

ارزیابی خواص مقاومتی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری اصلاح شده با میکرو آهک و سیمان

مهرداد میرشکاریان بابکی، دانشجوی دوره دکتری، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران ایران

محمودرضا کی منش (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران ایران

غلامرضا توکلی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران دانشگاه پیام نور، تهران ایران

آیت سلطانی منش، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران ایران

E-mail: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۰۱

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۶

چکیده

امروزه استفاده از روش بازیافت سرد آسفالت به صورت درجا، به عنوان یک روش اقتصادی برای بهسازی روسازی که دچار فرسودگی شده است، رشد چشمگیری داشته است. در بین روش‌های بازیافت سرد استفاده از فن‌آوری کف قیر به دلیل سهولت و سرعت در اجرا مورد توجه قرار گرفته است. تاکنون در مخلوط‌های کف قیری به منظور کاهش حساسیت مخلوط در برابر رطوبت و افزایش خواص مقاومتی از فیلهای فعال نظیر سیمان و آهک استفاده شده است. اگرچه اطلاعات محدودی در زمینه تاثیر انواع فیله بر خواص مکانیکی مخلوط‌های کف قیر در دسترس است. در این تحقیق از آهک هیدراته، میکرو آهک و سیمان و ترکیب آنها با یکدیگر به عنوان فیله فعال در مخلوط کف قیری استفاده گردید و تاثیر آنها بر خواص مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا نمونه‌های ساخته شده با قیر ۱، ۳ و ۲ درصد و شرایط عمل‌آوری متفاوت (خشک و اشباع) تحت آزمایش‌های استحکام مارشال، مقاومت کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در همه طرح‌ها با افزایش مقدار قیر از ۱ درصد به ۳ درصد استحکام مارشال و مدول برجهندگی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، اما مقاومت کشش غیرمستقیم بطور پیوسته افزایش می‌یابد. در بین فیلهای استفاده شده، ترکیب میکرو آهک با سیمان به نسبت مساوی در مقایسه با دیگر فیله‌ها بیشترین تاثیر را در افزایش خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها داشته است. به عنوان مثال این فیله موجب افزایش استحکام مارشال و مدول برجهندگی نمونه‌ها در حالت خشک با قیر ۲ درصد به میزان ۴۷ و ۶۲ درصد نسبت به نمونه بدون فیله گردید. همچنین فیله ترکیب سیمان و میکرو آهک اثر چشم‌گیری در کاهش خرابی‌های رطوبتی و افزایش نسبت TSR دارد، بطوریکه با افزودن این فیله نسبت TSR نمونه با قیر ۲ درصد نسبت به نمونه بدون فیله ۲۶ درصد افزایش می‌یابد. در نهایت با استفاده از نتایج تحقیق، یک مدل رگرسیونی بین پارامترهای مقاومت کشش غیرمستقیم، استحکام مارشال و نسبت مدول برجهندگی در حالت خشک ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: حساسیت رطوبتی، سیمان، میکرو آهک، مخلوط کف قیری

۱. مقدمه

دمای آب و افزودنی های قیر بستگی دارد. کف قیر ایجاد شده به دلیل کاهش گرانشی قیر با ریزدانه‌ها به صورت کامل مخلوط شده و ملاتی را به وجود می‌آورد که می‌تواند درشت‌دانه‌ها را به هم متصل نماید [Wirtgen Cold Recycling Technology, 2012].

تحقیقات مختلف نشان داده در مخلوط‌های کف قیری با افزودن فیلر فعال (مانند سیمان و آهک)، اختلاط قیر با سنگ‌دانه‌های درشت بهتر صورت می‌گیرد و علاوه بر افزایش مقاومت مخلوط موجب کاهش حساسیت آن در برابر رطوبت و چرخه یخبندان-ذوب می‌گردد. اگر چه اطلاعات محدودی در زمینه تاثیر انواع مختلف فیلرهای فعال بر خصوصیات مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های کف قیری در دسترس است [Halles and Thenoux, 2009]. با این وجود در این مقاله اثر سه فیلر فعال آهک هیدراته، سیمان، میکرو آهک و ترکیب آنها با یکدیگر بر خصوصیات مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های کف قیری بررسی گردیده است.

هدف اصلی از این مطالعه آزمایشگاهی بررسی عوامل تاثیر گذار (نوع فیلر، مقدار قیر و روش عمل آوری) بر خصوصیات مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های باز یافت شده کف قیری است. مخلوط‌های کف قیری باز یافت شده به دلیل عدم چسبندگی مناسب قیر با سنگدانه‌ها در برابر خرابی‌های رطوبتی بسیار آسیب پذیرند. همچنین با در نظر گرفتن ماهیت متفاوت این نوع از مخلوط‌های آسفالتی، تاکنون روش استاندارد جهت دستیابی به مقدار قیر بهینه در این نوع مخلوط‌ها ارایه نشده است. از طرفی دیگر با توجه به وجود رطوبت در مصالح خرده آسفالتی و کف قیر، همواره استفاده از فیلرهایی که با رطوبت موجود در مخلوط می‌توانند واکنش شیمیایی دهند مورد توجه بوده است و نیز در این تحقیق برای اولین بار از فیلر میکروآهک در مخلوط‌های کف قیری استفاده شد و تاثیر آن بر خواص مکانیکی مخلوط بررسی گردید. به این منظور نمونه‌های مخلوط کف قیر با استفاده از مصالح خرده آسفالت و در سه درصد قیر مختلف (۱، ۲ و ۳ درصد وزن مخلوط) و با چند نوع فیلر فعال (۱/۵ درصد وزن مخلوط) با استفاده از چکش مارشال ساخته شد و سپس تحت دو روش عمل آوری (خشک و اشباع) قرار گرفتند. در ادامه آزمایش‌های استحکام مارشال، مقاومت کشش غیرمستقیم و مدول برجهنگی بر روی

طی سال‌های اخیر با افزایش گازهای گلخانه‌ای نظیر متان، دی اکسید کربن، بخار آب و اکسید نیتروژن در جو، دمای کره زمین پیوسته در حال افزایش است که این امر باعث تغییرات ناخوشایند در محیط زیست و شرایط آب و هوایی خواهد شد. از این رو در سال ۱۹۹۷ طی پیمانی معروف به کیوتو^۱، کشورهای صنعتی متعهد شدند که ظرف ده سال آینده میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای خود را حدوداً ۵ درصد کاهش دهند [Ameri, Mansourkhaki and Askarzade, 2009 (In Persian)]. در راستای کاهش آلاینده‌های ناشی از تهیه مخلوط آسفالتی داغ و نیز کاهش مصرف انرژی، استفاده از فناوری باز یافت سرد در حال گسترش است. باز یافت سرد در محل با استفاده از روش کف قیر یکی از فناوری‌های نوین در این حوزه است. از مهمترین مزایای باز یافت سرد به روش کف قیر می‌توان به دمای پخش و تولید پایین، عدم نیاز به تهیه و حمل مصالح جدید، صرفه جویی در مصرف انرژی و کاهش تولید دی اکسید کربن و گرد و غبار اشاره نمود.

روش اصلاح و نوسازی رویه‌های آسفالتی با استفاده از کف قیر از سال ۱۹۸۰ بطور وسیع با استقبال گسترده و روزافزون بسیاری از کشورها از جمله کانادا، آفریقا جنوبی، ایالات متحده آمریکا مواجه شد. در ایران نیز در سال‌های اخیر از این روش در چند پروژه تثبیت، بهسازی و اصلاح راه‌ها و باند فرودگاه‌ها استفاده شده است. اولین کاربرد کف قیر در ایران به سال ۱۳۷۷ باز می‌گردد که در آن بخشی از لایه اساس باند فرودگاه عسلویه با استفاده از کف قیر تثبیت و بخشی دیگر بطور کامل باز یافت گردید. از دیگر پروژه‌های اجرا شده در ایران می‌توان به بهسازی بخشی از بزرگراه تهران-قم، ساخت لایه اساس قیری بزرگراه قشم-درگهان، تثبیت لایه اساس فرودگاه همدان و بهسازی محور شاهرود-سبزوار اشاره کرد [Ahmadi, 2009].

کف قیر با افزودن مقداری آب سرد (آب با دمای ۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد) و هوا به قیر داغ تولید می‌شود، بطوریکه با افزودن آب سرد در قیر داغ (قیر با دمای حدود ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) آب به صورت بخار درآمده و در حباب‌های بسیار ریز قیر محبوس می‌گردد، بدین ترتیب قیر به میزان چندین برابر حجم اولیه منبسط می‌شود یا به اصطلاح کف می‌نماید. خصوصیات کف تولید شده به نوع و درجه نفوذ قیر، مقدار و

ارزیابی خواص مقاومتی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری اصلاح شده با میکرو آهک و سیمان

می‌گردد [Halles and Thenoux, 2009]. افزودن سیمان به عنوان فیلر فعال در مصالح خرده آسفالتی درشت‌دانه باعث افزایش چشمگیر مقاومت نسبت به مصالح ریزدانه می‌شود و همچنین سیمان نسبت به کف قیر تأثیر بیشتری در کاهش خرابی های رطوبتی و افزایش مقاومت کشش غیر مستقیم دارد [Iwanski and Chomicz-Kowalsky, 2013].

اضافه کردن فیلر پودر آهک شکفته به مخلوط‌های آسفالتی گرم کف قیری موجب کاهش حساسیت رطوبتی و افزایش مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی می‌شود [Kavousi and Hashemian, 2007 (In Persian)].

نتایج مطالعه آزمایشگاهی هاشمیان در زمینه مخلوط‌های کف قیر نشان داد که افزودن فیلرهای سیمان، آهک و ترکیب آنها با یکدیگر (با نسبت مساوی) به میزان ۱/۵ درصد وزن مخلوط باعث افزایش مقاومت کشش غیرمستقیم، مقاومت فشاری و نسبت استحکام مارشال می‌شود، که فیلر سیمان در مقایسه با دیگر طرح‌ها تأثیر بیشتری در افزایش خصوصیات مکانیکی و صلبیت نمونه‌ها داشته است [Hashemian and Kavousi, 2010].

تحقیقات شفابخش در زمینه بررسی فیلرهای سیمان، پودر آهک، آهک شکفته، پوزلان، سرباز کوره و پودر لاستیک بر مخلوط‌های بازیافت شده کف قیری نشان داد که در بین فیلرهای استفاده شده، سیمان بیشترین تأثیر را در افزایش مدول برجهندگی و مقاومت کشش مستقیم داشته است [Shafabakhsh and Rezaeian, 2010 (In Persian)].

مطالعات ایوانسکی در سال ۲۰۱۶ نشان داد که استفاده از فیلر سنگ معدنی گابرو باعث افزایش استحکام مارشال و مقاومت کشش غیر مستقیم می‌شود و سپس آنها یک معادله ریاضی درجه دوم دو متغیره برای تخمین استحکام مارشال، مقاومت کشش غیر مستقیم و مدول برجهندگی بعنوان متغیر وابسته و مقدار فیلر و قیر بعنوان متغیر مستقل ارائه دادند [Iwanski, Buczynski and Mazurek, 2016].

دیوانداری با استفاده از روش رگرسیون خطی و ترکیب نتایج آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، استحکام مارشال و اثر جای چرخ یک رابطه ریاضی به شرح ذیل برای پیش بینی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی داغ ارائه نمود و سپس اعتبار سنجی مدل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی صورت پذیرفت.

نمونه‌های عمل‌آوری خشک و اشباع انجام گرفت. در نهایت با استفاده از نتایج تحقیق یک رابطه رگرسیونی بین پارامترهای مقاومت کشش غیرمستقیم و استحکام مارشال و مدول برجهندگی در حالت خشک، ارائه گردید.

۲. مروری بر تحقیقات گذشته

استفاده از آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی گرم از دهه ۱۹۷۰ میلادی در آمریکا شروع شد و پس از سال‌ها تحقیق امروزه به عنوان یکی از موثرترین افزودنی‌ها در آسفالت گرم به شمار می‌آید. در حال حاضر حدود ۱۰ درصد مخلوط‌های آسفالتی گرم تولیدی در آمریکا حاوی آهک هیدراته هستند [Lesueur, Petit and Ritter, 2014]. بحیری در سال ۲۰۱۳ در مصر جهت بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داغ از آزمایش‌های استحکام مارشال و کشش غیرمستقیم (در حالت خشک و اشباع) و از دو ماده افزودنی آهک هیدراته و سیمان استفاده کرد. نتایج مطالعه نشان داد که آهک هیدراته تأثیر بیشتری در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در مقایسه با سیمان دارد [Behiry, 2013]. مطالعات دیوانداری نشان داد که افزودن ۲ درصد پودر آهک به عنوان بخشی از فیلر مصالح سنگدانه‌ای در مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم موجب افزایش مقدار TSR، افزایش مدول برجهندگی و افزایش مقدار عدد روانی می‌گردد [Ziari, Diavndari and Yavari, 2016 (In Persian)].

از عمده ضعف‌های مخلوط آسفالتی کف قیری وجود درصد فضای خالی زیاد و عدم پوشش مناسب درشت‌دانه‌ها توسط کف قیر است. این موضوع موجب افت مقاومت مخلوط کف قیر و کاهش دوام آن می‌گردد و برای جبران این نقیصه از فیلرهای فعال مانند سیمان استفاده می‌شود [Asphalt Academy, 2009]. فیلرهای فعال با بوجود آوردن مقدار ماستیک بیشتر در مخلوط و بهبود چسبندگی قیر به مصالح خرده آسفالتی موجب افزایش خصوصیات مکانیکی مخلوط کف قیر می‌شوند [Martinez-Arguelles et al. 2015]. در بین فیلرهایی چون سیمان، غبار کوره سیمان، آهک و خاکستر بادی، فیلر سیمان تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های کف قیری نسبت به بقیه دارد اما آهک بر عکس سیمان در عین افزایش مقاومت با درصد کمتری نسبت به سیمان موجب افزایش انعطاف‌پذیری مخلوط نیز

معدنی گابرو (درصد) پیش بینی کند [Iwanski, Buczynski and Mazurek, 2016].

۳. روش تحقیق

۳-۱ انتخاب سنگ‌دانه

در این پروژه سنگدانه‌های مصرفی از آسفالت تراش داده شده میدان وحدت شهر اردبیل تهیه شد و مصالح خرده آسفالت توسط دستگاه آسفالت تراش ویرتگن^۳ و تا عمق متوسط ۱۰ سانتی متری تراشیده شده بودند. به دلیل عدم پوشش قیری مناسب درشت‌دانه‌ها با کف قیر، دانه‌های درشت‌تر از ۱۹ میلی‌متر از مخلوط جدا گردید [Xu et al, 2012]. در ابتدا دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی انجام و مصالح بر اساس اندازه الک‌ها تفکیک گردید. سپس مصالح خرده آسفالتی با توجه به حدود دانه بندی مورد نظر و ساخت ۱۲ نمونه ۱۰ کیلوگرمی بازترکیب گردید و نیز در راستای هدف اصلی تحقیق، جهت اصلاح دانه بندی از مصالح جدید استفاده نگردید. منحنی دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ آمده است. این دانه‌بندی حدود پیشنهادی فیناوریباز یافت سرد ویرتگن را مطابق شکل ۱ برآورده می‌سازد [Wirtgen Cold Recycling Technology, 2012]. همچنین بررسی کیفی مصالح خرده آسفالتی در جدول ۱ مطابق با جدول ۴-۱ نشریه ۳۳۹ بیان شده است [Iran Cold Mix Recycling General Technical Specification, No. 339, 2006].

(۱)

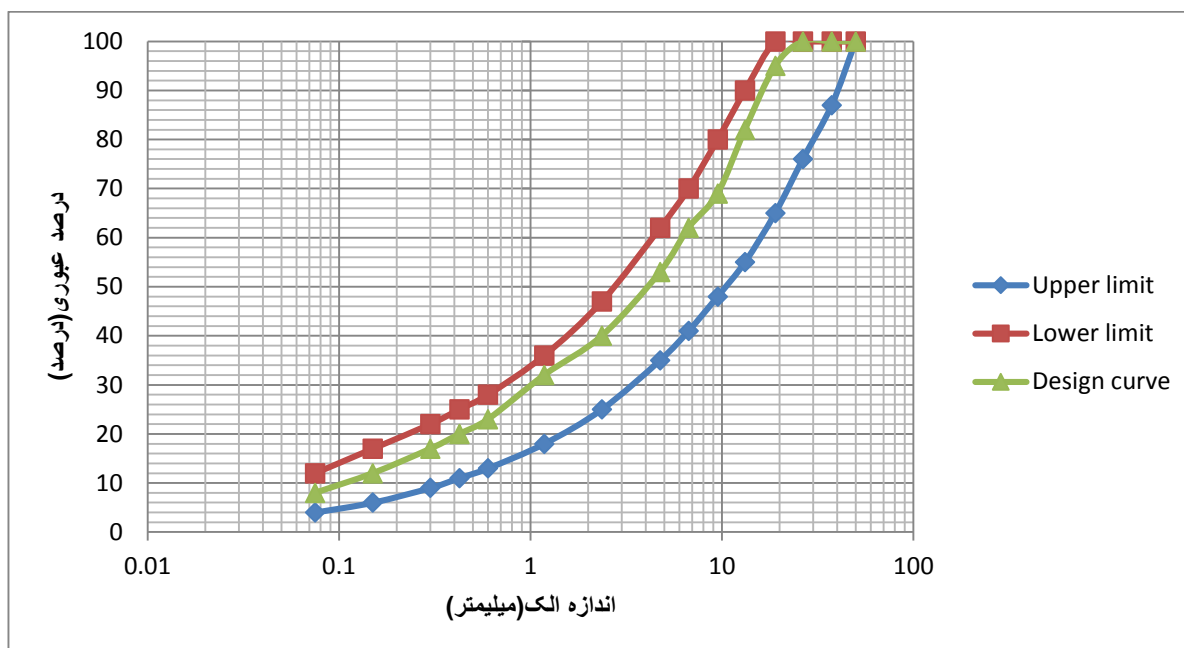
$$R_d(mm) = 2.951 \times D_v - 0.736 \times S_m + 0.003 \times S_t + 2.737$$

در رابطه فوق R_d عمق شیار بدست آمده از آزمایش اثر جای چرخ بر حسب میلی‌متر، D_v تغییر مکان قائم بدست آمده از آزمایش کشش غیرمستقیم بر حسب میلی‌متر، S_m استحکام مارشال بدست آمده بر حسب کیلونیوتن و S_t مقاومت کشش غیرمستقیم بر حسب کیلوپاسکال است. [Divandari et al. 2015 (In Persian)].
مدرس با انجام آزمایش‌های مقاومت کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی بروی مخلوط‌های بازیافت شده قیر امولسیون با استفاده از سیمان و در شرایط عمل آوری مختلف، مدلی را برای پیش بینی مدول برجهندگی به شرح ذیل ارائه کردند و سپس معتبر سازی و محدوده کاربرد مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی انجام گرفت.

$$M_r = 12.81 \times ITS - 984.9 \quad (2)$$

در رابطه فوق M_r مدول برجهندگی بر حسب مگاپاسکال و ITS مقاومت کشش غیرمستقیم بر کیلوپاسکال است [Modares and Kavousi, 2011].
ایوانسکی مدل ریاضی جهت پیش بینی مقاومت مارشال، مقاومت کشش غیر مستقیم در مخلوط‌های کف قیر با فیلر معدنی گابرو ارائه دادند. در معدل ارائه شده از روش رگرسیون دو متغیره غیر خطی (درجه دوم) معادله استفاده گردید که می‌تواند خصوصیات ذکر شده را بر حسب مقدار کف قیر (درصد) و فیلر

ارزیابی خواص مقاومتی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری اصلاح شده با میکرو آهک و سیمان



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح خرد آسفالتی

جدول ۱. مشخصات مصالح خرد آسفالتی مورد استفاده

روش آزمایش		حدود مشخصات	مشخصات مصالح	ویژگی‌ها
AASHTO	ASTM	نشریه ۳۳۹	مصالح	
T96	C131	حداکثر ۴۰	۳۰	افت وزنی در برابر سایش (لس آنجلس)
T104	C88	حداکثر ۱۲	۰/۳	افت وزنی در برابر سولفات سدیم
T176	C2419	حداقل ۳۵	۴۸	ارزش ماسه ای
T89,90	C4318	حداکثر ۶	۲	نشانه خمیری
-	-	حداقل ۵۰	۹۸	شکستگی مانده روی الک شماره ۴
T84,85	C127,128	حداکثر ۳	۱/۸	جذب آب
-	-	حداقل ۱۰	۲۸	ضریب یکنواختی
T194,267	-	حداکثر ۲	۱	مواد آلی

Recycling General Technical Specification, No:

۳۳۹, 2006 (In Persian). در این پروژه از قیر ۸۵/۱۰۰

محصول پالایشگاه تهران استفاده شد و مشخصه‌های اصلی قیر

مورد استفاده به شرح جدول ۲ است.

۲-۳ انتخاب قیر و مشخصات تولید کف قیر

قیرهای با ویسکوزیته پایین بهتر تبدیل به کف می‌شوند اما با

این وجود، نوع قیر مشکلی را در ایجاد کف به وجود نمی‌آورد،

مگر اینکه قیر حاوی سیلیکون باشد [Iran Cold Mix

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده

استاندارد	حدود مجاز	مقادیر	خصوصیات
ASTM D5	۸۵-۱۰۰	۹۱	درجه نفوذ (دهم میلی متر)
ASTM D36	۴۹-۵۶	۴۹	نقطه نرمی (سانتیگراد)
ASTM D113	بیشتر از ۱۰۰	بیشتر از ۱۰۰	خاصیت انگمی (سانتی متر)
ASTM D92	بیشتر از ۲۳۲	۲۹۶	درجه اشتعال (سانتیگراد)
ASTM D2170	-	۴۱۰	ویسکوزیته کینماتیک در دمای ۱۳۵ (سانتی استوکس)

آب (۱ و ۲ و ۳ و ۴ درصد وزنی قیر) تبدیل به کف قیر گردید و پارامترهای نیمه عمر، نسبت انبساط و شاخص کف قیر اندازه‌گیری و تغییرات این پارامترها در برابر درصد آب بررسی شد. برای ارزیابی خصوصیات کف قیر تولید شده از پارامترهای زیر استفاده گردید [NCHRP 807, 2015]:

- نیمه عمر^۴: زمان رسیدن حجم کف قیر به نصف حداکثر حجم کف بر حسب ثانیه که معرف پایداری کف قیر و سرعت محو شدن کف در مدت زمان اختلاط قیر و مصالح سنگی است.
- نسبت انبساط^۵: نسبت حجم حداکثر کف قیر به حجم اولیه قیر که تعیین کننده چگونگی توزیع قیر در مخلوط است.
- شاخص کف قیر^۶: این شاخص طبق رابطه زیر تعیین می گردد و توانایی ترکیب شدن کف قیر را با مصالح خرده آسفالت نشان می دهد.

جهت تولید و بررسی خصوصیات کف قیر در آزمایشگاه از دستگاه ساخت کف قیر استفاده شد (شکل ۲). این دستگاه از یک ظرف برای گرم کردن قیر و دو عدد پمپ دبی متغیر برای تزریق قیر و آب و همچنین یک ظرف جهت تخلیه کف قیر خروجی تشکیل شده است. قیر داغ و آب سرد (با وزن مشخص) به همراه هوای فشرده به محفظه انبساط تزریق می شوند و سپس از مجرای دیگر کف قیر تولیدی تخلیه می‌گردد. استفاده از این دستگاه این امکان را فراهم می‌سازد که تا علاوه بر تنظیم میزان قیر و آب ورودی با تغییر پارامترهایی نظیر فشار قیر، فشار آب و دمای قیر شرایط اجرایی مورد انتظار را شبیه سازی نمود. در این دستگاه فشار قیر ورودی تابعی از سرعت ماشین تثبیت بوده و در سرعت های متعارف ۵ الی ۱۰ متر بردقیقه، فشار قیر ورودی به نازل ۵ اتمسفر انتخاب می‌گردد [Asphalt Academy, 2009].

در این پروژه ساخت کف قیر بدین صورت انجام گرفت که قیر داغ با دمای ۱۷۰ درجه سانتیگراد و با درصدهای مختلف



شکل ۲. دستگاه تولید کف قیر WLB10

ارزیابی خواص مقاومتی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری اصلاح شده با میکرو آهک و سیمان

نسبت انبساط=ER

(۳)

HL= نیمه عمر (ثانیه)

$$FI = \frac{HL}{\ln 2} \left[4 - ER - 4 \ln \left(\frac{4}{ER} \right) \right] + \left(\frac{1+c}{c} \right) (ER \times t_s)$$

t_s= زمان تخلیه کف قیر (ثانیه)

مقدار C بر اساس جدول زیر تعیین می گردد.

FI= شاخص کف قیر

جدول ۳. مقدار C

زمان تخلیه کف قیر (ثانیه)	ضریب انبساط	نیمه عمر ۲ ثانیه	نیمه عمر ۵ ثانیه	نیمه عمر ۱۵ ثانیه	نیمه عمر ۳۰ ثانیه	نیمه عمر ۶۰ ثانیه
۱	۵	۰/۸۳	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۹
	۱۵	۰/۸۳	۰/۹۳	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹
	۲۵	۰/۸۳	۰/۹۳	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹
۵	۵	۰/۴۳	۰/۶۹	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۹۶
	۱۵	۰/۴۴	۰/۷۰	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۹۷
	۲۵	۰/۴۴	۰/۷۰	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۹۷
۱۰	۵	۰/۲۳	۰/۵۱	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۹۴
	۱۵	۰/۲۳	۰/۵۱	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۹۴
	۲۵	۰/۲۳	۰/۵۱	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۹۴

جدول ۴. مقادیر نسبت انبساط، نیمه عمر و شاخص کف قیر در برابر درصد آب

مقدار آب (درصد وزنی قیر)	نسبت انبساط	نیمه عمر	شاخص کف قیر
۱	۷/۴	۲۲/۴	۶۹
۲	۱۲/۳	۱۷/۳	۱۶۰
۳	۱۷/۲	۱۲/۲	۲۲۴
۴	۲۲/۱	۸/۱	۲۱۸

Cold Mix Recycling General Technical Specification, No: 339, 2006] همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده و بر اساس نتایج نیمه عمر، نسبت انبساط و شاخص کف قیر مقدار بهینه آب ۳ درصد وزن قیر انتخاب شد. دیگر مشخصات تولید کف قیر مطابق جدول ۵ اعمال گردید.

مقدار بهینه درصد آب بر اساس حدود توصیه شده توسط آیین نامه آکادمی آسفالت آفریقای جنوبی که حداقل ضریب انبساط و نیمه عمر را به ترتیب برابر ۱۰ و ۱۲ ثانیه در نظر گرفته است و مقدار حداکثر شاخص کف قیر، انتخاب گردید [Asphalt Academy, 2009]. البته نشریه ۳۳۹ حداقل ضریب انبساط و نیمه عمر را به ترتیب ۸ و ۱۰ ثانیه در نظر گرفته است [Iran

جدول ۵. مشخصات تولید کف قیر در دستگاه WLB10

مقدار آب (درصد)	دمای قیر (درجه سانتی گراد)	نسبت انبساط (ثانیه)	نیمه عمر (ثانیه)	فشار آب (اتمسفر)	فشار هوا (اتمسفر)
۳	۱۷۰	۱۷	۱۲	۸	۷

۳-۳ ساخت نمونه

در این تحقیق ابتدا با استفاده از آزمایش پروکتور استاندارد (AASHTO T180) رطوبت بهینه مصالح خرد آسفالت به میزان ۶/۲ درصد اندازه گیری گردید و ۸۰ درصد رطوبت بهینه مصالح خرد آسفالتی همراه با فیلرهای سیمان، آهک، میکرو آهک و ترکیب آنها با یکدیگر به مصالح خرد آسفالتی اضافه شد [Kuna, Airey and Thom, 2016]. مشخصات میکروآهک مورد استفاده در جدول ۶ ذکر شده است. سپس کف قیر (۱، ۲ و ۳ درصد وزنی مخلوط) به مخلوط مصالح اضافه گردید و عمل اختلاط به مدت تقریباً ۲ دقیقه صورت پذیرفت. در ادامه نمونه‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۴ اینچ و با یک نوع دانه‌بندی مطابق شکل ۱ و به روش مارشال مطابق دستورالعمل ASTM-D6926 در دمای محیط تهیه و با ۷۵ ضربه چکش مارشال به هر طرف نمونه متراکم گردید. در این تحقیق عمل آوری نمونه‌ها مطابق با بند ۴-۹ نشریه ۳۳۹ صورت پذیرفت. بدین ترتیب که بعد از گذشت ۲۴ ساعت از

ساخت، نمونه‌ها از قالب خارج شدند و تحت شرایط عمل آوری خشک (۷۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد) در گرمخانه قرار گرفتند. پس از خارج شدن نمونه‌ها از گرمخانه از هر تمامی طرح‌ها سه نمونه تحت شرایط عمل آوری اشباع (به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد) قرار گرفت [Iran Cold Mix Recycling General Technical Specification, No: 339, 2006 (In Persian)] در خاتمه بر روی نمونه‌ها آزمایش‌های استحکام مارشال، مقاومت کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی به ترتیب مطابق دستورالعمل‌های ASTM-D6927، AASHTO-T283 و ASTM-D4123-82 تحت شرایط عمل آوری خشک و اشباع صورت پذیرفت. در جدول ۶ خلاصه انواع طرح‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. نوع دانه بندی، مقدار قیر مصرفی و روش عمل آوری در همه طرح‌ها یکسان است و در ترکیب‌های مختلف مقدار فیلر فعال یکسان بوده (۱/۵ درصد وزن مخلوط) و تنها نوع فیلر فعال مورد استفاده تغییر کرده است.

جدول ۶. مشخصات فیزیکی و شیمیایی میکرو آهک

مقادیر	مشخصات
۲/۵۱	چگالی (gr/cm^3)
۳۲	سطح ویژه (gr/cm^2)
۵۰۰۰	متوسط اندازه ذرات (nm)
۹	PH
$CaCO_3$	فرمول مولکولی

ارزیابی خواص مقاومتی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری اصلاح شده با میکرو آهک و سیمان

جدول ۷. انواع طرح‌های مورد استفاده در تحقیق

دانه بندی	درصدهای مختلف قیر برای هر طرح	روش عمل آوری	نام طرح	انواع ترکیب فیلرها	مقدار فیلر
			N	بدین فیلر	
			C	سیمان ۱/۵ درصد	
			L	آهک ۱/۵ درصد	۱/۵
ثابت	۱، ۲ و ۳ (درصد)	خشک و اشباع	C+L	آهک ۰/۷۵ درصد + سیمان ۰/۷۵ درصد	(درصد)
			ML	میکرو آهک ۱/۵ درصد	
			ML+C	۰/۷۵ درصد میکرو آهک + ۰/۷۵ درصد سیمان	

۴. ارائه نتایج و تحلیل آن

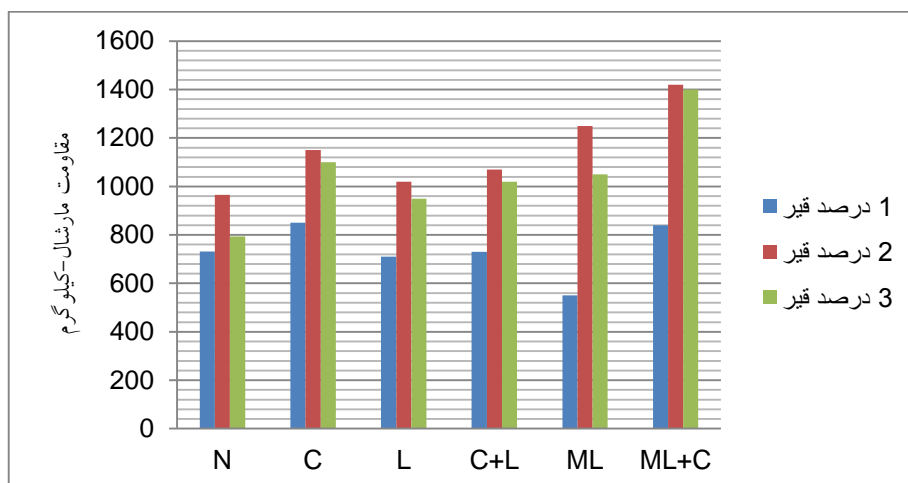
۴-۱ استحکام مارشال

این روش آزمایش، اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای مخلوط آسفالتی را در آستانه تغییر شکل پلاستیک در حالتی که سطح جانبی نمونه تحت بارگذاری قرار گرفته، شامل می‌شود و استحکام مارشال بیانی از استحکام مخلوط است. با توجه به شکل ۳ و ۴ در همه طرح‌ها با افزایش مقدار قیر از ۱ به ۲ درصد استحکام مارشال افزایش و سپس با افزایش مقدار قیر از ۲ به ۳ درصد استحکام مارشال کاهش پیدا می‌کند. در قیر ۱ درصد به دلیل عدم چسبندگی مناسب بین سنگدانه‌ها مقاومت در حالت خشک و اشباع به شدت کاهش می‌یابد.

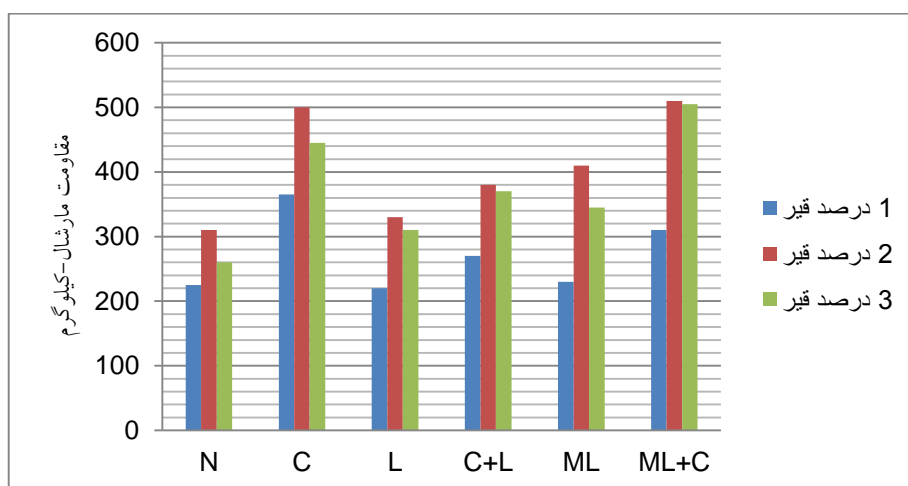
با جایگزینی میکرو آهک با آهک مشاهده می‌شود که استحکام مارشال نمونه‌ها با قیر ۲ درصد در طرح ML+C نسبت به C+L در حالت خشک ۳۳ درصد و در حالت اشباع ۳۴ درصد افزایش و در طرح ML نسبت به L در حالت خشک ۲۲ درصد و در حالت اشباع ۳۳ درصد افزایش می‌یابد. میکرو آهک به دلیل اندازه ذرات خیلی ریز آن می‌تواند موجب پخش بهتر قیر و پر کردن بهتر منافذ و در نتیجه افزایش مقدار مقاومت

مخلوط گردد. بیشترین مقدار استحکام مارشال نمونه‌ها در طرح ML+C با قیر ۲ درصد در حالت خشک و اشباع به ترتیب برابر با ۱۴۲۰ و ۵۱۰ کیلوگرم بدست آمد ولی بیشترین نسبت استحکام مارشال اشباع به خشک در قیر ۲ درصد و در طرح C برابر با ۰/۴۳ بدست آمد.

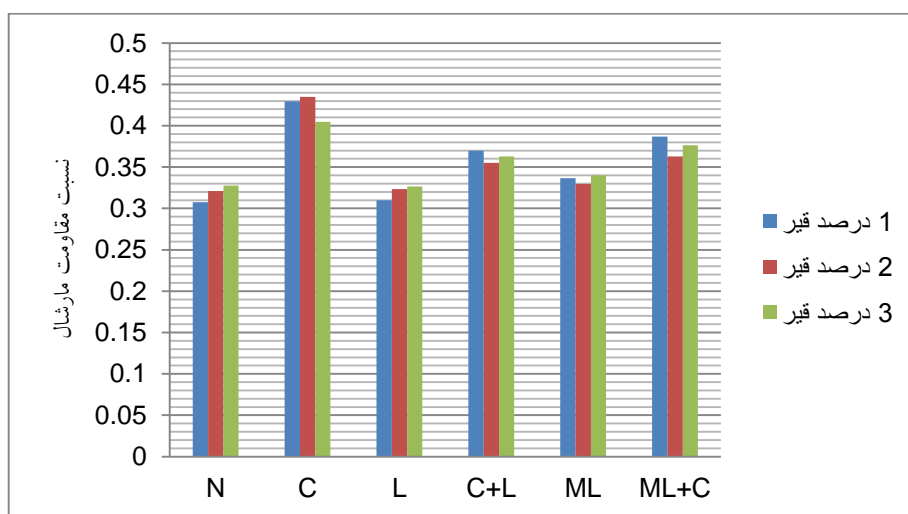
نشریه ۲۳۴ نسبت استحکام مارشال در حالت اشباع به خشک را یکی از روش اندازه‌گیری دوام مخلوط‌های آسفالتی داغ در برابر رطوبت در نظر گرفته است [Iran Highway Asphalt Paving Code, No. 234, 2006 (In Persian)]. با توجه به شکل ۵ و معیار فوق بیشترین نسبت استحکام مارشال اشباع به خشک در طرح C با مقدار قیر ۲ درصد و برابر با ۰/۴۳۵ و کمترین آن در نمونه بدون فیلر با ۱ درصد قیر و برابر با ۰/۳۰۷ درصد حاصل گردید. همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که فیلر سیمان بدلیل انجام واکنش‌های هیدراتاسیون در حضور رطوبت، بیشترین تاثیر را در افزایش نسبت استحکام مارشال دارد و این نسبت در نمونه بدون فیلر بطور قابل ملاحظه‌ای کم است. همچنین با توجه به شکل ۳ و ۴ استحکام مارشال در حالت خشک و اشباع با قیر ۲ درصد بیشترین مقدار را دارند.



شکل ۳. استحکام مارشال مخلوط با درصد قیرهای مختلف (حالت خشک)



شکل ۴. استحکام مارشال مخلوط در درصد قیرهای مختلف (حالت اشباع)



شکل ۵. نسبت استحکام مارشال در حالت اشباع به خشک

ارزیابی خواص مقاومتی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری اصلاح شده با میکرو آهک و سیمان

۴-۲ مقاومت کشش غیرمستقیم

در این تحقیق آزمایش کشش غیرمستقیم به وسیله یک تیغه بارگذاری استاندارد و با سرعت بکناوخت 51 mm/min انجام شد. در این آزمایش، نمونه‌های استوانه‌ای شکل تحت بارگذاری فشاری وارد بر سطح جانبی قرار می‌گیرند و اینگونه بارگذاری باعث ایجاد تنش کششی در امتداد قطر نمونه و در نهایت منجر به شکسته شدن نمونه می‌شود. این روش مناسبی برای ارزیابی عمر خستگی و ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است [Keymanesh et al. 2017] (In Persian).

آیین نامه بازیافت سرد آسفالت ایران حداقل مقاومت کشش غیرمستقیم خشک را در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و در ترافیک سنگین ۳۰۰ کیلوپاسکال بیان می‌کند [Iran Cold Mix Recycling General Technical Specification, No. 339, 2006]. با توجه به شکل ۵ نمونه‌های بدون فیلر در قیر ۱ و ۲ درصد و دیگر طرح‌ها در قیر ۱ درصد نمی‌توانند معیار فوق را برآورده نمایند. با توجه به شکل ۶ و ۷ با افزودن فیلر و افزایش مقدار قیر مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع افزایش می‌یابد. این موضوع بدین دلیل است که فیلرهای فعال با رطوبت موجود در سنگدانه‌ها و کف قیر واکنش شیمیایی داده و موجب افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگدانه‌ای می‌شوند. مطابق با شکل ۶ و ۷ بیشترین مقاومت کششی در حالت خشک در طرح C با قیر ۳ درصد و برابر ۵۰۰ کیلوپاسکال بدست آمد و در حالت اشباع نیز بیشترین مقاومت در طرح C با قیر ۳ درصد و برابر با ۴۱۰ کیلوپاسکال حاصل گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن فیلر تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت اشباع نسبت به حالت خشک دارد بطور مثال در قیر ۲ درصد افزودن فیلر سیمان و ترکیب میکرو آهک و سیمان به ترتیب موجب افزایش مقاومت کششی خشک به میزان ۶۰ و ۵۵ درصد شده اما در حالت اشباع مقاومت کشش غیر مستقیم به میزان ۱۰۲ و

۱۰۷ درصد افزایش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که در حالت اشباع واکنش هیدراتاسیون فیلر بطور کامل انجام می‌گیرد.

مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر خرابی‌های رطوبتی با نسبت TSR می‌سنجند و این نسبت به صورت حاصل تقسیم مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت اشباع به خشک تعریف می‌گردد. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مقاومت نمونه در برابر رطوبت بیشتر است. مطابق بند ۴-۹ آئین‌نامه بازیافت سرد آسفالت ایران (نشریه ۳۳۹) نسبت TSR مناسب برای مناطق مرطوب و با زهکشی ضعیف مطابق معادله (۱) برابر حداقل ۰/۷۵ است [Iran Cold Mix Recycling General Technical Specification, No. 339, 2006 (In Persian)]. همچنین در برخی مراجع نسبت TSR به عنوان یکی از معیارهای پذیرش یا رد مخلوط‌های آسفالتی کف قیری بیان شده است [Yin, Arambula-Mercado and Newcomb, 2016].

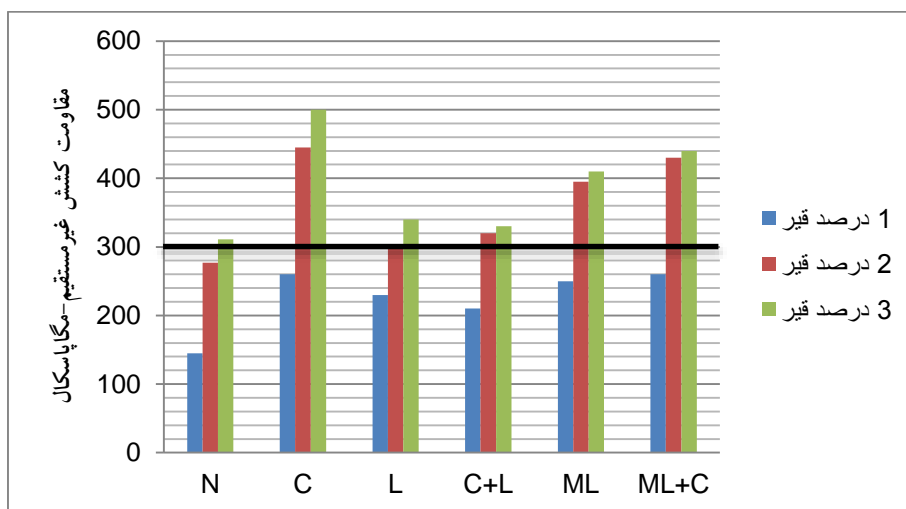
$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \quad (۴)$$

ITS_{wet} : مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه اشباع

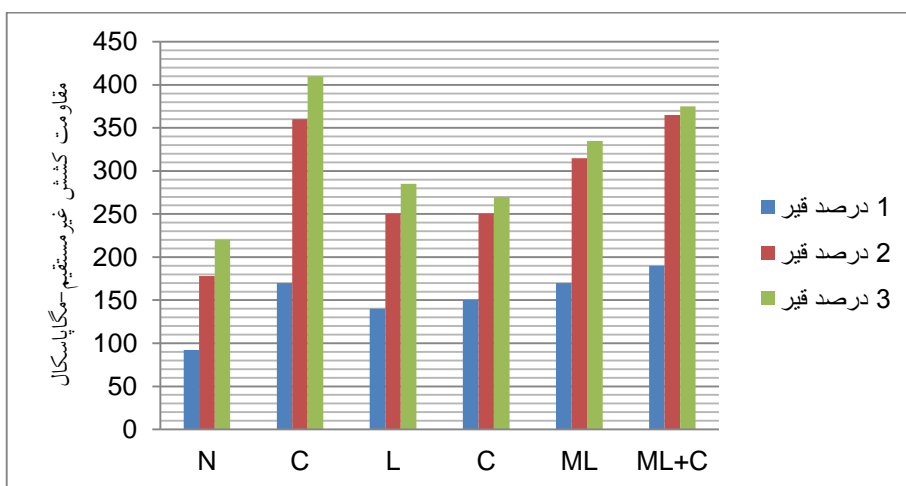
ITS_{dry} : مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه خشک

با توجه به نتایج آزمایش‌ها در شکل ۸ نمونه بدون فیلر و همچنین هیچکدام از طرح‌ها با قیر ۱ درصد نمی‌توانند معیار فوق را برآورده سازند ولی با افزایش قیر، مقاومت کششی مخلوط افزایش یافته و نیز حساسیت مخلوط در برابر رطوبت کاهش می‌یابد.

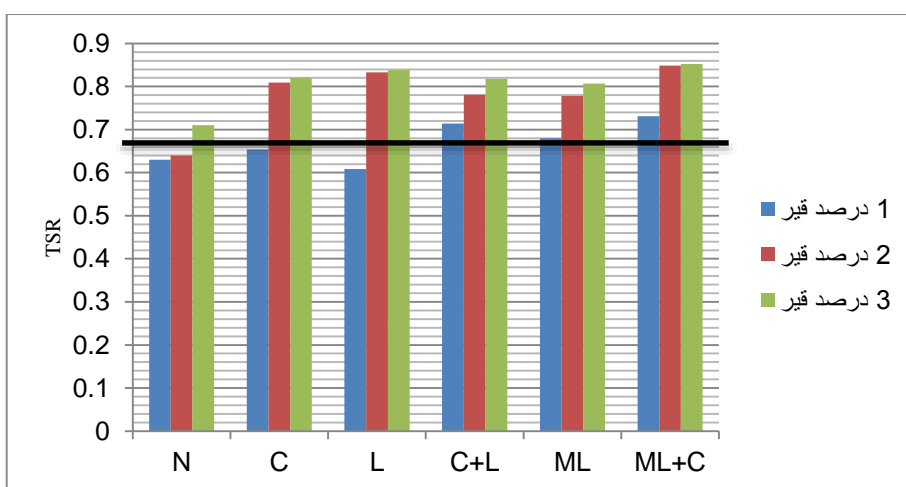
در این پژوهش مشخص شد ترکیب فیلر میکرو آهک و سیمان بیشترین تاثیر در کاهش خرابی‌های رطوبتی دارد به نحوی که مقدار TSR با قیر ۳ درصد برابر با ۰/۸۶ در قیر ۲ درصد برابر با ۰/۸۴ بدست آمد. همچنین با توجه به شکل ۶ و ۸ نمونه‌های ساخته شده با قیر ۲ درصد می‌توانند معیارهای نشریه ۳۳۹ را برآورده سازند.



شکل ۶. مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت خشک



شکل ۷. مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت اشباع



شکل ۸. نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک (TSR)

ارزیابی خواص مقاومتی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری اصلاح شده با میکرو آهک و سیمان

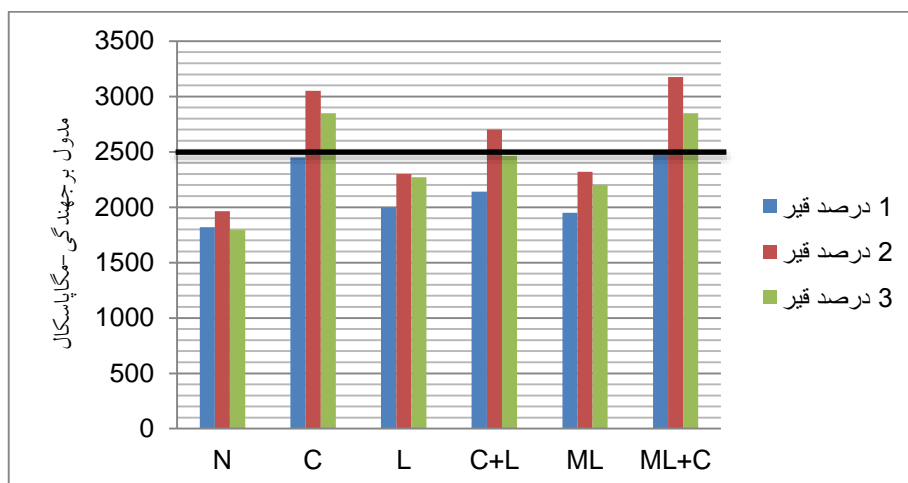
۴-۳ مدول برجهندگی

مدول برجهندگی یکی از رایج ترین روش های تعیین نمودار تنش- کرنش به منظور تعیین خصوصیات الاستیک مخلوط های آسفالتی بکار می رود و به صورت نسبت تنش به کرنش در یک شرایط بارگذاری و باربرداری سریع در حالت الاستیک تعریف می گردد. به عبارت دیگر در اثر بارگذاری و بار برداری سریع، به علت کرنش های باقیمانده بسیار کم پس از هر باربرداری، رفتار الاستیک غیر خطی ایجاد می شود که شیب آن بیانگر مدول برجهندگی مصالح است. در این تحقیق آزمایش مدول برجهندگی مطابق استاندارد ASTM D4123-82 بر روی نمونه های عمل آوری شده خشک و اشباع برای هر حالت از هر طرح، با استفاده از دستگاه UTM25KN و با بارگذاری نیمه سینوسی و زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه انجام شد. دمای انجام آزمایش برای کلیه نمونه ها ثابت و برابر ۲۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد.

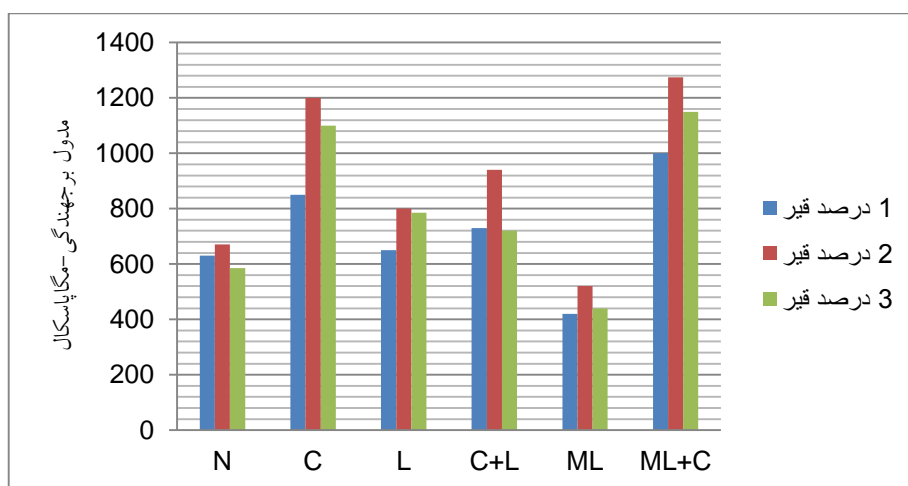
نتایج این تحقیق نشان می دهد که با افزایش مقدار قیر از ۱ به ۲ درصد مدول برجهندگی (در حالت خشک و اشباع) در ابتدا افزایش سپس در ادامه با افزایش قیر از ۲ به ۳ درصد مدول برجهندگی کاهش می یابد که بیشترین مقدار آن در تمامی طرح ها در قیر ۲ درصد حاصل می گردد. همچنین سیمان و ترکیب میکرو آهک با سیمان بیشترین تاثیر را در افزایش مدول برجهندگی در حالت خشک و اشباع دارند.

مطابق توصیه فناناوریباز یافت سرد ویرنگن مدول برجهندگی مخلوط های کف قیری اصلاح شده در حالت خشک بایستی بین ۲۵۰۰ الی ۴۰۰۰ مگا پاسکال باشد [Wirtgen Cold Recycling Technology, 2012]. با توجه به معیار فوق و شکل ۹ مدول برجهندگی در طرح های N و L و ML هیچگاه به ۲۵۰۰ مگاپاسکال نمی رسد و مدول برجهندگی فقط در طرح های C و ML+C با قیر ۲ و ۳ درصد از مقدار ۲۵۰۰ مگاپاسکال تجاوز می نماید. مطابق شکل ۹ و ۱۰ بیشترین مدول برجهندگی در حالت خشک با قیر ۲ درصد و در طرح ML+C برابر با ۳۱۰۰ مگاپاسکال و در شرایط اشباع نیز با قیر ۲ درصد و در طرح ML+C برابر با ۱۲۲۰ مگاپاسکال بدست آمد.

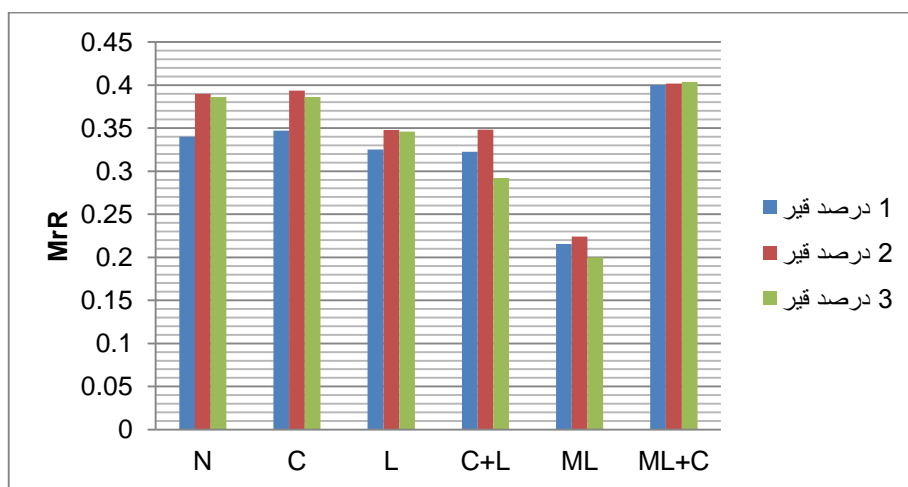
گزارش NCHRP-817 نسبت مدول برجهندگی اشباع به خشک را جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی نیمه گرم معرفی می نماید [NCHRP 817, 2016]. با توجه به شکل ۱۲ بیشترین نسبت مدول برجهندگی در ترکیب ML+C و برابر با ۰/۴۱۳ بدست آمد (با قیر ۳ درصد). همچنین استفاده از فیلر میکرو آهک باعث کاهش این نسبت می گردد و کمترین میزان نسبت مدول برجهندگی نمونه ها در طرح ML و با قیر ۳ درصد و برابر با ۰/۲۰ حاصل گردید. در انتها با توجه به شکل ۹ و ۱۰ مدول برجهندگی در حالت و خشک و اشباع با قیر ۲ درصد بیشترین مقدار را دارد.



شکل ۹. مدول برجهدگی در شرایط خشک



شکل ۱۰. مدول برجهدگی در شرایط اشباع



شکل ۱۱. نسبت مدول برجهدگی اشباع به خشک (MrR)

۵. تحلیل آماری

تحلیل رگرسیونی یک فرایند آماری برای تخمین روابط بین متغیرها است. در رگرسیون چند متغیره، مقادیر یک متغیر وابسته از روی مقادیر دو یا چند متغیر دیگر (متغیرهای مستقل) با استفاده از یک معادله ریاضی پیش بینی می‌شود. این کار از طریق ساختن یک معادله خطی به شکل عمومی زیر انجام می‌شود.

(۵)

$$Y = b_0 + b_1(x_1) + b_2(x_2) + \dots + b_n(x_n)$$

در رابطه فوق پارامترهای b_1 و b_2 و b_n ضریب رگرسیونی جزئی هستند و b_0 مقدار ثابت رگرسیون نامیده می‌شود. صحت مدل ساخته شده با استفاده از ضریب همبستگی تعیین می‌شود. این ضریب میزان همبستگی بین متغیرهای ساخته شده با استفاده از مدل را با مقادیر واقعی نشان می‌دهد. در این تحقیق به منظور تخمین مدل رگرسیونی بین نتایج از نرم افزار SPSS استفاده گردید. یکی از شرایط رگرسیون چند متغیره این است که هر کدام از متغیرها دارای توزیع نرمال باشند. در ابتدا چولگی^۷ و کشیدگی^۸ داده‌ها بررسی می‌شود. چولگی معیاری از تقارن یا عدم تقارن تابع توزیع است و کشیدگی نشان دهنده ارتفاع یک توزیع است. در حالت کلی چنانچه چولگی و کشیدگی در بازه (۲، -۲)

نباشند داده‌ها از توزیع نرمال برخوردار نیستند. پس از بررسی چواگی و کشیدگی، جهت بررسی نرمال بودن نمونه‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۹ و شاپیرو-ویلک^{۱۰} استفاده می‌گردد. روش کنترل نرمال بودن بدین صورت است که اگر P-value از سطح معناداری ۰/۰۵ بیشتر شود، داده‌ها نرمال هستند. سطح معناداری ۰/۰۵ با توجه به سطح اطمینان ۰/۹۵ در بیشتر مطالعات آزمایشگاهی مورد تایید محققین بوده است [Nikukar and Arabzade, 2006]. با استفاده از نتایج تحقیق در حالت عمل آوری خشک، مقاومت کشش غیرمستقیم بر حسب کیلوپاسکال و مدول برجهندگی بر حسب مگاپاسکال به عنوان متغیر وابسته و استحکام مارشال بر حسب کیلوگرم به عنوان متغیر وابسته انتخاب گردید و پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها بر اساس جدول ۸، مدل ریاضی مناسب بدست آمد... آنالیز آماری با استفاده از روش رگرسیون خطی با نرم افزار SPSS انجام گرفت که نتایج این تحلیل در جدول ۹ و ۱۰ ارایه شده است. در نهایت پس از بررسی ضریب تعیین و سطح معناداری مدل، فرمول ریاضی به صورت رابطه ۶ تعیین گردید.

جدول ۸. خلاصه آمارهای توصیفی متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی

متغیر	تعداد	حداقل	حداکثر	خطای استاندارد	کشیدگی	چولگی	کولموگروف-اسمیرنوف (P-value)	شاپیرو-ویلک (P-value)
استحکام مارشال (خشک)- کیلوگرم	۱۸	۵۵۰	۱۴۲۰	۲۳۷	-۰/۳۱۴	۰/۲۵۶	۰/۲	۰/۸
مقاومت کشش غیر مستقیم (خشک)- کیلوپاسکال	۱۸	۱۴۵	۵۰۰	۹۵	-۰/۶۳۶	۰/۱۰۳	۰/۲	۰/۸۸
مدول برجهندگی (خشک)- مگاپاسکال	۱۸	۱۷۹۳	۳۱۷۵	۴۱۴	-۰/۷۲۲	۰/۴۲۹	۰/۲	۰/۴۹۳

جدول ۹. خلاصه مشخصات مدل

دوربین-واتسون	خطای استاندارد	ضریب تعیین	ضریب همبستگی
۱/۶۴۸	۱۳۱	۰/۷۲۹	۰/۸۵۴

جدول ۱۰. آنالیز واریانس مدل

سطح معناداری	آماره آزمون	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
۰/۰۰	۲۰	۳۴۸۶۴۸	۲	۶۹۷۲۹۶	رگرسیون
		۱۷۲۶۹	۱۵	۲۵۹۰۴۴	باقیمانده
			۱۷	۹۵۶۳۴۰	مجموع

$$S = 21.28 + 0.223 \times Mr + 1.315 \times ITS \quad (6)$$

در رابطه فوق S استحکام مارشال بر حسب کیلوگرم، Mr مدول برجهندگی بر حسب مگا پاسکال و ITS مقاومت کشش غیر مستقیم بر حسب کیلو پاسکال است. با توجه به نتایج تحلیل در جدول ۱۰ و اینکه سطح معناداری رابطه ریاضی ارایه شده کمتر از ۰/۰۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهاد شده با دقت مناسبی می‌تواند پیش‌بینی کننده متغیر وابسته باشد و سطح معناداری قابل قبولی دارد. همچنین با توجه به جدول ۹ و ضریب تعیین مدل ارایه شده، می‌توان گفت که بین نتایج حاصل از مدل پیشنهادی و نتایج واقعی فاصله کمی وجود دارد. بنابراین با انجام آزمایش‌های ساده‌تر (استحکام مارشال و مقاومت کشش غیرمستقیم) می‌توان نتایج آزمایش مدول برجهندگی که نیاز به دستگاه پیچیده‌تر و گرانتری دارد، بدون صرف زمان و هزینه پیش‌بینی کرد.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر مقدار قیر مصرفی، نوع فیلر فعال و روش عمل‌آوری بر خصوصیات مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های کف قیر بررسی گردید و در این راستا پس از ساخت نمونه‌های بازیافت شده با استفاده از روش کف قیر آزمایش‌های استحکام مارشال، مدول برجهندگی، مقاومت کشش غیرمستقیم با دو روش عمل‌آوری خشک و اشباع بروی نمونه‌ها انجام گردید. دستاوردهای حاصل از این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد.

۱- افزایش قیر مصرفی از ۱ به ۲ درصد موجب افزایش مدول برجهندگی و استحکام مارشال شده در ادامه با افزایش مقدار قیر از ۲ به ۳ درصد استحکام مارشال و مدول برجهندگی

کاهش می‌یابد. اما با افزایش مقدار قیر از ۱ به ۳ درصد مقاومت کشش غیرمستقیم بطور پیوسته افزایش می‌یابد.
۲- نتایج بدست آمده از آزمایش مارشال نشان داد که افزودن فیلر به مخلوط‌های بازیافت شده کف قیری سبب افزایش مقاومت می‌شود به نحوی که در قیر ۲ درصد استحکام مارشال با افزودن سیمان ۱۹ درصد و آهک ۵ درصد و ترکیب سیمان و میکرو آهک ۴۷ درصد نسبت به نمونه بدون فیلر در شرایط عمل‌آوری خشک افزایش می‌یابد. همچنین سیمان بیشترین اثر را در افزایش نسبت استحکام مارشال اشباع به خشک را دارد. فیلر میکروآهک نسبت به آهک تأثیری بیشتری در افزایش استحکام مارشال داشته، به عنوان مثال در قیر ۲ درصد استحکام مارشال نمونه حاوی میکروآهک ۹ درصد بیشتر از نمونه با آهک در حالت خشک است.

۳- با افزودن فیلر و کف قیر به مخلوط‌های کف قیری، مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع افزایش می‌یابد. سیمان نسبت به دیگر فیلرها تأثیر چشم‌گیری در افزایش مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع دارد. بطوریکه در قیر ۲ درصد با افزودن سیمان و ترکیب میکروآهک و سیمان مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت خشک به ترتیب ۶۰ و ۵۵ درصد و در حالت اشباع ۱۰۲ و ۱۰۱ درصد نسبت به نمونه بدون فیلر افزایش می‌یابد. همچنین ترکیب میکرو آهک و سیمان بیشترین تأثیر را در افزایش نسبت TSR دارد اما نکته قابل توجه این است که در قیر ۱ درصد فیلرها تأثیر چندانی در افزایش نسبت TSR ندارد، اما در قیر ۲ و ۳ درصد با افزایش فیلر نسبت TSR در نمونه‌ها رشد

ارزیابی خواص مقاومتی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری اصلاح شده با میکرو آهک و سیمان

با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و استحکام مارشال، مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، دوره اول، شماره دوم، ص. ۵۴-۴۱

- کاوسی، الف، کاریزیکی، ا، صولتی فر، ن. و قاضی زاده، م. (۱۳۹۳) "ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی بازیافت روسازی های آسفالتی به روش سرد با کف قیر"، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، ارومیه

- کاوسی، امیر و هاشمیان، لیلا (۱۳۸۹) "ارزیابی مشخصات مخلوط های آسفالتی گرم کف قیری تولید شده با استفاده از دو نوع قیر (WMA-FOAM)، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره سوم، ص. ۱۲-۱

- عامری، م، منصورخاکی، ع. و عسگرزاده، م. (۱۳۸۹) "ارزیابی عملکرد آسفالتی نیمه گرم حاوی مواد افزودنی ساسوبیت و آمینی و مقایسه با مخلوط آسفالت گرم"، اولین کنفرانس منطقه ای مهندسی عمران، قائم شهر

- کی منش، م، زیاری، ح، نصرالله تبار، ع. و شهریاری، ن. (۱۳۹۶) "تحلیل پتانسیل پارامترهای میکروساختاری و مقاومت کشش غیرمستقیم در ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط های آسفالتی گرم"، مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، دوره سوم، شماره اول، ص. ۸۲-۶۹

- مدرس، امیر و کاوسی، امیر (۱۳۹۰) "مدلی برای تخمین مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی بازیافت شده با قیر امولسیون و سیمان"، فصلنامه علمی - پژوهشی مهندسی حمل و نقل، سال دوم، شماره دوم، ص. ۶۸۸-۶۷۹

- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۰) "آیین نامه روسازی راه های آسفالتی ایران"، نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، موسسه قیر آسفالت، تجدید نظر اول

- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۸۵) "مشخصات فنی اجرائی بازیافت سرد آسفالت"، نشریه شماره ۳۳۹، وزارت راه و شهرسازی، معاونت آموزش، تحقیقات و فنآوریاطلاعات

می‌باشد. بطور مثال در قیر ۱ درصد فیلر سیمان و ترکیب آهک و سیمان به ترتیب موجب ۴ و ۱۳ درصد افزایش نسبت TSR می‌شود ولی در قیر ۲ درصد فیلر سیمان و ترکیب آهک و سیمان به ترتیب موجب ۱۷ درصد و ۲۶ درصد افزایش نسبت TSR می‌شود.

۴- در آزمایش مدول برجهندگی ترکیب میکروآهک و سیمان بیشترین تاثیر را افزایش مدول برجهندگی در حالت خشک و اشباع دارد. بطوریکه در قیر ۲ درصد ترکیب میکروآهک و سیمان موجب افزایش مدول برجهندگی در حالت خشک به میزان ۶۲ درصد و در حالت اشباع به میزان ۹۰ درصد می‌شود. ۵- در نهایت با استفاده از روش های مرسوم آماری نرمال بودن نتایج آزمایشگاهی در شرایط عمل آوری خشک بررسی گردید و سپس یک فرمول ریاضی خطی فیما بین نتایج آزمایش های استحکام مارشال، مدول برجهندگی و مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت خشک با دقت مناسب ارایه گردید. به کمک این رابطه ریاضی می توان در آزمایشگاه و با صرف هزینه بسیار اندک و به سرعت خصوصیات مکانیکی مخلوط های کف قیری را نسبت به یکدیگر پیش بینی کرد.

۷. پی نوشتها

1. KYOTO Protocol
2. Tensile Strength Ratio
3. WIRTGEN
4. Half Time
5. Expansion Ratio
6. Foam Index
7. Skewness
8. Kurtosis
9. Kolmogotov-Smirnov
10. Shapiro-Wilk

۸. مراجع

- احمدی، امیر (۱۳۸۹) "بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای اختلاط، ساخت و عمل آوری آسفالت بازیافت شده کف قیری بروی مقاومت فشاری تک محوری، مدول برجهندگی و نتایج آزمایش مارشال"، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: اورنگ فرزانه، پردیس دانشکده فنی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

- دیواندری، ح، مدرس، الف، حسینی علی آبادی، م، رستمی انکاس، م. (۱۳۹۴) "ارائه مدل شیارشدگی مخلوط های آسفالتی

bitumen ", Bulletin of The Polish Academy Of Sciences, Technical Sciences, Vol. 64, No. 4, pp.763-773

-Kuna, K., Airey, G. and Thom, N. (2016) "Mix design considerations of foamed bitumen mixture with reclaimed asphalt pavement material", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 18, pp. 902-915

-Lesueur, D., Petit, J. and Ritter, H. J. (2012) "Increasing the durability of asphalt mixtures by hydrated lime addition: What evidence?", Europe Roads, Vol. 20, pp. 48-55.

-Martinez-Arguelles, G., Giutozzi, F., Crispino, M. and Flintsch, G. (2015) "Laboratory investigation on mechanical performance of cold foamed bitumen mixes: Bitumen source, foaming additive, fiber-reinforcement and cement effect", Construction and Building Materials, Vol. 93, pp.241-248

-Transportation Research Board (2015) "Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications", National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 807

-Shafabakhsh, Gh. and Rezaeian, M. (2010) "Analysis of the effects of applying different quantities and types of additives on strength parameters of cold in-situ recycled mixtures made of bitumen foam", Transportation Research Journal, Vol. 7, No. 1, pp. 53-65

-Transportation Research Board (2016) "Validation of guideline for evaluation the moisture susceptibility of wma technologies", National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 817

-Wirtgen Group (2012) "Wirtgen cold recycling technology", Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany

-Xu, J. Z., Hao, P.W., Ma, Y.F. and Liu, Na. (2012) "Study on the optimization design of mixing moisture content in foamed asphalt mix", Materials and Structures, Vol. 45, No. 7, pp. 1071 – 1085

-Yin, F., Arambula-Mercado, E. and Newcomb, D. (2016) "Mix design procedure for foamed

-نیکوکار، مسعود و عربزاده، بهمن (۱۳۸۵) "آمار و احتمالات کاربردی"، تهران: نشر آزاده

-هاشمیان، لیلا و کاووسی، امیر (۱۳۸۶) "روشی برای طرح اختلاط و بررسی رفتار مخلوطهای کف قیری"، مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ۳۳، ص. ۱-۱۲

-یوسف دوست، س.، فرزانه، الف.، اسماعیلی، ع. و احمدی، الف. (۱۳۹۰) "بررسی آزمایشگاهی مدول برجهدگی، مقاومت کشش غیرمستقیم و فشاری تک محوری مخلوط های آسفالت های بازیافت شده با استفاده از کف قیر" نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری -دانشکده فنی تهران، دوره ۴۵، شماره ۷، ص. ۸۰۳-۸۲۵

-Asphalt Academy (2009) "Technical guideline: Bitumen stabilised materials ", TG2. CSIR Transport, South Africa

-Behiry, A. E. A. E. M. (2013) "Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures", Ain Shams Engineering J., Vole. 4, pp. 351-363

-Dallas, N. L. and Jon, A. E. (2001) "The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt", National Lime Association, USA

-Halles, F. and Thenoux, F. (2009) "Degree of influence of active fillers on the properties of recycled mixes with foamed asphalt", Transportation Research Record, Vol. 2095, pp. 127-135

-Iwański, M. and Chomicz-Kowalska, A. (2013) "Laboratory study on mechanical parameters of foamed bitumen mixtures in the cold recycling technology", 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius, Lithuania, Procedia Engineering , 57, pp. 433 – 442

-Iwański, M. and Chomicz-Kowalska, A. (2011) "The effects of using foamed bitumen and bitumen emulsion in the cold recycling technology", 8th International Conference of Environmental Engineering, Vilnius, Lithuania, pp. 1089-1096

-Iwański, M., Buczynski, P. and Mazurek, G. (2016) "The use of gabbro dust in the cold recycling of asphalt paving mixes with foamed

ارزیابی خواص مقاومتی و حساسیت رطوبتی مخلوط کف قیری اصلاح شده با میکرو آهک و سیمان

Early-Stage strength for cold recycled asphalt mixture using foamed asphalt", Construction and Building Materials, Vol. 127, pp. 410-417

asphalt mixtures", Road Materials and Pavement Design, Vol. 17, pp. 946-957

-Zhigang, L., Peiwen, H., Hongying, L., Jinzhi, X. and Zhijun, C. (2016) "Investigation of

مهرداد میرشکاریان بابکی، محمودرضا کی منش، غلامرضا توکلی، آیت سلطانی منش

مهرداد میرشکاریان بابکی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران-عمران را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود و در سال ۱۳۹۱ در دوره دکتری تخصصی در رشته مهندسی عمران-راه ترابری در دانشگاه پیام نور پذیرفته شد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بازیافت آسفالت، فنآوریکف قیر و کاربرد روش اجزا محدود در روسازی است.



محمودرضا کی منش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۶۳ از دانشگاه سیستان و بلوچستان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۷۰ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی روسازی، تعمیر و نگهداری روسازی و ایمنی راه بوده و هم اکنون عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه پیام نور است.



غلامرضا توکلی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۸ از دانشگاه آزاد واحد یاسوج و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری در سال ۱۳۹۵ را از دانشگاه بین المللی پیام نور مرکز عسلویه اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بازیافت آسفالت، تکنولوژی کف قیر، عملکرد میکروسیلیس و سیمان بر مخلوط های بازیافتی، حساسیت های رطوبتی آسفالت و آزمایشات تخصصی قیر و آسفالت است.



آیت سلطانی منش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه لرستان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-راه و ترابری را در سال ۱۳۹۵ از دانشگاه بین المللی پیام نور مرکز عسلویه اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی روسازی و بازیافت گرم است.

