

بررسی آزمایشگاهی مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و فشاری تک محوری مخلوطهای آسفالت بازیافت شده با استفاده از کف قیر

سعید یوسف دوست^۱، اورنگ فرزانه*^۲، علی محمد اسماعیلی^۳ و امیر احمدی^۱

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۳ معاون آموزشی و پژوهشی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۰/۱۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۱۳۹۰/۱۱/۱۸، تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۱/۲۳)

چکیده

یکی از جدیدترین روش‌های بازیافت آسفالت‌های قدیمی، روش بازیافت آسفالت به صورت سرد درجا با استفاده از کف قیر می‌باشد. در سال‌های اخیر کاربرد این روش در راه‌ها و فرودگاه‌های ایران به تدریج گسترش یافته و به موازات آن تحقیقات آزمایشگاهی بر روی خصوصیات مکانیکی و عملکردی این مخلوط‌های آسفالتی شروع شده‌است. در بخش اول تحقیق حاضر، با انجام آزمایش مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی ۱۴۴ نمونه آسفالت کف قیر، تأثیر نوع دانه‌بندی، درصد قیر، درصد سیمان و میزان تراکم بر روی مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، در چهار حالت مختلف عمل آوری، بررسی شده‌است. سپس در ادامه، با انجام آزمایش‌های لازم بر روی ۱۰۸ نمونه دیگر، سعی شده تا تأثیر پارامترهای فوق روی مدول برجهندگی و مقاومت فشاری تک محوری مورد مطالعه قرار گیرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که تغییر دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی از ریز به متوسط و نیز تغییر میزان قیر اضافه شده از دو به چهار درصد، تأثیر نسبتاً کمی بر روی مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت فشاری تک محوری و بهبود حساسیت رطوبتی آسفالت بازیافت شده دارد. در مقابل، افزودن یک درصد سیمان و افزایش آن به دو درصد نقش قابل ملاحظه‌ای در افزایش پارامترهای مذکور دارد. با استفاده از داده‌های حاصل از این تحقیق، رابطه همبستگی بین مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم جهت تخمین پارامتر نخست، بر اساس نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم ارائه شده‌است.

واژه‌های کلیدی: بازیافت سرد آسفالت، کف قیر، مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت فشاری تک محوری.

مقدمه

استفاده در پروژه‌های اصلاح عمیق لایهٔ روسازی^۲ ارائه نمود که در آن بخار آب توسط افشانه‌های مخصوصی به درون قیر داغ تزریق شده و در نهایت به صورت کف قیر خارج می‌شود. در آن زمان به دلیل قیمت نسبتاً ارزان قیر و سهولت دسترسی به مصالح سنگدانه‌ای، این روش به طور گسترده مورد استفاده قرار نگرفت. کمپانی موبیل اوایل استرالیا^۳ روش اولیه تولید کف قیر را اصلاح و در آن به جای بخار آب، از آب سرد استفاده نمود که با این کار، تولید کف قیر در محل پروژه عملیات بازیافت تسهیل شد. در این روش یک جریان کنترل شده از آب سرد وارد قیر داغ شده و از محفظهٔ اختلاط مخصوصی عبور می‌کند، سپس از طریق افشانه

بازیافت آسفالت در طی چند سال اخیر به عنوان یک گزینه مناسب برای احیا و ترمیم روسازی موجود راه‌ها مطرح شده‌است. ترمیم روسازی‌های موجود به چند روش قابل انجام است که یکی از آنها بازیافت سرد درجا می‌باشد. در روش بازیافت آسفالت به صورت سرد درجا، عملیات بازیافت بدون حضور حرارت انجام می‌شود لذا باید تدبیری اندیشیده شود تا کندروانی بالای قیر در دمای محیط، مانع اختلاط آن با مصالح دانه‌ای نشود. از جدیدترین روش‌های شناخته شده برای غلبه بر این مشکل، استفاده از تکنولوژی کف قیر^۱ در عملیات بازیافت سرد آسفالت می‌باشد [۱].

Csanyi روند اصلی تولید کف قیر را برای

مخصوصی، به صورت کف قیر خارج می‌شود [۲].

در حال حاضر با تولید ماشین آلات مناسب تولید کف قیر، استفاده از این روش توسعه زیادی یافته و پژوهش‌هایی برای توسعه این روش انجام شده‌است که همچنان نیز ادامه دارد. اما هنوز برای تهیه طرح اختلاط بازیافت سرد با کف قیر، روش استاندارد شده‌ای ارائه نشده‌است.

بازیافت آسفالت با استفاده از کف قیر دارای مزایایی چون حفظ منابع طبیعی تجدید ناپذیر، سازگاری با محیط زیست، صرفه جویی اقتصادی، افزایش ایمنی در ترافیک به علت اجرای عملیات بازیافت به صورت درجا و سرعت بالای آن و کاهش در تداخل ترافیک می‌باشد. اما علی‌رغم مزایای این روش و پیشرفت‌های صورت گرفته در ساخت تجهیزات تولید کف قیر، استفاده از این تکنولوژی، کاربرد محدودی داشته‌است که علت عمده آن، نبود روش طرح اختلاط استاندارد و مناسب برای مخلوط‌های آسفالت بازیافت شده با کف قیر می‌باشد [۳].

برای ساخت مخلوط‌های آسفالت کف قیر با عملکرد درازمدت، لازم است تا خصوصیات مکانیکی و عملکردی این نوع مخلوط‌ها به خوبی شناسائی شده و یک روند طرح اختلاط مناسب برای آن تهیه شود.

روش اصلاح و نوسازی رویه‌های آسفالتی با استفاده از تکنولوژی کف قیر، از سال ۱۹۸۰ بطور وسیع با استقبال گسترده و روزافزون بسیاری از کشورها از جمله کانادا، آلمان، ایالات متحده آمریکا، ژاپن، برزیل، آفریقای جنوبی، مکزیک و استرالیا مواجه شد. امروزه در اروپا به ویژه در نروژ، انگلیس، هلند و همچنین کشورهای اروپای شرقی مثل روسیه یا جمهوری‌های بالتیک، استفاده از کف قیر در بازیافت سرد به عنوان یک راهکار مناسب، بیش از پیش مورد توجه و پذیرش قرار گرفته است. کاربرد این فن‌آوری در کشورهای با شرایط آب‌وهوایی خشک مثل عربستان، لیبی، مالووی و نیجریه نیز نتایج موفقیت‌آمیزی در پی داشته‌است [۴].

در ایران نیز، در سال‌های اخیر از این روش در

چند پروژه تثبیت، به‌سازی و اصلاح راه‌ها و فرودگاه‌ها استفاده شده‌است. اولین کاربرد تکنولوژی کف قیر در ایران به سال ۱۳۷۷ باز می‌گردد که در آن بخشی از لایه اساس بانده فرودگاه عسلویه با استفاده از کف قیر، تثبیت و بخش دیگر بازیافت شد. از دیگر پروژه‌های اجرا شده در ایران می‌توان به به‌سازی بخشی از بزرگراه تهران-قم، ساخت لایه اساس قیری بزرگراه قشم-درگهان، به‌سازی بزرگراه بهشت زهرا، به‌سازی محور شاهرود-سبزوار، تثبیت اساس فرودگاه‌های اردبیل و همدان، اشاره کرد. همچنین با توجه به استقبال مدیران و دست‌اندرکاران راه‌سازی کشور از این تکنولوژی، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، با همکاری وزارت راه و ترابری در سال ۱۳۸۵، اقدام به تهیه و انتشار مشخصات فنی و اجرائی بازیافت سرد آسفالت (نشریه ۳۳۹) نمود [۵].

تحقیقات آزمایشگاهی که تا کنون در کشورهای مختلف بر روی آسفالت کف قیر صورت گرفته، در مقایسه با بتن آسفالت گرم^۴، بسیار محدود بوده [۱] و در ایران نیز به جز چند مورد، تحقیق چندانی در این زمینه انجام نشده‌است.

از جمله تحقیقات مهم آزمایشگاهی انجام شده در سال‌های اخیر بر روی مخلوط‌های آسفالت کف قیر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

Nataatmadja تأثیر متغیرهای درصد قیر، نوع تراکم، دما، زمان و نحوه عمل آوری را بر روی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالت کف قیر بررسی کرد [۶].

Huang و Chiu مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالت کف قیر را بررسی و از نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالت کف قیر، در حالت اشباع به خشک به عنوان معیاری برای ارزیابی حساسیت رطوبتی آن‌ها استفاده نمودند [۳].

همچنین Kim و Lee، تأثیر دانه‌بندی، درصد قیر و میزان رطوبت را بر استحکام مارشال و پارامترهای حجمی مخلوط‌های آسفالت کف قیری بررسی کردند و بیشینه مقادیر مقاومتی آسفالت را در محدوده قیر ۲/۵٪ و رطوبت بهینه منهای یک، به

دست آوردند [۱].

Long و همکاران، تأثیر نوع دانه‌بندی و درصد سیمان را بر روی مقاومت فشاری تک محوری مخلوط‌های بازیافت شده با کف قیر بررسی نمودند [۷].

Hodgkinson و Visser، تأثیر فیلر غیر فعال و سیمان را بر مخلوط‌های بازیافت شده با استفاده از امولسیون و کف قیر بررسی کردند و به طور کلی مخلوط‌های آسفالت کف قیر را با توجه به محدوده متغیرهای آزمایششان مناسب‌تر از امولسیون قیر معرفی نمودند [۸].

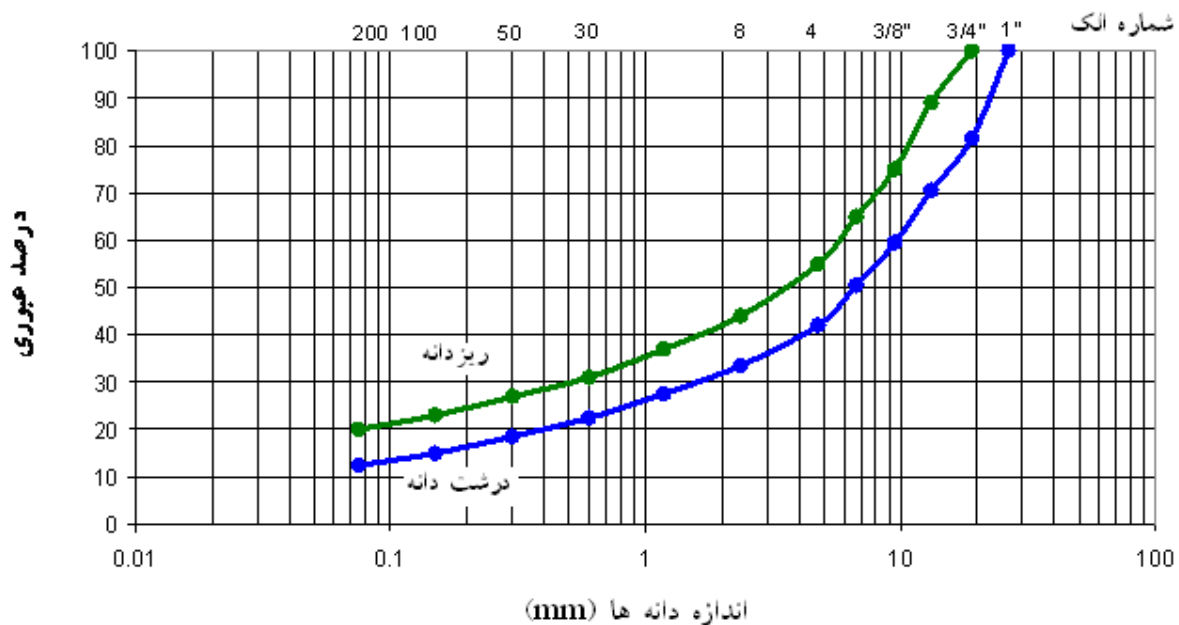
و نیز Mofreh، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های کف قیر را مورد بررسی قرار داد و از نسبت مدول برجهندگی آن‌ها در دو حالت خشک و اشباع، به عنوان معیار استفاده نمود [۹].

در این تحقیق، با استفاده از مصالح خرده آسفالتی به دست آمده از یکی از کارگاه‌های بازیافت آسفالت در حومه تهران، تأثیر پارامترهای مختلف طراحی و بهره‌برداری مخلوط‌های بازیافت سرد با استفاده از کف قیر، شامل نوع دانه‌بندی، میزان قیر، میزان سیمان، میزان تراکم و نحوه عمل آوری، بر روی مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم این مخلوط‌ها، مورد بررسی قرار گرفته‌است.

مشخصات مصالح مورد استفاده مصالح خرده آسفالتی

مصالح خرده آسفالتی مورد استفاده در این تحقیق، از کارگاه بازیافت سرد آسفالت به صورت درجا، در بزرگراه امام رضا واقع در جنوب شرقی تهران تهیه شد. خرده آسفالت‌ها توسط دستگاه آسفالت تراش ساخت شرکت ویرتگن (WR2000) و تا عمق متوسط ۱۶ سانتی‌متری تراشیده شده بودند. لازم به یادآوری است که در این کارگاه بازیافت آسفالت با استفاده از امولسیون قیر انجام می‌گرفت.

در توزیع کف قیر، بخش ریزدانه یا به اصطلاح فیلر موجود در مصالح سنگی همچنین فیلر فعال افزوده شده به مصالح مانند سیمان و آهک، نقش اساسی ایفا می‌کنند [۱۰]. جهت بررسی تأثیر دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی، با توجه به محدودیت انبار نمونه‌های مورد آزمایش، از دو نوع دانه‌بندی ریز و متوسط مطابق با محدوده دانه‌بندی پیشنهاد شده در مرجع ۱۱ استفاده شد (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود میزان فیلر در دانه‌بندی ریز و متوسط به ترتیب برابر ۲۰٪ و ۱۲/۵٪ می‌باشد.

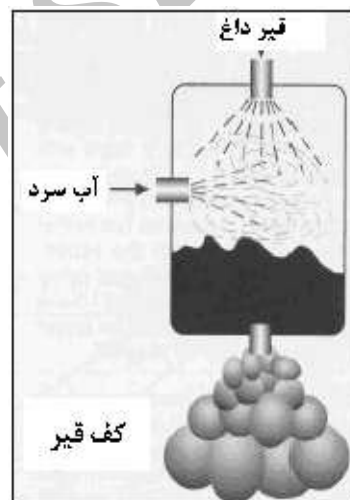


شکل ۱: نمودار دانه‌بندی‌های ریز و متوسط مصالح خرده آسفالتی مورد استفاده در این تحقیق

کف قیر

کف قیر را می‌توان قیر حجیم شده‌ای نامید که خصوصیات کف قیر با دو مشخصه زیر معرفی می‌شود:

نسبت انبساط^۷ که نسبت حداکثر حجم قیر در حالت کف به حجم قیر پس از محو شدن کف تعریف می‌شود و تعیین‌کننده چگونگی توزیع قیر در مخلوط است و **نیمه عمر**^۸، مدت زمانی که طی آن حداکثر حجم کف به نصف مقدار اولیه خود می‌رسد (برحسب ثانیه) و معرف پایداری کف قیر و سرعت محو شدن آن در مدت اختلاط قیر و مصالح سنگی است [۵]. در شکل ۲ فرآیند تولید کف قیر به صورت شماتیک نشان داده شده‌است.



شکل ۲: شمای فرآیند تولید کف قیر

دو مشخصه فوق به نوع و درجه نفوذ قیر انتخاب شده، مقدار آب تزریق شده به قیر داغ و درجه حرارت قیر هنگام تولید کف بستگی دارد. هرچه نسبت انبساط افزایش یابد کندروانی قیر کمتر و اختلاط مصالح سنگدانه‌ای و کف قیر بهتر انجام می‌شود. همچنین هرچه زمان نیمه‌عمر زیادتر باشد، فرصت بیشتری برای اختلاط کف قیر و مصالح وجود دارد. ضمن اینکه مطابق شکل ۳، رفتار این دو متغیر عکس یکدیگر است. به عبارت دیگر نسبت انبساط وقتی زیاد می‌شود که مقدار آب افزایش یابد. در حالی که هر قدر مقدار آب

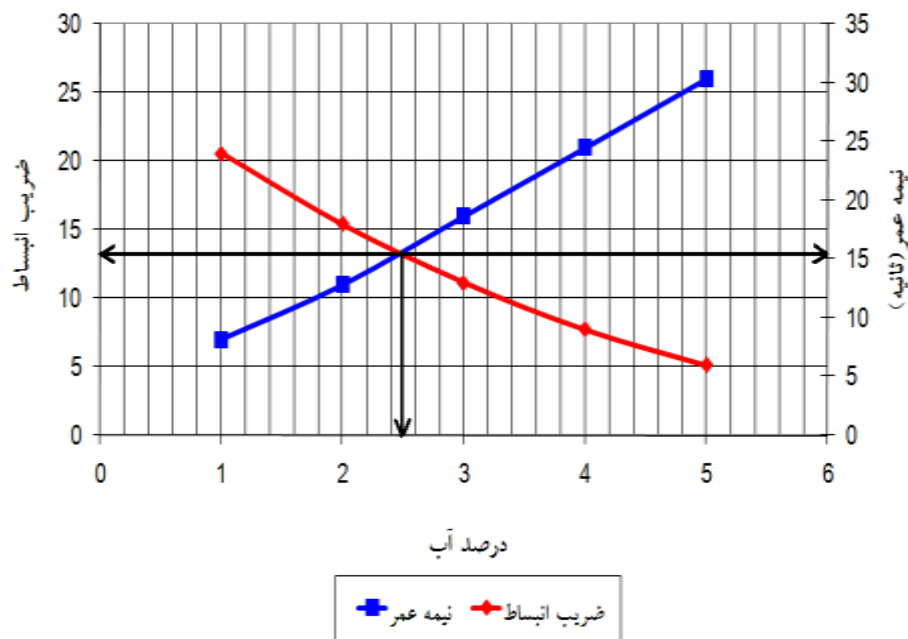
افزایش یابد نیمه‌عمر کوتاه‌تر خواهد شد [۵].

در تحقیق حاضر، جهت تولید کف قیر و ساخت مخلوط، از قیر خالص ۶۰/۷۰ پالایشگاه تهران استفاده شد. مشخصه‌های اصلی نمونه قیر مورد استفاده، آزمایش شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده‌است.

جدول ۱: مشخصات قیر مورد استفاده

Penetration (0.01mm)	67
Softening Point (Ring & Ball) (°C)	48.5
Viscosity @ 120 °C	800
Viscosity @ 135 °C	430
Viscosity @ 160 °C	140
Ductility (cm)	More than 100
Flash Point (°C)	294

در شکل ۳، نمودار بهینه‌سازی ضریب انبساط و نیمه عمر کف قیر تولید شده در دمای ۱۷۰°C در این تحقیق نشان داده شده‌است. منظور از بهینه‌سازی کف قیر، انتخاب درصد آب مناسب برای تولید کف قیر با ضریب انبساط و نیمه‌عمر مورد نظر است. حداقل ضریب انبساط و نیمه‌عمر برای قیر خالص به ترتیب معادل ۱۰ و ۱۲ ثانیه پیشنهاد شده‌است [۵ و ۲]. در این تحقیق، ۲/۵٪ آب جهت حصول ضریب انبساط ۱۳ و نیمه‌عمر ۱۶ ثانیه برای ساخت کف قیر انتخاب شد.



شکل ۳: نمودار بهینه‌سازی کف قیر

فیلر فعال

در این تحقیق از سیمان تیپ ۲ به عنوان فیلر فعال استفاده شد و تأثیر افزودن درصدهای مختلف آن بر مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول برجهندگی و مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های آسفالت کف قیر مورد بررسی قرار گرفت.

تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

در بخش اول این تحقیق، تأثیر دو نوع دانه‌بندی (متوسط و ریز)، سه درصد قیر (۲٪، ۳٪ و ۴٪)، سه درصد سیمان (۰٪، ۱٪ و ۲٪)، دو حالت تراکم (۵۰ و ۷۵ ضربه) و چهار حالت عمل آوری (عمل آوری خشک در دمای ۴۰ درجه، عمل آوری خشک در دمای ۲۵ درجه، عمل آوری اشباع و بدون عمل آوری) بر روی مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم ۱۴۴ نمونه آسفالت کف قیر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌است. جهت تراکم نمونه‌ها از چکش و قالب تراکم ۴ اینچی مارشال استفاده شد.

همچنین ۱۰۸ نمونه تکمیلی برای اندازه‌گیری تغییرات مدول برجهندگی و مقاومت فشاری تک محوری

در بخش دوم تحقیق انجام پذیرفته‌است که نتایج هر دو بخش تحقیق در این مقاله ارائه خواهد شد. در تحقیق دوم تغییرات درصد قیر (۱٪، ۲٪، ۳٪) بوده و تراکم، دانه‌بندی و میزان سیمان عیناً مانند ۱۴۴ نمونه قبلی می‌باشد. از آنجایی که نتایج مربوط به مدول برجهندگی منطبق بر بخش اول تحقیق می‌باشد، به منظور کاهش حجم مقاله فقط نتایج مربوط به مقاومت فشاری تک محوری از تحقیق دوم در این مقاله ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که کلیه مراحل ساخت و آزمایش نمونه‌های آسفالت کف قیر در آزمایشگاه مادر تخصصی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری انجام شد. مراحل ساخت نمونه‌های آسفالت کف قیر مورد آزمایش به شرح زیر می‌باشد [۱۲].

گام اول: بهینه‌سازی کف قیر

- ۱- بررسی ضریب انبساط و نیمه‌عمر کف قیر، در سه دما و درصد آب متفاوت.
- ۲- انتخاب قیر و دمای تولید کف مناسب با استفاده از نمودار ضریب انبساط - نیمه‌عمر.
- ۳- انتخاب درصد آب بهینه جهت حصول توامان بیشینه

بلافاصله پس از اجرای لایه و حالت عمل آوری به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد شبیه ساز حالت عادی بهره‌برداری سه ماه پس از ساخت لایه می‌باشد [۱۱].

گام ششم: آزمایش

انجام آزمایش‌های مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم پس از اتمام عمل آوری نمونه‌ها.

مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی^۵، مدول ارتجاعی در بارگذاری دوره‌ای با کرنش‌های بسیار کوچک و یکی از مشخصه‌های مکانیکی مهم مخلوط‌های آسفالتی است. به طور کلی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در سیستم روسازی راه، ویسکوالاستیک بوده و تابع سرعت بارگذاری، شدت آن و درجه حرارت می‌باشد. اگر بار در مقایسه با مقاومت مصالح، کوچک باشد و در طی دوره زمانی طولانی تکرار گردد، تغییر شکل، تحت هر تکرار بار، تقریباً به طور کامل برگشت‌پذیر خواهد بود [۶].

در این تحقیق مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از فریم آزمایش کشش غیرمستقیم و دستگاه UTM14 با قابلیت بارگذاری دوره‌ای و اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها، و طبق استاندارد ASTM4123 در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. آزمایش تعیین مدول برجهندگی، غیر مخرب بوده و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده در آزمایشگاه و یا نمونه‌گیری شده از محل، قابل انجام است. در این بررسی تنظیمات استاندارد دستگاه آزمایش به قرار زیر بوده است:

- شکل بارگذاری: زنگوله ای
- زمان دوره بارگذاری: ۰/۱ ثانیه
- دوره بارگذاری: ۲ ثانیه
- تعداد سیکل پیش بارگذاری: ۱۵۰
- تعداد سیکل بارگذاری اصلی: ۵
- دمای انجام آزمایش: ۲۵ درجه سانتی گراد
- دامنه بار اعمال شده به نمونه: ۵۰۰ نیوتون
- نسبت پواسون مفروض: ۰/۳۵

ضریب انبساط و نیمه‌عمر با استفاده از نمودار ضریب انبساط و نیمه‌عمر بر حسب درصد آب.

گام دوم: ساخت دانه‌بندی مورد نظر

- ۱- دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی و تفکیک آن‌ها بر حسب اندازه دانه
- ۲- بازترکیب مصالح خرده آسفالتی با توجه به دانه‌بندی مورد نظر (ریز و متوسط) و ساخت ۹ مخلوط ۱۰ کیلوگرمی برای دانه‌بندی ریز و متوسط.
- ۳- تعیین درصد رطوبت بهینه برای هر یک از دانه‌بندی‌های ریز و متوسط، به روش پروکتور اصلاح شده.
- ۴- اضافه کردن اوزان متناظر سیمان برای درصدهای ۰٪، ۱٪ و ۲٪ به مخلوط مصالح دانه‌ای.

گام سوم: ساخت مخلوط کف قیر

- ۱- محاسبه جرم آب مورد نیاز جهت ساخت مخلوط آسفالت کف قیر.
- ۲- محاسبه جرم مورد نیاز کف قیر با توجه به درصدهای مورد نظر (۲٪، ۳٪ و ۴٪).
- ۳- اضافه کردن وزن آب محاسبه شده به مخلوط و اختلاط آن به مدت حدود یک دقیقه توسط مخلوط‌کن با مصالح دانه‌ای. سپس تزریق وزن محاسبه شده کف قیر با توجه به درصد قیر مورد نظر (۲٪، ۳٪ و ۴٪)، به مخلوط مصالح و ادامه عمل اختلاط به مدت ۳۰ ثانیه دیگر.

گام چهارم: تراکم نمونه‌ها

تقسیم نمونه‌های استخراج شده از هر مخلوط ۱۰ کیلوگرمی آسفالت کف قیر به دو گروه و متراکم کردن نمونه‌های هر گروه به ترتیب با ۷۵ و ۵۰ ضربه تراکم چکش مارشال.

گام پنجم: عمل آوری

عمل آوری هر یک از چهار نمونه متراکم شده با انرژی ثابت تراکم (۷۵ یا ۵۰ ضربه)، به یکی از روش‌های ۷۲ ساعت عمل آوری در دمای ۴۰°C، ۷۲ ساعت عمل آوری در دمای ۲۵°C، عمل آوری اشباع و بدون عمل آوری. یادآوری می‌شود که حالت بدون عمل آوری معرف ویژگی لایه بازیافت شده با کف قیر برای تحمل ترافیک کارگاهی

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم ابزار مناسبی برای ارزیابی "مقاومت کششی" و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین از این آزمایش برای ارزیابی "حساسیت رطوبتی" و "عمر خستگی" نمونه‌های آسفالتی نیز استفاده می‌شود [۱]. در جدول ۲ مشخصات اصلی آزمایش برای کاربردهای مذکور ارائه شده است.

بین مخلوط‌های تولید شده با کف قیر و مخلوط‌های گرم و یا امولسیون قیری از نظر نحوه پخش و توزیع قیر و اندود شدن سنگدانه‌ها اختلاف اساسی وجود دارد. در حالت استفاده از قیرهای خالص و امولسیون قیر، تمام سطح سنگدانه‌ها با قیر پوشش داده می‌شود. در حالی که با کف قیر سنگدانه‌های درشت به طور کامل اندود نمی‌شوند و قیر بیشتر سطح ریزدانه‌ها را می‌پوشاند که نهایتاً ملاتی تولید می‌شود که باعث چسبندگی مخلوط و سنگ دانه‌های درشت و ریز به یکدیگر خواهد شد. از آنجا که سنگدانه‌ها در مخلوط‌های آسفالت کف قیر به طور کامل قیراندود نمی‌شوند، حساسیت رطوبتی آن‌ها به عنوان یکی از معیارهای اصلی طراحی آنان مطرح می‌باشد.

در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، بارگذاری توسط دو تیغه یا نوار فلزی مطابق استاندارد AASHTO-T283 انجام می‌شود [۱۱]. (شکل ۵) هنگام آزمایش، نمونه در قالب بارگذاری مربوطه قرار داده می‌شود و بارگذاری با سرعت ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر (۲ اینچ در دقیقه) به صورت قطری اعمال می‌شود. بار نهائی در موقع شکستن نمونه (دو نیمه شدن) اندازه‌گیری شده و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه با استفاده از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (2)$$

که در آن:

ITS: مقاومت کششی غیرمستقیم برحسب کیلوپاسکال

پیش از آزمایش، تمام نمونه‌ها به مدت حداقل دو ساعت در دمای ۲۵°C قرار داده می‌شوند. شکل ۱ قالب آزمایش مدول برجهندگی، نمونه مورد آزمایش و ابزار اندازه‌گیری تغییرشکل‌ها را نشان می‌دهد. مدول برجهندگی نمونه‌ها در این روش با استفاده از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$M_r = \frac{L(v + 0.2v)}{Dt} \quad (1)$$

که در آن:

M_r : مدول برجهندگی برحسب مگاپاسکال
 L : دامنه نیروی بیشینه اعمال شده به نمونه برحسب نیوتون
 v : نسبت پواسون که برای مخلوط‌های آسفالتی معمولاً ۰/۳۵ در نظر گرفته می‌شود.
 D : میانگین تغییرشکل افقی اندازه‌گیری شده در طرفین قطر نمونه بر حسب میلی‌متر
 t : میانگین ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۴: دستگاه آزمایش مدول برجهندگی

به صورت خشک می‌باشد. متوسط مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، به ترتیب معادل ۲۸۰۰ مگاپاسکال و ۳۴۰ کیلوپاسکال می‌باشد.

جهت ارائه نتایج قابل مقایسه و همچنین جلوگیری از پراکندگی آن‌ها و به علت محدودیت گنجایش مقاله و عدم امکان ارائه کلیه نتایج، مخلوطی با شرایط، دانه‌بندی متوسط، درصد قیر ۳٪، درصد سیمان ۱٪، تعداد ضربات تراکم ۷۵ و عمل آوری شده به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴۰°C، به عنوان مخلوط با شرایط استاندارد تعریف و در ارائه نتایج، تغییرات عوامل مختلف بر آن به عنوان نمونه، بررسی شده‌است.

تأثیر درصد قیر

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیر مستقیم مشاهده می‌شود با افزایش درصد قیر از ۲٪ به ۴٪، مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، کاهش می‌یابد که این کاهش به طور متوسط، در افزایش قیر از ۲٪ به ۳٪ به ترتیب معادل ۸٪ و ۱٪ و در تغییر آن از ۳٪ به ۴٪ به ترتیب معادل ۱۱٪ و ۸٪ می‌باشد.

اشکال ۶ و ۷ به عنوان نمونه به ترتیب مدول برجهندگی و تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی و تراکم استاندارد را برای سه درصد سیمان ۰٪، ۱٪ و ۲٪ برحسب تغییر درصد قیر، نشان می‌دهند.

P: بار نهائی در هنگام گسیختگی برحسب کیلونیوتون
D: قطر نمونه برحسب میلی‌متر
T: ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۴: مشخصات آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برای ارزیابی معیارهای مختلف [۱۱]

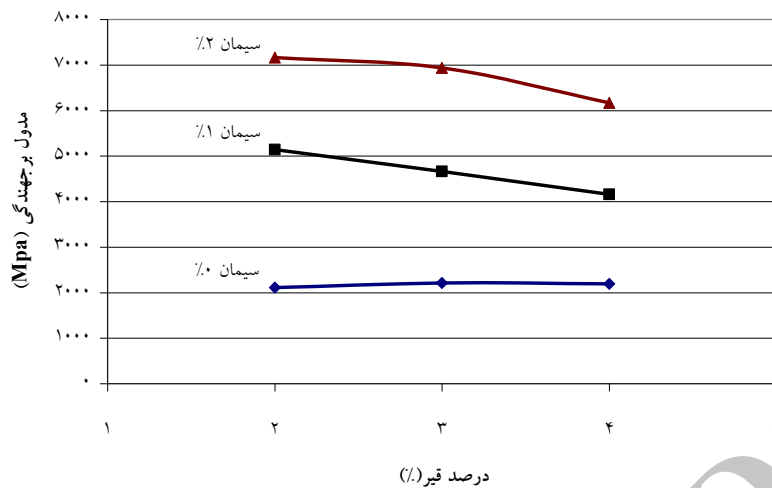
Application	Deformation Rate (mm/min)	Temperature (°C)
ITS	50	25
Water Sensitivity	50	25
Fatigue Cracking	50	-10, 4, 20



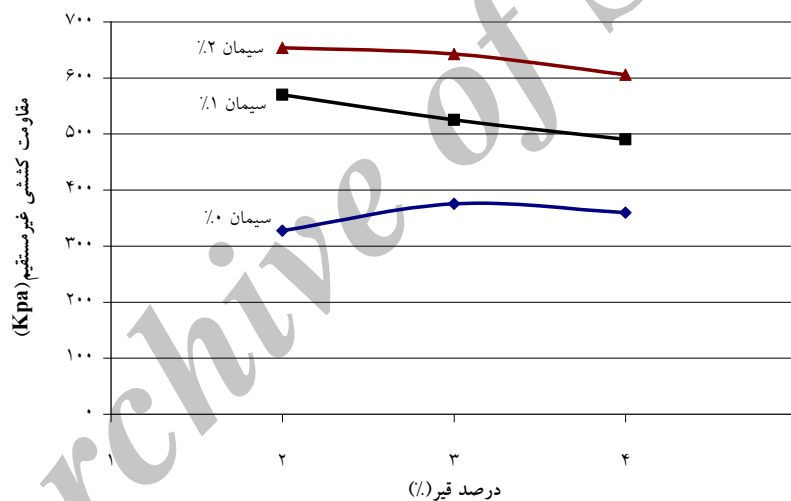
شکل ۵: دستگاه آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

ارائه و تفسیر نتایج آزمایش‌ها

مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق به ترتیب در محدوده ۲۹۲ تا ۷۱۶۲ مگاپاسکال و ۷۹ تا ۶۹۶ کیلوپاسکال می‌باشد. که مرز پائین آن مربوط به نمونه‌های فاقد سیمان و اشباع بوده و مرز بالای آن مربوط به نمونه‌های حاوی سیمان و عمل آوری شده



شکل ۶: تغییر مدول برجهندگی نمونه‌های با دانه‌بندی و تراکم استاندارد و سه درصد سیمان ۰٪، ۱٪ و ۲٪ بر حسب تغییر درصد قیر



شکل ۷: تغییر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های با دانه‌بندی و تراکم استاندارد و سه درصد سیمان ۰٪، ۱٪ و ۲٪ بر حسب تغییر درصد قیر

همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش سیمان از ۰٪ به ۱٪ در نمونه‌های حاوی ۲٪ قیر باعث افزایش چشمگیری در مدول برجهندگی و مقاومت کششی آنان می‌شود که این میزان افزایش، در نمونه‌های حاوی ۳٪ و ۴٪ قیر، کمتر و تقریباً یکسان است. همچنین اثر افزایش سیمان از ۱٪ به ۲٪ بر مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، در درصدهای مختلف قیر، در مقایسه با تأثیر افزایش سیمان از ۰٪ به ۱٪، کمتر می‌باشد.

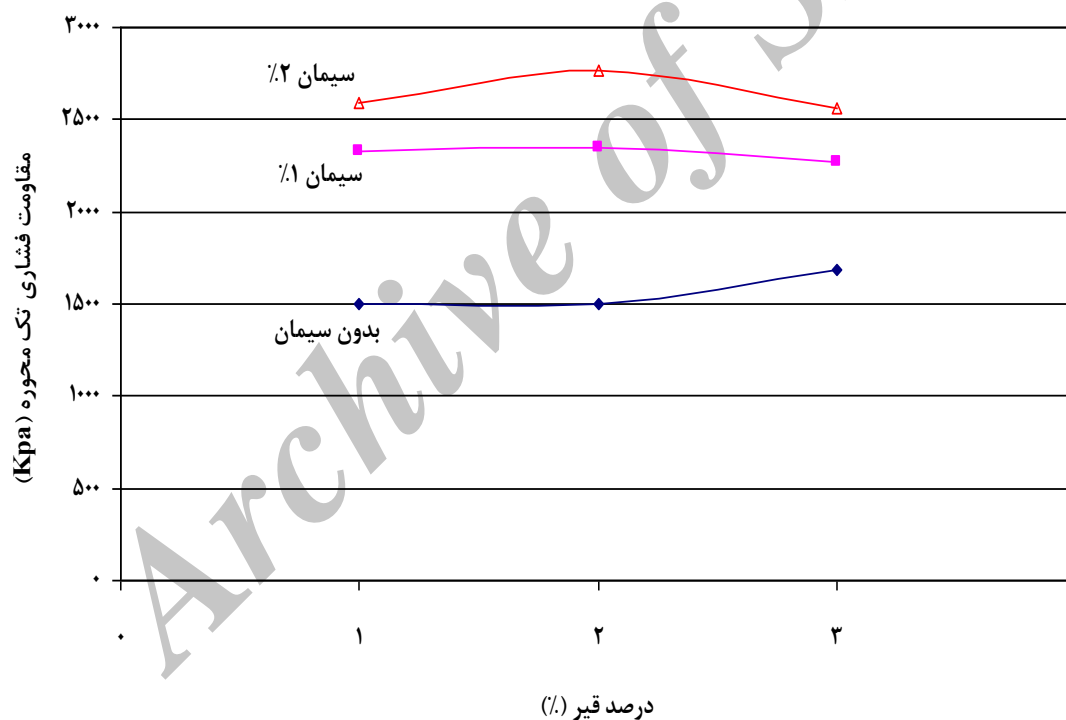
شکل ۸ تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های

همانطور که مشاهده می‌شود، مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی سیمان، در محدوده قیر ۲٪، بیشینه و با افزایش درصد قیر، کاهش می‌یابند در حالی که پارامترهای مذکور مربوط به نمونه‌های فاقد سیمان، در محدوده قیر ۳٪، بیشینه و با افزایش و یا کاهش درصد قیر، اندکی کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که افزودن سیمان باعث کاهش درصد قیر متناظر با بیشینه مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود.

همین طور در درصد قیر ۲٪، مقادیر مقاومت فشاری تکمحوری نمونه‌ها با افزایش سیمان از ۰٪ به ۱٪ معادل ۵۷٪ و با تغییر سیمان از ۱٪ به ۲٪، معادل ۱۸٪ و در درصد قیر ۳٪، با افزایش سیمان از ۰٪ به ۱٪ معادل ۳۵٪ و با تغییر سیمان از ۱٪ به ۲٪ معادل ۱۳٪، افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش سیمان از ۰٪ به ۱٪ در نمونه‌های حاوی ۱٪ و ۲٪ قیر باعث افزایش چشمگیری در مقاومت فشاری تکمحوری آنان می‌شود. که این میزان افزایش، در نمونه‌های حاوی ۳٪ قیر، کمتر است. همچنین اثر افزایش سیمان از ۱٪ به ۲٪ بر مقاومت فشاری تکمحوری نمونه‌ها، در درصدهای مختلف قیر، در محدوده ۱۱٪ تا ۱۸٪ درصد می‌باشد که در مقایسه با تأثیر افزایش سیمان از ۰٪ به ۱٪ که در محدوده ۳۵٪ تا ۵۷٪ است، کمتر می‌باشد.

ساخته شده با دانه‌بندی متوسط و تراکم ۷۵ ضربه مارشال را در سه درصد سیمان ۰٪، ۱٪ و ۲٪ برحسب تغییرات درصد قیر، نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری تکمحوری نمونه‌های حاوی سیمان، در محدوده قیر ۲٪، بیشینه و با افزایش و یا کاهش درصد قیر، کاهش می‌یابد در حالی که مقاومت فشاری تکمحوری نمونه‌های فاقد سیمان، در محدوده قیر ۳٪، بیشتر بوده و با کاهش درصد قیر، اندکی کاهش می‌یابد. این مسئله مبین آن است که افزودن سیمان باعث کاهش درصد قیر متناظر با بیشینه مقاومت فشاری تکمحوری می‌شود.

همچنین در درصد قیر ۱٪، با افزایش درصد سیمان، مقاومت فشاری تکمحوری نمونه‌ها به طور متوسط، به ترتیب با افزایش سیمان از ۰٪ به ۱٪، معادل ۵۵٪ و با تغییر سیمان از ۱٪ به ۲٪ معادل ۱۱٪، افزایش می‌یابد.



شکل ۸: تغییر مقاومت فشاری تکمحوری بر حسب تغییر درصد قیر در نسبت‌های مختلف سیمان (دانه‌بندی متوسط)، ۷۵ ضربه تراکم مارشال، عمل‌آوری خشک

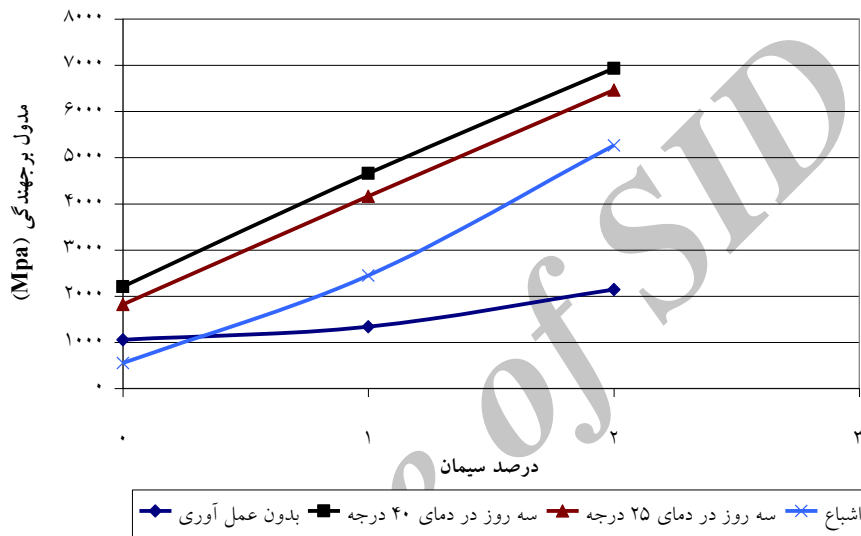
افزایش درصد سیمان از ۱٪ به ۲٪، معادل ۵۶٪ و ۳۱٪ می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که نرخ افزایش مدول برجهنگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها افزایش درصد سیمان از ۰٪ به ۱٪، به ترتیب تقریباً ۳ و ۲ برابر حالت دیگر است. بنا به طبیعت سیمان که ماده چسباننده با سختی نسبتاً بالاست، طبیعی است با افزایش درصد

تأثیر میزان سیمان

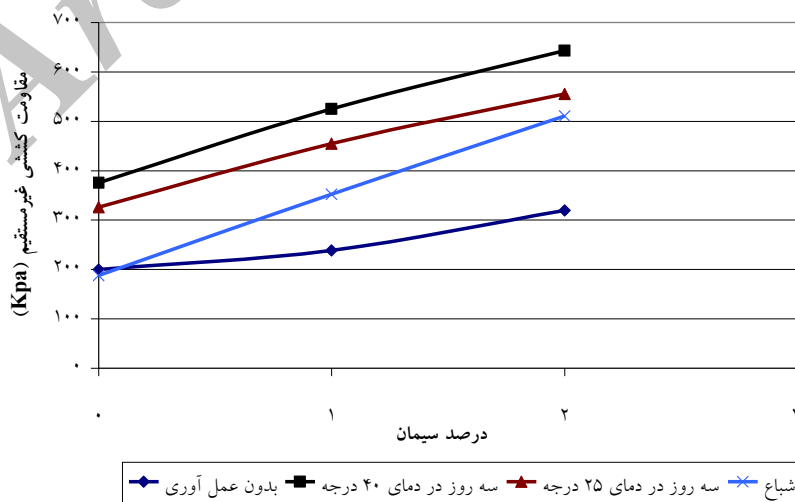
با افزایش درصد سیمان از ۰٪ به ۲٪، مدول برجهنگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها افزایش می‌یابد، این افزایش به طور متوسط، در تغییر درصد سیمان از ۰٪ به ۱٪، به ترتیب معادل ۱۷۰٪ و ۷۸٪ و در

غیرمستقیم نمونه‌های عمل آوری نشده، با افزایش درصد سیمان، کمتر از سایر روش‌های عمل آوری است که دلیل آن به ماهیت گیرش سیمان و افزایش سختی آن در طول زمان باز می‌گردد. در نمونه‌های عمل آوری نشده در مقایسه با سایر روش‌های عمل آوری، سیمان فرصت کافی جهت انجام فعل و انفعالات شیمیایی و گیرش مناسب ندارد.

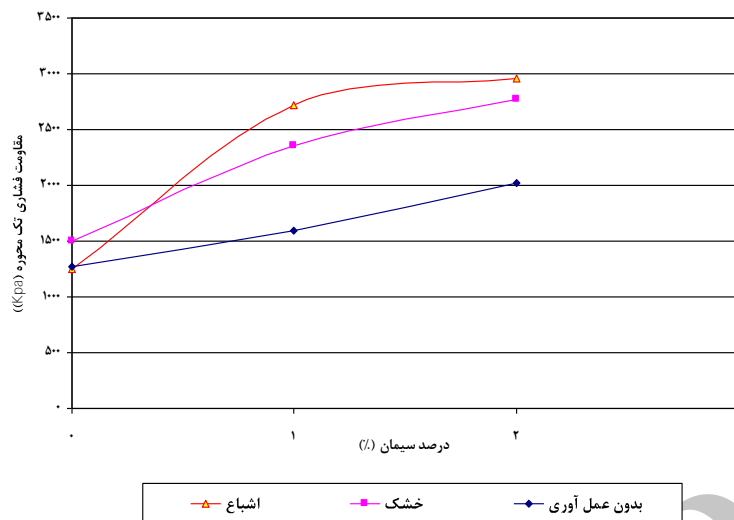
سیمان، مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نیز افزایش یابند. اشکال ۹ و ۱۰، به ترتیب تغییرات مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی، درصد قیر و تعداد ضربات تراکم استاندارد را بر حسب تغییرات درصد سیمان، در حالت‌های مختلف عمل آوری نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، نرخ افزایش مدول برجهندگی و مقاومت کششی



شکل ۹: تغییر مدول برجهندگی نمونه‌های با دانه‌بندی، درصد قیر و تراکم استاندارد، بر حسب تغییر درصد سیمان در حالات مختلف عمل آوری



شکل ۱۰: تغییر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های با دانه‌بندی، درصد قیر و تراکم استاندارد، بر حسب تغییر درصد سیمان در حالات مختلف عمل آوری



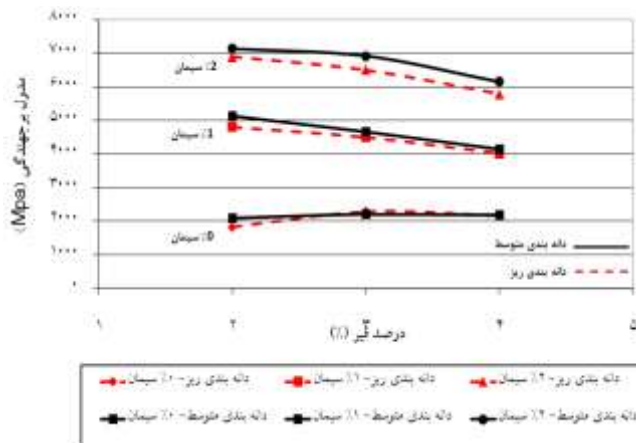
شکل ۱۱: تغییر مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب تغییر درصد سیمان در حالات مختلف عمل‌آوری (دانه‌بندی متوسط، ۲٪ قیر و تراکم ۷۵ ضربه مارشال)

تأثیر نوع دانه‌بندی

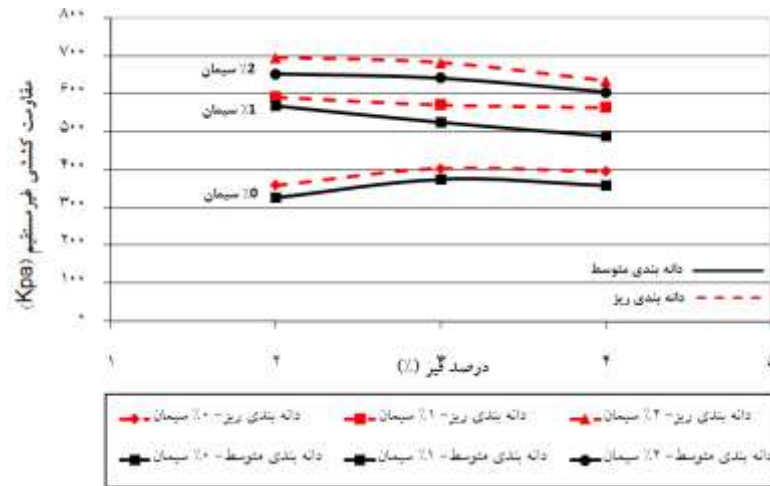
مدول برجهنگی با تغییر دانه‌بندی از ریز به متوسط، حدود ۵٪ افزایش و مقاومت کششی غیرمستقیم حدود ۹٪ کاهش می‌یابد.

اشکال ۱۲ و ۱۳ به عنوان نمونه، به ترتیب تغییرات مدول برجهنگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با تراکم و عمل‌آوری استاندارد را بر حسب تغییرات دانه‌بندی و درصد سیمان، نشان می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌شود، اولاً تأثیر دانه‌بندی در تمام حالات بسیار کم است، ثانیاً همانگونه که در اشکال ۹ و ۱۰ نیز نشان داده شده بود، نقش سیمان در افزایش مدول برجهنگی و مقاومت کششی غیرمستقیم بسیار چشمگیر می‌باشد.

شکل ۱۱ تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های شاخص یعنی نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی متوسط، درصد قیر ۲٪ و تعداد ضربات تراکم ۷۵ ضربه مارشال را بر حسب تغییرات درصد سیمان، در حالت‌های مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، نرخ افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های عمل‌آوری نشده، با افزایش درصد سیمان، کمتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده است که علت آن به ماهیت گیرش سیمان و افزایش سختی آن در طول زمان باز می‌گردد. در نمونه‌های عمل‌آوری نشده در مقایسه با سایر روش‌های عمل‌آوری، سیمان فرصت کافی جهت انجام فعل و انفعالات شیمیایی و گیرش مناسب ندارد.



شکل ۱۲: تغییرات مدول برجهنگی نمونه‌های با عمل‌آوری و تراکم استاندارد، بر حسب تغییر دانه‌بندی، درصد سیمان و درصد قیر

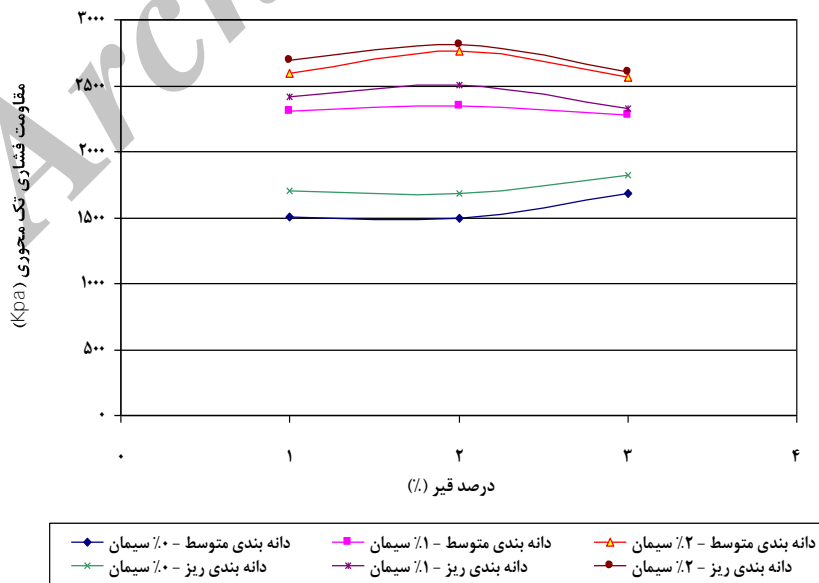


شکل ۱۳: تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های با عمل آوری و تراکم استاندارد، بر حسب تغییر دانه‌بندی، درصد سیمان و درصد قیر

خصوصیات چسبندگی مصالح نیز می‌باشد، افزایش پیدا می‌کند.

در شکل ۱۴ تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته شده با تراکم ۷۵ ضربه مارشال و عمل آوری خشک بر حسب تغییرات دانه‌بندی و درصد سیمان، نشان داده شده‌است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، اولاً تأثیر دانه‌بندی در تمام حالات بسیار کم است، ثانیاً همانگونه که در شکل ۹ نیز نشان داده شده بود، نقش سیمان در افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری بسیار چشمگیر می‌باشد.

علت افزایش مدول برجهندگی در مخلوط‌های ساخته شده با دانه‌بندی متوسط نسبت به دانه‌بندی ریز، وجود سنگدانه‌های درشت‌تر در اسکلت دانه‌بندی آن و در نتیجه افزایش سختی کل مخلوط است. از طرف دیگر، ملات حاصل از ریزدانه‌ها و قیر در مخلوط آسفالت کف قیر، عامل اصلی چسبندگی بین دانه‌ها می‌باشد همچنین ریزدانه‌ها در توزیع کف قیر در مخلوط نقش اساسی ایفا می‌کنند [۵] و از آنجا که با تغییر دانه‌بندی از متوسط به ریز، بخش ریزدانه مخلوط افزایش پیدا می‌کند، مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط که به طور غیرمستقیم بیانگر



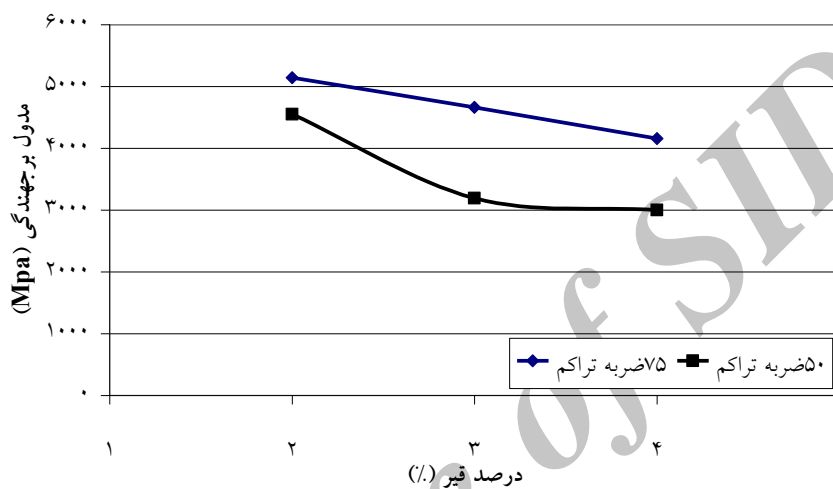
شکل ۱۴: تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب تغییر دانه‌بندی، درصد سیمان و درصد قیر (عمل‌آوری خشک و تراکم ۷۵ ضربه مارشال)

تأثیر انرژی تراکم

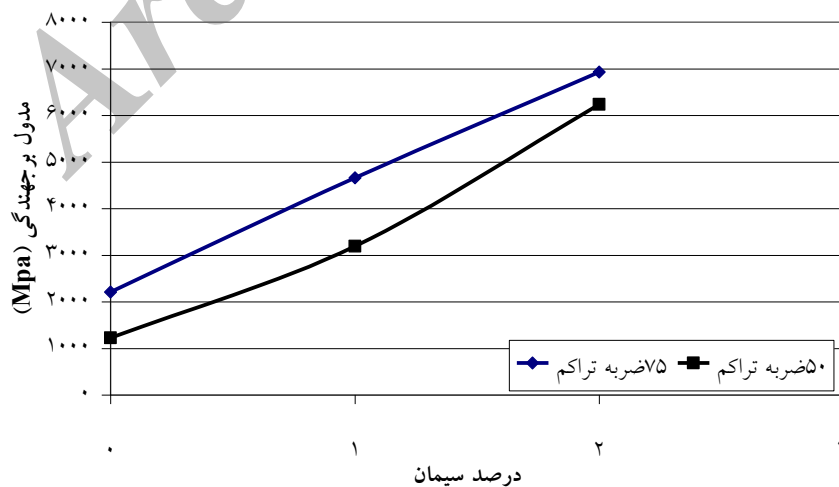
مطابق نتایج به دست آمده مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم، با افزایش انرژی تراکم (افزایش تعداد ضربات تراکم از ۵۰ به ۷۵)، به ترتیب معادل ۳۰٪ و ۴۰٪ افزایش می یابد.

اشکال ۱۵ تا ۱۸ تغییر مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های کف قیر ساخته شده با دانه‌بندی، درصد سیمان و عمل آوری استاندارد را برحسب

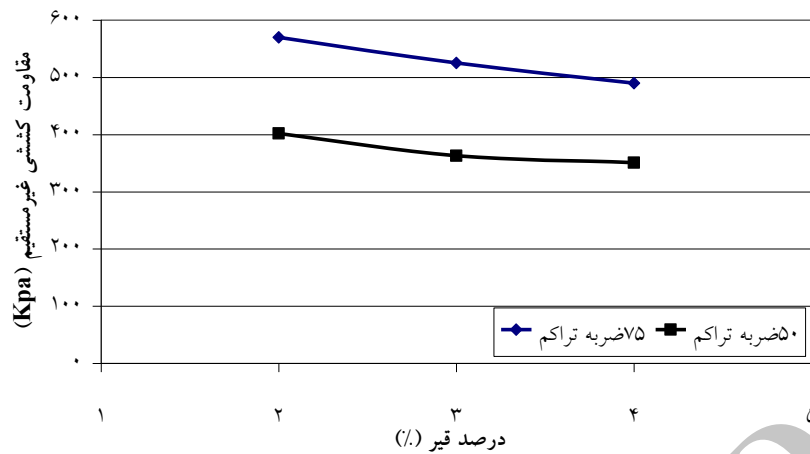
تغییر درصد قیر (شکل ۱۶ و ۱۷) و درصد سیمان (شکل ۱۸ و ۱۹) و ضربات تراکم، نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود عملیات تراکم با ۷۵ ضربه چکش مارشال، به علت وارد کردن انرژی تراکمی بیشتر باعث بهبود تراکم و افزایش مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در مقایسه با تراکم با ۵۰ ضربه چکش می‌شود.



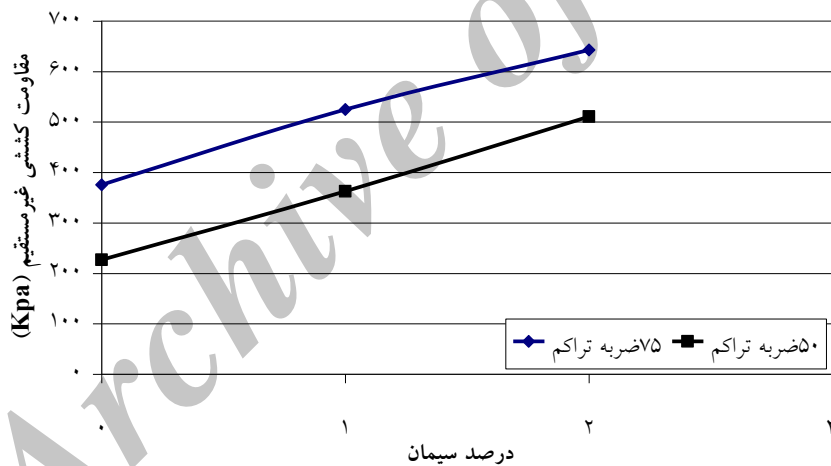
شکل ۱۵: تغییر مدول برجهندگی نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی، درصد سیمان و عمل آوری استاندارد، به ازای تغییر درصد قیر، در دو حالت تراکم



شکل ۱۶: تغییر مدول برجهندگی نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی، درصد سیمان و عمل آوری استاندارد، به ازای تغییر درصد قیر، در دو حالت تراکم



شکل ۱۷: تغییر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های ساخته شده با دانه بندی ، درصد سیمان و عمل آوری استاندارد، به ازای تغییر درصد قیر، در دو حالت تراکم

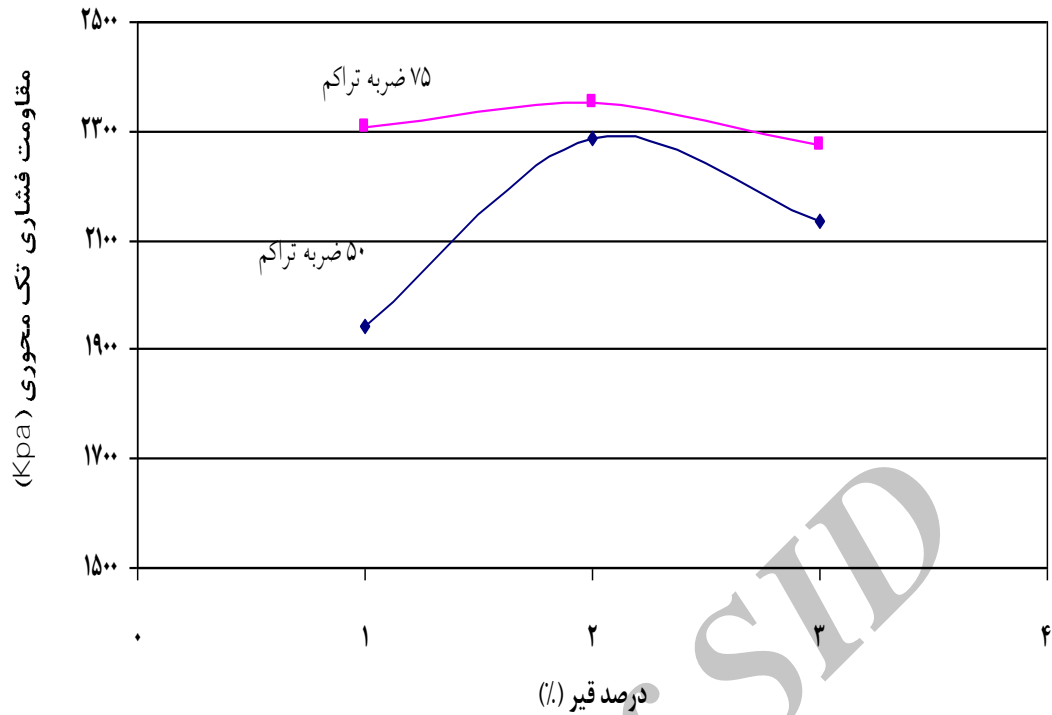


شکل ۱۸: تغییر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های ساخته شده با دانه بندی ، درصد قیر و عمل آوری استاندارد، به ازای تغییر درصد سیمان، در دو حالت تراکم

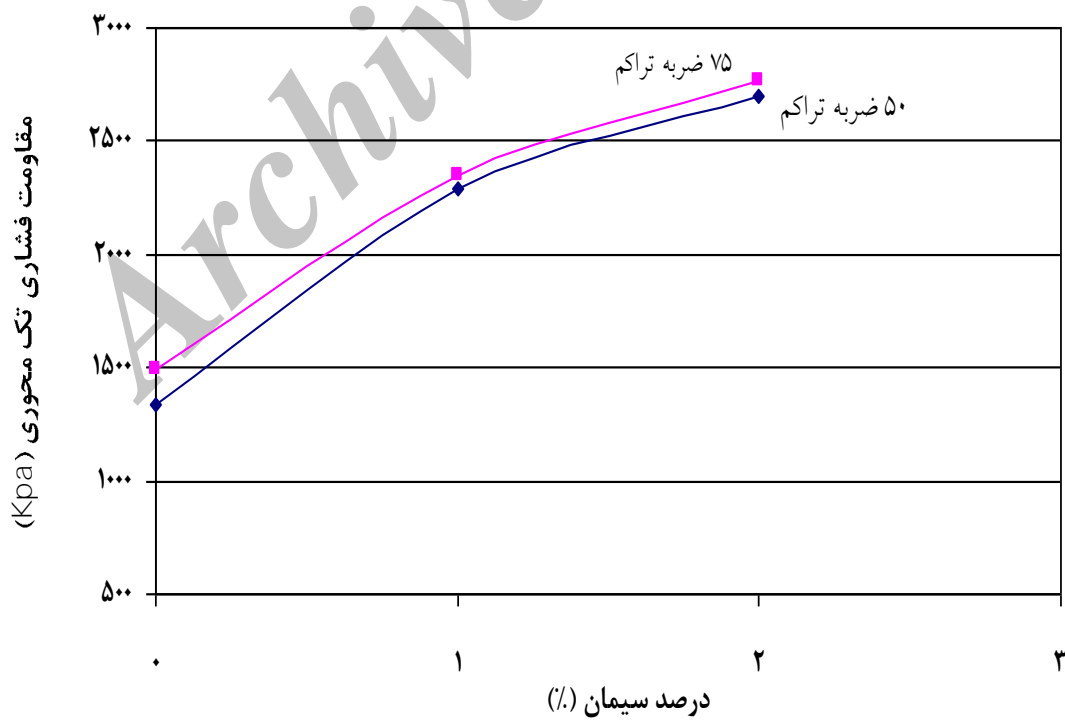
می شود عملیات تراکم با ۷۵ ضربه چکش مارشال، به علت وارد کردن انرژی تراکمی بیشتر باعث بهبود تراکم و افزایش مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها در مقایسه با تراکم با ۵۰ ضربه چکش می شود.

با توجه به شکل ۱۹ مشاهده می شود که تأثیر تغییرات درصد قیر بر مقاومت فشاری تک محوری با افزایش تعداد ضربات تراکم کاهش می یابد.

با افزایش تعداد ضربات تراکم از ۵۰ ضربه به ۷۵ ضربه مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها، معادل ۱۵٪ افزایش می یابد. اشکال ۱۹ و ۲۰ تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه های کف قیر ساخته شده با دانه بندی متوسط، ۱٪ سیمان و عمل آوری خشک را برحسب تغییرات درصد قیر (شکل ۱۹) و درصد سیمان (شکل ۲۰) و ضربات تراکم، نشان می دهند. همانطور که مشاهده



شکل ۱۹: تغییرات مقاومت فشاری تک محوری، به ازاء تغییر درصد قیر، در دو حالت تراکم (دانه بندی متوسط، ۱٪ سیمان و عمل آوری خشک)



شکل ۲۰: تغییرات مقاومت فشاری تک محوری، به ازاء تغییر درصد سیمان، در دو حالت تراکم (دانه بندی متوسط، ۲٪ قیر و عمل آوری خشک)

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، میانگین مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، با افزایش مدت زمان و دمای عمل آوری، افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۳ کمترین مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم، مربوط به نمونه‌های عمل آوری نشده بوده و به ترتیب در نمونه‌های اشباع، عمل آوری شده به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه و ۷۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه افزایش می‌یابد.

اگر مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل آوری شده با هر یک از روش‌های عمل آوری، با مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل آوری نشده، مقایسه شوند، بیشترین نرخ افزایش مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم، به ترتیب با ۱۷۹٪ و ۱۰۲٪ افزایش، مربوط به حالت عمل آوری خشک در دمای ۴۰°C و پس از آن، با ۱۴۳٪ و ۷۵٪ مربوط به عمل آوری خشک در دمای ۲۵°C و با ۷۶٪ و ۳۶٪ برای عمل آوری اشباع می‌باشد. همچنین مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل آوری استاندارد در اثر عمل آوری اشباع به ترتیب معادل ۳۷٪ و ۳۳٪ کاهش می‌یابد.

اشکال ۲۱ تا ۲۴، به ترتیب نمودار مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی متوسط، ۱٪ سیمان و ۷۵ ضربه تراکم (شکل ۲۱ و ۲۲) و دانه‌بندی متوسط، ۰٪ سیمان و ۷۵ ضربه تراکم (شکل ۲۳ و ۲۴) را با توجه به درصد قیر و حالات مختلف عمل آوری، نشان می‌دهند.

همچنین همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود تأثیر تعداد ضربات تراکم بر مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش درصد سیمان کاهش می‌یابد.

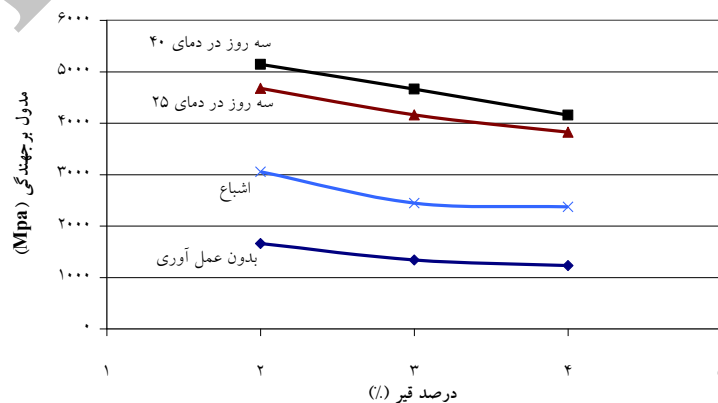
تأثیر نوع عمل آوری

در جدول ۳ نتایج مربوط به محدوده تغییرات میانگین مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم با توجه به نوع عمل آوری، نشان داده شده‌است.

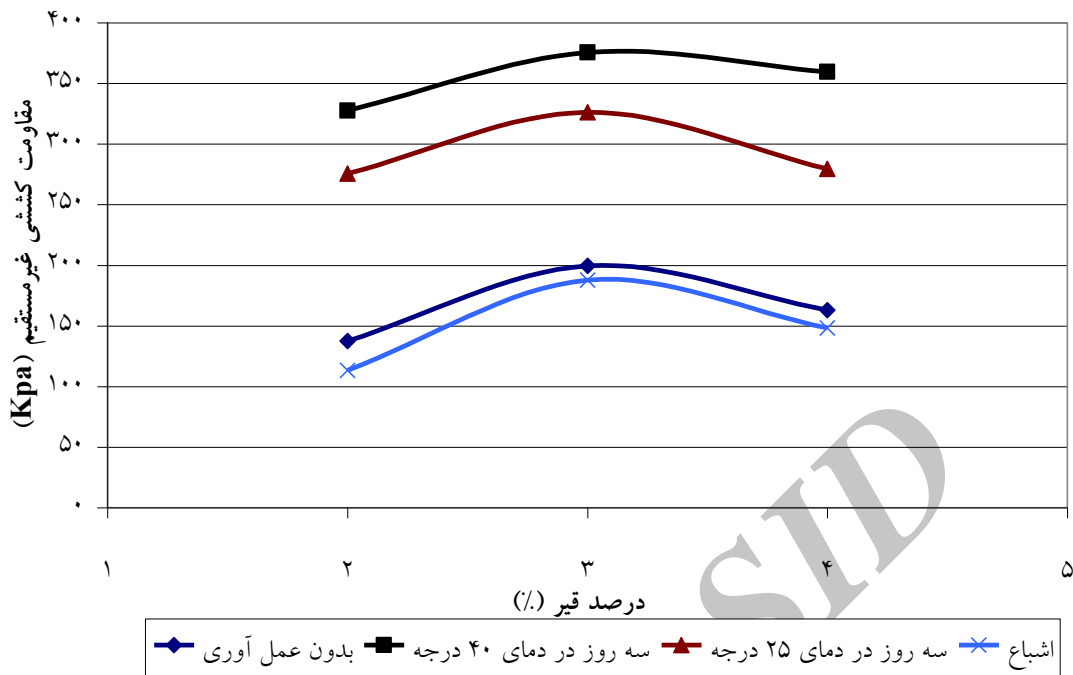
همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، میانگین مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، با افزایش مدت زمان و دمای عمل آوری، افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۳ کمترین مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم، مربوط به نمونه‌های عمل آوری نشده بوده و به ترتیب در نمونه‌های اشباع، عمل آوری شده به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه و ۷۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه افزایش می‌یابد.

جدول ۳: محدوده تغییرات مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم با تغییر نحوه عمل آوری

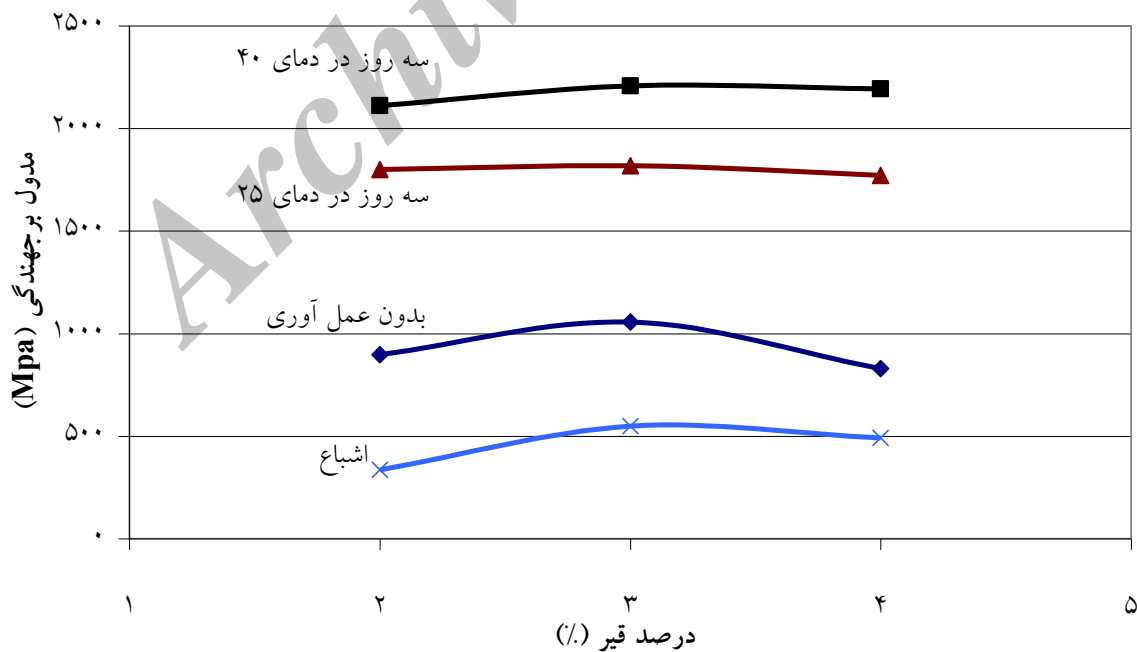
Mechanical Properties		Curing Condition
Indirect tensile Strength (Kpa)	Resilient modulus (Mpa)	
222	1401	Without Curing
301	2471	Soaked
388	3411	72hr@25°C
449	3912	72hr@40°C



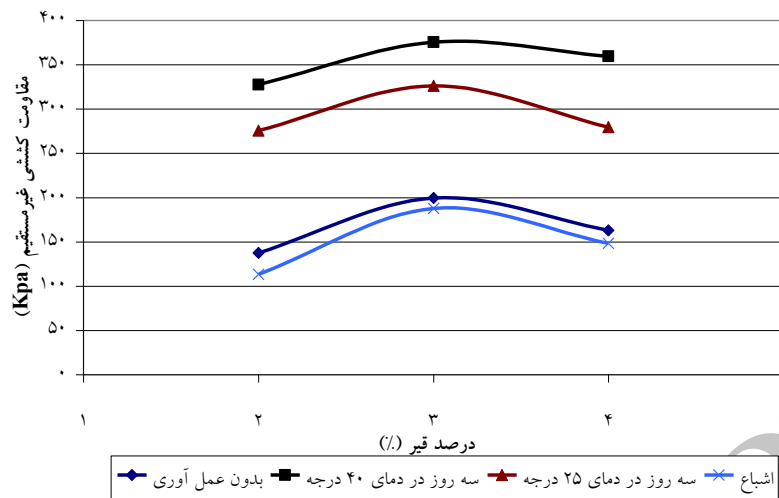
شکل ۲۱: تغییرات مدول برجهندگی نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی متوسط، ۱٪ سیمان و ۷۵ ضربه تراکم بر حسب تغییرات درصد قیر، در حالات مختلف عمل آوری



شکل ۲۲: تغییر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی متوسط، ۱٪ سیمان و ۷۵ ضربه تراکم بر حسب تغییرات درصد قیر، در حالات مختلف عمل آوری



شکل ۲۳: تغییر مدول برجهندگی نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی متوسط، ۰٪ سیمان و ۷۵ ضربه تراکم بر حسب تغییرات درصد قیر، در حالات مختلف عمل آوری



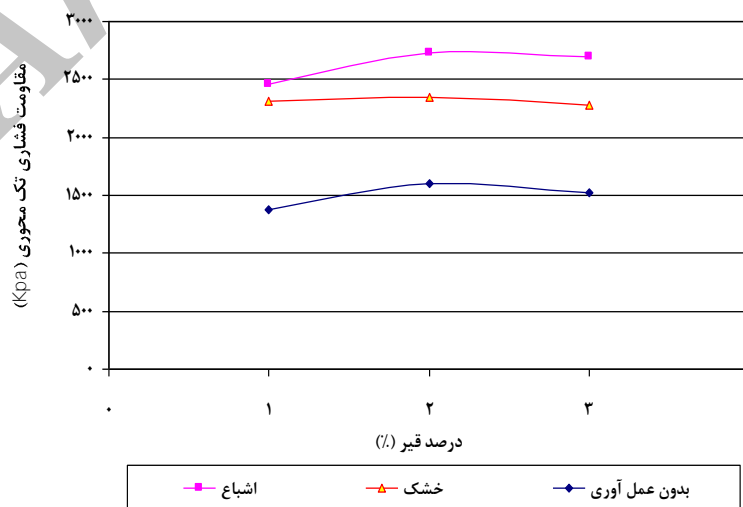
شکل ۲۴: تغییر مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی متوسط، +۱٪ سیمان و ۷۵ ضربه تراکم بر حسب تغییرات درصد قیر، در حالات مختلف عمل آوری

با ۴۰٪ افزایش، مربوط به حالت عمل آوری اشباع و پس از آن، برابر ۳۹٪ و مربوط به عمل آوری خشک در دمای ۴۰°C می‌باشد.

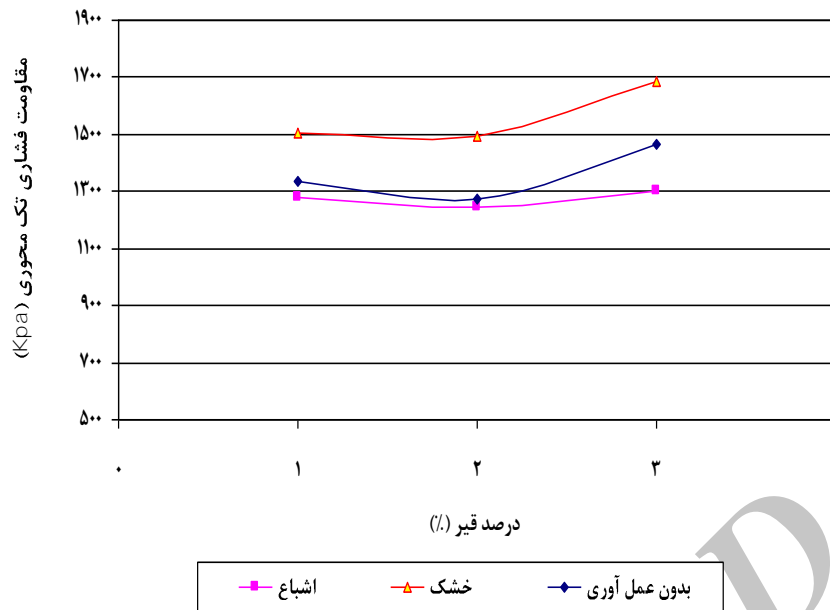
همچنین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های عمل آوری شده به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه در اثر عمل آوری اشباع معادل ۱٪ افزایش می‌یابد. اشکال ۲۵ و ۲۶ نمودار مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی متوسط، ۱٪ سیمان و ۷۵ ضربه تراکم (شکل ۲۵) و دانه‌بندی متوسط، بدون سیمان و ۷۵ ضربه تراکم (شکل ۲۶) را با توجه به درصد قیر و حالات مختلف عمل آوری، نشان می‌دهند.

بر اساس آزمایش‌های انجام شده، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها، با افزایش مدت زمان و دمای عمل آوری، افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده، کمترین مقاومت فشاری تک‌محوری، مربوط به نمونه‌های عمل آوری نشده بوده و در نمونه‌های عمل آوری شده به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه و اشباع افزایش می‌یابد.

اگر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های عمل آوری شده با هر یک از روش‌های عمل آوری، با مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های عمل آوری نشده، مقایسه شوند، بیشترین نرخ افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری،



شکل ۲۵: تغییر مقاومت فشاری تک‌محوری، بر حسب تغییر درصد قیر، در حالات مختلف عمل آوری (دانه‌بندی متوسط، ۱٪ سیمان و ۷۵ ضربه تراکم)



شکل ۲۶: تغییر مقاومت فشاری تک‌محوری، بر حسب تغییر درصد قیر، در حالات مختلف عمل‌آوری (دانه‌بندی متوسط، بدون سیمان و ۷۵ ضربه تراکم)

کششی و مدول برجهندگی، تا حدودی افزایش می‌یابند. این افزایش در تغییر درصد قیر ۲٪ به ۳٪ به ترتیب برابر ۳٪ و ۲٪ و در افزایش درصد قیر از ۳٪ به ۴٪ برابر ۸٪ و ۵٪ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود میزان تأثیر قیر در افزایش نسبت مقاومت کششی و مدول برجهندگی، کمتر از تأثیر سیمان است.

جدول ۴: محدوده تغییرات نسبت مقاومت کششی و مدول برجهندگی حالت اشباع به خشک با توجه به متغیرها

Variable		TSR	RM _r
Grading	Fine	65	59
	Medium	63	52
Cement (%)	0	47	31
	1	70	64
	2	75	72
Bitumen (%)	2	61	54
	3	63	55
	4	68	58
Compaction (Blows)	75	64	56
	50	63	55
Total		64	56

حساسیت رطوبتی

نسبت مدول برجهندگی^۱ و مقاومت کششی غیرمستقیم^۱ نمونه‌های عمل‌آوری شده به صورت خشک در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به نمونه‌های اشباع، برای هر درصد قیر از روابط ۳ و ۴ محاسبه شده و در این تحقیق به عنوان معیار برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در جدول ۴ نتایج مربوط به محدوده تغییرات میانگین نسبت مقاومت کششی و مدول برجهندگی در حالت اشباع به خشک، در حوزه تغییرات هر یک از متغیرها، ارائه شده است.

$$TSR = \frac{ITS_{\text{اشباع}}}{ITS_{\text{خشک}}} \times 100 \quad (3)$$

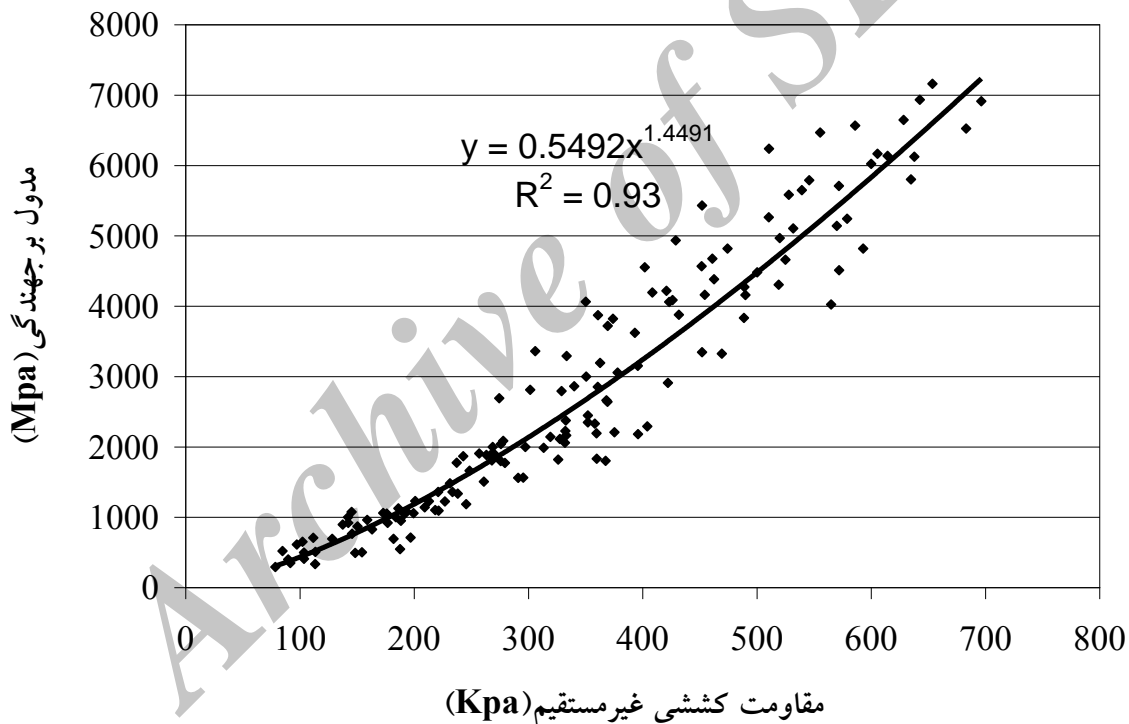
$$RM_r = \frac{M_r_{\text{اشباع}}}{M_r_{\text{خشک}}} \times 100 \quad (4)$$

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود. از آنجا که سیمان نقش ماده چسباننده و سخت‌کننده در مخلوط ایفا می‌کند لذا، با افزایش درصد سیمان، نسبت مقاومت کششی و مدول برجهندگی، افزایش می‌یابند. نرخ این افزایش، با افزودن ۱٪ سیمان به ترتیب برابر ۳۳٪ و ۱۰۶٪ و با افزایش درصد سیمان از ۱٪ به ۲٪ به ترتیب برابر ۷٪ و ۱۳٪ می‌باشد. با افزایش درصد قیر نیز، نسبت مقاومت

نمود. با رسم نمودار نتایج آزمایش مدول برجهندگی بر حسب مقاومت کششی غیرمستقیم برای مجموع حالات (شامل دو نوع دانه‌بندی، سه درصد قیر، سه درصد سیمان، دو حالت تراکم و چهار حالت عمل آوری)، رابطه همبستگی مابین مدول برجهندگی نمونه‌های آزمایش شده و مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها با توجه به نحوه توزیع نقاط بر روی نمودار و احراز شرایط مرزی، به صورت رابطه توانی $M_r = 0.5492(ITS)^{1.4491}$ به دست آمد که در آن M_r و ITS به ترتیب بیانگر مدول برجهندگی بر حسب مگاپاسکال و مقاومت کششی غیرمستقیم بر حسب کیلو پاسکال می‌باشند. (شکل ۲۷)

رابطه همبستگی میان مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم

از آنجا که تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز جهت اندازه‌گیری مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی، برعکس مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها، پیچیده و بسیار گران قیمت بوده و این تجهیزات تنها در معدودی از آزمایشگاه‌ها در دسترس می‌باشد، می‌توان با بهره‌گیری از نتایج و روابط ارائه شده در این تحقیق، بدون نیاز به دستگاه‌های اندازه‌گیری مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی و تنها با مقادیر مقاومت کششی آن‌ها، مقادیر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالت کف قیر را محاسبه



شکل ۲۷: توزیع نقاط و نمودار همبستگی بین مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم برای مجموع حالات

جهت حصول دانه‌بندی مورد نظر، نمونه‌های آسفالتی کف قیر با دو نوع دانه‌بندی ریز و متوسط، سه درصد مختلف قیر، سه درصد متفاوت سیمان و دو حالت تراکم ساخته شد و هر کدام از نمونه‌ها به چهار روش مختلف عمل آوری گردید.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مصالح خرده آسفالتی تراشیده شده از رویه بزرگراه امام رضا واقع در شرق تهران و با تفکیک آن‌ها بر حسب اندازه دانه و سپس بازترکیب آن‌ها بر حسب اوزان مناسب

نتایج حاصل از آزمایش‌های کشش غیرمستقیم و مدول بر جهندگی و مقاومت فشاری تک محوری به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱- تغییر دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی، از ریز به متوسط، تأثیر کمی بر روی خواص آسفالت بازیافت شده در این تحقیق داشت. در اثر این تغییرات، میانگین مدول بر جهندگی حدود ۵٪ افزایش و میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم، نسبت مقاومت کششی و مدول بر جهندگی در حالت اشباع به خشک به ترتیب حدود ۹٪، ۳٪ و ۱۲٪ کاهش یافت و همچنین مقاومت فشاری تک محوری حدود ۶٪ کاهش یافت.

۲- تأثیر افزایش درصد قیر از ۲٪ به ۴٪ نیز نسبتاً کم بود. با افزایش میزان قیر از ۲٪ به ۳٪ و از ۳٪ به ۴٪، متوسط مدول بر جهندگی نمونه‌ها به ترتیب حدود ۸٪ و ۱۱٪، میانگین مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها به ترتیب حدود ۱٪ و ۸٪، میانگین نسبت مقاومت کششی به ترتیب حدود ۳٪ و ۸٪ و میانگین نسبت مدول بر جهندگی حالت اشباع به خشک به ترتیب حدود ۲٪ و ۵٪ کاهش یافت. مقاومت فشاری تک محوره با افزایش میزان قیر از ۱٪ به ۲٪ به طور متوسط ۱۳٪ افزایش و از ۲٪ به ۳٪ به ۱۲٪ کاهش یافت.

۳- تأثیر افزودن سیمان بسیار چشمگیر بوده‌است. با افزودن ۱٪ سیمان و افزایش آن از ۱٪ به ۲٪، میانگین مدول بر جهندگی نمونه‌ها به ترتیب حدود ۱۷۰٪ و ۵۵٪، متوسط مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها به ترتیب حدود ۸۰٪ و ۳۰٪، میانگین نسبت مقاومت کششی به ترتیب حدود ۵۰٪ و ۷٪ و میانگین نسبت مدول بر جهندگی حالت اشباع به خشک به ترتیب حدود ۱۰۵٪ و ۱۳٪ افزایش یافت همچنین متوسط مقاومت فشاری تک محوری به

ترتیب حدود ۵۰٪ و ۱۵٪ افزایش یافت. ۴- با کاهش انرژی تراکم (تعداد ضربات چکش تراکم مارشال) از ۷۵ به ۵۰ ضربه، مقادیر میانگین مدول بر جهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم، نسبت مقاومت کششی و نسبت مدول بر جهندگی حالت اشباع به خشک به ترتیب حدود ۲۵٪، ۳۰٪، ۲٪ و ۲٪ کاهش یافت و میانگین مقاومت فشاری تک محوری نمونه حدود ۱۵٪ کاهش یافت.

۵- در مقایسه با عمل آوری استاندارد (عمل آوری خشک به مدت ۷۲ ساعت در دمای 40°C) مدول بر جهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم به طور متوسط، برای نمونه‌های اشباع (غرقاب شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای 25°C)، به ترتیب حدود ۳۵٪ و ۳۰٪، برای نمونه‌های عمل آوری نشده به ترتیب حدود ۶۵٪ و ۵۰٪ و برای نمونه‌های عمل آوری شده به مدت ۷۲ ساعت در دمای 25°C به ترتیب حدود ۱۳٪ و ۱۴٪ کاهش یافت. مقاومت فشاری تک محوری، برای نمونه اشباع حدود ۱٪ افزایش و برای نمونه‌های عمل آوری نشده ۳۹٪ کاهش می‌یابد.

۶- برای مصالح مورد آزمایش در این تحقیق رابطه همبستگی کلی قابل قبول بین مدول بر جهندگی (برحسب مگاپاسکال) و مقاومت کششی غیرمستقیم به دست آمد.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با همکاری دانشکده مهندسی عمران پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران و آزمایشگاه مادر تخصصی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری انجام گرفته‌است که بدین وسیله از پشتیبانی و همکاری مسئولین و پرسنل محترم آزمایشگاه مزبور صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

1. Kim, Yongjoo. and Lee, Hosin David. (2006). "Development of Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt" *Journal of Materials in Civil Engineering* Vol. 18, No. 1.
2. Muthen, K.M. (1998). "Foamed Asphalt Mixes: Mix Design Procedure", Research. Report (CR-98/077), CSIR Transporek, South Africa.

3. Chiu, Chui-Te. and Huang, M. Y. (2002). "A Study on Properties of Foamed Asphalt Treated Mixes" Proc., 82nd Annual Transportation Research Board Meeting (CD-Rom), Transportation Research Council, Washington, D.C.
4. Wirtgen Group, (2002). "Rehabilitation of a Heavily Trafficked Road, Pavement Investigation and Construction Report", Germany.
5. Management and planning organization of Iran (2006). "Technical and Practical Specification of Cold Asphalt Recycling", code number 339
6. Nataatmadja, A. (2001). "Some Characteristics of Foamed Bitumen Mixes", Transportation Research Record 1767, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 120-125.
7. Long, F.M., Theyse, H.L. and Ventura, D.F.C. (2004). "Characterization of Foamed Bitumen Treated Materials from HVS Test Section", Transportek, CSIR, South Africa.
8. Hodgkinson, A. and Visser, A.T. (2004). "The Role of Fillers and Cementitious Binders When Recycling with Foamed Bitumen or Bitumen Emulsion" 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04).
9. Mofreh, F.Saleh. (2006). "Effect of Aggregate Gradation, Type of Mineral Fillers, Bitumen Grade and Source on the Mechanical Properties of Foamed Bitumen Stabilized Mixes" Proc., 85th Annual Transportation Research Board Meeting (CD-Rom), Transportation Research Council, Washington, D.C.
10. Asphalt Recycling and Reclaiming Association. (2001). Basic Asphalt Recycling Manual, First Edition, 269 p.
11. Asphalt Academy, June (2002). "Interim Technical Guideline: The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials", Technical Guideline 2, Pretoria, South Africa.
12. Yousef – doost, Saeed. (2007), "Laboratory Investigation on Resilient Modulus and Indirect Tensile Strength of Foamed Bitumen Mixes", Master of Science Dissertation, University of Tehran.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Foamed Asphalt
2. Full Depth Reclamation
3. Mobil Oil Australia Ltd
4. Hot Mix Asphalt
5. Resilient Modulus
6. Indirect Tensile Strength
7. Expansion Ratio
8. Half-Life
9. Retained Resilient Modulus
10. Tensile Strength Ratio