیل تغییرات ناچیز آن روی منحنی تراکم، همان مشخصات ذکر شده برای نمونه رسی مد نظر قرار گرفته است.

جدول ۴: خلاصه نتایج آزمایش های تراکم انجام شده روی نمونه های ماسه‌ای و رسی همراه با افزودنی‌های مربوطه.

ω_{opt} (%)	ρ_d (g/cm ³)	افزودنی		مصالح
		(%)	نوع	
۱۱/۴	۱/۹۵	---	---	ماسه
۱۳/۲	۱/۸۷	۶	B	
۱۴/۱	۱/۸۵	۹	B	
۱۱/۸	۱/۹۳	۶	L	
۱۲/۲	۱/۹۰	۹	L	
۱۲/۴	۱/۹۱	۳+۳	B+L	
۱۲/۹	۱/۸۸	۴/۵+۴/۵	B+L	رس
۱۸/۵	۱/۷۰	---	---	
۱۹/۸	۱/۶۲	۶	L	
۲۰/۲	۱/۵۶	۹	L	
۱۹/۵	۱/۶۵	۲+۲	B+L	
۱۹/۹	۱/۵۹	۳+۳	B+L	

نحوه تهیه نمونه‌ها

برای تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتداء مصالح مورد نیاز، طوری که برای ساخت همه نمونه‌های لازم از یک طرح اختلاط کفایت کند، را به طور دقیق وزن و سپس به صورت خشک به طور کامل با یکدیگر مخلوط و در کیسه‌های نایلونی در بسته نگهداری شده‌اند. برای ساخت نمونه در هر مرحله از این مخلوط استفاده شده

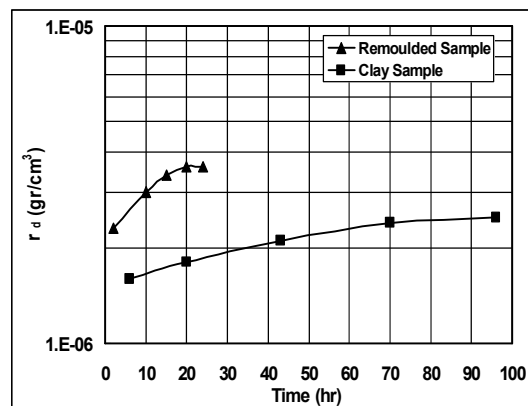
حداکثر به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد را داشته باشد.

جدول ۵: زمان مورد نیاز برای اشباع نمونه های ماسه ای و رسی همراه با نوع و درصد افزودنی ها.

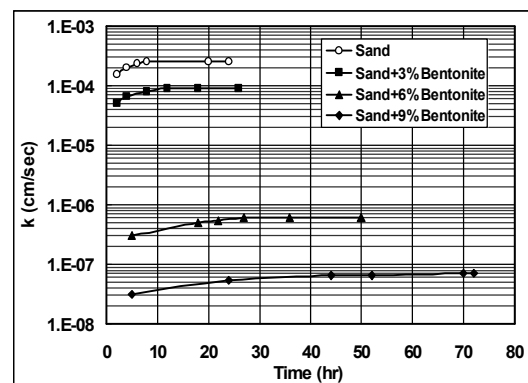
زمان اشباع (hr)	نمونه	افزودنی		$\frac{q}{R}$
		(%)	نوع	
۶	کامل	---	---	ماسه
۸	"	۳	B	
۴۸	"	۶	B	
۷۲	"	۹	B	
۲۴	"	۳ + ۳	B+L	
۴۸	"	۴/۵ + ۴/۵	B+L	
۶	"	۳	L	
۱۶	"	۶	L	
۲۶	"	۹	L	
---	---	---	---	
۲۴	Remolded	---	---	رسی
۳۲	"	۲	B	
۴۸	"	۴	B	
۶۴	"	۶	B	
۴۸	"	۲ + ۲	B+L	
۶۲	"	۳ + ۳	B+L	
۴۸	"	۲	L	
۶۴	"	۴	L	
۷۲	"	۶	L	
۹۶	نمونه کامل	---	---	

شکل های (۵-a، ۵-b، ۵-c) منحنی های تراکم ماسه همراه با مصالح افزودنی بنتونیت، آهک و بنتونیت و آهک به صورت توام را نشان می دهند. نتایج حاصل از انجام آزمایش های تراکم استاندارد روی نمونه ماسه ای حاوی درصد های مختلف بنتونیت و آهک به صورت مجزاء و توام به عنوان مصالح افزودنی، نشان می دهد که با افزایش درصد این مصالح افزودنی، رطوبت بهینه افزایش و حداکثر دانسیته خشک مخلوط کاهش می یابد. این تغییرات را می توان به افزایش درصد ذرات ریزدانه در مخلوط و در نتیجه افزایش رطوبت بهینه و کاهش دانسیته خشک آن مرتبط دانست. در نمونه های حاوی بنتونیت به علت قابلیت جذب و تورم زیاد، این تغییرات در مقایسه با آهک بیشتر است. با افزودن توام آهک و بنتونیت و به علت وقوع واکنش های پوزولانی بین ذرات بنتونیت و آهک و تشکیل مواد سیمانی، تأثیر آن نسبت به بنتونیت به تنهایی کمتر است.

قبل از شروع آزمایش های نفوذ پذیری الزامی بود. نمونه ای از تغییرات ضریب نفوذ پذیری نسبت به زمان اشباع شدن در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده می گردد که برای همه نمونه ها با افزایش زمان اشباع شدن قبل از شروع آزمایش، ضریب نفوذ پذیری خاک ابتدا قدری افزایش و سپس به یک شرایط ثابت و پایدار می رسد. در جدول (۵) نیز خلاصه زمان های مورد نیاز برای اشباع نمودن تمامی نمونه های ماسه ای و رسی همراه با افزودنی های مورد مطالعه ارائه شده است.



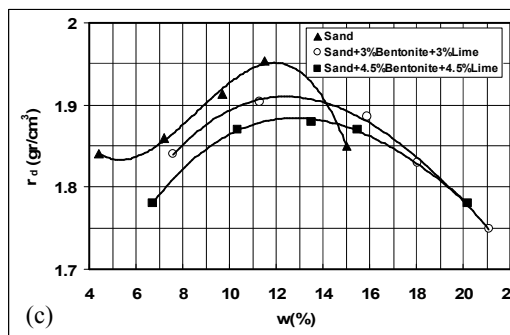
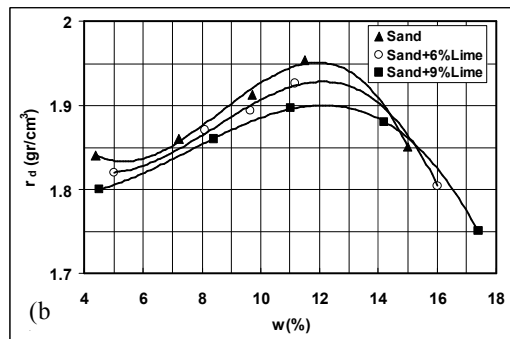
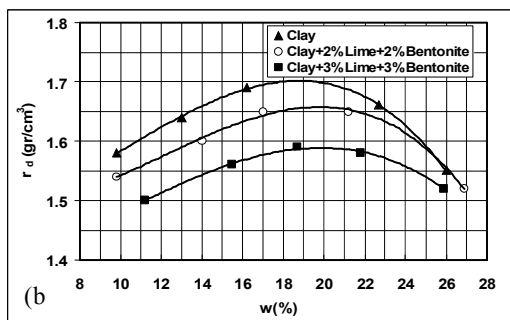
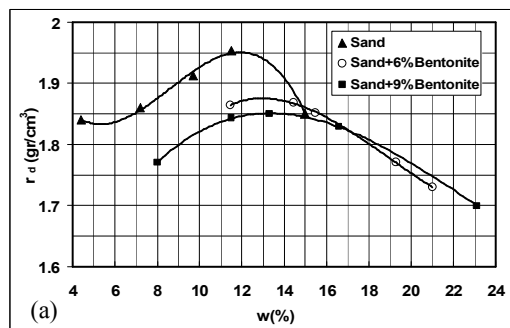
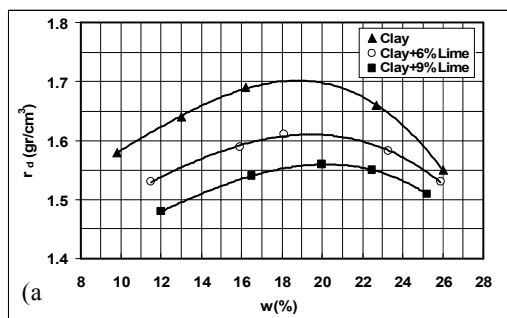
شکل ۳: مقایسه زمان لازم برای اشباع نمونه رسی کامل و نمونه بازسازی شده.



شکل ۴: تغییرات ضریب نفوذ پذیری نسبت به زمان اشباع برای ماسه همراه با درصد های مختلف بنتونیت

نتایج آزمایش تراکم

بر اساس پیشنهاد مؤسسه USEPA لایه های آب بند و پوشش مدفن باید از نفوذ پذیری خیلی کم و همچنین دانسیته خشک مناسب بهره مند باشند. بر همین اساس لایه آب بند باید حداقل ۹۵ درصد دانسیته خشک



شکل ۶: تغییرات دانسیته خشک نسبت به درصد رطوبت برای رس با درصد مختلف آهک.

شکل ۵: تغییرات دانسیته خشک نسبت به درصد رطوبت برای ماسه با درصد افزودنی‌های مختلف.

در صورت افزودن آهک یا سیمان به تنهایی به خاک، به واسطه ریز بودن این مصالح، فضاهای خالی بین ذرات خاک پر شده و بدین ترتیب سبب افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک خاک می‌شوند [۲۲].

تغییرات ضریب نفوذپذیری با انرژی تراکم

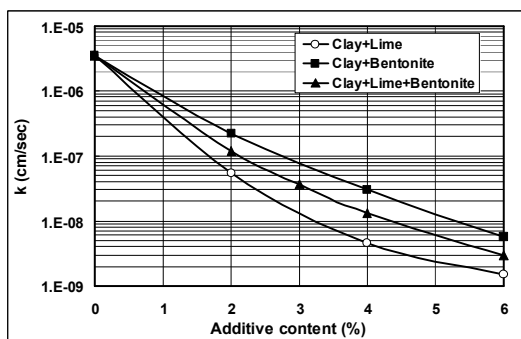
یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر ضریب نفوذپذیری یک خاک میزان تراکم است؛ به دلیل این که نمونه‌های مورد مطالعه اغلب از ماسه و رس تشکیل شده اند، بنابراین تأثیر میزان تراکم فقط روی این خاک‌ها بدون مصالح افزودنی بررسی شده‌اند. بدین منظور نمونه‌های ماسه ای و رسی با درجه تراکم کمتر از مقدار استاندارد یعنی با تعداد ضربات چکش ۲۰ ضربه در هر لایه ولی با همان درصد رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته اند. (شکل ۷) تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به درجه تراکم را برای خاک‌های ذکر شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش درجه تراکم، نفوذپذیری خاک کاهش یافته است. با افزایش انرژی تراکمی، ذرات قابلیت جا به جایی بیشتری داشته و بنابراین به یکدیگر نزدیکتر شده و بدین ترتیب باعث کاهش نسبت تخلخل و اندازه متوسط حفره‌ها

در شکل (۶-ا، ۶-ب، ۶-ج) نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد روی نمونه‌های رسی با درصد‌های مختلف آهک و بنتونیت به صورت توأم به عنوان مصالح افزودنی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزودن آهک به تنهایی باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش دانسیته خشک حداکثر نمونه رسی شده است که همین رفتار برای نمونه‌های حاوی آهک و بنتونیت به صورت توأم نیز صادق است. کاهش در دانسیته خشک حداکثر را می‌توان ناشی از تشکیل سریع مواد سیمانی که باعث ایجاد پیوند های ضعیف بین ذرات و بنابراین کاهش تراکم پذیری مخلوط دانست [۱۹].

آن تنها با اشغال بخشی از فضاهای خالی بین ذرات ماسه توانسته اند باعث کاهش ضریب نفوذپذیری شود. بنتونیت با توجه به ریزدانه بودن ذرات و هم چنین قابلیت جذب رطوبت و تورم قابل ملاحظه، در کاهش نفوذپذیری ماسه بسیار موثرتر بوده است.

تأثیر مصالح افزودنی بر ضریب نفوذپذیری رس

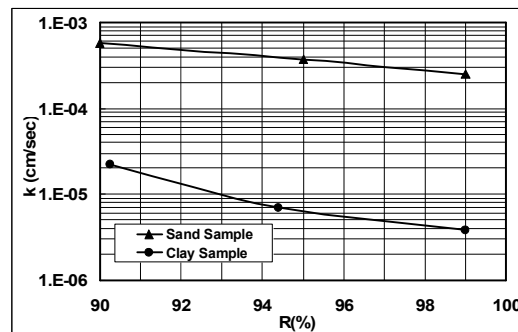
مصالح افزودنی آهک، بنتونیت و آهک و بنتونیت به طور همزمان، نسبت به ماسه در کاهش ضریب نفوذپذیری خاک رس بسیار مؤثرتر بوده اند. با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود که با یک درصد ثابت از مصالح افزودنی، اختلاف زیادی در ضرائب نفوذپذیری به دست نیامده و همه نمونه‌ها از یک Order of Magnitude برخوردار می‌باشند. نکته جالب توجه درباره خاک رس اینکه افزودنی آهک نسبت به بنتونیت و بنتونیت و آهک به صورت توأم مؤثرتر بوده است. دلیل تأثیر کمتر بنتونیت نسبت به آهک در کاهش نفوذپذیری خاک رس را شاید بتوان بسیار ریزدانه بودن ذرات و دشواری اختلاط کامل آن با خاک رس بیان کرد.



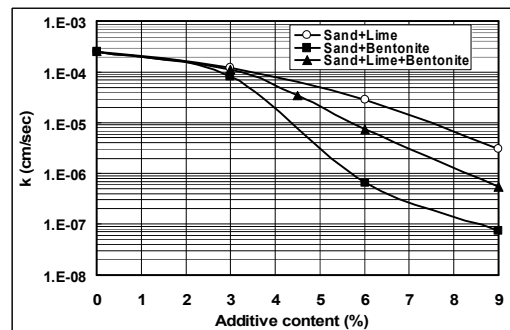
شکل ۹: مقایسه تغییرات نفوذپذیری نمونه‌های رسی حاوی بنتونیت و آهک، بصورت مجزا و توأم.

کاهش نفوذپذیری خاک رس توسط آهک را می‌توان ناشی از واکنش‌های پوزولانی بین ذرات رس حاوی سیلیس و آلومین دانست که به شدت تحت تأثیر عواملی از قبیل درصد آهک، زمان و دمای عمل آوری قرار می‌گیرند. با افزودن آهک به خاک، pH محیط افزایش یافته و به طور تقریبی به ۱۲/۴ می‌رسد. افزایش pH باعث حل شدن سیلیکات و آلومینات موجود در خاک رس شده و با آزاد شدن این واحدها از خاک رس، ترکیب آنها با کلسیم میسر می‌شود. این واکنش‌ها باعث تشکیل ژل‌های سیمانی هیدرات‌های سیلیکات کلسیم (C-S-H)، آلومینات

و ایجاد توده‌ای همگن‌تر شده است. همچنین با افزایش میزان ذرات جامد خاک در واحد حجم و کاهش حجم فضاهای خالی بین ذرات، دانسیته خشک افزایش و ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد. برای نمونه رسی می‌توان گفت که با افزایش انرژی تراکمی، ساختار خاک از حالت لخته‌ای (Flocculated) به حالت پراکنده (Dispersed) میل کرده و بدین ترتیب باعث کاهش ضریب نفوذپذیری می‌شود.



شکل ۷: تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به درجه تراکم برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی.

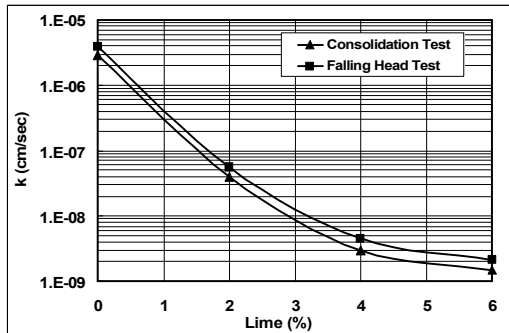


شکل ۸: مقایسه تغییرات نفوذپذیری نمونه‌های ماسه‌ای حاوی بنتونیت و آهک، به صورت مجزا و توأم.

تأثیر مصالح افزودنی بر ضریب نفوذپذیری ماسه

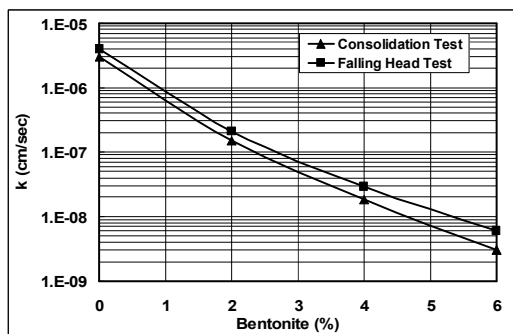
در شکل (۸) تأثیر مصالح افزودنی آهک، بنتونیت و آهک و بنتونیت به صورت توأم بر نفوذپذیری خاک ماسه‌ای نشان داده شده است. به طور کلی می‌توان گفت که مصالح افزودنی مورد مطالعه باعث کاهش ضریب تراوایی ماسه شده اند. در این میان آهک کم اثرترین، بنتونیت موثرترین و آهک و بنتونیت به صورت توأم حالت بینابینی داشته است. آهک نه تنها قادر به انجام واکنش با ماسه، که اغلب از کوارتز تشکیل شده نیست بلکه قابلیت جذب آب و تورم آنچنانی را نیز ندارد. بنابراین و لذا ذرات

مورد مطالعه به روش بار افتان ۱/۷ درصد و به روش آزمایش تحکیم ۱/۶ درصد تعیین شده است. درصد مصالح افزودنی که باعث کاهش ضریب نفوذپذیری خاک به کمتر از 10^{-7} cm/s شده، به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰: مقایسه نفوذپذیری حاصل از آزمایش‌های تحکیم و بار افتان (رس+آهک).

افزودن بنتونیت به خاک رس نیز تأثیری مشابه رفتار فوق را داشته که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد بنتونیت و در نتیجه اشغال بخش بیشتری از حجم حفره‌های بین ذرات رس و تورم ناشی از جذب رطوبت، نفوذپذیری به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. برای خاک رس مورد مطالعه، مقدار بهینه بنتونیت در آزمایش بار افتان ۲/۷ درصد و در آزمایش تحکیم ۲/۳ درصد تعیین شده است که اختلاف زیادی نیست.



شکل ۱۱: مقایسه نفوذپذیری حاصل از آزمایش‌های تحکیم و بار افتان (رس+بنتونیت).

افزودن توأم آهک و بنتونیت به خاک رس نیز در هر دو آزمایش بار افتان و تحکیم، نتایج همخوان و تقریباً یکسانی به دست داده است (شکل ۱۲)). برای نمونه‌های مطالعه شده به خوبی می‌توان دید که با افزایش درصد

کلسیم (C-A-H) همراه با کربنات کلسیم در حضور CO₂ موجود در هوا می‌شود. تشکیل و رشد این ترکیبات شیمیایی نه تنها باعث پیوند بین ذرات و افزایش مقاومت مخلوط رس - آهک شده، بلکه باعث مسدود شدن و یا اشغال بخشی از حجم حفرات نیز می‌شود که کاهش نفوذپذیری را در پی دارد [۱۹،۲۱].

در سیستم‌های سیمانی کاهش در نفوذپذیری ناشی از تشکیل ژل‌های سیمانی است. در نتیجه تشکیل این ژل‌ها اندازه حفره‌های ریزتر و در نتیجه به صورت کلی پوکی خاک کاهش می‌یابد. در چنین سیستم‌هایی که توزیع گسترده‌ای در اندازه حفره‌هایی وجود دارد، نفوذپذیری بیشتر تحت تأثیر حجم حفرات بزرگ‌تر قرار گرفته و حفرات ریزتر تأثیر خیلی کمی بر جریان دارند. بر اساس تحقیقات انجام شده، اندازه حفرات ژل‌ها بسیار ریز و بین ۱ تا ۱۰۰ nm متغیر بوده و نفوذ پذیری آنها بسیار کم و در حدود 10^{-16} تا 10^{-15} گزارش شده است [۱۷، ۱۸].

افزایش مقاومت، کاهش پوکی و بنابراین کاهش نفوذپذیری مخلوط خاک رس-آهک در نتیجه تشکیل مواد سیمانی به طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش مقاومت مخلوط در برابر یخبندان نیز می‌شود. نفوذ پذیری همراه با توزیع دانه بندی، در دسترس بودن آب و زمان یخبندان از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مکانیزم و گستردگی یخبندان است [۲۰].

تعیین نفوذپذیری نمونه رسی با استفاده از آزمایش تحکیم

تغییرات میزان نفوذپذیری برای خاک رس در نتیجه افزودن درصدهای مختلف آهک برای مقایسه نتایج حاصل از آزمایش‌های بار افتان و تحکیم، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که همخوانی بسیار خوبی بین نتایج حاصل از آزمایش‌های مذکور به دست آمده و اختلاف جزئی قابل قبول است. تحت یک درصد ثابت مواد افزودنی در کل نتایج حاصل از این آزمایش‌های تحکیم انجام شده بر روی نمونه‌های رسی مخلوط شده با آهک قدری کمتر از نتایج حاصل از آزمایش‌های بار افتان بوده است. علت این رفتار احتمالاً اشباع کاملتر نمونه‌ها در آزمایش تحکیم قبل از شروع آزمایش بوده است. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار بهینه آهک برای خاک رس

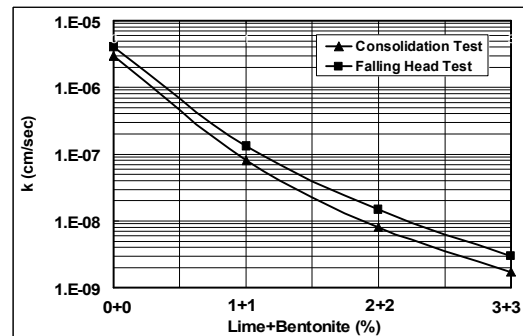
۱ - نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که به کارگیری بنتونیت در کاهش نفوذپذیری ماسه مؤثر بوده، در صورتی که آهک به دلیل نداشتن امکان واکنش با ذرات سیلیسی ماسه مؤثر نبوده است. اختلاط توام آهک و بنتونیت نیز در مقایسه با اختلاط بنتونیت به تنهایی کارایی لازم را در کاهش نفوذپذیری نشان نداده است.

۲- آهک بسیار مؤثرتر از بنتونیت در کاهش نفوذپذیری خاک رس عمل کرده است. اختلاط توام بنتونیت و آهک هر چند در کاهش نفوذپذیری مؤثر بوده است، اما در درصد‌های مشخص کارایی لازم را نسبت به آهک مجزا نشان نداده است. واکنش آهک با رس باعث تشکیل هیدرات‌های سیلیکات و آلومینات کلسیم می‌شود که این ترکیبات باعث پیوند ذرات، اشغال حفره‌ها و در نتیجه کاهش نفوذپذیری می‌شود. با تشکیل ژل‌های سیمانی اندازه حفره‌ها ریزتر و در نتیجه به صورت کلی پوکی خاک کاهش می‌یابد.

۳- افزودن آهک به خاک‌های رسی سبب می‌شود که به طور قابل ملاحظه‌ای خصوصیات تورمی - انقباضی این خاک‌ها کاهش یابد. علت این کاهش، کم شدن میل به جذب آب توسط دانه‌های رس اشباع شده از آهک و هم‌چنین به وجود آمدن یک استخوانبندی از مواد سیمانی است که در برابر افزایش و یا کاهش حجم مصالح در اثر تغییرات رطوبت مقاومت می‌کند. این موضوع از بروز ترک‌های انقباضی ناشی از خشک شدن جلوگیری به عمل می‌آورد.

۴- بر اساس معیارهای USEPA برای رسیدن به حداقل ضریب نفوذپذیری 10^{-7} cm/s مقدار بهینه بنتونیت برای ماسه ۸/۵ درصد تعیین شده است. برای خاک رس مقادیر بهینه بنتونیت ۲/۷ درصد، آهک ۱/۷ درصد و آهک و بنتونیت به صورت توأم ۲/۲ درصد تعیین شده است. شایان ذکر است که در صورتی که به کارگیری آهک و یا بنتونیت برای کاهش نفوذپذیری بسترهای طبیعی در محل دفن زباله‌های شهری مد نظر باشد، مطالعات اختصاصی برای مشخص کردن تأثیر و تعیین مقادیر بهینه برای خاک محل الزامی است.

مصالح افزودنی، نفوذپذیری مصالح به شدت کاهش می‌یابد. در این نمونه‌ها مقدار بهینه مصالح افزودنی برای هر دو روش به طور تقریبی ۱+۱ درصد بوده است. با توجه به ضخامت کم نمونه‌ها (۲ سانتی متر)، می‌توان گفت که درجه تراکم و بنابراین نسبت تخلخل نمونه‌ها یکنواخت‌تر بوده و بر همین اساس نتایج به دست آمده نیز همخوانی به نسبت خوبی دارند.



شکل ۱۲: مقایسه نفوذپذیری حاصل از آزمایش‌های تحکیم و بار افتان (رس+آهک+بنتونیت).

جدول ۶: مقادیر بهینه مصالح افزودنی برای کاهش میزان نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای و رسی به کمتر از 10^{-7} cm/s.

درصد بهینه	افزودنی	مصالح
۸/۵	B	ماسه
*	L	ماسه
*	L+B	ماسه
۲/۷	B	رس
۱/۷	L	رس
۲/۲	L+B	رس

* عدم کارایی مؤثر در کاهش نفوذپذیری

خلاصه مقادیر بهینه مصالح افزودنی به منظور کاهش میزان نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای و رسی به کمتر از 10^{-7} cm/s بر اساس توصیه موسسه USEPA در جدول (۶) ارائه شده است.

نتیجه گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق نتایج کلی در زیر حاصل گردیده است:

مراجع

1 - Broomand, F. (1991). "International education of environment." National commission of UNICEF in Iran.

- 2 - Omrani, G.A. (1995). *The waste solid materials, Managing of collecting and transportation*. Azad University Publishes.
- 3 - Davoodian, L. (1980). *The effect of burying waste solid materials of Tehran in quality of underground and surface water of landfill areas in Kahrizak and Abali road*. Thesis for master's degree, Tehran University.
- 4 - Shomali, M. (2001). *Investigation on methods of decreasing the permeability of liner and cover in landfills*. Thesis for master's degree, Civil Engineering faculty, Khaje Nasir-e-dine Toosi University of technology.
- 5 - Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S. (1993). *Integrated solid waste management, Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill.
- 6 - Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of soil behavior*. Wiley, New York.
- 7 - Fredlund, D. J. and Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. Wiley, New York.
- 8 - Bosscher, P.J. and Connel, D.E. (1988). "Measurements and analysis of jointing properties in fine grained soils." *J. Geotech. Eng.*, Vol. 114, No. 7, PP. 826-843.
- 9 - Miller, C.J. (1988). "Field investigation of clay liner movement." *Hazard. Waste Hazard, Mater*, Vol. 5, No. 3, PP. 231-238.
- 10 - Miller, C. J. and Mishra, M. (1989). "Modeling of leakage through cracked clay liners- I: State of the Art." *Water Resources Bull., Am. Water Resour. Assoc.*, Vol. 25, No.3, PP. 551-555.
- 11 - Freeze, R.A. and Cherry, J. (1979). *Ground water*, Prentice - Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- 12 - Miller, C. J., Hong, M. and Yesiller, N. (1998). "Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners." *J. Am. Water Resour. Assoc.*, Vol. 34, No. 3, PP. 677-684.
- 13 - Omid, G. H., Prasad, T. V., Thomas, J. C. and Brown, K. W. (1996). "Influence of amendments on the volumetric shrinkage and integrity of compacted clay soils used in landfill liners." *Water, Air Soil Pollution*, Vol. 86, No. 1-4, PP. 263-274.
- 14 - Leung, M. and Vipulanandan, C. (1995). "Treating contaminated cracked and permeable field clay with grouts." *Proc. Speciality Conf. on Geotechnical Practice in Waste Disposal*, Geotechnical Special Publication, ASCE, New York, PP. 829-843.
- 15 - Wild, S. Arabi, M. and Rowlands, G. O. (1987). "Relation between pore size, distribution, permeability and cementitious gel in cured clay-lime system." *Materials Science and Technology*, December, Vol. 3.
- 16 - Bell, R., Mac-Gregor, P. and Stapledon, D. "Geotechnical engineering of embankment dams." Section 6, Part 3.
- 17 - Nyame, B. K. and Illston, J. M. (1981). *Mag. Concr. Res.*, BVol. 33, No.116, PP. 139-146.
- 18 - Marsh, B. K., Day, R. L. and Bonner, (1985). *Cem. Concr. Res.*, Vol. 15, PP. 1027-1038.
- 19 - Arabi, M., (1987). *Fabric and strength of clays stabilized with lime*. Ph.D. Thesis, the Polytechnic of Wales, U.K.
- 20 - Townsend, D.L. and Klym, T.W. (1966). "Durability of lime stabilized soils." *Highway Res. Rec.* No. 139, H.R.B., PP. 25-41.
- 21 - Bell, F.G. (1993). "Engineering treatment of soils." *E & FN Spon*, London, 302p.
- 22 - Wang et al. (2003). *Stabilization of sulphate containing soil by cementation mixtures: mechanical properties*. Louisiana Transportation Research Center.