

ارزیابی نقش فیلر سیمان و آهک بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های بازیافتی کف قیر و آرایه مدل ریاضی

سید فرزین فائزی^۱، مهرداد میرشکاریان بابکی^۲

۱ استادیار، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
۲ دانش آموخته دوره دکتری دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

F.faezi@pnu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۴/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۷/۵/۶

چکیده

خرده‌های آسفالت بازیافتی پس از تراشیده شدن، نوعی از مواد زائد محسوب می‌شوند که از نظر زیست محیطی آثار نامطلوبی بر محیط اطراف خود دارند. از طرفی هزینه سنگین احداث راههای جدید و خسارت‌های ناشی از خرابی راه‌های موجود، مشکلات زیادی را بوجود می‌آورد. هدف این پژوهش بررسی اثر توام درصد قیر با تغییر فیلر بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های کف قیری آسفالت بازیافتی است. روش تحقیق، آزمایشگاهی است. نمونه‌های ساخته شده با افزودن فیلرهای سیمان، آهک با درصد قیر متفاوت و در شرایط عمل‌آوری خشک، اشباع و ذوب-یخبندان بررسی شدند. نمونه‌ها با فیلر سیمان (۱/۵ درصد)، آهک (۱/۵ درصد) و ترکیب سیمان، آهک (۰/۷۵+۰/۷۵ درصد) و یک نمونه شاهد ساخته شدند. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، مدول برجهنگی، استحکام مارشال و مقاومت کشش غیرمستقیم برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی انجام شد. در ادامه با استفاده از نتایج تست مدول برجهنگی مدل‌سازی اجزا محدود با استفاده از نرم‌افزارهای اباکوس و KenLayer انجام و اثر تغییر مدول برجهنگی بر تعداد تکرار بار منجر به خرابی خستگی بررسی شد که در نهایت یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی نسبت TSR آرایه شود. نتایج این پژوهش می‌دهد در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و استحکام مارشال، در کلیه طرح‌ها با افزایش قیر از ۱ به ۲ درصد نتایج افزایش سپس با افزایش قیر از ۲ به ۳ درصد کاهش می‌یابد. همچنین نتایج آزمون مقاومت کشش غیرمستقیم نشان می‌دهد که با افزایش قیر از ۱ به ۳ درصد در همه طرح‌ها مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت عمل‌آوری خشک، اشباع به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. فیلر سیمان با آهک در تمامی حالت‌های عمل‌آوری بیشترین تاثیر را در افزایش مقاومت کشش غیرمستقیم دارد و تاثیر افزایش مقاومت در نمونه‌های حاوی فیلر در شرایط عمل‌آوری اشباع بیش از حالت خشک است. نتایج مدل‌سازی سه بعدی نشان داد که با افزایش مدول برجهنگی لایه اساس، تعداد تکرار منجر به خرابی خستگی را به شدت افزایش می‌یابد.

واژه‌گان کلیدی: کف قیر، آسفالت، مدل ریاضی، اجزا محدود.

۱. مقدمه

نوآوری است. سوالات اساسی این پژوهش به شرح ذیل است:
با توجه به اینکه مخلوط‌های کف قیری مستعد خرابی رطوبتی هستند، فیلرهای فعال چه نقشی در کاهش این پدیده دارند؟
تاثیر نقش مقدار قیر در خرابی رطوبتی مخلوط کف قیری بازیافتی چیست؟

تاثیر همزمان مقدار قیر و نوع فیلر بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های کف قیری بازیافتی چیست؟
کدامیک از فیلرهای استفاده شده بیشترین تاثیر را در کاهش خرابی‌های رطوبتی و افزایش دوام و استحکام مخلوط کف قیر بازیافتی دارند؟

۲. مبانی نظری و پیشینه تحقیق

در دنیا بازیافت آسفالت در سال‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته و هم اکنون در بیشتر کشورهای دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های بازیافت آسفالت بازیافت به روش سرد با روش کف قیر است. در این روش تولیدات حاصل از تخریب لایه‌های قیری روسازی قدیمی یک راه به صورت ذرات آسیاب شده (خرده آسفالت) برای ساختن اساس یا آستر آسفالتی به وسیله روش‌های تثبیت با قیر امولسیون، کف قیر، سیمان و سایر افزودنی‌ها به کار می‌رود [6, 7]. استفاده از کف قیر به عنوان ماده تثبیت کننده، شیوه‌ای است که از سال ۱۹۷۰ در اروپا گسترش یافت و توسعه استفاده از این افزودنی قیری به سال ۱۹۹۰ و به خصوص کشور آلمان بر می‌گردد. کف قیر می‌تواند با انواع مصالح اعم از نو یا بازیافت شده و حتی با خاک‌های با خمیری زیاد به صورت درجا ترکیب شود [8, 9].

تولید و اجرای مخلوط آسفالتی بازیافتی سرد به روش درجا بنا به دلایلی همچون درجه حرارت و آلودگی کمتر به نسبت مخلوط‌های آسفالت داغ، کاهش مصرف انرژی، کاهش تولید آلاینده‌ها، افزایش کارایی، کاهش اکسیداسیون قیر، افزایش بازدهی کارخانه آسفالت، گسترش زیادی پیدا کرده است. در سال ۲۰۰۶، در قاره اروپا، ۴۹/۳۸۹/۴۰۰ تن مصالح خرده آسفالتی موجود بوده که بیش از ۴۰ درصد آن در بازیافت گرم، حدود ۲۵ درصد در بازیافت سرد و حدود ۲۵ درصد نیز در مخلوط‌های گرم آسفالتی

امروزه در راستای کاهش آلاینده‌های ناشی از تهیه مخلوط آسفالتی داغ، کاهش آثار تخریب محیط زیست، صرفه‌جویی‌های اقتصادی، کاهش مصرف انرژی و حفظ منابع طبیعی، استفاده از فناوری بازیافت سرد درجا در دنیا رو به گسترش است [1]. بازیافت سرد در محل با استفاده از روش کف قیر یکی از فناوری‌های نوین در این حوزه است. این روش امروزه به‌عنوان یکی از سریع‌ترین و کم هزینه‌ترین روش‌های بهسازی روسازی شناخته می‌شود [2]. بازیافت آسفالت به روش سرد را می‌توان به‌عنوان جایگزینی مناسب برای نوسازی بسیاری از راه‌های کشور استفاده نمود و می‌تواند با کاهش هزینه‌های حمل و دپوی مصالح، استفاده مجدد از مصالح موجود و در نتیجه کاهش مصرف مصالح جدید، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، کاهش زمان اجرای پروژه و در نتیجه کاهش هزینه کاربران راه و ... در قیاس با روش‌های سنتی از دیدگاه اقتصادی بسیار با صرفه باشد [3].

پژوهش‌های 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، پژوهش‌چندانی در این زمینه صورت نگرفته است [4]. از طرف دیگر، تاکنون طرح اختلاط جامعی در این زمینه ارائه نشده و استانداردها و مراجع مختلف، برای دستیابی به قیر بهینه و نوع فیلر، روش‌های کاملاً متفاوتی را ارائه نموده‌اند. بخشی از دستگاه‌ها برای تولید و ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی کف قیری به‌دلیل گرانی تجهیزات قابل استفاده در کارگاه نیستند. بنابراین 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 [5]. هدف اصلی از این مطالعه بررسی عوامل تاثیرگذار (نوع فیلر، مقدار قیر و روش عمل‌آوری) بر ویژگی‌های مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های بازیافت شده کف قیری است. تمرکز این پژوهش بر بررسی اثر توام درصد قیر با تغییر نوع فیلر بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های کف قیری است که در این راستا برای نخستین مرتبه شرایط مختلف عمل‌آوری و رطوبتی بر مخلوط‌های کف قیری اعمال شد که این به نوبه خود دارای

استفاده شده است [10].

در دمای محیط، مدول بالاتری نسبت به مخلوط‌های آسفالت گرم دارند. در آسفالت کف قیری از آنجا که مصالح درشت دانه‌تر با قیر پوشیده نمی‌شود اصطکاک بین مصالح در دماهای بالاتر حفظ می‌شود [19]. نشریه ۳۳۹ (۱۳۸۵) حداکثر اندازه مصالح سنگی را به ۳۷/۵ میلی‌متر محدود کرده است. مصالح خیلی درشت موجب افزایش جداشدگی سنگدانه‌ها شده، افزایش درصد فضای خالی مخلوط، افزایش نفوذپذیری و دشواری در پخش و تراکم خواهد شد. نتایج پژوهش‌های یوسف‌دوست و همکاران (۱۳۹۰) نشان داد که با تغییر دانه‌بندی از متوسط به ریز مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مخلوط کف قیری ساخته شده بیشتر می‌شود [20]. نتایج پژوهش خسروی‌فر و اشوارتز (۲۰۱۳) نشان داد که بیشینه اندازه دانه‌های مصالح سنگی در بازیافت سرد با کف قیر باید به ۲۸ میلی‌متر محدود شود [21]. زو و همکارانش در سال ۲۰۱۲، در آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که اگر مخلوط کف قیری در رطوبت مناسب درست شده و متراکم شود می‌تواند دانه‌های سنگی تا اندازه ۱۸ میلی‌متر را به شکل مناسبی با قیر بپوشاند [22]. استفاده از فیلر یکی از روش‌های اجرایی در زمینه اصلاح ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی کف قیری است و در پژوهش‌های گذشته کمتر به این موضوع پرداخته شده و در این پژوهش برای اولین بار از ترکیب فیلر سیمان و آهک در مخلوط‌های کف قیری بازیافتی استفاده شد. همچنین پژوهش جامع و مفصلی جهت بررسی نقش فیلر در مقاومت در برابر خرابی‌های رطوبتی مخلوط‌های کف قیری انجام شده است.

۳. روش تحقیق

در این تحقیق 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 فیلرهای سیمان (۱/۵ درصد وزن مخلوط)، آهک (۱/۵ درصد وزن مخلوط) و ترکیب سیمان و آهک (۰/۷۵+۰/۷۵) با استفاده از چکش مارشال ساخته شدند و سپس تحت سه روش عمل‌آوری (خشک، اشباع و ذوب-یخبندان) قرار گرفتند. برای عمل‌آوری خشک نمونه‌ها ۷۲ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد و جهت عمل‌آوری اشباع پس از عمل‌آوری خشک،

در پژوهش ژینگانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶، تحلیل اقتصادی گزینه‌های تثبیت اساس نشان می‌دهد که اقتصادی‌ترین گزینه، بازیافت آسفالت با کف قیر است [11]. در مطالعات دیگری به بررسی هزینه‌های اجرای بازیافت آسفالت با کف قیر و بازسازی مجدد پرداخته شده است. مقایسه هزینه گزینه‌های مختلف نشان می‌دهد در تمامی پروژه‌های مطالعه مذکور، هزینه اجرای بازیافت آسفالت با کف قیر نسبت به بازسازی مجدد کمتر بوده است. به ویژه در مورد روسازی‌هایی که در وضعیت بدتری قرار دارند [12].

مطالعات پینگ (۲۰۰۶) نشان داد که ویسکوزیته قیر پایه در مشخصات کف قیر تولید تاثیرگذار است. در این پژوهش مشخص شد که با افزایش ویسکوزیته قیر پایه نیمه عمر و نسبت انبساط کف قیر تولید شده به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد [14]. مطالعات کجیالیو (۲۰۱۷) نشان داد که با افزایش دمای قیر این دو پارامتر افزایش می‌یابند [15].

نتایج پژوهش دانگ و همکاران (۲۰۱۷) روی قیر پسماند نشان داد که افزایش مقدار آب موجب تاثیر منفی بر مقاومت شیارشدگی، مقاومت در دمای پایین و مقاومت خستگی قیر پسماند می‌شود [16]. پژوهش دیگر نشان داد هر چه مقدار نیمه عمر و نسبت انبساط بیشتر شود، کیفیت قیر تولید شده بیشتر می‌شود. استفاده از مقدار آب زیاد موجب افزایش نسبت انبساط در عوض باعث افزایش سرعت نشست و زوال کف قیر شده، و در زمانی که آب به قیر داغ تزریق می‌شود، دمای قیر در نسبت انبساط و نیمه عمر کف تشکیل شده تاثیرگذار بوده، به گونه‌ای که هرچه دمای قیر بیشتر باشد، کیفیت قیر تولید بیشتر است [17]. مارتینز (۲۰۱۵) بیان کرد که بخش ریزدانه مصالح یکی از ملاحظات مهم است و باید بیشتر از ۰/۵٪ مصالح را به خود اختصاص دهد و مخلوط‌های آسفالتی کف قیری با مقادیر بالاتر ریزدانه استحکام بیشتری دارند. همچنین وی نشان داد که مقدار ریزدانه نقش مهمی در مقاومت، استحکام و کارایی ماسه‌های تثبیت شده با کف قیر دارد [18]. ین نشان داد که دماهای بالاتر از ۳۰ °C مخلوط‌های آسفالت کف قیری بعد از ۲۱ روز عمل‌آوری

Min 100	More than 100	tensile in 25°C(cm)
Max 3	0.323	Smoothness(Pa.s) in 135°C
Max 1	0.07	Change of mass (%)
Min 1000	1057	G*/sinδ in 64°C
Max 300	255	Crawl in -6°C
Min 0.3	0.303	m in -6°C

جهت تولید و بررسی ویژگی‌های کف قیر در آزمایشگاه از دستگاه WLB10 استفاده شد. 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.

برای ارزیابی ویژگی‌های کف قیر از پارامترهای نیمه عمر (زمان رسیدن حجم کف قیر به نصف حداکثر حجم کف بر حسب ثانیه) و نسبت انبساط (نسبت حجم حداکثر کف قیر به حجم اولیه قیر) استفاده می‌شود که نحوه عمل بدین ترتیب است قیر داغ را (معمولاً در دمای ۱۶۰ یا ۱۷۰ یا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) با درصدهای مختلف آب (معمولاً ۱ یا ۲ یا ۳ و یا ۴ درصد وزنی قیر) تبدیل به کف قیر می‌شود و پارامترهای نیمه عمر و نسبت انبساط را در محفظه مخصوص انبساط اندازه‌گیری، ثبت و نمودار تغییر این پارامترها را در برابر درصد آب رسم می‌گردد [17]. محل تلاقی دو نمودار برای بهینه کردن هر دو خاصیت به عنوان درصد مناسب آب برای تولید کف قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد که باید طبق پیشنهاد نشریه ۳۳۹ نسبت انبساط و نیمه عمر حداقل به ترتیب ۸ و ۱۰ باشند [27]. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود مقدار آب برابر ۲ درصد وزنی قیر تعیین گردید که حداقل‌های آئین نامه را برآورده می‌نماید.

Table 2. Ratio of expansion and half life

Ratio of expansion	Half life(sec)	Water%
24.4	7.1	1
16.1	11.3	2
123.2	16.2	3
7.2	20.4	4

۲۴ ساعت غوطه ور در آب در دمای ۲۵ درجه قرار گرفتند. در این تحقیق جهت ایجاد عمل آوری سختگیرانه‌تر شرایط ذوب-یخبندان نیز برای مخلوط‌های کف قیری اجرا شد. این شرایط بدین ترتیب انجام گرفت که پس از عمل آوری خشک نمونه‌ها در ابتدا تا میزان تقریباً ۸۰ درصد اشباع شدند و سپس به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۱۸- درجه و سپس ۲۴ ساعت درون آب ۶۰ درجه قرار گرفتند. در ادامه آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، استحکام مارشال و مدول برجهندگی بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده خشک و آزمون مقاومت کشش غیر مستقیم بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده خشک، اشباع و ذوب-یخبندان انجام گرفت. لازم به توضیح است که تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه فنی و مکانیک وزارت راه و شهرسازی واقع در شهر تهران انجام شده است. در این تحقیق برای اولین بار یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی خرابی‌های رطوبتی در مخلوط‌های کف قیری با فیلر سیمان ارائه شد.

جهت افزایش تعداد مشاهدات و بالابردن دقت مدل ریاضی نمونه‌هایی با فیلر سیمان با نسبت ۲۰ درصد و با قیر ۳۰ و ۲۰ درصد نیز با استفاده از چکش مارشال ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع بر روی آنها انجام پذیرفت. در خاتمه تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود اباکوس مدل‌سازی سه بعدی از ساختار روسازی انجام می‌شود و در این مدل فرض می‌شود که لایه اساس به صورت تثبیت شده با کف قیر بوده و اثر مدول برجهندگی لایه اساس بر خرابی خستگی بررسی شد.

۱-۳ 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 [17]. در این پروژه از قیر ۶۰/۷۰ محصول پالایشگاه تهران استفاده شد و مشخصه‌های اصلی قیر مورد استفاده به شرح جدول ۱ می‌باشد.

Table 1. Base bitumen Properties

allowable	Result	Test
60-70	65	Penetration in 25°C(0.1 mm)
49-56	50.3	Softing point(°C)
Min 232	312	Degree of inflammation(°C)

(۱۳۸۵) (دانه‌بندی شماره ۴) و فناوری بازیافت سرد ویرتگن (۲۰۱۲) را برآورده کرد.

۳-۳ فیلر فعال

در این تحقیق از فیلرهای سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱، آهک و ترکیب سیمان و آهک به عنوان فیلر فعال مورد استفاده قرار گرفت و مقدار فیلر فعال اضافه شده در همه طرح‌ها یکسان در نظر گرفته شد. لازم به توضیح است که فیلرهای مذکور به مصالح خرده آسفالتی اضافه شدند (جایگزین فیلر موجود نشدند). با توجه به هدف اصلی تحقیق مبنی بر بررسی تاثیر فیلرهای مختلف و افزایش خواص مکانیکی مخلوط‌های کف قیری، مقدار فیلر فعال در همه طرح‌ها یکسان (۱/۵ درصد) در نظر گرفته شد. در این تحقیق برای اولین بار از فیلر ترکیبی سیمان و آهک استفاده گردید. جهت مقایسه و بررسی تغییر مقدار قیر و نوع فیلر نمونه بدون فیلر (N)، با ۱/۵ درصد سیمان (C)، با ۱/۵ درصد آهک (L) و با فیلر ترکیب سیمان و آهک به میزان ۰/۷۵ درصد (C+L) ساخته شد. مقدار فیلر در همه طرح‌ها یکسان و برابر با ۱/۵ درصد و در فیلر ترکیب سیمان و آهک، وزن هر فیلر ۰/۷۵ درصد در نظر گرفته شد. در این تحقیق جهت ارایه مدل ریاضی و افزایش تعداد مشاهدات جهت بالا بردن دقت مدل فیلر سیمان با درصدهای ۱/۵ و ۲ استفاده گردید.

۳-۴ تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق ابتدا با استفاده از آزمایش پروکتور استاندارد (AASHTO T180) رطوبت بهینه مصالح خرده آسفالت اندازه‌گیری گردید و ۸۵ درصد رطوبت بهینه مصالح خرده آسفالتی همراه با فیلرهای سیمان، آهک، ترکیب آنها با یکدیگر به مصالح خرده آسفالتی اضافه شدند و مصالح خرده آسفالت و فیلرها و آب با یکدیگر مخلوط شدند. سپس کف قیر (۱، ۲ و ۳ درصد وزنی مخلوط) به صورت اسپری به مصالح اضافه گردید و به مدت ۴۵ ثانیه عمل اختلاط ادامه پیدا کرد. از هر طرح ۳ نمونه ساخته شد و سپس میانگین آنها به عنوان نتیجه آزمون ثبت گردید.

۳-۲ مصالح سنگدانه‌ای

در این پروژه سنگدانه‌های مصرفی از تراشه‌های آسفالت باند ۲۹ راست فرودگاه بین‌المللی شهید دستغیب شیراز تهیه شدند. خرده آسفالت‌ها توسط دستگاه آسفالت‌تراش ساخت شرکت ویرتگن (W250) و تا عمق متوسط ۱۰ سانتیمتری تراشیده شده بودند (شکل ۱).

شکل ۱. محل استخراج مصالح سنگدانه‌ای خرده آسفالتی

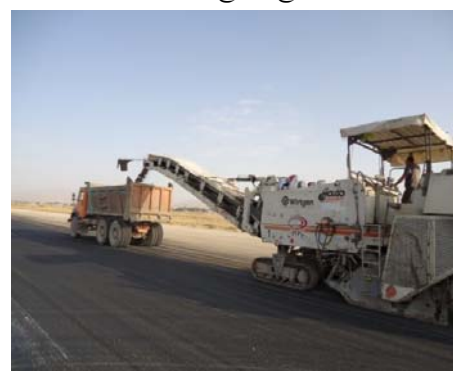


Fig. 1. The site of extraction of asphalt concrete gypsum aggregates

در این تحقیق حدوداً ۵۰۰ کیلوگرم مصالح خرده آسفالتی تهیه گردید. به دلیل عدم پوشش مناسب درشت‌دانه‌ها با کف قیر، دانه‌های درشت‌تر از ۱۹ میلی‌متر از مخلوط جدا گردید. در ابتدا دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی انجام و مصالح بر اساس اندازه الک‌ها تفکیک گردید. در راستای هدف اصلی تحقیق، جهت اصلاح دانه‌بندی از مصالح جدید و ماسه استفاده نگردید. معمولاً سنگدانه‌های حاصل از تراشه‌های آسفالت درشت دانه هستند و مقدار ریزدانه (کمتر از الک نمره ۴۰) آنها بسیار کم است، از طرفی دیگر مقدار ریزدانه در استقامت و دوام مخلوط کف قیر بسیار تعیین کننده و حائز اهمیت است زیرا که کف قیر نمی‌تواند درشت دانه‌ها را پوشش دهد و با ریزدانه سنگدانه‌ها تشکیل ماستیک می‌دهد که موجب به هم چسبیدن سنگدانه‌های درشت می‌شود [23,24]. بدین جهت حجم زیادی از مصالح سنگدانه‌ای الک گردید تا اینکه مقدار ریزدانه کافی تهیه گردد. منحنی دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش حدود پیشنهادی دو آئین‌نامه بازیافت سرد آسفالت ایران (نشریه ۳۳۵،

کشش غیرمستقیم اشباع به خشک تعریف می‌گردد. با توجه به اینکه جهت پیش‌بینی دقیق ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالت کف قیری و تعیین دقیق ضرایب رگرسیونی هر معادله به تعداد بیشتری مشاهده از متغیرهای وابسته مورد نیاز است، بنابراین نمونه‌های حاوی فیلر سیمان با درصد قیرهای ۱ و ۲ و ۳ درصد و با مقادیر سیمان ۱ و ۱/۵ و ۲ درصد ساخته شدند و جهت پیش‌بینی متغیر وابسته (نسبت TSR) آزمایش‌های مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت عمل‌آوری خشک و اشباع بروی آنها انجام گردید.

۴. نتایج تحقیق

۴-۱ استحکام مارشال

استحکام نمونه‌های ساخته شده به قطر ۱۰۰ میلیمتر با روش تراکم مارشال ۷۵ ضربه، در شرایط عمل‌آوری خشک اندازه‌گیری گردید و نتایج آن در شکل‌های ۲ نشان داده شده است. در این آزمون از فیلرهای سیمان، آهک و ترکیب سیمان با آهک با مقدار ۱/۵ درصد استفاده گردید.

شکل ۲. نتایج استحکام مارشال در شرایط عمل‌آوری خشک

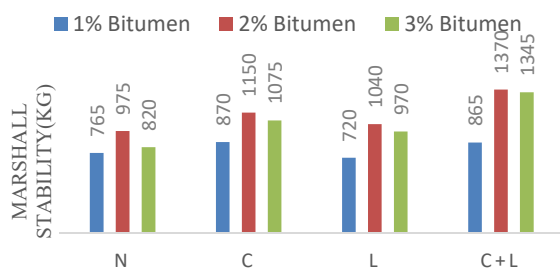


Fig. 2. Marshall Strength results

با توجه به شکل ۲ 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 کاهش پیدا می‌کند. این روند دقیقاً مطابق با تحقیقات گذشته است. تحقیقات ایوانسکی و همکاران (۲۰۱۶) نشان می‌دهد که منحنی تغییرات استحکام مارشال در برابر تغییر قیر زنگوله‌ای است و در قیر ۲ درصد و سیمان ۱/۵ درصد استحکام مارشال ۱۰۰۰ کیلوگرم بدست آمده است [25]. در قیر ۱ درصد به دلیل نبود چسبندگی مناسب بین سنگدانه‌ها در اثر عدم وجود قیر کافی در مخلوط، مقاومت در حالت خشک به شدت کاهش

خلاصه نام آزمایش‌ها استفاده شده به همراه متغیرهای هر آزمایش در این پژوهش به شرح جدول ۳ است.

جدول ۳. خلاصه آزمایش‌های بررسی ویژگی‌های مکانیکی و با تراکم مارشال

name of the experiment	variables	the required number of samples (three samples from each design)
Marshall stability	amount of bitumen (1, 2 and 3) filler: cement, lime and composition curing: dry	36
Resilient Modulus	amount of bitumen ((1, 2 and 3) filler: cement, lime and composition curing: dry	36
Indirect tensile strength	amount of bitumen ((1, 2 and 3) filler: cement, lime and composition curing: dry, Saturation And Melting-freezing	108
Uniaxial compressive strength	amount of bitumen ((1, 2 and 3) filler: cement, lime and composition curing: dry	36

Table 3. Summary of Mechanical Properties and Marshall Density Tests

۳-۵ مدل ریاضی

به‌طور کلی در این تحقیق یک تابع ریاضی ارایه می‌شود که رابطه بین متغیرهای مستقل (X) و وابسته (Y) را بیان می‌کند. در روش رگرسیون، دو فرض H_0 و H_1 به شکل رابطه (۲) تعریف می‌شود. 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.

$$\begin{cases} H_0 : R = 0 \\ H_1 : R \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

در این پژوهش، جهت ارایه مدل ریاضی از متغیرهای درصد سیمان و کف قیر به عنوان متغیر مستقل و نسبت TSR به عنوان متغیر وابسته استفاده گردید. نسبت TSR به صورت نسبت مقاوت

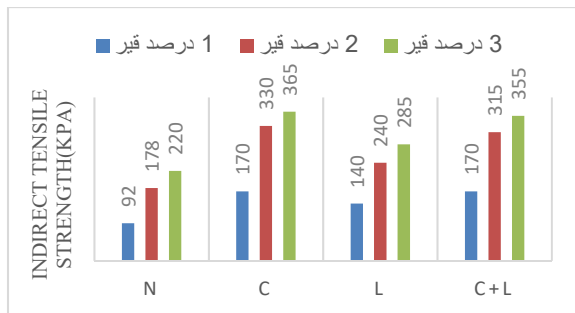


Fig. 4. Indirect tensile strength (Saturation)

شکل ۵. مقاومت کشش غیرمستقیم ذوب-یخبندان

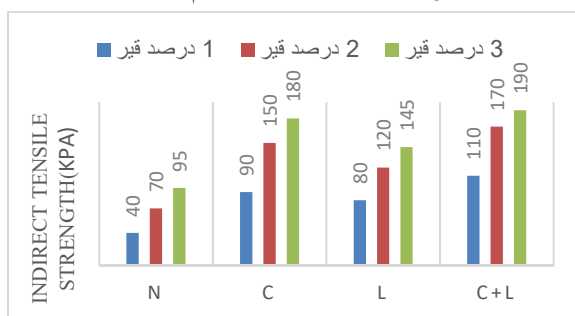


Fig. 5. Indirect tensile strength (Melting-freezing)

نشریه ۳۳۹ حداقل مقاومت کشش غیرمستقیم خشک را در شرایط ترافیک سنگین ۳۰۰ کیلو پاسکال اعلام می‌دارد [27]. با توجه به شکل ۳ نمونه‌های بدون فیلر با قیر ۱ و ۲ درصد و دیگر طرح‌ها در قیر ۱ درصد نمی‌توانند معیار فوق را برآورده نمایند. بنابراین وجود قیر ناکافی (۱ درصد) به شدت دوام این نوع از مخلوط‌ها را پایین می‌آورد. نتیجه دیگری که می‌توان گرفت این است که فیلرهای سیمان، آهک و ترکیب آهک با سیمان می‌توانند کمبود قیر را در مخلوط کف قیر جبران کنند. با توجه به ماهیت این آزمون چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها بیشترین نقش را در مقاومت نمونه‌ها تحت بارگذاری کشش غیرمستقیم دارد. مطابق با نتایج این تحقیق فیلرهای فعال نظیر سیمان و آهک با انجام واکنش هیدراتاسیون در حضور رطوبت سنگدانه‌ها موجب افزایش چسبندگی بین اجزا مخلوط می‌شوند و مقاومت نمونه را افزایش می‌دهند. بنابراین طبیعی است که فیلرهای فعال بیشترین تاثیر را در این آزمون بر نمونه‌های کف قیری داشته باشند. بیشترین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت عمل‌آوری خشک در نمونه با فیلر سیمان و قیر ۳ درصد برابر با ۵۰۰ کیلو پاسکال و در حالت عمل‌آوری اشباع در نمونه با فیلر سیمان و قیر ۳ درصد برابر با

می‌یابد و مقدار کمی دارد. در شرایط عمل‌آوری خشک بیشترین مقاومت در طرح C+L با قیر ۲ درصد و برابر با ۱۳۷۰ کیلوگرم بدست آمد و کمترین مقدار آن در نمونه بدون فیلر با قیر ۱ درصد برابر با ۷۶۵ کیلوگرم بدست آمد. بنابراین بیشترین فیلر ترکیب سیمان و آهک بیشترین تاثیر را در افزایش مقاومت دارد. با توجه به اینکه در آزمایش استحکام مارشال نمونه در اثر اعمال بار فشاری و تنش برشی تغییر شکل پلاستیک می‌دهد، فیلر سیمان و آهک بدلیل انجام واکنش با آب موجود در خرده آسفالت پیوند بین قیر و سنگدانه‌ها بیشتر کرده و موجب افزایش پوشش قیری روی سنگدانه‌ها می‌شود.

۲-۴ مقاومت کشش غیرمستقیم

آزمایش کششی غیرمستقیم روش مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی و ارزیابی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین از این آزمایش برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیز استفاده می‌شود [26]. این آزمایش بروی نمونه‌های با عمل‌آوری خشک، اشباع و ذوب-یخبندان انجام شد. در شکل ۳، ۴ و ۵ نتایج انجام آزمایش کشش غیرمستقیم در حالت‌های مختلف عمل‌آوری نشان داده شده است. در این آزمون از فیلرهای سیمان، آهک و ترکیب سیمان با آهک با مقدار ۱/۵ درصد استفاده گردید.

شکل ۳. مقاومت کشش غیرمستقیم خشک

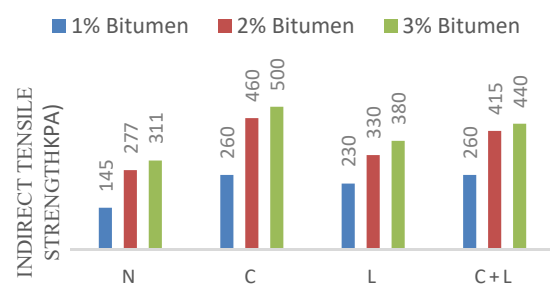


Fig. 3. Indirect tensile strength (dry)

شکل ۴. مقاومت کشش غیرمستقیم اشباع

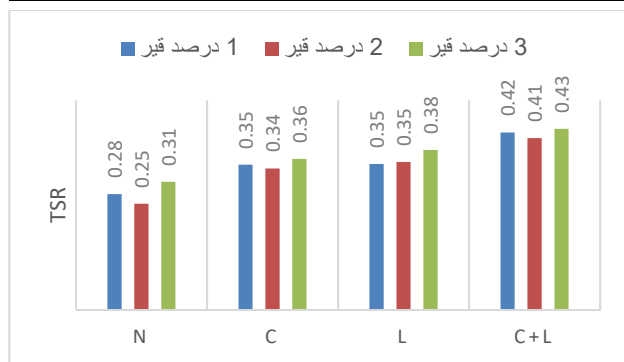


Fig. 7. TSR Ratio (Melting-freezing)

مطابق بند ۴-۹ آئین نامهٔ بازیافت سرد آسفات ایران (نشریه ۳۳۹) نسبت TSR_{sat} مناسب برای مناطق مرطوب و با زهکشی ضعیف مطابق معادلهٔ برابر حداقل ۰/۷۵ است [27]. با توجه به شکل ۶ نمونه بدون فیلر نمی‌تواند معیار فوق را برآورده نماید. با توجه به شکل ۶ و ۷ فیلر ترکیب سیمان با آهک بهترین عملکرد را در افزایش نسبت TSR در عمل آوری اشباع و ذوب-یخبندان دارد و بهتر توانسته در شرایط عمل آوری اشباع و ذوب-یخبندان پیوند بین سنگدانه‌ها را حفظ نماید.

۳-۴ مدول بر جھندگی

مدول برجهندگی که طبق استاندارد ASTM D4123 با روش کشش غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود، یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین نمودار تنش-کرنش جهت ارزیابی ویژگی‌های الاستیک مخلوطهای آسفالتی است [28]. در این تحقیق مدول برجهندگی نمونه‌های ساخته شده در شرایط عمل‌آوری خشک در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد اندازه‌گیری گردید که نتایج آن به شرح شکل ۸ است.

شکل ۸. مدول ب جهندگی در شرایط خشک

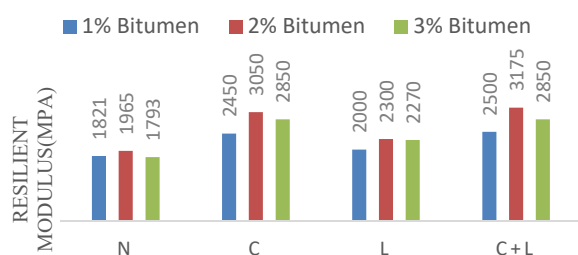


Fig. 8. Resilient Modulus (dry)

۳۶۵ کیلوپاسکال و در حالت ذوب-یخبندان در نمونه با فیلر سیمان و آهک در قیر ۳ درصد برابر با ۱۹۰ کیلو پاسکال بدست آمد. در همه طرح‌ها و در تمامی شرایط عمل‌آوری مقاومت کشش غیرمستقیم در قیر ۳ درصد بیشینه و در قیر ۱ درصد کمترین مقدار را دارد. انسجام مخلوط‌های آسفالتی در اثر چسبندگی مصالح سنگی و قیر معنی پیدا می‌کند. جدا شدن مصالح سنگی از سطح رویه آسفالتی را عریان شدگی مصالح سنگی می‌نامند که در این عمل پیوند بین مصالح سنگی و قیر به وسیله رطوبت شکسته می‌شود. خرابی‌های رطوبتی خود یک خرابی محسوب شده و می‌تواند زمینه ساز دیگر گردد. مقاومت نمونه‌های آسفالتی در برابر خرابی‌های رطوبتی با نسبت TSR می‌سنجند و این نسبت به صورت حاصل تقسیم مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت در حضور رطوبت به خشک تعریف می‌گردد. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مقاومت نمونه در برابر رطوبت بیشتر است. در این تحقیق با توجه به اینکه دو روش عمل‌آوری انجام گردید (اشباع و ذوب-یخبندان) برای هر کدام به صورت جداگانه مطابق با روابط (۱) و (۲) نسبت TSR محاسبه و در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

$$TSR_{sat} = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \quad (1)$$

$$TSR_{cold} = \frac{ITS_{cold}}{ITS_{drv}} \quad (2)$$

ITS_{dry} : مقاومت کشش غیر مستقیم با شرایط عمل آوری خشک
 ITS_{wet} : مقاومت کشش غیر مستقیم با شرایط عمل آوری اشباع
 ITS_{cold} : مقاومت کشش غیر مستقیم با شرایط عمل آوری
 ذوب - یخندان

شکل ۶. نسبت TSR در حالت اشیاء به خشک

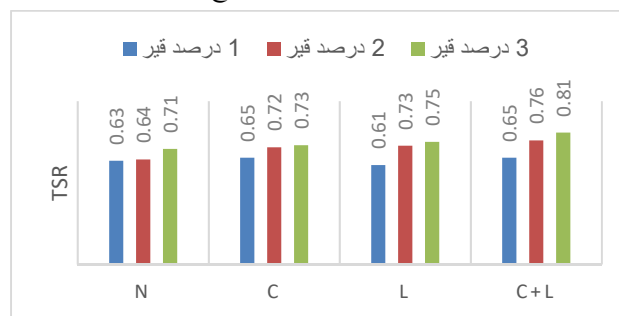


Fig. 6. TSR Ratio (Saturation)

شکل ۷. نسبت TSR در حالت ذوب-یخندان به خشک

نمونه‌های با فیلر سیمان، آهک و ترکیب سیمان با آهک این ضابطه را ارضا می‌نماید. همچنین با افزایش مقدار قیر از ۱ درصد تا ۳ درصد در ابتدا مقاومت فشاری را افزایش و سپس کاهش می‌دهد. فیلر سیمان بیشتر تاثیر را در افزایش فشاری داشته و بیشترین مقدار مقاومت فشاری در نمونه با فیلر سیمان و قیر ۲ درصد برابر ۱۹۹۵ کیلوپاسکال بدست آمد.

۴-۵ مدل ریاضی

در این تحقیق مقادیر نسبت TSR به عنوان متغیر وابسته و درصد سیمان و درصد کف قیر به عنوان متغیر مستقل انتخاب گردید. پر واضح است که متغیرهای درصد سیمان و درصد قیر در این تعریف روی یکدیگر تاثیر نمی‌گذارند. مقادیر متغیر مستقل مطابق با جدول ۴ انتخاب گردید.

جدول ۴. خلاصه آمارهای توصیفی متغیرهای مستقل

factor	amount	unit	average	Min	Max
cement	1, 1.5, 2	%	1.125	0	2
foam bituminous	1, 2, 3	%	2	1	3

Table 4. Summary of descriptive statistics of independent variables

جهت بررسی نرمال بودن نمونه‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک استفاده شد (جدول ۵). با توجه به جدول ۵ مشخص گردید که متغیر وابسته دارای توزیع نرمال است. پس از انجام تحلیل بر روی نتایج آزمایشگاهی نسبت TSR، مدل ریاضی بر حسب درصد قیر و سیمان با استفاده از نرم‌افزار STATISCA VER 12 محاسبه و مقادیر ضریب همبستگی، خطای استاندارد با سطح اطمینان ۹۵٪ و نیز آنالیز واریانس برای مدل ارایه شده در جدول ۶ و ۷ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۰ تغییرات نسبت TSR بر حسب تغییر مقدار سیمان و کف قیر نشان داده شده است.

جدول ۵. خلاصه آمارهای توصیفی متغیرهای مورد استفاده در مدل سازی

Variable	sample	Min	Max	kurtosis	skewness	test K-S	Shapiro-Wilk test
----------	--------	-----	-----	----------	----------	----------	-------------------

نتایج آزمایشها نشان می‌دهد 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 می‌یابد که بیشترین مقدار آن در تمامی طرح‌ها در قیر ۲ درصد حاصل می‌گردد. بیشترین مدول برجهندگی در حالت عمل‌آوری خشک در نمونه با فیلر سیمان و آهک و در قیر ۲ درصد برابر با ۳۱۷۵ مگاپاسکال و کمترین مقدار آن در نمونه بدون فیلر با قیر ۱ درصد برابر با ۱۸۲۱ مگاپاسکال بدست آمد. مدول برجهندگی مخلوط‌های کف قیری اصلاح شده در حالت خشک بایستی بین ۲۵۰۰ الی ۴۰۰۰ مگا پاسکال باشد [29]. در نمونه بدون فیلر و با فیلر آهک مدول برجهندگی هیچگاه به ۲۵۰۰ مگاپاسکال نمی‌رسد، اما در نمونه با فیلر سیمان و ترکیب سیمان و آهک در همه درصدهای قیر این معیار برآورده می‌شود.

۴-۶ مقاومت فشاری تک محوری

در این روش آزمایش، مقاومت نمونه استوانه ای مخلوط آسفالتی در حالتی که سطح رویه نمونه تحت بارگذاری قرار گرفته، اندازه گیری می‌شود. این آزمون با سرعت ۱۴۰ کیلو پاسکال بر ثانیه در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و تا شکست نمونه ادامه پیدا می‌کند. نتایج این آزمون در شکل ۹ نشان داده شده است.

شکل ۹. مقاومت فشاری تک محوری

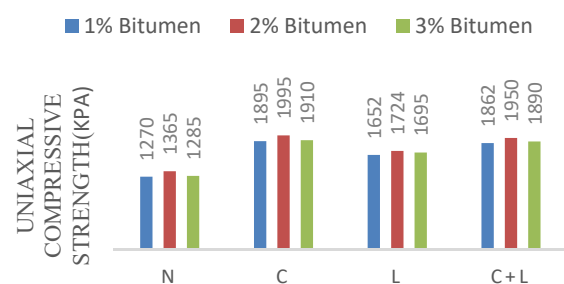


Fig. 9. Uniaxial Compressive Strength

مطابق با نشریه ۳۳۹ مقدار مقاومت فشاری در حالت ترافیک سنگین باید بین ۱۴۰۰ تا ۲۰۰۰ کیلوپاسکال باشد [27]. با توجه به شکل ۹ نمونه بدون فیلر نمی‌تواند این معیار را برآورده نماید ولی

TSR RATIO	12	0/63	0/76	-1/157	-0/093	0.2	0/751
-----------	----	------	------	--------	--------	-----	-------

Table 5. Summary of descriptive statistics of variables used in modeling

نتایج حاصل از مدل پیشنهادی و نتایج واقعی فاصله کمی وجود دارد.

۶-۴ مدل‌سازی اجزا محدود و نقش لایه اساس کف قیری در تعداد تکرار بار منجر به خرابی خستگی

در این قسمت مدل‌سازی مربوط به سازه روسازی انجام می‌گیرد و فرض می‌شود که لایه رویه از جنس مخلوط آسفالتی داغ با ویژگی‌های ویسکوالاستیک، لایه اساس آن مخلوط کف قیری با خاصیت الاستیک و لایه زیراساس با مشخصات الاستیک باشد. مدل ساخته شده در نرم‌افزار اباکوس به طول ۵ و عرض ۱/۵ متر که ضخامت لایه رویه ۱۰ سانتیمتر و ضخامت لایه اساس ۳۰ سانتیمتر و ضخامت لایه زیراساس نامحدود فرض شده است. مشخصات هر کدام از لایه‌ها در جدول (۸) نشان داده شده است.

جدول ۸. مشخصات لایه‌های مدل

Thickness (cm)	Coefficient poisson	Module of elastisite (Mpa)	materials
unlimited	0.45	43	subgrade
30	0.35	Var(1965, 2300, 3050, 3175)	base
10	0.35	9840	Asphalt layer

Table 8. Specification of Model Layers

جدول ۹. مشخصات ویسکوالاستیک لایه آسفالت

g_i	τ
6.31	0.0206
0.215	0.173
0.0847	1.29
0.0267	5.35
0.0066	106

بارگذاری وارد بر مدل بصورت یک دایره با شدت تنش یکنواخت در نظر گرفته شد و زمان انجام تحلیل یک ثانیه تعیین گردید. المان‌های لایه رویه و اساس سه بعدی و از نوع C3D8 و المان لایه بستر نا محدود در نظر گرفته شد. تماس بین همه لایه‌ها از نوع تماس بدون لغزش کاملاً بهم چسبیده (Tie) فرض گردید. جهت تحلیل مدل از روش حل استاتیک و حلگر استاتیک، جنرال اسفاده شد. در شکل ۱۱ مدل تحلیل شده توسط نرم‌افزار که تغییر مکان عمودی را در مدل نشان می‌دهد، نمایش داده شده است. در این تحقیق برای ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی و معتبرسازی آنها از

جدول ۶. آنالیز رگرسیون مدل

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Durbin-Watson
Linear	0.962	0.926	0.910	1.201

Table 6. Analysis regression model

جدول ۷. آنالیز واریانس مدل

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Regression	0.017	2	0.009	56	0.00
Residual	0.001	9	0.00		
Total	0.019	11			

Table 7. Analysis of variance model

شکل ۱۰. منحنی سه بعدی تغییرات TSR در برابر مقدار قیر و سیمان

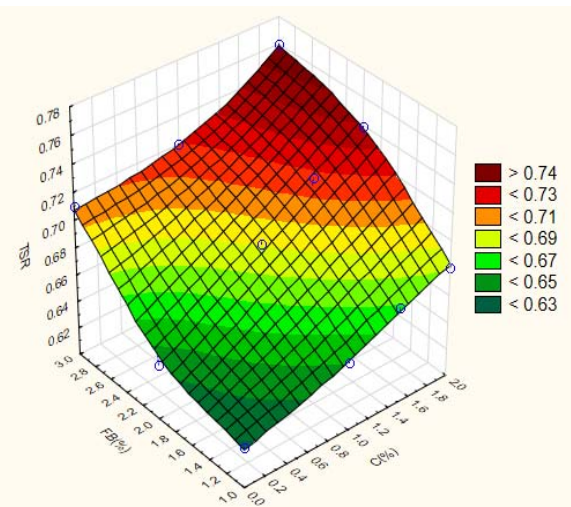


Fig. 10. Three-dimensional curve of TSR versus bitumen and cement content

$$TSR = 0/583 + 0/033 \times C + 0/036 \times FB \quad (3)$$

با توجه به نتایج تحلیل در جدول ۷ 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 ۶ و ضریب تعیین مدل ارایه شده، می‌توان گفت که بین

دایره) و در پایین‌ترین المان در لایه آسفالتی رویه بدست آمده است.

جدول ۱۱. کرنش کششی زیر لایه رویه و تعداد تکرار بار منجر به خرابی خستگی با تغییر مدول لایه اساس

repetitions to fatigue failure	tensile strain	Resilient Modulus-subgrade
8/6425E14	2/6783E-5	1965
2/314E15	2/1131E-5	2300
8/3544E15	1/5079E-5	3050
3/3418E16	1/0615E-5	3175

Table 11. Tensile strain under the Asphalt layer and the number of repeat loads resulted in failure by changing the base modulus

با توجه به جدول ۸ با افزایش مدول برجهندگی مقدار کرنش کششی در زیر لایه رویه به شدت کاهش می‌یابد. در شکل ۸ تغییرات تعداد تکرار بار منجر به خرابی خستگی بر حسب مدول برجهندگی لایه اساس نشان داده شده است.

شکل ۱۲. تغییرات تعداد تکرار بار منجر به خرابی خستگی بر حسب مدول برجهندگی لایه اساس

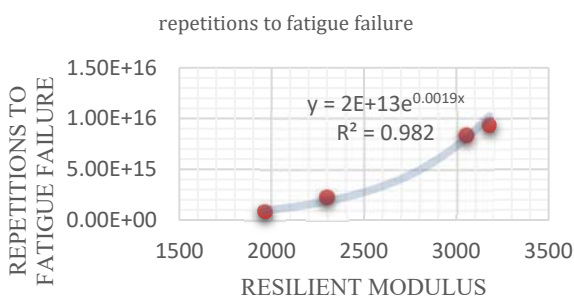


Fig. 12. Changes in the number of repetitions of load leads to fatigue failure in terms of the Resilient Modulus-subgrade

با توجه به شکل ۱۲ با افزایش مدول برجهندگی، تعداد تکرار منجر به خستگی افزایش می‌یابد. نتایج این تحلیل نشان داد که با افزایش مدول لایه اساس از ۲۰۰۰ مگاپاسکال به بالا، تعداد تکرار بار با شیب بسیار زیاد افزایش می‌یابد. این موضوع از این نظر حائز اهمیت است که افزایش مدول برجهندگی لایه اساس موجب سخت‌تر شدن سازه روسازی شده و تغییر شکلها و

نرم‌افزار Kenlayer استفاده گردید. نرم افزار اباکوس با استفاده از روش اجزا محدود نتایج دقیقتری نسبت به دیگر نرم افزارهای رایج دارد. با نتایج حاصل از مدل‌سازی و معتبرسازی با نرم‌افزار Kenlayer به شرح جدول ۷ است.

شکل ۱۱. نمایش تغییر شکل عمودی در مدل ساخته شده با نرم‌افزار اباکوس

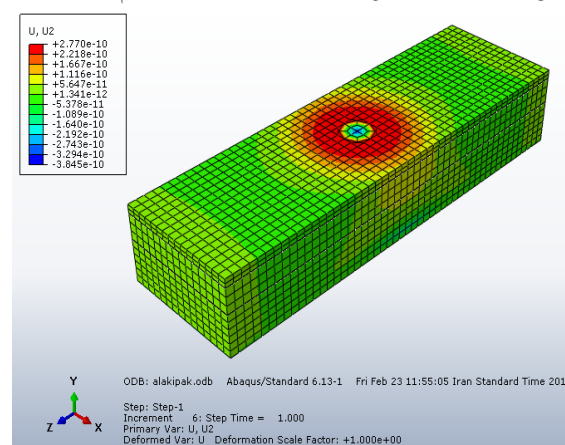


Fig. 11. Vertical deformation in the model made with ABAQUS software

جدول ۱۰. مقایسه نتایج پاسخ روسازی در روش اجزا محدود اباکوس و

Kenlayer				
percentage error	Kenlayer software	ABAQUS software	position	response
3	0.000141	0.0001371	Center load	tensile strain (cross) (LE11)
0.4	2076	2084	Center load	tensile strain
6	0.0001586	0.0001491	Center load	Vertical strain (LE22)

Table 10. Comparison of pavement response results in finite element method of ABAQUS and Kenlayer

با توجه به جدول ۱۰ نتایج روش مدل‌سازی با نرم‌افزار Kenlayer کمتر از ۶ درصد اختلاف دارند، بنابراین می‌توان مدل ساخته شده در نرم‌افزار اباکوس را معتبر در نظر گرفت و در ادامه تحلیل از آن استفاده کرد. مدول برجهندگی بر اساس برای بررسی خرابی خستگی بر مبنای روابط مکانیستیک-تجربی نیاز به کرنش کششی در زیر لایه رویه است. در جدول ۱۱ نتایج حاصل از تحلیل مدل بر اساس تغییر مدول برجهندگی لایه اساس (بر مبنای آزمایش مدول برجهندگی) نمایش داده شده است. در این بخش مقدار کرنش درست در مرکز اعمال بار (مرز

در نمونه‌های با فیلر سیمان، آهک و ترکیب آهک با سیمان این معیار در قیر ۳ و ۲ درصد برآورده می‌گردد.

نتایج آزمون مقاومت کشش غیرمستقیم نشان می‌دهد که با افزایش قیر از ۱ درصد به ۳ درصد در همه طرح‌ها مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت عمل‌آوری خشک، اشباع و ذوب-یخبندان به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. همچنین فیلر ترکیب سیمان با آهک بیشترین تاثیر را در افزایش نسبت TSR داشتند.

با توجه به اینکه مخلوط کف قیری بیشتر در لایه اساس کاربرد دارد، در روش طراحی روسازی آشتو مدول برجهنگی لایه اساس تثبیت شده نقش تعیین کننده‌ای در ضریب قشر آن لایه و کاهش ضخامت اساس دارد. نتایج آزمون مدول برجهنگی نشان می‌دهد که با افزایش قیر از ۱ به ۲ درصد مدول برجهنگی در ابتدا افزایش و سپس با افزایش قیر از ۲ درصد به ۳ درصد مدول برجهنگی کاهش می‌یابد. همچنین فیلر ترکیب آهک با سیمان بیشتر تاثیر را در افزایش مدول برجهنگی دارد و در نمونه با قیر ۲ درصد مدول برجهنگی را ۹۳ درصد افزایش داد. نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری نشان داد که با افزایش مقدار قیر در ابتدا مقاومت فشاری افزایش و سپس کاهش می‌یابد و فیلر سیمان بیشترین افزایش را در مقاومت فشاری نسبت به دیگر نمونه‌ها دارد.

چبا توجه به نتایج آزمایشگاهی این تحقیق مخلوط‌های بازیافتی کف قیری به کمبود قیر بسیار حساس هستند و کاهش مقدار قیر دوام این نوع مخلوط‌ها را بسیار کاهش می‌دهد. نشریه ۳۳۹ برای انواع شرایط محیطی و ترافیک معیارهای مختلفی را ارائه کرده که می‌توان جهت انتخاب یک طرح اقتصادی مقدار قیر مورد نظر را بدست آورد. اما با توجه به روند آزمون‌های استحکام مارشال، مدول برجهنگی و مقاومت فشاری مقدار قیر ۲ درصد انتخاب مناسبی به نظر می‌رسد.

در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمون مقاومت کشش غیرمستقیم خشک و اشباع یک رابطه ریاضی (معادله درجه اول) با استفاده از تکنیک رگرسیون خطی چند متغیره برای پیش‌بینی هر یک از نتایج آزمایش‌های فوق با دقت مناسب ارائه گردید.

طبعاً کرنش‌ها را کاهش می‌دهد. از این رو بر خرابی خستگی تاثیرگذار است و در اثر کاهش مدول برجهنگی خرابی خستگی در روسازی سریعتر اتفاق می‌افتد.

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق مصالح خرده آسفالت تراشیده شده از سطح باند فرودگاه بین‌المللی شهید آیت الله دستغیب شیراز تهیه گردید و تفکیک و دانه‌بندی آنها انجام شد. در این پژوهش جهت بررسی تاثیر فیلر فعال به مصالح فیلرهای سیمان، آهک و ترکیب سیمان با آهک اضافه گردید. مصالح خرده آسفالتی سرد در دمای محیط با کف قیر مخلوط شدند و نمونه‌ها به سه روش مختلف عمل‌آوری (خشک، اشباع و ذوب-یخبندان) شدند. نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش‌های استحکام مارشال، مقاومت کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی و مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند. سپس با استفاده از نتایج آزمایش‌های مقاومت کشش غیرمستقیم در حالت خشک و اشباع یک مدل ریاضی برای بررسی خرابی‌های رطوبتی مخلوط‌های کف قیری با استفاده از روش رگرسیون خطی چند متغیره ارائه گردید. در خاتمه با استفاده از نتایج مدول برجهنگی مدل سه بعدی اجزا محدود یک ساختار روسازی ایجاد شد و اثر مدول برجهنگی لایه اساس بر تعداد تکرار بار منجر به خرابی خستگی بررسی گردید. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

با توجه به نتایج آزمایش استحکام مارشال، در کلیه طرح‌ها با افزایش قیر از ۱ درصد به ۲ درصد استحکام مارشال افزایش سپس با افزایش قیر از ۲ درصد به ۳ درصد کاهش می‌یابد. در این آزمون فیلر ترکیب آهک با سیمان در قیاس با دیگر فیلرها بیشترین تاثیر را داشته است این موضوع بیانگر این مطلب است که قفل و بست بین سنگدانه‌ها در این نوع مخلوط به خوبی برقرار گردیده است.

نشریه ۳۳۹ حداقل مقاومت کشش غیرمستقیم خشک را در شرایط ترافیک سنگین ۳۰۰ کیلو پاسکال بیان می‌کند. نمونه ساخته شده بدون فیلر در قیر ۲ و ۳ درصد نمی‌تواند این معیار را برآورده سازد و فقط در قیر ۳ درصد این معیار ارضا می‌شود.

منابع

- Asphalt pavements, The 15th National Students Conference in Urumia"(In Persian)".
- [11] Zhigang, L., Peiwen, H., Hongying, L., Jinzhi, X., Zhijun, C. 2016 Investigation of Early-Stage strength for cold recycled asphalt mixture using foamed asphalt", Construction and Building Materials, 127, 410-417
- [12] Yazdan Dust, M. And Yazdani, M. 1394 Investigating the Interaction of Microsilicon Weights, Softness Modulus of Aggregates and Water to Cement Ratio on the Physical and Mechanical Parameters of Concrete, Journal of Omran Modares, 4, 195-183"(In Persian)".
- [13] Jenkins, K. J.; Molenaar, A. A. A.; de Groot, J. L. A.; Van de Ven, M. F. C 2000 Optimisation and Application of Foamed Bitumen in Road Building, Wegbouwkundige Werkdagen, Doorwerth, Netherlands
- [14] Ping, H. 2006 Study the Use of Reclaimed Asphalt Pavement(RAP) with Foamed Bitumen in HONK KONG, Hong kong Polu Technic University, Hong kong
- [15] Kijialiu and Ling,B. 2017 Study on Mixture Ratio Design Method of AC-20C Modified Foamed Asphalt Mixture, 6th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, Zhuhai, China
- [16] Dong, L., Yu, X., Liang, X. and Ding, G. 2017 Influence of foaming water and aging process on the properties of foamed asphalt, Construction and Building Materials, 153, 866–874
- [17] Transportation Research Board 2015 Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 807
- [18] 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, 93, 241-248
- [19] Yin, F., Arambula-Mercado, E. and Newcomb, D. 2016 Mix Design Procedure for Foamed Asphalt Mixtures", Road Materials and Pavement Design, 17, 946-957
- [20] Yusuf Dust, S., Farzaneh, A., Esmaeili, A., Ahmadi, A. 2011 Laboratory study of modulus of resistivity, indirect resistance and compressive strength of single axial segments of recycled asphalt using bitumen floor, Journal
- [1] Kavousi, A. And Hashemian, L. 2010 Evaluation of Specifications of Hot Asphalt Mixtures of Bitumen Bitumen Made with Two Types of Bitumen (WMA-FOAM), Journal of Transportation Engineering, 1(3), 12-1"(In Persian)"
- [2] Diwandari, H., Ziyari, H., Shafabakhsh, Gh. And Fakhri, M. 2013 Presenting a Model for Estimating the Asphalt Psychological Number Using Shear Stress Curve and Gyration Concentration Slope, Journal of Transportation, 10(2), 171-191"(In Persian)".
- [3] Hashemian, L. and Kavousi, A. 2007 Methods for mixing and studying the behavior of bituminous mortar mixtures, Modares Technical Civil and Engineering Magazine, 33, 12-1"(In Persian)".
- [4] Modares, A., and Kavousi, A. 2016 A model for estimating the resonance modulus of asphalt mixtures recovered with bitumen emulsion and cement, Transport Engineering, 2, 688-679"(In Persian)".
- [5] Divandari, H., Modares, A., Hosseini Aliabadi, M., Rostami Ankas, M. 2015 Presentation of Asphalt Mixture Growth Model Using Indirect Tensile Strength Test and Marshall Strength Test Results, Transport Engineering Engineering, 1(2), 54-41"(In Persian)".
- [6] Kuna, K., Airey, G., Thom, N. 2016 Mix Design Considerations of Foamed Bitumen Mixture with Reclaimed Asphalt Pavement Material, International Journal of Pavement Engineering, 18, 902-915
- [7] Jinzhi, X., Peiwen, H. 2014 The Influence of Material Related Parameters on the Mechanical properties of Foamed Asphalt Mix, Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 3, 119-125
- [8] 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, 433-442
- [9] Wirtgen Group. 2012 Wirtgen Cold Recycling Technology, Wirtgen GmbH, Germany
- [10] Kavousi, A., Karizik, A., Solatiefar, N., Ghazizadeh, M. 2014 Technical, Economic, and Environmental Assessment of Cold-Fired

- groove depth in rubber asphalt mixtures with finite element modeling results, *Journal of Transportation Engineering*, 8(4), 435-450 (In Persian)".
- [25] Iwański, M., Buczynski, P. and Mazurek, G. 2016 The Use of Gabbro Dust in the Cold Recycling of Asphalt Paving Mixes with Foamed Bitumen, *Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences, Technical Sciences*, 64(4), 763-773
- [26] Keymansh, M., Ziari, H., Nasrallah Tabar, A., Shahriari, N. 2017 Potential Analysis of Microstructural Parameters and Indirect Tensile Strength in Evaluation of the Growth Performance of Hot Asphalt Mixtures, *Transport Infrastructure Engineering*, 3(1), 82-69 (In Persian)".
- of Civil Engineering and Surveying, Tehran Faculty of Engineering, 45(7), 803-825 (In Persian)".
- [21] Khosravifar, S. and Schwarts, C. 2013 Design and Evaluation of Foamed Asphalt Base Materials, Project Number SP909B4E, University of Maryland, USA (In Persian)".
- [22] Zhou, F., Scullion, T. and Sun, L. 2004 Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes", *Journal of Transportation Engineering*, 130(4), 486- 494
- [23] Taherkhani H and Ebrahimi Moghaddam, A. 2012 Prediction of fatigue life of asphalt mixtures using neural networks, *Transport Engineering*, 4(1) 45-58 (In Persian)".
- [24] Arabani, M., Bakhshi, B. And Shirini, b. 2017 Evaluation of laboratory results for
- [27] Deputy Head of Presidential Strategic Planning and Controlling 2006 Technical specifications for cold asphalt recycling, 339, Ministry of Roads and Urban Development, Deputy Director of Education, Research and Information Technology (In Persian)".
- [28] Eliasy M., Bagheri M., Gilanchi M. 2012 The Effect of Cement on Reducing the Sensitivity of Hot Asphalt Mixture to Humidity, *Transport Engineering*, 4(1), 10-1 (In Persian)".
- [29] Chomicz-Kowalska, A., Iwanski, M. and Mrugala, J. 2017 Basic enformance of Fibre Reinforced Asphalt Concrete with Reclaimed Asphalt Pavement Produced in Low Temperatures with Foamed Bitumen, *Materials Science and Engineering*, 245, 1-9

Evaluations of the role of cement and lime filler on the mechanical properties of foam bituminous recycled mixtures and the presentation of a mathematical model

1-S.F. faezi, Department of civil engineering, payame noor university

2 - M. Mirshekarian babaki, payame noor university (PNU), P.O.BOX.19395-3697. Tehran, Iran.

F.faezi@pnu.ac.ir

Abstract

Recycled asphalt chips after shaving are considered to be a waste material that has an adverse environmental impact on the environment. On the other hand, the heavy cost of constructing new ways and damages caused by the destruction of existing roads will cause many problems. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of mixed bitumen with filler change on mechanical and functional properties of asphalt foam mixtures of recycled materials. Research method is field study. All experiments were carried out at the Technical and Mechanical Laboratory of the Ministry of Construction in Tehran. In this project, aggregates consumed from asphalt tracks of the 29th straight Shahid Dastgheib International Airport in Shiraz were prepared. The bitumen used in this research was selected as bitumen from Tehran refinery in Tehran. Also, Portland cement fillers of type 425-1, lime and cement and lime mixture as active filler were used and the amount of active filler added in all designs was considered the same. Samples were made by adding cement fillers, lime with different bitumen content and under dry and saturated treatment conditions. Samples were made with filler cement (1.5%), lime (1.5%) and cement, lime (0.75% and 0.75%) and a control sample. Then, the experiments were performed on the modulus of resilience, the strength of the marshall and the indirect pull resistance. To increase the number of observations and increase the accuracy of the mathematical model, samples with cement filler with a ratio of 1 and 2 percent with bitumen 1, 2 and 3 were constructed using Marshall Hammer. Marshall Strength tests, modulus of resistivity and indirect pull resistance were carried out in dry and saturated conditions. Using the results of the modulus of resilience test, the finite element modeling was performed using ABAQUS and KenLayer software, and the effect of changing the modulus on the number of load repetitions that resulted in fatigue failure was evaluated. Finally, a mathematical model was presented. The results of this study, using SPSS and Statistica software, show that in Marshall's strength test, in all plans, increasing the bitumen from 1 to 2 percent, the Marshall Strength increases and then decreases with increasing bitumen by 2 to 3 percent. Marshall Strength ratio (obtained by dividing the Marshall strength of saturated samples to the Marshall strength of dry specimens) revealed that these types of mixtures are sensitive to moisture conditions and at best (2% bitumen and with cement lime filler) this amount reaches 0.46. Also, results of indirect resistance test show that, with increasing bitumen from 1 to 3%, in all designs, indirect resistance is increased during drying, saturation is continuously increased. The cement filler with lime in all treatment modes has the greatest effect on increasing the indirect pull resistance, and the effect of increasing the strength of the filler-containing specimens is more than dry in terms of saturation processing. The results of three-dimensional modeling of Abacus showed that increasing the modulus of the base layer, the number of repetitions leads to fatigue failure greatly increases. Also, half-life parameters, expansion ratio and index of bitumen were measured and the parameters of these parameters were plotted against water percent.

Key words: foamed bitumen, asphalt, mathematical model, finite element