

Improving Hydraulic Conductivity of Landfill Liners by Applying Natural Amendments

MASOUD GERASHI¹, AMIN FALAMAKI^{2*}, MAHNAZ ESKANDAR³, MEHDI HOMAEI⁴

1. Former M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran
2. Associated Professor, Department of Engineering, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran
3. Research Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
4. Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(Received: Jan. 17, 2017- Revised: Jan. 31, 2018- Accepted: Apr. 3, 2018)

ABSTRACT

Soil and groundwater contamination due to leachate from municipal solid waste landfills is one of the most important environmental challenges for management of soil and water resources. This study was aimed to propose a landfill liner from the existing natural materials that in addition of having proper permeability, provides more capacity to absorb leachates. Two natural amendments including bentonite and DCP were applied to coarse landfill soil of Evaz city in Fars province between zero to a maximum 9% and 0.2% of base materials dry weight, respectively. The required permeability tests were conducted with both water and synthetic leachate. Results indicated that for the materials containing 6% bentonite, application of 0.2% DCP was considerably reduced the permeability compares to the bentonite application. Due to larger viscosity, the permeability of synthetic leachate in base liner materials and containing 3% bentonite was less than the water. However, in the 6% bentonite application, due to its acidity, the permeability of leachate was increased. In 9% bentonite, synthetic leachate had minor effect in reducing or increasing the soil permeability. This can be attributed to significant increase of fine particles and the increase of soil buffering properties.

Keywords: Hydraulic conductivity, Landfill liner, Natural materials

* Corresponding Author's Email: afalamaki@yahoo.com

بهسازی هدایت هیدرولیکی خاک بستر خاکچال‌ها با مواد طبیعی

مسعود گراشی^۱، امین فلامکی*^۲، مهناز اسکندری^۳، مهدی همایی^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳. استادیار پژوهش، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۴. استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۱۱/۱۴)

چکیده

آلودگی خاک و سفره‌های آب زیرزمینی بر اثر نفوذ شیرابه از محل دفن پسماندهای شهری، از چالش‌های مهم مدیریت منابع آب و خاک می‌باشد. هدف از این پژوهش، ساخت آستری از مواد طبیعی موجود در محل دفن زباله بود که افزون بر نفوذپذیری مناسب، توانایی بیشتری در جذب آلاینده‌ها نیز داشته باشد. دو ماده افزودنی طبیعی شامل بنتونیت و دی-کلسیم فسفات، به ترتیب از صفر تا حداکثر ۹ درصد و ۰/۲ درصد جرم خشک مواد پایه آستر به خاک درشت‌دانه جمع-آوری شده از محل دفن شهر اوز در استان فارس، افزوده شد. آزمایش نفوذپذیری با آب و شیرابه مصنوعی انجام گرفت. نتایج نشان داد که برای مواد پایه حاوی ۶ درصد بنتونیت، افزودن ۰/۲ درصد دی-کلسیم فسفات باعث کاهش چشمگیرتر نفوذپذیری نسبت به بنتونیت به تنهایی می‌شود. به دلیل گرانبی‌تر، نفوذپذیری شیرابه مصنوعی در مواد پایه آستر و همچنین حاوی ۳ درصد بنتونیت، نسبت به آب کمتر بود. لیکن در ۶ درصد بنتونیت، به دلیل خاصیت اسیدی، نفوذپذیری شیرابه بیشتر شد. شیرابه مصنوعی در ۹ درصد بنتونیت تأثیر چندانی بر کاهش یا افزایش نفوذپذیری نداشت. علت این امر را می‌توان افزایش چشمگیر ذرات ریزدانه رسی و در نتیجه افزایش خاصیت بافری خاک دانست.

واژه‌های کلیدی: آستر خاکچال؛ اصلاح‌کننده طبیعی؛ نفوذپذیری

مقدمه

قسمت‌های یک مدفن بهداشتی برای کنترل آلودگی، وجود لایه آب‌بند و پوشش مناسب است. هدف کلی از طراحی یک پوشش رسی، به تعویق انداختن زمان عبور شیرابه از داخل آن و در نتیجه کاهش میزان نفوذ شیرابه به خارج از لایه پوشش است؛ بنابراین مهم‌ترین ویژگی مصالحی که به‌عنوان لایه آب‌بند و پوشش به کار می‌روند، اندک بودن نفوذپذیری آن‌هاست. مقدار هدایت هیدرولیکی آسترهای رسی خاکچال بهداشتی بر پایه استاندارد آژانس محیط‌زیست کشور آمریکا^۱، باید کمتر از 1×10^{-7} سانتی‌متر بر ثانیه باشد (USEPA, 2001).

دانه‌بندی خاک و مواد تشکیل دهنده آن، حدود اتربرگ، درصد رطوبت و انرژی تراکم، شرایط تنش، مواد افزودنی و نحوه اجرا از عوامل مؤثر بر نفوذپذیری پوشش آستر هستند. شیرابه نیز به دو صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت بر میزان نفوذپذیری لایه تأثیر می‌گذارد. در کوتاه‌مدت، تغییر در نفوذپذیری به دلیل لزجت بیشتر شیرابه نسبت به آب و نیز تولید گاز از شیرابه حین

آلودگی خاک و منابع آب زیرزمینی به فلزات سنگین از چالش‌های مهم محیط زیستی در دهه‌های اخیر است، زیرا خاک‌ها و آب‌های آلوده به فلزات سنگین، مشکلاتی فراوان برای زیست‌بوم و سلامت انسان پدید می‌آورند (Khodaverdiloo and Homaei, 2008). یکی از عمده‌ترین منابع رهاسازی فلزات سنگین به محیط‌زیست، دفع پسماندهای شهری به روش سنتی می‌باشد (Eskandari et al., 2016). در روش دفع سنتی، شیرابه حاصل از زباله همراه با بارش‌های جوی به محیط اطراف خاکچال نفوذ می‌کند. این ماده که حاوی مقادیر بسیار زیاد مواد آلی، معدنی و میکروارگانسیم‌ها است، پس از نفوذ به درون خاک و آب‌های زیرزمینی باعث انتشار آلودگی می‌شود. پایش منابع آب و خاک آلوده، هزینه‌های بسیاری دارد؛ بنابراین روشن است که باید در محل‌های دفن زباله، با کاربرد تمهیداتی از ورود شیرابه به محیط‌زیست جلوگیری و یا آن را مهار کرد. مهم‌ترین

1. (USEPA) United State Environmental Protection Agency

تراکم و هدایت هیدرولیکی خاک لاتریت را بهبود می‌بخشد. هدایت هیدرولیکی خاک لاتریت زمانی که با ۲۵٪ رس کهانگ مخلوط شد به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت.

George and Georgina (2014)، نفوذپذیری مخلوط بنتونیت با ماسه ساحل اقیانوس اطلس برای استفاده احتمالی از آن به‌عنوان مواد آستر محل دفن زباله را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مخلوط ماسه اقیانوس و بنتونیت به نسبت ۹۰٪ به ۱۰٪ دارای کمترین میزان نفوذپذیری ($10^{-8} \times 6/95$ سانتی‌متر بر ثانیه) است.

Ashrafi (2013) اثر بنتونیت و متاکائولن در رفتار ژئوتکنیکی ماسه را مورد مطالعه قرار داد. نتایج پژوهش او نشان داد که ترکیب ۲۰ درصد بنتونیت و ۸۰ درصد ماسه با ضریب نفوذپذیری $10^{-10} \times 1/24$ متر بر ثانیه، مقاومت برشی ۷۴/۵ کیلوپاسکال، مقاومت تک محوری ۷۲/۱ کیلوپاسکال و ضریب انتشار مولکولی $10^{-10} \times 2/5$ مترمربع بر ثانیه به‌عنوان بهترین و اقتصادی‌ترین گزینه برای جایگزینی آسترهای رسی در لندفیل‌ها می‌باشد.

Falamaki *et al.* (2008) استفاده از ترکیبات فسفاتی در آسترهای متراکم رسی را پیشنهاد کردند. تاکنون پژوهش‌های بسیاری انجام شده که نشان می‌دهد ترکیبات فسفات می‌تواند موجب تثبیت انواع آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین و رادیواکتیوها شوند (Spance and Shi, 2005; Hong *et al.*, 2010; Mignardi *et al.*, 2013; Tang *et al.*, 2013; Ping *et al.*, 2013; Falamaki *et al.*, 2016).

کارایی دی‌کلسیم‌فسفات (DCP) در عدم تحرک و تثبیت فلز سنگین در خاک توسط (Falamaki *et al.*, 2016). مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که دی-کلسیم‌فسفات، ماده‌ای مؤثر برای تثبیت مس و کادمیوم در خاک است و می‌تواند به‌گونه‌ای مؤثر برای جلوگیری از آبشویی این دو فلز در خاک‌های سبک بافت به منابع آب زیرزمینی به‌کار رود؛ بنابراین شاید بتوان با افزودن ترکیبات فسفات که جاذب انواع آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین هستند، آسترهای رسی تهیه نمود که به‌طور هم‌زمان دارای نفوذپذیری اندک و پتانسیل جذب آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین هستند، آسترهای فسفات باشند. همچنین در مقایسه با آسترهای ژئوسنتتیک، دارای فن‌آوری ساده‌تر و ارزان‌تری هستند. لازم به ذکر است که این نوع آستر به دلیل مسائل اقتصادی می‌تواند چند لایه باشد. به عبارتی فقط بخشی از آسترهای رسی متراکم دارای مواد افزودنی شود. در این پژوهش، ساخت یک آستر با افزودن دو

نفوذ آن به داخل لایه رسی است. لیکن اثر بلند مدت شیرابه مربوط به زمانی است که خاک پوششی به مدت نسبتاً زیادی در مجاورت شیرابه قرار گرفته و تغییر خواص داده باشد. تأثیر سیال اسیدی بر خاک‌های رسی در بسیاری از پژوهش‌های پیشین بررسی شده است (Ourth and Verbrugge, 1999; Kashir and Yanful, 2001; Gratchev and Sassa, 2009). در یک مرور اجمالی بر مقالات ارائه شده در این زمینه، می‌توان چنین استنباط کرد که حضور مواد شیمیایی اسیدی و بازی در خاک، باعث افزایش نفوذپذیری خاک رس می‌شود. لیکن این افزایش مقدار، نسبتاً اندک و قابل چشم‌پوشی است. نتایج بدست آمده تابع عوامل زمان، نحوه اندازه‌گیری و آزمایش، ویژگی‌های خاک و نوع مواد شیمیایی مورد استفاده است که در برخی از موارد حتی باعث کاهش نفوذپذیری در مجاورت مواد شیمیایی شده است (Appolonia, 1980; Mitchel, 1982; Madsen and Mitchel, 1987; Brandenburg and Lagaly, 1988; Gori, 1994; Benson *et al.*, 1994; Mahdavi, 1997; Ruhl and Daniel, 1997; Benson *et al.*, 1999; Santamarina *et al.*, 2002; Ahmadi and Sasanian, 2005; Wang and Siu, 2006; Gajo and Maines, 2007; Ahmadi *et al.*, 2015).

لایه‌های آب‌بند و پوشش باید قادر به تحمل تنش‌های زیاد ناشی از وزن توده زباله، نشست‌های نامتقارن، فشار هیدرواستاتیک، خزش و ترک‌های ناشی از خشک‌شدن، یخبندان و ذوب یخ نیز باشند (Vigil *et al.*, 1993). افزون بر این، از آسترهای رسی متراکم انتظار می‌رود که خروج مواد شیمیایی موجود در شیرابه را به تأخیر اندازد. انواع آسترهای رسی مورد کاربرد در مدفن بهداشتی زباله شامل آسترهای رسی با پیدایش طبیعی، آسترهای رسی متراکم‌شده و آسترهای ژئوسنتتیکی هستند. کاربرد آسترهای رسی مصنوعی در کشورهای در حال توسعه به دلیل هزینه زیاد معمولاً مقدور نیست. در این شرایط می‌توان از آسترهای متراکم رسی بهسازی شده با هدف کاهش پتانسیل انتقال آلودگی استفاده کرد. برای این منظور از انواع مختلفی از مواد افزودنی می‌توان استفاده نمود. به عنوان مثال کاربرد خاکستر بادی در تحقیقات مختلف برای استفاده در آستر مورد بررسی قرار گرفته است (Vesperman *et al.*, 1985; Edil, 1992; Nhan, 1994; Bowders, 1988).

Han (2012)، پتانسیل استفاده از مخلوط رس کهانگ و لاتریت^۱ را به‌عنوان مواد آستر خاکچال مورد بررسی قرار داد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن رس کهانگ، ویژگی‌های

1. laterate and khang clay

پژوهش، در جدول (۲) نشان داده شده است. فرمول شیمیایی این ماده به صورت $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ می‌باشد. بر پایه پژوهش Falamaki *et al.* (2016)، کاربرد ۰/۲ درصد DCP نسبت به جرم خشک خاک، توانایی جذب فلزات سنگین موجود در شیرابه را داراست؛ بنابراین در این پژوهش نیز از ۰/۲ درصد دی‌کلسیم‌فسفات به‌عنوان ماده افزودنی برای کمک به حذف آلاینده‌های موجود در شیرابه استفاده شد.

از آنجا که اثر شیرابه بر آسترهای رسی و سازگاری آن‌ها با شیرابه بسیار مهم است، در آزمایش‌های انجام شده افزون‌بر آب معمولی، از شیرابه مصنوعی نیز استفاده شد. سپس نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه گردید. شیرابه مصنوعی کمک می‌کند که شرایط به منظور تعیین ضریب نفوذپذیری آستر، به واقعیت نزدیک‌تر باشد. ترکیب شیمیایی شیرابه مصنوعی ساخته‌شده و مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۳) ارائه شده است. برخی از اجزای این ترکیب مانند کلرید سدیم، هیدروژن کربنات سدیم، سولفات منیزیم، سولفات مس و سولفات روی بر پایه ترکیب شیمیایی شیرابه مصنوعی مورد استفاده در پژوهش Hrapovic (2001) انتخاب شد. pH شیرابه مصنوعی کاربردی، اسیدی و برابر با ۵/۰۷ بود.

روش تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها

برای تهیه مصالح پایه مورد نیاز هر ترکیب، نخست خاک عبوری از الک نمره ۴ محل دفن با شش دسته الک به روش تر، از هم تفکیک شد. سپس با توجه به مقدار مصالح پایه مورد نیاز و نیز درصد مانده بر روی هر الک مطابق با جدول (۴)، از خاک‌های تفکیک‌شده برای تهیه مصالح پایه آستر استفاده شد. برای تهیه نمونه‌ها، مواد پایه آستر (خاک عبوری از الک نمره ۴ محل دفن اوز) با مواد افزودنی شامل بنتونیت (بین ۰ تا حداکثر ۹ درصد وزنی خشک مواد پایه) و در مواردی دی‌کلسیم‌فسفات (به مقدار ۰/۲ درصد وزنی خشک مواد پایه) ترکیب شدند. تیمارهای بکار رفته در پژوهش حاضر در جدول (۵) ارائه شده است. بر پایه پیشنهاد آژانس حفاظت محیط‌زیست کشور آمریکا، لایه‌های آب‌بند و پوشش مدفن زباله باید از دانسیته خشک مناسب بهره‌مند باشند؛ بنابراین لایه آب‌بند باید حداقل ۹۵ درصد دانسیته خشک حداکثر به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد (D698-1) داشته باشد. با انجام آزمایش تراکم پروکتور استاندارد (D698-1) (ASTM 12e1)، رطوبت بهینه ترکیب‌های مورد مطالعه تعیین شد (ASTM D2216). به منظور تحلیل بهتر اثر مقدار بنتونیت بر دانسیته خشک حداکثر مواد پایه، تغییرات دانسیته خشک حداکثر مواد پایه آستر نسبت به درصد‌های مختلف بنتونیت با

ماده بنتونیت و دی‌کلسیم‌فسفات به خاک محل دفن پسمانده‌های شهری اوز (استان فارس، ایران) که هم توانایی جذب آلاینده‌ها را افزایش و هم ضریب نفوذپذیری را به کمتر از 1×10^{-7} سانتی‌متر بر ثانیه کاهش دهد، مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه شرایط محل دفن زباله‌های این شهر با ضوابط و مقررات مکان‌های دفن زباله سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (Unname, 2010)، نشان داد که این مکان برخی از ضوابط لازم را رعایت نمی‌کند. به عنوان مثال، درشت‌دانه بودن خاک آبرفتی منطقه و نفوذپذیری نسبتاً زیاد آن، این مکان را برای دفن زباله نامناسب می‌کند (Unname, 2011). در شرایطی که شهرداری این شهر از نظر اقتصادی توانایی تغییر محل دفن و یا استفاده از آستر رسی مصنوعی را ندارد، راهکاری بجز بهسازی این محل نیست.

در این پژوهش، ضریب نفوذپذیری با آب و شیرابه مصنوعی اندازه‌گیری و نتایج مقایسه شد تا سازگاری آستر با شیرابه نیز تا حدودی بررسی شده باشد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در مواردی که نفوذپذیری خاک محل دفن زباله زیاد بوده و مشکل نفوذپذیری و نفوذ شیرابه به خاک و آب‌های زیرزمینی وجود دارد، استفاده شود.

مواد و روش‌ها

محل دفن پسمانده‌های شهری اوز در جنوب استان فارس و در موقعیت $27^\circ 46' 58''$ عرض شمالی و $54^\circ 00' 32''$ طول شرقی و در ارتفاع ۹۴۶ متری از سطح دریا قرار دارد. در این پژوهش، خاک جمع‌آوری شده از این محل پس از عبور از الک نمره ۴، به‌عنوان مواد پایه آستر استفاده شد. نخست نمونه‌های خاک از خاکچال اوز به آزمایشگاه منتقل و با الک نمره ۴ الک شد و خاک‌های باقیمانده روی الک، از کل آزمایش‌ها حذف گردید (ASTM D422-63e2). این خاک می‌تواند در سیستم زهکشی شیرابه محل دفن، استفاده شود.

به منظور کاهش نفوذپذیری خاک محل دفن در این پژوهش، بنتونیت سدیم پودر شده شرکت باریت فلات ایران مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های این ماده افزودنی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های بنتونیت سدیم به کار رفته در پژوهش

درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰	حد خمیری (%)	حد روانی (%)
۹۰	۴۵	۱۹۶

ویژگی‌های دی‌کلسیم‌فسفات استفاده شده در این

آزمایش تراکم پروکتور استاندارد مشخص شد.

حداقل ۱۷٪ ۲۱٪ حداکثر ۱۷٪/۰ حداکثر ۳٪/۰

جدول ۲. ویژگی‌های دی‌کلسیم‌فسفات به کار رفته در پژوهش

فسفر (%)	کلسیم (%)	فلوئور (%)	رطوبت (%)
----------	-----------	------------	-----------

جدول ۳. ترکیب شیمیایی شیرابه مصنوعی ساخته شده در این پژوهش

نام ماده	مقدار
کلرید سدیم ^۱	۱۴۴۰ (میلی گرم بر لیتر)
هیدروژن کربنات سدیم ^۲	۳۰۱۲ (میلی گرم بر لیتر)
سولفات منیزیم ^۳	۱۵۶ (میلی گرم بر لیتر)
سولفات آمونیوم ^۴	۲۸ (میلی گرم بر لیتر)
سولفات مس ^۵	۴۰ (میلی گرم بر لیتر)
سولفات روی ^۶	۵۰ (میلی گرم بر لیتر)
اسید کلریدریک ^۷	۱۰/۴ (میلی لیتر بر لیتر)

1. NaCl 2. NaHCO₃ 3. MgSO₄ 4. (NH₄)₂SO₄ 5. CuSO₄.5H₂O 6. ZnSO₄.H₂O 7. HCl

جدول ۴. درصد وزنی ذرات تشکیل دهنده مصالح پایه

شماره الک	۴	۸	۱۶	۳۰	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	زیر ۲۰۰
درصد مانده بر روی الک	۰	۱۸/۷۲۵	۱۷/۸۸۵	۲۵/۶۴۵	۱۳/۶۹	۱۰/۴۵	۵/۰۸	۸/۴۹

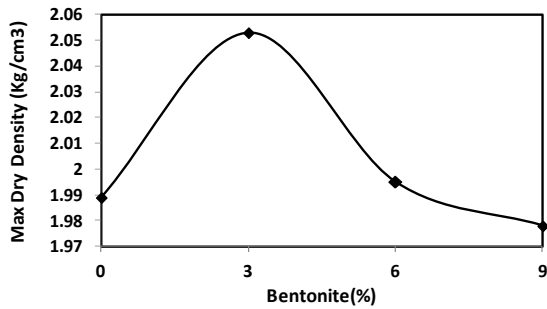
جدول ۵. ویژگی‌های تیمارهای مورد استفاده در پژوهش

نام تیمار	نام اختصاری تیمار	دانسیته خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	رطوبت بهینه (%)
ماسه	S	۱/۹۸	۱۱/۴۵
ماسه با ۳٪ بنتونیت	S + ۳٪ Be	۲/۰۵	۹/۹۵
ماسه با ۶٪ بنتونیت	S + ۶٪ Be	۱/۹۹	۱۱
ماسه با ۹٪ بنتونیت	S + ۹٪ Be	۱/۹۷	۱۳/۱
ماسه با ۳٪ بنتونیت و ۰/۲ درصد DCP	S + ۳٪ Be + ۰/۲ DCP	۲/۰۵	۹/۹۵
ماسه با ۶٪ بنتونیت و ۰/۲ درصد DCP	S + ۶٪ Be + ۰/۲ DCP	۱/۹۹	۱۱
ماسه با ۹٪ بنتونیت و ۰/۲ درصد DCP	S + ۹٪ Be + ۰/۲ DCP	۱/۹۷	۱۳/۱

دستگاه نفوذپذیری، ترکیب مربوطه به طور مستقیم در سلول نفوذپذیری با بار آبی افتان در سه لایه با جرم‌های یکسان و انرژی معادل پروکتور استاندارد متراکم شد. پس از ساخت نمونه‌ها، آزمایش نفوذپذیری با آب و

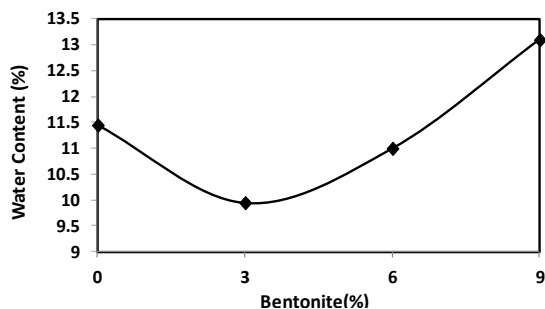
شیرابه مصنوعی به روش بار افتان (ASTM-D5856) انجام شد. این آزمایش از زمانی شروع شد که نمونه خاک فقط دارای رطوبت بهینه و غیراشباع بود و تا زمان اشباع شدن کامل نمونه خاک و رسیدن به ضریب نفوذپذیری ثابت، ادامه یافت. اشباع نمونه‌های خاک، از پایین سلول انجام شد. در این آزمایش، حرکت آب در سلول به صورت جریان رو به بالا است. آب از

دانسیته خشک حداکثر و رطوبت بهینه ترکیب‌های توأمان بنتونیت و دی‌کلسیم‌فسفات، برابر با ترکیب‌های حاوی بنتونیت به‌تنهایی در نظر گرفته شد و آزمایش‌های تراکم پروکتور استاندارد جداگانه‌ای صورت نگرفت. برای رسیدن به تعادل شیمیایی و رطوبتی، ترکیب‌های حاوی DCP پیش از شروع آزمایش‌ها به مدت یک ماه در کیسه‌های پلاستیکی عایق رطوبت نگهداری شدند. نمونه‌های خاک مورد نیاز برای آزمایش نفوذپذیری، با توجه به درصد رطوبت بهینه به‌دست آمده و جرم مخصوص خشک حداکثر برای هر ترکیب ساخته شد. برای جلوگیری از دست‌خوردگی نمونه‌ها و کاهش خطای نتایج



شکل ۲. تغییرات دانسیته خشک حداکثر مواد پایه آستر نسبت به درصدهای مختلف بنتونیت

همچنین تغییرات رطوبت بهینه مواد پایه آستر نسبت به درصدهای مختلف بنتونیت در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که با افزایش درصد بنتونیت در مواد پایه آستر، رطوبت بهینه در ابتدا کاهش یافته و در مقدار ۳ درصد بنتونیت، به کمترین مقدار می‌رسد. سپس با افزایش بنتونیت، مقدار رطوبت بهینه مواد پایه آستر نیز افزایش می‌یابد تا در ۹ درصد بنتونیت، به حداکثر رطوبت بهینه می‌رسد. دلیل این مسئله، افزایش ذرات ریزدانه در خاک می‌باشد.



شکل ۳. تغییرات رطوبت بهینه مواد پایه آستر نسبت به درصدهای مختلف بنتونیت

این تغییرات نشان می‌دهد که به منظور افزایش تراکم خاک، ۳ درصد بنتونیت کمترین مقدار رطوبت بهینه و بیشترین تراکم خاک در حالت خشک را ایجاد کرده است. مقدار دانسیته خشک و رطوبت بهینه تیمارها با توجه به نتایج آزمایش تراکم پروکتور استاندارد در جدول (۵) ارائه شده است.

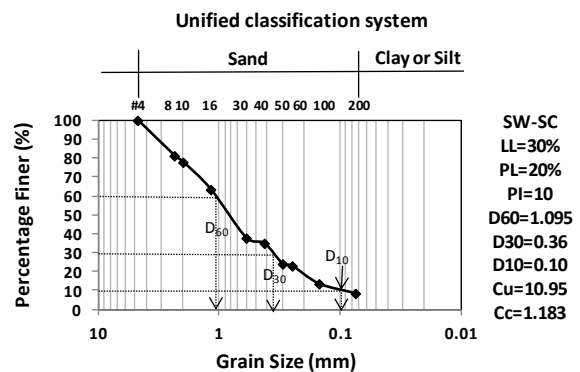
اثر مقدار مواد افزودنی بر نفوذپذیری مواد پایه آستر

تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به زمان برای مواد پایه آستر بدون مواد افزودنی در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، خاک محل دفن به دلیل درشت‌دانه بودن، نفوذپذیری بالایی دارد. مقادیر نفوذپذیری به دست آمده با شیرابه مصنوعی نسبت به آب پایین‌تر بود که علت آن لزجت بیشتر شیرابه نسبت به آب و همچنین مدت زمان اندک مجاورت شیرابه

پایین سلول وارد شده و پس از عبور از سنگ متخلخل، از خلل و فرج نمونه خاک گذشته و با عبور مجدد از سنگ متخلخل بالایی از سلول خارج می‌شود. پس از خارج شدن آب از سلول، از اشباع شدن خاک اطمینان حاصل می‌شود. پس از اتمام آزمایش با آب، مخزن، پیژومتر و شیلنگ از آب تخلیه شد و بدون تغییر در نمونه متراکم‌شده، شیرابه مصنوعی به مخزن افزوده گردید. آزمایش پس از هواگیری پیژومتر و شیلنگ متصل به سلول از سر گرفته شد.

نتایج و بحث

نمودار توزیع دانه‌بندی خاک استفاده شده در **Error** (Reference source not found) نشان داده شده است. نتایج آزمایش حدود اتربرگ (ASTM D4318-10e1) بخش ریزدانه نشان داد که مواد پایه دارای حد روانی ۳۰ درصد، حد خمیری ۲۰ درصد و نشانه خمیری ۱۰ است. مواد پایه آستر بر پایه سیستم طبقه‌بندی متحد، SW-SC نام‌گذاری شد. ضریب یکنواختی و دانه‌بندی با توجه به $D_{60}=1/0.95$ ، $D_{30}=0/36$ و $D_{10}=0/10$ میلی‌متر، به ترتیب برابر با $Cu=10/95$ و $Cc=1/183$ به دست آمد.

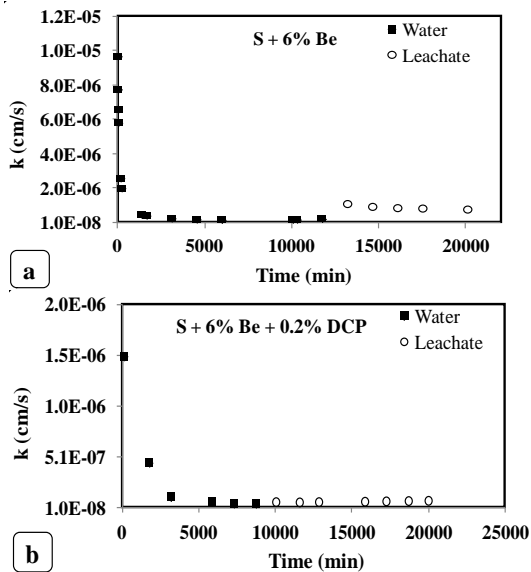


شکل ۱. توزیع دانه‌بندی خاک محل دفن پسمانده‌های شهری اوز پس از عبور از الک شماره ۴

نتایج آزمایش تراکم پروکتور استاندارد در شکل (۲) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد بنتونیت در مواد پایه آستر، دانسیته خشک حداکثر در ابتدا افزایش و در مقدار ۳ درصد بنتونیت، به حداکثر می‌رسد. سپس با افزایش مقدار بنتونیت کاهش می‌یابد، بطوری که کمترین دانسیته خشک، در مقدار ۹ درصد بنتونیت به دست آمد.

است. نتایج ارائه شده در شکل (۶a) نشان می‌دهد که افزودن ۶ درصد بنتونیت به مواد پایه در کاهش نفوذپذیری مؤثر بود، لیکن به حد استاندارد نرسید. شکل (۶b) نشان می‌دهد که افزودن توآمان ۶ درصد بنتونیت و ۰/۲ درصد دی‌کلسیم فسفات به مواد پایه آستر، به‌گونه‌ای منجر به کاهش نفوذپذیری شد که استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست کشور آمریکا را رعایت کرد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، نفوذپذیری نمونه در برابر شیرابه مصنوعی نسبت به آب داشته است. این مسئله ممکن است به دلیل خاصیت شیرابه و افزایش مدت زمان مجاورت شیرابه مصنوعی با نریب باشد. در این شرایط مواد اسیدی به جدایی آنیون‌ها و کاتیون‌ها و انحلال نمک‌های موجود در خاک کمک می‌کنند (Shriver and Atkins, 1999; Benson *et al.*, 1994; Farster and Heick, 1996; Appolonia, 1980; Ruhl and Daniel, 1997; Kashir and Yanful, 2001; Ahmadi and Sasaniyan, 2005; Ahmadi *et al.*, 2015). افزایش ذرات ریزدانه در خاک باعث افزایش زمان لازم برای اشباع شدن کامل ترکیب شده است.

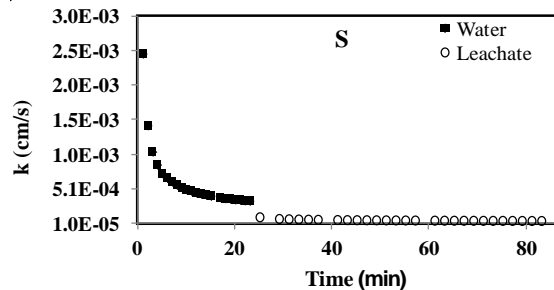
از آنجا که سیستم خاک بسیار پیچیده است، توضیح فرآیندهای شیمیایی تیمارهای توأم با DCP بویژه هنگامی که سیال عبوری شیرابه می‌باشد، مشکل است. ترکیب فسفات با مواد معدنی موجود در شیرابه (بویژه فلزات) می‌تواند منجر به تشکیل رسوب پایدار شود. تشکیل این رسوبات ممکن است هدایت هیدرولیکی محیط متخلخل را نیز تغییر دهد.



شکل ۶. تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به زمان برای آستر بهسازی شده (a) با ۶٪ بنتونیت و (b) بنتونیت توأم با دی‌کلسیم‌فسفات

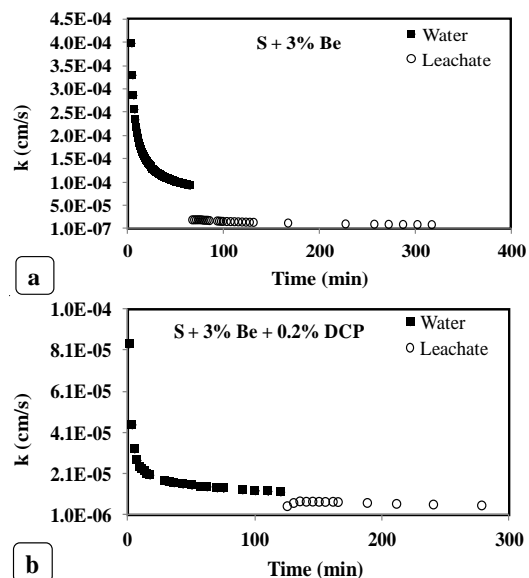
تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به زمان برای مواد پایه

مصنوعی با خاک بود. این خاک تنها زمانی به‌عنوان آستر محل دفن زباله شهری قابل استفاده است که با مواد افزودنی، بهسازی و هدایت هیدرولیکی آن مناسب شود.



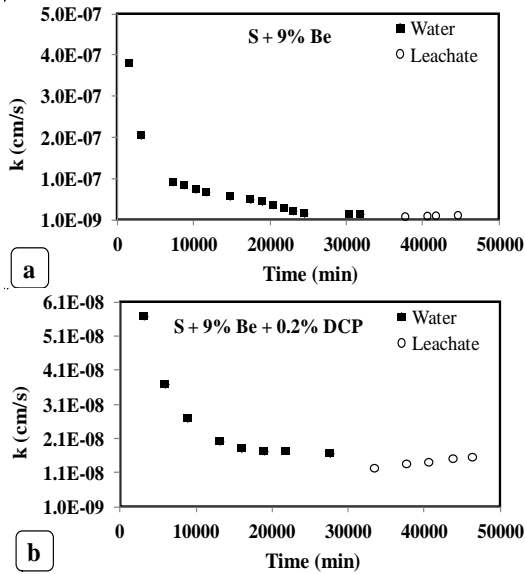
شکل ۴. تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به زمان برای مواد پایه بدون مواد افزودنی

تغییرات نفوذپذیری نسبت به زمان برای مواد پایه آستر حاوی ۳ درصد بنتونیت و همچنین بنتونیت با دی‌کلسیم فسفات در شکل (۵) نشان داده شده است. افزودن ۳ درصد بنتونیت به مواد پایه آستر و در تیمار همراه با دی‌کلسیم‌فسفات، نفوذپذیری را ده برابر کاهش داد. هرچند مقادیر نفوذپذیری به‌دست آمده با شیرابه مصنوعی نسبت به آب پایین‌تر بود، لیکن با این مقدار بنتونیت مقدار نفوذپذیری به استاندارد کمتر از 1×10^{-7} سانتی‌متر بر ثانیه نرسید. علت کاهش نفوذپذیری ترکیب در برابر شیرابه نسبت به آب احتمالاً لزجت بیشتر شیرابه و همچنین مدت زمان اندک مجاورت شیرابه مصنوعی با ترکیب بود.

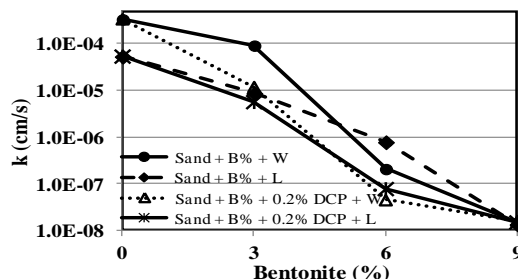


شکل ۵. تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به زمان برای آستر بهسازی شده (a) با ۳٪ بنتونیت و (b) بنتونیت توأم با دی‌کلسیم‌فسفات

تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به زمان برای مواد پایه آستر حاوی ۶ درصد بنتونیت در شکل (۶) نشان داده شده



شکل ۷. تغییرات ضریب نفوذپذیری نسبت به زمان برای آستر بهسازی شده با (a) ۹٪ بنتونیت و (b) ۹٪ بنتونیت توام با دی‌کلسیم فسفات با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، می‌توان با افزودن بنتونیت و دی‌کلسیم فسفات به عنوان مواد افزودنی به خاک‌های درشت‌دانه، آستری را ساخت که هم دارای ضریب نفوذپذیری مناسب مطابق با استاندارد آژانس محیط‌زیست کشور آمریکا و هم سازگار با شیرابه و دارای توانایی جذب آلاینده‌های موجود در شیرابه باشد. بر این اساس، مقدار بهینه مواد افزودنی بنتونیت و دی‌کلسیم فسفات در این پژوهش به ترتیب برابر با ۶ درصد و ۰/۲ درصد جرم خشک مواد پایه آستر تعیین شد. چنانچه به‌کارگیری بنتونیت و یا بنتونیت توأم با دی‌کلسیم فسفات برای کاهش نفوذپذیری بسترهای طبیعی در محل دفن پسماندهای شهری مد نظر باشد، مطالعات اختصاصی برای مشخص کردن تأثیر و تعیین مقدار بهینه برای خاک محل، الزامی است.



شکل ۸. مقایسه تغییرات ضریب نفوذپذیری مواد پایه آستر حاوی مقادیر مختلف مواد افزودنی

خلاصه نتایج آزمایش نفوذپذیری مواد پایه آستر حاوی مقادیر مختلف مواد افزودنی در جدول (۶) ارائه شده است.

آستر حاوی ۹ درصد بنتونیت در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در شکل (۷a) نشان می‌دهد که افزودن ۹ درصد بنتونیت در کاهش نفوذپذیری مواد پایه آستر مؤثر است و استاندارد آژانس محیط‌زیست کشور آمریکا را رعایت می‌کند. شیرابه مصنوعی در ۹ درصد بنتونیت تأثیر چندانی در کاهش یا افزایش ضریب نفوذپذیری نداشت که علت آن را می‌توان افزایش چشمگیر ذرات ریزدانه رسی و در نتیجه افزایش خاصیت بافری خاک عنوان کرد. مدت‌زمان لازم برای اشباع شدن کامل نمونه خاک حدود ۱۸ روز بود. افزایش زمان مورد نیاز برای اشباع شدن کامل نمونه خاک به دلیل افزایش ذرات ریزدانه در مواد پایه بود. نتایج حاصل از شکل (۷b) نیز نشان داد که شیرابه مصنوعی تأثیر چندانی در کاهش یا افزایش ضریب نفوذپذیری ترکیب حاوی ۹ درصد بنتونیت و ۰/۲ درصد دی‌کلسیم فسفات نداشت.

در شکل (۸) تغییرات ضریب نفوذپذیری مواد پایه آستر حاوی مقادیر مختلف مواد افزودنی باهم مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان داد که افزودن بنتونیت به مواد پایه آستر در کاهش نفوذپذیری مؤثر بود و با افزایش مقدار بنتونیت، نفوذپذیری کاهش چشمگیری یافت. برای مواد پایه حاوی ۶ درصد بنتونیت، افزودن ۰/۲ درصد دی‌کلسیم فسفات باعث کاهش چشمگیرتر نفوذپذیری نسبت به بنتونیت به‌تنهایی شد. با توجه به شکل (۸)، برای کاهش ضریب نفوذپذیری مواد پایه آستر به کمتر از 1×10^{-7} سانتی‌متر بر ثانیه مطابق با معیارهای آژانس محیط‌زیست کشور آمریکا، مقدار بهینه بنتونیت، ۷/۵ درصد و برای مواد پایه حاوی ۰/۲ درصد دی‌کلسیم فسفات برابر با ۶ درصد جرم خشک مواد پایه به‌دست آمد. برای مواد پایه بدون مواد افزودنی و حاوی ۳ درصد بنتونیت، شیرابه مصنوعی باعث کاهش ضریب نفوذپذیری نسبت به آب شد که علت آن را می‌توان لزجت بیشتر شیرابه و همچنین مدت زمان اندک مجاورت شیرابه مصنوعی با ترکیب عنوان کرد. در حالی که در ۶ درصد بنتونیت، شیرابه مصنوعی باعث افزایش ضریب نفوذپذیری ترکیب نسبت به آب شد که ممکن است به دلیل خاصیت اسیدی شیرابه و افزایش مدت زمان مجاورت شیرابه مصنوعی با ترکیب و کمک مواد اسیدی به جدایی آنیون‌ها و کاتیون‌ها و انحلال نمک‌های موجود در خاک توسط این مواد باشد. در ۹ درصد بنتونیت نیز، شیرابه تأثیری در تغییر ضریب نفوذپذیری ترکیب نداشت که علت آن را می‌توان افزایش خاصیت بافری خاک به دلیل افزایش ذرات ریزدانه رسی عنوان کرد.

زمان اندک مجاورت شیرابه مصنوعی با ترکیب عنوان کرد. شیرابه مصنوعی در ۶ درصد بنتونیت باعث افزایش ضریب نفوذپذیری ترکیب نسبت به آب شد که ممکن است به دلیل خاصیت اسیدی شیرابه و افزایش مدت زمان مجاورت شیرابه مصنوعی با ترکیب و کمک مواد اسیدی به جدایی آنیون‌ها و کاتیون‌ها در خاک رس و انحلال نمک‌های موجود در خاک توسط این مواد باشد.

شیرابه مصنوعی در ۹ درصد بنتونیت تأثیر چندانی در تغییر ضریب نفوذپذیری ترکیب نداشت. این مسئله به دلیل افزایش چشمگیر ذرات ریزدانه رسی و در نتیجه افزایش خاصیت بافری خاک بود.

با افزایش مقدار مواد افزودنی در مواد پایه آستر، مدت زمان لازم برای اشباع شدن نمونه خاک، به دلیل افزایش ذرات ریزدانه ترکیب افزایش یافت.

با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، برای ساخت آستری از مواد طبیعی محل دفن که افزون بر داشتن نفوذپذیری مناسب، توانایی بیشتری در جذب آلاینده‌ها نیز داشته باشد، مقدار بهینه مواد افزودنی بنتونیت و دی‌کلسیم-فسفات به ترتیب برابر با ۶ درصد و ۰/۲ درصد جرم خشک مواد پایه آستر تعیین شد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله، از رییس محترم دانشگاه پیام نور اوز جناب آقای دکتر قاسمعلی مقتدری که با در اختیار گذاشتن آزمایشگاه مجهز مکانیک خاک و پی دانشگاه، کمال همکاری را ابراز داشتند و همچنین از جناب آقای دکتر بهمنی رییس محترم دانشکده علوم پزشکی امام جعفرصادق (ع) شهرستان گراش، جناب آقای پیروزی مسئول بخش تحقیقات آزمایشگاهی دانشکده و همچنین سرکار خانم نادرپور که در انجام آزمایش‌های شیمیایی کمک شایانی نمودند، صمیمانه سپاسگزارند.

REFERENCES

- Ahmadi, M. M., Hasanlourad, M. and Khatami, M. H. (2015). An investigation of the effect of variations in the pH of leachate on the physical and mechanical properties of kaolinite clay soil in presence bentonite, *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, 2(1), 25-33. (In Farsi)
- Ahmadi, M. M., Sasanian, S. (2005). The effect of variations in the pH of leachate on the properties

جدول ۶. خلاصه نتایج آزمایش نفوذپذیری مواد پایه آستر حاوی مقادیر مختلف مواد افزودنی

ضریب نفوذپذیری (سانتی‌متر بر ثانیه)		تیمار
آب	شیرابه	
$3/4 \times 10^{-4}$	$5/4 \times 10^{-5}$	S
$9/3 \times 10^{-5}$	$8/8 \times 10^{-6}$	S + ٪۳Be
$2/1 \times 10^{-7}$	$7/9 \times 10^{-7}$	S + ٪۶Be
$1/5 \times 10^{-8}$	$1/3 \times 10^{-8}$	S + ٪۹Be
$1/2 \times 10^{-5}$	$5/7 \times 10^{-6}$	S + ٪۳ Be + ٪۰/۲ DCP
$4/5 \times 10^{-8}$	$7/8 \times 10^{-8}$	S + ٪۶ Be + ٪۰/۲ DCP
$1/6 \times 10^{-8}$	$1/5 \times 10^{-8}$	S + ٪۹ Be + ٪۰/۲ DCP

نتیجه‌گیری

یافته‌های بدست آمده در این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم پروکتور استاندارد نشان داد که بنتونیت باعث تغییراتی در دانسیته خشک حداکثر مواد پایه آستر می‌شود، بدین‌صورت که با افزایش بنتونیت در مواد پایه آستر، دانسیته خشک بیشینه نخست افزایش و در ۳ درصد بنتونیت به حداکثر می‌رسد. سپس افزایش بنتونیت، باعث کاهش دانسیته خشک بیشینه مواد پایه آستر می‌گردد، به گونه‌ای که کمترین دانسیته خشک در ۹ درصد بدست آمد.

افزایش بنتونیت در مواد پایه آستر، در ابتدا منجر به کاهش رطوبت بهینه شد، به گونه‌ای که در ۳ درصد بنتونیت به کمترین مقدار رسید. پس از آن بنتونیت باعث افزایش رطوبت بهینه شد بطوری که حداکثر رطوبت بهینه در ۹ درصد بنتونیت بدست آمد. برای مواد پایه آستر حاوی ۶ درصد بنتونیت، افزودن ۰/۲ درصد دی‌کلسیم‌فسفات باعث کاهش چشمگیرتر نفوذپذیری نسبت به بنتونیت به تنهایی شد.

برای مواد پایه بدون مواد افزودنی و حاوی ۳ درصد بنتونیت، شیرابه مصنوعی باعث کاهش ضریب نفوذپذیری نسبت به آب شد که علت آن را می‌توان گرانروی بیشتر شیرابه و مدت

of permeability and plastic and liquid limit of coverage clay. From http://www.civilica.com/Paper-NCCE02-NCCE02_543.html. (In Farsi)

Appolonia, D. (1980). Soil-bentonite slurry trench cutoffs. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, ASCE, 106(4), 399-417.

Ashrafi, H. A. (2013). Study the effect of bentonite and

- metakaolin in geotechnical behavior of sand. M.Sc thesis, University of Ormia, Iran, Faculty of Engineering. (In Farsi)
- ASTM D2216-10, (2010). Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass, ASTM international, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D422-63e2, (2007). Standard test method for particle-size analysis of soils (Withdrawn 2016), ASTM international, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D4318-10e1, (2010). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM international, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- ASTM D5856-15, (2015). Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold.
- ASTM D698-12e1, (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM international, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- Benson, C. H., Daniel, D. E. and Boutwell, G. P. (1999). Field performance of compacted clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(5), 390-403.
- Benson, C. H., Zhai, H., Wang, X. (1994). Estimating Hydraulic conductivity of compacted clay liners. *ASCE*, 110(6), 1063-1083.
- Bowders, J. J. (1988). Fly ash liners for waste disposal facilities. *Geotechnical News*, 6(4), 26-29.
- Brandenburg, U. and Lagaly, G. (1988). Rheological properties of sodium montmorillonite dispersions, *Applied Clay Science*, 3, 263-279.
- Edil, T. B., Sandstrom, L. K. and Berthouex, P.M. (1992). Interaction of inorganic leachate with compacted pozzolanic fly ash. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 118(9): 1410- 1430.
- Eskandari, M., Homae, M., and Falamaki, A. (2016). Landfill site selection for municipal solid wastes in mountainous areas with landslide susceptibility. *Environmental Science and Pollution Research*, 23: 12423-12434.
- Falamaki, A., Shariatmadari, N. and Noorzad, A. (2008). Strength properties of hexametaphosphate treated soils. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8):1215-1218.
- Falamaki, A., Tavallali, H., Eskandari, M., Farahmand, S.R. (2016). Immobilizing some heavy metals by mixing contaminated soils with phosphate admixtures. *International Journal of Civil Engineering*. DOI 10.1007/s40999-016-0006-5, ISSN 1735-0522.
- Farster, H., Heick, L. (1996). Influence of anion competition on boron adsorption by clays and soils. *Soil Science*, 161(2), 99-103.
- Gajo, A. and Maines, M. (2007). Mechanical effects of aqueous solutions in organic acids and bases on a natural active clay. *Geotechnique*, 57(8), 687-699.
- George, R. O. and Georgina, U. O. (2014). The permeability of ocean sand with bentonite. *International Journal of Engineering and Technology Research*, 2(1),1-6.
- Gori, U. (1994). The pH influence on the index properties of clays. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 50, 37-42.
- Gratchev, I.B. and Sassa, K. (2009). Cyclic behavior of fine-grained soils at different pH values. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE*, 135(2), 271-279.
- Han, B. W. (2012). Potential use of laterite and kahang clay mixture as a landfill liner material. Thesis for degree of master of engineering, University Teknologi Malaysia.
- Hong, C. O., Chung, D. Y., Lee, D. K. and Kim, P. J. (2010). Comparison of phosphate materials for immobilizing cadmium in soil. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 58, 268-274.
- Hrapovic, L. (2001). Biodegradation of organic contaminants under diffusive transport through clayey soil. Ph.D. Thesis, University of Western Ontario, London, Ont.
- Kashir, M. and Yanful, E. K. (2001). Hydraulic conductivity of bentonite permeated with acid mine drainage, *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 1034-1048.
- Khodaverdiloo, H. and Homae, M. (2008). Modeling phytoremediation of soils polluted with cadmium and lead. *JWSS - Isfahan University of Technology*, 11(42), 417-426. (In Farsi)
- Madsen, F. T. and Mitchel, J. K. (1987). Chemical effects on clay hydraulic conductivity and their determination, Open file report, Environmental Institute for Waste Management Studies, University of Alabama, Tuscaloosa.
- Mahdavi, A. (1997). The effect of pH changes on some of the mechanical parameters of clay. M.Sc thesis, Islamic Azad University of Arak, Iran. (In Farsi)
- Mignardi, S., Corami, A. and Ferrini, V. (2013) Immobilization of Co and Ni in mining-impacted soils using phosphate amendments, *Water Air Soil Pollution*, 224:1447.
- Mitchel, J. K. (1982). Fundamentals of soil behavior, John wiley & sons, New York.
- Nhan, C. T. (1994). A coal fly ash liner: an option in solid waste disposal management. M.Sc. Thesis, University of Toronto, Toronto, Ont.
- Ourth, A. S. and Verbrugge, J. C. (1999) First results about the influence of leachates on the properties of boom clay, International conference on geoenvironmental engineering, London, 47-53.
- Ping, T., Yong-chao, Z. and Zhen-miao, X. (2013).

- Immobilization of heavy metals in sludge using phosphoric acid and monobasic calcium phosphate, *Zhejiang University Sci A*, 14(3), 177–186.
- Ruhl, J. L. and Daniel, D. E. (1997). Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(4), 369–381.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., Palomino, A. and Guimaraes, M. S. (2002). Micro-scale aspects of chemo-mechanical coupling: Interparticle forces and fabric. In: Di Maio, Hueckel and Loret (eds) *Chemomechanical coupling in clays: from nano-scale to engineering applications*, Swets & Zeitlinger, Lisse.
- Shriver, D. F. and Atkins, P. W. (1999). *Inorganic Chemistry*, W.H. Freeman and Company.
- Spance, R. D. and Shi, C. (2005). *Stabilization and solidification of hazardous, radioactive and mixed wastes*. 1st edn. CRC Press, Boca Raton.
- Tang, P., Zhou, Y. and Xie, Z. (2013). Immobilization of heavy metals in sludge using phosphoric acid and monobasic calcium phosphate. *Journal of Zhejiang University – Science A (Applied Physics & Engineering)*, 14(3), 177-186.
- Unname. (2010). *Guidelines for Siting MSW Sanitary Landfill*, Iran's Environmental Protection Organization, Office for Soil and Water Pollution Studies., Tehran, Iran. (In Farsi)
- Unname. (2011). *Urban and rural waste management master plan of Fars province (southern area)*. Fars Governor, Iran. (In Farsi)
- USEPA, (2001). *Geosynthetic clay liners used in municipal solid waste landfills*. Solid Waste and Emergency Response (5306w).
- Vesperman, K. D., Edil, T. B. and Berthouex, P. M. (1985). Permeability of fly ash and fly ash-sand mixtures In *Hydraulic Barriers in Soil and Rock*. ASTM STP 874. Edited by Johnson, A.L., Frobel, R.K., Cavalli N.J. and Pettersson, C.B. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 289-298.
- Vigil, S., Theisen, H. and Tchobanoglous, G. (1993). *Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues*. Mc Graw-Hill.
- Wang, Y. H. and Ashrafi, H. A. (2013). Study the effect of bentonite and metakaolin in geotechnical behavior of sand. M.Sc thesis, University of Ormia, Iran, Faculty of Engineering. (In Farsi)
- Siu W. K. (2006). Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characterizations, *Canadian Geotechnical Journal*, 43(6), 587–600.