

## ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوزیست محیطی ترکیبات ماسه- بنتونیت جهت استفاده در آستر کف مدفن های زباله

کاظم بدو<sup>۱\*</sup> و هادی علی اشرفی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی عمران، گرایش خاک و پی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

### چکیده

در مدفن های مواد زائد جامد، اغلب از آسترهای متراکم رسی (CCLs) به دلیل نفوذپذیری پایین، تراکم پذیری و مقاومت کافی، به عنوان سیستم مانع انتقال آلودگی استفاده می شود؛ لیکن ترک های انقباضی ممکن است در آسترهای رسی ایجاد شده و منجر به نشت شیرابه گردند و کارایی آستر را در طول عمر خود کاهش دهند. ترکیبات ماسه-بنتونیت (BES) با داشتن نفوذپذیری پایین و عدم آسیب پذیری ناشی از ترک های انقباضی، می توانند جایگزین مناسبی برای آسترهای رسی در مدفن های مهندسی باشند. در این تحقیق، برخی از مهم ترین خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوزیست محیطی چهار ترکیب ماسه-بنتونیت با درصد های بنتونیت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ بررسی گردید. این آزمایش ها شامل آزمایش نفوذپذیری سه محوری با جداره انعطاف-پذیر، آزمایش انتشار مولکولی خالص، آزمایش برش مستقیم و آزمایش فشاری نامحسوس بود. نتایج آزمایش های نفوذپذیری سه محوری و انتشار مولکولی خالص نشان دادند که با افزایش درصد بنتونیت در ترکیبات، ضرایب نفوذپذیری و انتشار مولکولی به طور محسوس کاهش می یابند. از آزمایش های برش مستقیم و فشاری نامحسوس مشخص شد که ترکیبات ماسه-بنتونیت دارای مقاومت برشی و تک محوری قابل قبولی برای استفاده در آستر مدفن می-باشند. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش ها، می توان گفت که ترکیبات ماسه-بنتونیت عملکرد مناسبی به عنوان آستر مدفن مهندسی دارند و از میان چهار ترکیب ماسه-بنتونیت، ترکیب ۲۰ درصد بنتونیت و ۸۰ درصد ماسه، بهینه ترین ترکیب به عنوان جایگزین آستر رسی در کف مدفن زباله می باشد.

**واژگان کلیدی:** آستر مدفن زباله، ترکیب ماسه- بنتونیت، نفوذپذیری، انتشار مولکولی، مقاومت.

### ۱- مقدمه

سیستم مانع انتقال آلودگی استفاده می شود؛ اما از نقاط ضعف این آسترها تشکیل ترک های انقباضی است که نهایتاً منجر به نشت می گردد و در نتیجه کارایی مدفن را در طول عمر خود کاهش می دهد. ماده جایگزینی که بدون ایجاد ترک های انقباضی در آن، می تواند معیار نفوذپذیری هیدرولیکی آستر مدفن را برآورده کند، ترکیب ماسه-بنتونیت است [۷]. علاوه بر آن، بنتونیت موجود در ترکیب ماسه- بنتونیت دارای ظرفیت بالا به عنوان ماده جاذب در برابر مواد شیمیایی می باشد [۸]. خصوصیات ژئوتکنیکی ترکیبات ماسه-بنتونیت به طور گسترده توسط محققین بررسی شده است [۹-۱۲]. ترکیبات ماسه- بنتونیت می بایست سه معیار اجرایی را به عنوان لایه مانع در مدفن برآورده کنند. این معیارها عبارتند از داشتن نفوذپذیری هیدرولیکی پایین (معمولاً کمتر از  $1 \times 10^{-9}$  m/s)، مقاومت کافی برای پایداری در حین ساخت و بهره برداری و عدم آسیب پذیری ناشی از ترک های انقباضی بیش از حد که به دلیل تغییرات

یکی از اصلی ترین راهکارهای حل مشکلات زیست محیطی ناشی از زباله های شهری، احداث محل های دفن مهندسی زباله می باشد تا از این طریق بتوان از انتقال آلودگی به لایه های زیرین خاک و آلودگی آب های زیرزمینی جلوگیری کرد. آسترهای کف مدفن به عنوان اولین مانع در برابر جریان شیرابه عمل می کنند و به این دلیل نقش بسیار مهمی در کارایی مدفن دارند. معیارهای متعددی برای ارزیابی لاینرها از نقطه نظر کنترل انتقال آلودگی توصیه شده است [۳-۱]. از میان این معیارها پائین بودن ضریب نفوذپذیری و ضریب انتشار مولکولی از اهمیت بیشتری برخوردار است و آسترهای ساخته شده باید برای این دو ویژگی کنترل شوند [۴-۶].

در مدفن های مواد زائد جامد، به دلیل نفوذپذیری پایین، اقتصادی بودن، پتانسیل بالای جذب آلودگی، تراکم پذیری مناسب و مقاومت بالا، از خاک های متراکم رسی به عنوان

در رابطه اخیر،  $n$  پوکی خاک است. قانون اول فیک فقط برای محلول‌هایی تحت شرایط حالت پایدار و زمانی که گرادیان غلظت در محیط با زمان تغییر نمی‌یابد، صدق می‌کند. نرخ تغییرات غلظت با زمان و فاصله در محیطی که انتشار مولکولی در آن رخ می‌دهد، توسط قانون دوم فیک به صورت رابطه (۳) قابل بیان است:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D * \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $t$  زمان بوده و سایر پارامترها در بخش‌های قبلی، توضیح داده شده‌اند. حل رابطه (۳) که در آن ملاحظات مربوط به توده محدود آلاینده در منبع موجود در بالای خاک، تعویض محلول منبع با آب مقطر و شرایط شار صفر در پایین نمونه خاک را در نظر می‌گیرد، توسط Booker و Rowe در قالب کد کامپیوتری POLLUTE ارائه گردیده است [۲۰ و ۲۱]. در تحقیق حاضر، از این برنامه به منظور پیش‌بینی غلظت‌های یون کلر در منبع در مقابل زمان و نیز غلظت‌های یون کلر در آب حفره‌ای خاک در مقابل عمق خاک، در آزمایش‌های انتشار مولکولی انجام گرفته روی نمونه‌های ماسه-بنتونیتی، استفاده گردید که در ادامه توضیح داده شده است.

### ۳- مواد و روش‌ها

#### ۳-۱- بنتونیت و ماسه

بنتونیت مورد استفاده در این تحقیق، از شرکت باریت فلات ایران تهیه گردید. نتایج آزمایش انکسار اشعه  $x$  نشان داد که بنتونیت مورد استفاده دارای حدود ۹۰٪ مونت‌موریلونیت<sup>۳</sup> است (شکل (۱)). ماسه مورد استفاده نیز از کارخانه تأمین ماسه ریخته‌گیری در فیروزکوه تهیه شد. ماسه فیروزکوه با کد ۱۶۱، ماسه سیلیسی بد دانه‌بندی شده می‌باشد. سایر خصوصیات خاک ماسه و پودر بنتونیت مورد استفاده در این تحقیق بر اساس آزمایش‌های استاندارد (ASTM D 4318-05, ASTM D 698-07, ASTM D 2434-87, ASTM D 854-06) به دست آمدند که خلاصه نتایج در جدول (۱)، ارائه شده است [۲۲-۲۵]. منحنی دانه‌بندی ماسه و بنتونیت بر اساس آزمایش‌های استاندارد دانه‌بندی با الک و هیدرومتری (ASTM D 422-87 and D 421-87) در شکل (۲) نشان داده شده است [۲۶].

درصد رطوبت در طول عمر مدفن رخ می‌دهد [۱۲].

در این تحقیق، برخی از مهم‌ترین خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوزیست‌محیطی ترکیبات ماسه-بنتونیت با کاربری آستر مدفن زباله، بر روی چهار ترکیب ماسه-بنتونیت با درصدهای وزنی بنتونیت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ بررسی گردید. آزمایش‌های نفوذپذیری هیدرولیکی، انتشار مولکولی، برش مستقیم و فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌های ماسه-بنتونیتی صورت پذیرفت تا عملکرد این ترکیبات به عنوان آستر مدفن‌های مهندسی مشخص شده و در نهایت بهترین ترکیب معرفی گردد.

#### ۲- تئوری انتشار مولکولی

انتشار مولکولی<sup>۱</sup> فرآیندی است که طی آن مولکول‌ها یا یون‌های تشکیل دهنده ماده، تحت تأثیر نیروی جنبشی در جهت گرادیان غلظت انتقال می‌یابند. شار انتشار مولکولی  $J_d$  با استفاده از قانون اول فیک<sup>۲</sup> برای شرایط حالت پایدار طبق رابطه (۱) نوشته می‌شود [۱۳]:

$$J_d = -D_0 \frac{dC}{dX} \quad (1)$$

در رابطه فوق،  $D_0$  ضریب انتشار مولکولی در محلول آزاد (زمانی که ماده شیمیایی به صورت نامحدود رقیق است)،  $C$  غلظت یون در محلول و  $X$  فاصله‌ای است که انتشار مولکولی در آن رخ می‌دهد. محققین بسیاری، عوامل تأثیرگذار بر روی  $D_0$  را مطالعه کرده‌اند [۱۴-۱۶]. به منظور استفاده از قانون اول فیک در محیط خاک، بسیاری از محققین اصلاحاتی روی رابطه (۱) انجام داده‌اند [۱۷-۱۹]. در خاک‌ها به دلیل تخلخل به ویژه در خاک‌های ریزدانه که دارای نفوذپذیری پایین و کانال‌های پرپیچ و خمی هستند، انتشار مولکولی ماده شیمیایی نسبت به محلول آزاد، بسیار کمتر است. بنابر این شار توده شیمیایی به طریق انتشار مولکولی در خاک رسی ریزدانه می‌تواند با استفاده از ضریب انتشار مولکولی مؤثر  $D^*$  طبق رابطه (۲) نوشته شود:

$$J_d = -D^* n \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (2)$$

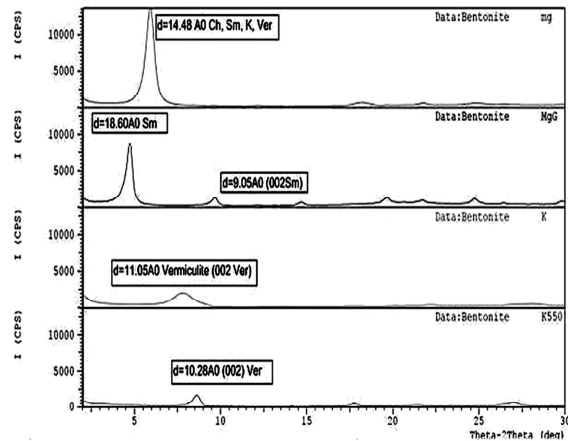
بعد از ترکیب ۲۰٪ این روند عکس می‌گردد؛ بنابر این ترکیب ۲۰٪ بنتونیت دارای کم‌ترین رطوبت بهینه (۱۶٪) و بیش‌ترین وزن مخصوص خشک حداکثر (۱۷/۵ kN/m<sup>3</sup>) می‌باشد.

جدول ۲- درصدهای رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر ترکیبات ماسه - بنتونیت

مقدار بنتونیت (%)	حداکثر وزن مخصوص خشک (kN/m <sup>3</sup> )	رطوبت بهینه (%)
۵	۱۶/۵	۱۷/۵
۱۰	۱۶/۹	۱۷/۱
۲۰	۱۷/۵	۱۶/۰
۳۰	۱۷/۱	۱۷/۵
۴۰	۱۶/۳	۱۸/۵
۵۰	۱۶/۰	۲۱

### ۲-۳- آزمایش‌های نفوذپذیری سه محوری

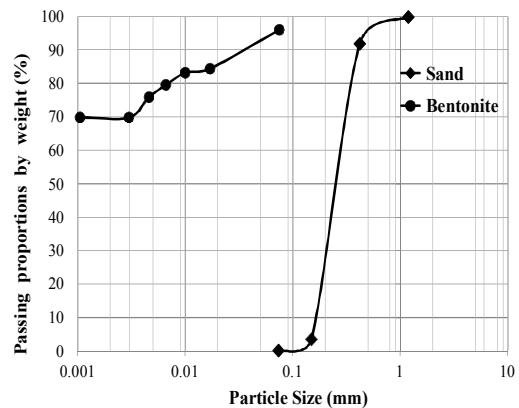
چهار ترکیب ماسه-بنتونیت با درصدهای بنتونیت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ برای انجام آزمایش‌های نفوذپذیری انتخاب شد. برای به حداقل رساندن خطاهای احتمالی، از هر ترکیب دو نمونه (نمونه‌های a و b) مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در جدول (۳) مشخص است، نمونه‌های آزمایش شده سری a از H10a تا H40a و سری b از H10b تا H40b شماره‌گذاری شدند. هر یک از هشت ترکیب ماسه-بنتونیت در دو درصد بیشتر از رطوبت بهینه به روش A پروکتور استاندارد متراکم گردیدند [۲۴]. تراکم خاک‌های ریزدانه در قسمت تر بهینه، باعث تراکم بیشتر توده خاک، حذف حفرات بین دانه‌ای و قرارگیری مجدد دانه‌ها در توده خاک می‌شود که همگی این عوامل منجر به کاهش نفوذپذیری هیدرولیکی می‌گردد [۲۸] و [۲۹]. بعد از انجام تراکم، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰/۱ cm و ارتفاع ۱۱/۷ cm به وسیله جک هیدرولیکی از قالب تراکم استخراج گردیدند و بلافاصله در دستگاه نفوذپذیری قرار داده شدند. نمونه‌ها در غشاء لاستیکی انعطاف‌پذیر قرار داده شدند و جهت اشباع شدن به مدت ۷۲ ساعت تحت فشار محافظه‌ای ۱۰۰ kPa قرار داده شدند و بعد از آن به منظور حصول اطمینان از اشباع کامل نمونه‌ها، به مدت ۲۴ ساعت تحت پس فشار قرار گرفتند. شکل (۳)، دستگاه نفوذپذیری هیدرولیکی سه محوری را به همراه سه نمونه ماسه-بنتونیتی داخل محفظه‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۱- نتایج تحلیل انکسار اشعه ایکس بنتونیت (XRD)

جدول ۱- خصوصیات خاک ماسه و پودر بنتونیت

بنتونیت	ماسه
چگالی ویژه: ۲/۸۱	چگالی ویژه: ۲/۶۴
حد روانی (%): ۳۳۸/۴	اندازه مؤثر دانه‌ها (mm): ۰/۱۷
حد خمیری (%): ۴۷	ضریب یکنواختی: ۱/۵۹
فعالیت: ۴/۲	ضریب نفوذپذیری (m/s): $5 \times 10^{-5}$
درصد دانه‌های رسی: ۶۹/۵	رطوبت بهینه (%): ۱۲/۶
درصد مونتموریلونیت: ۹۰	وزن مخصوص خشک حداکثر: ۱۶ (kN/m <sup>3</sup> )



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه فیروزکوه و بنتونیت

آزمایش‌های تراکم پروکتور استاندارد (ASTM D 698-07) بر روی شش ترکیب ماسه-بنتونیت با درصدهای بنتونیت ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ به منظور تعیین درصدهای رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر ترکیبات صورت پذیرفت [۲۴]. نتایج آزمایش‌های تراکم در جدول (۲) خلاصه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است با افزایش بنتونیت از ۵٪ به ۲۰٪، رطوبت بهینه کاهش و وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش می‌یابد؛ اما

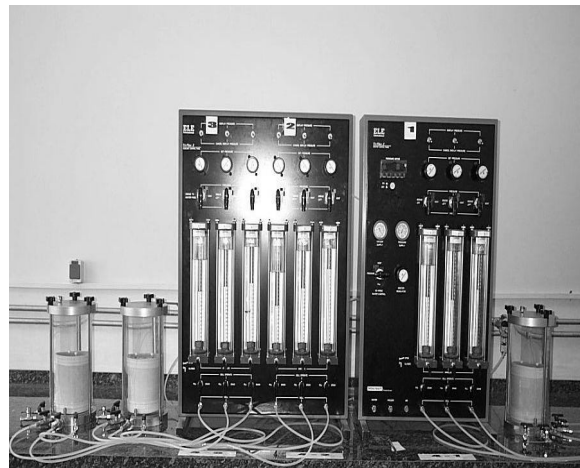
### ۳-۳- آزمایش‌های انتشار مولکولی

برای هر یک از چهار ترکیب ماسه- بنتونیت با درصدهای بنتونیت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰، دو آزمایش انتشار مولکولی با شرایط یکسان به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج، انجام پذیرفت. شکل (۴) سری آزمایش‌های در حال انجام را نشان می‌دهد. آزمایش‌های سری a از D10a تا D40a و آزمایش‌های سری b از D10b تا D40b شماره‌گذاری گردیدند (جدول (۴)). نمونه‌های ماسه- بنتونیتی در دو درصد بیشتر از رطوبت بهینه در قالب‌های انتشار مولکولی به قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۲۰ cm به روش A پروکتور استاندارد متراکم شدند. بعد از عمل تراکم، ارتفاع نهایی نمونه‌ها در حدود ۱۲ cm به دست آمد.

به منظور تأمین شرایط مرزی، قالب‌ها از پایین توسط صفحه شیشه‌ای و درزگیر سیلیکونی، آب‌بندی شدند. فضای خالی بالای نمونه‌های ماسه- بنتونیتی در داخل قالب‌های انتشار مولکولی به عنوان منبع محلول کلرورسدیم در نظر گرفته شد. به منظور رفع انتقال یون کلر به طریق فرارفت<sup>۱</sup> ناشی از پتانسیل مکش، آب مقطر به ارتفاع ۱ cm به قسمت فوقانی نمونه‌های ماسه- بنتونیتی ریخته شد و پس از گذشت مدت زمان ۲۴ ساعت، این آب تخلیه گردید. سپس محلول کلرورسدیم با غلظت ۴۰۰۰ mg/L به عنوان منبع آلوده، روی نمونه‌های ماسه- بنتونیتی ریخته شد و آزمایش‌های انتشار مولکولی آغاز گردید و حدود ۲۵ روز به طول انجامید. در طول آزمایش‌ها، به منظور مشاهده تغییرات غلظت یون کلر در مقابل زمان، از محلول منبع نمونه‌گیری شد. در هر بار نمونه‌گیری، محلول منبع به میزان ۲ cm<sup>3</sup> برداشته شده و به همین میزان، آب مقطر به منبع اضافه گردید تا ارتفاع محلول در بالای نمونه‌های ماسه- بنتونیتی ثابت باقی بماند.



شکل ۴- قالب‌های انتشار مولکولی به همراه نمونه‌های محلول کلرور سدیم منبع در آزمایش‌های انتشار مولکولی ترکیبات ماسه- بنتونیت



شکل ۳- دستگاه نفوذپذیری هیدرولیکی سه محوری با چداره انعطاف‌پذیر با سه نمونه ترکیب ماسه- بنتونیت در حال آزمایش

گرادیان هیدرولیکی و فشارهای بالا و پایین هر یک از نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D 5084-03 محاسبه شدند [۳۰]. آزمایش‌ها حدود ۱۶۸ ساعت به طول انجامید و ضرایب نفوذپذیری از رابطه (۴) محاسبه گردید:

$$k = \frac{\Delta Q \cdot L}{A \cdot h \cdot \Delta t} \quad (4)$$

در این رابطه،  $k$  ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی (m/s)،  $L$  ارتفاع نمونه (m)،  $A$  سطح مقطع نمونه (m<sup>2</sup>)،  $h$  متوسط افت بار آب (m)،  $\Delta t$  بازه زمانی عبور جریان، و  $\Delta Q$  میانگین جریان‌های ورودی و خروجی در بازه زمانی  $\Delta t$  می‌باشد (m<sup>3</sup>). مقادیر ضرایب نفوذپذیری هیدرولیکی به دست آمده با استفاده از روابط (۵) و (۶) مطابق با استاندارد برای دمای ۲۰ °C اصلاح شدند [۳۰]:

$$K_{20} = R_T \cdot K \quad (5)$$

$$R_T = \frac{2.2902(0.9842^T)}{T^{0.1702}} \quad (6)$$

در روابط بالا،  $k_{20}$  ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی اصلاح شده در دمای ۲۰ °C،  $R_T$  نسبت ویسکوزیته آب در دمای آزمایش به ویسکوزیته آب در دمای ۲۰ °C،  $T$  دمای متوسط آزمایش نفوذپذیری (°C) می‌باشد.

در دو درصد بیش‌تر از رطوبت بهینه به دست آمده، متراکم شدند. نمونه‌ها در داخل قالب استوانه‌ای به قطر ۱۵ cm و ارتفاع ۱۰ cm در سه لایه و در هر لایه ۵۶ ضربه، به روش پروکتور استاندارد متراکم گردیدند [۲۴]. سپس نمونه‌ها توسط جک هیدرولیکی به ضخامت ۲ cm از قالب خرج گردیدند. بدین ترتیب برای هر یک از چهار ترکیب ماسه- بنتونیت از داخل قالب تراکم، پنج نمونه برش به ابعاد ۱۰×۱۰ cm و ضخامت ۲ cm تهیه گردید. در هر یک از چهار ترکیب ماسه- بنتونیت، سه نمونه از پنج نمونه برش، با تنش نرمال ۵۰ kPa (برابر با تنش مؤثر در نظر گرفته شده برای آستر مدفن در شرایط دفن متعارف) و دو نمونه باقی‌مانده با تنش‌های نرمال ۱۰۰ kPa و ۱۵۰ kPa مورد آزمایش قرار گرفتند. در ابتدا تمامی نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حالت غوطه‌ور در آب قرار داده شدند. سپس آزمایش برش مستقیم با حالت کنترل کرنش و با سرعت نیروی برشی ۰/۱۲ mm/min انجام گردید و بعد از گذشت مدت زمان تقریبی ۱ ساعت و ۴۰ دقیقه، یعنی زمانی که کرنش افقی نمونه به ۰/۱۲ رسید، آزمایش پایان یافت.

### ۳-۵- آزمایش‌های فشاری نامحصور (تک محوری)

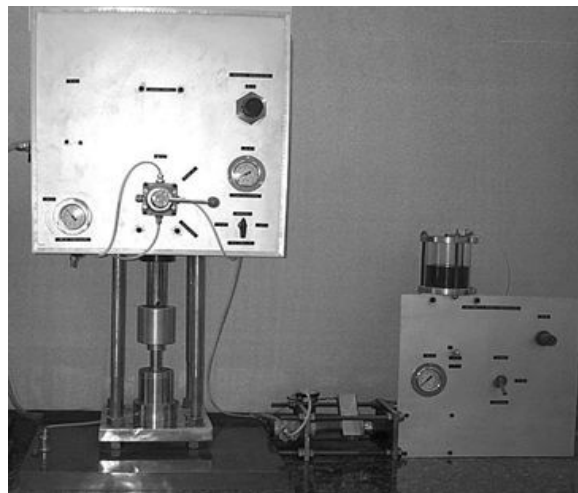
همانند آزمایش‌های برش مستقیم، تمامی ترکیبات ماسه- بنتونیت با درصدهای بنتونیت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ در دو درصد بیش‌تر از رطوبت بهینه متراکم شدند. جهت تهیه نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D 2166-00 از یک قالب فلزی استوانه‌ای با نسبت ارتفاع به قطر ۲/۰۵ استفاده شد [۳۲]. قالب‌های فلزی توسط پتک به آرامی داخل قالب تراکم جاگذاری شده و برای هر یک از چهار ترکیب ماسه- بنتونیت، چهار نمونه آزمایش فشاری محصور نشده به قطر ۳۸ mm و ارتفاع ۷۸ mm تهیه گردید. نمونه‌ها پس از ثبت وزن تک‌تک آن‌ها، به منظور جلوگیری از هدر رفت رطوبت، در محفظه‌ای قرار داده شدند. آزمایش‌ها بصورت کنترل کرنش و با سرعت ۱ mm/min انجام شدند. بارگذاری تا جایی ادامه یافت که گسیختگی در نمونه‌ها رخ دهد.

### ۴- نتایج

#### ۴-۱- آزمایش‌های نفوذپذیری سه محوری

تغییرات حجم عبوری آب در مقابل زمان آزمایش برای ترکیب حاوی ۲۰ درصد بنتونیت در آزمایش‌های H20a و H20b در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است، انطباق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی و خط برازش حاصل از رابطه (۴) در هر دو آزمایش، به دست

شکل (۴)، قالب‌های انتشار مولکولی را به همراه نمونه‌های کلرور سدیم برداشته شده از منبع در طول آزمایش‌ها، نشان می‌دهد. در پایان هر آزمایش، محلول منبع تخلیه گردید و نمونه ماسه- بنتونیت به وسیله جک هیدرولیکی از قالب استخراج شده و در هفت لایه با ضخامت ۱/۷ cm بریده شد. برای تعیین درصد رطوبت هر یک از نمونه‌های خاک بریده شده، بخشی از خاک جدا شد و مابقی آن با استفاده از دستگاه استحصال آب حفره‌ای، آگیری گردید. شکل (۵)، دستگاه استحصال آب حفره‌ای خاک<sup>۱</sup> به کار رفته در آزمایشات را نشان می‌دهد [۳۱].



شکل ۵- خروج آب حفره‌ای نمونه‌های ماسه- بنتونیتی توسط دستگاه استحصال آب حفره‌ای خاک

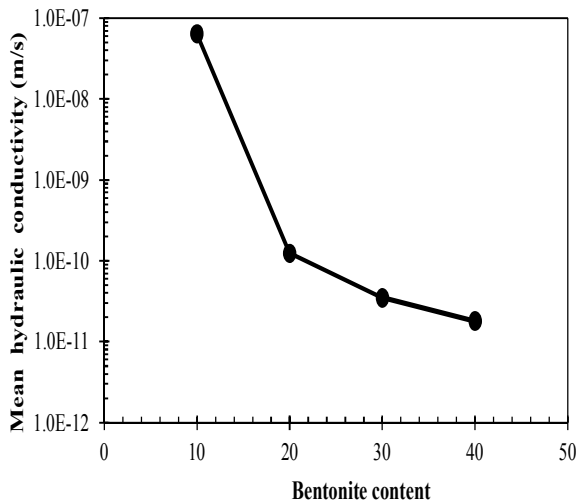
قبل از شروع آزمایش‌های انتشار مولکولی، هر یک از چهار ترکیب ماسه- بنتونیت متراکم گردیده و نمونه‌هایی از ترکیبات در دستگاه استحصال آب حفره‌ای قرار داده شدند و آب حفره‌ای حاصل از فشرده شدن خاک به منظور تعیین غلظت اولیه یون کلر جمع‌آوری گردید. غلظت یون کلر در نمونه محلول‌های منبع و نمونه‌های آب حفره‌ای استحصال شده، با استفاده از دستگاه غلظت سنج<sup>۲</sup> (یون‌متر) تعیین گردید.

#### ۳-۴- آزمایش‌های برش مستقیم

مقاومت برشی چهار ترکیب ماسه- بنتونیت با درصدهای بنتونیت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ از طریق آزمایش‌های برش مستقیم بدست آمد. برای اطمینان از حداقل نفوذپذیری ممکن، نمونه‌ها

8- Soil pore water squeezer

9-Microprocessor pH/Ion Meter, WTW Co., Germany



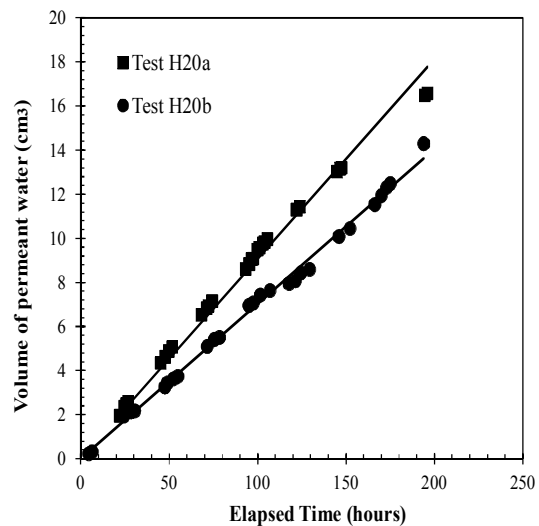
شکل ۷- نفوذپذیری هیدرولیکی متوسط در مقابل درصد بنتونیت ترکیبات ماسه- بنتونیت

جدول ۳- ضرایب نفوذپذیری هیدرولیکی اصلاح شده ترکیبات ماسه - بنتونیت

شماره آزمایش	مقدار بنتونیت (%)	درصد رطوبت	گرادیان هیدرولیکی	ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی در دمای ۲۰°C (m/s)
H10a	۱۰	۱۹/۱	۱۰	$6.186 \times 10^{-8}$
H20a	۲۰	۱۸/۰	۲۰	$1.32 \times 10^{-10}$
H30a	۳۰	۱۹/۵	۳۰	$3.77 \times 10^{-11}$
H40a	۴۰	۲۰/۵	۳۰	$1.69 \times 10^{-11}$
H10b	۱۰	۱۹/۱	۱۰	$6.02 \times 10^{-8}$
H20b	۲۰	۱۸/۰	۲۰	$1.16 \times 10^{-10}$
H30b	۳۰	۱۹/۵	۳۰	$3.24 \times 10^{-11}$
H40b	۴۰	۲۰/۵	۳۰	$1.91 \times 10^{-11}$

آمد. مقادیر ضرایب نفوذپذیری میانگین اصلاح شده برای هر یک از چهار ترکیب ماسه- بنتونیت در جدول (۳) خلاصه شده است. نتایج بیانگر آنست که با افزایش درصد بنتونیت در ترکیبات، ضرایب نفوذپذیری هیدرولیکی به شدت کاهش یافته و ترکیب حاوی ۴۰٪ بنتونیت دارای کمترین ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی است ( $1.69 \times 10^{-11}$  m/s و  $1.91 \times 10^{-11}$  m/s به ترتیب برای آزمایش‌های H40a و H40b). افزودن بنتونیت بیش از ۲۰٪ به ترکیب، تأثیر چندانی روی کاهش نفوذپذیری هیدرولیکی نمی‌گذارد به این دلیل که در ترکیب ۲۰٪، تقریباً تمام حفرات ماسه در اثر تورم بنتونیت پر شدند و عملاً افزودن بنتونیت بیش‌تر از این درصد تأثیر بسزایی در کاهش نفوذپذیری ندارد. سایر محققین نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند [۱۰ و ۳۳].

بنابر این ترکیب حاوی ۲۰٪ بنتونیت، ترکیب بهینه‌ای به عنوان جایگزین برای آسترهای رسی مدفن‌های مهندسی به حساب می‌آید. شکل (۷) مقادیر نفوذپذیری هیدرولیکی متوسط ترکیبات را در مقابل درصد بنتونیت نشان می‌دهد. نسبت نفوذپذیری میانگین اصلاح شده ترکیب ۱۰٪ به ۲۰٪ بنتونیت، تقریباً برابر ۵۰۰ است در حالی که همین نسبت برای ترکیب ۲۰٪ بنتونیت به ۳۰٪ تنها در حدود ۳ می‌باشد که این اختلاف در شکل (۷)، از مقایسه شیب بین ترکیبات متوالی نمایان است.



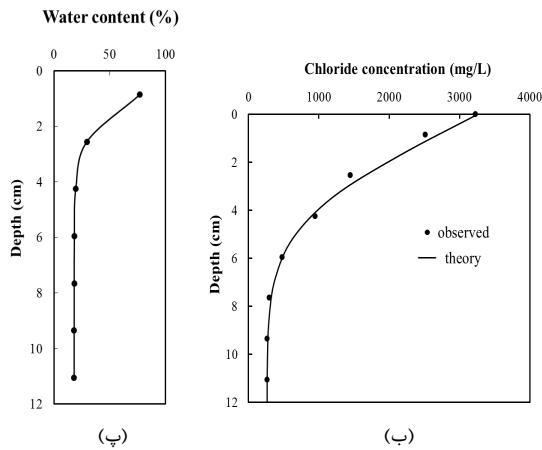
شکل ۶- حجم آب عبوری در مقابل زمان سپری شده در آزمایش‌های نفوذپذیری هیدرولیکی انجام شده روی ترکیب حاوی ۲۰٪ بنتونیت (آزمایش‌های H20a و H20b)

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های انتشار مولکولی ترکیبات ماسه- بنتونیت

شماره آزمایش								پارامترها
سری b				سری a				
D40b	D30b	D20b	D10b	D40a	D30a	D20a	D10a	
۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	درصد بنتونیت
۱۲/۰	۱۲/۲	۱۲/۱	۱۲/۲	۱۲/۱	۱۲/۱	۱۲/۰	۱۲/۱	ارتفاع نمونه (cm)
۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۳	رطوبت حجمی
۹۲/۰	۹۳/۱	۹۲/۸	۹۳/۰	۹۲/۰	۹۳/۱	۹۲/۸	۹۳/۰	درجه اشباع (/)
۲۷۵	۲۶۳	۲۶۳	۲۰۰	۲۷۵	۲۶۳	۲۶۳	۲۰۰	غلظت پیشینه یون کلر (mg/L)
۳۹۳۰	۳۹۵۰	۳۹۱۰	۳۹۲۰	۳۹۵۰	۳۹۶۰	۳۹۱۰	۳۹۴۰	غلظت اولیه کلر در منبع (mg/L)
۲۴/۸	۲۴/۵	۲۴/۳	۲۴/۷	۲۵/۲	۲۵/۲	۲۵/۰	۲۵/۱	مدت زمان آزمایش (روز)
۱/۷	۲/۱	۲/۶	۳/۱	۱/۶	۱/۹	۲/۴	۳/۱	ضریب دیفیوژن مؤثر یون کلر ( $\times 10^{-10} m^2/s$ )

#### ۴-۲- آزمایش‌های انتشار مولکولی

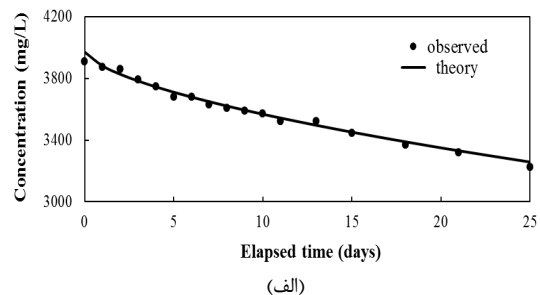
شکل (۸-الف) غلظت‌های یون کلر مشاهده شده و پیش‌بینی شده را در مقابل زمان (مدت زمان آزمایش) و شکل (۸-ب) غلظت‌های یون کلر مشاهده شده و پیش‌بینی شده را در مقابل عمق خاک برای آزمایش D20a نشان می‌دهد. شکل (۸-پ) تغییرات رطوبت خاک در مقابل عمق را در پایان آزمایش D20a نشان می‌دهد. تحلیل تئوریک، مقدار ضریب انتشار مولکولی را برای ترکیب ۲۰٪ بنتونیت در آزمایش D20a برابر  $1.0 \times 10^{-10} m^2/s$  نتیجه داد. خلاصه نتایج دو سری آزمایش‌های انتشار مولکولی برای ترکیبات ماسه-بنتونیت در جدول (۴) آمده است. همان طور که مشخص است، با افزایش درصد بنتونیت، ضریب انتشار مولکولی ترکیبات ماسه-بنتونیت به طور محسوس کاهش می‌یابد. مقادیر ضرایب انتشار مولکولی نمونه‌های ماسه-بنتونیتی از  $3.1 \times 10^{-10} m^2/s$  تا  $1.6 \times 10^{-10} m^2/s$  به ترتیب برای ترکیب ۱۰ تا ۴۰ درصد بنتونیت می‌باشد. این مقادیر، با نتایج به دست آمده در مطالعات سایر محققین برای مواد مشابه سازگاری دارند.

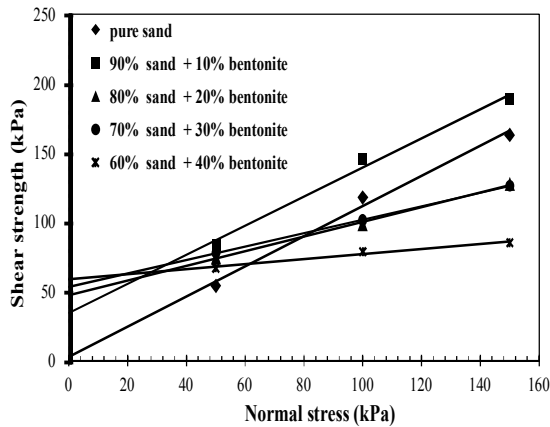


شکل ۸- پروفیل‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده در آزمایش انتشار مولکولی D20a: الف) غلظت‌های یون کلر منبع در مقابل زمان سپری شده، ب) غلظت‌های یون کلر در مقابل عمق خاک، پ) درصد رطوبت در مقابل عمق خاک

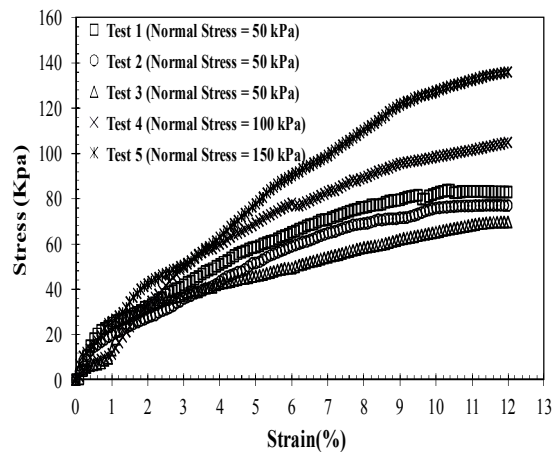
#### ۴-۳- آزمایش‌های برش مستقیم

در پایان آزمایش‌های برش مستقیم، منحنی‌های تنش- کرنش و خطوط پوش گسیختگی در نمودارهای تنش نرمال- تنش برشی برای تمام ترکیبات ماسه-بنتونیت، ترسیم شدند. در ادامه تنها نتایج ترکیب ماسه-بنتونیت حاوی ۲۰٪ بنتونیت ارائه شده است. شکل (۹) منحنی‌های تنش-کرنش را برای ترکیب ۲۰٪ بنتونیت و ۸۰٪ ماسه در تنش‌های نرمال ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال نشان می‌دهد.

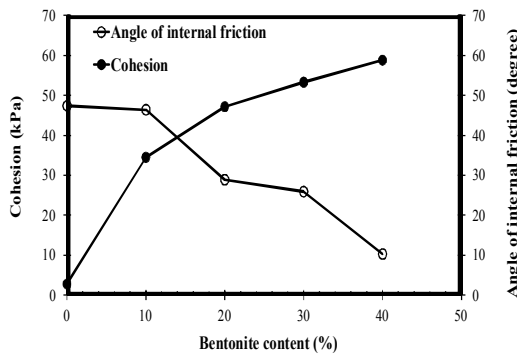




شکل ۱۰- خطوط پوش گسیختگی در آزمایش‌های برش مستقیم انجام گرفته بر روی ترکیبات ماسه- بنتونیت



شکل ۹- منحنی‌های تنش- کرنش ترکیب حاوی ۲۰٪ بنتونیت به دست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم



شکل ۱۱- زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی، در مقابل درصد بنتونیت در آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده بر روی ترکیبات ماسه- بنتونیت

#### ۴-۴- آزمایش‌های فشاری نامحصور

منحنی تنش-کرنش برای ترکیب حاوی ۲۰٪ بنتونیت در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مقادیر متوسط مقاومت فشاری نامحصور (تک محوری) چهار نمونه آزمایش برای هر یک از ترکیبات ماسه- بنتونیت محاسبه گردید و مطابق شکل (۱۳) در مقابل درصد بنتونیت ترسیم شد. همان طور که در شکل (۱۳) دیده می‌شود، افزایش بنتونیت تا ۳۰٪، موجب افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری نامحصور شد. به عنوان مثال مقاومت تک محوری ترکیب ۲۰٪، حدوداً ۶۴٪ بیش‌تر از ترکیب ۱۰٪ است. طبق شکل (۱۳)، مقاومت فشاری نامحصور بیشینه برابر ۸۶/۳ kPa می‌باشد که مربوط به ترکیب ۳۰٪ بنتونیت و ۷۰٪ ماسه است.

همان طور که انتظار می‌رفت با افزایش تنش نرمال وارد بر نمونه‌ها از ۵۰ به ۱۵۰ کیلوپاسکال، تنش برشی ترکیبات نیز افزایش یافت. هیچ‌کدام از منحنی‌های تنش-کرنش برای ترکیبات ماسه-بنتونیت، نقطه بیشینه ندارند. مقادیر مقاومت‌های برشی برای هر سه حالت تنش نرمال ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال به ازای کرنش ۱۰ درصد نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. شکل (۱۰)، خطوط پوش گسیختگی حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم را نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای مقاومت برشی ( $C$  و  $\theta$ ) از آن به دست آمدند. در شکل (۱۰)، تنش‌های برشی هر یک از چهار ترکیب در تنش نرمال ۵۰ kPa می‌باشند. مقادیر متوسط تنش‌های برشی در سه آزمایش برش مستقیم می‌باشند. مقادیر مقاومت برشی ترکیبات طبق معادله کولمب ( $\tau = c + \sigma \tan \theta$ ) محاسبه گردیدند (شکل (۱۱)). تغییرات پارامترهای مقاومت برشی را در مقابل درصد بنتونیت ترکیبات نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۱۱) مشخص است، با افزایش درصد بنتونیت در ترکیبات، به دلیل ریزدانه بودن، چسبندگی و تورم زیاد بنتونیت، چسبندگی افزایش یافته لیکن از اصطکاک بین دو ماده ماسه و بنتونیت کاسته شد. این امر موجب کاهش محسوس مقاومت برشی ترکیبات ماسه-بنتونیت گردید. به عنوان مثال، مقادیر  $C$  و  $\theta$  برای ترکیب ۱۰٪ بنتونیت به ترتیب برابر  $46/4^\circ$  و  $34/5$  کیلوپاسکال و برای ترکیب ۴۰٪ بنتونیت برابر  $10/3^\circ$  و  $58/8$  کیلوپاسکال می‌باشند و مقاومت برشی میانگین ترکیب ۴۰ درصد بنتونیت نسبت به ۱۰ درصد بنتونیت در تنش قائم ۵۰ کیلوپاسکال، حدود ۲۲ درصد کاهش یافته است.



متوسط ترکیبات ماسه- بنتونیت با درصدهای وزنی بنتونیت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ به ترتیب برابر  $10^{-11} \text{ m/s}$ ،  $6/44 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ ،  $3/48 \times 10^{-11} \text{ m/s}$  و  $1/8 \times 10^{-11} \text{ m/s}$  به دست آمد.

۲- ضرایب انتشار مولکولی ترکیبات ماسه- بنتونیت حاصل از آزمایش‌های انتشار مولکولی، در محدوده  $3/1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $1/6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  برای ترکیب حاوی بنتونیت به مقدار ۱۰٪ تا ۴۰٪ به دست آمد. این مقادیر کمتر از ضرایب انتشار مولکولی متوسط گزارش شده برای آسترهای رسی متراکم است؛ بنابراین معیار انتشار مولکولی یک آستر مهندسی را ارضاء می‌کند.

۳- نتایج آزمایش‌های برش مستقیم نشان دادند که با افزایش درصد بنتونیت در ترکیبات، چسبندگی نیز افزایش می‌یابد؛ در حالی که مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و در نتیجه مقاومت برشی ترکیب کاهش پیدا می‌کند. مقاومت برشی میانگین ترکیب حاوی ۴۰٪ بنتونیت نسبت به ۱۰٪ بنتونیت در تنش قائم ۵۰ kPa، کاهش حدود ۲۲ درصدی دارد.

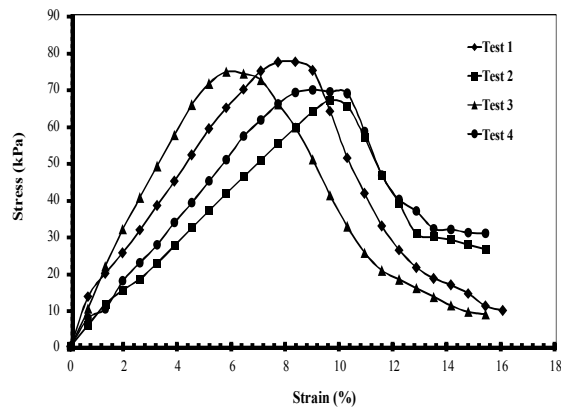
۴- با افزایش بنتونیت تا ۳۰٪، مقاومت فشاری نامحصور ترکیبات ماسه- بنتونیت به مقدار بیشینه ۸۶/۳ kPa افزایش یافت، لیکن افزودن بیش از ۳۰٪ بنتونیت به ماسه، باعث کاهش مقاومت فشاری نامحصور ترکیب شد.

۵- نتایج این مطالعه نشان دادند که ترکیب ۲۰٪ بنتونیت و ۸۰٪ ماسه فیروزکوه، حداقل استانداردهای ژئوتکنیکی و ژئوزیست‌محیطی لازم را برای آستر کف یک مدفن مهندسی برآورده می‌کند. بنابراین این ترکیب، به عنوان ترکیب بهینه و به عنوان مصالح جایگزین برای آسترهای رسی (هنگامی که خاک رسی مناسب و کافی در دسترس نباشد) توصیه می‌شود. خلاصه- ای از پارامترهای به دست آمده برای ترکیب حاوی ۲۰٪ بنتونیت و ۸۰٪ ماسه فیروزکوه بدین شرح است:

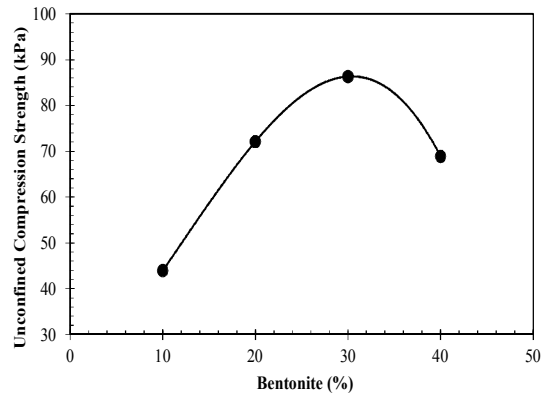
درصد رطوبت بهینه = ۱۶٪، وزن مخصوص خشک حداکثر =  $17/5 \text{ kN/m}^3$ ، ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی =  $10^{-11} \text{ m/s}$ ، ضریب انتشار مولکولی یون کلر =  $2/5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ، مقاومت برشی تحت تنش نرمال ۵۰ kPa = ۷۴/۵ kPa و مقاومت فشاری نامحصور = ۷۲/۱ kPa.

#### ۶- مراجع

- [1] Katsumi, T., Benson, C. H., Foote, G. J., Kamon, M., "Performance-Based Design of Landfill Liners", Engineering Geology, 2001, 60, 139-148.
- [2] Bouazza, A., "Geosynthetic Clay Liners", Geotextiles and Geomembranes, 2002, 20, 3-17.



شکل ۱۲- منحنی‌های تنش- کرنش ترکیب حاوی ۲۰٪ بنتونیت به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری نامحصور



شکل ۱۳- مقاومت فشاری نامحصور در مقابل درصد بنتونیت ترکیبات ماسه- بنتونیت

#### ۵- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آزمایش‌های آزمایشگاهی با هدف بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوزیست‌محیطی ترکیبات ماسه فیروزکوه و بنتونیت به عنوان مصالح جایگزین برای آسترهای رسی در مدفن‌های مهندسی زباله انجام پذیرفت. بدین منظور آزمایش‌های نفوذپذیری سه محوری با جداره انعطاف‌پذیر، برش مستقیم، فشاری نامحصور (تک محوری) و انتشار مولکولی انجام شدند. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها را به شرح زیر می‌توان خلاصه نمود:

۱- آزمایش‌های نفوذپذیری هیدرولیکی نشان دادند که بنتونیت تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش ضریب نفوذپذیری ماسه فیروزکوه دارد؛ طوری که ترکیب‌های حاوی ۲۰٪ بنتونیت و بیشتر، استاندارد حداقل نفوذپذیری را به عنوان آستر کف یک مدفن مهندسی برآورده می‌کند. ضریب نفوذپذیری هیدرولیکی

- Second Edition, John Wiley and Sons Ltd, West Sussex, England, 1999, pp 1-329.
- [15] Shackelford, C. D., Daniel, D. E., "Diffusion in Saturated Soil, I: Background", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1991, 117, 467-484.
- [16] Shackelford, C. D., Daniel, D. E., "Diffusion in Saturated Soil, II: Results for Compacted Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1991, 117, 485-506.
- [17] Foose, G. J., "Transit-Time Design for Diffusion through Composite Liners", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2002, 128, 590-601.
- [18] Malusis, M. A., Shackelford, C. D., "Predicting Solute Flux through a Clay Membrane Barrier", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130, 477-487.
- [19] Shackelford, C. D., Lee, J. M., "The Destruction Role of Diffusion on Clay Membrane Behavior", *Journal of Clays and Clay Minerals*, 2003, 51, 186-196.
- [20] Rowe, R. K., Booker, J. R., "An Efficient Analysis of Pollutant Migration through Soil", *Numerical Methods in Transient and Coupled Systems*, Lewis, Hinton, Bettess & Schrefler Ed., John Wiley & Sons, 1987, pp 13-42.
- [21] Rowe, R. K., Booker, J. R., "Pollute-V6. A Program for Modeling Pollutant Migration through Soil", *Geotechnical Research center*, The University of Western Ontario, Canada, 1994.
- [22] ASTM D 854-06 e1. "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", *Annual Book of ASTM Standards*, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (1), ASTM, West Conshohocken, PA.
- [23] ASTM D 4318-05. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", *Annual Book of ASTM Standards*, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (1), ASTM, West Conshohocken, PA.
- [24] ASTM D 698-07 e1. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))", *Annual Book of ASTM Standards*, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (1), ASTM, West Conshohocken, PA.
- [3] Shackelford, C. D., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, T. B., Lin, L., "Evaluating the Hydraulic Conductivity of GCLs Permeated with Non-Standard Liquids", *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, 18, 133-161.
- [4] Rowe, R. K., Booker, J. R., Quigley, R. M., "Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities", E & F N Spon (Chapman & Hall), London, 1995, pp 1-390.
- [5] Rowe, R. K., "Liner Systems", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*, Kluwer Academic Publishing, Norwell, US, 2001, pp 739-788.
- [6] King, K. S., Quigley, R. M., Fernandez, F., Reades, D. W., Bacopoulos, A., "Hydraulic Conductivity and Diffusion Monitoring of the Keele Valley Landfill Liner, Maple, Ontario", *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 30, 124-134.
- [7] Mollins, L. H., Stewart, D. I., Cousens, T. W., "Predicting the Properties of Bentonite-Sand Mixtures", *Clay Minerals*, 1996, 31, 243-252.
- [8] Yong, R. N., "Overview of Modeling of Clay Microstructure and Interactions for Prediction of Waste Isolation Barrier Performance", *Engineering Geology*, 1999, 54, 83-91.
- [9] Akgun, H., "Geotechnical Characterization and Performance Assessment of Bentonite/Sand Mixtures for Underground Waste Repository Sealing", *Applied Clay Science*, 2010, 49, 394-399.
- [10] Komine, H., "Simplified Evaluation on Hydraulic Conductivities of Sand-Bentonite Mixture Backfill", *Applied Clay Science*, 2004, 26, 13-19.
- [11] Stewart, D. I., Studds, P. G., Cousens, T. W., "The Factors Controlling the Engineering Properties of Bentonite-Enhanced Sand", *Applied Clay Science*, 2003, 23, 97-110.
- [12] Tay, Y. Y., Stewart, D. I., Cousens, T. W., "Shrinkage and Desiccation Cracking in Bentonite-Sand Landfill Liners", *Engineering Geology*, 2001, 60, 263-274.
- [13] Mitchell, J. K., "Fundamentals of Soil Behavior", John Wiley and Sons, Inc, New York, US, 1993, pp 1-437.
- [14] Beek, W. J., Mutzall, K. M. K., Van Heuven, J. W., "Transport Phenomena",

- [25] ASTM D 2434-87, "Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (1), ASTM, West Conshohocken, PA.
- [26] ASTM D 421-87, "Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (1), ASTM, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM D 422-87, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (1), ASTM, West Conshohocken, PA.
- [28] Daniel, D. E., Benson, C., "Water Content-Density Criteria for Compacted Soil Liners", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1990, 116, 1811-1830.
- [29] Lambe, T., "The Permeability of Compacted Bentonite Fined-Grained Soils", Special Technical Publication, ASTM, 1954, 163, 56-67.
- [30] ASTM D 5084-03, "Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using A Flexible Wall Permeameter", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (1), ASTM, West Conshohocken, PA.
- [31] Badv, K., "Automatic-Pneumatic Soil Squeezer (APSS)", Patent No. 36509, Dated 9<sup>th</sup> October, 2006 (1385/07/17), General Office for Registration of Companies and Industrial Ownership of Iran.
- [32] ASTM D 2166-06, "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength 375 of Cohesive Soil, Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (1), ASTM, West Conshohocken, PA.
- [33] De Magistris, F. S., Silvestri, F., Vinale, F., "Physical and Mechanical Properties of Compacted Silty Sand with Low Bentonite Fraction", Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35, 909-925.

**EXTENDED ABSTRACT**

## **Laboratory Investigation of Geotechnical and Geoenvironmental Characteristics of Bentonite-Enhanced Sand Mixtures as Landfill Liner Material**

Kazem Badv \*, Hadi Aliashrafi

*Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia 57561-15311, Iran*

**Received:** 02 October 2014; **Accepted:** 13 April 2015

---

**Keywords:**

Landfill liner, Bentonite-enhanced sand mixture, Hydraulic conductivity, Diffusion, Strength

---

### **1. Introduction**

In the absence of clayey soils, compacted bentonite-enhanced sand (BES) mixtures are attracting greater attention as suitable material for contaminant barrier systems. The efficiency of these insulated barriers depends largely on their hydraulic and mechanical behavior. In landfills, as the main function of the liner is to minimize the movement of water out of the waste disposal facility, BES should satisfy three performance criteria if it is to perform satisfactorily as a barrier material. It should have low hydraulic conductivity (typically less than  $1 \times 10^{-9}$  m/s), should have sufficient strength in order to be stable during construction and operation, and it should not be susceptible to excessive shrinkage cracking due to water content changes that usually occur during the lifetime of the landfill [1]. In this study, some important geotechnical and geoenvironmental characteristics of BES mixtures were investigated. Four BES mixtures with 10, 20, 30 and 40% bentonite content were selected and the hydraulic conductivity tests, pure diffusion tests, direct shear tests and unconfined compression tests were performed on the BES samples to examine their suitability as contaminant barrier material.

### **2. Methodology**

#### *2.1. Hydraulic conductivity tests*

Four BES mixtures with 10, 20, 30 and 40% bentonite content were chosen for the hydraulic conductivity tests. For each mixture two, samples were prepared and tested to ensure reproducibility of the results. Fig. 1a shows the triaxial hydraulic conductivity apparatus with three BES samples in the test cells. The hydraulic gradient and the lower and upper pressures for each specimen were chosen according to ASTM D 5084-03 standard. The hydraulic conductivity values were calculated using Eq. (1).

$$k = \frac{\Delta Q \cdot L}{A \cdot h \cdot \Delta t} \quad (1)$$

Where  $k$  is the hydraulic conductivity (m/s),  $\Delta Q$  is the quantity of flow for given time interval  $\Delta t$  taken as the average of the inflow and outflow ( $m^3$ ),  $L$  is the height of the specimen (m),  $A$  is the cross-sectional area of the specimen ( $m^2$ ), and  $h$  is the average head loss across the permeameter/specimen (m).

#### *2.2. Diffusion tests*

Two identical diffusion tests were performed for each four BES mixtures with 10, 20, 30 and 40% bentonite contents, to ensure reproducibility of the results (test series 'a' and 'b'). Tests were numbered from D10a to D40a for series 'a' tests and from D10b to D40b for series 'b' tests (see Table 1). The NaCl solution with 4000 mg/L chloride concentration was poured on top of the specimens and the diffusion experiments commenced.

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: k.badv@urmia.ac.ir (Kazem Badv), hadi\_aliashrafi68@yahoo.com (Hadi Aliashrafi)



**Fig. 1.** Hydraulic conductivity and diffusion tests: (a) Triaxial hydraulic conductivity apparatus with three BES samples in the test cells, (b) Diffusion cells with NaCl samples taken during the diffusion tests.

The duration of tests was about 25 days. Fig. 1b shows a picture view of diffusion cells with NaCl samples taken from the source reservoirs during the tests. After the termination of each diffusion test, the source solution was removed and BES sample was extruded from the diffusion cell using a hydraulic jack and sliced into seven sub-layers of about 1.7 cm thickness. A soil sample was taken from each slice for water content determination and the remaining soil was squeezed using the pneumatic soil pore-water squeeze apparatus. The chloride concentrations in all collected NaCl solutions were measured using the Microprocessor pH/Ion Meter (WTW Co., Germany).

### 2.3. Direct shear tests

For each four BES mixtures with 10, 20, 30 and 40% bentonite content, five specimens were prepared. Three specimens were tested under 50 kPa normal stress and the remaining two specimens were tested under 100 kPa and 150 kPa normal stresses with the direct shear tests.

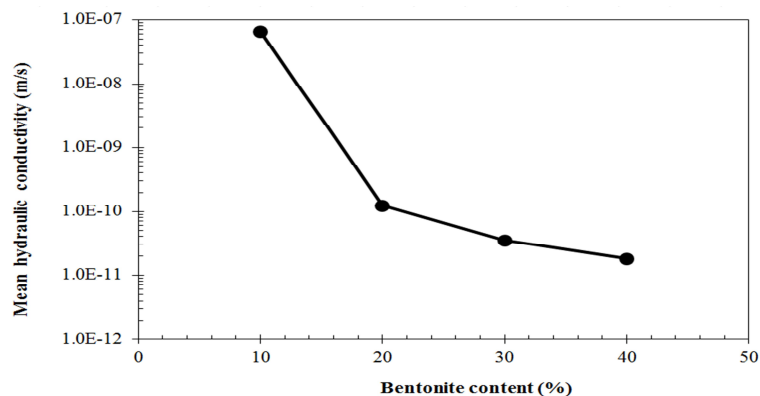
### 2.4. Unconfined compression tests

For each four BES mixtures with 10, 20, 30 and 40% bentonite content, four specimens were prepared. The unconfined compression tests were performed in a strain controlled state with the strain rate of 1 mm/min. All samples were loaded until failure occurred.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Hydraulic conductivity tests

The results indicated that as bentonite content of BES mixtures increased, the hydraulic conductivity decreased and BES mixture with 40% bentonite content possessed the lowest hydraulic conductivity value (i.e.,  $1.69 \times 10^{-11}$  m/s and  $1.91 \times 10^{-11}$  m/s). Fig. 2 shows the mean hydraulic conductivity values against the bentonite content of BES mixtures. The addition of more than 20% bentonite to the BES mixture does not have significant effect on decreasing the hydraulic conductivity of the mixture and 20% bentonite content is an optimum value for the bentonite content of the BES mixture when used as an alternative material for landfill liner construction. This is due to the fact that the voids in BES mixture are almost entirely filled with swelled bentonite when the bentonite content reaches to 20% in the mixture. Other researchers arrived at the same conclusion for similar material [2, 3].



**Fig. 2.** The mean hydraulic conductivity against bentonite content of BES specimens

### 3.2. Diffusion tests

The results of two series of diffusion tests on BES mixtures are summarized in Table 1.

**Table 1.** Results of diffusion tests on BES specimens

Parameter	Test Numbers							
	Series a				Series b			
	D10a	D20a	D30a	D40a	D10b	D20b	D30b	D40b
Bentonite content (%)	10	20	30	40	10	20	30	40
Soil height (cm)	12.1	12.0	12.1	12.1	12.2	12.1	12.2	12.0
Volumetric water content (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	0.33	0.32	0.34	0.36	0.33	0.32	0.34	0.36
Degree of saturation (%)	93.0	92.8	93.1	92.0	93.0	92.8	93.1	92.0
Soil background Cl <sup>-</sup> concentration (mg/L)	200	263	263	275	200	263	263	275
Initial source Cl <sup>-</sup> concentration (mg/L)	3940	3910	3960	3950	3920	3910	3950	3930
Duration of test (days)	25.1	25.0	25.2	25.2	24.7	24.3	24.5	24.8
Cl <sup>-</sup> diffusion coefficient ( $\times 10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)	3.1	2.4	1.9	1.6	3.1	2.6	2.1	1.7

### 3.3. Direct shear tests

The results indicated that as bentonite content of BES mixtures increased, angle of internal friction reduced while the cohesion increased and finally the shear strength of BES mixtures decreased. The values of shear strength parameters of  $\phi$  and  $C$  were 47.4° and 2.8 kPa for pure sand, respectively, and 10.3° and 58.8 kPa for BES mixture with 40% bentonite content, respectively.

### 3.4. Unconfined compression tests

The average values of unconfined compression strength for four samples of each BES mixture were calculated they indicated that the increase of bentonite content up to 30% in the mixture, resulted in substantial increase of the unconfined compression strength. The maximum unconfined compression strength of 86.3 kPa belongs to BES mixture with 30% bentonite content.

## 4. Conclusions

The hydraulic conductivity and pure diffusion tests showed that the bentonite has potential effect on the reduction of hydraulic conductivity and chloride effective diffusion coefficients of BES mixtures. The results of direct shear tests showed that adding bentonite has negative effect on shear strength of BES mixtures. The unconfined compression tests indicated that as the bentonite content of BES mixtures increased up to 30%, the strength increased to a maximum value. Between four different BES mixtures, the BES mixture with 20% bentonite and 80% sand is the optimum and economical choice as landfill liner material. The summary of the mean values of the geotechnical and geoenvironmental properties of the above BES mixture is as follows: the optimum water content = 16%, the maximum dry unit weight = 17.5 kN/m<sup>3</sup>, the hydraulic conductivity =  $1.24 \times 10^{-10}$  m/s, the effective diffusion coefficient =  $2.5 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s, the shear strength under 50 kPa normal stress = 74.5 kPa, and the unconfined compression strength = 72.1 kPa.

## 5. References

- [1] Tay, Y. Y., Stewart, D. I., Cousens, T. W., "Shrinkage and Desiccation Cracking in Bentonite-Sand Landfill Liners", *Engineering Geology*, 2001, 60, 263-274.
- [2] Komine, H., "Simplified Evaluation on Hydraulic Conductivities of Sand-Bentonite Mixture Backfill", *Applied Clay Science*, 2004, 26, 13-19.
- [3] De Magistris, F. S., Silvestri, F., Vinale, F., "Physical and Mechanical Properties of Compacted Silty Sand with Low Bentonite Fraction", *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35, 909-925.