Archive of SID
DOI: 10.22059/ijswr.2018.260196.667946 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۰، شماره ۴، شهریور ۱۳۹۸ (ص ۹۶۳-۹۵۱)

The Effect of Saline Water on the Physical and Mechanical Properties of Cohesive Fine-grained Soils (Case Study, Madani and Malekian Dams in East Azarbaijan Province)

HOSSEIN SOLTANI-JIGEH[1], NAZILA KARDAN[2*], HOSSEIN ESHAGHI[3], MOHAMMAD REZA EMAMI AZADI[4]

1. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
3. Graduated M.SC Student-Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
4. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran
(Received: June. 19, 2018- Revised: Oct. 1, 2018- Accepted: Oct. 3, 2018)

ABSTRACT

Fine-grained soils with a high percentage of clay minerals are used for covering sanitary landfill and for earth dams' cores because of their low permeability. One of the key factors affecting the behavior of these soils is pore fluid chemistry, so that changes in fluid viscosity and type of cations change the engineering properties of these soils. In this study, the effect of water salinity has been investigated on Atterberg and compaction characteristics**,** shear strength**,** pore water pressure of fine-grained soils. For this purpose, Atterberg limits, compaction and undrained triaxial tests were conducted on the fine-grained soils, used in the cores of Shahid Madani and Malekian dams, with different pore fluids. Distilled water**,** project salty water**,** NaCl solutions with 0.2**,** 0.4**,** and 0.8 molar are used as a pore fluid. The results showed by increasing the salinity of water, the liquid limit, plastic limit and plasticity index decrease in both soils, but these changes are not considerable. The results of the triaxial tests showed increasing NaCl salt concentration does not always increase the shear strength of the soils. The maximum increase in the soil shear strength values in both Malekian and Madani soils was obtained with 0.2 molar which is mentioned as an optimal point. In both soils, by increasing the salinity of water**,** the excess pore water pressure decreases and there is not any meaningful effect on the deformation modulus secant of soils. The cohesion parameter in both soils are reduced up to 0.4 molar and after that increased by increasing salinity. The saline water with concentration between 0.2 and 0.4 molarraised the internal friction angle of soil and beyond these concentration did not have a positive effect on the friction angle.

Key words: Fine-grained cohesive soils, Atterberg limits, Triaxial test, Shear strength, Excess pore water pressure, Salinity.

*Corresponding Author's Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir
www.SID.ir

Archive of SID

بررسی اثر شوری آب بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ریزدانه (مطالعه موردی سدهای شهید مدنی و ملکیان آذربایجان‌شرقی)

حسین سلطانی جیغه[۱]، نازیلا کاردان[۲*]، حسین اسحقی[۳]، محمدرضا امامی آزادی[۴]

۱. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۳. کارشناس ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۴. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۹- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۷/۹- تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۷/۱۱)

چکیده

خاک‌های ریزدانه با درصد بالای کانی‌های رسی به علت نفوذپذیری پایین در پوشش مدفن‌های بهداشتی و هسته سدهای خاکی استفاده می‌شوند. یکی از عوامل مهم مؤثر بر رفتار این خاک‌ها، شیمی آب منفذی است، به طوری که تغییر در غلظت سیال و نوع کاتیون‌های آن، می‌تواند موجب تغییر خواص مهندسی خاک‌ها گردد. در تحقیق حاضر، اثر شوری آب بر ویژگی‌های خمیری، تراکم، مقاومت برشی و فشار آب‌حفره‌ای خاک‌های ریزدانه بررسی شده است. بدین منظور، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم و سه‌محوری زهکشی‌نشده بر روی مصالح ریزدانه مورد استفاده در هسته سدهای خاکی ملکیان و شهید مدنی با سیال‌های منفذی مختلف انجام گرفته است. آب‌های استفاده شده شامل آب مقطر، آب شور هر پروژه، و محلول‌های آب شور با غلظت‌های ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ مولار نمک طعام بودند. نتایج نشان داد که با افزایش شوری آب، حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری اندکی کاهش می‌یابد، لیکن این تغییرات چندان قابل‌ملاحظه نمی‌باشند. نتایج آزمایش‌های سه‌محوری نشان داد که با افزایش شوری آب، مقاومت برشی نمونه‌های خاک همواره افزایش نمی‌یابد. حداکثر افزایش در مقاومت برشی خاک‌های ملکیان و مدنی با محلول ۰/۲ مولار بدست آمد، که به عنوان نقطه بهینه ذکر می‌شود. در هر دو خاک با افزایش شوری آب، فشار آب حفره‌ای اضافی کاهش یافته و روند مشخصی بر مدول تغییرشکل خاک‌ها ندارد. چسبندگی در هر دو خاک تا ۰/۴ مولار کاهش یافته و بعد از آن با بیشتر شدن شوری زیاد شده است. شوری آب در محدوده ۰/۲ الی ۰/۴ مولار، زاویه اصطکاک داخلی خاک‌ها را افزایش داده و بعد از آن اثر مثبتی بر روی این پارامتر ندارد.

واژه‌های کلیدی: خاک‌های ریزدانه، حدود اتربرگ، آزمایش سه‌محوری، مقاومت برشی، فشار آب حفره‌ای، شوری آب.

مقدمه

خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه تابع عوامل متعددی مانند دانسیته، تخلخل، ساختار، دانه‌بندی، میزان و نوع کانی‌های رسی، خاصیت خمیری و میزان و نوع املاح موجود در آب منفذی می‌باشد. تغییر هر یک از این عوامل، خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها را تغییر می‌دهد و به تبع آن ممکن است سازه‌های ساخته شده روی این خاک‌ها دچار تغییرات و یا تهدیداتی شوند. ویژگی‌های سیال منفذی موجود در حفرات توده خاک نیز از عوامل تأثیرگذار بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها است. در برخی از پروژه‌های ژئوتکنیکی، آب موجود در منطقه شور بوده و یا به دلیل عبور از مصالح خاکی حاوی نمک، شور می‌گردد؛ بنابراین، شناخت رفتار خاک تحت تأثیر محلول‌ها و مواد مختلف می‌تواند در طراحی‌ها و تصمیم‌گیری صحیح مؤثر واقع شود. در خاک‌های رسی، نوع مواد شیمیایی که با خاک ترکیب می‌شوند و نیز ترکیبات آن‌ها از مسائل مهم در درک نحوه تغییر خصوصیات مهندسی خاک‌ها است (Abbasi and Nazifi, 2013). تحقیقات متعددی در خصوص اثر سیال منفذی بر خواص مهندسی خاک‌های رسی انجام گرفته است که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

آزمایش‌های حد روانی بر روی بنتونیت با محلول سه نوع نمک متفاوت نشان دادند که با افزایش غلظت محلول نمک حد روانی خاک کاهش می‌یابد (Di Maio, 1996).تحقیقات دیگری تأیید کردند که آب شور باعث کاهش حد روانی خاک می‌گردد (Mahasneh, 2004; Alamdar, 1999). Yukselen-Aksoy *et al.* (2008) دریافتند که در خاک‌های با حد روانی کمتر از ۱۱۰ درصد، آب شور اثر چندانی بر حد روانی خاک ندارد، لیکن در

* نویسنده مسئول: n.kardan@azaruniv.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

خاک‌های با حد روانی بیشتر از این مقدار، حد روانی و نشانه خمیری را به شدت کاهش می‌دهد. Arasan and Yetimoğlu (2008) با مطالعه اثر چهار نوع محلول نمک متفاوت نتیجه گرفتند که شوری آب حد روانی و خمیری خاک‌های با خمیری کم را افزایش و بر عکس مقادیر متناظر را در خاک‌های با خمیری بالا کاهش می‌دهد.

Ajam *et al.* (2014) با مطالعه اثر نمک‌های کلرید سدیم، کلرید منیزیم و سولفات کلسیم بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح رسی هسته سد خاکی گتوند نشان دادند که نوع و میزان نمک تأثیر چندانی بر ویژگی‌های تراکمی خاک ندارد. از سویی دیگر، وجود نمک در خاک، حد روانی را کاهش و تغییر چندانی در حد خمیری ایجاد نمی‌کند. همچنین در خاک‌های چسبنده، اثرات مخرب سولفات سدیم بسیار بیشتر از سدیم کلراید است (Shukla *et al.*, 2014). Messad and Moussai (2016) دریافتند که افزایش درصد نمک در آب موجب کاهش حدود اتربرگ خاک می‌گردد. Mansouri *et al.* (2012) کاهش حد روانی خاک در اثر اضافه شدن آب شور دریای مرده را به حضور کاتیون‌هایی با ظرفیت بالا در آب شور نسبت دادند که به موجب آنها نیروی دافعه در بین ذرات کاهش یافته و ذرات به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

تعدادی از محققان مشاهده نمودند که با افزایش شوری آب، رطوبت بهینه خاک کم و وزن مخصوص خشک زیاد می‌شود (Alainachi and Alobaidy, 2010; Emami Azadi, 2008; Shariatmadari *et al.*, 2011).

Abdullah et al. (1997) با مطالعه اثر سه نوع کاتیون سدیم، کلسیم و پتاسیم بر خواص تحکیمی خاک‌های رسی نشان دادند که پتاسیم باعث تغییرات بنیادی در رفتار خاک رس می‌شود و نشانه خمیری و ویژگی‌های تورمی خاک را به شدت کاهش می‌دهد. مطالعه اثر آب شور سرشاخه کرچای و آب نیمه شور رودخانه آجی‌چای بر خواص خاک ریزدانه هسته سد کرچای نشان داد که با افزایش شوری آب حدود اتربرگ، شاخص‌های تراکم‌پذیری و تورم‌پذیری، ضریب تغییر حجم و ضریب قابلیت فشردگی کاهش و ضریب تحکیم و ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد. دلیل تغییرات اتصال ذرات خاک، املاح موجود در آب و تشکیل ساختار فولوکوله در خاک می‌باشد. در این ساختار نشست خاک کمتر و به دلیل نفوذپذیری بالای خاک، زایل شدن فشار آب منفذی اضافی سریعتر انجام شده و در نتیجه ضریب تحکیم خاک با آب شور در مقایسه با آب مقطر بیشتر است (Mansouri *et al.*, 2012).

Yukselen-Aksoy *et al.* (2008) نشان دادند که آب شور فقط شاخص تراکم‌پذیری خاک بنتونیت سدیم‌دار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. Siddiqua *et al.* (2011) با بررسی اثر محلول‌های کلرید سدیم و کلرید کلسیم بر روی دو نوع خاک دریافتند که در خاک حاوی درصد زیاد رس، افزایش شوری آب منفذی سبب کمتر شدن شاخص‌های تراکم‌پذیری و تورم‌پذیری می‌شود، اما تأثیر چندانی بر خصوصیات مکانیکی خاک دانه‌ای ندارد. Alamdar (1999) نیز تغییر چندانی در پارامترهای تراکم خاک با افزایش شوری آب مشاهده ننمود.

Yilmaz (2006) نتیجه گرفت که افزایش غلظت محلول‌های نمکی، مخصوصاً کلرید سدیم، به علت کاهش نیروی دافعه در بین صفحات منفی کانی‌های رسی، نفوذپذیری خاک را زیاد می‌کند. نتیجه مشابهی توسط Muhammad (2004) نیز بدست آمد. Mansouri *et al.* (2016) نشان دادند که با افزایش مقدار شوری، تراکم‌پذیری و فشار تورمی خاک ریزدانه چسبنده کاهش و ضریب نفوذپذیری و مقاومت تک‌محوری آن افزایش می‌یابد. در حضور آب‌های مقطر، نیمه‌شور و شور، تورم‌پذیری خاک پس از گذشت ۲۴ ساعت، به ترتیب کمتر از ۱ درصد، برابر ۲۳٪ و ۳۲٪ شده است. همچنین مقاومت ماسه سنگ کوارتزی در معرض آب شور بین ۵ تا ۱۳ درصد کاهش داشته است.

Ouhadi and Goodarzi (2009) با استفاده از مخلوط خاک بنتونیت و نمک‌های سدیم با منشأ آنیونی متفاوت، نمونه‌های مصنوعی خاک- الکترولیت تهیه نموده و دریافتند که وجود کاتیون سدیم در غلظت‌های کم و زیاد به ترتیب باعث ایجاد ساختمان پراکنده و فولوکوله می‌شود. Abbasi and Nazifi (2013) واگرا نشدن خاک در تماس با محلول کلرید سدیم را به آنیون کلر نسبت دادند که بر خلاف کاتیون سدیم در جهت واگرایی خاک عمل می‌کند. Khamehchiyan *et al.* (2005) معتقدند که در خاک حاوی مقادیر بالای کانی‌های کلریت و ایلیت با فعالیت کم، میزان گسترش لایه دوگانه در حدی نمی‌باشد که سبب از بین رفتن نیروی جاذبه در بین ذرات رس و واگرایی آنها در آزمون پین‌هول شود.

Abu Zeid and Abd El-Aal (2017) با بررسی اثر شوری آب زیرزمینی بر ویژگی‌های خاک رسی، با مقادیر شوری تا ۸۰ درصد، نشان دادند که با افزایش درصد شوری آب، حد خمیری، حد روانی و نشانه خمیری خاک کاهش و رطوبت بهینه، ضریب تحکیم و نسبت باربری کالیفرنیای خاک زیاد و وزن مخصوص خشک حداکثر کم می‌شود. دلیل این تغییرات بزرگتر شدن اندازه ذرات رس در اثر افزایش غلظت شوری آب منفذی می‌باشد.

Kenny (1967) دریافت که مقاومت باقیمانده رس‌ها به نوع کانی‌ها و خواص شیمیایی آب منفذی بستگی دارد. Mahasneh

www.SID.ir

Archive of SID

(2004) و Mansour *et al.* (2008) نشان دادند که آب شور دریای مرده مقاومت فشاری خاک را زیاد می‌کند. آنان افزایش مقاومت را به رسوب نمک در خاک و ایفای نقش آن به عنوان سیمان نسبت دادند. Ayininuola *et al.* (2009)، Siddiqua *et al.* (2011) و Naeini and Jahanfar (2011) نشان دادند که شوری آب تأثیر چندانی بر پارامترهای مقاومت برشی خاک ندارد. Kirov and Truc (2012) مشاهده نمودند که آب شور مقاومت برشی خاک رس را کاهش می‌دهد.

مرور پیشینه موضوع نشان می‌دهد که اثر شوری بر مقاومت برشی انواع خاک‌ها به طور کامل واضح نبوده و مطالعات محدودی در این زمینه توسط دستگاه سه‌محوری انجام شده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم و سه محوری زهکشی نشده بر روی خاک‌های ریزدانه رسی جهت بررسی اثر شوری آب بر رفتار آنها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مصالح خاکی

در تحقیق حاضر، دو نوع خاک ریزدانه از منابع قرضه هسته دو سد خاکی واقع در استان آذربایجان‌شرقی تهیه شدند. خاک اول از منبع قرضه خاک ریزدانه هسته سد شهید مدنی در نزدیکی روستای ونیار شهرستان خواجه در شمال تبریز و خاک دوم از منبع قرضه خاک ریزدانه هسته سد ملکیان واقع در روستای ملکیان نرسیده به شهرستان خواجه تهیه شدند. محل‌های نمونه‌برداری خاک‌ها نسبت به موقعیت سدها در شکل (۱) نشان داده شده است. مختصات محل‌های نمونه‌برداری برای خاک سد مدنی N ″۵۰/۵۳ ′۶ °۳۸، E ″۲۹/۴۵ ′۲۲ °۴۶ و برای خاک سد ملکیان N ″۵۸/۶۷ ′۲ °۳۸، E ″۵۴/۷۲ ′۳۱ °۴۶ می‌باشند. دانه‌بندی این خاک‌ها در شکل (۲) و برخی مشخصات آنها در جدول (۱) آمده است.

آب منفذی

برای بررسی اثر شوری آب بر ویژگی‌های مصالح ریزدانه، آب مقطر، آب‌های شور رودخانه آجی‌چای در محل سد شهید مدنی (سد ونیار) و رودخانه ملکیان و نیز آب‌های شور تهیه شده از آب مقطر و کلریدسدیم با غلظت‌های ۰/۲ مولار (۱۱/۶۸ گرم بر لیتر)، ۰/۴ مولار (۲/۳۷ گرم بر لیتر)، و ۰/۸ مولار (۴۶/۷۴ گرم بر لیتر)، در آزمایشگاه به نمونه خاک‌ها اضافه گردید. لازم به ذکر است در تعیین حدود اتربرگ علاوه بر آب‌های مذکور، آب شور با غلظت‌های ۰/۱ و ۱/۰ مولار نیز تهیه شده و به خاک‌های مورد مطالعه اضافه گردیدند.

وزن مخصوص کلرید سدیم مورد استفاده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر ۲/۱۷ g/cm^3 و عدد جرمی آن برابر g/Mol ۵۸/۴۴ می‌باشد. نتایج آنالیز شیمیایی آب‌های سدهای ملکیان و شهید مدنی در جدول (۲) ارائه شده است.

روش تهیه نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایش حدود اتربرگ و تراکم بعد از افزودن آب‌های مختلف به خاک‌ها به مقدار لازم به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌های آزمایش سه‌محوری، با ۹۵٪ وزن مخصوص خشک حداکثر (روش استاندارد) و رطوبت بهینه متناظر به ترتیب با قطر و ارتفاع ۵ و ۱۰ سانتی‌متر در ۴ لایه متراکم شدند.

آزمایش‌های انجام یافته

در این تحقیق، آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم پروکتور استاندارد و سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی نشده بر روی نمونه‌های حاوی آب مقطر و آب‌های شور انجام گرفت. برای تعیین اثر روش انجام آزمایش (نمونه‌سازی، اشباع، تحکیم و بارگذاری) بر نتایج آزمایش‌های سه محوری، آزمایش‌های تکرار پذیری بر روی نمونه‌های مختلف در تنش‌های محصورکننده مختلف انجام شد. همچنین آزمایش‌های تکرار پذیری اتربرگ و تراکم بر روی اکثر نمونه‌ها انجام شد.

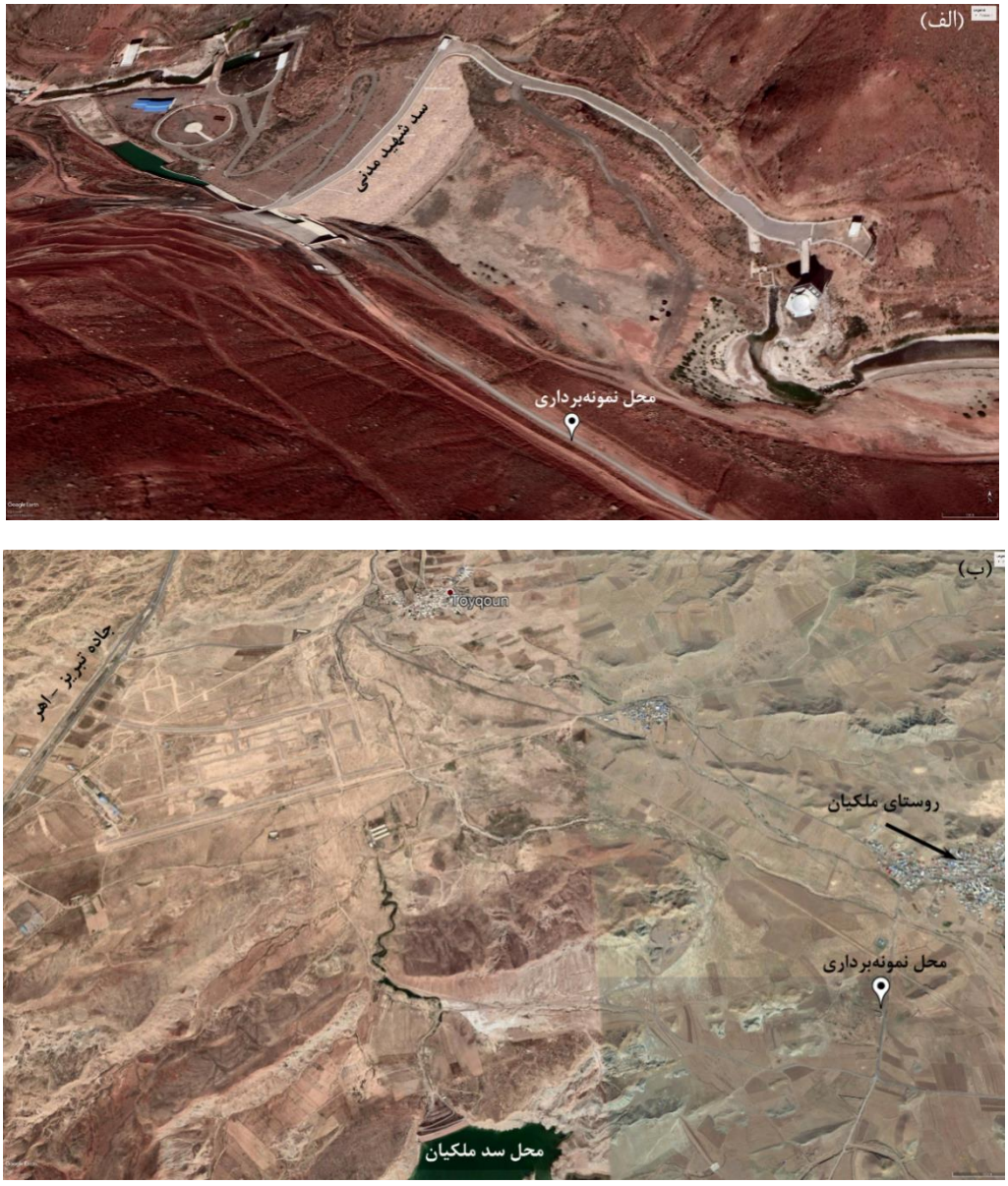
برای انجام آزمایش‌های سه‌محوری، نمونه‌ها پس از آماده‌سازی درون محفظه سه‌محوری قرار داده شده و حداقل ۷۲ ساعت آب مربوط به هر نمونه از داخل آنها عبور داده شد و بعد با اعمال تدریجی فشارهای محفظه و پس‌فشار به‌صورت گام به گام اشباع گردیدند. پس از اشباع، تمامی نمونه‌ها تحت تنش‌های محصورکننده مؤثر ۲۰۰ KPa و ۳۰۰ kPa به طور همسان تحکیم شدند. در نهایت، تمامی نمونه‌ها با اعمال بار محوری به صورت کنترل کرنش و با سرعت ثابت ۰/۰۸ mm/min به صورت زهکشی‌نشده تا کرنش محوری ۲۵٪ بارگذاری شدند.

نتایج و بحث

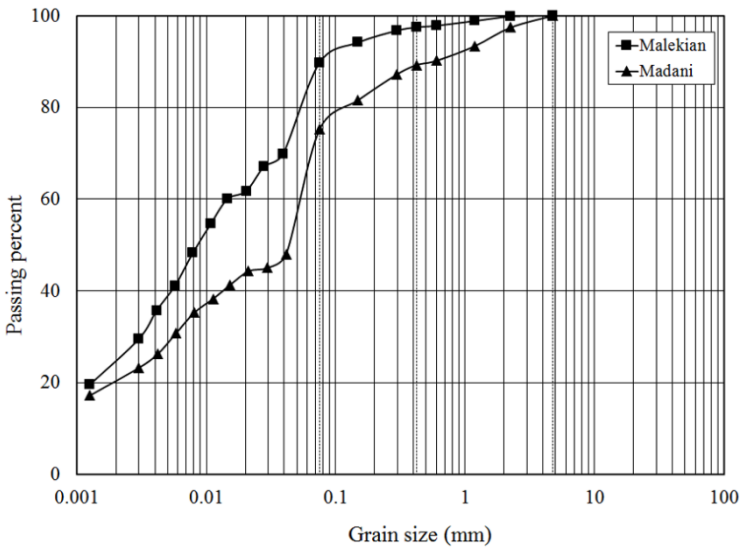
اثر شوری آب بر حدود اتربرگ، منحنی تراکم، تغییرات تنش تفاضلی، فشار آب حفره‌ای اضافی، مسیر تنش، و سایر پارامترهای مکانیکی خاک‌های ریزدانه سدهای ملکیان و مدنی در این قسمت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- محل نمونه‌برداری از منابع قرضه خاک‌های ریزدانه سدهای: الف) شهید مدنی، ب) ملکیان.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- برخی از مشخصات خاک‌های ریزدانه منابع قرضه سدهای مدنی و ملکیان

نام یون / نام خاک	حد روانی (٪)	حد خمیری (٪)	نشانه خمیری (٪)	ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون (٪)	توده ویژه ذرات خاک	طبقه‌بندی طبق سیستم متحد
شهید مدنی	۲۹	۱۷	۱۲	۷۵	۲/۶۷	CL
ملکیان	۲۹	۱۸	۱۱	۹۵	۲/۶۶	CL

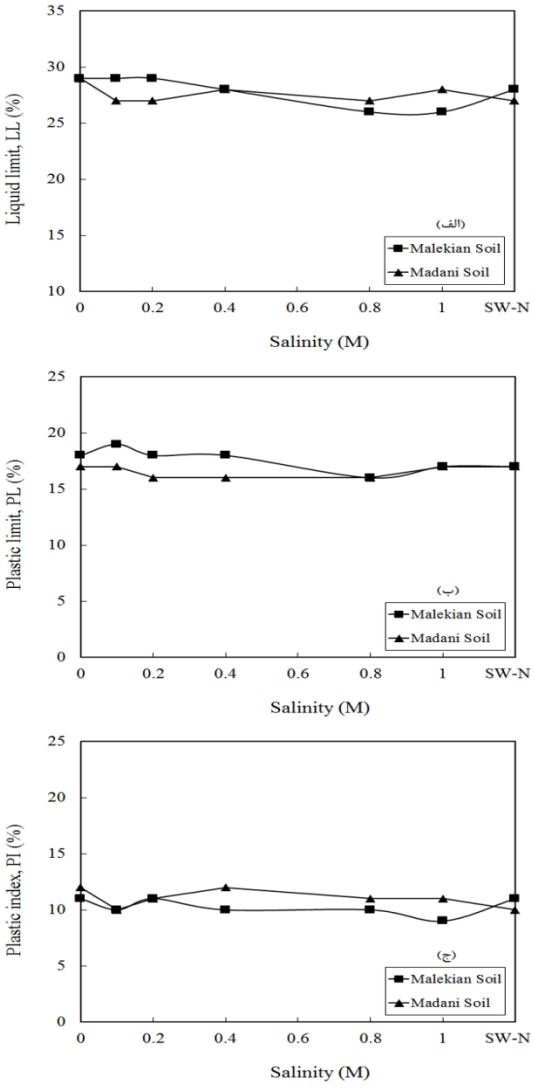
جدول ۲ - نتایج آنالیز یون‌های غالب آب سدهای شهید مدنی و ملکیان بر حسب ppm

نمونه آب	$[ca^{+}]$	$[K^{+}]$	$[Na^{+}]$	$[Cl^{-}]$	$[HCO_3^{-}]$
سد شهید مدنی	۹۰	۷۷	۳۵۰۰	۴۸۸۱	۶۱۰
سد ملکیان	۱۰۰	۲۰	۴۶۰	۶۵۶	۳۰۵

آزمایش‌های حدود اتربرگ

از تغییرات حدود اتربرگ، مطابق شکل (۳) دیده می‌شود که در خاک سد ملکیان، افزودن محلول نمک تا ۰/۲ مولار، تغییری در حد روانی ایجاد نکرده و افزودن آب شور با غلظت‌های ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۰ مولار حد روانی خاک را اندکی کاهش می‌دهد و حداکثر کاهش حدود ۳٪ می‌باشد. در این خاک آب شور سد، حد روانی را به مقدار اندکی کم نموده است. در خاک سد مدنی، با افزودن محلول‌های ۰/۱ و ۰/۲ مولار، حد روانی خاک اندکی کم شده و سپس با زیاد شدن غلظت آب شور (یعنی ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۰ مولار) حد روانی اندکی زیاد شده است. با توجه به شکل (۳-الف)، اثر آب شور سد مدنی در کاهش حد روانی، از اثر مشابه محلول‌های با غلظت ۰/۱ و ۰/۲ مولار کمتر است. در هر حال، حد روانی هر دو خاک با آب‌های شور کمتر از مقدار متناظر حاصل با آب مقطر است.

مطابق شکل (۳-ب)، حد خمیری خاک ملکیان در مقدار شوری ۰/۱ مولار اندکی افزایش یافته و پس از آن در محلول‌های ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۰ مولار اندکی کاهش دارد، چنانکه از حد خمیری خاک با آب مقطر نیز کمتر است. آب شور سد حد خمیری را اندکی کم کرده است، ولی اثر آن نسبت به محلول‌های با غلظت ۰/۴ و ۰/۸ مولار کمتر است. در مورد خاک سد مدنی، افزودن محلول شور تا ۰/۲ مولار، باعث کاهش حد خمیری شده و پس از آن در محلول‌های ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۰ مولار، روند تغییرات حد خمیری بر عکس شده است. آب شور پروژه تغییر قابل توجهی در حد خمیری خاک مدنی ایجاد نکرده است. نشانه خمیری هر دو خاک با آب شور با غلظت ۰/۱ مولار کاهش و پس از آن با اندکی افزایش در بازه ۰/۴-۰/۲ مولار، مجدداً کم شده است. آب شور سد مدنی نشانه خمیری خاک مربوطه را کمی کاهش داده است، ولی آب شور سد ملکیان تأثیری بر مقدار نشانه خمیری خاک ملکیان ندارد (شکل ۳-ج).



شکل ۳- اثر شوری آب بر حدود اتربرگ خاک‌های ملکیان و مدنی: (الف) حد روانی (ب) حد خمیری و (ج) نشانه خمیری.

www.SID.ir

Archive of SID

در توجیه کاهش حدود روانی و نشانه خمیری، مطابق نظر Abu zeid and Abd El-Aal (2017) می‌توان گفت که یون‌های مثبت Na^+ و K^+ در آب با کاتیون‌های لایه آب مضاعف اطراف ذره رس جایگزین شده و بار الکتریکی خالص را کم می‌کند. همچنین مطابق نظر Yukselen-Aksoy *et al.* (2008)، به دلیل حد روانی پایین خاک‌ها و درصد کم کانی مونت‌موریلونیت در آنها، شوری آب ویژگی‌های خمیری آنها را چندان متأثر نمی‌کند. نتایج بدست آمده با داده‌های سایر محققین نیز سازگار است (Sridharan, 1991; Sridharan *et al.*, 2002; Ören and Kaya, 2003).

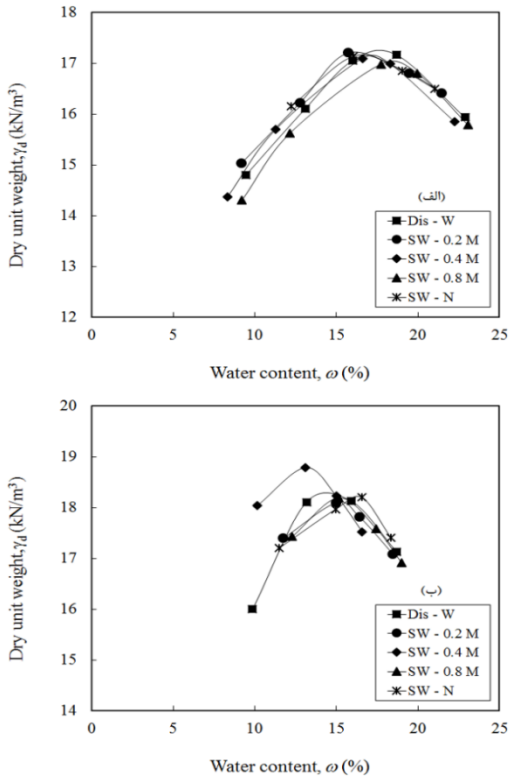
نتایج آزمایش‌های تراکم

منحنی‌های تراکم خاک‌های ملکیان و مدنی با غلظت‌های مختلف آب شور (شکل ۴) نشان می‌دهند که با افزودن آب شور به خاک ملکیان، وزن مخصوص خشک حداکثر آن تغییر چندانی نکرده است، ولی در خاک مدنی، با افزودن محلول تا ۰/۴ مولار، وزن مخصوص خشک حداکثر حدود ۱۰٪ زیاد شده و بعد از آن با شور شدن آب مقدار این پارامتر کم شده است. آب شور هر دو پروژه اثر محسوسی بر وزن مخصوص خشک حداکثر خاک مربوط به آن پروژه نداشته است. این موضوع در شکل (۵-الف) نیز به وضوح دیده می‌شود.

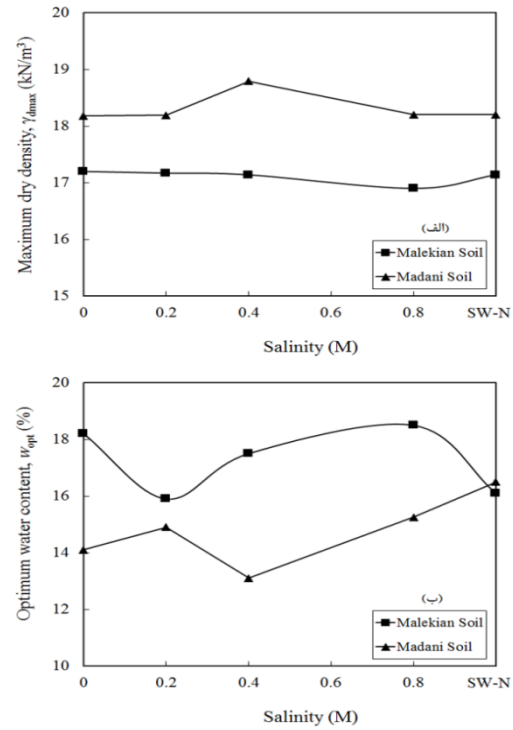
در خصوص اثر شوری آب بر مقادیر رطوبت بهینه، مطابق شکل (۵-ب)، در خاک ملکیان با آب شور ۰/۲ مولار، رطوبت بهینه کم شده و بعد از آن با زیاد شدن شوری آب، رطوبت بهینه زیاد شده است، لیکن تمامی مقادیر از مقدار متناظر حاصل با آب مقطر کمتر است. در خاک مدنی، به غیر از آب شور با غلظت ۰/۴ مولار که رطوبت بهینه را کاهش داده‌است، در بقیه حالات با افزایش غلظت شوری آب، رطوبت بهینه زیاد می‌گردد.

مشاهده می‌شود که علیرغم مشابهت مشخصات خاک‌های ملکیان و مدنی، آب شور پروژه مدنی رطوبت بهینه خاک را زیاد نموده است، حال آن که آب شور سد ملکیان رطوبت بهینه خاک را نسبت به مقدار متناظر بدست آمده با آب مقطر کاهش داده است.

در مطالعات قبلی، زیاد شدن وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش رطوبت بهینه به کاهش ضخامت لایه آب مضاعف و افزایش نیروی جاذبه بین ذرات در حضور آب نسبت داده شده است (Shariatmadari, et al., 2011; Alainachi and Alobaidy, 2010; Mansour et al., 2008; and Emami Azadi, 2008). لیکن، در این تحقیق به دلیل اشباع نشدن خاک‌ها در حالت متراکم و نیز فعالیت سطحی کم رس‌ها به نظر می‌رسد ضخامت لایه آب مضاعف دست‌خوش تغییرات چندانی نشده و ویژگی‌های تراکم خاک‌ها نیز از شوری آب متأثر نشده‌اند.



شکل ۴- نتایج آزمایش تراکم نمونه‌های حاوی آب‌های شور مختلف: (الف) خاک سد ملکیان (ب) خاک سد مدنی



شکل ۵- اثر شوری آب بر ویژگی‌های تراکم خاک‌ها: (الف) وزن مخصوص خشک حداکثر، (ب) رطوبت بهینه.

نتایج آزمایش‌های سه محوری

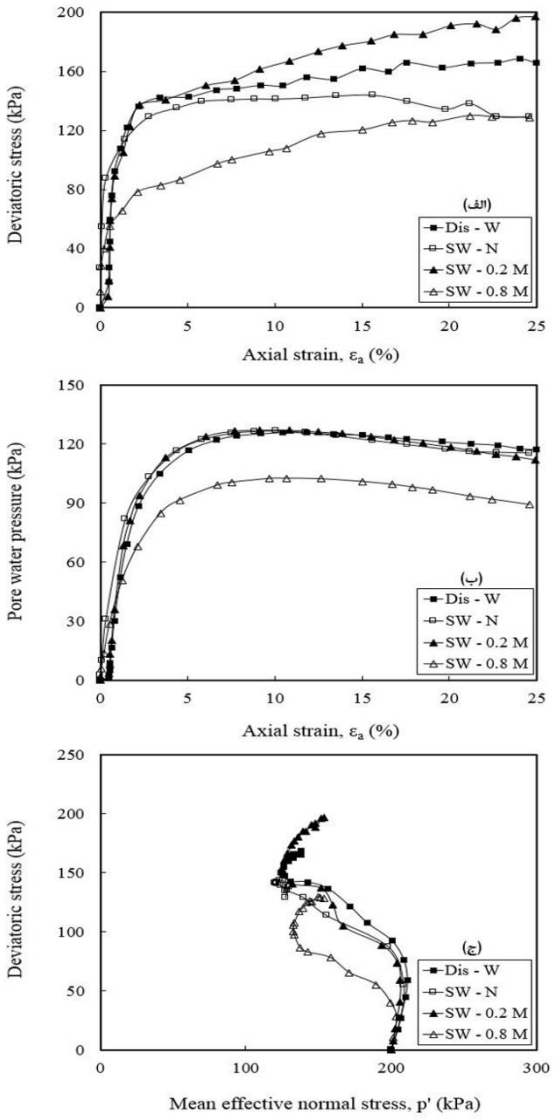
منحنی تنش - کرنش

شکل‌های (۶ و ۷) تغییرات تنش-کرنش، فشار آب حفره‌ای و

www.SID.ir

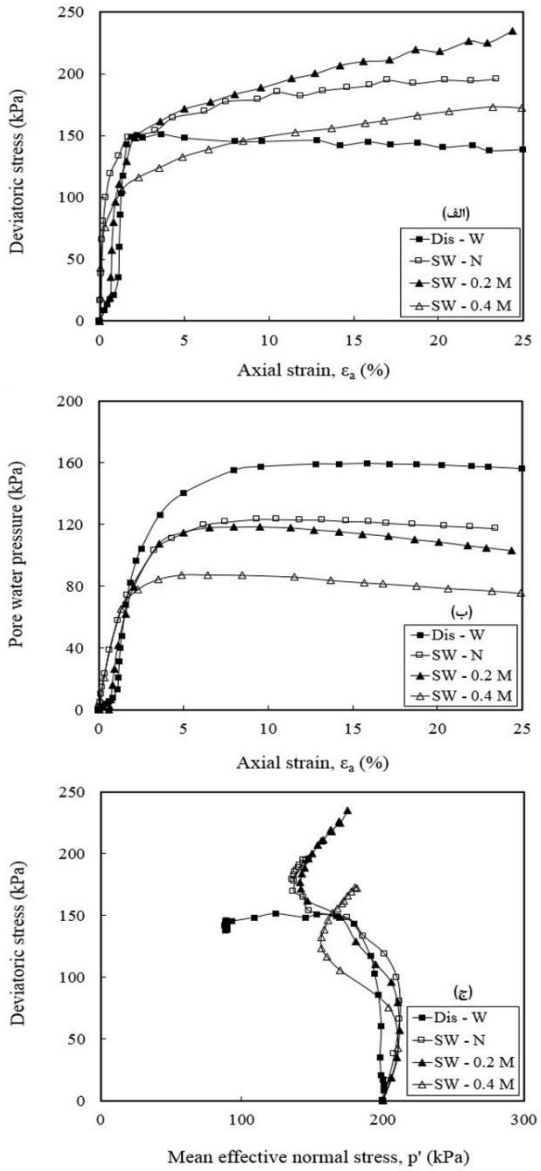
Archive of SID

مسیر تنش آزمایش‌های انجام شده تحت تنش محصورکننده ۲۰۰ کیلوپاسکال را به ترتیب برای خاک سدهای ملکیان و مدنی نشان می‌دهند. نمودارهای مشابه برای خاک سد مدنی تحت تنش محصور کننده ۳۰۰ کیلوپاسکال در شکل (۸) ارائه گردیده است. در نمودارهای تنش-کرنش و فشار آب حفره‌ای اضافی، محور قائم به ترتیب تنش تفاضلی ($q'=\sigma_1-\sigma_3$) و فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در اثر بارگذاری برشی (Δ_u)، و محور افقی در هر دوی این نمودارها، کرنش محوری کل (ε_a) می‌باشد. در نمودارهای مسیر تنش، محور قائم تنش تفاضلی و محور افقی، میانگین تنش نرمال مؤثر ($p'=(2\sigma'_3+\sigma'_1)/3$) است.



شکل ۶- نتایج آزمایش سه‌محوری نمونه‌های خاک سد ملکیان تحت تنش ۲۰۰ kPa: (الف) منحنی تنش-کرنش، (ب) فشار آب حفره‌ای اضافی و (ج) مسیر تنش.

از شکل (۶-الف) دیده می‌شود که آب شور با ۰/۲ مولار نمک طعام، اثر مثبتی بر رفتار مکانیکی و مقاومت خاک ملکیان داشته است. در خاک سد مدنی نیز روند مشابه با خاک سد ملکیان مشاهده گردید، با این تفاوت که در این خاک، آب شور با ۰/۴ مولار نمک طعام و آب شور سد سبب افزایش مقاومت برشی خاک می‌گردد، لیکن اثر آب شور سد نسبت به آب شور با ۰/۲ مولار نمک طعام کمتر است (شکل‌های ۷-الف و ۸-الف).



شکل ۷- نتایج آزمایش سه‌محوری نمونه‌های خاک سد مدنی تحت تنش ۲۰۰ kPa: (الف) منحنی تنش-کرنش، (ب) فشار آب حفره‌ای اضافی و (ج) مسیر تنش.

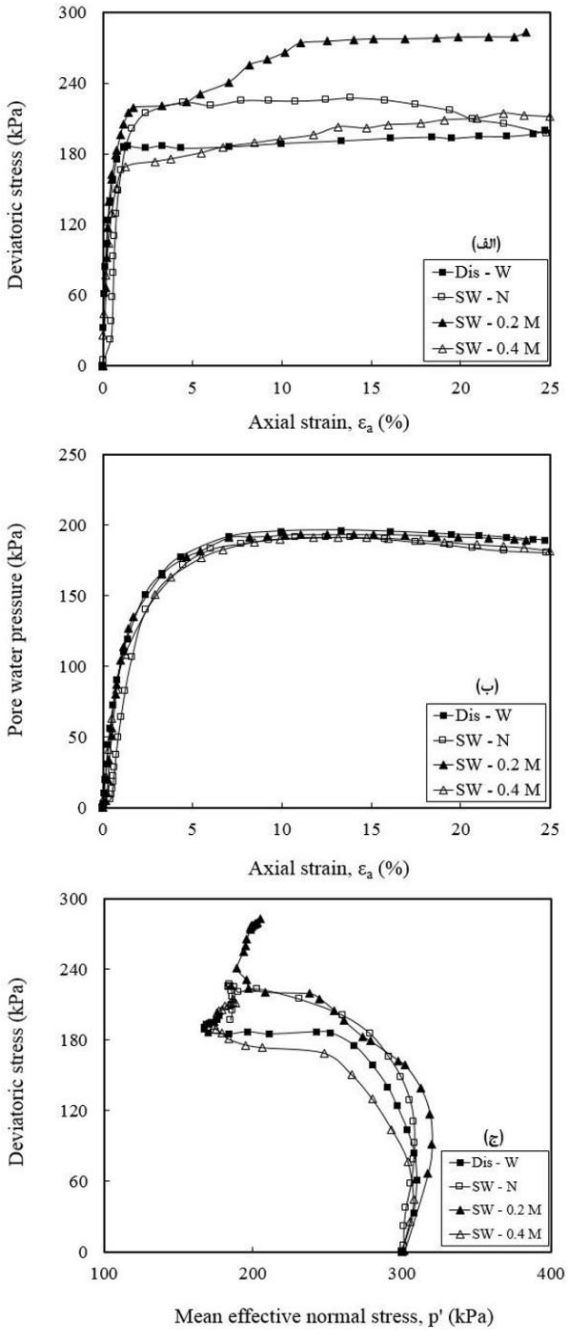
اثر شوری آب بر مقاومت برشی و شکل‌پذیری نمونه‌ها

تغییرات مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک سدهای ملکیان و مدنی با غلظت شوری، تحت تنش‌های تحکیمی ۲۰۰kPa و ۳۰۰kPa، در شکل (۹) رسم شده است. دیده می‌شود که در خاک سد ملکیان، تحت هر دو تنش تحکیمی، بیشترین مقاومت برشی مربوط به نمونه حاوی محلول ۰/۲ مولار می‌باشد و بیشترین

www.SID.ir

Archive of SID

میزان افزایش در مقاومت، نسبت به خاک آزمایش شده با آب مقطر، ۱۶/۹٪ است. در خاک سد ملکیان، مقاومت برشی نمونه‌های حاوی آب شور سد و محلول ۰/۸ مولار کمتر از مقاومت خاک آزمایش شده با آب مقطر است. در خاک سد مدنی، مقاومت نمونه‌های حاوی ۰/۲ مولار نمک طعام بیشترین مقدار بوده و نمونه‌های حاوی آب شور پروژه مقاومت بیشتری نسبت به خاک آزمایش شده با آب مقطر از خود نشان داده‌اند. در این خاک بیشترین میزان افزایش مقاومت ۵۵/۲٪ است.



شکل ۸- نتایج آزمایش سه محوری نمونه‌های خاک سد مدنی تحت تنش ۳۰۰kPa: (الف) منحنی تنش-کرنش، (ب) فشار آب حفره‌ای اضافی و (ج) مسیر تنش

جهت ارزیابی اثر شوری آب بر میزان شکل‌پذیری نمونه‌ها، تغییرات مدول تغییر شکل سکانت (E_{50}) آنها در شکل (۱۰) آمده است. در نمونه‌های خاک سد ملکیان، اثر شوری آب بر مدول تغییرشکل روند خاصی ندارد، با این حال عمدتاً E_{50} نمونه‌های حاوی آب شور سد و محلول ۰/۲ مولار نسبت به E_{50} مصالح حاوی آب مقطر اندکی بیشتر است. در خاک سد مدنی نیز شوری آب باعث کاهش E_{50} نسبت به مقادیر متناظر مصالح حاوی آب مقطر شده است و حداقل مقدار آن در نمونه‌های حاوی آب شور ۰/۲ مولار می‌باشد. این تغییرات را می‌توان به تغییر در ساختار اشاره شده در بخش قبلی نسبت داد که نسبت تخلخل زیاد در ساختار لبه به سطح در غلظت‌های نمک پایین سبب افزایش شکل پذیری شده است.

فشار آب حفره‌ای اضافی

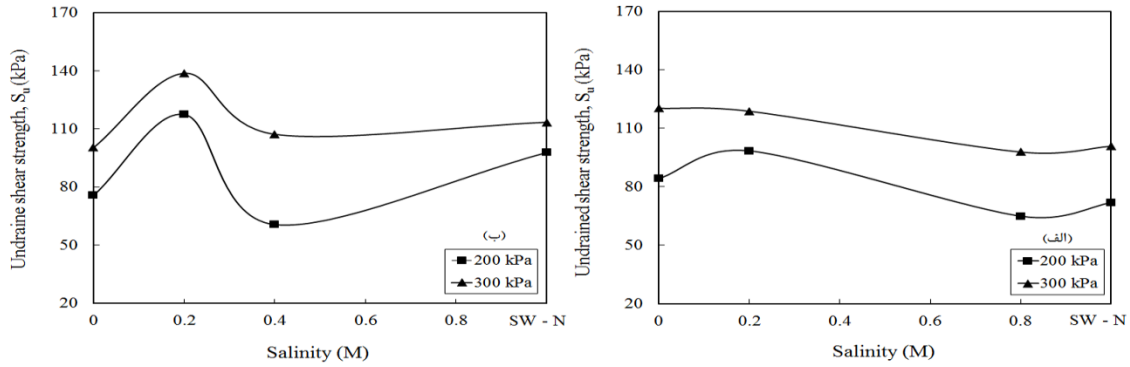
تغییرات فشارآب حفره‌ای با کرنش محوری در خاک سدهای ملکیان و مدنی (بخش ب شکل‌های ۶، ۷، و ۸)، حاکی از آن است که در تمامی نمودارها، فشار آب حفره‌ای ابتدا با صعود در یک نقطه به مقدار حداکثر رسیده و سپس با افزایش کرنش، مقدار آن ثابت مانده و یا با شیب ملایمی کم می‌شود.

مقایسه نتایج آزمایش‌های سه‌محوری تحت تنش تحکیمی ۲۰۰kPa و ۳۰۰kPa نشان می‌دهد که فشار آب حفره‌ای نمونه خاک سد ملکیان با آب سد ملکیان، از مقدار متناظر سایر نمونه‌ها بیشتر است. در خاک سد مدنی نیز، در هر دو تنش تحکیمی، نمودار فشار آب حفره‌ای نمونه‌های حاوی آب مقطر بالاتر از سایر نمودارها می‌باشد.

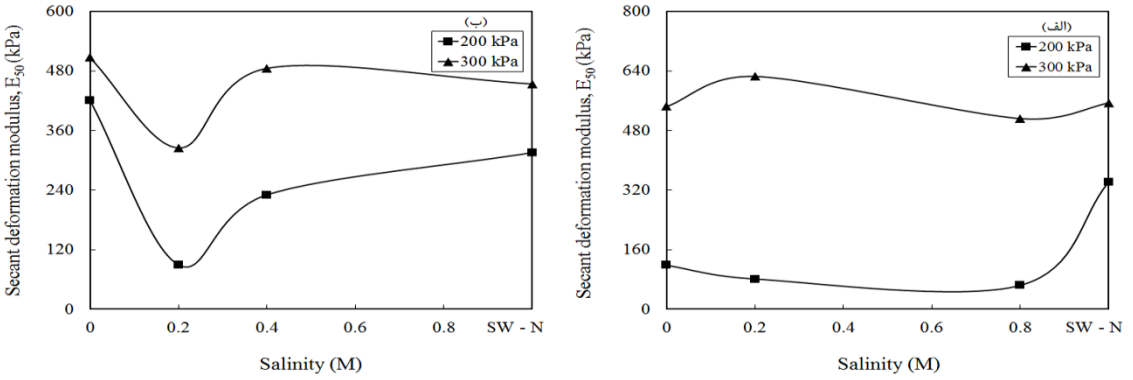
شکل‌های (۱۱ و ۱۲) به ترتیب تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی حداکثر و باقیمانده را در برابر شوری آب نشان می‌دهند. بیشترین مقدار فشار آب حفره‌ای اضافی در خاک سد ملکیان، در نمونه‌های آزمایش شده با آب شور سد می‌باشد و در این خاک مقدار فشار آب حفره‌ای نمونه‌های آزمایش شده با آب مقطر و محلول ۰/۲ مولار تقریباً برابر می‌باشد. در این خاک اثر شوری آب بر فشار آب حفره‌ای حداکثر چندان محسوس نمی‌باشد. در خاک سد مدنی، با افزایش غلظت شوری آب تا ۰/۴ مولار فشار آب حفره‌ای حداکثر کم شده و در هر دو تنش تحکیمی، نمونه‌های حاوی آب مقطر بیشترین فشار آب حفره‌ای را دارند. روند تغییرات فشار آب حفره‌ای نهایی مشابه تغییرات فشار آب حفره‌ای حداکثر است.

www.SID.ir

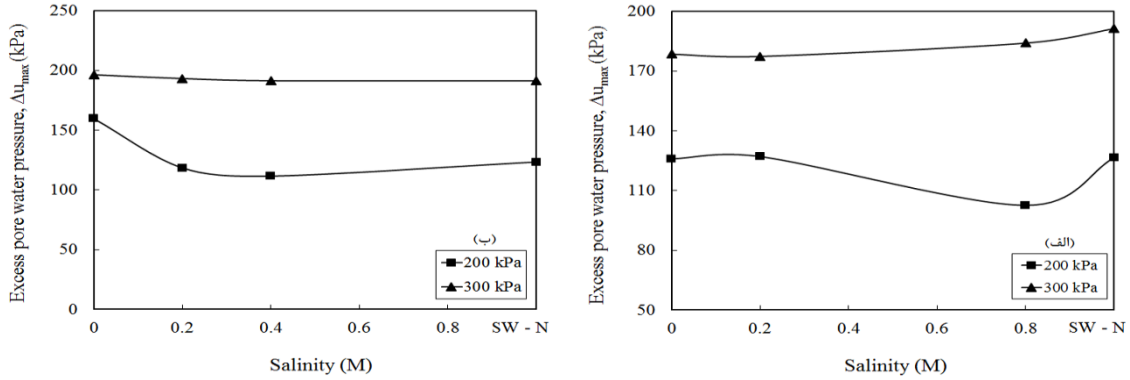
Archive of SID



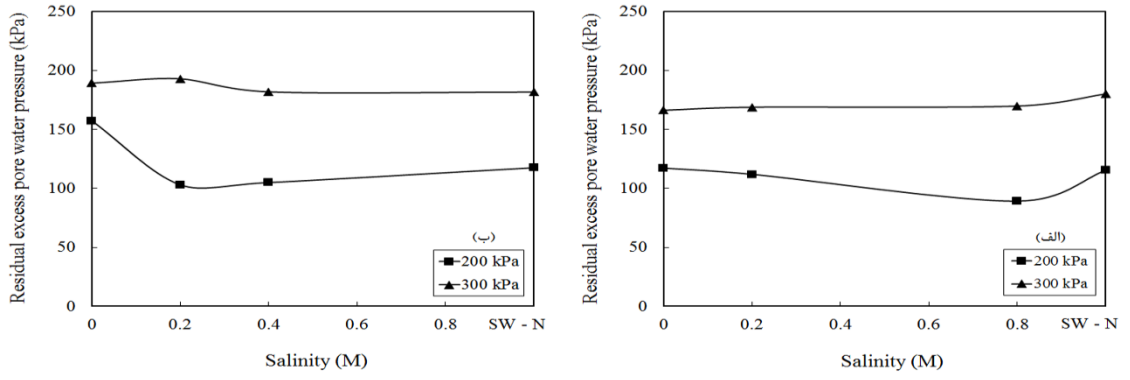
شکل ۹- اثر شوری آب بر مقاومت برشی زهکشی نشده خاک‌های: (الف) سد ملکیان و (ب) سد مدنی.



شکل ۱۰- تغییرات مدول تغییرشکل سکانت نمونه‌ها با غلظت شوری آب برای خاک‌های: (الف) سد ملکیان، و (ب) سد مدنی.



شکل ۱۱- تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی حداکثر با غلظت شوری آب برای خاک‌های: (الف) سد ملکیان، و (ب) سد مدنی.



شکل ۱۲- تغییرات فشار آب حفره‌ای اضافی باقیمانده با غلظت شوری آب برای خاک‌های: (الف) سد ملکیان، و (ب) سد مدنی.

www.SID.ir

Archive of SID

مسیرهای تنش

از منحنی‌های مسیر تنش نمونه‌های خاک سد ملکیان (شکل ۶-ج) دیده می‌شود که در تنش تحکیمی ۲۰۰kPa، به غیر از نمونه آزمایش شده با آب شور سد، رفتار بقیه نمونه‌ها ابتدا انقباضی بوده و سپس به اتساعی تغییر می‌یابد. رفتار نمونه آزمایش شده با آب شور سد کاملاً انقباضی است. در نمونه‌های خاک مدنی، در تنش تحکیمی ۲۰۰kPa، رفتار نمونه‌های آزمایش شده با آب مقطر و محلول با شوری ۰/۴ مولار انقباضی است، حال آن که رفتار بقیه نمونه‌ها تحت هر دو تنش تحکیمی ابتدا انقباضی بوده و سپس به اتساعی تغییر می‌یابد.

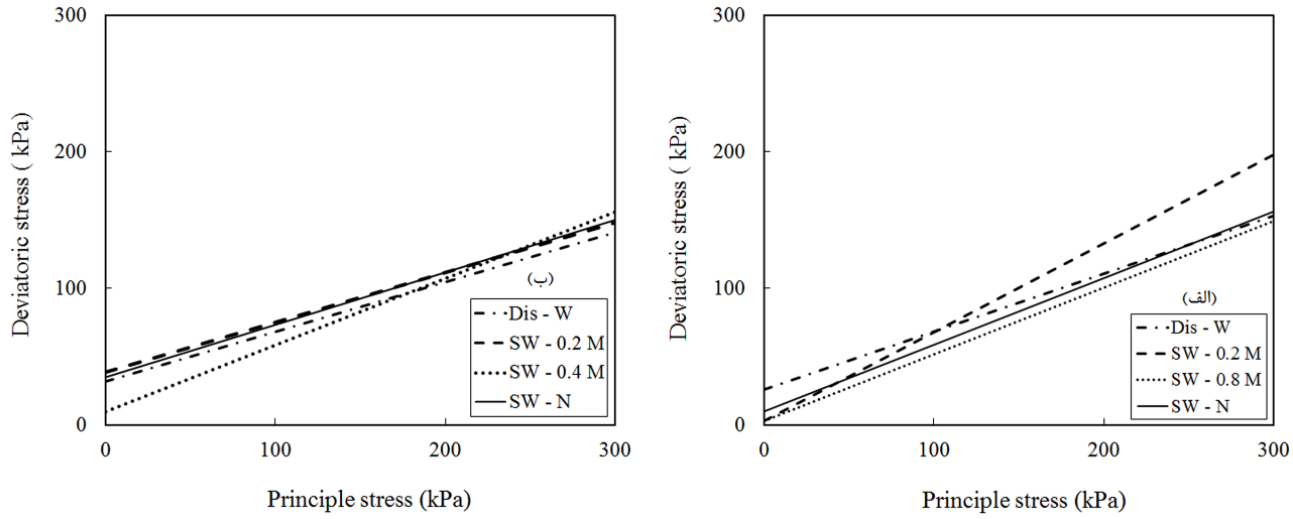
پوش گسیختگی و پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها

در پوش گسیختگی نمونه‌ها (شکل ۱۳) ملاحظه می‌شود که پوش گسیختگی نمونه‌های حاوی آب شور با غلظت ۰/۲ مولار بالاتر از پوش متناظر بقیه نمونه‌ها است. در جدول (۳) پارامترهای مقاومت برشی موثر خاک، یعنی چسبندگی (c') و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ')، ارائه شده است. همچنین تغییرات هر دوی این پارامترها در برابر شوری آب در شکل (۱۴) آورده شده است. روند تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تقریباً برعکس یکدیگر می‌باشند، به طوری که نمونه خاک سد ملکیان حاوی آب مقطر و خاک سد مدنی آزمایش شده به ترتیب با آب شور ۰/۲ مولار، بیشترین چسبندگی و کمترین زاویه اصطکاک را دارند. بیشترین مقدار زاویه اصطکاک داخلی در خاک سد ملکیان در نمونه حاوی آب شور ۰/۲ مولار و در خاک سد مدنی در نمونه حاوی آب شور ۰/۴ حاصل شده است. در نمونه‌های حاوی آب شور خود سد، زاویه اصطکاک نسبت به مقادیر متناظر در نمونه حاوی آب مقطر اندکی افزایش دارد. می‌توان گفت که شوری آب در محدوده ۰/۲ الی ۰/۴ مولار زاویه اصطکاک داخلی خاک‌ها را افزایش داده و بعد از آن اثر مثبتی بر روی این پارامتر ندارد. چسبندگی در هر دو خاک تا ۰/۴ مولار کاهش یافته و بعد از آن با بیشتر شدن شوری آب زیاد شده است.

طبق نظر Das (2008)، در غلظت نمک پایین، ساختار لخته‌ای از نوع "لبه به سطح" ایجاد می‌شود که به دلیل عدم تماس سطحی ذرات سبب کاهش چسبندگی و با توجه به درگیری ذرات زاویه اصطکاک داخلی زیاد می‌شود. در غلظت نمک زیاد، به دلیل ساختار لخته‌ای از نوع "سطح به سطح" ذرات به هم نزدیک شده و چسبندگی خاک افزایش می‌یابد و به دلیل عدم درگیری ذرات با هم زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است.

جدول ۳-پارامترهای مقاومت برشی موثر نمونه‌های خاک سدهای ملکیان و مدنی

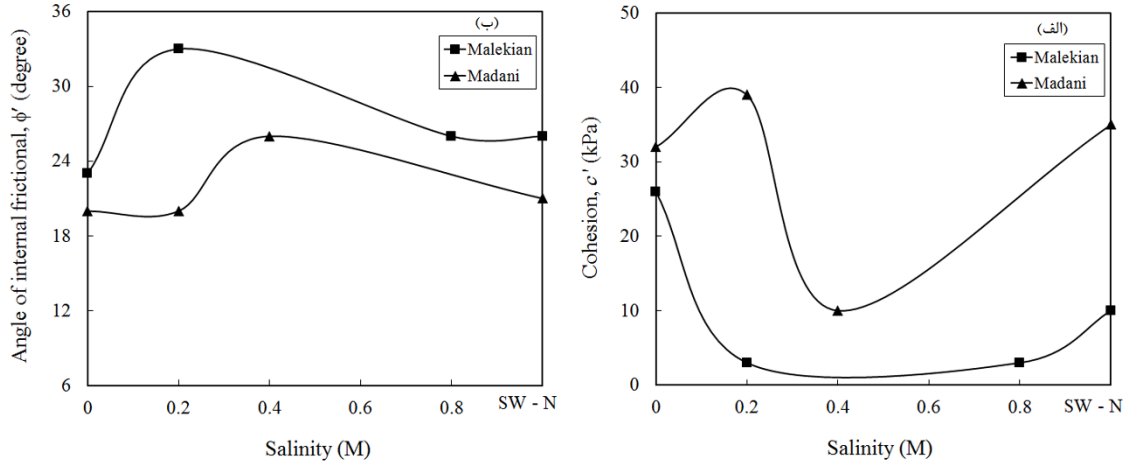
نام نمونه خاک	c′ (kPa)	ϕ′ (درجه)
ملکیان با آب مقطر	۲۶	۲۳
ملکیان با آب شور	۱۰	۲۶
ملکیان با ۰/۲ مولار محلول	۳	۳۳
ملکیان با ۰/۸ مولار محلول	۳	۲۶
مدنی با آب مقطر	۳۲	۲۰
مدنی با آب شور	۳۵	۲۱
مدنی با ۰/۲ مولار محلول	۳۹	۲۰
مدنی با ۰/۴ مولار محلول	۱۰	۲۶



شکل ۱۳-نمودارهای پوش گسیختگی: (الف) خاک سد ملکیان و (ب) خاک سد مدنی در برابر شوری آب.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۴- تغییرات (الف) چسبندگی و (ب) 'ϕ نمونه‌های خاک آزمایش شده در برابر شوری آب.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر شوری آب بر ویژگی‌های خمیری، تراکم، مقاومت برشی و فشار آب حفره‌ای خاک‌های ریزدانه مورد استفاده در هسته سدهای خاکی ملکیان و شهید مدنی با انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم و سه محوری زهکشی‌نشده انجام گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش شوری آب، حدود روانی و خمیری و نشانه خمیری هر دو خاک اندکی کاهش می‌یابد، لیکن این تغییرات چندان قابل‌ملاحظه نمی‌باشند.

نتایج آزمایش‌های تراکم نشان داد که فقط وزن مخصوص خشک حداکثر خاک سد مدنی، با افزودن محلول با غلظت ۰/۴ مولار حدود ۱۰٪ زیاد شده و سایر محلوهای آب شور اثر چندانی بر روی این پارامتر ندارند. رطوبت بهینه خاک سد ملکیان حاوی آب‌های شور نسبت به مقدار متناظر نمونه حاوی آب مقطر کم شده است. در خاک سد مدنی، به غیر از آب شور با غلظت ۰/۴ مولار که رطوبت بهینه را کاهش داده‌است، در بقیه حالات با افزایش غلظت آب شور رطوبت بهینه زیاد شده است.

مشاهده می‌شود که علیرغم مشابهت مشخصات خاک سدهای ملکیان و مدنی، آب شور سد مدنی رطوبت بهینه خاک را زیاد نموده، حال آن که آب شور سد ملکیان رطوبت بهینه خاک را نسبت به مقدار متناظر بدست آمده با آب مقطر کاهش داده است.

نتایج آزمایش‌های سه محوری نشان دادند با افزایش غلظت شوری آب، مقاومت برشی نمونه‌های خاک همواره افزایش نمی‌یابد. بیشترین افزایش در مقادیر مقاومت برشی خاک سدهای ملکیان و مدنی در محدوده آب شور ۰/۲ مولار می‌باشد. در هر دو خاک با زیاد شدن غلظت شوری آب، فشار آب حفره‌ای اضافی کاهش می‌یابد ولی روند مشخصی بر مدول تغییرشکل خاک‌ها ندارد. چسبندگی در هر دو خاک تا ۰/۴ مولار کاهش یافته و بعد از آن با بیشتر شدن شوری زیاد شده است. شوری آب در محدوده ۰/۲ الی ۰/۴ مولار زاویه اصطکاک داخلی خاک‌ها را افزایش داده و بعد از آن اثر مثبتی بر روی این پارامتر ندارد.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که آب شور تا غلظت ۰/۲ الی ۰/۴ مولار و نیز آب شور رودخانه‌ها تأثیر منفی چندانی بر ویژگی‌های خمیری و مقاومتی خاک‌های ریزدانه ندارد.

REFERENCES

Abbasi, N. and Nazifi, M.H. (2013). Assessment and modification of sherard chemical method for evaluation of dispersion potential of soils. *Geotechical and Geological Engineering*, 31(1), 337-349.

Abdullah,W.S., Al-Zoubi, M.S. and Alshibli, K.A. (1997). On the physicochemical aspects of compacted clay compressibility. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(4), 551-559.

Abu Zeid, M.M. and Abd El-Aal, A.K. (2017). Effect of salinity of groundwater on the geotechnical properties of some Egyptian clay. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26, 643–648.

Ajam, M., Sabour, M.R.and Dezvareh, G.A. (2014). Study of water salinity effect on geotechnical behavior of soilstructure using response surface method (RSM), (Case study: Gotvand Dam), *Ciência eNatura*, Santa Maria, 37 (1), 350-359

Alainachi, I.H. and Alobaidy, G.A. (2010). The effects of Basra Gulf salt water on the proctor compaction and CBR test results of soil samples at Baniyas City, Abu Dhabi, and UAE. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1-16.

Alamdar, S. (1999). The long-term effects of saline water on fine-grained soils. MS.C Thesis, Faculty of Civil Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran (In Farsi).

Arasan, S. and Yetimoğlu, T. (2008). Effect of inorganic salt solutions on the consistency limitsof two clays, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 32, 107-115.

www.SID.ir

Archive of SID

Ayininuola, G.M., Agbede O.A. and Franklin, S. O. (2009). Influence of calcium sulphate on subsoil cohesion and angle of friction. *Journal of Applied Sciences Research*, 5(3), 297-304.

Das, B.M. (2008). Advanced soil mechanics, Third edition, Taylor & Francis.

Di Maio, C. (1996). Exposure of bentonite of salt osmotic and mechanical effects. *Geotecnique 4b*, 46(4), 695-707.

Emami Azadi, M.R. (2008). The effects of Urmieh Lake salt water on the proctor compaction and CBR test results of well graded gravel-sand mixed with clay (GSCW) soil samples. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1-15.

Kenny, T.C. (1967). The influence of mineral composition of the residual strength of natural sails. *In Proceedings of the Geotechical Conf*, 22 May, Oslo, pp. 123-129.

Khamehchiyan, M. Rahimi, E. Lashkaripour, G.R. and Solouki, H. R. (2005). Investigating the causes of soil erosion in Sistan plain from the viewpoint of engineering geologist with a particular attitude towards divergence phenomenon. *Journal of Science (University of Tehran)*, 31(1), 253-268 (In Farsi).

Kirov,B.L. and Truc, N.N. (2012). A study on the relationship between geotechnical properties and clay mineral composition of Hanoi soft soils in saline media. *International Journal of Civil Engineering*, 10(2), 87-92.

Mahasneh, B.Z. (2004). Dead Sea water as a soil improvement agent. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 9, 1-14.

Mansour, Z.M., Taha, M.R. and Chik, Z. (2008). Fresh-Brine water effect on the basic engineering properties of Lisan Marl-Dead Sea- Jordan. *Journal of Applied Sciences*, 8(20), 3603-3611.

Mansouri, H., Jorkesh, Z., Ajalloeian, R. and Sadeghpour, A.H. (2016). Investigating effects of water salinity on geotechnical properties of fine-grained soil and quartz in a sandstone case study: Ajichay project in northwest Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(3), 1117.1128.

Mansouri, H., Ajalloeian, R. and Sadeghpour, A. (2012). The effect of water on consolidation parameter of fine-grained soils, case study: Korchay Dam. *16th Symposium of Geological Society of Iran*, 4-6 Sep., Shiraz, Iran, pp. 98-105 (In Farsi).

Messad, A. and Moussai, B. (2016) Effect of water salinity on Atterberg limits of El-Hodna sabkha soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1), 301–309.

Muhammad, N. (2004). Hydraulic, diffusion, and retention characteristics of inorganic chemicals in bentonite. Ph.D. dissertation, University of South Florida, Florida.

Naeini, S.A. and Jahanfar, M.A. (2011). Effect of salt solution and plasticity index on undrain shear strength of clays. *World Academy of Science Engineering and Technology*, 5(1), 92-96.

Ouhadi, V.R. and Goodarzi, A.R. (2009). Assessment of the stability of a dispersive soil treated by Alum. *Engineering Geology*, 85(1-2), 91-101.

Ören, A.H. and Kaya, A., 2003. Some engineering aspects of homoionized mixed clay minerals. *Environmental Monitoring and Assessment*, 84, 85–98.

Shariatmadari, N., Salami, M. and Karimpour Fard, M. (2011). Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers. *International Journal of Civil Engineering*, 9(2), 103-110.

Shukla, R.P., Tiwari, R.P. and Agrawal, B.K. (2014) Stabilization of black cotton soil using sea salt. *In International Symposium Geohazards: Science, Engineering and Management*, 20–21 Nov., Kathmandu, Nepal, pp. 493–501.

Siddiqua, S., Blatz, J.A. and Greg, S. (2011). Investigation of the mechanical behaviour of light and dense backfill material subjected to various pore fluid conditions, *Geotechnical Conference*, 12 Oct., Toronto, Ontario, pp. 235-42.

Sridharan, A., 1991. Engineering behavior of fine-grained soils: a fundamental approach. *Indian Geotechnical Journal*, 21, 1–136.

Sridharan, A., El-Shafei, A., Miura, N., 2002. Mechanisms controlling the undrained strength behavior of remolded Ariake marine clays. Marine *Georesources and Geotechnology*, 20, 21–50.

Yilmaz, I. (2006). Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering Geology*, 85(3-4), 295-301.

Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A. and Oren, A.H. (2008). Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. *Engineering Geology*, 102(1-2), 54-61.

www.SID.ir