بررسی مشخصات مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با استفاده از تکنولوژی کف قیر

علیرضا عاملی، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
سعید یوسف دوست، دانش آموخته دکتری، دانشگاه صنعتی سوینبرن، ملبورن، استرالیا
رضوان باباگلی، مربی، گروه مهندسی عمران، واحد پردیس، دانشگاه آزاد اسلامی، پردیس، تهران، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول:amelii@gmail.com
دریافت: 96/01/07- پذیرش:96/06/20

چکیده

در این تحقیق خصوصیات عملکردی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با کف قیر، مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. در این تحقیق، با انجام آزمایشهای لازم برروی 90 نمونه ساخته شده، تأثیر میزان درصد قیر، نوع و میزان تراکم، دما و نوع عمل آوری برروی مدول برجهندگی و دانسیته نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت. از تراکم مارشال و تراکم ژیراتوری جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده، مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌های متراکم شده با تراکم مارشال بیشتر از مقادیر مربوط به تراکم ژیراتوری بود. همچنین میزان قیر بهینه نمونه های متراکم شده با تراکم مارشال متناظر با بیشینه دانسیته آنان بدست آمد. در بررسی تأثیر درصد قیر، مشاهده شد که حساسیت نمونه های متراکم شده با تراکم ژیراتوری نسبت به تغییرات درصد قیر، کمتر از نمونه‌های متراکم شده با تراکم مارشال است. همچنین در نمونه‌های عمل آوری نشده، مدول برجهندگی نمونه‌های متراکم شده بوسیله روشهای تراکمی که انرژی بیشتری اعمال می کنند (75 ضربه مارشال و ژیراتوری) کمتر از نمونه های متراکم شده توسط تراکم مارشال با 50 ضربه بود. از طرف دیگر در نمونه های خشک عمل آوری شده، اگرچه نمونه‌های متراکم شده با ژیراتوری نسبت به تراکم مارشال، وزن مخصوص بالاتری داشتند، اما مشاهده شد که نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم مارشال، مقادیر مدول برجهندگی بالاتری در مقایسه با تراکم ژیراتوری از خود نشان دادند. به علاوه در نمونه های عمل آوری اشباع مشاهده شد که نمونه‌های متراکم شده با تراکم ژیراتوری در درصد قیر بالاتر مدول برجهندگی بیشتری از خود نشان دادند. درنهایت بعلت درصد قیر نسبتاً کم مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با کف قیر، تغییرات دما در مقایسه با مخلوطهای آسفالتی گرم، تأثیر کمتری بر روی مدول برجهندگی آنان گذاشت.

واژه‌های کلیدی: بازیافت سرد در جا، کف قیر، مدول برجهندگی، عمل آوری

1- مقدمه

طی 20 سال گذشته، رشد بی‌سابقه‌ای در امور زیر بنائی در کشور اتفاق افتاده است و به عنوان بخشی از آن به احداث صدها کیلومتر راه جدید جهت تسهیل تردد ترافیک رو به رشد، می‌توان اشاره کرد که بخش عمده‌ای از این راه‌ها، امروزه به پایان عمر طراحی خود نزدیک می‌شوند. از طرفی رشد قابل توجه تکنولوژی بازیابی آسفالت طی سال های اخیر از یک سو و افزایش هزینه‌های ساخت، بهسازی و نگهداری راهها و کاهش اعتبارات موجود برای انجام این گونه عملیات، سازمان های دولتی را بر آن داشته تا در جستجوی روش هایی باشند که از نظر هزینه، مقرون به صرفه تر بوده و همچنین توجیه اقتصادی داشته باشد. از اینرو انتخاب روشهای بازیافت به عنوان یک گزینه مورد توجه فرار گرفته است. تکنیک بازیافت سرد درجا[1] (CIR)، گزینه‌ای جدید و پرمزیت برای احیا و نوسازی راه‌هاست. در این روش، از ماشین آلات مخصوصی جهت

تراشیدن لایه‌های روسازی موجود که دچار خرابی‌های شدید شده‌اند و تزریق مواد تثبیت کننده مانند آهک، سیمان، امولسیون قیر و یا کف قیر، جهت بهبود مشخصات سازه‌ای مصالح تراشیده شده استفاده می‌شود. قیر موجود در لایه روسازی قدیمی، منبع باارزشی می‌باشد. عواملی مانند اکسیداسیون ممکن است باعث از بین رفتن برخی از خصوصیات اولیه فیر گردد تمت هنگامی که این قیر با قیر جدیدی مخلوط شود، می توان آن را به عنوان یک ماده چسبنده موثر، مجدداً مورد استفاده قرار داد. استفاده مجدد از قیر قدیمی موجود در لایه آسفالتی می‌تواند میزان قیر جدید مورد نیاز برای بازسازی روسازی را کاهش دهد.

بازیافت سرد در جا (CIR) به عنوان یک تکنیک نوسازی روسازی است که در آن روسازی موجود در محل مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد. مصالح روسازی بدون استفاده از گرما در محل مخلوط می‌شوند. مصالح خرده آسفالتی (RAP) با استفاده از خرد کردن و تراشیدن روسسازی موجود به دست می آیند. استفاده از فناوری بازیافت سرد درجا سبب حذف شیارهای چرخ موجود، از بین بردن چاله ها، ترک های طولی و عرضی و انعکاسی و همچنین برگرداندن مشخصات مطلوب روسازی قدیمی می گردد. بعضی از دلایل عمده و اصلی برای افزایش استفاده از بازیافت سرد در جا(CIR)، افزایش کمبود نیاز به مصالح شن و ماسه، صرفه جویی در هزینه، حداقل اختلال در ترافیک، توانایی حفظ خصوصیات عملکردی مخلوط، کاهش آلودگی های زیست محیطی و کاهش یک نگرانی رو به رشد برای تخلیه ذخایر نفتی می باشد.
(Kavussi and Modarres, 2010; Kim and Lee, 2012; Kavussi and Modarres, 2010; Wood, White and Nelson, 1988; Kandhal, 1984; Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 1992; Design, 1992).

کف قیر[2] یا قیر منبسط شده[3]، مخلوطی از آب و قیر داغ است. هنگامی که آب سرد (15-25°c) با افشانه مخصوصی به قیر داغ (160-200°c) تزریق می شود، کف قیر بوجود می‌آید و باعث انبساط مخلوط حاصل تا بیش از 10 برابر حجم اولیه خود می‌شود. زمانیکه آب تزریق می‌شود و با قیر داغ تماس پیدا می‌کند به بخار تبدیل شده و در هزاران حباب ریز قیر محبوس می‌شود که این پدیده باعث تغییر موقت خصوصیات فیزیکی قیر شده و نتیجه آن کاهش ویسکوزیته قیر است که در نهایت، قیر را برای اختلاط با مصالح (سنگدانه‌ها) آماده می‌سازد (Munthen, 1999) .

مزایای استفاده از کف قیر بطور خلاصه عبارتند از:

- افزایش در مقاومت مصالح
- دوره کوتاه مدت اجرا
- هزینه کمتر در مقایسه با ساخت مجدد و یا سایر روشهای بهسازی
- قابلیت قرارگیری تحت ترافیک بلافاصله پس از اتمام مراحل ساخت
- بهبود دوام و مقاومت مصالح در برابر نفوذ رطوبت.

اما از طرف دیگر باید توجه داشت که این روش، به مصالح روسازی با دانه‌بندی مناسب، ابزار و ماشین آلات مخصوص و مجری کارآزموده و متخصص نیاز دارد.

2- پیشینه تحقیق

پس از ابداع اولین سیستم تولید کف قیر در سال 1928 توسط August Jacobi آلمانی، کاربرد کف قیر به عنوان یک ماده چسباننده مصالح سنگی و خاک (تثبیت خاک) در سال 1956 برای اولین بار توسط Ladis H.Csanyi استاد مرکز تحقیقات دانشگاه ایالتی ایووا (Iowa) معرفی شد و از آن تاریخ تاکنون این فن‌آوری در کشورهای بسیاری مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. (Csanyi, 1957)

در سال 1967 شرکت نفتی موبیل اویل استرالیا (Mobil oil Australia) که حق امتیاز Csanyi را به دست آورده بود، تغییرات و اصلاحاتی در روش تولید کف قیر به وجود آورد و در این روش در یک سیستم تحت فشار، به جای بخار آب از تزریق آب سرد به درون جریان قیر داغ در یک محفظه انبساط استفاده شد. اما انحصاری شدن این روش توسط موبیل اویل و عدم وجود یک استاندارد مشخص برای مخلوط‌های کف‌قیری، باعث محدود شدن کاربرد این روش گردید. پس از به پایان رسیدن امتیاز موبیل اویل در تولید کف‌قیر، تلاش‌های سخت‌کوشانه محققین به خصوص در آفریقای جنوبی، باعث ارائه طرح‌های بسیار موفق از این تکنیک تثبیت شد. (Kendal et al, 1999).

این نوع روش تولید، بسیار کارآمد و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه بود و براساس آن سیستم‌های تولید کف قیر توسط شرکت‌هایی چون سوتر کانادا و ویرتگن آلمان برای انواع ماشین‌های تثبیت خاک و مصالح ساخته شد و از سال 1980

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 و کاربرد این فن‌آوری در کشورهایی با شرایط آب‌وهوایی خشک مثل عربستان، لیبی، مالاوی و نیجریه نیز نتایج موفقیت‌آمیزی در پی داشته است(Wirtgen Group, 2002)

در ایران نیز، در سالهای اخیر از روش بازیافت سرد درجا با استفاده از تکنولوژی کف‌قیر در چند پروژه تثبیت، بهسازی و اصلاح راه‌ها و فرودگاه‌ها استفاده شده است. اولین کاربرد تکنولوژی کف قیر در ایران به سال 1377 باز می‌گردد که در آن بخشی از لایه اساس باند 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، اقدام به تهیه و انتشار مشخصات فنی و اجرائی بازیافت سرد آسفالت (نشریه 339) در سال 1385، نموده است (یوسف دوست، 1386).

از جمله تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده برروی مخلوطهای آسفالت کف قیر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- در تحقیقی که توسط هی و همکاران در سال 2007 انجام شد، خصوصیات شیارشدگی مخلوط آسفالتی کف قیر حاوی مصالح خرده آسفالت (RAP) مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق از آزمایش خزش دینامیکی جهت ارزیابی پتانسیل شیارشدگی استفاده شد. سه پارمتر شیب کرنش خزشی (creep strain slope)، مبدا و شیب مدول سختی خزشی (Intercept and secant creep stiffness modulus (SCSM)) جهت ارزیابی نتایج نمونه ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد، درجه قیر تأثیر قابل توجهی بر شیب کرنش خزشی دارد. در حالیکه درصد و پیری مصالح خرده آسفالتی تأثیر قابل توجهی بر روی CSS ندارد. همچنین نتایج نشان داد قیرهای با درجه عملکردی بالاتر به مخلوط‌های کف قیری جهت کاهش شیارشدگی کمک می کند (He, Gui-ping, and Wong, 2007; Nazemi, & Heidaripanah, 2016)
- در تحقیقی که توسط Yan و همکاران انجام شد، مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی کف قیری و امولسیونی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق مقاومت خستگی نمونه ها توسط آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول سختی در سه دما و چهار سطح تنش مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش دما و سطح تنش، مذول سختی نمونه ها کاهش می یابد. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم در سطوح تنش مختلف نشان داد، مخلوط های آسفالتی کف قیری عمر خستگی بیشتری در سطوح تنش پایین‌تر دارند، در حالیکه مخلوط های امولسیونی، عمر خستگی بیشتری در سطوح کرنش بالاتر دارند. (Yan et al,. 2010; Yan et al, 2014)
- در تحقیقی که توسط چیو و همکاران در سال 2002 انجام شد، خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی سرد کف قیری مورد ارزیابی قرار گرفت و با مخلوط‌های بازیافتی گرم مقایسه شد. نتایج نشان داد مدول دینامیکی و مقاومت خستگی نمونه‌های کف قیری به خوبی نمونه های بازیافتی گرم می‌باشد. (Chiu, Chui-Te, and Huang, 2002)
- در تحقیق دیگری که توسط کیم و همکاران انجام شد، تأثیر درصدهای کف قیر و مصالح خرده آسفالت، بر روی مدول دینامیکی و خصوصیات شیارشدگی مخلوط بازیافت سرد درجا مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر مدول دینامیکی مخلوط‌های خرده آسفالتی بسته به درصد و منبع کف قیر تغییر می‌کند. مقادیر عدد روانی نمونه‌های مصالح خرده اسفالتی ریزدانه با قیر سخت مقادیر بیشتری را نسبت به مصالح خرده آسفالتی درشت دانه با قیر نرمتر، از خود نشان داد (Kim et al, 2009)
- در تحقیق دیگری که توسط هی و همکاران انجام شد، حساسیت رطوبتی و تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالتی گرم و کف قیری مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش

مقاومت کششی غیر مستقیم و خزش دینامیکی مخلوط های کف قیری با مصالح خرده آسفالتی با دو نوع قیر مورد ارزیابی قرار گرفت. آنالیز آماری داده‌ها نشان داد که درجه قیر و درصد مصالح خرده آسفالتی تأثیر بسزایی بر روی مقاومت کششی نمونه‌های کف قیری دارد. (He, Gui-Ping, and Wong, 2008)

- در تحقیقی که توسط کیم و همکاران (2010) انجام شد، تاثیز زمان عمل آوری و درصد رطوبت بر مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی نمونه‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد در زمان های عمل آوری کوتاه مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها افزایش نیافته ولی در زمان‌های عمل آوری بیشتر، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها افزایش چشمگیری یافته است.
- در تحقیقات دیگری از یانسکی و همکاران، پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مخلوط های بازیافتی حاوی کف قیر مورد ارزیابی قرار گرفت. قیر در درصدهای 2 و 3.5 ٪ قیر هیدرولیکی از 1تا 2.5 ٪ به مصالح بازیافتی اضافه گردیدند. تاثیر درصدهای مختلف قیر و هوا بر پارامترهای مارشال و مدول برجهندگی در دمای 25 درجه مورد ارزیای قرار گرفت. حساسیت رسوبتی مخلوط ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزودن 2.5 ٪ قیر و 2٪ سیمان، مخلوط ها بهترین نتایج را ارائه می دهند. (Iwański, Chomicz-Kowalska, 2013; Iwański, Chomicz-Kowalska, 2012; Iwański, Chomicz-Kowalska, 2011).

بطور کلی تحقیقات آزمایشگاهی که تاکنون در کشورهای مختلف برروی آسفالت کف قیر صورت گرفته، در مقایسه با آسفالت معمولی (HMA)، بسیار محدود بوده و در ایران نیز بجز چند مورد، تحقیق چندانی در این زمینه انجام نشده است. جهت ساخت و اجرای مخلوطهای آسفالت کف قیر با عملکرد درازمدت، لازم است تا خصوصیات مکانیکی و عملکردی این نوع مخلوطها شناسائی، بررسی و یک روند طرح اختلاط مناسب برای آن تهیه شود بدین جهت لزوم بررسی پارامترهای مختلف اختلاط و تراکم برروی وجوه مختلف رفتار مکانیکی آن در شرایط مختلف بهره‌برداری محسوس می باشد.

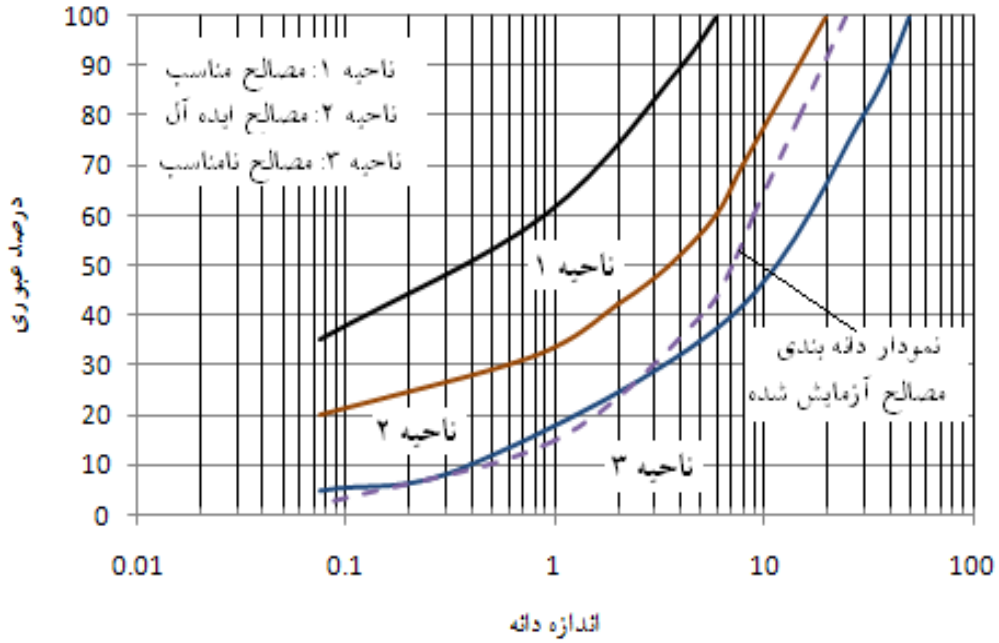
نتایج پروژه اخیر پژوهشی جهت بررسی آزمایشگاهی عملکرد لایه‌های روسازی بازیافت شده با روش بازیافت سرد درجا و با استفاده از ماده‌ی تثبیت کننده کف قیر که با همکاری دانشکده عمران دانشگاه تهران و آزمایشگاه مادر تخصصی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی انجام شده است، مرور و بررسی می‌شود. هدف از این کار، بررسی تأثیر نوع تراکم، درصد قیر، روش عمل‌آوری، دما و شرایط بارگذاری بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالت کف قیر است.

3- مصالح مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالت کف قیر

3-1- مصالح دانه‌ای

مطالعات نشان می‌دهد که مصالح اولیه بکار برده شده در مخلوطهای آسفالت کف قیر، می‌تواند از سنگ شکسته تا مصالح نامرغوب متغیر باشد. بتن خرد شده، نخاله‌های ساختمانی، ماسه و مصالح دانه‌ای خام نیز می‌توانند برای ساخت محلوطهای آسفالتی کف قیر با مشخصات مطلوب مورد استفاده قرار گیرند. اما نکته کلیدی استفاده از منحنی دانه‌بندی مناسب می‌باشد که منحنی توصیه شده آن در شکل 1 نشان داده شده است (Rutherford et al, 2014; Leek, Jameson, 2011).

مصالح با دانه بندی منطبق بر ناحیه 2، برای استفاده در ساخت راههای با ترافیک سنگین مناسب می‌باشد. مصالح منطبق بر ناحیه 1 برای راههای با ترافیک سبک مناسب بوده که می‌توان با افزودن اندکی مصالح درشت‌دانه منحنی دانه‌بندی آنها را منطق بر ناحیه 2 قرار داد. مصالحی که منحنی دانه‌بندی آنها در ناحیه 3 قرار می‌گیرند، ریزدانه کمی داشته و تا زمانی که این کمبود اصلاح نشود برای تثبیت با کف قیر مناسب نخواهند بود (García et al, 2013; Chandra, Veeraragavan, Krishnan, 2013)



شکل 1. دانه بندی مناسب برای مخلوطهای آسفالتی کف قیر

3-2- قیر

بطور کلی قیرهای نرم‌تر (بادرجه نفوذ بیشتر)، خصوصیات کف کنندگی بهتری دارند. انتخاب نوع قیر مورد استفاده تا حد زیادی به دمای محیط بستگی دارد. کف قیر بهینه، کف قیری است که نیمه عمر[4] و نسبت انبساط[5] را همزمان بهینه کند. نسبت انبساط بصورت نسبتی مابین حجم بیشینه بدست آمده در حالت کف و حجم قیر در حالت عادی بیان می‌شود. نیمه عمر، مدت زمانی است که طول می‌کشد (به ثانیه) تا حجم کف قیر به نصف حجم بیشینه خود تنزل کند(Manual, 2004)

در مخلوطهای آسفالتی تولید شده با کف قیر، تعیین درصد قیر بهینه معمولاً به آسانی تعیین قیر بهینه در مخلوطهای آسفالتی گرم نیست(Munthen, 1999) ، چراکه افزایش بیش از اندازه درصد کف قیر در مخلوط آسفالتی باعث کاهش مقاومت آسفالت و کاهش درصد کف قیر باعث افزایش حساسیت به رطوبت در مخلوط آسفالتی می شود. درصد قیر بهینه به دانه‌بندی مصالح، مخصوصاً درصد ریزدانه در مخلوط بستگی دارد، اما بطور کلی معمولاً در محدوده 4-2 درصد قرار دارد. میزان رطوبت (درصد آب) برای حصول خصوصیات بهینه برای کف قیر، متأثر از نوع قیر مورد استفاده است. اما بطور کلی در محدوده 3-2 درصد برای قیرهای با درجه نفوذ 60/70 می باشد (Chiu, Chui-Te, and Huang, 2002; Yan et al, 2010)

3-3- افزودنی

افزودن سیمان یا آهک در صورتیکه در مصالح بازیافتی، ریزدانه به میزان کم وجود داشته باشد، به توزیع مناسب قیر در مصالح بازیافتی و افزایش سختی مخلوط کمک می‌کند. (Du, 2014; Modarres et al, 2011; Kuna et al, 2016) .

4-تراکم مخلوط آسفالتی کف قیر

بهینه‌سازی تراکم مصالح تثبیت شده با کف قیر پیچیده‌تر از تراکم مصالح آسفالتی گرم یا خاک است که علت آن حضور توامان دو ماده‌ی لغزنده آب و قیر در مخلوط می باشد. اگرچه قیر هنگام تزریق به مخلوط، گرم است اما بخش عمده ای از دمای خود را هنگام تماس با مصالح سرد از دست می‌دهد از این رو کندروانی (ویسکوزیته) قیر هنگام تراکم، نسبتاً بالا است. رطوبت، بنا به دلائل متعددی در مخلوطهای کف قیر مورد نیاز است، از جمله: 1- جلوگیری از توده شدن مصالح 2- تسهیل در توزیع یکنواخت قیر در مخلوط 3- تسهیل عمل تراکم به عنوان ماده لغزنده در شبکه دانه‌ها. اما پس از تراکم، رطوبت

اثری جز کاهش مقاومت مخلوط ندارد. تحقیقات زیادی بر روی درصد رطوبت بهینه (OMC)[6] مخلوطهای آسفالت کف قیر جهت اطمینان از حصول اختلاط و تراکم مناسب آنها انجام شده است که به عنوان نمونه می توان به موارد زیر اشاره کرد.

Bowering (1970) درصد رطوبت بهینه مخلوطهای آسفالت کف قیر را در محدوده 80٪-70٪ درصد رطوبت بهینه مصالح دانه ای تعیین شده به روش پروکتور اصلاح شده، تخمین زد در حالیکه Lee (1981)و Bissada, (1987) میزان آن را معادل 85٪-65٪ درصد رطوبت بهینه مصالح پیشنهاد دادند.

Castedo و همکاران درصد رطوبت بهینه مخلوط آسفالت کف قیر را معادل درصد رطوبت بهینه مصالح تعیین شده از آزمایش تراکم پروکتور اصلاح شده منهای درصد قیر مخلوط، پیشنهاد دادند(Castedo and Wood, 1983)

Sakr و Manke با توجه به آنالیز آماری برروی طیفی از دانه بندی ها، رابطه 1 را برای درصد رطوبت بهینه مخلوط آسفالت کف قیر پیشنهاد نمودند(Sakr and Manke, 1985)

$$MMC=8.92+1.48(OMC)+0.40(PF)-0.39(BC) \quad (1)$$

که در آن

MMC: درصد رطوبت اختلاط

OMC: درصد رطوبت بهینه مصالح، تعیین شده به روش پروکتور اصلاح شده

PF: درصد ریزدانه مصالح دانه ای و

BC: درصد قیر می باشد.

همچنین در نشریه 339 سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور تحت عنوان مشخصات فنی اجرائی بازبافت سرد آسفالت، درصد رطوبت بهینه اختلاط مصالح با کف قیر بر حسب نوع و جنس مصالح، حدود 90٪ -50 رطوبت بهینه مخلوط مصالح به روش AAHSHTO-T180 طریقه D پیشنهاد شده است (نشریه 339) .

در سالهای اخیر تراکم ژیراتوری به عنوان روش تراکم مناسب، جایگزین روشهای تراکم سنتی و مرسوم مانند تراکم مارشال برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تراکم کارگاهی شده است و به نظر می‌رسد روش واقعی‌تری نسبت به روشهای سنتی و مرسوم باشد. از آنجا که در تراکم ژیراتوری، انرژی بیشتری نسبت به روش تراکم مارشال، به مخلوط وارد می‌شود، میزان رطوبت بهینه مخلوط، کمتر از روش مارشال به دست می‌آید.

5- پروژه آزمایشگاهی

5-1- مصالح دانه ای

در تحقیق آزمایشگاهی انجام شده، ابتدا مصالح خرده آسفاتی که از سطح روسازی بزرگراه امام رضا واقع در جنوب شرقی تهران تراشیده شده بودند، پس از انتقال به آزمایشگاه، در یک مخلوط‌کن مکانیکی مخلوط شدند تا مخلوطی با دانه بندی نسبتاً یکنواخت بدست آید. مصالح خرده آسفالتی درگرمخانه خشک شده و آنالیز دانه‌بندی بر روی آنها انجام شد که منحنی آن در شکل 1 بصورت نقطه چین نشان داده شده است. مشاهده می شود که مصالح مورد آزمایش با وجود اندکی کمبود ریزدانه در قسمت ایده‌آل نمودار قرار گرفتند. سپس درصد رطوبت بهینه مصالح خرده آسفالتی به روش پروکتور اصلاح شده تعیین شد. درصد رطوبت بهینه، معادل 5٪ و چگالی خشک بیشینه معادل$20/9\ KN/m^3$ بدست آمد. میزان رطوبت برای تثبیت با کف قیر معادل 4/1٪ (حدوداً ٪80 رطوبت بهینه) است.

5-2- تهیه نمونه

مصالح مورد استفاده برای تثبیت با کف قیر ابتدا با قرار گرفتن در هوای آزاد به مدت 7 روز خشک شدند که متعاقب آن برای کاهش رطوبت آنها به مقدار تقریبی صفر، مصالح به مدت 48 ساعت در گرمخانه در دمای60 درجه سانتی گراد قرار داده شدند. 2٪ سیمان به عنوان ماده افزودنی و فیلر فعال در مصالح استفاده شد.

5-3- تزریق کف قیر

دستگاه آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق دستگاه تولید کف قیر آزمایشگاهی Wirtgen (WLB10) متعلق به آزمایشگاه مادر تخصصی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری بود (شکل 2). این دستگاه دارای سیستم تزریق قیری

است که عیناً مشابه سیستم تزریق قیر ماشین بازیافت WR2500 می باشد. این دستگاه قیر را با دبی وزنی 100 گرم بر ثانیه به مخلوط مصالح تزریق می کند. همچنین از یک مخلوط‌کن مکانیکی جهت اختلاط کف قیر تولید شده و مصالح استفاده شد.

شکل 2. تحقیق دستگاه تولید کف قیر آزمایشگاهی

5-4- تراکم

جهت بررسی اثر نوع تراکم نمونه‌ها به سه روش متراکم شدند : تراکم مارشال با 50 ضربه بر هر طرف نمونه، تراکم مارشال با 75 ضربه بر هر طرف نمونه و تراکم ژیراتوری. لازم به ذکر است که تراکم مارشال با 75 ضربه، در حال حاضر، متداولترین روش تراکم می باشد. در تراکم ژیراتوری از بار محوری 540kpa، زاویه ژیراسیون ۳° و تعداد ژیراسیون(دور) 85 استفاده شد. (Maccarrone et al, 1994)

5-5- آزمایش مدول برجهندگی توسط بارگذاری کشش غیرمستقیم

مدول برجهندگی، مدول الاستیسیته‌ای است که در تئوری الاستیسیته بکار برده می‌شود. این پارامتر از تقسیم تنش وارده به نمونه در حین آزمایش بر میزان کرنش برگشت‌پذیر بدست می‌آید و به همین دلیل به مدول برجهندگی معروف است. به طور کلی رفتار مخلوطهای آسفالتی در سیستم روسازی راه، ویسکوالاستیک بوده و تابع زمان 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 تقریبا بطور کامل برگشت پذیر خواهد بود و نسبت به بار می‌تواند الاستیک فرض شود. از کمیت ضریب مدول برجهندگی در ارزیابی کیفیت نسبی مصالح استفاده می شود درضمن این پارامتر یکی از ورودیهای مهم و تاثیر گذار در تحلیل، طراحی و ارزیابی روسازیهای آسفالتی است.
(Chiu, Chui-Te, and Huang, 2002; Kim, Lee, 2011; Khosravifar, Schwartz, Goulias, 2013)

آزمایش مدول برجهندگی، توسط دستگاه بارگذاری UTM15 [7] در آزمایشگاه مادر تخصصی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری انجام شد. نمونه‌ها در یک محفظه‌ی کنترل دما[8] در دمای ثابت نگهداری و آزمایش شدند. 5 پالس پیش بارگذاری، 5 پالس بارگذاری، شکل بارگذاری نیمه سینوسی با زمان بارگذاری 0/1 ثانیه و کرنش برگشت‌پذیر 50 میکروکرنش برای آزمایش در نظر گرفته شد. هر نمونه جهت بررسی نحوه عمل آوری و ارزیابی حساسیت در مقابل رطوبت، در سه حالت مورد آزمایش قرار گرفت: بلافاصله پس از تراکم (بدون عمل آوری)، پس از عمل‌آوری در گرمخانه و پس از غرقاب شدن (اشباع شدن). همانطور که در مرجع (Munthen, 1999) پیشنهاد شده است، عمل آوری معمولاً به مدت سه روز در گرمخانه و در دمای 60° انجام می شود که علت آن کاهش رطوبت نمونه، پیر کردن قیر و شبیه سازی شرایط نمونه با روسازی بازیافت شده، 3 ماه پس از بهره برداری می باشد. اشباع سازی نمونه ها با غرقاب نمودت آنها به مدت 24 ساعت و در دمای محیط (25° C)انجام شد.

6- نتایج

6-1- وزن مخصوص

تغییرات وزن مخصوص خشک مخلوط آسفالت کف قیر در مقابل تغییرات درصد قیر، در شکل 3 نشان داده شده است. مشاهده شد که وزن مخصوص خشک نمونه‌های متراکم شده با تراکم ژیراتوری به علت اعمال انرژی بیشتر، از وزن مخصوص خشک نمونه‌های متراکم شده به روش مارشال، بیشتر است. به علاوه نمونه‌های متراکم شده با تراکم مارشال

نسبت به تغییر درصد قیر حساس‌تر بودند. انرژی تراکمی اضافی اعمال شده در تراکم مارشال با 75 ضربه نسبت به 50 ضربه، تأثیر اندکی بر چگالی نمونه ها در درصد قیر کم، داشت اما این تأثیر در درصدهای قیر بالاتر، محسوس بود. مشابه خاکهای متراکم، درصد فضای خالی، تابعی از انرژی تراکمی است. کمینه درصد فضای خالی نمونه‌ها، در نمونه های متراکم شده با 50 ضربه چکش مارشال، در درصد قیر2/5٪ بدست آمد که معادل 12٪ بود. در حالیکه درصد فضای خالی نمونه های متراکم شده با 75 ضربه چکش مارشال و تراکم ژیراتوری، در همان درصد قیر، به ترتیب معادل 10/3٪ و 9/4٪ بدست آمد.

6-2- مدول برجهندگی نمونه های بدون عمل آوری

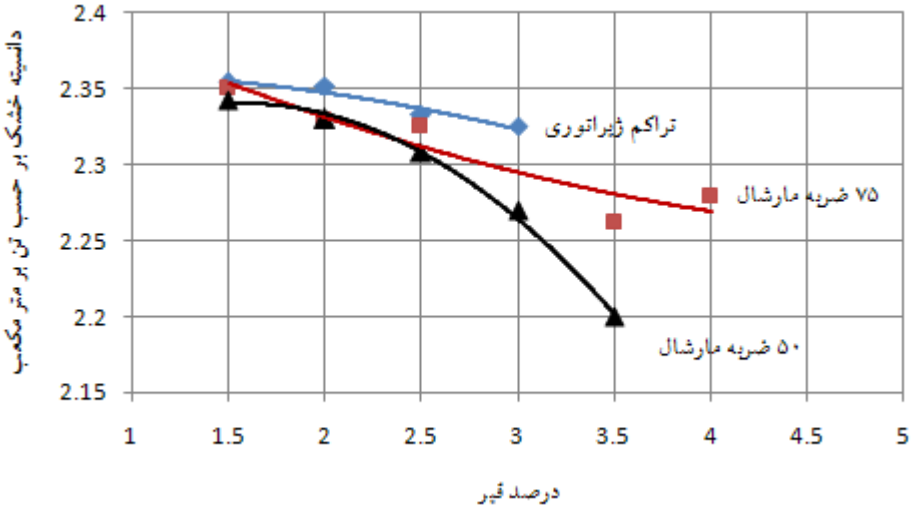
تغییرات مدول برجهندگی نمونه‌ها پیش از عمل‌آوری (بلافاصله پس از تراکم) در مقابل تغییرات درصد قیر در شکل 4 نشان داده شده است. برای نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم مارشال، بیشترین سختی در درصد قیری معادل ٪2/3 حاصل شد. همچنین نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم ژیراتوری حساسیت کمتری در مقابل تغییرات درصد قیر از خود نشان دادند. نکته جالب توجه آنکه مدول برجهندگی نمونه‌های متراکم شده بوسیله روشهای تراکمی که انرژی بیشتری اعمال میکنند(75 ضربه مارشال و ژیراتوری) در حالت عمل آوری نشده کمتر از نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم مارشال با 50 ضربه بود که علت آن می‌تواند تأثیر رطوبت محبوس شده در حفرات مخلوط (فشار آب حفره‌ای) بر روی سختی اولیه نمونه‌ها باشد. به علاوه در مورد نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم ژیراتوری این امکان وجود دارد که جابجائی قیر و ریزدانه‌ها حین تراکم، باعث حصول مقادیر مدول کمتری برای نمونه‌ها شده باشد.

6-3- مدول برجهندگی نمونه‌های خشک (عمل‌آوری شده)

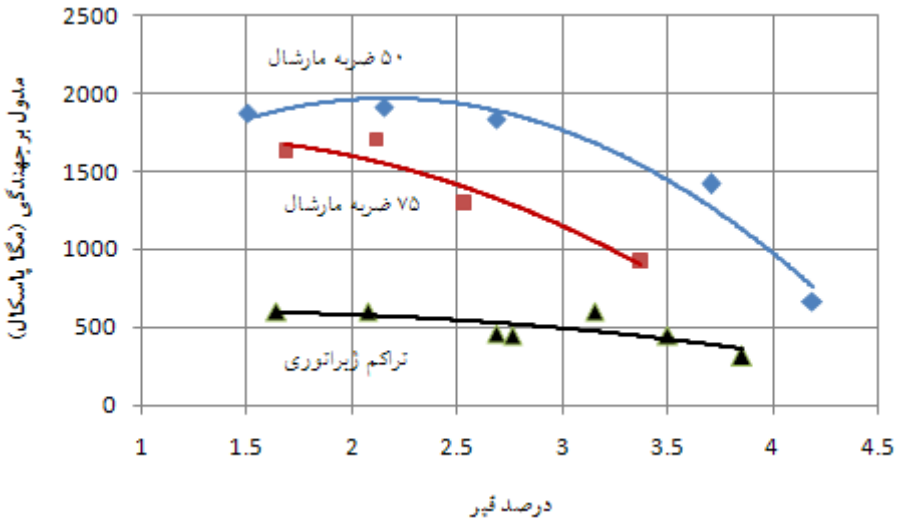
تغییرات مدول برجهندگی نمونه‌های عمل آوری شده در مقابل تغییر درصد قیر برای سه نوع تراکم در شکل 5 نشان داده شده است. عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای 60° و به مدت سه روز، باعث افزایش چشم‌گیری در سختی نمونه‌ها شد (بین 4 تا 25 برابر حالت عمل‌آوری نشده). نمونه‌های با درصد قیر بالاتر و دانسیته بیشتر، افزایش بیشتری در سختی از خود نشان دادند. اگرچه نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم ژیراتوری نسبت به تراکم مارشال، وزن مخصوص بالاتری داشتند، اما مشاهده شد که نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم مارشال، مقادیر مدول برجهندگی بالاتری در مقایسه با تراکم ژیراتوری از خود نشان دادند. یک دلیل محتمل برای وقوع چنین پدیده‌ای آن است که ساختار ذره‌ای نمونه های متراکم شده به روش مارشال با نمونه‌های متراکم شده توسط ژیراتوری که مشابهت بیشتری با شرایط واقعی دارد، متفاوت است و علت آن تغییر مکان ریزدانه‌ها و قیر در سطوح بالا و پائین نمونه‌های متراکم شده با چکش مارشال است. این پدیده مخصوصاً در درصد قیرهای کم، بیشتر مشهود بود.

6-4- مدول برجهندگی نمونه‌های اشباع (غرقاب شده)

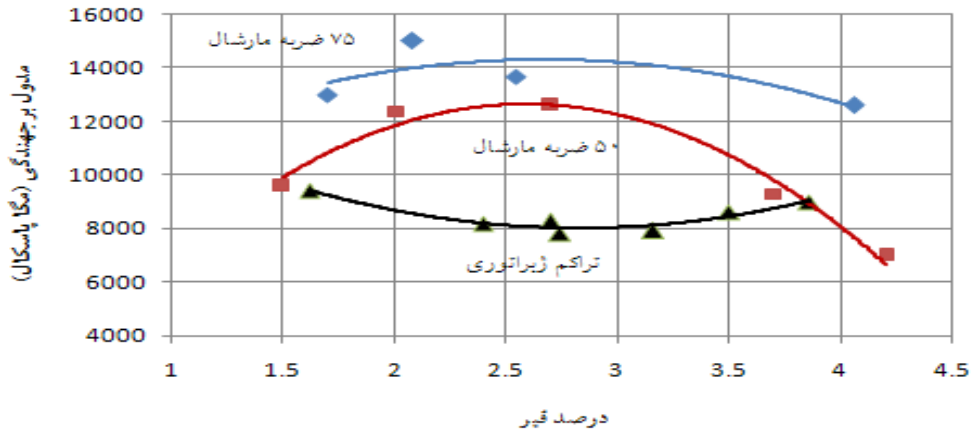
تغییرات مدول برجهندگی نمونه‌های اشباع در مقابل درصد قیر در شکل 6 نشان داده شده است. اشباع شدن، باعث کاهش چشم‌گیری در مدول برجهندگی نمونه‌ها شد. اما در این میان نمونه‌های متراکم شده با تراکم ژیراتوری کمترین تأثیر را پذیرفتند. به علاوه مشاهده شد که نمونه‌های متراکم شده با تراکم ژیراتوری در درصد قیر بالاتر، در محدوده درصد قیرهای مورد آزمایش، مدول برجهندگی بیشتری از خود نشان دادند که انتظار می رود این افزایش در مدول برجهندگی در مقادیر درصد قیر بالاتر به تدریج کاهش یابد. با مقایسه نتایج حاصل از تراکم مارشال و ژیراتوری، این ایده مطرح می شود که درصد قیر بهینه برای طرح اختلاط مخلوطهای آسفالت کف قیر، با استفاده از تراکم مارشال، درصد قیر متناظر با بیشینه مدول برجهندگی نمونه در حالت اشباع است. در حالیکه درصد قیر بهینه برای نمونه های متراکم شده به روش ژیراتوری با توجه به نیازهای سازه ای روسازی مورد نظر تعیین می شود.



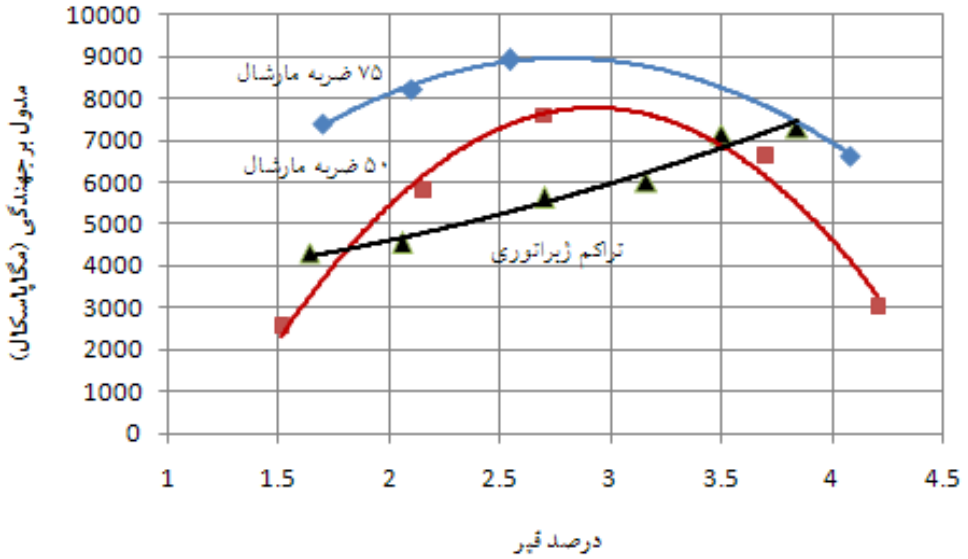
شکل 3. تغییرات وزن مخصوص خشک در مقابل درصد قیر برای برای سه نوع تراکم مختلف



شکل 4. تغییرات مدول برجهندگی نمونه های عمل آوری نشده (بلاقاصله بعد از تراکم) در مقابل درصد قیر برای سه نوع تراکم مختلف



شکل 5. تغییرات مدول برجهندگی نمونه های عمل آوری شده در مقابل درصد قیر برای برای سه نوع تراکم مختلف



شکل 6. تغییرات مدول برجهندگی نمونه های اشباع در مقابل درصد قیر برای برای سه نوع تراکم مختلف

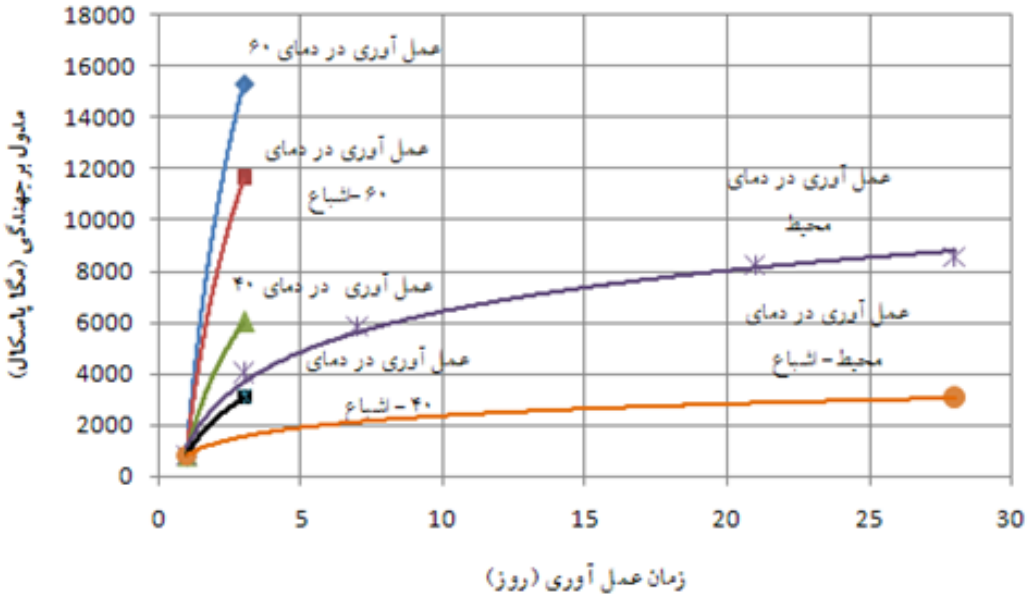
6-5- اثر روش عمل آوری

در این تحقیق، سه روش عمل آوری و اثرات آنها بر مدول برجهندگی نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت. این سه روش عبارتند از: عمل آوری به مدت 28 روز در دمای محیط(25 درجه سانتی گراد)، عمل آوری به مدت 3 روز در دمای 40° و عمل آوری به مدت سه روز در دمای 60° . شکل 7 اثر روش عمل آوری را برای نمونه های ساخته شده با 2/5٪ قیر و متراکم شده با 50 ضربه مارشال برای دو حالت خشک و اشباع را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط علاوه بر مدول برجهندگی کمتر نسبت به نمونه های عمل آوری شده به دو روش دیگر، حساسیت بیشتری نسبت به رطوبت نیز از خود نشان دادند. نمونه های عمل آوری شده در دمای 60 درجه بیشترین مقادیر مدول برجهندگی را داشتند که علت آن می تواند مربوط به تغییر خصوصیات قیر در اثر پیرشدگی دانست. با اینکه عمل آوری در دمای 60 درجه می تواند شبیه ساز خوبی برای دما و رطوبت مخلوط در برخی شرایط باشد. اما عمل آوری به مدت سه روز و در دمای 40 درجه در این حالت خاص مناسب تر به نظر می رسد. نکته جالب توجه آنکه مدول برجهندگی نمونه های عمل آوری شده به مدت سه روز در دمای 40 درجه مشابه مدول برجهندگی نمونه های عمل آوری شده به مدت 7 روز در دمای محیط بود.

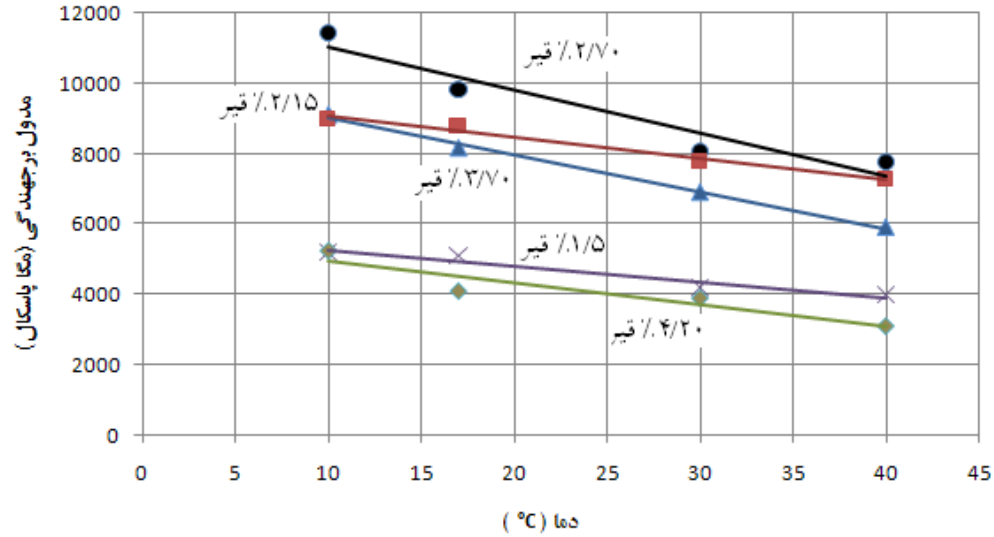
6-6- اثر دما

اثر دما بر مدول برجهندگی نمونه های مورد آزمایش در شکل 8 نشان داده شده است. نمونه های ساخته شده با 2/5 درصد قیر و تراکم 50 ضربه چکش مارشال برای بررسی اثر دما در نظر گرفته شدند. همانطور که مشاهده می شود نمونه هائی که مدول برجهندگی بیشتری دارند حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات دمای آزمایش از خود نشان دادند.

اما در مقایسه با محدوده مقادیر مدول برجهندگی مخلوطهای آسفالت گرم (Akeroyd and Hicks, 1988) مخلوطهای ساخته شده با استفاده از کف قیر حساسیت کمتری نسبت به دما از خود نشان می‌دهند که این نتیجه مشابه نتیجه می‌باشد با این تفاوت که در آزمایشهای ایشان از آهک به عنوان فیلر در ساخت نمونه های آزمایشگاهی استفاده شده بود.



شکل 7. تغییرات مدول برجهندگی در مقابل روش عمل آوری



شکل 8. تغییرات مدول برجهندگی در مقابل دما

7- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با همکاری آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی و با هدف بررسی بیشتر برروی رفتار مکانیکی و عملکردی مخلوطهای آسفالت کف قیر، انجام شد. همچنین ارزیابی تأثیر تراکم مارشال و ژیراتوری مدنظر قرار گرفت. در این تحقیق از مصالح خرده آسفالتی تراشیده شده از رویه بزرگراه امام رضا واقع در شرق تهران جهت ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شد. و انجام آنالیز دانه بندی برروی آنها، تأثیر میزان درصد قیر، نوع و میزان تراکم، دما و نوع عمل آوری برروی مدول برجهندگی و دانسیته نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. عمده نتایج حاصل از آزمایشهای انجام شده بر روی 90 نمونه فوق الذکر را می‌توان خلاصه نمود.

1) وزن مخصوص خشک نمونه‌های متراکم شده با تراکم ژیراتوری به علت اعمال انرژی بیشتر، از وزن مخصوص خشک نمونه‌های متراکم شده به روش مارشال، بیشتر است. به علاوه نمونه‌های متراکم شده با تراکم مارشال نسبت به تغییر درصد قیر حساس‌تر بودند

2) نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم ژیراتوری در حالت بدون عمل آوری، حساسیت کمتری در مقابل تغییرات درصد قیر از خود نشان دادند. نکته جالب توجه آنکه مدول برجهندگی نمونه‌های متراکم شده بوسیله روشهای تراکمی که انرژی بیشتری اعمال میکنند(75 ضربه مارشال و ژیراتوری) در حالت عمل آوری نشده کمتر از نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم مارشال با 50 ضربه بود.

3) اگرچه نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم ژیراتوری در حالت عمل آوری شده به مدت سه روز در دمای 60 درجه سانتی گراد، نسبت به تراکم مارشال با شرایط عمل آوری یکسان، وزن مخصوص بالاتری داشتند، اما مشاهده شد که نمونه‌های متراکم شده توسط تراکم مارشال، مقادیر مدول برجهندگی بالاتری در مقایسه با تراکم ژیراتوری از خود نشان دادند یک دلیل محتمل برای وقوع چنین پدیده‌ای تغییر مکان ریزدانه‌ها و قیر در سطوح بالا و پائین نمونه های متراکم شده با چکش مارشال می تواند باشد.

4) نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مخلوطهای آسفالتی کف قیر دارای برخی مشخصات منحصر به فرد هستند که با مخلوطهای آسفالتی گرم متفاوت است. بطور مثال درصد قیر بهینه در مخلوطهای آسفالتی تولید شده با کف قیر مانند آسفالت های گرم، به راحتی از روی منحنی وزن مخصوص- درصد قیر قابل تعیین نیست.

5) مقاومت مخلوطهای آسفالتی کف قیر به شدت وابسته به میزان رطوبت آنهاست و این حساسیت مخلوط کف قیر به رطوبت، باید به عنوان راهنمائی برای تعیین کمینه درصد قیر قابل قبول مورد استفاده قرار گیرد در حالت کلی نمونه‌های متراکم شده با تراکم مارشال، مدول برجهندگی غیراشباع (خشک) بالاتری در مقایسه با تراکم ژیراتوری از خود نشان دادند. اما در عوض، نمونه‌های متراکم شده با تراکم ژیراتوری حساسیت کمتری نسبت به رطوبت داشتند.

6) عمل آوری تسریع شده در دمای 60° منجر به حصول مقادیر مدول برجهندگی بیشتری در مقایسه با عمل آوری در دمای محیط شد. اما بطور کلی دما و مدت زمان عمل آوری باید به گونه ای انتخاب شود که نشان دهنده روسازی در شرایط محل مورد نظر باشد.

7) به علت وجود درصد قیر کمتر و استفاده از فیلرهای فعال مانند آهک و یا سیمان در مخلوطهای آسفالتی کف قیر، تغییرات دما تأثیر کمتری بر روی مدول برجهندگی آنها در مقایسه با مخلوطهای آسفالتی گرم می‌گذارد.

8- سپاسگزاری

این تحقیق با همکاری دانشکده مهندسی عمران پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران و آزمایشگاه مادر تحصصی فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی انجام گرفته است که بدین وسیله از پشتیبانی و همکاری مسئولین و پرسنل محترم آزمایشگاه مزبور صمیمانه سپاسگزاری می شود.

9- پی‌نوشت‌ها

1- Cold In place Recycling
2-Foamed Asphalt
3- Expanded Asphalt
4- Half-Life
5- Expansion Ration
6- Optimum Moisture Content
7- Universal Testing Machine
8- Environmental Chamber

10- مراجع

- یوسف دوست، س.، (1386)، "بررسی آزمایشگاهی مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیر مستقیم آسفالت کف قیری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران.

-"مشخصات فنی اجرائی بازیافت سرد آسفالت" (1386)، نشریه 339، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

- An Overview of Recycling and Reclamation Methods for Asphalt Pavement Rehabilitation, Asphalt Recycling and Reclaiming Association, Annapolis, MD, (1992).

- Bissada, A.F. (1987), “Structural Response of

materials. Construction and Building Materials", 22(1), pp. 30-40.

-Iwański, M., & Chomicz-Kowalska, A. (2013). "Laboratory study on mechanical parameters of foamed bitumen mixtures in the cold recycling technology". Procedia Engineering, 57, pp. 433-442.

-Iwański, M., Chomicz-Kowalska, A., (2012). "Experimental study of water and Frost resistance of foamed bitumen mixes in the cold recycling technology", 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th, Istanbul, Turkey.

-Iwański, M., & Chomicz-Kowalska, A. (2011), "the effects of using foamed bitumen and bitumen emulsion in the cold recycling technology". In 8th International Conference, Environmental Engineering.

- Kandhal P.S. (1984), "Asphalt Cold Recycling Technology in Pennsylvania, AAPT Proceedings", Vol. 53, Association of Asphalt Paving Technologists, Minneapolis, MN.

-Kavussi, A., & Modarres, A. (2010), "Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement". Construction and Building Materials, 24(10), pp. 1920-1927.

-Kavussi, A., & Modarres, A. (2010), "a model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results". Construction and Building Materials, 24(11), pp. 2252-2259.

- Kendal M., Baker B., Evans P & Rammujan J., (1999), "Foamed Bitumen Stabilization", Southern Region Symposium, Australia.

-Khosravifar, S., Schwartz, C. W., & Goulias, D. G. (2013), "Foamed asphalt stabilized base: a case study". In Proceeding of ASCE airfield and highway pavements conference. pp. 106-117.

-Kim, Y., & Lee, H. D. (2012), "Performance evaluation of cold in-place recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus", flow number, flow time, and raveling loss. KSCE Journal of Civil Engineering, 16(4),

Foamed-Asphalt-Sand Mixtures in Hot Environments". In Transportation Research Record 1115, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 134-149.

- Bowering, R.H.(1970), "Properties and Behaviour of Foamed Bitumen Mixtures for Road Building". 5th ARRB Conference, Part 6, pp. 38-57.

- Castedo, L.H. and Wood, L.E.(1983), "Stabilization with Foamed Asphalt of Aggregates Commonly Used in Low-Volume Roads". In Transportation Research Record 898, TRB, National Research Council, Washington, D.C. pp. 297-302.

- Csanyi, L.H.(1957). "Foamed Asphalt in Bituminous Pavements", Transportation Research Record 160, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 109-122.

- 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.

-Chandra, R., Veeraragavan, A., & Krishnan, J. M. (2013). "Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen". Procedia-Social and Behavioral Sciences, 104, pp. 2-11.

-Design, P. (1992). "A Guide to the Structural Design of Road Pavements". Austroads Publication No. APGP17/04. Austroads, Sydney.

-Du, S. (2014). "Interaction mechanism of cement and asphalt emulsion in asphalt emulsion mixtures". Materials and structures, 47(7), pp. 1149-1159.

-García, A., Lura, P., Partl, M. N., & Jerjen, I. (2013), "Influence of cement content and environmental humidity on asphalt emulsion and cement composites performance". Materials and structures, 46(8), pp: 1275-1289.

- "Guidelines for Cold In-Place Recycling Asphalt Recycling and Reclaiming Association", Annapolis, MD, (1992).

- He, G. P., & Wong, W. G. (2007), "Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials". Construction and Building Materials, 21(8), pp. 1809-1819.

- He, G. P., & Wong, W. G. (2008), "Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP

- Manual, W. C. R. (2004), Wirtgen GmbH. Windhagen, Germany.

-Modarres, A., Nejad, F. M., Kavussi, A., Hassani, A., & Shabanzadeh, E. (2011), "a parametric study on the laboratory fatigue characteristics of recycled mixes". Construction and Building Materials, 25(4), pp. 2085-2093.

- Munthen K.M., (1999), "Foamed Asphalt Mixes – Mix Design Procedure". Contract Report CR-98/077, CSIR Transportek, South Africa.

-Nazemi, M., & Heidaripanah, A. (2016), "Support vector machine to predict the indirect tensile strength of foamed bitumen-stabilized base course materials". Road Materials and Pavement Design, 17(3), pp.768-778.

-Rutherford, T., Wang, Z., Shu, X., Huang, B., & Clarke, D. (2014), "Laboratory investigation into mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar". Construction and Building Materials, 65, pp. 76-83.

- Sakr, H.A. and Manke, P.G.(1985), "Innovations in Oklahoma Foamix Design Procedures" Transportation Research Record 1034, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 26-34.

-Yan, J., Zhang, Z., Charmot, S., Ding, W., & Li, F. (2014), "Investigation and Prediction Model for the Dynamic Modulus of Asphalt Emulsion Cold Recycled Mixtures". Journal of Materials in Civil Engineering, 27(1).

- Yan, J., Ni, F., Yang, M., & Li, J. (2010). ″An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes″. Construction and Building Materials, 24(11), pp. 2151-2156.

- Wood, L. E., White, T. D., & Nelson, T. B. (1988), "Current practice of cold in-place recycling of asphalt pavements. Transportation Research Record", (1178).

-Wirtgen Group, (2002), "Rehabilitation of a Heavily Trafficked Road, Pavement Investigation and Construction Report", Germany.

pp. 586-593.

-Kim, Y., Im, S., & Lee, H. D. (2010), "Impacts of curing time and moisture content on engineering properties of cold in-place recycling mixtures using foamed or emulsified asphalt". Journal of Materials in Civil Engineering, 23(5), pp. 542-553.

- Kim, Y., Lee, H. D., & Heitzman, M. (2009), Dynamic modulus and repeated load tests of cold in-place recycling mixtures using foamed asphalt. Journal of Materials in Civil Engineering, 21(6), pp. 279-285.

-Kim, Y., & Lee, H. D. (2011), Influence of reclaimed asphalt pavement temperature on mix design process of cold in-place recycling using foamed asphalt. Journal of Materials in Civil Engineering, 23(7), pp. 961-968.

-Kuna, K., Airey, G., & Thom, N. (2016), "Development of a tool to assess in-situ curing of Foamed Bitumen Mixtures". Construction and Building Materials, 124, 55-68.

Kuna, K., Airey, G., & Thom, N. (2016), "Mix design considerations of foamed bitumen mixtures with reclaimed asphalt pavement material". International Journal of Pavement Engineering, pp.1-14.

- Lee, D.Y.(1981), "Treating Marginal Aggregates and Soil with Foamed Asphalt". Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 50, pp. 211 - 250.

-Leek, C., & Jameson, G. (2011). "Review of Foamed Bitumen Stabilization Mix Design Methods". Technical Report, Austroads AP-T178/11, Sydney, Australia.

-Long, F. M., Theyse, H. L., & Ventura, D. F. C. (2004), "Characterisation of Foamed Bitumen Treated Material from HVS Test Section". Transportek, CSIR, South Africa.

- Maccarrone, S., Holleran, G. and Leonard, D.J. and Hey, S. (1994), "Pavement Recycling Using Foamed Bitumen". 17 the ARRB Conference, Part 3, pp. 349 - 366.