

## مطالعه تحلیلی روسازی راه در خاک‌های غیر اشباع

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۵

کد مقاله: ۷۲۵۴۹

حامد امیری<sup>۱</sup>، علی میرزایی<sup>۲</sup>

### چکیده

در کشور پهناور ایران تسهیل در امور حمل و نقل با توجه به اقلیم و شرایط خاص منطقه ای و برنامه ریزی مناسب برای آن و ساخت و توسعه اصولی و مناسب زیرساختهای حمل و نقل با رعایت ضوابط و معیارهای فنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حمل و نقل هوایی با توجه به سرعت بالای آن در جابجائی کالا و مسافر و تاثیر آن بر توسعه اقتصادی در برنامه ریزی حمل و نقل کشور توجه ویژه‌ای به آن گردیده است. زمین طبیعی، بستر خاکریزی های آماده شده راه، کف برش های خاکی و یا سنگی، حتی در شرایط کاملاً متراکم و خوب دانه بندی شده، مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارده از چرخ خودرو را در شرایط متغیر جوی ندارد. بارگذاری این گونه خاک ها موجب شکست برشی و ایجاد تغییر شکلهای دائم بیش از اندازه برای آنها می شود. روسازی، از بروز و ظهور آسیب دیدگی های فوق جلوگیری نموده و عبور و مرور راحت، سریع، مطمئن، ایمن و بدون گرد و غبار را در یک سطح هموار فراهم می کند. تحقیق حاضر یک شبیه سازی نرم افزاری از داده های آزمایشگاهی مستند می باشد که از طریق واحد آزمایشگاه انجام می شود. روش کاربرد بدین صورت است اطلاعاتی که حاصل از آزمایشات انجام گرفته را به عنوان ورودی شبیه سازی در نظر گرفته سپس این اطلاعات را در نرم افزار MN PAVE وارد کرده و یک شبیه سازی از پدیده واقعی می گردد.

**واژگان کلیدی:** روسازی راه ها، لایه های زیراساس، رویه شنی

## ۱- مقدمه

روسازی راه‌ها به واسطه بسیاری از شرایط مختلف مثل بارش نزولات، تغییرات دما و اقلیم‌های متفاوت آب و هوایی ... در وضعیت کاملاً اشباع نیست. بسیاری از پروژه‌های عمرانی در شرایطی انجام می‌شوند که وضعیت خاک متغیر است و خاک به صورت کاملاً خشک و یا اشباع نیست عملاً خاک در حالت غیر اشباع است. این درحالی است که مکانیک خاک کلاسیک خاک را به صورت دو فاز کاملاً خشک و یا اشباع در نظریه گیردمکان یک خاک غیر اشباع به دلیل پیچیده بودن رفتار خاک در این وضعیت با ناشناخته‌های فراوانی روبه روست اهمیت مطالعه رفتار اینگونه خاکها بسیار ضروری می‌باشد در نتیجه یک طراحی مناسب لایه‌های روسازی راه بایستی شامل در نظر گرفتن این موارد گردد. مکانیک خاک غیر اشباع عبارت است از بکارگیری قوانین مکانیک، هیدرولیک و فیزیک سطح جدایش، برای حل مسائل مهندسی‌ای که با خاک غیر اشباع سر و کار دارند. اغلب روش‌هایی که در واقعیت برای طراحی روسازی راه‌ها استفاده می‌شود مبتنی بر فرض اشباع بودن و یا خشک کامل خاک است. مثل روش‌های ASHTO و ... طراحی روسازی راه‌ها را می‌توان به صورت روش‌های عددی و یا تحلیلی انجام داد. این روش‌ها فرضیات در این تحقیق می‌خواهیم با استفاده از نرم‌افزار MNPave اثر تحلیل واقعی تر روسازی راه را با توجه به شرایط آب و هوایی و در نظر گرفتن رفتار خاک در حالت غیر اشباع انجام دهیم. داده‌های مورد استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از تحقیق آقای دکتر علی میرزایی و آقای مهندس نگهبان می‌باشد.

## ۲- مبانی نظری

### ۲-۱- تاریخچه روسازی راه‌ها

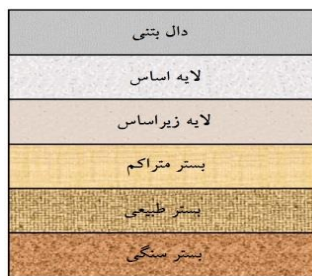
راهسازان از زمان‌های قدیم بر لزوم و اهمیت روسازی راه‌ها واقف بودند و بر حسب مورد از انواع روسازیه‌ها استفاده می‌کردند. روسازی راه‌ها در مناطقی که دارای زمین‌های سست و آب و هوایی مرطوب بود و برای حمل و نقل کالا و مسافران از ارباب استفاده می‌شد بیشتر توسعه یافت. از سروسازی‌های قدیمی که هنوز هم آثاری از آنجا بجا مانده می‌توان خیابانهای بابل و روسازی راه‌های رومیان را نام برد. در بابل برای ساختن خیابانها و محافظت آنها در برابر طغیان رودخانه دجله از آجر و ملات قیر معدنی استفاده می‌کردند. روسازی کف خیابانها و دیوارهای دو طرف آن با آجر و ملات قیر معدنی ساخته می‌شد و سپس کف خیابان با استفاده از سنگ فرش می‌گردید. روسازی راه‌های رومیان از چند لایه تشکیل می‌شد که از پائین به بالا عبارت بودند از یک لایه ۳۰ سانتی لاشه سنگ و ملات، یک لایه ۲۰ سانتی متری پارچ سنگ و قلوه سنگ، یک لایه ۲۵ سانتی متری شن و خرده سنگ و ملات و یک لایه ۲۰ سانتی متری شن و ماسه خاکدار. روسازی راه‌های رومیان که صدها کیلومتر از آن به این روش ساخته شد و قسمتی از آن هنوز هم باقی مانده است، در خندقی که از کندن زمین مسیر راه به عمقی حدود یک متر بدست می‌آمد ساخته می‌شد. در مناطقی نظیر ایران راه‌ها معمولاً بدون روسازی ساخته می‌شد زیرا آب و هوای این مناطق گرم و خشک بود، آبادی‌ها از یکدیگر فاصله زیادی داشتند و برای حل و نقل کالا و رفت و آمد مسافران از چهارپایان استفاده می‌شد. از روسازی فقط در مواردی که راه از زمینهای سست، نم‌کنار، آب گیر و یا لجنی عبور میکرد استفاده می‌شد.

### ۲-۲- هدف از روسازی

هدف از روسازی راه و یا فرودگاه احداث یک سطح صاف و هموار و در عین حال با ایمنی کافی برای استفاده کنندگان از راه یا فرودگاه است. روسازی باید طوری طرح و ساخته شود که بتواند وزن وسایل نقلیه را تحمل کند و در هر شرایط جوی قابل استفاده باشد. زمین در حالت طبیعی معمولاً مقاومت کافی برای تحمل بارهای وارد از چرخهای وسایل نقلیه سنگین نظیر کامیونها و هواپیماها را ندارد و بارگذاری این گونه خاکها موجب شکست برشی خاک و بوجود آمدن تغییر شکل‌های بیش از اندازه در آن می‌شود. برای جلوگیری از شکست برشی خاک و بوجود آمدن تغییر شکل‌های دائم بیش از اندازه در آن، باید از شدت تنشهای فشاری قائم بر روی خاک کاسته شود. این عمل با قرار دادن لایه‌ای از مصالح مرغوب و با مقاومت زیاد بر روی خاک انجام می‌شود. جنس و ضخامت این لایه که به روسازی موسوم است باید طوری باشد که ضمن آنکه میتواند شدت تنشهای فشاری قائم را بمیزان قابل تحمل خاک بستر روسازی کاهش دهد، خود نیز قادر به تحمل بارهای وارد به آن باشد.

### ۲-۳- لایه‌های روسازی

روسازی‌ها معمولاً از چندین لایه تشکیل میشوند. تعداد، ضخامت و جنس این لایه‌ها تابعی از مقاومت خاک و بستر روسازی، خصوصیات آمد و شد وسایل نقلیه، شرایط جوی منطقه، مصالح موجود در محل و شرایط اقتصادی است. روسازی راه‌های با آمد و شد زیاد و فرودگاهها معمولاً از سه لایه متمایز رویه، اساس و زیر اساس که بر روی لایه متارکم شده خاک بستر روسازی قرار می‌گیرند تشکیل می‌شود.



شکل (۱): مقطعی از لایه های روسازی صلب  
(NCHRP 1-37A، ۲۰۰۲)

## ۲-۴- نحوه انتخاب مقاومت خاک برای طرح روسازی

مقاومت خاک بستر راه در نقاط مختلف متفاوت است و به عوامل زیادی از قبیل جنس و میزان رطوبت و تراکم خاک بستگی دارد. لذا یکی از سؤالاتی که همواره در طرح روسازیه‌ها مطرح می شود انتخاب مقاومت خاک بستر روسازی است. انتخاب عددی برای مقاومت خاک بستر با استفاده از روشهای آماری انجام می شود. انتخاب مقاومت خاک مبنا برای طرح روسازی علاوه بر نوع و میزان آمد و شد وسائل نقلیه تابعی از پراکندگی نتایج آزمایش تعیین مقاومت و همچنین نسبت مخارج اولیه روسازی به مخارج تعمیرات آن خواهد بود.

## ۲-۵- اجرای لایه های زیر اساس و اساس و رویه شنی

مقاومت و قدرت باربری لایه های زیر اساس، اساس و رویه شنی تابعی از تراکم آنها است. این لایه ها باید در ضخامت های کم (حدود ۱۵ تا ۲۰ سانتی متر) پخش و در درصد رطوبت بهینه کوبیده شوند. پخش مصالح هر لایه باید پس از اتمام عملیات پخش و کوبیدن لایه زیر آن انجام شود. پخش مصالح ممکن است بوسیله پخش کن و یا تیغه گریدر انجام شود. ساده ترین روش پخش مصالح سنگی ابتدا ریشه کردن یا کپه کردن مصالح سنگی در طول و بر روی سطح آماده شده راه، و سپس پخش آن با تیغه گریدر است. پخش مصالح بوسیله پخش کن مکانیکی از دقت بیشتری برخوردار است و کیفیت لایه بدست آمده از نظر یکنواختی ضخامت آن بهتر است.

## ۲-۶- تثبیت خاک و مصالح شنی با آهک

برخی خاک ها به علت مشخصات فنی نامطلوب از نوع بد یا نامرغوب محسوب شده و مشکلات زیادی از نظر فنی و اقتصادی در راهسازی ایجاد می کنند. هرگاه بنا به عللی امکان تغییر مسیر راه و یا تعویض خاک نباشد، باید روش تثبیت خاک مورد بررسی قرار گیرد تا اگر این روش از نظر اقتصادی قابل توجیه باشد مبادرت به انجام آن شود. در این بخش تأثیر آهک بر خاکها و مصالح شنی مورد بررسی قرار گرفته و خواص و ویژگی های مصالح تثبیت شده با آهک شرح داده شده است تا با شناخت بیشتر این نوع مصالح از آن بطور اصولی تر در راهسازی استفاده شود.

## ۲-۷- روش انستیتو آسفالت برای طرح روسازی راه

روش سابق انستیتو آسفالت برای طرح روسازی های آسفالتی راه یک روش تجربی بود که بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات اشته و آزمایش راه واشو در ایالات متحده آمریکا و چند آزمایش انجام شده در انگلستان استوار بوده است. لیکن روش جدید انستیتو آسفالت بر اساس محدود کردن مقدار حداکثر تغییر شکل نسبی فشاری قائم وارد بر خاک بستر روسازی و همچنین محدود کردن مقدار حداکثر تغییر شکل نسبی کششی افقی در لایه آسفالتی استوار است. در این قسمت هر دو روش انستیتو آسفالت برای طرح روسازیهای آسفالتی آورده شده است.

## ۲-۸- روش شل برای طرح روسازی راه

در این روش فرض بر این است که سیستم روسازی انعطاف پذیر از سه لایه کلی تشکیل می شود و تحت اثر بارهای وارد از وسائل نقلیه قرار دارد و لذا میتوان از نظریه سیستم سه لایه ای برای تعیین تنش ها و تغییر شکل های نسبی استفاده کرد. سه لایه اصلی روسازی عبارتند از: یک یا چند لایه آسفالتی، یک یا چند لایه شنی و یا تثبیت شده، و لایه خاک بستر روسازی. روش شل برای طرح روسازیهای انعطاف پذیر بر اساس محدود نمودن مقدار حداکثر تغییر شکل نسبی قائم وارد بر خاک بستر روسازی (بمنظور جلوگیری از خرابی روسازی در اثر افت و خیز دائم بیش از حد خاک) و محدود نمودن مقدار حداکثر تغییر شکل نسبی کششی در سطح زیر لایه آسفالتی (بمنظور جلوگیری از خرابی روسازی در اثر ترک خوردن ناشی از خستگی خمشی لایه رویه آسفالتی) استوار است.

## ۲-۹- روش NCSA برای طرح روسازی راه

در این روش که بر اساس روش CBR ارائه شده توسط گروه مهندسين استوار است ضخامت لایه های روسازی بر این اساس تعیین می شوند که در طی عمر مفید روسازی هیچ یک از لایه های روسازی در اثر تکرار تغییر شکل برشی ناشی از تمار

بارگذاری خراب نشوند. منحنی نشان داده شده روش NCSA برای طرح روسازی است که در آن ضخامت لایه های روسازی با دست داشتن نسبت به کالیفرنای لایه های خاک بستر، زیر اساس و اساس و شاخص طرح (DI) بدست می آید. شاخص طرح (DI) نشانه ای از میزان و نوع آمد و شد وسائل نقلیه راه است که معرف تعداد متوسط روزانه محور ساده ۸/۲ تنی هم ارز آمد و شد در خطر طرح برای یک دوره ۲۰ ساله (عمر مفید روسازی) می باشد. در مواردی که تعیین و یا پیش بینی تعداد محورها ساده ۸/۲ تنی هم ارز امکان پذیر نباشد می توان شاخص طرح را با استفاده از مشخصات کلی آمد و شد وسائل نقلیه تعیین کرد.

### ۳- روش انجام تحقیق

در تحقیق حاضر یک شبیه سازی نرم افزاری از داده های آزمایشگاهی مستند، انجام می شود. روش کاربرد بدین صورت است اطلاعاتی که حاصل از آزمایش انجام گرفته توسط آقای میرزایی و آقای نگهبان در دانشگاه کاشان در سال ۱۳۹۳ - ۱۳۹۴ را به عنوان ورودی شبیه سازی در نظر گرفته شده و سپس این اطلاعات را در نرم افزار MN PAVE وارد کرده و یک شبیه سازی از پدیده واقعی ایجاد شده است. سپس تجزیه و تحلیل روی پارامترهای مختلف تاثیر گذار انجام می شود و میزان تاثیر گذاری آنها و درجه اهمیت هر یک روی جنبه های مهندسی و اقتصادی طرح روسازی راه سنجیده می شود.

### ۳-۱- مشخصات خاک مورد مطالعه

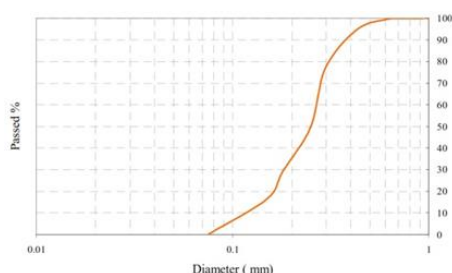
#### ۳-۱-۱- آزمایش های شناسایی پایه

برای اطمینان از مشخصات خاک مورد مطالعه و تطابق با خاک مورد استفاده در مطالعه میرزایی و یثربی (۲۰۱۲) آزمایشات پایه ای زیر انجام گردید:

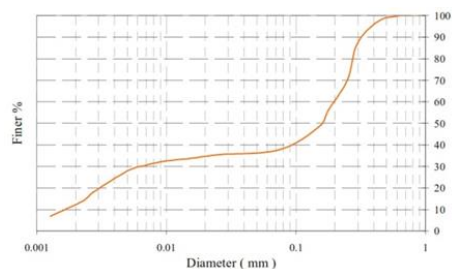
۱. آزمایش دانه بندی
۲. آزمایش حدروانی و حدخمیری

#### ۳-۱-۲- آزمایش دانه بندی

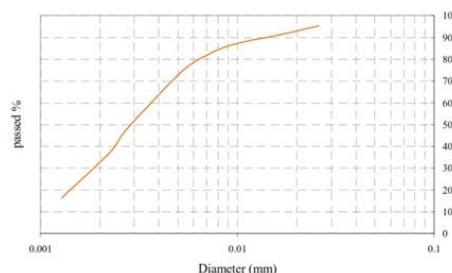
به منظور طبقه بندی خاک ترکیبی مورد مطالعه آزمایش دانه بندی مطابق استاندارد (ASTM D - 422) بر روی آن بخش از ذرات موجود در خاک ها که در محدوده کوچکتر از ۴،۷۵ میلیمتر و بزرگتر از ۰،۰۷۵ میلیمتر هستند و آزمایش هیدرومتری بر روی بخش ذرات کوچکتر از ۰،۰۷۵ میلیمتر مطابق استاندارد (ASTM D - 422) انجام شده است. این آزمایش ها ابتدا به صورت مجزا بروی خاک های ماسه و کائولینیت صورت گرفته و سپس بروی ترکیب ماسه - کائولینیت انجام شده است. نتایج این آزمایش ها در نمودار های شکل (۱-۳) تا (۳-۳) آورده شده است.



شکل (۲): نمودار دانه بندی ماسه



شکل (۴): نمودار دانه بندی ترکیب ماسه - کائولینیت



شکل (۳): نمودار دانه بندی کائولینیت

با توجه نمودار شکل (۳-۳) دانه بندی مقادیر  $D_{10}$  و  $D_{30}$  و  $D_{60}$  به ترتیب ۰،۰۰۶۴ و ۰،۰۰۱۷ و ۰،۰۰۱۷ بدست می آید. در نتیجه ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب دانه بندی یا ضریب انحنا ( $C_c$ ) بدست می آید:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 117.6 \quad (۱)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} = 0.12 \quad (۲)$$

### ۳-۲- آزمایشات سی بی آر بر روی بازه ترشدگی

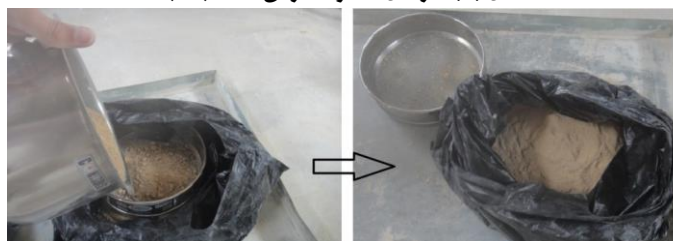
در آزمایشات روی بازه ترشدگی ۱۲ آزمایش انجام شده است. با توجه به عدم نیاز به اشباع شدن نمونه ها از قالب تراکم اصلاح شده استفاده شده است. آزمایشات سی بی آر دقیقاً روی نقاط آزمایش شده توسط میرزایی و یثربی (۲۰۱۲) انجام شده است. بنابراین نمونه ها به صورت تراکم دینامیکی و در سه لایه با ضخامت یکسان کوبیده می شود. تمامی نمونه ها در درصد رطوبت بهینه تراکم (۹۶ درصد) متراکم شده است. برای این امر ابتدا وزن خاک لازم را با توجه به روابط وزنی حجمی بدست می آوریم سپس آن را به سه قسمت تقسیم نموده و با استفاده از یک چکش پراکتور خاک را بطور یکنواخت آنقدر کوبیده تا لایه مفروض به ارتفاع دلخواه برسد.

### ۳-۳- بازسازی نمونه ها

با توجه به دانه بندی مخلوط ماسه رسی کائولین، هر دوی ماسه و خاک رس را کاملاً مخلوط نموده برای اینکار از میکسر استفاده شده است. مطابق شکل (۵) با توجه به مقدار رطوبت لازم آب به مخلوط اضافه شده و کاملاً مخلوط شده است. برای یکنواخت کردن رطوبت و از بین بردن کلوخه های خاک ابتدا با میکسر بمدت یک دقیقه خوب مخلوط شده و پس از آن مطابق شکل (۶) خاک را درون یک نایلون از الک نمره ۸ عبور می دهیم و با دست کلوخه ها را از الک عبور داده شده تا خاک یکدست گردد.



شکل (۵): مراحل مخلوط کردن خاک با آب



شکل (۶): عبور دادن خاک از الک نمره هشت

در کیسه نایلونی را بسته کمی تکان داده شده تا خاک کاملاً یکنواخت شود. مطابق شکل (۹) مقدار یک سوم از خاک را با توجه به محاسبات انجام شده با توجه به مقدار خاک مورد نیاز وزن شده، درون قالب ریخته آنقدر بطور یکنواخت کوبیده شده تا ارتفاع آن برابر یک سوم ارتفاع قالب گردد. برای این هدف از کولیس استفاده شده که کافیت در چهار نقطه نزدیک لبه قالب کنترل گردد اینکار را برای سه لایه انجام شده است. بایستی سطح نهایی با لبه قالب برابر شده و کاملاً صاف گردیده است. در تمام مراحل وزن کردن و متراکم نمودن خاک، مقدار خاک باقیمانده برای لایه های دوم و سوم بمنظور جلوگیری از دست رفتن رطوبت درون کیسه نایلونی کاملاً بسته نگهداری شده است. سپس قالب باز شده و برعکس شده وزنه های سربار مطابق استاندارد آشتو وای اس تی ام به وزن ۴٫۵ کیلوگرم روی نمونه قرار گرفته و زیر دستگاه قرار گرفته شده است.



شکل (۷): مراحل متراکم نمودن نمونه

### ۴-۳- بارگذاری نمونه

دستگاه سی بی آر دارای دو گیج اندازه گیری نفوذ و نیرو<sup>۱</sup> می باشد. مطابق شکل (۸) گیج نیرو دارای حلقه ای است که بار توسط این حلقه اندازه گیری می شود. معمولاً مقدار ضریب کالیبراسیون حلقه مشخص است. با این حال قبل از شروع انجام آزمایشات کالیبراسیون حلقه کنترل گردیده شد. برای این کار ابتدا حلقه از دستگاه باز شده و سپس میله متحرک اندازه گیری گیج کاملاً به صفحه زیرین حلقه چسبیده و تمامی پیچ ها سفت می گردد و گیج روی صفر تنظیم می گردد. سپس حلقه تحت بارگذاری های مختلف قرار گرفته مقادیر بارگذاری و عدد خوانده شده از گیج ثبت می گردد و مقدار کالیبراسیون حلقه با رسم منحنی مشخص می گردد. سپس حلقه روی دستگاه اتصال یافته پیستون متصل شده است. این ضریب برای این دستگاه ۲,۲۶۳ می باشد که نتیجه برحسب کیلوگرم خواهد بود.

مطابق شکل (۹) همزمان با پایین آوردن پیستون گیج نفوذ به پیستون وصل و روی لبه قالب قرار می گیرد برای این آزمایشات از گیج نفوذ با دقت ۰,۰۰۱ اینچ مطابق استاندارد آشنو و ای اس تی ام استفاده شده است، پیستون به آرامی روی نمونه قرار می گیرد پیچ های جابه جایی پیستون کاملاً سفت و پیستون کاملاً تراز شده دستگاه روشن شده به سمت بالا حرکت می کند گیج نیرو در این وضعیت باید باندازه یک واحد عقب تر از صفر قرار گیرد تا با بالا آمدن قالب و بمحض حرکت گیج نیرو قرار گرفتن روی صفر دستگاه خاموش و گیج نفوذ روی صفر تنظیم می گردد. در این موقع هر دو گیج باید روی صفر قرار گرفته باشند.



شکل (۹): بارگذاری نمونه



شکل (۸): گیج نیروی دستگاه سی بی آر

بعد از تنظیمات اولیه دستگاه روشن مطابق استاندارد ای اس تی ام قرائت گیج نیرو در بازه های نفوذ ۰,۰۲۵، ۰,۰۵، ۰,۰۷۵، ۰,۱، ۰,۱۲۵، ۰,۱۵، ۰,۱۷۵، ۰,۲، ۰,۳، ۰,۴ و ۰,۵ اینچ ثبت شده است.

در پایان بارگذاری و ثبت نتایج بارگذاری، دستگاه با حرکت به سمت پایین روشن شده صبر می کنیم تا دوباره به حالت اولیه باز گردد بعد از رسیدن دستگاه به حالت اولیه توسط پیچ های جابجایی پیستون، پیستون بالا آورده می شود و قالب خارج شده و پس از آن ۳ نمونه درصد رطوبت از قسمت زیرپیستون وسط نمونه و زیر نمونه گرفته شده است تا کنترل شود.

### ۵-۳- آزمایشات سی بی آر بر روی بازه خشک شدگی

سری دوم آزمایش های سی بی آر شامل ۱۲ آزمایش بر روی منحنی خشک شدگی مشخصه آب - خاک می باشد. در این آزمایش ها مقدار سی بی آر نمونه های خاک در سه نسبت تخلخل ۰,۳۲، ۰,۵۲ و ۰,۷۲ و در مقادیر مشخص شده درجه اشباع

1 Force gauge

همانند روش ترشدگی اندازه گیری خواهند شد. در این پژوهش آزمایشات مختلفی انجام گردید تا بتوان مقدار سی بی آر روی بازه خشک شدگی را بدست آورد چند پیشنهاد مورد بررسی قرار گرفت. راهکار اول اشباع نمودن نمونه ها و خشک کردن تا رسیدن به مقدار رطوبت مورد نظر بود که بدلیل تورم بسیار بالای مخلوط ماسه رسی و همچنین تغییرات در ساختار تراکم و تاثیر آن برروی مقاومت صرف نظر گردید.



شکل (۱۰): کنترل تورم نمونه

مطابق شکل (۹) تورم نمونه ها در تخلخل های مختلف اندازه گیری شد و مشاهده گردید با اشباع کردن نمونه ها تورم نمونه بسیار زیاده بود و در نتیجه تاثیر زیادی روی مقدار سی بی آر دارد همچنین در طی خشک شدن نمونه از قالب جدا شده است؛ بنابراین از روش هوادهی بعد از اشباع کردن نمونه صرف نظر گردید. راهکار دوم انتخابی متراکم کردن نمونه همانند روش ترشدگی بود که با گذشت زمان بدست آمد. در انجام این سری آزمایشات از قالب های سی بی آر که قابلیت اشباع شدن را دارد استفاده شده است. در این آزمایش ها، ابتدا نمونه خاک همانند روش ترشدگی متراکم و آماده شده و سپس نمونه های ساخته شده با روش هوادهی به مدت ۷ روز خشک شده است.

### ۳-۶- بازسازی نمونه

همانند ساخت نمونه های در حالت ترشدگی ماسه و رس کائولین توسط میکسر خوب مخلوط می گردد. سپس مقدار رطوبت با توجه به نسبت تخلخل کاملاً مخلوط می نمایم. برای از بین بردن کلوخه های ناشی از جذب آب و همگن کردن خاک دوباره خاک را با میکسر مدت یک دقیقه مخلوط می نمایم سپس خاک را درون نایلون ریخته همزمان از الک نمره ۸ عبور داده که کاملاً خاک با درصد رطوبت یکنواخت گردد. قالب سی بی آر را آماده نموده فاصله انداز قالب را در کف قالب قرار داده خاک را مطابق روش قبلی در سه لایه متراکم می نمایم. بعد از اتمام متراکم نمودن پیچ های قالب باز شده فاصله انداز برداشته شده قالب برعکس شده روی صفحه مشبک قرار گرفته است. قبل از قرار گیری سوراخ های کف قالب را کنترل نموده که کاملاً باز بوده که هوا بتواند براحتی به کف نمونه نفوذ کند. سپس وزن شده و ثبت گردیده است.



شکل (۱۱): هوادهی و خشک کردن نمونه

بعد از قرار گیری قالب روی صفحه مشبک کف، روی نمونه نیز با صفحه فلزی مشبک که برای آزمایشات اشباع کردن نمونه به کار می رود استفاده شده و روی نمونه قرار گرفته شده است برای جلوگیری از جدا شدن نمونه خاک از قالب، وزنه ها نیز روی صفحه قرار می گیرند. مطابق شکل (۱۰) بعد از آماده شدن نمونه، قالب در دو طرف بر روی دو تکیه گاه قرار گرفته که هوا بتواند از زیر به نمونه نفوذ نماید. بعد از هوادهی و خشک شدن نمونه به مدت ۷ روز، بارگذاری نمونه همانند روش ترشدگی انجام شده و نتایج ثبت شده است.

### ۴- تجزیه و تحلیل داده ها

#### ۴-۱- روابط بین عدد CBR و DCP

آزمایش نفوذ دینامیکی برای اولین بار در سال ۱۹۵۶ در آفریقای جنوبی به عنوان تکنیکی برای ارزیابی مقاومت لایه های مختلف در زیرسازی جاده ها مورد استفاده قرار گرفت. از آن موقع به بعد، این آزمایش به صورت گسترده ای در آفریقای جنوبی، انگلیس، آمریکا، استرالیا و سایر کشورها به علت سادگی تجهیزات و اجراء قابلیت حمل، هزینه کم و توانایی اندازه گیری سریع مقاومت لایه های گوناگون در راه سازی، مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمایش شامل کوبیدن نوک مخروطی تا عمق مشخص و ثبت تعداد ضربات متناسب با آن عمق نفوذ می باشد. آزمایش DCP دارای ارتباط گسترده ای با متغیرهای دیگر از قبیل نتایج آزمایش های CBR، SPT، مقاومت فشاری محصور نشده، مدول برجهنگی و مقاومت برشی خاک می باشد و همچنین از آن به عنوان ابزاری برای کنترل کیفیت تراکم در خاکریزها استفاده می شود. تحقیقات وسیعی به منظور ایجاد روابط تجربی بین مقاومت نفوذ DCP و عدد CBR انجام گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته شده توسط کلین (Kleyn, 1975) بر روی انواع خاک ها منجر به رابطه (۳) گردیده است:

$$\log CBR = 2 / 62 - 1 / 27 * \log DCP \quad (3)$$

که در بالا DCP نسبت نفوذ (برحسب میلی‌متر) بر تعداد ضربات لازم برای حاصل شدن آن مقدار نفوذ می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایش‌های صحرایی انجام گرفته شده، لیونه (Livneh, 1987) رابطه (۴) را به فرم زیر برای استفاده در خاک‌های دانه‌ای و چسبنده پیشنهاد داد:

$$\log CBR = 2 / 56 - 1 / 16 * \log DCP \quad (4)$$

اسه و همکاران (Ese et. al., 1995) یک سری آزمایش‌های صحرایی انجام داده و یک معادله مشابه روابط فوق به صورت رابطه (۵) برای مصالح دانه‌ای متراکم ارائه کردند:

$$\log CBR = 2 / 44 - 1 / 0.7 * \log DCP \quad (6)$$

روابط تجربی (۷) و (۸) نیز به ترتیب برای مصالح دانه‌ای و انواع مختلف خاک‌ها توسط هاریسون (Harison, 1987) و وبستر و همکاران (Webster et. al., 1992) پیشنهاد شده است:

$$\log CBR = 2 / 55 - 1 / 14 * \log DCP \quad (7)$$

$$\log CBR = 2 / 46 - 1 / 12 * \log DCP \quad (8)$$

همان طور که مشاهده می‌شود، همه روابط بالا مشابه به هم بوده و می‌توان همه آنها را به صورت کلی مطابق با رابطه (۹) نمایش داد:

$$\log(CBR) = a - b \log(DCP) \quad (9)$$

که در رابطه فوق  $b, a$  ثابت‌هایی هستند که  $a$  از (۲/۴۴) تا (۲/۶۲) و  $b$  از (۱/۰۷) تا (۱/۲۷) تغییر می‌کند.

#### ۲-۴ نحوه محاسبه DCP در مسیر تر شدگی و خشک شدگی

با توجه به روابط ذکر شده در بالا، و نیز با استفاده از داده‌های CBR که از پژوهش نگهبان و میرزایی، بدست آمده بود، مقدار DCP در مسیر ترشدگی و خشک شدگی به ترتیب در جدول (۱) و (۲) آمده است.

جدول (۲): نحوه محاسبه DCP در مسیر خشک شدگی

| DCP   | CBR(%) | پروژه |
|-------|--------|-------|
| 6.83  | 33.9   | P1    |
| 4.02  | 61.3   | P2    |
| 2.63  | 98.6   | P3    |
| 2.46  | 106.6  | P4    |
| 20.9  | 9.7    | P5    |
| 9.09  | 24.8   | P6    |
| 8.58  | 26.3   | P7    |
| 8.27  | 27.4   | P8    |
| 38.48 | 4.9    | P9    |
| 24.8  | 8      | P10   |
| 23.27 | 8.6    | P11   |
| 21.76 | 9.27   | P12   |

جدول (۱): نحوه محاسبه DCP در مسیر تر شدگی

| DCP    | CBR(%) | پروژه |
|--------|--------|-------|
| 7.14   | 32.3   | P1    |
| 4.13   | 59.6   | P2    |
| 2.65   | 97.7   | P3    |
| 2.46   | 106.3  | P4    |
| 47.15  | 3.9    | P5    |
| 9.98   | 22.2   | P6    |
| 8.88   | 25.3   | P7    |
| 8.69   | 25.9   | P8    |
| 78.61  | 2.2    | P9    |
| 37.1   | 5.1    | P10   |
| 33.08  | 5.8    | P11   |
| 27.898 | 7.02   | P12   |

#### ۳-۴ داده‌های بدست آمده در مسیر تر شدگی و خشک شدگی

مطابق جدول (۲) مقادیر درصد رطوبت وزن مخصوص مرطوب، تراکم اولیه با استفاده از روابط وزنی حجمی بدست می‌آید. همچنین مقادیر سی بی آر با توجه به این مقادیر و آزمایشات انجام گرفته در مسیر خشک شدگی و تر شدگی مشخص شده است و به ترتیب در جدول (۳) و (۴) آمده است.

جدول (۳): نتایج مقادیر سی بی آر بدست آمده از آزمایشات سی بی آر غیراشباع در مسیر ترشدگی

| سی بی آر (CBR) درصد | دانسیته خشک ( $\gamma_d$ ) کیلونیوتن بر متر مکعب | درصد رطوبت (w) | درجه اشباع ( $S_r$ ) | مکش بافتی (S) کیلو پاسکال | نسبت تخلخل (e) یا تراکم اولیه |
|---------------------|--------------------------------------------------|----------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| ۳۲,۳                | ۱۹,۷۷                                            | ۱۱,۷۸          | ۹۸                   | ۴۰                        | ۰,۳۲                          |
|                     |                                                  | ۱۱,۱۵          | ۹۲,۷                 | ۱۲۰                       |                               |
|                     |                                                  | ۹,۳۶           | ۷۷,۸                 | ۲۵۰                       |                               |
|                     |                                                  | ۸,۱۹           | ۶۸,۱                 | ۴۰۰                       |                               |
| ۳,۹                 | ۱۷,۱۷                                            | ۱۵,۲۱          | ۷۷,۸                 | ۴۰                        | ۰,۵۲                          |
|                     |                                                  | ۱۰,۸۷          | ۵۵,۶                 | ۱۲۰                       |                               |
|                     |                                                  | ۹,۳۰           | ۴۷,۶                 | ۲۵۰                       |                               |
|                     |                                                  | ۷,۷۴           | ۳۹,۶                 | ۴۰۰                       |                               |
| ۲,۲                 | ۱۵,۱۷                                            | ۱۶,۲۵          | ۶۰,۴                 | ۴۰                        | ۰,۷۲                          |
|                     |                                                  | ۱۲,۰۵          | ۴۴,۵                 | ۱۲۰                       |                               |
|                     |                                                  | ۹,۸۵           | ۳۶,۴                 | ۲۵۰                       |                               |
|                     |                                                  | ۸,۵۸           | ۳۱,۷                 | ۴۰۰                       |                               |

جدول (۴): نتایج مقادیر سی بی آر بدست آمده از آزمایشات سی بی آر غیراشباع در مسیر خشک شدگی

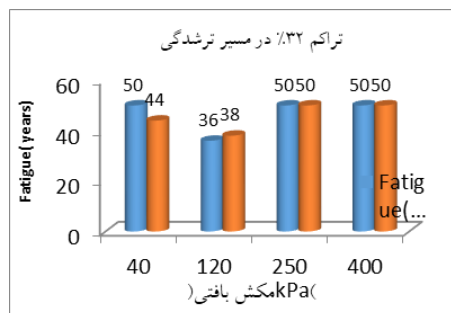
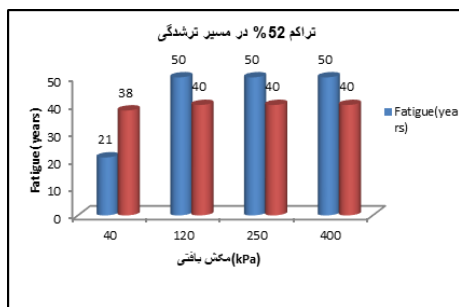
| سی بی آر (CBR) درصد | دانسیته خشک ( $\gamma_d$ ) کیلونیوتن بر متر مکعب | درصد رطوبت (w) | درجه اشباع ( $S_r$ ) | مکش بافتی (S) کیلو پاسکال | نسبت تخلخل (e) یا تراکم اولیه |
|---------------------|--------------------------------------------------|----------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 33.9                | ۱۹,۷۷                                            | 9.48           | 81.4                 | ۲۴۳                       | 0.32                          |
|                     |                                                  | 9.03           | 77.5                 | ۲۸۸                       |                               |
|                     |                                                  | 7.24           | 62.2                 | ۶۲۴                       |                               |
|                     |                                                  | 6.27           | 53.8                 | ۱۰۳۸                      |                               |
| 9.7                 | ۱۷,۱۷                                            | 13.64          | 72                   | ۱۲۷                       | 0.52                          |
|                     |                                                  | 9.51           | 50.2                 | ۵۵۲                       |                               |
|                     |                                                  | 8.65           | 45.7                 | ۸۱۰                       |                               |
|                     |                                                  | 7.44           | 39.3                 | ۱۴۹۹                      |                               |
| 4.9                 | ۱۵,۱۷                                            | 14.16          | 54.2                 | ۱۴۸                       | 0.72                          |
|                     |                                                  | 9.95           | 38.1                 | ۵۷۱                       |                               |
|                     |                                                  | 8.12           | 31.1                 | ۱۲۴۳                      |                               |
|                     |                                                  | 6.84           | 26.2                 | ۲۳۹۶                      |                               |

#### ۴-۴- تاثیر تراکم اولیه بر روی فاتیگ (Fatigue) در مسیر تر شدگی

جدول (۵): مقدار مکش بافتی و تراکم اولیه در مسیر ترشدگی برای محاسبه Fatigue

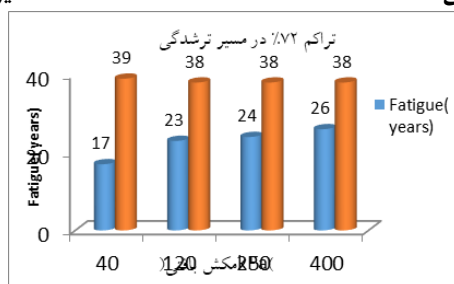
| نسبت تخلخل (e) یا تراکم اولیه | مسیر تر شدگی           |        |                        |                                                               |
|-------------------------------|------------------------|--------|------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                               | مقدار مکش بافتی s(kPa) | CBR(%) | گسیختگی Fatigue(years) | گسیختگی در ضخامت هدف Preliminary Life Estimate Fatigue(years) |
| 0.32                          | ۴۰                     | 32.3   | ۵۰                     | ۴۴                                                            |
|                               | ۱۲۰                    | 59.6   | ۳۶                     | ۳۸                                                            |
|                               | ۲۵۰                    | 97.7   | ۵۰                     | ۵۰                                                            |
|                               | ۴۰۰                    | 106.3  | ۵۰                     | ۵۰                                                            |
| 0.52                          | ۴۰                     | 3.9    | ۲۱                     | ۳۸                                                            |
|                               | ۱۲۰                    | 22.2   | ۵۰                     | ۴۰                                                            |
|                               | ۲۵۰                    | 25.3   | ۵۰                     | ۴۰                                                            |
|                               | ۴۰۰                    | 25.9   | ۵۰                     | ۴۰                                                            |

| نسبت<br>تخلخل (e) یا<br>تراکم اولیه | مسیر ترشده                                                          |                           |        |                           |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------|---------------------------|
|                                     | گسیختگی در ضخامت هدف<br>Preliminary Life Estimate<br>Fatigue(years) | گسیختگی<br>Fatigue(years) | CBR(%) | مقدار مکش بافتی<br>s(kPa) |
| 0.72                                | ۳۹                                                                  | ۱۷                        | 2.2    | ۴۰                        |
|                                     | ۳۸                                                                  | ۲۳                        | 5.1    | ۱۲۰                       |
|                                     | ۲۸                                                                  | ۲۴                        | 5.8    | ۲۵۰                       |
|                                     | ۳۸                                                                  | ۲۶                        | 7.02   | ۴۰۰                       |



شکل (۱۲): تاثیر تراکم اولیه (۳۲٪) بر روی Fatigue در مسیر ترشده

مسیر ترشده

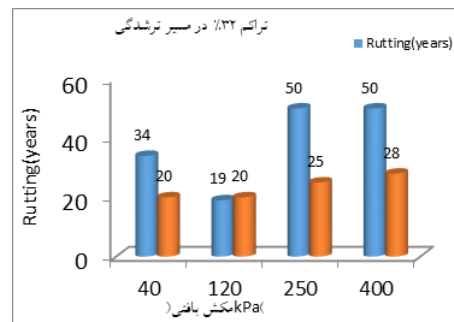
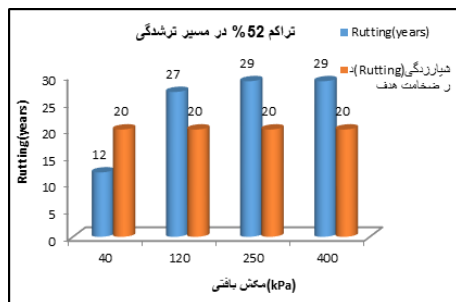


شکل (۱۴): تاثیر تراکم اولیه (۷۲٪) بر روی Fatigue در مسیر ترشده

#### ۴-۵ تاثیر تراکم اولیه بر روی راتینگ (Rutting) در مسیر ترشده

جدول (۶): مقدار مکش بافتی و تراکم اولیه در مسیر ترشده برای محاسبه Rutting(years)

| نسبت تخلخل (e) یا<br>تراکم اولیه | مسیر ترشده                                                           |                            |        |                           |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------|---------------------------|
|                                  | شیارزدگی در ضخامت هدف<br>Preliminary Life Estimate<br>Rutting(years) | شیارزدگی<br>Rutting(years) | CBR(%) | مقدار مکش بافتی<br>s(kPa) |
| 0.32                             | 20                                                                   | 34                         | 32.3   | ۴۰                        |
|                                  | 20                                                                   | 19                         | 59.6   | ۱۲۰                       |
|                                  | 25                                                                   | 50                         | 97.7   | ۲۵۰                       |
|                                  | 28                                                                   | 50                         | 106.3  | ۴۰۰                       |
| 0.52                             | 20                                                                   | 12                         | 3.9    | ۴۰                        |
|                                  | 20                                                                   | 27                         | 22.2   | ۱۲۰                       |
|                                  | 20                                                                   | 29                         | 25.3   | ۲۵۰                       |
|                                  | 20                                                                   | 29                         | 25.9   | ۴۰۰                       |
| 0.72                             | 20                                                                   | 10                         | 2.2    | ۴۰                        |
|                                  | 20                                                                   | 13                         | 5.1    | ۱۲۰                       |
|                                  | 20                                                                   | 13                         | 5.8    | ۲۵۰                       |
|                                  | 20                                                                   | 14                         | 7.02   | ۴۰۰                       |

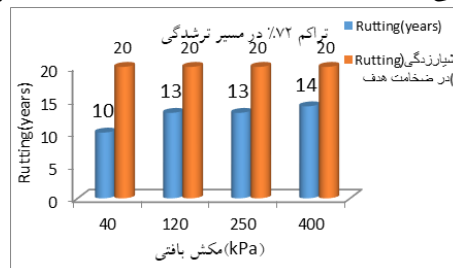


شکل (۱۵): تاثیر تراکم اولیه (۵۲٪) بر روی Rutting در

شکل (۱۵): تاثیر تراکم اولیه (۳۲٪) بر روی Rutting در

مسیر ترشدگی

در مسیر ترشدگی

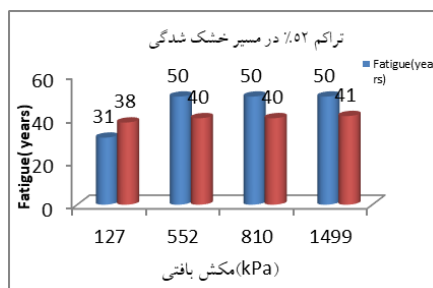


شکل (۱۶): تاثیر تراکم اولیه (۷۲٪) بر روی Rutting در مسیر ترشدگی

#### ۴-۶ تاثیر تراکم اولیه و مکش بافتی بر روی فاتیگ (Fatigue) در مسیر خشک شدگی

جدول (۷): مقدار مکش بافتی و تراکم اولیه در مسیر خشک شدگی برای محاسبه Fatigue

| مسیر خشک شدگی          |        |                        |                                                               | تراکم اولیه |
|------------------------|--------|------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------|
| مقدار مکش بافتی s(kPa) | CBR(%) | گسیختگی Fatigue(years) | گسیختگی در ضخامت هدف Preliminary Life Estimate Fatigue(years) |             |
| ۲۴۳                    | 33.9   | ۵۰                     | ۴۵                                                            | ۳۲٪         |
| ۲۸۸                    | 61.3   | ۵۰                     | ۵۰                                                            |             |
| ۶۲۴                    | 98.6   | ۵۰                     | ۵۰                                                            |             |
| ۱۰۳۸                   | 106.6  | ۵۰                     | ۵۰                                                            |             |
| ۱۲۷                    | 9.7    | ۳۱                     | ۳۸                                                            | ۵۲٪         |
| ۵۵۲                    | 24.8   | ۵۰                     | ۴۰                                                            |             |
| ۸۱۰                    | 26.3   | ۵۰                     | ۴۰                                                            |             |
| ۱۴۹۹                   | 27.4   | ۵۰                     | ۴۱                                                            |             |
| ۱۴۸                    | 4.9    | ۲۲                     | ۳۸                                                            | ۷۲٪         |
| ۵۷۱                    | 8      | ۲۸                     | ۳۸                                                            |             |
| ۱۲۴۳                   | 8.6    | ۲۹                     | ۳۸                                                            |             |
| ۲۳۹۶                   | 9.27   | ۳۰                     | ۳۸                                                            |             |

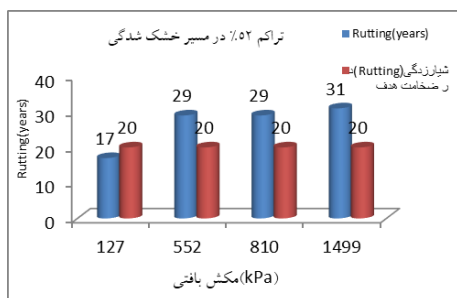


شکل (۱۹): تاثیر تراکم اولیه (۷۲٪) و مکش بافتی بر روی Fatigue در مسیر خشک شدگی

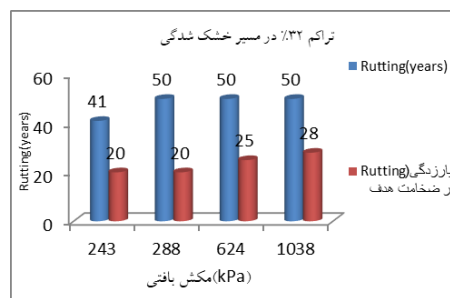
#### ۷-۴ تاثیر تراکم اولیه و مکش بافتی بر روی راتینگ (Rutting) در مسیر خشک شدگی

جدول (۸): مقدار مکش بافتی و تراکم اولیه در مسیر خشک شدگی برای محاسبه Rutting(years)

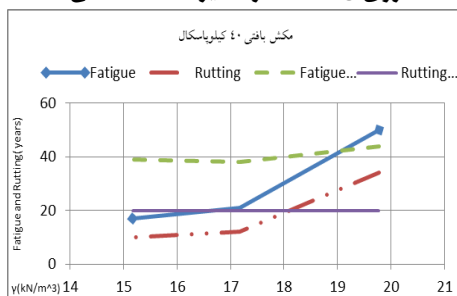
| نسبت<br>تخلخل (e) یا<br>تراکم اولیه | مسیر خشک شدگی                                                        |                            |        |                           |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------|---------------------------|
|                                     | شیارزدگی در ضخامت هدف<br>Preliminary Life Estimate<br>Rutting(years) | شیارزدگی<br>Rutting(years) | CBR(%) | مقدار مکش بافتی<br>s(kPa) |
| 0.32                                | ۲۰                                                                   | ۴۱                         | 33.9   | ۲۴۳                       |
|                                     | ۲۰                                                                   | ۵۰                         | 61.3   | ۲۸۸                       |
|                                     | ۲۵                                                                   | ۵۰                         | 98.6   | ۶۲۴                       |
|                                     | ۲۸                                                                   | ۵۰                         | 106.6  | ۱۰۳۸                      |
| 0.52                                | ۲۰                                                                   | ۱۷                         | 9.7    | ۱۲۷                       |
|                                     | ۲۰                                                                   | ۲۹                         | 24.8   | ۵۵۲                       |
|                                     | ۲۰                                                                   | ۲۹                         | 26.3   | ۸۱۰                       |
|                                     | ۲۰                                                                   | ۳۱                         | 27.4   | ۱۴۹۹                      |
| 0.72                                | ۲۰                                                                   | ۱۳                         | 4.9    | ۱۴۸                       |
|                                     | ۲۰                                                                   | ۱۵                         | 8      | ۵۷۱                       |
|                                     | ۲۰                                                                   | ۱۶                         | 8.6    | ۱۲۴۳                      |
|                                     | ۲۰                                                                   | ۱۶                         | 9.27   | ۲۳۹۶                      |



شکل (۲۱): تاثیر تراکم اولیه (۵۲٪) و مکش بافتی بر روی Rutting در مسیر خشک شدگی



شکل (۲۰): تاثیر تراکم اولیه (۳۲٪) و مکش بافتی بر روی Rutting در مسیر خشک شدگی



شکل (۲۲): تاثیر تراکم اولیه (۷۲٪) و مکش بافتی بر روی Rutting در مسیر خشک شدگی



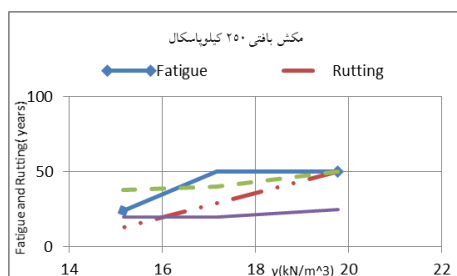
شکل (۲۳): تاثیر چگالی بر روی Rutting و Fatigue در مسیر ترشدگی

جدول (۹): تاثیر چگالی بر روی فاتیگ و راتینگ در مکش بافتی ۴۰ کیلو پاسکال در مسیر ترشدگی

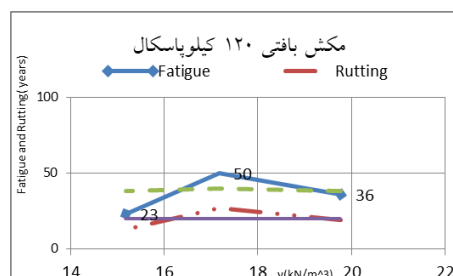
| چگالی | %CBR | Fatigue (سال) | Rutting (سال) | Fatigue (thickness goal) | Rutting (thickness goal) |
|-------|------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| ۱۹,۷۷ | ۳۲,۳ | ۵۰            | ۳۴            | ۴۴                       | ۲۰                       |
| ۱۷,۱۷ | ۳,۹  | ۲۱            | ۱۲            | ۳۸                       | ۲۰                       |
| ۱۵,۱۷ | ۲,۲  | ۱۷            | ۱۰            | ۳۹                       | ۲۰                       |

جدول (۱۰): تاثیر چگالی بر روی فاتیگ و راتینگ در مکش بافتی ۱۲۰ کیلو پاسکال در مسیر ترشدگی

| چگالی | %CBR | Fatigue (سال) | Rutting (سال) | Fatigue (thickness goal) | Rutting (thickness goal) |
|-------|------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| ۱۹,۷۷ | ۵۹,۶ | ۳۶            | ۱۹            | ۳۸                       | ۲۰                       |
| ۱۷,۱۷ | ۲۲,۲ | ۵۰            | ۲۷            | ۴۰                       | ۲۰                       |
| ۱۵,۱۷ | ۵,۱  | ۲۳            | ۱۳            | ۳۸                       | ۲۰                       |



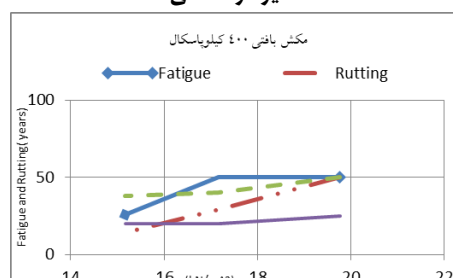
شکل (۲۵): تاثیر چگالی بر روی Fatigue و Rutting در مسیر ترشدگی



شکل (۲۶): تاثیر چگالی بر روی Fatigue و Rutting در مسیر ترشدگی



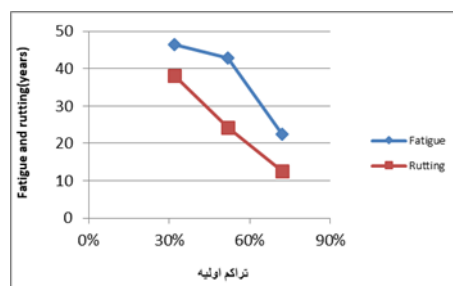
شکل (۲۸): تغییرات CBR بر حسب مکش بافتی در تراکم اولیه ۳۲٪



شکل (۲۷): تاثیر چگالی بر روی Fatigue و Rutting در مسیر ترشدگی

جدول (۱۱): تاثیر تراکم اولیه بر روی Fatigue و Rutting در مسیر ترشدگی

| تراکم | DCP   | مقدار Fatigue (سال) | مقدار Rutting (سال) |
|-------|-------|---------------------|---------------------|
| ۰/۳۲  | ۴     | ۴۶/۵                | ۳۸/۲۵               |
| ۰/۵۲  | ۱۸,۶۷ | ۴۲/۷۵               | ۲۴/۲۵               |
| ۰/۷۲  | ۴۴    | ۲۲/۵                | ۱۲/۵                |



شکل (۲۹): تاثیر تراکم اولیه بر روی Fatigue و Rutting در مسیر ترشدگی

## ۵- جمع بندی نتایج

در این بخش به مرور و جمع بندی دستاوردهای این تحقیق در راستای بررسی آزمایشگاهی تاثیر تراکم اولیه، تخلخل اولیه، درصد رطوبت اولیه و نهایتا تاثیر رفتار هیستریس هیدرولیکی بروی سی بی آر در محدوده مکش بافتی ۴۰ تا ۴۰۰ کیلوپاسکال پرداخته شده است.

### ۵-۱- تاثیر تراکم اولیه بر روی Fatigue و Rutting در مسیر تر شدگی و خشک شدگی

- مجموعه ای از آزمایش های تر بر روی بازه ای از مقادیر وزن مخصوص خشک بر روی خاک SC از نوع خاک های دانه ای ماسه ای انجام پذیرفت و مطابق نتایج آزمایشگاهی مشاهده گردید که :
- با افزایش تراکم اولیه، مقدار DCP افزایش پیدا می کند.
- با افزایش تراکم اولیه، مقدار CBR افزایش پیدا می کند.
- با افزایش تراکم اولیه مقدار فاتیگ (Fatigue) کاهش پیدا می کند.
- با افزایش تراکم اولیه مقدار راتینگ (Rutting) کاهش پیدا می کند.
- در تراکم ۳۲٪ با کاهش DCP مقدار Rutting افزایش پیدا می کند و در تراکم های بعدی مقدار Rutting ثابت است.

### ۵-۲- تاثیر مکش بافتی بر روی Fatigue و Rutting در مسیر تر شدگی و خشک شدگی

- در یک خاک با مکش بافتی ثابت، کاهش تخلخل باعث افزایش مقدار سی بی آر می گردد. این افزایش مقدار سی بی آر برای نمونه های با مکش بافتی بیشتر بمراتب بیشتر بدست آمده است.
- در یک وضعیت مکش بافتی مفروض، منحنی حاصل از رابطه تخلخل، مکش بافتی و سی بی آر نمونه های روی حالت تر و خشک شدگی با یکدیگر موازی و منحنی روی بازه خشک شدگی مقادیر سی بی آر بالاتری را بدست آمده است.
- با افزایش نسبت تخلخل سی بی آر بشدت کاهش می یابد. اما نرخ افزایش شدید سی بی آر بین بازه تخلخل ۰٫۵۲ تا ۰٫۳۲ رخ می دهد. که بالاترین نسبت تخلخل برای تخلخل ۰٫۳۲ می باشد.
- در مقایسه مکش های بافتی مختلف افزایش سی بی آر روی کمترین نسبت تخلخل و بالاترین مکش بافتی رخ می دهد.
- در بازه نسبت تخلخل های بستر از ۰٫۷۲ مکش بافتی تاثیری روی مقدار سی بی آر نداشته و به یک مقدار ثابت می رسند.
- با افزایش مقدار مکش بافتی مقدار DCP کاهش پیدا می کند.
- با افزایش مکش بافتی در هر تراکم، مقدار Fatigue افزایش پیدا می کند.
- با افزایش مکش بافتی در هر تراکم، مقدار Rutting افزایش پیدا می کند و مقدار افزایش آن چشم گیر نمی باشد.

### ۵-۳- تاثیر درصد رطوبت اولیه بر روی DCP

- نتایج آزمایش های مختلف پژوهشگران روی مقادیر سی بی آر نشان داد که با افزایش درصد رطوبت سی بی آر کاهش می یابد و مقدار DCP افزایش می یابد. نتایج آزمایش های سی بی آر غیراشباع که در نسبت تخلخل های مختلف انجام گرفته در این پژوهش نشان داد که:
- در یک نسبت تخلخل مفروض با کاهش درصد رطوبت سی بی آر افزایش می یابد و به نوبه آن مقدار DCP کاهش می یابد. این افزایش سی بی آر برای نمونه های با نسبت تخلخل بیشتر مقادیر سی بی آر کمتری را نتیجه می دهد.
- درصد رطوبت روی نمونه های با تخلخل اولیه کمتر، مقادیر سی بی آر بیشتری را نتیجه خواهد داد. و به نوبه آن مقدار DCP کاهش می یابد
- در تخلخل های ۰٫۵۲ و ۰٫۷۲ با وجود کاهش رطوبت کمتر از ۹٫۶ درصد (رطوبت پهنه)، سی بی آر افزایش بسیار کمی دارد اما برای تخلخل ۰٫۳۲ نرخ افزایش سی بی آر با اعمال درصد رطوبت کمتر از ۹٫۶ همچنان در حال افزایش چشمگیری است.
- با رسم منحنی های تر و خشک شدگی متوجه موازی بودن این منحنی ها می شویم که مقادیر سی بی آر برای نمونه های با تخلخل بیشتر نرخ افزایش سی بی آر بیشتر خواهد بود.

#### ۴-۵ تاثیر مکش بافتی بر روی سی بی آر و DCP:

- مطالعه حاضر با استفاده از نتایج اندازه گیری مکش بافتی توسط میز زایی و یثربی (۲۰۱۲) در محدوده ۴۰ تا ۴۰۰ کیلو پاسکال به انجام یک سری آزمایشات سی بی آر منتهی گردید که نتیجه این آزمایش ها مشخص نمود که:
- نتایج آزمایشات پژوهشگران روی اندازه گیری مکش بافتی مخلوط ماسی رسی در محدوده ۰ تا ۸۰ و ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ کیلو پاسکال بوده است اما نتایج آزمایش حاضر در بازه ۴۰ تا ۴۰۰ کیلو پاسکال اندازه گیری شده است و مقادیر سی بی آر روی این بازه بدست آمده اند.
  - در یک نسبت تخلخل مفروض با افزایش مکش بافتی سی بی آر افزایش می یابد و DCP کاهش می یابد.
  - در تخلخل های بیشتر از ۰,۳۲، برای مکش های بافتی بالاتر از ۱۲۰ کیلو پاسکال افزایش سی بی آر اندک است. و مقدار افزایش DCP بیشتر است.
  - با رسم نمودار نقاط مکش بافتی - سی بی آر مشخص گردید یک رابطه خطی بین سی بی آر و مکش بافتی حاکم است.

#### ۵-۵ تاثیر همبسته مکش بافتی و درصد رطوبت بر روی سی بی آر و DCP

- نمودار تغییرات درجه اشباع، مکش بافتی در قیاس با سی بی آر رسم گردید و مشاهده شد که:
- با فرض مکش بافتی ثابت در یک خاک با افزایش درجه اشباع سی بی آر افزایش می یابد. و DCP کاهش می یابد.
  - یک رابطه خطی بین درجه اشباع و سی بی آر در هر مکش بافتی ثابت وجود دارد که برای نمونه های روی حالت خشک شدگی همانند حالت ترشدگی و موازی این خطوط می باشند.
  - شیب خطوط روی بازه خشک شدگی برابر شیب خطوط روی بازه ترشدگی برای مکش های بافتی مختلف است.
  - با افزایش مقادیر مکش بافتی و درجه اشباع، باعث افزایش شدید مقدار سی بی آر گردد. و در نتیجه مقدار DCP نیز کاهش می یابد. بنابراین پارامترهای مکش بافتی و درجه اشباع، دو نوع پارامتر کلیدی در رفتار خاک های غیر اشباع می باشد.

#### منابع

۱. خانی، علی، گلی، احمد (۱۳۹۵) "مدل سازی رفتار آسفالت در شرایط الاستیک و ویسکوالاستیک تحت تحلیل دینامیکی" دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری.
۲. ندافی، محمدرضا، مرتضوی، سیدمصطفی، عزت آبادی پور، محمد (۱۳۹۵) "شناخت مواد زاید و بررسی تأثیر آن در روسازی راه" دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین علوم و تکنولوژی.
۳. مرتضایی، محمد، صدرنژاد، سیدامیرالدین (۱۳۹۵) "یک مدل رفتاری الاستو پلاستیک برای خاک های غیر اشباع: رفع مشکل عدم هم خوانی مدل و نتایج آزمایشگاهی" دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری.
۴. مرتضایی، محمد، صدرنژاد، سیدامیرالدین (۱۳۹۴) "یک مدل الاستو پلاستیک جامع برای خاک های غیر اشباع" دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.
۵. باقریه، علیرضا، کامران، مهرداد (۱۳۹۵) "تحلیل و بررسی رابطه پارامتر تنش موثر در خاک های غیر اشباع با استفاده از داده های آزمایشگاهی" دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری.
۶. امیدی، محسن، حسینی، محمود، فراهانی، مرتضی (۱۳۹۵) "رفتار مکانیکی خاک غیر اشباع در تنشهای محصور کننده موثر" دومین کنگره بین المللی علوم زمین و توسعه شهری.
۷. شهبازان، پرپسا، خسروی، علی، پاک، علی (۱۳۹۴) "بررسی آزمایشگاهی تاثیر تغییرات تنش موثر بر مدول برشی ماکزیم ماسه غیر اشباع در مسیر خشک شدگی" دومین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی.
۸. نظری، نرگس، اژدری، محسن، بناکار، محمد امین (۱۳۹۳) "محاسبه تنش موثر در خاک غیر اشباع با استفاده از رفتار تغییر حجمی خاک در مسیر تنش خاص" هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران.
۹. زمانی ایبانه، محمدرضا، اکرامی نسب، نادر (۱۳۹۲) "تئوری خاک های غیر اشباع و بررسی جریان آب در این نوع خاک ها" هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران.
۱۰. جوزف، ای، بولز، ۱۳۷۹، تحلیل و طراحی پی، ترجمه اردشیر اطلیایی، جلد اول، چاپ اول، نشر جویبار، تهران.
۱۱. توفیق، م.م؛ ملک پور، م.ر، ۱۳۸۵، «بررسی و مقایسه روابط تجربی بین آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)، نخستین کنگره بین المللی عمران و ارتقاء کیفیت»، گرگان، ایران، ۱۹ تا ۲۱ اسفند.

12. Laloui, L., F. Geiser, L. Vulliet, X.L. Li, A. Bolle & R. Charlier 1997. "Characterisation of the mechanical behaviour of an unsaturated sandy silt", Proc. XIV Int. Conf. on Soil Mech. & Found Eng.: Hamburg: Balkema
13. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993): "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley and Sons Inc., New York
14. E.C. Leong, T.T. Nyunt, and H. Rahardjo, "Triaxial Testing of Unsaturated Soils", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Multiphysical Testing of Soils and Shales, SSGG, pp 33-44, 2013
15. Alonso, E.E., Gens, A., and Josa, A. (1990). "A constitutive model for partially saturated soils." *Géotechnique*, 40(3), 405-430.
16. S.J. Wheeler & K. Stopeit & Y.J. Cui, "An anisotropic elasto-plastic model for unsaturated soils". In: 1st European Conference on Unsaturated Soils, 2-4 July 2008, Durham, England.
17. Hoyos Jr, L.R, "Experimental and computational modeling of unsaturated soil behavior under true triaxial of stress state", PhD dissertation, Georgia Institute of Technology, 1998
18. M. M. Futai ; M. S. S. Almeida, "An experimental investigation of the mechanical behaviour of an unsaturated gneiss residual soil", *Géotechnique*, Volume 55, Issue 3, 01 April 2005, pages 201 –213
19. Eise, Dug, Myre, Jostein, Noss, Permagne, and Vaernea, Einar., 1994. "The Use of Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for Road Strengthening Design in Norway", Proc. Int. Conf. on Bearing Capacity of Rd. and Airfield, 3-22.
20. Harison, J. R., 1987. "Correlation between California Bearing ratio and Dynamic Cone Penetrometer Strength Measurement of Soils", Proc. Inst. Of Civ. Engrgs. London, 2, 83-87.
21. Kleyn, E. G., 1975, "The Use of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP)", Rep. No. 2/74. Transval Roads Department, South Africa.
22. Livneh, M. Ishai, I., 1988. "The Relationship Between in Situ CBR Test and the Various Penetration Tests", Proc. First Int. Conf. on Penetration Testing, Orlando, FL, 445-452.
23. Livneh, M., 1987. "Validation of correlation between a number of penetration Tests and in Situ California Bearing Ratio Tests", Transportation Research Board, Washington, D. C. 56-67.
24. Livneh, M., 1989. In Situ CBR testing by Indirect Methods. Proceeding of 12th International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engineering. Rio de Janero, 1, 267-270.
25. Webster, S. L., Grau, R. H., and Williams, T. P., 1992, "Description and application of Dual Mass Dynamic Cone Penetrometer, Final Report, Department of Army, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.