

ارائه مدل ریاضی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های کف قیری اصلاح شده با سیمان

محمودرضا کی منش، استادیار*، گروه عمران راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، تهران
مهرداد میرشکاریان بابکی، دانشجوی دکتری عمران راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، تهران
نوشین شهریاری، دانشجوی دکتری عمران راه و ترابری، دانشگاه پیام نور، تهران
Email: Mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۲/۱۸ - پذیرش: ۹۶/۰۷/۳۰

چکیده

امروزه، استفاده از روش بازیافت سرد آسفالت به صورت درجا، به عنوان یک روش اقتصادی برای بهسازی راه‌هایی که دچار فرسودگی شده‌اند، رشد چشمگیری داشته است. در بین روش‌های بازیافت سرد، استفاده از فناوری کف قیر به خاطر سهولت و سرعت در اجرا مورد توجه قرار گرفته است. در مخلوط‌های کف قیری، به منظور کاهش حساسیت مخلوط در برابر رطوبت و افزایش خواص مقاومتی، از فیلرهای فعال نظیر سیمان و آهک استفاده شده است. اما تاکنون طرح اختلاط مناسب و استاندارد برای این نوع از مخلوط‌ها وجود ندارد و انجام آزمایش‌های مکانیکی به روش سعی و خطا اغلب زمان‌بر و پُر هزینه است. لذا، لزوم ارائه روشی ساده که ضمن دارا بودن دقت کافی، بتواند رفتار مکانیکی نمونه‌های بازیافت شده کف قیری را پیش‌بینی کند، به شدت احساس می‌شود. در این تحقیق، مخلوط‌های کف قیری با مصالح خرده آسفالت بازیافتی در قیر ۱، ۲ و ۳ درصد و با سیمان صفر، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد ساخته شد و خواص مکانیکی نمونه‌ها با آزمایش‌های مقاومت مارشال، مدول برجهنگی و مقاومت کششی غیرمستقیم خشک و اشباع اندازه‌گیری گردید. سپس، با انجام تحلیل‌های آماری، یک رابطه ریاضی برای هر یک از آزمایش‌های مذکور، با دقت مناسب، ارائه گردید. مدل‌های ارائه شده می‌توانند خواص مکانیکی مخلوط‌های بازیافتی کف قیری را بر حسب درصد قیر و سیمان، بدون صرف زمان و هزینه و با دقت کافی پیش‌بینی کنند. همچنین، مشخص شد که با افزایش قیر، رفتار این مخلوط‌ها در آزمایش‌های انجام شده یکسان نمی‌باشد. به طوری که با افزایش قیر از ۱٪ به ۲٪، مقاومت مارشال و مدول برجهنگی افزایش و در ادامه، با افزایش قیر، کاهش می‌یابند. اما با افزایش قیر، مقاومت کششی غیرمستقیم (خشک و اشباع) افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، افزودن سیمان موجب افزایش مقاومت و کاهش حساسیت رطوبتی این نوع مخلوط‌ها گردید.

واژه‌های کلیدی: بازیافت سرد، کف قیر، طرح اختلاط، رفتار مکانیکی

۱. مقدمه

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 بازیافت گردید. از دیگر پروژه‌های اجرا شده در ایران می‌تون 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 (احمدی، ۱۳۸۷). در ایران نیز سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، با همکاری وزارت راه و ترابری، در ۱۳۸۵ اقدام به تهیه و انتشار مشخصات فنی و اجرایی بازیافت سرد آسفالت نمود.

تولید و اجرای مخلوط آسفالتی با استفاده از کف قیر بنا به دلایلی همچون کاهش دما و آلودگی کمتر، کاهش مصرف انرژی، کاهش تولید آلاینده‌ها، افزایش کارایی و کاهش اکسیداسیون قیر نسبت به مخلوط‌های آسفالت داغ، هم اکنون به عنوان یک روش اقتصادی گسترش زیادی پیدا کرده است. در سال ۲۰۰۶، در قاره اروپا، ۴۹،۳۸۹،۴۰۰ تن مصالح خرده آسفالتی موجود بوده است که بیش از ۴۰٪ آن در بازیافت گرم، حدود ۲۵٪ در بازیافت سرد و حدود ۲۵٪ نیز در مخلوط‌های نیمه گرم آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است (کاووسی و همکاران، ۱۳۹۳).

تحقیقات صورت گرفته در زمینه بازیافت سرد با استفاده از کف قیر در مقایسه با آسفالت گرم و داغ بسیار محدود بوده و در ایران به جز چند مورد، تحقیق چندانی در این زمینه صورت نگرفته است. از طرف دیگر، تاکنون طرح اختلاط جامعی در این زمینه ارائه نشده و استانداردها و مراجع مختلف، جهت دستیابی به قیر بهینه و میزان فیلر، روش‌های کاملاً متفاوتی را ارائه نموده‌اند. به‌طور کلی، محدودیت‌های این تحقیق شامل مواردی از

یکی از فناوری‌های نوین که در دهه اخیر به عنوان یک گزینه مناسب به منظور ترمیم و بهسازی سازه‌ای روسازی آسفالتی مطرح شده، بازیافت آسفالت به روش سرد می‌باشد. در این روش، مصالح بازیافتی بعد از فرآوری مجدد در سطح راه یا در یک کارخانه مرکزی و پس از اختلاط با مواد قیری نظیر کف قیر در دمای محیط، روی سطح راه پخش و متراکم می‌شوند. از مهمترین مزایا و فواید زیست‌محیطی بازیافت سرد درجا، می‌توان به عدم نیاز به تهیه و حمل مصالح جدید و در نتیجه کاهش مصرف انرژی اشاره نمود. کف قیر^۱ یکی از روش‌های بازیافت سرد به شمار می‌آید.

کف قیر با افزودن مقداری آب سرد (آب با دمای ۱۵ تا ۲۵ درجه سلسیوس) و هوا به قیر داغ تولید می‌شود. به طوری که با تزریق آب سرد در قیر داغ (قیر با دمای حدود ۱۶۰ تا ۱۸۰ درجه سلسیوس) 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 می‌کند. 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 (فناوری بازیافت سرد ویرتگن^۲، ۲۰۱۲).

روش اصلاح و نوسازی رویه‌های آسفالتی با استفاده از روش کف قیر، از سال ۱۹۸۰ به‌طور گسترده مورد استقبال کشورهای آفریقای جنوبی قرار گرفت. امروزه در اروپا، به‌ویژه در نروژ، آلمان، انگلستان و کشورهای اروپای شرقی، استفاده از روش کف قیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است (فناوری بازیافت سرد ویرتگن، ۲۰۱۲). اولین کاربرد کف

کاهش دوام آن می‌گردد و برای جبران این نقیصه از فیلرهای فعال مانند سیمان استفاده می‌شود (راهنمای فنی تثبیت مصالح با قیر آفریقای جنوبی^۱، ۲۰۰۹). فیلرهای فعال با به‌وجود آوردن مقدار ماستیک بیشتر در مخلوط و بهبود چسبندگی قیر به مصالح خرده آسفالتی باعث افزایش خصوصیات مکانیکی مخلوط می‌شوند (گیلبرتو مارتینز و همکاران، ۲۰۱۵) (در لیست موجود است). فیلر سیمان با استفاده از رطوبت موجود در مصالح خرده آسفالتی و کف قیر، واکنش هیدراتاسیون داده و موجب افزایش چسبندگی ماستیک تشکیل شده به مصالح سنگدانه‌ای می‌شود و در نتیجه اختلاط مصالح با کف قیر را تسریع و بهبود می‌بخشد. این موضوع باعث افزایش مقاومت و کاهش خرابی‌های رطوبتی می‌گردد (شفابخش و رضائیان، ۱۳۸۹). البته آهک، بر عکس سیمان، در عین افزایش مقاومت با درصد کمتری نسبت به سیمان، موجب افزایش انعطاف‌پذیری مخلوط نیز می‌گردد. 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 دارد (هالس و تنوکس، ۲۰۰۹). 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 خرابی‌های رطوبتی و افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم دارد (ایوانسکی و همکاران، ۲۰۱۳).

افزودن فیلرهای سیمان، آهک و ترکیب آنها با یکدیگر (با نسبت مساوی) به میزان ۱/۵ درصد وزن مخلوط باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت فشاری و نسبت مقاومت مارشال می‌شود، و فیلر سیمان در مقایسه با دیگر طرح‌ها، تأثیر بیشتری در افزایش خصوصیات مکانیکی و صلیبت نمونه‌ها داشته است (هاشمیان و کاووسی، ۱۳۸۶). نتایج مطالعات یوسف

قبیل کمبود منابع فنی مرتبط، تجاری بودن مصالح استفاده شده به عنوان فیلر، دقت مرسوم آزمایشگاهی و همخوانی نتایج با یکدیگر جهت اعتبارسنجی مدل‌های آماری می‌شود. اگر چه امروزه روش‌ها و دستگاه‌های متعددی جهت تولید و ارزیابی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی کف قیری به‌کار گرفته می‌شود، اما بخشی از آنها به دلیل گرانی تجهیزات قابل استفاده در کارگاه نیستند. از این رو، همچنان این نیاز احساس می‌شود که با بهره‌گیری از روش آماری، معادلاتی بتوانند نتایج آزمایش‌ها را با دقت مناسب و بدون صرف زمان و هزینه پیش‌بینی کنند. تحقیقات مختلف نشان داده که در مخلوط‌های کف قیری، با افزودن فیلر فعال مانند سیمان، اختلاط قیر با سنگ‌دانه بهتر صورت می‌گیرد و علاوه بر افزایش مقاومت مخلوط، موجب کاهش حساسیت آن در برابر رطوبت می‌گردد (لی و همکاران، ۲۰۱۶). در این مقاله، با استفاده از آزمایش‌های مقاومت مارشال، مدول بر جهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم (اشباع و خشک)، تأثیر سیمان به عنوان فیلر فعال و میزان قیر مصرفی در مخلوط‌های کف قیری مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، تحلیل رگرسیونی و آماری انجام شده و یک مدل ریاضی (تابع) برای هر یک از خصوصیات مقاومتی و رطوبتی مخلوط‌های کف قیری ارائه می‌شود. مدل‌های ارائه شده، مقادیر مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول بر جهندگی را بر حسب مقدار فیلر سیمان و درصد قیر مصرفی پیش‌بینی می‌کنند.

۲. مروری بر تحقیقات گذشته

از ضعف‌های عمده مخلوط‌های کف قیری وجود درصد فضای خالی زیاد و عدم پوشش مناسب درشت‌دانه‌ها توسط کف قیر است (تاجیرا و همکاران، ۲۰۰۶). این موضوع موجب افت مقاومت مخلوط کف قیر و

خرده آسفالت توسط دستگاه آسفالت تراش ساخت شرکت ویرتگن (WR200) و تا عمق متوسط ۱۰ سانتی-متری تراشیده شده بودند. به دلیل عدم پوشش مناسب درشت‌دانه‌ها با کف قیر، دانه‌های درشت‌تر از ۱۹ میلی‌متر از مخلوط جدا گردید (شو و همکاران، ۲۰۱۲). در ابتدا، دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی انجام و مصالح بر اساس اندازه الک‌ها تفکیک گردید. سپس، مصالح خرده آسفالتی با توجه به حدود دانه‌بندی مورد نظر و ساخت ۱۲ نمونه ۱۰ کیلوگرمی باز ترکیب گردید و نیز در راستای هدف اصلی تحقیق، جهت اصلاح دانه‌بندی از مصالح جدید استفاده نگردید. منحنی دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ آمده است. این دانه‌بندی، حدود پیشنهادی دو آئین‌نامه بازیافت سرد آسفالت ایران (نشریه ۳۳۹، ۱۳۸۵) و فناوری بازیافت سرد ویرتگن (۲۰۱۲) را مطابق شکل ۱ برآورده می‌سازد. همچنین، بررسی کیفی مصالح خرده آسفالتی در جدول ۱ بیان شده است.

دوست و همکاران (۱۳۹۰) نشان داد که با افزایش فیلر سیمان از صفر به ۱٪، مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها به ترتیب ۱۷۰٪ و ۷۸٪ افزایش می‌یابند و نرخ افزایش مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های عمل‌آوری نشده، با افزایش درصد سیمان، کمتر از سایر روش‌های عمل‌آوری است. دیواندری و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از روش رگرسیون خطی و ترکیب نتایج آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، استحکام مارشال و اثر جای چرخ، یک رابطه ریاضی به شرح زیر برای پیش‌بینی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه نمودند و سپس اعتبارسنجی مدل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی صورت پذیرفت:

$$R_d(mm) = 2.951D_v - 0.736S_m + 0.003S_t + 2.737 \quad (1)$$

در رابطه فوق، R_d عمق شیار به دست آمده از آزمایش اثر جای چرخ (میلی‌متر)، D_v تغییر مکان قائم به دست آمده از آزمایش کشش غیرمستقیم (میلی‌متر)، S_m مقاومت مارشال به دست آمده (کیلو نیوتن) و S_t مقاومت کششی غیرمستقیم (کیلو پاسکال) می‌باشد.

مدرس و کاووسی (۱۳۸۹) با انجام آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی روی مخلوط‌های بازیافت شده قیر امولسیون، با استفاده از سیمان و در شرایط عمل‌آوری مختلف، مدلی را برای پیش‌بینی مدول برجهندگی به شرح زیر ارائه کردند:

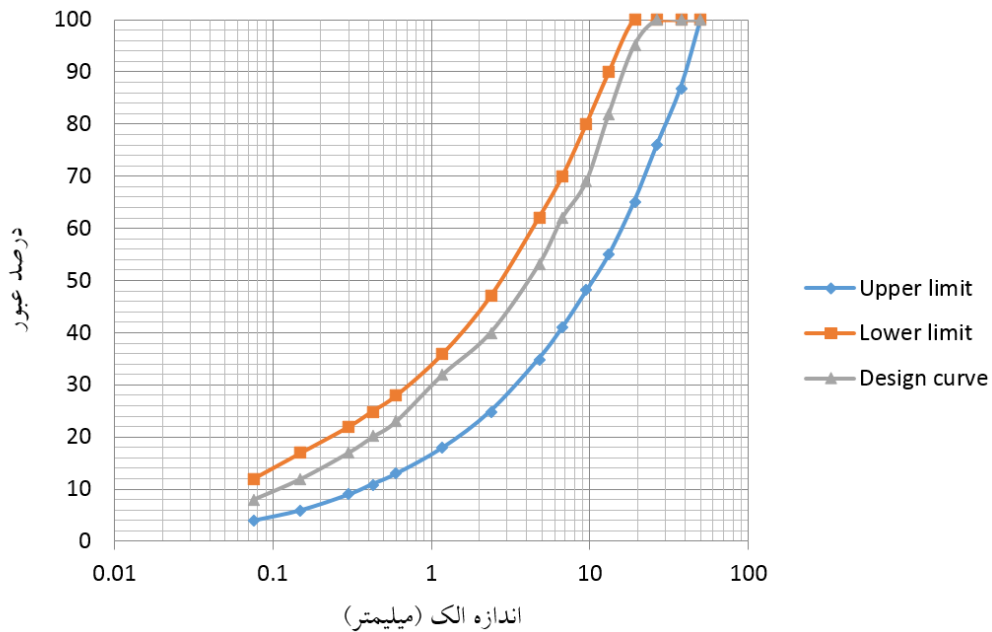
$$M_r = 12.81ITS - 984.9 \quad (2)$$

که M_r مدول برجهندگی (مگاپاسکال) و ITS مقاومت کششی غیرمستقیم خشک (کیلو پاسکال) است.

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



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه خرد آسفالت و حدود پیشنهادی فناوری بازیافت سرد و یرتگن

جدول ۱. مشخصات مصالح خرد آسفالتی طبق نشریه ۳۳۹

روش آزمایش		مشخصات استاندارد	مشخصات مصالح	ویژگی‌ها
AASHTO	ASTM			
T96	C131	حداکثر ۴	۳۰	افت وزنی در برابر سایش (لس آنجلس)
T104	C88	حداکثر ۱ ۲	۰/۳	افت وزنی در برابر سولفات سدیم
T176	C2419	حداقل ۳۵	۴۸	ارزش ماسه‌ای
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
T194,26 7	-	حداکثر ۲	۱	مواد آلی

۲-۳. انتخاب قیر و مشخصات تولید کف قیر

قیرهای با ویسکوزیته کم 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 (نشریه ۳۳۹، ۱۳۸۵). انتخاب قیر مورد استفاده متأثر از

دمای محیط است و در ایران از قیرهای خالص با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ برای مناطق سردسیر و با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ برای مناطق معتدل استفاده می‌شود (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰). در این پروژه، از قیر ۸۵/۱۰۰ پالایشگاه تهران استفاده شد. مشخصه‌های اصلی قیر مورد استفاده به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲. مشخصات قیر مورد استفاده

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

جهت تولید و بررسی خصوصیات کف قیر در آزمایشگاه، از دستگاه WLB10 استفاده شد. شکل ۲ شمای کلی دستگاه WLB10 را نشان می‌دهد. 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 می‌شوند و سپس از مجرای دیگر کف قیر

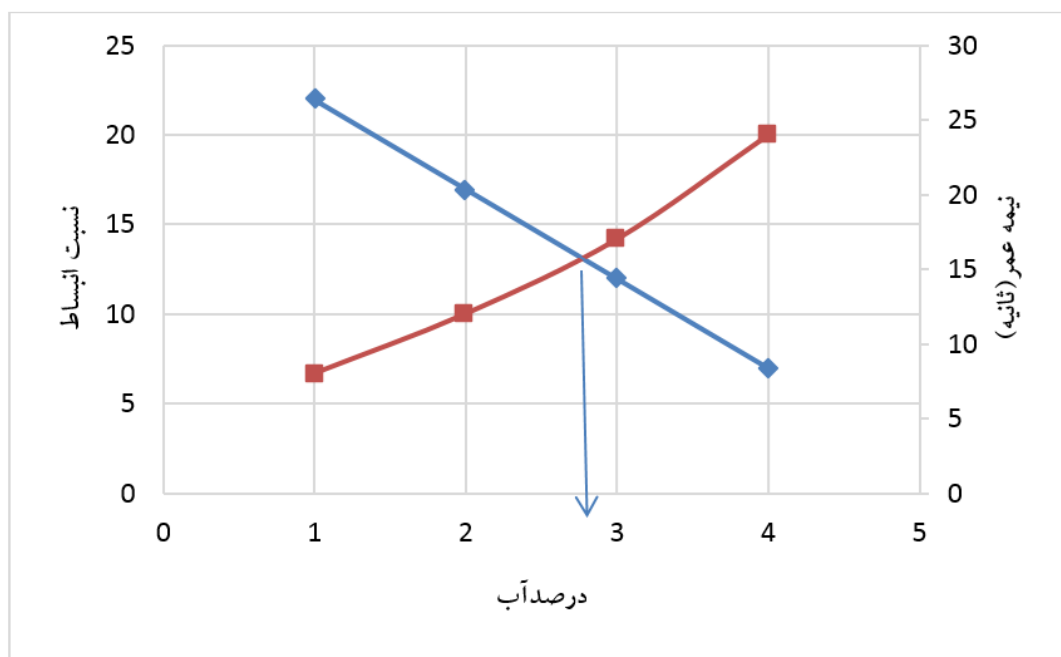
تولیدی تخلیه می‌شود. استفاده از دستگاه WLB10 این امکان را فراهم می‌سازد که علاوه بر تنظیم میزان قیر و آب ورودی، با تغییر پارامترهایی نظیر فشار قیر، فشار آب و دمای قیر شرایط اجرایی مورد انتظار را شبیه سازی نمود. در این دستگاه، فشار قیر ورودی تابعی از سرعت ماشین تثبیت بوده و در سرعت‌های متعارف ۵ الی ۱۰ متر بر دقیقه، فشار قیر ورودی به نازل ۵ اتمسفر انتخاب می‌گردد (آکادمی آسفالت آفریقای جنوبی، ۲۰۰۲).



شکل ۲. دستگاه تولید کف قیر WLB10

(نشریه ۳۳۹، ۱۳۸۵). محل تلاقی دو نمودار برای بهینه کردن هر دو خاصیت به عنوان درصد مناسب آب برای تولید کف قیر استفاده می‌شود که باید با حداقل مقدار آیین‌نامه آکادمی آسفالت آفریقای جنوبی (۲۰۰۲) که حداقل ضریب انبساط و نیم‌عمر را به ترتیب ۱۰ و ۱۲ ثانیه در نظر گرفته و طبق پیشنهاد نشریه ۳۳۹ (۱۳۸۵) به ترتیب ۸ و ۱۰ ثانیه است، مطابقت داشته باشد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود مقدار آب برابر ۲/۶ درصد وزنی قیر تعیین گردید که حداقل‌های هر دو آیین‌نامه را برآورده می‌نماید.

برای ارزیابی خصوصیات کف قیر از پارامترهای نیم-عمر^۱ (زمان رسیدن حجم کف قیر به نصف حداکثر حجم کف بر حسب ثانیه) و نسبت انبساط^۲ (نسبت حجم حداکثر کف قیر به حجم اولیه قیر) استفاده می‌شود که نحوه عمل بدین ترتیب است که قیر داغ (معمولاً در دمای ۱۶۰، ۱۷۰ یا ۱۸۰ درجه سلسیوس) با درصدهای مختلف آب (معمولاً ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزنی قیر) تبدیل به کف قیر می‌شود و پارامترهای نیم‌عمر و نسبت انبساط را در محفظه مخصوص انبساط اندازه‌گیری، ثبت و نمودار تغییر این پارامترها در برابر درصد آب رسم می‌گردد



شکل ۳. درصد آب بهینه برای تولید کف قیر

در این پژوهش، بر اساس نتایج نیم‌عمر و نسبت انبساط کف قیر، تنظیم‌های تولید کف قیر در دستگاه WLB10 مطابق جدول ۳ اعمال گردید.

جدول ۳. مشخصات تولید کف قیر در دستگاه WLB10

آب	دمای قیر	نسبت انبساط	نیم‌عمر	فشار آب	فشار هوا
(%)	(درجه سلسیوس)	(ثانیه)	(ثانیه)	(اتمسفر)	(اتمسفر)
۲/۶	۱۷۰	۱۳	۱۳	۸	۷

۳-۳. ساخت نمونه و آزمایش‌ها

در ابتدا، با استفاده از آزمایش پروکتور استاندارد (AASHTO T180) رطوبت بهینه مصالح خرده آسفالت به میزان $\frac{6}{2}$ تعیین گردید و $\frac{80}{100}$ رطوبت بهینه برای اختلاط مناسب تر مخلوط و جداسازی ذرات ریز برای ترکیب بهتر با قیر، همراه با سیمان (صفر، ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی مخلوط) به مصالح خرده آسفالتی اضافه شد (کیم و لی، ۲۰۰۶). سپس، کف قیر (۱، ۲ و ۳ درصد وزنی مخلوط) به مخلوط مصالح اضافه گردید و عمل اختلاط به مدت تقریباً یک 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. مشخصات انواع طرح‌ها در جدول ۴ ذکر شده است.

بعد از گذشت ۲۴ ساعت از ساخت، نمونه‌ها از قالب خارج شدند و تحت شرایط عمل‌آوری خشک (۷۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس) در گرمخانه قرار داده شدند. پس از خارج شدن نمونه‌ها از گرمخانه، از هر طرح سه نمونه تحت شرایط عمل‌آوری اشباع (به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس) جهت آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم اشباع قرار داده شد. روی نمونه‌ها، آزمایش مقاومت مارشال و مقاومت کششی خشک و اشباع به ترتیب مطابق دستورالعمل‌های

ASTM-D6927 و AASHTO-T283 صورت پذیرفت. همچنین، برای نمونه‌های با عمل‌آوری اشباع، نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک (TSR^1) تعیین گردید. مطابق بند ۴-۹ آئین‌نامه بازیافت سرد آسفالت ایران (نشریه ۳۳۹، ۱۳۸۵) نسبت TSR مناسب برای مناطق مرطوب و با زهکشی ضعیف مطابق معادله (۳) برابر حداقل 0.75 است.

$$TSR_{Sat} = ITS_S / ITS_D \geq 0.75 \quad (3)$$

که ITS_S مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه اشباع و ITS_D مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه خشک است. در ادامه تحقیق، آزمایش مدول برجهنگی نیز مطابق استاندارد ASTM D4123-82 روی نمونه‌های عمل‌آوری شده خشک برای هر حالت از هر طرح، انجام گردید. مدول برجهنگی نسبت تنش به کرنش در یک شرایط بارگذاری و باربرداری سریع در حالت الاستیک می‌باشد. به عبارت دیگر، در اثر بارگذاری و باربرداری سریع، به علت کرنش‌های باقیمانده بسیار کم پس از هر باربرداری، رفتار الاستیک غیر خطی ایجاد می‌شود که شیب آن بیانگر مدول برجهنگی مصالح است. در این پژوهش، مدول برجهنگی با استفاده از دستگاه UTM25KN و با بارگذاری نیمه سینوسی و زمان بارگذاری 0.1 ثانیه و زمان استراحت 0.9 ثانیه انجام گردید. دمای انجام آزمایش برای کلیه نمونه‌ها ثابت و برابر ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شد.

جدول ۴. انواع طرح‌ها

عامل	مقدار	واحد	میانگین	کمینه	پیشینه
سیمان	۰، ۱، ۲، ۳	درصد	۱/۱۲۵	۰	۲
کف قیر	۱، ۲، ۳	درصد	۲	۱	۳

۴. مدل ریاضی

تحلیل رگرسیونی یک فرایند آماری برای تخمین

روابط بین متغیرها است. وقتی که تمرکز روی روابط بین متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل باشد، این روش شامل تکنیک‌های زیادی برای مدل‌سازی و تحلیل

1- Tensile strength ratio

ضریب همبستگی و نیز کمترین خطای استاندارد را داشته باشد، به عنوان تابع پیشگو انتخاب خواهد شد.

جدول ۵. توابع پیشگو

نوع تابع	رابطه ریاضی
خطی	$Ax_1 + Bx_2 + C$
درجه دوم	$A + Bx_1 + Cx_2 + Dx_1^2 + Ex_2^2$
توانی	$Ax_1^B + Cx_2^D + E$
لگاریتمی- خطی	$A + B(\ln(x_1)) + C(\ln(x_2))$
نمایی- خطی	$A + Be^{x_1} + Ce^{x_2}$

که x_1 درصد سیمان و x_2 درصد کف قیر است.

پس از انجام تحلیل نتایج آزمایشگاهی، مقاومت مارشال، مدول برجهنگی و مقاومت کششی غیرمستقیم (خشک و اشباع) بر حسب درصد قیر و سیمان با استفاده از نرم افزار IBM SPSS VER 23 و STATISCA VER 12، مقادیر ضریب همبستگی و خطای استاندارد با سطح اطمینان ۹۵٪ برای هر یک از توابع در جدول ۶ نشان داده شده است. بنابراین، با توجه به اطلاعات جدول ۶، مناسب ترین تابع در تمامی نتایج درجه دوم تعیین گردید.

متغیرهای خاص و منحصر به فرد است. در این روش، یک تابع ریاضی ارائه می شود که رابطه بین متغیرهای مستقل (X) و وابسته (Y) را بیان می کند. ضریب همبستگی (R) میزان ارتباط بین متغیر وابسته و مستقل را بیان می کند. در روش رگرسیون، دو فرض H_0 و H_1 به شکل رابطه (۴) تعریف می شود. فرض H_1 بیانگر این مطلب است که یک رابطه علیتی بین متغیرها وجود دارد و فرض H_0 بر مبنای عدم وجود رابطه بین متغیر وابسته و مستقل است. در این روش، هدف، حذف و رد فرضیه H_0 است.

$$\begin{cases} H_0 : R = 0 \\ H_1 : R \neq 0 \end{cases}$$

(۴)

در رگرسیون های چندمتغیره، مقادیر یک متغیر وابسته از روی مقادیر دو یا چند متغیر دیگر (متغیرهای مستقل) با استفاده از یک معادله ریاضی برآورد می شود. در این مقاله، متغیرهای درصد سیمان و قیر به عنوان متغیر مستقل و متغیرهای مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهنگی به عنوان متغیر وابسته انتخاب گردید و جهت پیش بینی هر یک از متغیرهای وابسته، توابع جدول ۵ بررسی خواهد گردید. هر تابع که بیشترین

جدول ۶. ضریب همبستگی و خطای استاندارد برای هر یک از نتایج آزمایش

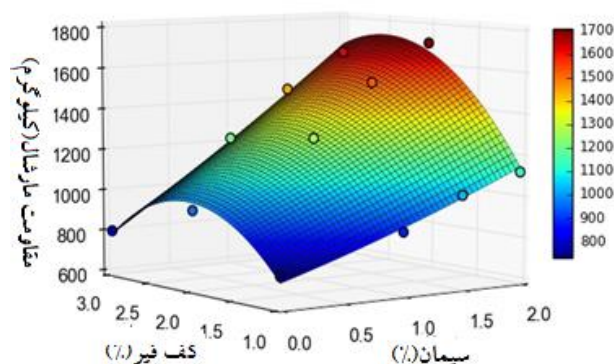
تابع	مقاومت کششی غیرمستقیم خشک (کیلو پاسکال)		مقاومت کششی غیرمستقیم اشباع (کیلو پاسکال)		مقاومت مارشال (کیلو گرم)		مدول برجهنگی (مگا پاسکال)	
	ضریب همبستگی (%)	خطای استاندارد	ضریب همبستگی (%)	خطای استاندارد	ضریب همبستگی (%)	خطای استاندارد	ضریب همبستگی (%)	خطای استاندارد
درجه دو	۹۸/۵	۱۷	۹۶۵	۲۳	۹۴	۹۶	۹۹	۲۵۶
خطی	۹۴	۳۶	۹۴	۲۸	۷۹	۱۶۵	۹۳	۶۶۱
توانی	۸۴	۱۶۳	۶۲	۶۹	۸۴	۱۶۳	۹۷	۵۰۷
لگاریتمی- خطی	۵۰>	-	۵۰>	-	۵۰>	-	۵۰>	-
نمایی- خطی	۷۵	۶۲	۸۰	۵۱	۶۶	۲۱۰	۷۵	۱۲۵۰

۵. ارائه نتایج و تحلیل آنها

۵-۱. مقاومت مارشال

کمتر، به دلیل عدم چسبندگی مناسب بین سنگ‌دانه‌ها مقاومت به شدت کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با افزایش درصد سیمان، مقاومت مارشال با شیب نسبتاً زیاد افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش مقدار قیر مصرفی از ۱٪ تا ۲٪ مقاومت مارشال افزایش و سپس با افزایش قیر، مقاومت مارشال کاهش می‌یابد. در کلیه طرح‌ها، منحنی مقاومت مارشال بر حسب قیر، شکل زنگوله‌ای دارد. بیشترین مقدار مقاومت مارشال در قیر ۲٪ و سیمان ۲٪ برابر با ۱۷۵۰ کیلوگرم و کمترین آن در قیر ۱٪ و سیمان صفر و برابر با ۷۳۲ کیلوگرم به دست آمد. معادله (۵) نتایج مقاومت مارشال را بر حسب درصد قیر و سیمان بیان می‌کند.

در این روش آزمایش، مقاومت نمونه استوانه‌ای مخلوط آسفالتی در حالتی که سطح جانبی نمونه با دستگاه مارشال تحت بارگذاری قرار گرفته، اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۴ نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت مارشال در طرح‌های مختلف در قیر ۲٪ به دست می‌آید. قیر تا حدی می‌تواند موجب افزایش مقاومت مخلوط شود. ولی به دلیل خاصیت عایق رطوبتی که دارد در درصدهای بیشتر، از نفوذ رطوبت جلوگیری کرده و در نتیجه مانع از واکنش کامل هیدراتاسیون می‌گردد، که در نتیجه مقاومت مخلوط کاهش پیدا می‌کند. در درصد قیر



شکل ۴. مقاومت مارشال مخلوط در درصد قیر و سیمان

$$S = -369 + 291 \times C + 1207 \times F.B + 20.2 \times C^2 - 261 \times F.B^2 \quad (5)$$

که S مقاومت مارشال (کیلوگرم)، C مقدار سیمان (درصد) و F.B مقدار کف قیر (درصد) است.

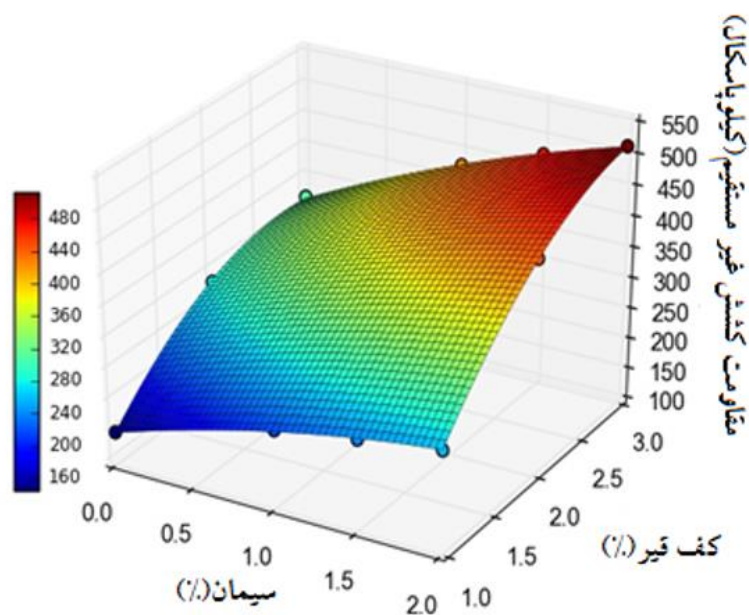
جدول ۷. آنالیز واریانس مدل مقاومت مارشال

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره آزمون	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۱۸۱۴۹۷۳۹	۵	۳۶۲۹۹۴۸	۳۹۵	۰/۰۰
باقیمانده	۶۴۲۵۰	۷	۹۱۷۸		
مجموع کل (تصحیح نشده)	۱۸۲۱۳۹۸۹	۱۲			
مجموع کل (تصحیح شده)	۱۱۷۵۵۳۹	۱۱			

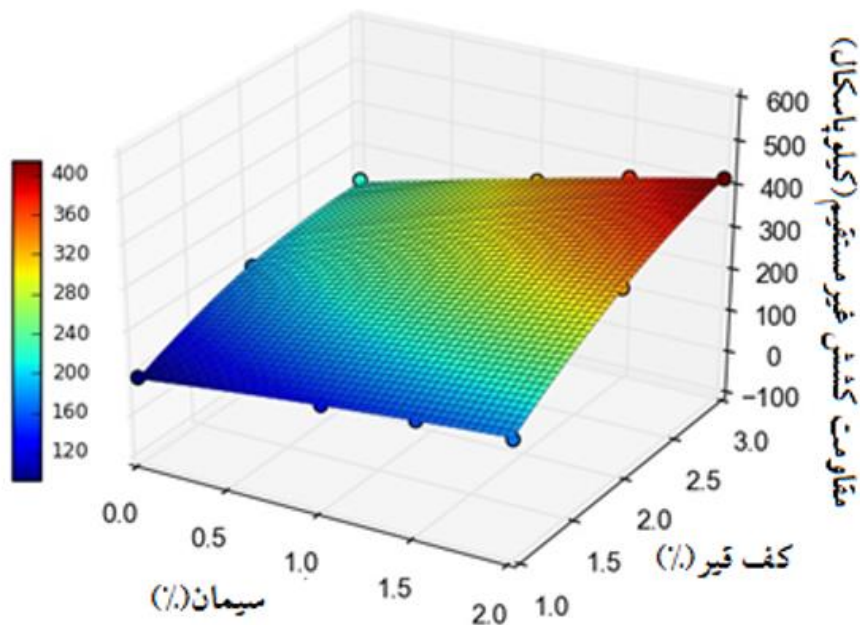
۲-۵. مقاومت کششی غیرمستقیم

آزمایش کشش غیرمستقیم به وسیله یک تیغه بارگذاری استاندارد و با سرعت بکنواخت ۵۱ میلی‌متر در دقیقه 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 مقاومت کششی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی است (کی‌منش و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین، از این آزمایش برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیز استفاده می‌شود. در شکل‌های ۵ و ۶، نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم خشک و اشباع بر حسب درصد سیمان و قیر نشان داده شده است. با بررسی نتایج مشاهده شد که با افزایش قیر و سیمان، مقاومت کششی غیرمستقیم (خشک و اشباع) افزایش می‌یابد و شکل صفحه برآزش شده بر نتایج آزمایشگاهی تقریباً مسطح است. این افزایش را می‌توان به بهبود چسبندگی بین استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌های بازیافتی و قیر مرتبط

دانست (لانگ و همکاران، ۲۰۰۴). بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم با قیر ۳٪ و سیمان ۲٪ در حالت خشک ۵۱۲ کیلوپاسکال و در شرایط اشباع ۴۱۴ کیلوپاسکال حاصل گردید. به دلیل انجام واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان با آب، با افزایش درصد سیمان، مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع افزایش بیشتری نسبت به حالت خشک می‌یابد. مطابق شکل‌های ۵ و ۶، تأثیر سیمان در افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع بیش از قیر است و چنانچه مقدار قیر از ۱٪ به ۳٪ افزایش یابد، تأثیر افزودن سیمان در افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم (خشک و اشباع) نمونه‌ها بیشتر می‌شود. مطابق با بند ۴-۱۱ نشریه شماره ۳۳۴ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۰)، حداقل مقاومت کششی غیرمستقیم خشک برای ترافیک سنگین ۳۰۰ کیلوپاسکال و در حالت اشباع ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. معادله (۶) نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع را بر حسب درصد قیر و سیمان مصرفی مشخص می‌کند. جداول ۸ و ۹، آنالیز واریانس مدل مقاومت کششی غیرمستقیم خشک و اشباع را نشان می‌دهند.



شکل ۵. مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک



شکل ۶. مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع

$$ITS_{dry} = -148 + 109 \times C + 323 \times F.B - 15 \times C^2 - 54 \times F.B^2 \quad (1)$$

$$ITS_{wet} = -142.7 + 81.6 \times C + 234 \times F.B - 5.1 \times C^2 - 34.8 \times F.B^2$$

که ITS_{wet} و ITS_{dry} به ترتیب مقاومت کششی غیرمستقیم خشک و اشباع (کیلوپاسکال)، C مقدار سیمان (درصد) و $F.B$ مقدار کف قیر (درصد) است.

جدول ۸. آنالیز واریانس مدل مقاومت کششی غیرمستقیم خشک

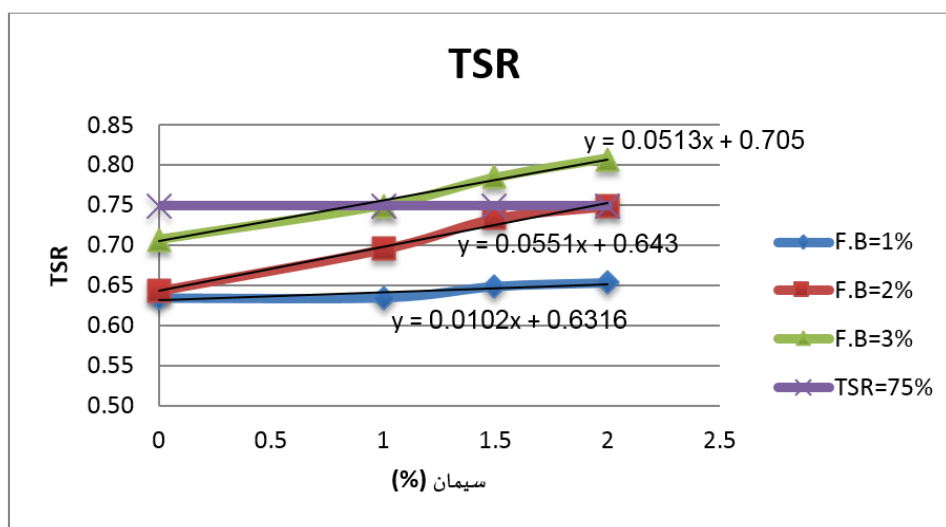
سطح معنی- داری	آماره آزمون	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
۰/۰۰	۱۰۳۷	۳۰۷۱۳۸	۵	۱۵۳۵۶۹۲	رگرسیون
		۲۹۶	۷	۲۰۷۳	باقیمانده
			۱۲	۱۵۳۷۷۶۶	مجموع کل (تصحیح نشده)
			۱۱	۱۴۳۷۵۸	مجموع کل (تصحیح نشده)

جدول ۹. آنالیز واریانس مدل مقاومت کششی غیرمستقیم اشباع

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره آزمون	سطح معنی-داری
رگرسیون	۸۳۲۹۶۷	۵	۱۶۶۵۹۳	۳۰۰	۰/۰۰
باقیمانده	۳۸۸۶	۷	۵۵۵		
مجموع کل (تصحیح نشده)	۸۳۶۸۵۳	۱۲			
مجموع کل (تصحیح نشده)	۱۱۳۱۱۹	۱۱			

بیشترین مقدار TSR در سیمان ۲٪ و قیر ۳٪ و برابر با ۰/۸۱ و کمترین مقدار TSR در قیر ۱٪ و سیمان صفر و برابر با ۰/۶۳ به دست آمد. با توجه به شکل ۷، در قیر ۱٪، با افزایش مقدار سیمان، نسبت TSR افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند و از ۰/۶۳ به ۰/۶۵ می‌رسد. اما در قیر ۲٪ و ۳٪ تأثیر سیمان در افزایش نسبت TSR نسبت به قیر ۱٪ محسوس‌تر (تقریباً ۵ برابر قیر ۱٪) بوده و شیب منحنی در هر دو حالت تقریباً برابر است.

مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر خرابی‌های رطوبتی را با نسبت TSR می‌سنجند. این نسبت به صورت حاصل تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت اشباع به خشک تعریف می‌گردد. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مقاومت نمونه در برابر رطوبت بیشتر است. در شکل ۷، مقادیر پارامتر TSR بر حسب مقدار سیمان و قیر مصرفی نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۷ مشخص است، با افزایش مقدار قیر و سیمان، حساسیت رطوبتی کاهش و نسبت TSR افزایش می‌یابد.



شکل ۷. نسبت TSR بر حسب درصد سیمان و قیر

TSR افزایش محسوس‌تری نسبت به قیر ۱٪ پیدا می‌کند (با شیب ۰/۰۵۵) و در سیمان ۲٪ و قیر ۲٪ نسبت TSR برابر با ۰/۷۵ می‌شود. در قیر ۳٪ و سیمان ۱٪، نسبت

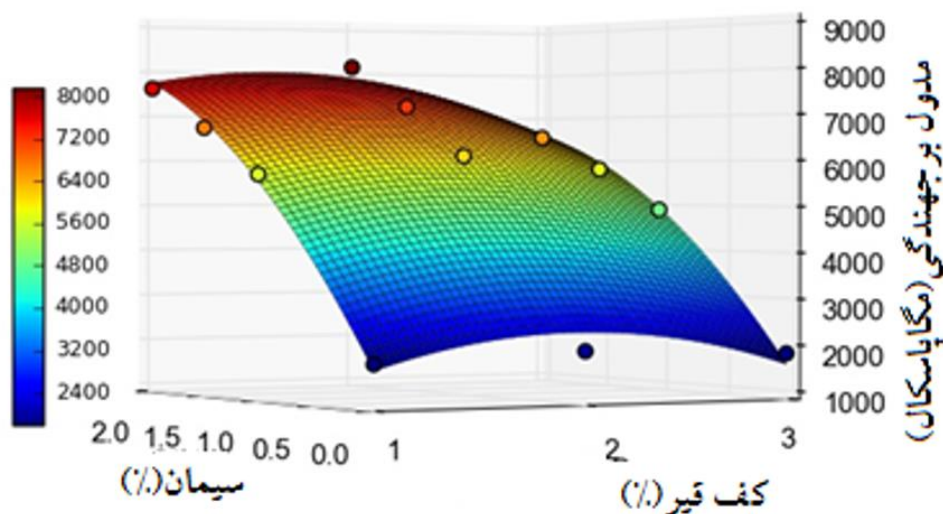
با توجه به شکل ۷، نسبت TSR در قیر ۱٪ هیچگاه به ۰/۷۵ نمی‌رسد و حتی با افزایش سیمان نیز این ضعف جبران نمی‌گردد. اما در قیر ۲٪ با افزایش سیمان، نسبت

نمودار تنش-کرنش به منظور تعیین خصوصیات الاستیک مخلوط‌های کف قیری می‌باشد. مطابق توصیه دستور-العمل ویرتگن (۲۰۱۲) مدول برجهندگی مخلوط‌های کف قیری اصلاح شده بایستی بین ۲۵۰۰ الی ۴۰۰۰ مگاپاسکال باشد. در شکل ۸، نتایج آزمایش مدول برجهندگی بر حسب درصد سیمان و قیر نشان داده شده است. معادله (۷) نتایج مدول برجهندگی را بر حسب قیر و سیمان مصرفی مشخص می‌کند. در جدول ۱۰، آنالیز واریانس مدل مدول برجهندگی ارائه شده است.

TSR به بیش از ۰/۷۵ می‌رسد و در ادامه با افزایش سیمان، نسبت TSR افزایش چشمگیری می‌یابد. بنابراین، با افزایش سیمان، می‌توان حساسیت رطوبتی مخلوط‌های کف قیری را به شرط استفاده از درصد قیر مناسب (بیش از ۲٪) کاهش داد.

۳-۵. مدول برجهندگی

مدول برجهندگی یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین



شکل ۸. نتایج مدول برجهندگی بر حسب سیمان و قیر مصرفی

$$MR = -1293 + 4486 \times C + 3316 \times F.B - 859 \times C^2 - 743 \times F.B^2 \quad (7)$$

که MR مدول برجهندگی (مگاپاسکال)، C مقدار سیمان (درصد) و F.B مقدار کف قیر (درصد) است.

جدول ۱۰. آنالیز واریانس مدل مدول برجهندگی

سطح معنی‌داری	آماره آزمون	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مدل
۰/۰۰	۷۷۲	۸۰۲۶۷۱۶۹	۵	۴۰۱۳۳۵۸۴۵	رگرسیون
		۱۰۴۰۱۹	۷	۷۲۸۱۳۶	باقیمانده
			۱۲	۴۰۲۰۶۳۹۸۱	مجموع کل (تصحیح نشده)
				۵۷۳۸۳۸۳۹	مجموع کل (تصحیح نشده)

برجهندگی، مخلوطهای کف قیری بدون سیمان نمی‌توانند انتظارات را برآورده سازند، زیرا که مطابق با نتایج، در مخلوطهای ساخته شده بدون سیمان، حداکثر مدول برجهندگی در قیر ۲٪ و برابر با ۱۹۶۵ مگاپاسکال به‌دست آمد.

در نهایت، با استفاده از نتایج آزمایش‌های مقاومت مارشال، مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم (خشک) و روش رگرسیون، یک رابطه خطی بین همه نتایج به‌دست آمد. در این مدل، خصوصیات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی با استفاده از یک رابطه ریاضی به یکدیگر وابسته می‌گردند. تحلیل ضرایب پارامترهای مستقل مدل و آنالیز واریانس کل در جداول ۱۱ و ۱۲ بیان شده است.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بیشترین مدول برجهندگی در سیمان ۲٪ و قیر ۲٪ و برابر با ۸۱۵۰ مگاپاسکال و کمترین آن در نمونه با قیر ۱٪ و سیمان صفر و برابر با ۱۸۲۱ مگاپاسکال به‌دست آمد. همچنین، با افزایش سیمان، مقدار مدول برجهندگی با شیب زیادی افزایش می‌یابد. اما با افزایش قیر از ۱٪ به ۲٪، مدول برجهندگی افزایش و سپس با افزایش قیر از ۲٪ به ۳٪، کاهش می‌یابد و رفتاری مشابه نتایج استقامت مارشال دارد. مطابق شکل ۸، در قیر ۱٪، تأثیر سیمان در افزایش مدول برجهندگی نسبت به قیر ۲٪ و ۳٪ کمتر است. به طوری که مدول برجهندگی در قیر ۱٪ و سیمان ۲٪، ۶۵۴۷ مگاپاسکال و در قیر ۳٪ و سیمان ۲٪، ۷۶۱۶ مگاپاسکال به‌دست آمد. بنابراین، مطابق با توصیه دستورالعمل ویرتگن (۲۰۱۲) و نتایج آزمایش مدول

جدول ۱۱. آنالیز واریانس مدل

مدل	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره آزمون	سطح معنی‌داری
رگرسیون	۲	۱۰۸/۰۵۶	۵۴	۵۴	۰/۰۰۰
ITS	۱	۱۷/۲۱	۱۷/۲۱	۱۶/۳۶	۰/۰۰۳
MR	۱	۱۷/۰۸	۱۷/۰۸	۱۶/۲۴	۰/۰۰۳
باقیمانده	۹	۹/۴۶۶	۱		
مجموع	۱۱	۱۱۷/۵۲۲			

جدول ۱۲. آنالیز ضرایب مدل

پارامترهای مستقل	ضرایب	خطای استاندارد ضرایب	ضریب استاندارد شده	پارامتر T	سطح معنی‌داری
constant	۲/۸۰۹	۰/۹۷۷	-	۲/۸۷	۰/۰۱۸
ITS	۱۴/۹۸	۳/۷	۰/۵۲۴	۴/۰۴	۰/۰۰۳
MR	۰/۷۴۷	۰/۱۸۵	۰/۵۲۲	۴/۰۳	۰/۰۰۳

$$S=2.809+14.98 \times ITS+0.747 \times MR \quad (8)$$

که S مقاومت مارشال (کیلونیتن)، پارامتر ITS مقاومت کششی غیرمستقیم (مگاپاسکال) و MR مدول بر جهندگی (گیگاپاسکال) است.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، پس از ساخت نمونه‌های بازیافت شده با استفاده از روش کف قیر، آزمایش‌های مقاومت مارشال، مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم خشک و اشباع روی نمونه‌ها انجام گردید. پس از انجام آزمایش و تحلیل نتایج، با استفاده از روش‌های مرسوم آماری، در راستای فرض اصلی تحقیق، برای هر یک از خواص مکانیکی نمونه‌ها یک رابطه ریاضی با دقت مناسب انتخاب و ارائه گردید. مدل ریاضی معرفی شده می‌تواند با خطای بسیار کم مقاومت مارشال، مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم (خشک و اشباع) را در نمونه‌های بازیافت کف قیری برآورد کند. سایر دستاورد های این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

الف) به منظور دستیابی به مناسب‌ترین مدل ریاضی جهت برآورد نتایج، در ابتدا پنج تابع بررسی شده و بهترین تابع با کمترین خطا در تمامی حالت‌ها درجه دوم تعیین گردید.

ب) نتایج به دست آمده از آزمایش مارشال نشان داد که افزودن سیمان به مخلوط‌های بازیافت شده کف قیری سبب افزایش مقاومت می‌شود. به نحوی که با افزایش مقدار سیمان از ۱٪ به ۲٪ به طور متوسط مقاومت مارشال ۳۱٪ افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار مقاومت مارشال در قیر ۲٪ حاصل گردید و با افزایش قیر، مقاومت مارشال در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

۷. مراجع

احمدی، ا. (۱۳۸۷). "بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای اختلاط، ساخت و عمل‌آوری آسفالت بازیافت شده کف قیری بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول برجهندگی و نتایج آزمایش مارشال". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

دیواندری، ح.، مدرس، ا.، حسینی علی‌آباد، س. م. و رستمی انکاس، م. (۱۳۹۴). "ارائه مدل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، (۲): ۴۱-۵۴.

کاووسی، ا.، شیخی‌کاریزکی، ا.، صولتی‌فر، ن. و جلیلی قاضی‌زاده، م. (۱۳۹۳). "ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی

ج) افزودن سیمان و کف قیر به مخلوط‌های کف قیر باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع می‌شود و سیمان (نسبت به قیر) تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم دارد. با افزایش سیمان از ۱٪ به ۲٪، مقاومت در حالت خشک و اشباع به ترتیب ۱۹٪ و ۲۷٪ به طور متوسط افزایش یافت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که همچنین با افزایش مقدار سیمان و قیر در نمونه‌ها، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های کف قیری کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که در قیر ۱٪ سیمان تأثیر زیادی در افزایش نسبت TSR ندارد. اما در قیر ۲٪ و ۳٪، با افزایش سیمان، نسبت TSR با شیب تقریباً یکسان در نمونه‌ها رشد می‌یابد.

د) با افزودن سیمان به نمونه‌های مخلوط کف قیر، مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. به طوری که اگر مقدار سیمان از ۱٪ به ۲٪ در مخلوط افزایش یابد، مدول برجهندگی نمونه به طور متوسط ۳۳٪ افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش مقدار سیمان از صفر به ۲٪، مدول برجهندگی در قیر ۱٪، ۲/۶، در قیر ۲٪، ۳ برابر و در قیر ۳٪، ۳/۶ برابر می‌شود. بنابراین، با افزایش مقدار قیر، تأثیر سیمان در افزایش مدول برجهندگی بیشتر می‌شود.

ه) با استفاده از مدل‌های ساخته شده می‌توان در آزمایشگاه، با صرف هزینه بسیار اندک و به سرعت، خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های کف قیری را پیش‌بینی کرد.

بازیافت روسازی‌های آسفالتی به روش سرد با کف قیر"، پانزدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، ارومیه. کی منش، م. ر.، زیاری، ح.، نصرالله تبار، ع. و شهریاری، ن. (۱۳۹۶). "تحلیل پتانسیل پارامترهای میکروساختاری و مقاومت کششی غیرمستقیم در ارزیابی عملکرد شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۸۲-۶۹: (۱)۳.

مدرس، ا. کاووسی، ا. (۱۳۸۹) "مدلی برای تخمین مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی بازیافت شده با قیر امولسیون و سیمان"، مهندسی حمل و نقل، ۲(۲): ۱۴۳-۱۵۴.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری. (۱۳۹۰). "آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران". نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، مؤسسه قیر و آسفالت، تجدید نظر اول.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری. (۱۳۸۵). "آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران". نشریه شماره ۳۳۹، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، مؤسسه قیر و آسفالت، تجدید نظر اول.

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

یوسف دوست، س.، فرزانه، ا.، اسماعیلی، م. ع. و احمدی، ا. (۱۳۹۰). "بررسی آزمایشگاهی مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و فشاری تک‌محوری مخلوط‌های آسفالت‌های بازیافت شده با استفاده از کف قیر". نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، ۴۵(۷): ۸۰۳-۸۲۵.

Asphalt Academy Transport, South African Interim Technical Guidelines. (2002). "Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials". TG2, CSIR Transport, South Africa.

Asphalt Academy (2009) "Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials ", TG2. CSIR Transport, South Africa

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

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, Lithuania, pp. 1089-1096.

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, Proc. Eng., 57: 433-442.

Kim, Y. and Lee, H. D. (2006). "Development of mix design procedure for cold in-place recycling with foamed asphalt". J. Mater. Civ. Eng., 18(1): 116-124.

Li, Z., Hao, P., Liu, H., Xu, J., Chen, Z. (2016) "Investigation of early-stage strength for cold recycled asphalt mixture using foamed asphalt". Constr. Build. Mater., 127: 410-417.

Long, F., Theyse, H. L., Ventura, D. F. C. (2004). "Characterization of foamed bitumen treated materials from HVS test sections". 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Minneapolis, USA.

Martinez-Arguelles, G., Giutozzi, F., Crispino, M., 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

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". Transport. Res. J., 7(1): 53-65.

Twagira, M. E., Jenkins, K. and Ebels, L. J. (2006). "Characterization of fatigue performance of selected cold bituminous mixes". 10th International Conference on Asphalt Pavements, Quebec, Canada.

Wirtgen cold recycling manual. (2012). Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany.

Xu, J. Z., Hao, P. W., Ma, Y. F. and Liu, N. A. (2012). "Study on the optimization design of mixing moisture content in foamed asphalt mix". *Mater. Struc.*, 45(7): 1071-1085.