

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر رفتار هیستریسیس هیدرولیکی بر ظرفیت باربری کالیفرنیا یک مخلوط ماسه رسی تراکم پذیر غیراشباع

مقداد نگهبان^۱، علی میرزایی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کاشان

ali.mirzaii@kashanu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۰/۲۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۸/۷]

چکیده- در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای نسبت تخلخل اولیه، درصد رطوبت، مکش بافتی، درجه اشباع و هیستریسیس هیدرولیکی روی ظرفیت باربری کالیفرنیا یک مصالح روسازی پرداخته شده است. برای این منظور، مقدار سی بی آر یک خاک مخلوط ماسه رسی در بازه‌ای از مقادیر نسبت تخلخل اولیه روی بازه‌های تر و خشک شدگی منحنی مشخصه آب-خاک اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌های ترشدگی سی بی آر روی نمونه‌های خاک متراکم و تر شده در بازه‌ای از مقادیر نسبت تخلخل و درصد رطوبت اولیه انجام پذیرفت. نمونه‌های خاک استفاده شده در آزمایش‌های خشک شدگی نیز ابتدا مطابق با روند و پارامترهای نمونه‌های استفاده شده در آزمایش‌های ترشدگی ساخته شده و بعد از خشک نمودن یکنواخت آن‌ها با استفاده از تکنیک هوادهی مقادیر سی بی آر آنها اندازه‌گیری شده است. بر پایه نتایج آزمایشگاهی، ظرفیت باربری کالیفرنیا خاک مورد مطالعه با افزایش مقادیر تراکم اولیه و مکش بافتی خاک افزایش یافته است. لیکن نتایج آزمایشگاهی حاکی از کاهش مقدار سی بی آر خاک مفروض با افزایش درجه اشباع خاک است. با عنایت به مشاهده آزمایشگاهی در یک مکش بافتی مفروض، ظرفیت باربری خاک مطالعه شده دارای مقادیر کمتری روی بازه‌های خشک شدگی نسبت به بازه‌های ترشدگی بوده است. این روند هیسترتیک مشاهده شده در تغییرات سی بی آر، با توجه به رفتار هیستریسیس هیدرولیکی منحنی مشخصه آب-خاک بیان شده است.

واژگان کلیدی: خاک‌های غیراشباع، مخلوط ماسه رس دار، سی بی آر، هیستریسیس هیدرولیکی، منحنی مشخصه آب-خاک

۱- مقدمه

بیشتر روسازی راه‌ها روی خاک‌های متراکم و غیراشباع ساخته شده و در نتیجه عملکرد مکانیکی لایه‌های مختلف روسازی راه‌ها تابعی از اصول و روابط حاکم رفتار خاک‌های غیر اشباع است. اگرچه در عمده روش‌های طرح روسازی فرض بر اشباع کامل لایه‌های مختلف روسازی شده و تاثیر پارامترهایی همچون درجه اشباع، مکش بافتی و یا رفتار متفاوت خاک در بازه‌های تر و خشک شدگی (هیستریسیس هیدرولیکی) در نظر گرفته نشده است.

یکی از پارامترهای ساده و پرکاربرد در طرح روسازی راه‌ها نسبت ظرفیت باربری کالیفرنیا (سی بی آر) بوده که مقدار آن تابعی از وضعیت اشباع خاک است. مطالعات گسترده پژوهشگران روی سی بی آر خاک‌های اشباع منجر به تدوین دستورالعمل‌های لازم همچون استاندارد ASTM-D1883-07 [۱] و یا استاندارد AASHTO T193-99 [۲] برای تعیین ظرفیت باربری خاک‌های اشباع شده است. بسیاری از پژوهش‌های انجام شده تاکنون روی تغییرات سی بی آر در خاک‌های غیراشباع عمدتاً محدود به مطالعه تاثیر

سی بی آر آن‌ها در بازه‌ای از مقادیر مختلف درجه اشباع و مکش بافتی روی مسیرهای تر و خشک‌شدگی اندازه‌گیری شده است. روند انجام آزمایش‌های گفته شده و نتایج به دست آمده در ادامه شرح داده شده‌اند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خصوصیات خاک

آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش روی مصالح خاکی مورد مطالعه به وسیله‌ی میرزایی و یثربی (۲۰۱۲) [۱۲] انجام پذیرفت که شامل یک خاک ترکیبی از ۶۰ درصد ماسه و ۴۰ درصد کائولینیت بوده است.

آزمایش‌های شناسایی و تراکم دوباره روی خاک یاد شده انجام گرفت که خاکی از نتایج مطابق با نتایج مشاهده شده در میرزایی و یثربی (۲۰۱۲) بوده است. در جدول (۱) نتایج آزمایش‌های شناسایی خاک آورده شده است. در شکل (۱) نیز نمودار دانه بندی خاک یاد شده نشان داده شده است.

میرزایی و یثربی (۲۰۱۲) منحنی مشخصه خاک یاد شده را برای بازه‌ای گسترده از وضعیت تراکم خاک اندازه‌گیری کرده که نتایج یاد شده در جدول (۲) جمع بندی شده و در این پژوهش استفاده شده است. بر پایه نتایج مندرج در جدول (۲)، منحنی مشخصه آب- خاک بازه‌های ترشدگی در شکل (۲) برای مقادیر مختلف نسبت تخلخل اولیه ترسیم شده است.

جدول (۱) مشخصات خاک مطالعه شده

SC	نوع خاک (طبقه بندی متحد)
۲۳/۵	حد روانی %
۹/۵	نشانه خمیری %
۲/۶۶	چگالی دانه‌ها (G_s)
۹/۵۸	درصد رطوبت بهینه %
۱۹/۷۱	وزن مخصوص بیشینه (kN/m^3) [*]

* به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد

پارامترهایی همچون درصد رطوبت و میزان تراکم خاک همچون مطالعات گذشته دیویس^۱ (۱۹۴۶) [۳] و بلک^۲ (۱۹۶۲) [۴] و مطالعات اخیر سانچز^۳ (۲۰۰۲) [۵] و تالوکدار^۴ (۲۰۱۴) [۶] بوده است. نتایج این پژوهشگران حاکی از افزایش مقدار سی بی آر خاک با افزایش میزان تراکم خاک و یا کاهش درصد رطوبت خاک است

همچنین تلاش‌هایی برای بررسی ظرفیت باربری کالیفرنیا خاک‌ها با توجه به سایر متغیرهای اصلی حاکم بر رفتار خاک‌های غیر اشباع همچون مکش بافتی و یا درجه اشباع نیز انجام شده که به عنوان نمونه می‌توان به پژوهش‌های انجام شده به وسیله‌ی پیرا^۵ (۱۹۸۷) [۷]، سیواکومر و تان^۶ (۲۰۰۲) [۸]، گریگ و همکاران^۷ (۲۰۰۳) [۹]، آمپادو^۸ (۲۰۰۷) [۱۰] و پروانا و همکاران^۹ (۲۰۱۲) [۱۱] اشاره کرد که تمامی نتایج حاصل بیانگر افزایش مقدار ظرفیت باربری کالیفرنیا با افزایش مکش بافتی و یا کاهش درجه اشباع خاک است. با عنایت به حجم محدود مطالعات اشاره شده، نیاز به داده‌های آزمایشگاهی بیشتر روی تغییرات سی بی آر خاک‌های غیر اشباع است.

بسیاری از روسازی‌های راه در طول عمر خود به واسطه عوامل مختلف تحت اثر بازه‌های مختلف تر و خشک‌شدگی واقع می‌شوند. لیکن، تاثیر رفتار هیسترسیس هیدرولیکی در بازه‌های تر و خشک شدگی روی تغییرات ظرفیت باربری کالیفرنیا تا کنون مطالعه نشده است.

با عنایت به موارد اشاره شده، در این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای مکش بافتی، درجه اشباع، نسبت تخلخل اولیه و به ویژه رفتار هیسترسیس هیدرولیکی روی مقدار ظرفیت باربری یک خاک مخلوط ماسه-کائولینیت پرداخته شده است. برای این امر نمونه‌های خاک در بازه‌ای از نسبت تخلخل‌های اولیه مفروض متراکم شده و در ادامه مقدار

1 Davis

2 Black

3 Sanchez

4 Talukdar

5 Paraire

6 Sivakumar & Tan

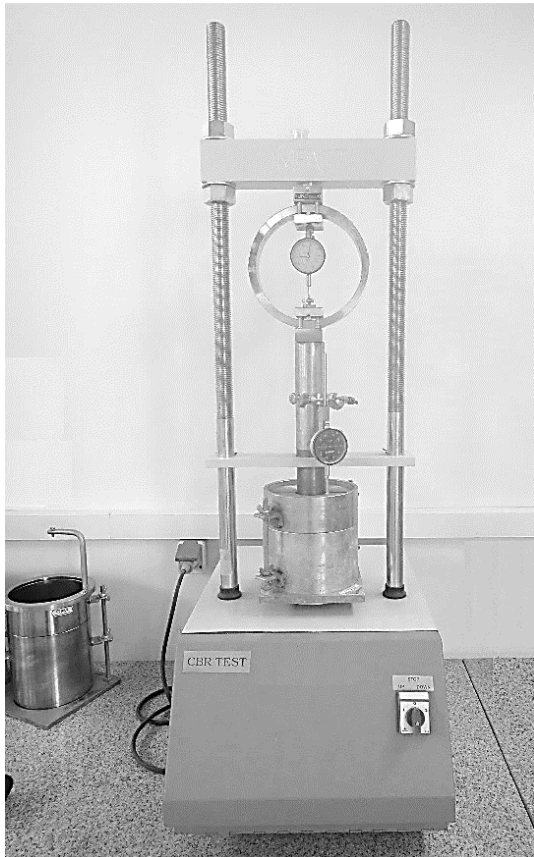
7 Vogrig et al.

8 Ampadu

9 Purwana et al.

۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی

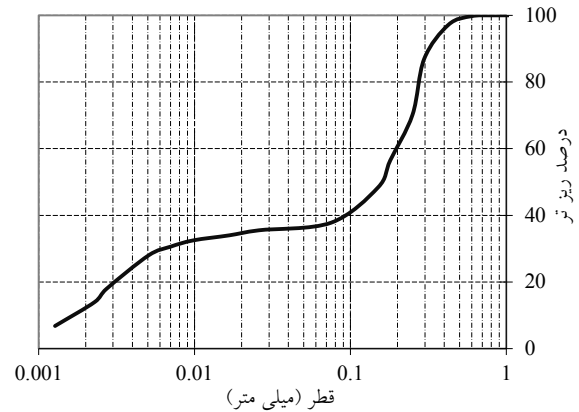
آزمایش‌های ظرفیت باربری کالیفرنیا انجام شده در این پژوهش با استفاده از دستگاه سی بی آر ساخت شرکت ایمپکت^۱ انگلستان نشان داده شده در شکل (۳) انجام پذیرفت.



شکل (۳) دستگاه سی بی آر مورد استفاده در این مطالعه

ظرفیت بارگذاری محوری این دستگاه ۳۰ کیلونیوتن و با سرعت نفوذ پیستون ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه (مطابق استاندارد ASTM D1883-07) بوده است. قالب‌های استفاده شده برای تعیین ظرفیت باربری کالیفرنیا خاک شامل قالب‌های آزمایش تراکم استاندارد اصلاح شده ASTM D 698-12 [۱۳] و قالب‌های آزمایش تعیین سی بی آر ASTM D 1883-07 [۱] بوده است.

هر دو نوع قالب یاد شده برای تراکم نمونه‌های خاک با ابعاد یکسان به قطر ۶ اینچ (۱۵/۲۴ سانتی‌متر) و ارتفاع ۴/۵۸۴ اینچ (۱۱/۶۴۳ سانتی‌متر) استفاده شده‌اند. برای به دست آوردن

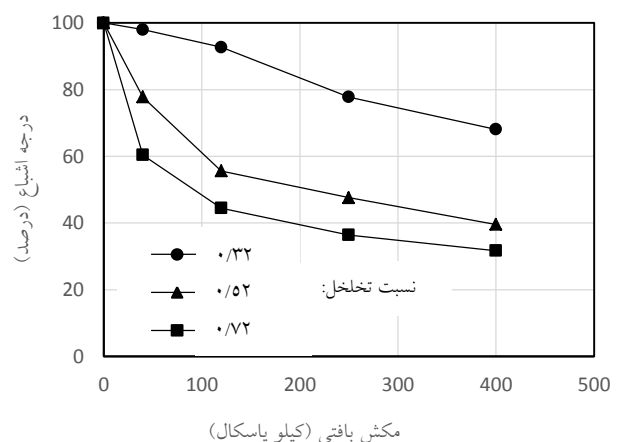


شکل (۱) نمودار دانه‌بندی خاک مطالعه شده

جدول (۲) مقادیر اندازه‌گیری شده مکش بافتی و درجه اشباع در نسبت

تخلخل‌های مختلف توسط میرزایی و یثربی (۲۰۱۲)

درجه اشباع ترشدگی	مکش بافتی	نسبت تخلخل
۹۸	۴۰	۰/۳۲
۹۲/۷	۱۲۰	
۷۷/۸	۲۵۰	
۶۸/۱	۴۰۰	
۷۷/۸	۴۰	۰/۵۲
۵۵/۶	۱۲۰	
۴۷/۶	۲۵۰	
۳۹/۶	۴۰۰	
۶۰/۴	۴۰	۰/۷۲
۴۴/۵	۱۲۰	
۳۶/۴	۲۵۰	
۳۱/۷	۴۰۰	



شکل (۲) منحنی مشخصه آب-خاک بازه‌های ترشدگی خاک مطالعه شده

بارگذاری شود. در حین فرایند تراکم نمونه‌ها، مقدار درجه اشباع خاک با اعمال انرژی تراکم متناوباً تا رسیدن به مقدار مفروض افزایش یافته و باعث شده تا نمونه‌های خاک حاصل روی بازه ترشدگی واقع شود (میرزایی و یثربی، ۲۰۱۲). درانتها، نمونه‌های ساخته شده به شکل مطلوبی در زیر دستگاه بارگذاری تعبیه شده و مقدار سی بی آر نمونه‌های ترشدگی با سرعت نفوذ پیستون ۱/۲ میلی‌متر بر دقیقه مطابق با استاندارد ASTM D1883-07 اندازه‌گیری شده است.

نمونه‌های خاک استفاده شده در آزمایش‌های سی بی آر خشک‌شدگی نیز شامل ۱۲ نمونه بوده که عیناً با مقادیر درجه اشباع و نسبت تخلخل اولیه آزمایش‌های ترشدگی (مندرج در جدول ۲) و نیز مطابق با روند بازسازی نمونه‌های ترشدگی متراکم شدند. در ادامه نمونه‌های متراکم شده به مدت ۷ روز هوادهی و خشک شده‌اند. این امر باعث کاهش مقادیر درجه اشباع نمونه‌ها و واقع شدن آنها روی مسیر خشک‌شدگی شده است. برای حفظ یکنواختی توزیع درصد رطوبت نمونه‌ها در حین فرایند هوادهی، سطح بالای نمونه با تعبیه یک صفحه فلزی متخلخل روی آن کاملاً پوشانده شده و نیز ۴/۵ کیلوگرم وزنه سربار روی آن تعبیه شده‌اند (مطابق شکل ۴). همچنین با قرار دادن قالب نمونه روی دو تکیه‌گاه، امکان خشک شدن نمونه خاک از طریق روزنه‌های موجود در کف پایینی قالب نیز فراهم شده است. بعد از اتمام فرایند خشک‌شدگی، میزان تبخیر آب از نمونه‌ها (در حدود ۴۲، ۲۸ و ۳۵ گرم به ترتیب در نمونه‌های با نسبت تخلخل ۰/۳۲، ۰/۵۲ و ۰/۷۲) و کاهش ارتفاع نمونه‌ها به واسطه خشک‌شدگی (در حدود ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۷ میلی‌متر به ترتیب در نمونه‌های با نسبت تخلخل اولیه ۰/۳۲، ۰/۵۲ و ۰/۷۲) اندازه‌گیری شده است. مشاهده می‌شود که نمونه‌های با نسبت تخلخل اولیه ۰/۳۲ و ۰/۵۲ به ترتیب بیشترین و کمترین میزان تبخیر آب را داشته و این امر بیانگر این مسئله بوده که میزان تبخیر آب از نمونه‌ها تنها تابعی از نسبت تخلخل نمونه‌ها نبوده و بیشتر تابعی از شرایط محیطی و به ویژه دما بوده است. در انتها، ظرفیت باربری کالیفرنیا نمونه‌ها مطابق روند استفاده شده در آزمایش‌های ترشدگی اندازه‌گیری شده است.

مقدار سی بی آر روی بازه‌های ترشدگی با توجه به عدم نیاز به اشباع نمودن نمونه از قالب‌های آزمایش تراکم استاندارد اصلاح شده استفاده شد. در آزمایش‌های تعیین سی بی آر خشک‌شدگی، برای هوادهی و خشک نمودن یکنواخت نمونه‌ها از قالب‌های آزمایش سی بی آر که دارای سوراخ‌هایی در کف بود استفاده شده است.

۲-۳- بازسازی نمونه

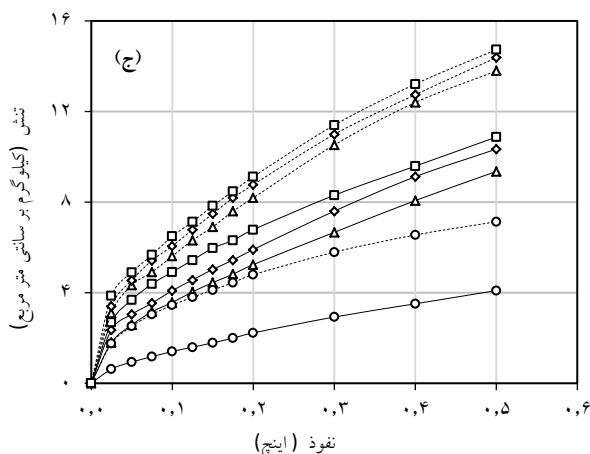
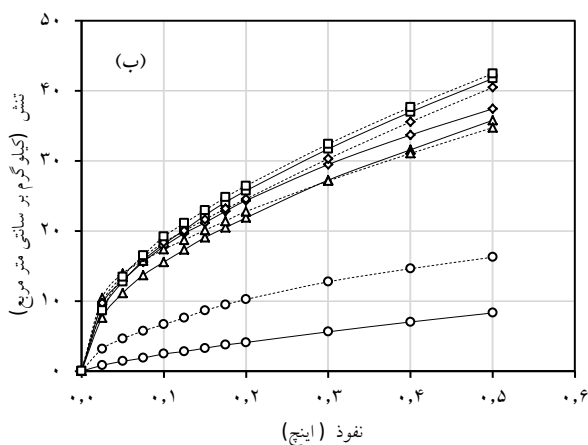
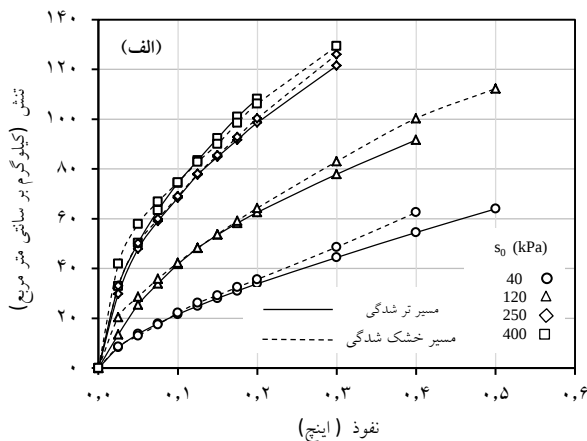
نمونه‌های خاک استفاده شده در این پژوهش در بازه‌ای از مقادیر مختلف درجه اشباع و نسبت تخلخل اولیه با استفاده از روش تراکم دینامیکی ساخته شده‌اند.

آزمایش‌های تعیین سی بی آر ترشدگی روی ۱۲ نمونه متراکم شده مطابق با مقادیر درجه اشباع و نسبت تخلخل اولیه مندرج در جدول (۲) انجام پذیرفت. برای این امر، ابتدا درصد رطوبت لازم به مخلوط کاملاً خشک ماسه-کائولینیت اضافه شده و سپس با استفاده از دستگاه هم زن مخلوط شده است. در ادامه خاک مرطوب شده را از الک شماره ۸ عبور داده تا کلوخه‌های تشکیل شده به واسطه جذب آب کاهش یافته و خاک همگن‌تر شود. در پایان خاک مرطوب حاصل به مدت ۲۴ ساعت درون یک کیسه پلاستیکی عایق نگهداری شده است.

نمونه‌های خاک استفاده شده در آزمایش‌های ترشدگی به صورت دینامیکی و در سه لایه با ضخامت یکسان متراکم شده‌اند. برای نیل به این امر، با توجه به نسبت تخلخل و درصد رطوبت مفروض نمونه خاک، مقدار وزن خاک مورد نیاز برای هر لایه داخل قالب ریخته شده و سپس با استفاده از چکش ۲/۵ کیلوگرمی آزمایش تراکم استاندارد (ASTM D698-12) آزمایش تراکم استاندارد تا رسیدن به ارتفاع مفروض کوبیده شده است. سپس میزان ارتفاع هر لایه با استفاده از ابزار کولیس کنترل شده و خراش‌هایی در سطح تداخل لایه‌ها برای یکنواختی و اتصال بهتر لایه‌ها ایجاد شده است. این روند برای تراکم دو لایه دیگر نمونه خاک نیز تکرار شده است. بعد از تراکم لایه آخر، سطح نمونه صاف شده است. در پایان تراکم، به دلیل مسطح بودن بهتر سطح پایینی نمونه در کف قالب، قالب باز و برعکس شده تا سطح متراکم شده زیرین نمونه

میرزایی و یثربی (۲۰۱۲) به ترتیب برابر ۰/۲۸، ۰/۲۴۵- و ۰/۲۶۱- در نظر گرفته شده است. مقدار عدد هوای ورودی نیز با استفاده از رابطه پیشنهادی میرزایی و یثربی (۲۰۱۲) برای خاک مورد استفاده در این پژوهش به صورت تابعی از نسبت تخلخل

$$S_{ae} = 5.996 \times e_0^{-2.614} \quad (۲)$$



شکل (۵) منحنی های تنش - نفوذ برای نمونه های با نسبت تخلخل

(الف) ۰/۳۲، (ب) ۰/۵۲، (ج) ۰/۷۲



شکل (۴) هوا دهی و خشک کردن نمونه ها

۳- نتایج

نتایج آزمایش های تعیین ظرفیت باربری کالیفرنیا روی بازه های تر و خشک شدگی به ترتیب در جداول (۳) و (۴) گفته شده است. همچنین منحنی های تنش نفوذ در شکل (۵) مشاهده می شود. مقادیر درصد رطوبت مندرج در این جداول برابر میانگین مقادیر اندازه گیری شده درصد رطوبت در بالا، پایین و وسط نمونه ها بعد از اتمام مرحله بارگذاری بوده است. این مقادیر در جدول (۵) گفته شده است.

مقادیر درجه اشباع نمونه های خشک شده مندرج در جدول (۴) با توجه به میزان کاهش درصد رطوبت و کاهش حجم آن ها محاسبه شده اند. مقادیر مکش بافتی نمونه های خشک شده مندرج در جدول (۴) نیز با استفاده از رابطه پیشنهادی میرزایی و یثربی (۲۰۱۲) با توجه به درجه اشباع خاک خشک شده، عدد ورودی هوای خاک و شیب منحنی خشک شدگی مشخصه آب- خاک محاسبه شده اند:

$$S_r = \left(\frac{s}{s_{ae}} \right)^{\lambda_d} \quad (۱)$$

که در آن S_r درجه اشباع، s مکش بافتی، s_{ae} عدد ورودی هوا (مکش ورود هوا) و λ_d شیب منحنی خشک شدگی است.

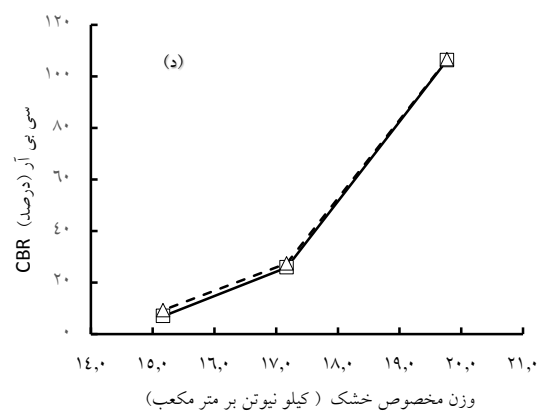
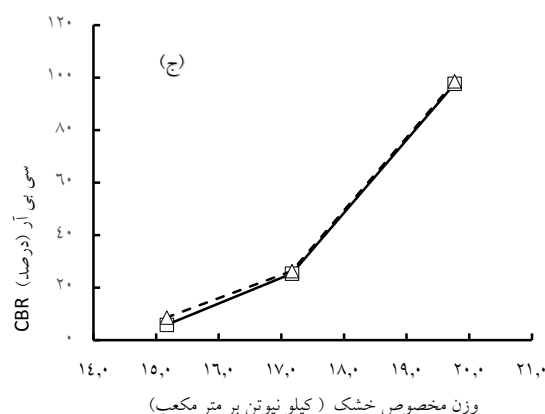
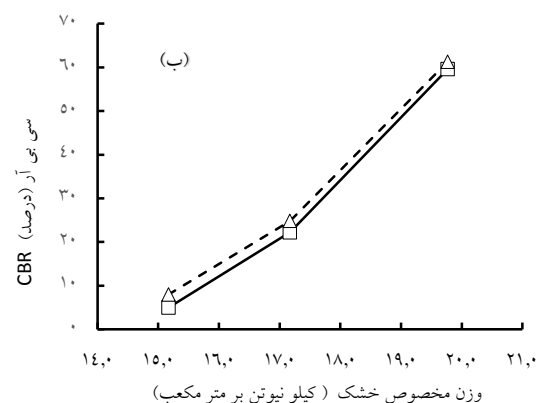
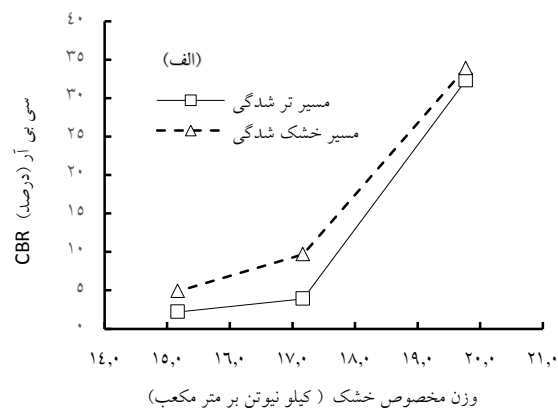
مقدار λ_d برای نسبت تخلخل های ۰/۳۲، ۰/۵۲ و ۰/۷۲ استفاده شده در این پژوهش با توجه به نتایج آزمایشگاهی

جدول (۳) مقادیر سی بی آر بر روی بازه ترشدگی

نسبت تخلخل، e_0	وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	درصد رطوبت (%)	مکش بافتی، S (کیلو پاسکال)	درجه اشباع، S_r (%)	سی بی آر ترشدگی (%)
۰/۳۲	۱۹/۷۷	۱۱/۷۸	۴۰	۹۸	۳۲/۳
		۱۱/۱۵	۱۲۰	۹۲/۷	۵۹/۶
		۹/۳۶	۲۵۰	۷۷/۸	۹۷/۷
		۸/۱۹	۴۰۰	۶۸/۱	۱۰۶/۳
۰/۵۲	۱۷/۱۷	۱۵/۲۱	۴۰	۷۷/۸	۳/۹
		۱۰/۸۷	۱۲۰	۵۵/۶	۲۲/۲
		۹/۳۰	۲۵۰	۴۷/۶	۲۵/۳
		۷/۷۴	۴۰۰	۳۹/۶	۲۵/۹
۰/۷۲	۱۵/۱۷	۱۶/۳۵	۴۰	۶۰/۴	۲/۲
		۱۲/۰۵	۱۲۰	۴۴/۵	۵/۱
		۹/۸۵	۲۵۰	۳۶/۴	۵/۸
		۸/۵۸	۴۰۰	۳۱/۷	۷/۰۲

۳-۱ - تاثیر تراکم اولیه

با توجه به نتایج آزمایشگاهی، تغییرات ظرفیت باربری کالیفرنیا در برابر وزن مخصوص خشک اولیه نمونه‌ها در شکل (۶) ترسیم شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش میزان تراکم اولیه نمونه‌ها روی هر دو مسیر تر و خشک شدگی مقدار سی بی آر افزایش یافته است. این روند مشابه روند مشاهده شده در مطالعات پژوهشگران گذشته همچون سانچز (۲۰۰۲) روی خاک‌های اشباع و دیویس (۱۹۴۶) و آمپادو (۲۰۰۷) روی خاک‌های غیر اشباع است. همچنین مطابق شکل (۶) روند افزایشی ظرفیت باربری در نمونه‌های با مکش بافتی بالاتر، بیشتر مشهود بوده است. با دقت بیشتر در شکل (۶) مشاهده می‌شود که در یک وزن مخصوص خشک اولیه مفروض، سی بی آر نمونه‌ها روی مسیر خشک شدگی به میزان اندکی



شکل (۶) تاثیر تراکم اولیه بر روی سی بی آر در نمونه‌های با مکش بافتی

اولیه الف) ۴۰، ب) ۱۲۰، ج) ۲۵۰ و د) ۴۰۰ کیلو پاسکال

روند مشاهده شده در مطالعات دیویس (۱۹۴۶)، سیواکومار و تان (۲۰۰۲)، سانچز (۲۰۰۲)، آمپادو (۲۰۰۷)، پروانا و همکاران (۲۰۱۲)، زیرانگ و جانمینگ^۱ (۲۰۱۴) [۱۴] می باشد. ولی در پژوهش های گفته شده عمدتاً تاثیر درصد رطوبت روی سی بی آر خاک تنها برای یک نسبت تخلخل اولیه بررسی شده است.

بیشتر از مسیرتر شدگی بوده و باعث شده تا منحنی های تر و خشک شدگی روی یکدیگر واقع نشوند. این رفتار هیسترتیک در نمونه های با مقادیر مکش های بافتی کمتر بیشتر مشهود است.

جدول (۴) مقادیر سی بی آر بر روی بازه خشک شدگی

نسبت تخلخل، e_0	وزن مخصوص خشک (kN/m^3)	درصد رطوبت (%)	مکش بافتی، S^* (کیلو پاسکال)	درجه اشباع، S_r^* (%)	سی بی آر خشک شدگی (%)
۰/۳۲	۱۹/۷۷	۹/۴۸	۲۴۲/۶	۸۱/۴	۳۳/۹
		۹/۰۳	۲۸۸/۳	۷۷/۵	۶۱/۳
		۷/۲۴	۶۲۳/۶	۶۲/۲	۹۸/۶
		۶/۲۷	۱۰۳۷/۶	۵۳/۸	۱۰۶/۶
۰/۵۲	۱۷/۱۷	۱۳/۶۴	۱۲۶/۶	۷۲	۹/۷
		۹/۵۱	۵۵۱/۹	۵۰/۲	۲۴/۸
		۸/۶۵	۸۰۹/۷	۴۵/۷	۲۶/۳
		۷/۴۴	۱۴۹۸/۹	۳۹/۳	۲۷/۴
۰/۷۲	۱۵/۱۷	۱۴/۱۶	۱۴۷/۹	۵۴/۲	۴/۹
		۹/۹۵	۵۷۰/۷	۳۸/۱	۸
		۸/۱۲	۱۲۴۲/۳	۳۱/۱	۸/۶
		۶/۸۴	۲۳۹۶/۲	۲۶/۲	۹/۲۷

* در انتهای فرایند خشک شدگی

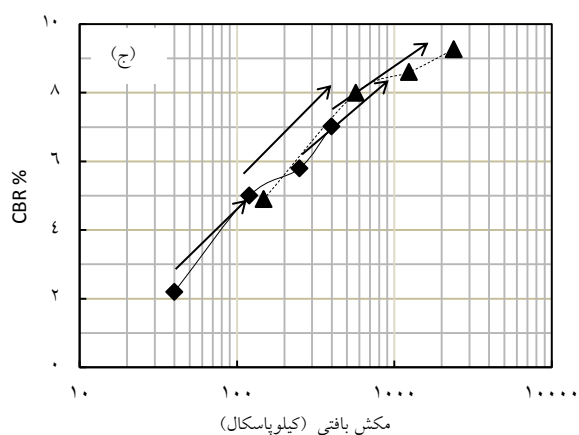
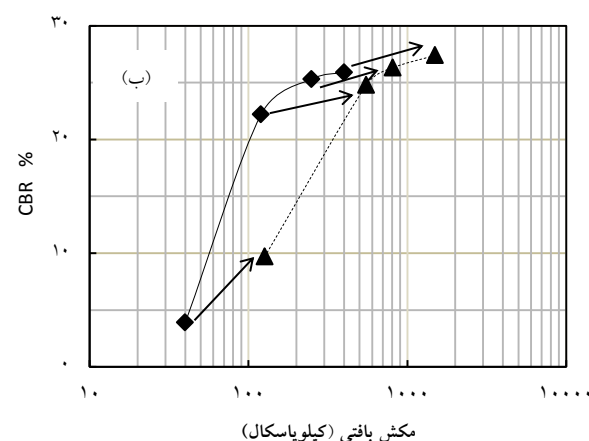
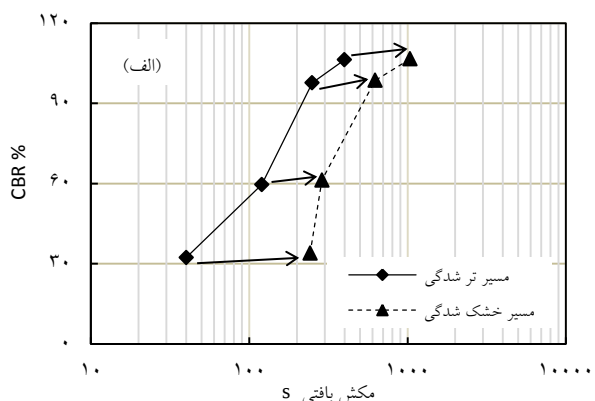
جدول (۵) مقادیر درصد رطوبت در نمونه ها بعد از خشک شدگی

نسبت تخلخل	مکش بافتی اولیه (کیلو پاسکال)	مکش بافتی خشک شدگی (کیلو پاسکال)	درصد رطوبت			درصد رطوبت میانگین
			بالای نمونه	وسط نمونه	پایین نمونه	
۰/۳۲	۴۰	۲۴۲/۶	۹/۴۳	۹/۴۸	۹/۷۹	۹/۵۷
	۱۲۰	۲۸۸/۳	۹/۳۱	۹/۳۵	۹/۳۰	۹/۳۲
	۲۵۰	۶۲۳/۶	۷/۴۳	۷/۵۶	۷/۴۷	۷/۴۹
	۴۰۰	۱۰۳۷/۶	۶/۴۶	۶/۶۱	۶/۴۶	۶/۴۹
۰/۵۲	۴۰	۱۲۶/۶	۱۴/۲۰	۱۳/۷۲	۱۴/۳۳	۱۴/۰۸
	۱۲۰	۵۵۱/۹	۹/۷۸	۹/۷۵	۹/۹۱	۹/۸۱
	۲۵۰	۸۰۹/۷	۸/۸۷	۸/۹۰	۹/۰۴	۸/۹۴
	۴۰۰	۱۴۹۸/۹	۷/۷۷	۶/۶۲	۷/۷۰	۷/۷۰
۰/۷۲	۴۰	۱۴۷/۹	۱۴/۲۰	۱۵/۰۶	۱۴/۷۵	۱۴/۶۷
	۱۲۰	۵۷۰/۷	۱۰/۵۰	۱۰/۱۹	۱۰/۲۷	۱۰/۳۲
	۲۵۰	۱۲۴۲/۳	۸/۳۹	۸/۵۰	۸/۴۲	۸/۴۴
	۴۰۰	۲۳۹۶/۲	۶/۸۶	۷/۳۴	۷/۱۰	۷/۱۰

مطابق نتایج مندرج در شکل (۷) مشاهده می شود که در یک نسبت تخلخل اولیه ثابت، نمونه های روی منحنی خشک شدگی در درصد رطوبت کمتری به مقدار سی بی آر بیشتری خواهند رسید. در واقع این مسئله باعث شده تا نمودار تغییرات سی بی آر در برابر درصد رطوبت در

۳-۳- تاثیر درصد رطوبت

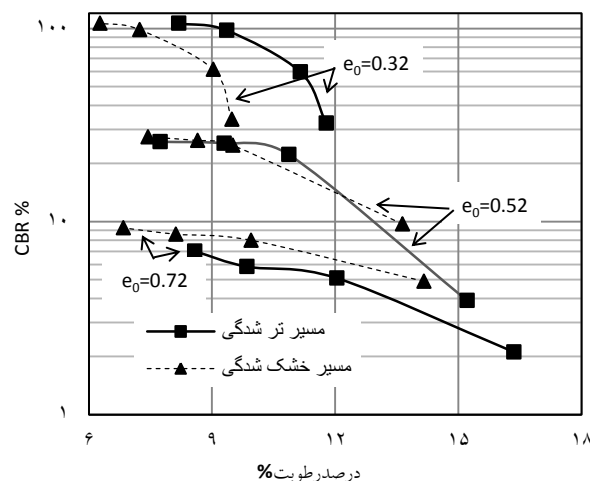
در شکل (۷) تغییرات ظرفیت باربری نمونه ها در برابر تغییرات درصد رطوبت در مسیرهای تر و خشک شدگی ترسیم شده است. مطابق این شکل مشاهده می شود که به واسطه کاهش درصد رطوبت نمونه ها، مقدار سی بی آر روی هر دو منحنی تر و خشک شدگی افزایش یافته است. این نرخ افزایشی در نمونه های متراکم شده در بیشترین وزن مخصوص خشک مشهودتر بوده است. این روند مشابه با



شکل ۸- تاثیر مکش بافتی روی سی بی آر در مسیرهای تر و خشک شدگی
برای نمونه‌های با نسبت تخلخل اولیه: الف) ۰/۳۲، ب) ۰/۵۲، ج) ۰/۷۲

در شکل (۹) تغییرات ظرفیت باربری نمونه‌ها در برابر تغییرات درجه اشباع برای مسیرهای تر و خشک شدگی ترسیم شده است. مطابق نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که در تمامی مقادیر تراکم، افزایش درجه اشباع نمونه‌ها باعث کاهش مقدار سی بی آر خاک در امتداد هر دو مسیر تر و خشک شدگی شده است. روند گفته شده مطابق

مسیرهای تر و خشک شدگی روی یکدیگر واقع نشود. این رفتار هیسترتیک در نمونه‌های با کمترین نسبت تخلخل اولیه مشهود است.

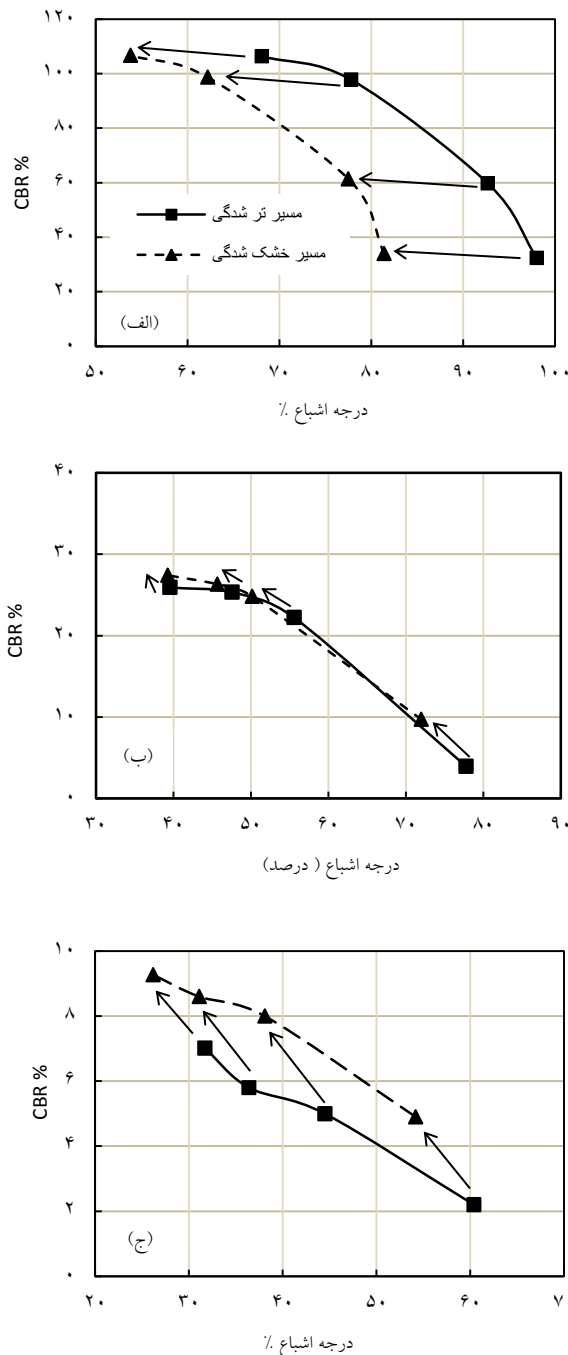


شکل (۷) تاثیر درصد رطوبت بر روی سی بی آر

۳-۴- تاثیر همبسته مکش بافتی و درجه اشباع

در شکل (۸) نمودار تغییرات مکش بافتی در برابر تغییرات ظرفیت باربری کالیفرنیا برای مقادیر مختلف نسبت تخلخل اولیه در مسیرهای تر و خشک شدگی ترسیم شده است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش مکش بافتی مقدار سی بی آر بر روی هر دو بازه تر و خشک شدگی افزایش یافته است. این روند افزایشی مشابه روند مشاهده شده در مطالعات پیرا (۱۹۸۷) و آمپادو (۲۰۰۷) در امتداد مسیرهای تر شدگی است.

مطابق نتایج مندرج در شکل (۸) مشاهده می‌شود که فرایند خشک شدگی نمونه‌ها باعث افزایش مقدار مکش بافتی آنها و به تبع آن مقدار ظرفیت باربری نمونه‌ها شده است. این امر باعث شده تا نمودارهای ظرفیت باربری مسیرهای تر و خشک شدگی روی یکدیگر واقع نشده و نمودار سی بی آر نمونه‌های مسیر خشک شدگی در سمت راست و اندکی بالاتر از نمودار مسیر تر شدگی واقع شود. این رفتار هیسترتیک در نمونه‌های متراکم شده در بیشترین وزن مخصوص (شکل ۸-الف) بیشتر مشهود است.



شکل ۹- تاثیر درجه اشباع بر روی سی بی آر در مسیرهای تر و خشک شدگی برای نمونه های با نسبت تخلخل اولیه: الف) ۰/۳۲، ب) ۰/۵۲، ج) ۰/۷۲

با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در این پژوهش مندرج در شکل (۹)، مشاهده شد که برای یک نمونه خاک مفروض، افزایش درجه اشباع باعث کاهش مقدار سی بی آر خاک می شود. با توجه به رفتار هیسترتیک منحنی مشخصه

با روند مشاهده شده در نتایج مطالعات گریگ و همکاران (۲۰۰۳) برای مسیرهای ترشدگی است.

نتایج نشان داده شده در شکل (۹) حاکی از کاهش درجه اشباع نمونه های خاک به واسطه فرایند خشک شدگی بوده است که به تبع آن مقدار ظرفیت باربری نمونه ها افزایش یافته است. این امر باعث شده تا نمودارهای ظرفیت باربری مسیرهای تر و خشک شدگی روی یکدیگر واقع نشده و نمودار سی بی آر نمونه های مسیر خشک شدگی اندکی بالاتر از نمودار مسیر ترشدگی واقع شود. این رفتار هیسترتیک در نمونه های متراکم شده در بیشترین وزن مخصوص (شکل ۹-الف) بیشتر مشهود است.

با دقت بیشتر در شکل های (۸) و (۹) مشاهده می شود که در یک نمونه خاک متراکم شده مفروض، کاهش درجه اشباع خاک باعث افزایش مقدار مکش بافتی و به تبع آن افزایش مقدار ظرفیت باربری نمونه خاک می شود. به طور مشابه در یک نمونه خاک متراکم شده مفروض، افزایش مکش بافتی نمونه باعث کاهش مقدار درجه اشباع و به تبع آن افزایش مقدار سی بی آر خاک شده است.

۳-۵- تاثیر رفتار هیسترسیس هیدرولیکی

مطابق نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در بخش های قبل، مقادیر متفاوت ظرفیت باربری کالیفرنیا در مسیرهای تر و خشک شدگی حاکی از رفتار هیسترتیک مقدار سی بی آر خاک روی بازه های تر و خشک شدگی بوده است. این روند مشابه رفتار هیسترسیس هیدرولیکی منحنی مشخصه آب-خاک است.

مطابق نتایج آزمایشگاهی به دست آمده به وسیله ی میرزایی و یثربی (۲۰۱۲) برای خاک مطالعه شده در این پژوهش، مشاهده شد که برای یک نمونه خاک متراکم شده مفروض، منحنی های مشخصه تر و خشک شدگی آب-خاک روی یکدیگر واقع نشده و به ازای یک مکش بافتی ثابت، درجه اشباع خاک روی منحنی خشک شدگی بیشتر از منحنی ترشدگی بوده است.

۶- مراجع

- [1] American Society for Testing and Materials (ASTM); "Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils (D-1883-07)"; ASTM International, Pennsylvania, 2007
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO); "Standard Method of Test for the California Bearing Ratio (T193-99)"; AASHTO Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Washington, DC, 2003
- [3] Davis, E.H. "The California bearing ratio method for the design of flexible roads and runway. Geotechnique"; 1(4), 1946, 249-263.
- [4] Black, W.P.M. "A method of estimating the California bearing ratio of cohesive soils from plasticity data"; Geotechnique, 12(4), 1962, 271-282.
- [5] Sanchez, F.J. "Interpretation of CBR test results under the shear strength concept of unsaturated soil mechanics"; In: Proc 3rd Int Conf on unsaturated soils (USAT 2002), Recife, 2002, 663-668
- [6] Talukdar D.K. "A Study of Correlation Between California Bearing Ratio (CBR) Value With Other Properties of Soil"; international Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Vol. 4, No. 1, 2014, 59-562.
- [7] Paraire, J. "Suction tests on CBR-diameter specimens. The bearing capacity suction relation"; Transport and Road Research Lab. (TRRL), 1987.
- [8] Sivakumar V, Tan W.C. "CBR, undrained strength and yielding characteristics of compacted tills"; In: d.C. Juca, Marinho (Editor), Unsaturated Soils, proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brazil, 2002, 657-661.
- [9] Vogrig, M. MacDonald, A. Vanapalli, S.K., Siekmeier, J., Roberson, R., and Garven, E. "A laboratory technique for estimating the resilient modulus of unsaturated soil specimens from CBR and unconfined compression tests"; Proceedings of the 56th Canadian Geotechnical Conference, Winnipeg, 2003, 99-106.
- [10] Ampadu S. "A laboratory investigation into the effect of water content on the CBR of a subgrade soil"; In: T. Schanz (Editor), Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Springer Berlin Heidelberg, 2007, 137-144
- [11] Purwana Y.M., Nikraz H., Jitsangiam P. "Experimental Study of Suction-Monitored CBR Test on Sand-Kaolin Clay Mixture"; International Journal of Geomate; Vol. 3, No. 2, 2012, 419-422.
- [12] Mirzaii A., Yasrobi S. "Influence of Initial Dry Density on Soil-Water Characteristics of two Compacted Soils"; Geotechnique Letters 2, 2012, 193-198
- [13] American Society for Testing and Materials (ASTM); "Standard test method for laboratory compaction characteristic of soil using standard effort (12,400 fr-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) (D-698-07)"; ASTM International, Pennsylvania, 2007
- [14] Xirong W., Junming S. "Research on the Impact of Moisture Content on the CBR Value of Shanxi loess"; Advanced Materials Research Vols. Vol. 838-841, 2014, 80-83

آب- خاک، در یک مکش بافتی مفروض مقدار درجه اشباع خاک روی منحنی خشک شدگی بیشتر از منحنی ترشدگی است. در نتیجه انتظار می رود که برای یک نمونه خاک با یک مکش بافتی ثابت، مقدار سی بی آر روی منحنی ترشدگی بیشتر از منحنی خشک شدگی بوده و منحنی تغییرات ظرفیت باربری در برابر مکش بافتی مسیرهای ترشدگی در بالای نمودار مسیر خشک شدگی واقع شود. این روند برای نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در این پژوهش در شکل (۸) مشاهده می شود.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تاثیر تراکم اولیه، مکش بافتی و درجه اشباع روی ظرفیت باربری کالیفرنیا یک خاک ماسه رس دار در مسیرهای تر و خشک شدگی پرداخته شد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده مشاهده شده است که افزایش مقدار تراکم اولیه و مکش بافتی و یا کاهش مقدار درجه اشباع نمونه های خاک باعث افزایش ظرفیت باربری کالیفرنیا در امتداد هر دو مسیرهای تر و خشک شدگی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش های سی بی آر مشخص شد که منحنی تغییرات ظرفیت باربری کالیفرنیا در برابر تراکم اولیه، مکش بافتی و درجه اشباع در امتداد مسیرهای تر و خشک شدگی روی یکدیگر واقع نشده و دارای رفتار هیسترتیک بوده است. با توجه به آن که مقادیر درجه اشباع نمونه ها در مسیرهای خشک شدگی بیشتر از مسیرهای ترشدگی بوده، این امر باعث شده است تا منحنی تغییرات ظرفیت باربری- مکش بافتی مسیرهای ترشدگی در بالای منحنی مفروض مسیر خشک شدگی واقع شود.

۵- تشکر و قدردانی

برنامه مطالعات آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه مکانیک خاک و پی دانشگاه کاشان انجام پذیرفت. نویسندگان از زحمات آقای مهندس بابایی در طول انجام آزمایش ها کمال تشکر و قدردانی را دارند.

Experimental investigation on the influence of hydraulic hysteresis on the California Bearing Ratio of an unsaturated deformable clayey sand

M. Negahban¹ & A. Mirzaii^{2*}

1. M.Sc. in Transportation engineering, Azad Islamic University, Isfahan (Khorasgan) branch, Isfahan, Iran

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

ali.mirzaii@kashanu.ac.ir

Abstract:

Many of the past experimental research on the design of road pavement layers was confined to the behavior of saturated pavements materials. Among the experimental studies to determine the road layers properties, California bearing ratio (CBR) has been one of the most common and applicable parameter for determination of the resistance of roads subgrade in both design and practical purposes. An extensive amount of research exist in the literature that explains the behavior of California bearing ratio of saturated soils. However, any change in the degree of saturation of subgrade materials and in particular different hydraulic response in wetting and drying paths can affect the CBR value of a pavement material. In compare to the extensive previous studies on the California bearing ratio of soils, this phenomenon is rarely concerned in the previous studies. The goal of this laboratory research is to examine the influence of the initial compaction void ratio, moisture content, degree of saturation, matrix suction and hydraulic hysteresis on the California bearing ratio of a pavement material. To this end, California bearing ratio of a sand-kaolin mixture was measured in a range of initial void ratios and initial water contents along drying and wetting portions of the soil-water characteristic curve. The CBR tests along wetting paths was performed on the soil samples that were dynamically compacted and wetted in a range of initial void ratios and initial water contents. The CBR tests for drying paths was also carried out on the soil samples that were compacted identically to the samples used in wetting tests, but they were air dried for seven days before CBR measurements. The air drying process was achieved from the both ends of soil samples as to maintain a homogenous moisture distribution thorough the soil. This was experimentally verified by measuring the moisture contents of top, middle, and bottom portions of the specimens. The CBR values of soil samples were measured within the loading speed of 1.2 mm/min both for wetting and drying paths. The results of a comprehensive study in past by Mirzaii & Yasrobi (2012) on the soil-water characteristics of this soil mixture was used in this study as to estimate the matrix suctions within the specimens on CBR tests performed on wetting or drying paths. According to the laboratory results, it is observed that the CBR value is increased within the increment of initial soil compaction and matrix suction. Based on the results, it is also observed that the value of California bearing ratio of the understudying soil is decreased within increment of the degree of saturation and initial moisture content of the soil. The experimental data also revealed that the California bearing ratio of the pavement material along the drying and wetting paths are not identical, and for a given suction, the CBR values for drying paths possess lower values than the wetting paths. This hysteretic trend for the change of CBR along drying and wetting paths is explained with regard to the hysteretic behavior of the soil-water characteristic curve.

Keywords: Unsaturated Soils, Sand-Kaolin Mixture ,CBR , Hydraulic Hystersis, Soil-Water Characteristic Curve.