

اثر دما بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم و عایق رسی ژئوسینتتیک (GCL)

مهدی قلیخانی^۱، کاظم بدو^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

^۲ استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

(دریافت: ۹۸/۱۱/۳، پذیرش: ۹۹/۱۱/۲۸، نشر آنلاین: ۹۹/۱۱/۲۸)

چکیده

تأثیر دما در خواص نفوذپذیری خاک‌های رسی متراکم یکی از پارامترهای اساسی در طراحی لایه‌های عایق مهندسی است که در معرض شیرابه‌ها هستند. در این تحقیق اثر دما بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم منطقه نازلوی ارومیه و عایق‌های رسی ژئوسینتتیک (Geosynthetic) و همچنین تأثیر میزان تنش مؤثر و دانسیته بر نرخ تغییر ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی بررسی شده است. دستگاه تعیین ضریب نفوذپذیری سه‌محوری با دیواره انعطاف پذیر برای اندازه‌گیری ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها تحت تأثیر دما مورد استفاده قرار گرفته است. با افزایش دما ویسکوزیته (Viscosity) محلول کاهش یافته و اثرات دمایی ساختار خاک را تغییر می‌دهد و تولید حفرات بزرگ‌تر بین ذرات رس می‌کند و باعث ایجاد تغییر در سطح مقطع مؤثر جریان شده و آب جذب شده تبدیل به آب آزاد می‌شود و در نتیجه باعث افزایش ضریب نفوذپذیری خاک رسی می‌شود. با افزایش دما از ۲۳ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد ضریب نفوذپذیری خاک رسی تقریباً ۲/۳ برابر می‌شود. افزایش تنش مؤثر از ۳۰ kPa به ۶۵ kPa باعث می‌شود ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی، تقریباً به اندازه ۰/۴ نمونه‌هایی شود که تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa قرار داشتند. با کاهش دانسیته خاک رسی از ۱/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب به ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بسته به میزان دمای آزمایش، ضریب نفوذپذیری ۲ تا ۳ برابر می‌شود. برخلاف خاک‌های رسی، در عایق‌های رسی ژئوسینتتیک افزایش دما تأثیر اندکی (در حدود ۲۰٪) در ضریب نفوذپذیری این لایه‌ها داشته و زمانی که این لایه‌ها در معرض افزایش دما قرار گیرند به عملکرد خوب خود به‌عنوان یک مانع هیدرولیکی ادامه می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: ضریب نفوذپذیری، دما، رس متراکم، عایق رسی - ژئوسینتتیک، تنش مؤثر، دانسیته.

۱- مقدمه

مطالعات انجام شده در مورد تأثیر دما بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی نشان می‌دهد با افزایش دما ضریب نفوذپذیری خاک رسی افزایش می‌یابد (Daniel، ۱۹۸۲؛ Gribb و Benson، ۱۹۹۷؛ Li و همکاران، ۲۰۱۰؛ Wan و همکاران، ۲۰۱۰). در بیشتر موارد، این افزایش به دلیل کاهش در ویسکوزیته محلول است (Habibagahi، ۱۹۹۷؛ Cho و همکاران، ۱۹۹۹؛ Delage و همکاران، ۲۰۱۱). به‌رحال تغییرات ضریب نفوذپذیری با دما تنها به دلیل تغییرات خواص آب نیست، بلکه به دلیل اثر دمایی روی اندرکنش خاک- آب در سطح ریزساختار است (Towhata و همکاران، ۱۹۹۳؛ Romero و همکاران، ۲۰۰۱؛ Villar و همکاران، ۲۰۰۴). زمانی که دما افزایش می‌یابد، اثرات دمایی ساختار خاک را تغییر داده و تولید حفرات بزرگ‌تر بین ذرات رس می‌کند و باعث ایجاد تغییر در سطح مقطع مؤثر جریان می‌گردد و آب

خاک رسی متراکم و عایق رسی ژئوسینتتیک (GCL) اغلب به‌عنوان لایه‌های مانع هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال می‌توان به کاربرد این لایه‌ها در سازه‌های ذخایر آب و مدفن زباله‌های شهری اشاره نمود. از آنجاکه هدف اصلی از کاربرد این لایه‌ها به حداقل رساندن نفوذ مایعات است، ضریب نفوذپذیری پایین از اهمیت بالایی برخوردار است. در این ارتباط بررسی پارامترهایی که نفوذپذیری این لایه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند نیز اهمیت پیدا می‌کند. به‌عنوان مثال، انتظار می‌رود با نفوذ شیرابه به داخل عایق‌های رسی و GCL‌ها در اثر اندرکنش شیمیایی بین شیرابه و ذرات جامد، ضریب نفوذپذیری این عایق‌ها افزایش یابد (Hopmans و همکاران، ۱۹۸۶؛ Pusch و همکاران، ۱۹۹۰؛ Badv و Omidi، ۲۰۰۷).

1. Geosynthetic Clay Liner

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۴-۳۱۹۴۲۸۸۰

نفوذپذیری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد از 10^{-4} به 10^{-5} سانتی-متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. همچنین ضریب نفوذپذیری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً ۳ برابر ضریب نفوذپذیری در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد بود.

Delage و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که با افزایش دما از ۳۵ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد ضریب نفوذپذیری خاک رسی بیش از ۲ برابر افزایش می‌یابد. Chen و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که ضریب نفوذپذیری خاک رسی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً $2/4$ برابر ضریب نفوذپذیری همین خاک در دمای محیط (۲۳ درجه سانتی‌گراد) است و تغییرات ضریب نفوذپذیری با دما در طول چرخه گرما-سرما برگشت‌پذیر است. از جمله مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده روی رفتار دمایی خاک‌های رسی در شرایط غیراشباع نیز به کار Young و همکاران (۲۰۰۴) و Jobmann و همکاران (۲۰۰۷) می‌توان اشاره نمود.

۲- تئوری مسئله

خواص آب که وابسته به دما هستند شامل کشش سطحی، ویسکوزیته، و دانسیته آب، فاکتورهای اصلی در بیان وابستگی دمایی ضریب نفوذپذیری می‌باشند (Liu و همکاران، ۲۰۱۴). یک تئوری معمول برای شرح تغییرات وابسته به دمای ذرات خاک رس، تغییر در ضخامت آب دولایه با افزایش دما در طول آزمایش نفوذپذیری می‌باشد. افزایش دما باعث تحریک اتصال مولکول‌های آب به اجزای رس شده و باعث حرکت راحت‌تر آن به خارج از لایه اتصال به اجزای خاک رس می‌شود. ضخامت لایه آب اتصال یافته به ذرات خاک رس در اثر خروج مولکول‌های آب، کاهش یافته و باعث ایجاد مجرای بزرگ برای حرکت آب و ضریب نفوذپذیری بیشتر می‌شود (Shao و Gao، ۲۰۱۵).

وابستگی دمایی اسکلت خاک، فاکتوری است که خواص نفوذپذیری خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. رس‌ها به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، خاصیت جذب آب و پلاستیسیته بالایی دارند که به شدت با تغییرات دمایی تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Qiao و همکاران، ۲۰۱۹).

افزایش دما می‌تواند قدرت اتصال داخلی اجزای خاک را کاهش دهد و همچنین باعث شود آب و ذرات خاک افزایش حجم دهند. افزایش حجم ذرات خاک باعث کاهش در سطح ویژه ذرات خاک شده و در نتیجه ظرفیت نگهداری آن کاهش می‌یابد (Wan و همکاران، ۲۰۱۵). وابستگی ضریب نفوذپذیری به دما می‌تواند در نتیجه اثر حرارتی ویسکوزیته سینماتیک سیال باشد. در شرایط خاک اشباع میزان مکش موجود در خاک با تغییر دما همچنان صفر باقی می‌ماند. با توجه به کاهش کشش سطحی و ویسکوزیته

جذب‌شده تبدیل به آب آزاد می‌شود (Monfared و همکاران، ۲۰۱۲). ضایعات رادیواکتیو ساطع حرارت هستند و دما می‌تواند تا بیشتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد داخل لندفیل^۲ افزایش یابد. با توجه به این‌که ضریب انبساط حرارتی مایع حفره‌ای خیلی بزرگ‌تر از ضریب انبساط حرارتی فاز جامد است این دما باعث افزایش در فشار آب حفره‌ای در خاک می‌شود (Ghabezloo و همکاران، ۲۰۰۹). از طرفی افزایش در فشار آب حفره‌ای باعث کاهش در تنش مؤثر متوسط و افزایش ریسک انتشار ترک‌های موجود در خاک و همچنین شکل‌گیری ترک‌های جدید می‌شود. این پدیده می‌تواند حجم ترک‌ها را در خاک افزایش داده و موجب افزایش نفوذپذیری خاک شود (Bastiaens و همکاران، ۲۰۰۷).

از جمله مباحثی که در اکثر موارد به دلیل ایجاد مشکلات فراوان باعث جلب نظرها گردیده، بحث رفتار آب در خاک می‌باشد. کنترل نشت و ایجاد مانع هیدرولیکی یکی از مسائل مهم در مهندسی عمران می‌باشد. محققین کوشیده‌اند تا راه‌حل مناسبی در این مورد پیدا کنند. هزینه بالای مصالح عایق مصنوعی و غیراقتصادی بودن استفاده از آن‌ها در پروژه‌های بزرگ باعث شده است تا مصالح با نفوذپذیری کم طبیعی بیشتر مورد توجه قرار گیرند. مصالح طبیعی نیز به نوبه خود مشکلات خاصی را دارند که از جمله نزدیک نبودن منابع قرضه به محل اجرای پروژه، بالا رفتن هزینه حمل‌ونقل، نیاز به تخصص در اجرای صحیح و مشکلاتی که در اثر عوامل جوی یا طبیعت ذاتی این مصالح به وجود می‌آید، باعث شده است این مصالح با رضایت کامل مورداستفاده قرار نگیرند (Rowe و همکاران، ۲۰۰۰؛ Blümling و همکاران، ۲۰۰۷). ضریب نفوذپذیری خاک تحت تأثیر پارامترهایی نظیر نوع خاک، دانه‌بندی خاک، دانسیته خاک، ویسکوزیته مایع عبوری از خاک، دما و غیره تغییر می‌کند (Lima و همکاران، ۲۰۱۱؛ Chen و همکاران، ۲۰۱۴).

در این تحقیق تأثیر دما بر روی ضریب نفوذپذیری خاک رسی منطقه نازلوی ارومیه و همچنین لایه عایق رسی ژئوسینتتیک (GCL) بررسی شده است. آزمایش‌های نفوذپذیری توسط دستگاه نفوذپذیری سه‌محوری با دیواره انعطاف‌پذیر بر روی نمونه‌ها انجام شده‌اند. محققین متعددی برای ارزیابی تأثیر دما بر ضریب نفوذپذیری خاک‌های رسی متراکم مطالعاتی را انجام داده‌اند که می‌توان به تحقیقات Ren و همکاران (۲۰۱۳) اشاره کرد که ضریب نفوذپذیری یک خاک رس سیلتی را مطالعه کردند و تأثیر هم‌زمان دانسیته و دمای آب را روی ضریب نفوذپذیری مشاهده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد زمانی که دانسیته خاک رس سیلتی از $1/4$ به $1/6$ گرم بر سانتی‌متر مکعب افزایش می‌یابد ضریب

نفوذپذیری در دمای موردنیاز و با توجه به حجم کم آب داخل آن، نیاز بود تا درجه هیتر معادل دمای آب داخل محفظه دستگاه نفوذپذیری به دست آید که برای این کار با روش آزمون و خطا توسط یک دماسنج و هیتر مورد استفاده در این تحقیق، در یک ظرف هم حجم محفظه دستگاه نفوذپذیری، میزان درجه هیتر برای هر دمای موردنیاز آب داخل محفظه دستگاه نفوذپذیری به دست آمد که نتیجه آن در جدول (۴) ارائه شده است. در شکل (۱-ب) هیتر مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- (الف) نمونه GCL آماده شده برای آزمایش نفوذپذیری،
(ب) هیتر مورد استفاده برای تنظیم دمای محفظه دستگاه نفوذپذیری

۴- آزمایش‌های نفوذپذیری

آزمایش‌های نفوذپذیری با دانسیته‌های خشک ۱/۵ و ۱/۷ و ۱/۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب برای نمونه‌های رسی و تحت تنش‌های مؤثر ۳۰ و ۶۵ کیلو پاسکال و گرادیان ۱۰ و تحت تأثیر دمای ۲۳، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه رسی و لایه‌های GCL انجام شدند. نمونه‌های رسی و لایه‌های GCL در محفظه دستگاه نفوذپذیری سه‌محوری قرار گرفته و پس از تنظیم دما توسط هیتر که داخل محفظه قرار دارد آزمایش‌های نفوذپذیری مطابق استاندارد ASTM D-5084 بر روی نمونه‌ها انجام شدند.

که در اثر افزایش دما رخ می‌دهد، افزایش دما اصطکاک بین آب و ذرات جامد خاک را کاهش می‌دهد (Schneider و Goss، ۲۰۱۱). در خاک‌های غیراشباع با افزایش دما میزان مکش آب در خاک کاهش می‌یابد و باعث افزایش ضریب نفوذپذیری خاک می‌شود. در خاک‌های با مقادیر رس بالا این نکته اهمیت زیادی دارد (Liu، ۲۰۱۵). هدف از این تحقیق بررسی اثر دما بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم منطقه نازلوی ارومیه و عایق‌های رسی ژئوسینتتیک و همچنین تأثیر میزان تنش مؤثر و دانسیته بر نرخ تغییر ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی تحت اثر تغییر دما می‌باشد.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- مشخصات مصالح

خاک رسی به کاررفته در این تحقیق، خاک رس منطقه نازلوی ارومیه می‌باشد که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است. نمونه‌های رسی مورد استفاده در این تحقیق دارای قطر ۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر هستند. نمونه‌های رسی در درجه رطوبت ۳٪ بیشتر از درجه رطوبت بهینه (۱۵٪) و با استفاده از روش تراکم پروکتور^۳ استاندارد آماده شدند و پس از تراکم، به‌طور متوسط دارای نسبت تخلخل ۰/۴۸ بودند. همچنین نتایج آزمایش XRD روی خاک رس مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۲) نشان داده شده است. نمونه‌های GCL مورد استفاده در این تحقیق با نام تجاری BFG 5000 Bentofix® شامل یک لایه بنتونیت^۴ که بین یک لایه ژئوتکستایل^۵ پوششی و یک لایه ژئوتکستایل حمال قرار گرفته است می‌باشند. مشخصات نمونه GCL مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۳) آمده است. نمونه‌ها در اندازه‌های با قطر ۷۰ میلی‌متر آماده شدند. نمونه‌گیری از GCL برای آزمایش، بدون از دست دادن بنتونیت تقریباً غیرممکن است. برای تهیه نمونه با ابعاد موردنیاز باید GCL به‌نحو مناسبی برش داده شود تا از دست رفتن بنتونیت به حداقل برسد. در این تحقیق برای تهیه نمونه‌های GCL، نمونه‌ها توسط یک استوانه فلزی نوک تیز به‌صورت خشک برش داده شدند و سپس یک لایه نازک از خمیر بنتونیت در اطراف محل برش چسبانده شده تا مانع هدر رفتن بنتونیت در حین آزمایش شود. در شکل (۱-الف) یک نمونه GCL آماده شده برای آزمایش نشان داده شده است.

۳-۲- دستگاه تنظیم دمای محفظه دستگاه نفوذپذیری

برای تنظیم دمای محفظه دستگاه نفوذپذیری از یک هیتر ساخت کارخانه ماهیران استفاده شد که این هیتر قابلیت تنظیم دما در یک دمای خاص را دارد. برای تنظیم دمای محفظه دستگاه

شکل (۲-الف) یک نمونه رسی را داخل محفظه دستگاه نفوذپذیری (۲-الف) آزمایش نفوذپذیری زمانی خاتمه می‌یابد که میزان جریان ورودی سه‌محوری در حال انجام آزمایش نفوذپذیری نشان می‌دهد. با جریان خروجی برابر شود.

جدول ۱- مشخصات خاک رس منطقه نازلوی ارومیه

نوع خاک در سیستم متحد	حد روانی (%)	نشانه خمیری (%)	درجه رطوبت بهینه (%)	دانسیتته خشک حداکثر (kg/m ³)
CL	۲۴	۱۰	۱۲	۱۸۳۰

جدول ۲- نتایج آزمایش XRD روی خاک رس

مواد تشکیل‌دهنده خاک رس	SiO ₂	CaCO ₃	Feldspar (Na, Ca)	Clay Mineral	Feldspar (K)
درصد تشکیل‌دهنده	۳۷	۲۴	۱۹	۱۳	۷

جدول ۳- مشخصات نمونه GCL مورد استفاده در این تحقیق

جرم واحد سطح (g/m ²)	۵۵۰۰
ضخامت (mm)	۷
مقاومت کششی حداکثر (kN/m)	۲۰ - ۱۱
ضریب نفوذپذیری (m/s)	۲×۱۰ ^{-۱۱}

جدول ۴- رابطه بین درجه هیتز و دمای محفظه دستگاه نفوذپذیری

درجه هیتز	۲۴	۳۰	۳۴
دمای محفظه دستگاه نفوذپذیری (درجه سانتی‌گراد)	۱±۳۰	۱±۴۰	۱±۵۰

جدول ۵- آزمایش‌های نفوذپذیری انجام شده بر روی خاک رسی و لایه GCL

دما (سانتی‌گراد)	۲۳	۳۰	۴۰	۵۰	دانسیتته (gr/cm ³)	تنش همه‌جانبه (kPa)	
آزمایش‌های نفوذپذیری لایه رسی	آزمایش ۱	آزمایش ۱	آزمایش ۱	آزمایش ۱	ρ=۱/۹	۳۰	
	آزمایش ۲	آزمایش ۲	آزمایش ۲	آزمایش ۲			
	آزمایش ۱	آزمایش ۱	آزمایش ۱	آزمایش ۱	ρ=۱/۹	۶۵	
	آزمایش ۲	آزمایش ۲	آزمایش ۲	آزمایش ۲			
	آزمایش ۱	آزمایش ۱	آزمایش ۱	آزمایش ۱	ρ=۱/۷	۳۰	
	آزمایش ۱	آزمایش ۱	آزمایش ۱	آزمایش ۱	ρ=۱/۵		
	GCL	سری ۱	سری ۱	سری ۱	سری ۱	-----	۳۰

در روابط فوق a سطح مقطع بورت دستگاه نفوذپذیری سه‌محوری، L ارتفاع نمونه خاک، A سطح مقطع نمونه خاک، t زمان آزمایش، P_B تنش انحرافی، h اختلاف ارتفاع آب در بورت بالایی و پائینی، $V_u(t_i)$ حجم قرائت شده در بورت بالایی در زمان t_i و $V_L(t_i)$ حجم قرائت شده در بورت پائینی در زمان t_i می‌باشند.

آزمایش‌های نفوذپذیری توسط دستگاه نفوذپذیری سه‌محوری با دیواره انعطاف‌پذیر (Tri-Flex 2) انجام شده‌اند که در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. برنامه آزمایش‌های نفوذپذیری انجام شده بر روی خاک رسی و لایه‌های GCL در جدول (۵) ارائه شده است. ضریب نفوذپذیری براساس قانون داریسی^۶ و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{aL}{2At} \ln \left[\frac{P_B + h(t_1)}{P_B + h(t_2)} \right] \quad (1)$$

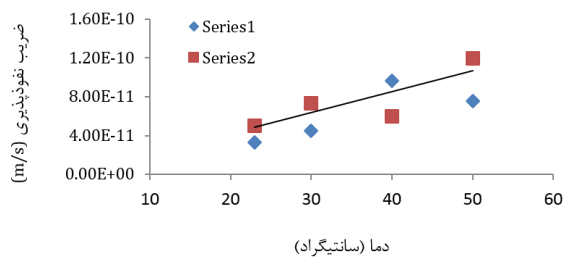
$$h(t_1) = V_u(t_1) - V_L(t_1) \quad (2)$$

$$h(t_2) = V_u(t_2) - V_L(t_2) \quad (3)$$

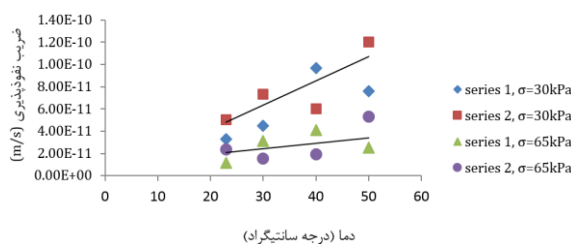
که تحت اثر تنش مؤثر 65 kPa قرار گرفته‌اند؛ شیب نمودار کمتر از نمونه‌هایی است که تحت اثر تنش مؤثر 30 kPa قرار گرفته‌اند. یعنی اعمال تنش مؤثر زیاد به نمونه‌هایی که تحت اثر افزایش دما قرار گرفته‌اند باعث کاهش نرخ افزایش در ضریب نفوذپذیری می‌شود. به‌عبارتی تنش مؤثر بیشتر، اثر مخرب افزایش دما را تا حدودی کاهش می‌دهد. برای درک بهتر اثر تنش مؤثر بر ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی تحت اثر افزایش دما، پارامتر بی بعد B را به‌صورت نسبت ضریب نفوذپذیری میانگین هر دما تحت اثر تنش مؤثر 65 kPa ($K_{T, 65}$) به ضریب نفوذپذیری میانگین در همان دما تحت اثر تنش مؤثر 30 kPa ($K_{T, 30}$) تعریف می‌کنیم که به‌صورت رابطه (۴) نشان داده شده است.

$$B = \frac{K_{T,65}}{K_{T,30}} \quad (4)$$

که در این رابطه T دما برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد. ضرایب نفوذپذیری میانگین تحت اثر تنش‌های مؤثر 30 و 65 کیلوپاسکال و همچنین مقدار پارامتر B برای دماهای مختلف در جدول (۶) آورده شده است.



شکل ۳- نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه رسی در برابر دما



شکل ۴- نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه رسی در برابر دما تحت تنش‌های 30 kPa و 65 kPa

جدول ۶- مقادیر ضرایب نفوذپذیری میانگین و پارامتر B برای نمونه‌های رسی

	۵۰	۴۰	۳۰	۲۳	T ($^{\circ}\text{C}$)
$K_{T,30}$ (m/s)	$1.0^{-11} \times 9/8$	$1.0^{-11} \times 7/8$	$1.0^{-11} \times 5/9$	$1.0^{-11} \times 4/2$	
$K_{T,65}$ (m/s)	$1.0^{-11} \times 3/9$	$1.0^{-11} \times 3/0$	$1.0^{-11} \times 2/3$	$1.0^{-11} \times 1/8$	
B	۰/۴۰	۰/۳۸	۰/۳۹	۰/۴۲	



(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) دستگاه نفوذپذیری سه‌محوری با دیواره انعطاف‌پذیر، ب) محفظه دستگاه نفوذپذیری سه‌محوری با دیواره انعطاف‌پذیر به‌همراه هیتر تنظیم دما

۵- نتایج

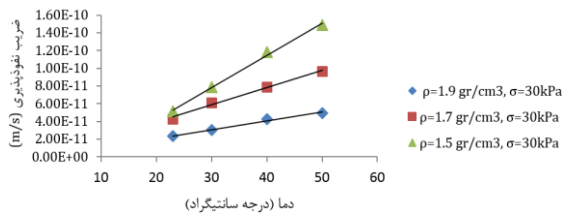
۵-۱- تأثیر دما بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم

برای مشاهده اثر دما بر ضریب نفوذپذیری خاک رسی متراکم، آزمایش‌های نفوذپذیری سه‌محوری بر روی خاک رسی تحت تنش مؤثر 30 kPa و گرادیان هیدرولیکی 10 انجام شدند. برای هر دما، دو نمونه تحت آزمایش قرار گرفتند که نتایج تغییرات ضریب نفوذپذیری در مقابل تغییرات دما در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود یک رابطه خطی بین دما و نفوذپذیری خاک رسی وجود دارد. با افزایش دما از 23 به 50 درجه سانتی‌گراد ضریب نفوذپذیری خاک رسی تقریباً $2/3$ برابر شده است که این افزایش در ضریب نفوذپذیری به‌دلیل کاهش ویسکوزیته آب و همچنین به‌دلیل اثر دمایی روی اندرکنش خاک-آب است.

۵-۲- اثر میزان تنش مؤثر بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم تحت اثر افزایش دما

برای مشاهده اثر تنش مؤثر بر ضرایب نفوذپذیری نمونه‌های رسی قرار گرفته در معرض تغییرات دما، آزمایش‌های نفوذپذیری بر روی نمونه‌های رسی تحت اثر تنش مؤثر 65 kPa و گرادیان هیدرولیکی 10 انجام شدند. در شکل (۴) تغییرات ضرایب نفوذپذیری در مقابل تغییرات دما برای هر دو سری آزمایش‌های نفوذپذیری تحت تنش مؤثر 30 kPa و 65 kPa نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۴) ملاحظه می‌شود برای نمونه‌هایی

دما بر نمونه‌های GCL ضریب نفوذپذیری این لایه‌ها را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و اگر این لایه‌ها در معرض افزایش دما قرار گیرند به عملکرد خوب خود به‌عنوان مانع هیدرولیکی ادامه می‌دهند.



شکل ۵- نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری نمونه رسی با دانسیته‌های مختلف در برابر دما

جدول ۷- نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری برای لایه‌های GCL

۵۰	۴۰	۳۰	۲۳	T (°C)
$1.0^{-11} \times 2/5$	$1.0^{-11} \times 2/4$	$1.0^{-11} \times 2/3$	$1.1^{-10} \times 2/1$	K (m/s)

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

- در این مطالعه ضریب نفوذپذیری لایه‌های رسی CL منطقه نازلوی ارومیه و عایق‌های رسی ژئوسینتتیک با نام تجاری Bentofix® BFG 5000 تحت تأثیر دما به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند. اثر تنش مؤثر و دانسیته خاک رسی نیز بر میزان تأثیر دما بر ضریب نفوذپذیری لایه‌های رسی و GCL ها مطالعه شدند که نتایج حاصل از این تحقیق را به شرح می‌توان خلاصه نمود:

- در بررسی تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک رسی در اثر تغییرات دما مشاهده شد که یک رابطه خطی بین دما و نفوذپذیری خاک رسی وجود دارد. با افزایش دما از ۲۳ به ۵۰ درجه سانتی‌گراد ضریب نفوذپذیری خاک رسی تقریباً $2/3$ برابر می‌شود.
- برای بررسی اثر تنش مؤثر بر میزان تأثیر دما بر ضریب نفوذپذیری لایه‌های رسی، دو سری آزمایش نفوذپذیری تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa و ۶۵ kPa انجام شدند که مشاهده گردید برای نمونه‌هایی که تحت اثر تنش مؤثر ۶۵ kPa قرار گرفته‌اند شیب نمودار دما- ضریب نفوذپذیری کم‌تر از نمونه‌هایی است که تحت اثر تنش مؤثر ۳۰ kPa قرار گرفته‌اند. افزایش تنش مؤثر از ۳۰ kPa به ۶۵ kPa باعث می‌شود ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی قرار گرفته در معرض افزایش دما، تقریباً به‌اندازه $0/4$ نمونه‌هایی شود که تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa قرار داشتند.
- برای مشاهده اثر دانسیته بر ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی تحت اثر افزایش دما، نمونه‌های رسی با ۳ دانسیته $1/5$ ، $1/7$ و $1/9$ گرم بر سانتی‌متر مکعب آماده‌شده و آزمایش‌های ضریب نفوذپذیری تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa روی این نمونه‌ها انجام شدند.

همان‌طور که از نتایج جدول (۶) ملاحظه می‌شود، افزایش تنش مؤثر از ۳۰ kPa به ۶۵ kPa باعث می‌شود ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی قرار گرفته در معرض افزایش دما تقریباً به‌اندازه $0/4$ نمونه‌هایی شود که تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa قرار داشتند.

۵-۳- اثر دانسیته بر ضریب نفوذپذیری رس متراکم تحت اثر افزایش دما

برای مشاهده اثر دانسیته بر ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی تحت اثر افزایش دما، نمونه‌های رسی با ۳ دانسیته $1/5$ ، $1/7$ و $1/9$ گرم بر سانتی‌متر مکعب آماده شدند و آزمایش‌های ضریب نفوذپذیری تحت تنش مؤثر ۳۰ kPa روی این نمونه‌ها انجام شدند. شکل (۵) تغییرات ضریب نفوذپذیری در مقابل دما برای نمونه‌های رسی با دانسیته‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با کاهش دانسیته خاک میزان ضریب نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد با کاهش دانسیته خاک رسی از $1/9$ گرم بر سانتی‌متر مکعب به $1/5$ گرم بر سانتی‌متر مکعب، ضریب نفوذپذیری خاک رسی $2/2$ برابر می‌شود و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد این نسبت ۳ می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود با کاهش دانسیته نرخ افزایش ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد (شیب نمودار دما- ضریب نفوذپذیری). افزایش ضریب نفوذپذیری با کاهش دانسیته در دماهای بالاتر بیشتر است.

۵-۴- تأثیر دما بر ضریب نفوذپذیری عایق‌های رسی ژئوسینتتیک (GCLs)

برای مشاهده تأثیر دما بر ضریب نفوذپذیری عایق‌های رسی ژئوسینتتیک، لایه‌های GCL آماده شده و تحت اثر تنش مؤثر ۳۰ kPa و گرادیان هیدرولیکی ۱۰ تحت آزمایش‌های نفوذپذیری سه‌محوری قرار گرفتند. آزمایش‌های تعیین ضریب نفوذپذیری برای لایه‌های GCL تحت دماهای ۲۳، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شدند. نتایج ضرایب نفوذپذیری در برابر دما در جدول (۷) آمده است. ضریب نفوذپذیری نمونه GCL در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد $2/1 \times 10^{-11}$ m/s به‌دست آمد. این در حالی است که ضریب نفوذپذیری نمونه GCL در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد $2/49 \times 10^{-11}$ m/s به‌دست آمد. بنابراین افزایش کمی (در حدود 20%) در ضریب نفوذپذیری نمونه GCL در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه GCL در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد نتیجه شد. در حالی‌که برای نمونه رسی تحت اثر تنش‌های مشابه ضریب نفوذپذیری نمونه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً $2/3$ برابر ضریب نفوذپذیری نمونه رسی در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد بود. نتایج نشان می‌دهند که برخلاف نمونه‌های رسی، اعمال افزایش

- scanning", *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2014, 47 (1), 87e99.
- Chen WZ, Ma YS, Sillen X, "Effect of temperature and thermally-induced microstructure change on hydraulic conductivity of Boom Clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 383-395.
- Cho Wj, Lee Jo, Chun Ks, "The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite", *Applied Clay Science*, 1999, 14 (1), 47-58.
- Daniel DE, "Measurement of hydraulic conductivity of unsaturated soils with thermocouple psychrometers", *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 20 (6), 1125-1129.
- Delage P, Sultan N, Cui YJ, Ling LX, "Permeability change in Boom Clay with temperature", *arXiv preprint arXiv*, 2011, 1112. 6396.
- Gao HB, Shao MA, "Effect of temperature changes on soil hydraulic properties", *Soil Tillage Res*, 2015, 153, 145-154.
- Ghabezloo S, Sulem J, Saint-Marc J, "Evaluation of a permeability-porosity relationship in a low permeability creeping material using a single transient test", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46 (4), 761-768.
- Habibagahi K, "Temperature effect and the concept of effective void ratio", *Indian Geotechnical Journal* 1977, 7 (1), 14-34.
- Hopmans JW, Dane JH, "Temperature dependence of soil hydraulic properties", *Soil Science Society of America*, 1986, 50, 4-9.
- Jobmann M, Polster M, "The response of Opalinus claystone due to heating: a combined analysis of in situ measurement, laboratory investigations and numerical calculations", *Phys Chem Earth*, 2007, 32 (8-14), 929-936.
- Li XL, Bastiaens W, Van Marcke P, Verstricht J, Chen GJ, Weetjens E, Sillen X, "Design and development of large-scale in situ PRACLAY heater test and horizontal high-level radioactive waste disposal gallery seal test in Belgian HADES", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2010, 2 (2), 103e 10.
- Liu MX, Cui WH, Wu D, Liao LJ, Du WZ, "Soil macropore structures and their effect on preferential flow", *Applied Mechanics*, 522, 990-994.
- Lima A, "Thermo-hydro-mechanical behaviour of two deep Belgian clay formations, Boom and Ypresian Clays", PhD Thesis, 2011, Barcelona, Spain: universitat politecnica de catalunya.
- Lu Y, "Temperature effect on unsaturated hydraulic properties of two fine-grained soils and its influence on moisture movement under an airfield test facility", Master of science Thesis, 2015, Arizona State University.
- Monfared M, Sulem J, Delage P, Mohajerani M, "On the THM behaviour of a sheared Boom clay sample: application on the behaviour and sealing properties of the EDZ", *Engineering Geology*, 2012, 124, 47-58.
- Pusch R, Guven N, "Electron microscopic examination of hydrothermally treated bentonite clay", *Engineering Geology*, 1990, 28 (3), 303-14.
- نتایج نشان داد که با کاهش دانسیته خاک، میزان ضریب نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد با کاهش دانسیته نرخ افزایش ضریب نفوذپذیری (شیب نمودار دما-ضریب نفوذپذیری) افزایش می‌یابد و افزایش ضریب نفوذپذیری با کاهش دانسیته در دماهای بالاتر، بیشتر است.
- برای مشاهده تأثیر دما بر ضریب نفوذپذیری عایق‌های رسی ژئوسینتتیک، لایه‌های GCL آماده‌شده و تحت اثر تنش مؤثر ۳۰kPa و گرادیان هیدرولیکی ۱۰ تحت آزمایش‌های نفوذپذیری سه‌محوری قرار گرفتند. آزمایش‌های تعیین ضریب نفوذپذیری برای لایه‌های GCL تحت دماهای ۲۳، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی-گراد انجام شدند. ضریب نفوذپذیری نمونه GCL در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد 1.1×10^{-11} m/s و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد 2.49×10^{-11} به‌دست آمد که نشان‌دهنده افزایش اندکی در ضریب نفوذپذیری GCL (در حدود ۲۰٪) است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق می‌توان گفت برای استفاده از خاک رس CL در مناطق با دمای بالا باید تدابیر لازم در طراحی و اجرای لایه‌های عایق لحاظ شوند ولی لایه‌های رسی ژئوسینتتیکی BFG Bentofix® 5000 عملکرد خوب به‌عنوان لایه عایق خواهند داشت.
- #### ۷- مراجع
- Ai H, Young JF, Scherer GW, "Thermal expansion kinetics: method to measure permeability of cementitious materials: II, application to hardened cement paste", *Journal of the American Ceramic Society*, 2004, 84 (2), 385-391.
- ASTM D5084, "Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter", ASTM D5084-16a, 2016.
- Badv K, Omid A, "Effect of synthetic leachate on the hydraulic conductivity of clayey soil in Urmia City landfill site", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 2007, 31, B5, 535-545.
- Bastiaens W, Bernier F, Li XL, "Experiments and conclusions on fracturing, self-healing and self-sealing processes in clays", *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 2007, 32, 600-615
- Benson CH, Gribb MM, "Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and field In *Unsaturated Soil Engineering Practice*", American Society of Civil Engineers (ASCE), 1997, Reston, Va. 113-168.
- Blümling P, Bernier F, Lebon P, Martin CD, "The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment", *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 2007, 32, 588-599.
- Chen GJ, Maes T, Vandervoort F, Sillen X, Van Marcke P, Honty M, Vanderniepen P, "Thermal impact on damaged Boom Clay and opalinusclay: permeameter and isostatic tests with mCT

- Ren J, Shen Zh, Yang J, Zhao J, Yin J, "Effect of temperature and dry density on hydraulic conductivity of silty clay under infiltration of low-temperature water", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2013.
- Romero E, Gens A, Lloret A, "Temperature effects on the hydraulic behavior of an unsaturated clay", *Geotechnical & Geological Engineering*, 2001, 19 (3-4), 311-32.
- Rowe RK, Caers CJ, Reynolds G, Chan C, "Design and construction of barrier system for the Halton Landfill", *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37 (3), 662-675.
- Schneider M, Goss KU, "Temperature dependence of the water retention curve for dry soils", *Water Resources*, 2011, 47, 5.
- Towhata I, Kuntiwattanakul P, Seko I, Ohishi K, "Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests", *Soils and Foundations*, 1993, 33 (4), 170-83.
- Villar MV, Lloret A, "Influence of temperature on the hydro-mechanical behavior of a compacted bentonite", *Applied Clay Science*, 2004, 26 (1), 337-50.
- Wan M, "Study of soil-water characteristics and hydraulic conductivity of highly compacted GMZ bentonite under temperature control", Ph.D. Thesis, 2010, Shanghai, China, Tongji University.
- Wan M, Ye WM, Chen YG, Cui YJ, Wang J, "Influence of temperature on the water retention properties of compacted GMZ01 bentonite", *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73 (8), 4053-4061.
- Qiao X, Ma Sh, Pan G, Liu G, "Effects of temperature change on the soil water characteristic curve and a prediction model for the mu us bottomland, northern china", 2019, *Water*, 11, 1235.

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Temperature on the Hydraulic Conductivity of Compacted Clayey Soil and Geosynthetic Clay Liner (GCL)

Mahdi Gholikhany, Kazem Badv *

Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 23 January 2020; Accepted: 16 February 2021

Keywords:

Hydraulic Conductivity, Temperature, Compacted clay, GCL, Effective stress, Density

1. Introduction

In most studies, the increase in hydraulic conductivity with temperature has been considered due to the decrease in the viscosity of fluid (Habibagahi, 1977; Cho et al., 1999; Delage et al., 2011). However, the changes in hydraulic conductivity with temperature are not only influenced by the changes in water properties, but also by the thermal effect on soil-water interaction at the microstructure level (Towhata et al., 1993; Romero et al., 2001; Villar and Lloret, 2004). In the present study, results of temperature effects on the hydraulic conductivity of compacted clay from the Nazlou region of Urmia City (Iran), and geosynthetic clay liner (GCL) are presented. In this research, experiments were conducted by flexible-wall triaxial permeability apparatus. In order to increase the temperature of the permeability cell to a desired level, a heater and a temperature sensor were used. Results showed that by increasing the temperature, the viscosity of fluid decreases, the soil pore size increases, cross-section of effective flow increases and hence, the soil hydraulic conductivity increases. Increasing the effective stress causes the rate of increase in soil permeability due to temperature to decrease. Results showed that temperature increase does not have a significant effect on the hydraulic conductivity increase of geosynthetic clay liners.

2. Methodology

Clay samples with 5 cm height and 7 cm diameter and the GCL samples with 7cm diameter were used in order to investigate the effect of temperature on the hydraulic conductivity of clay and GCL samples. For clay samples, permeability tests were conducted with 30 and 65 kPa of effective stresses and at different temperatures ranging from 23 °C to 50 °C. Also, the permeability tests on the clay samples were conducted at three various soil densities (1.5, 1.7 and 1.9 gr/cm³). For GCL samples permeability tests were conducted with 30 kPa effective stress, and at the same temperature levels as clay samples.

3. Results and discussion

3.1. Effect of temperature on the hydraulic conductivity of compacted clay

In order to investigate the effect of temperature on the hydraulic conductivity of compacted clay, permeability tests were conducted on the clay samples with 30 kPa of effective stress and a hydraulic gradient of 10. For each temperature level, two permeability tests were conducted. The results showed that hydraulic conductivity at 50 °C is about 2.3 times larger than that at room temperature (23 °C).

* Corresponding Author

E-mail addresses: (Mahdi Gholikhany), k.badv@urmia.ac.ir (Kazem Badv).

3.2. Effect of effective stress on the hydraulic conductivity of compacted clay with temperature increase

In order to investigate the effect of effective stress on the hydraulic conductivity, two series of permeability tests were conducted on the compacted clay with 30 and 65 kPa effective stress and hydraulic gradient of 10. The results of these tests are shown in Fig 1. By increasing the effective stress from 30 to 65 kPa, hydraulic conductivity and the hydraulic conductivity increasing rate, are reduced. The ratio of average hydraulic conductivity for each temperature with 65 kPa effective stress, to average hydraulic conductivity with 30 kPa effective stress was 0.4.

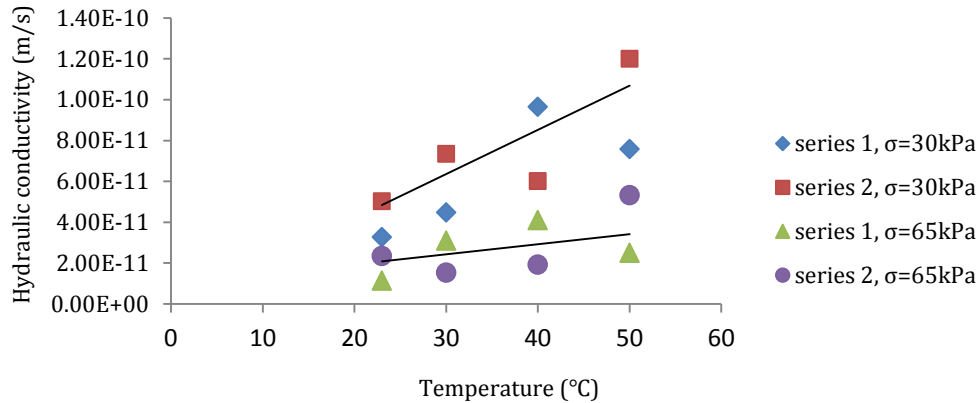


Fig. 1. Hydraulic conductivity of clay samples versus temperature with 30 and 65 kPa effective stress

3.3. Effect of density on the hydraulic conductivity of compacted clay with temperature increase

Permeability tests with three various densities (1.5, 1.7 and 1.9 gr/cm³) were conducted on the clay samples, in order to investigate the effect of density on the hydraulic conductivity of compacted clay with temperature increase. The results showed that as the density of clay samples reduces, the hydraulic conductivity and increase the rate of hydraulic conductivity increases.

3.4. Effect of temperature on the hydraulic conductivity of GCLs

Results of permeability tests on the GCL samples are presented in Table 1. Results showed that when the temperature level increases from 23 °C to 50 °C, the hydraulic conductivity of GCL increases by about 20%.

Table 1. Results of permeability tests on the GCL samples

T (°C)	23	30	40	50
K (m/s)	2.10×10 ⁻¹¹	2.22×10 ⁻¹¹	2.38×10 ⁻¹¹	2.49×10 ⁻¹¹

4. Conclusions

For clay samples, temperature increase causes an increase in clay hydraulic conductivity. Hydraulic conductivity at 50 °C is about 2.3 times greater than at 23 °C room temperature. By increasing the effective stress from 30 to 65 kPa, hydraulic conductivity and the hydraulic conductivity increase rate, are reduced. The ratio of average hydraulic conductivity for each temperature with 65 kPa effective stress to average hydraulic conductivity with 30 kPa effective stress is 0.4. As the density of clay samples reduces, hydraulic conductivity and increase the rate of hydraulic conductivity increases. Results showed that when temperature level increases from 23 °C to 50 °C, the hydraulic conductivity of GCL increases about 20%.

5. References

- Cho Wj, Lee Jo, Chun Ks, "The temperature effects on hydraulic conductivity of compacted bentonite", Applied Clay Science, 1999, 14 (1), 47-58.
- Delage P, Sultan N, Cui YJ, Ling LX, "Permeability change in Boom Clay with temperature", arXiv preprint arXiv, 2011, 1112, 6396.
- Habibagahi K, "Temperature effect and the concept of effective void ratio", Indian Geotechnical Journal 1977, 7 (1), 14-34.

- Romero E, Gens A, Lloret A, "Temperature effects on the hydraulic behavior of an unsaturated clay", *Geotechnical & Geological Engineering*, 2001, 19 (3-4), 311-32.
- Towhata I, Kuntiwattanakul P, Seko I, Ohishi K. "Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests", *Soils and Foundations* 1993, 33 (4), 170-83.
- Villar MV, Lloret A, "Influence of temperature on the hydro-mechanical behavior of a compacted bentonite", *Applied Clay Science*, 2004, 26 (1), 337-50.