

ارزیابی اثر کاربرد فیلتر سیگار بر طرح اختلاط آسفالت به روش آزمایشگاهی و تحلیل سطح پاسخ

مهدی خباز مهرجردی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران،
دانشگاه یزد

محمد مهدی خبیری*، عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد
حامد خانی‌سانج، عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

Email: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۷ - پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰

چکیده

یکی از معضلات زیست‌محیطی ناشی از استعمال دخانیات، از جمله سیگار، دفع ته‌سیگارها در محیط‌زیست است که آلودگی خاک و اثرهای منفی بر رشد گیاهان، جانداران و پرندگان را به دنبال دارد. از طرفی، امروزه، با توجه به افزایش هزینه‌های اقتصادی و عدم دسترسی به مصالح طبیعی، استفاده مجدد از مواد زائد موجود در طبیعت در ساخت راه‌ها گسترش یافته است. بنابراین، در این پژوهش، به ارزیابی استفاده از فیلتر سیگار به عنوان افزودنی در آسفالت پرداخته شد. برای استفاده از فیلتر سیگار در آسفالت، به منظور جلوگیری از پخش آلودگی‌های موجود در فیلتر و همچنین جذب قیر توسط فیلتر، ابتدا با استفاده از قیر، سطح فیلترها به خوبی پوشانده شد. پس از آن، نمونه‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف فیلتر سیگار (۱۰، ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب) ساخته شد. به منظور بررسی عملکرد نمونه‌های آسفالتی، آزمایش‌های مقاومت مارشال و کشش غیرمستقیم انجام گرفت. همچنین، با استفاده از نرم‌افزار Design Expert درصد قیر بهینه و درصد فیلتر بهینه به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار سبب افزایش ۲۸ درصدی مقاومت مارشال و همچنین، افزایش ۷ درصدی شاخص مارشال می‌شود. همچنین، افزایش ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار به مخلوط آسفالتی گرم، کاهش ۲۲ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم را به دنبال داشت. با توجه به نتایج به دست آمده از برنامه Design Expert، مقدار فیلتر بهینه، ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب و مقدار قیر بهینه، ۵٪ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: فیلتر سیگار، مخلوط آسفالتی گرم، مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم، روش سطح پاسخ

۱. مقدمه

امروزه، دفع زباله‌های مختلف به دلیل حجم قابل توجه و رشد آنها، باعث افزایش نگرانی در سرتاسر جهان شده است. یکی از راه‌های مقابله با این مشکل، بازیافت است؛ چرا که تبدیل مواد زائد جامد به منابع جایگزین، موجب کمک به کاهش منابع غیرقابل استفاده، حفظ انرژی و حل مشکلات زیست‌محیطی می‌شود. از طرفی، امروزه، با توجه به افزایش هزینه‌های اقتصادی و عدم دسترسی به مصالح طبیعی، استفاده مجدد از مواد زائد موجود در طبیعت در ساخت راه‌ها گسترش یافته (کوفتکی و نظری، ۲۰۱۸)، چرا که استفاده از زباله‌های تولید شده در طبیعت در آسفالت باعث کاهش هزینه‌های ساخت و ساز، کاهش اثرهای مخرب محیط‌زیستی و ذخیره منابع طبیعی می‌شود (عربانی و تهامی، ۲۰۱۷).

یکی از متداول‌ترین انواع زباله در جهان، فیلتر سیگار می‌باشد که از الیاف استات سلولز تشکیل شده و تجزیه آن مدت‌ها زمان می‌طلبد. دفع و پاک‌سازی فیلتر سیگار یک مشکل جدی زیست‌محیطی است و در حال حاضر نیز تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه در حال انجام است، چرا که سالانه هزاران نوع سیگار در سراسر جهان تولید و میلیون‌ها تن زباله سمی در محیط‌زیست به شکل فیلتر سیگار رها می‌شود (مهاجرانی و همکاران، ۲۰۱۶). در این راستا، بوث و همکاران (۲۰۱۵) برای نشان دادن تأثیر فیلتر سیگار بر حیات وحش، درصدهای مختلف شیرهی فیلتر سیگار را روی حلزون‌ها آزمایش کردند و دریافتند که مرگ و میر حلزون‌ها با ۵٪ فیلتر بر لیتر، با زمان خیساندن ۲ ساعت، به حداکثر خود، یعنی تمامی حلزون‌ها، بعد از ۸ روز می‌رسد.

به طور کلی، محققان با ارزیابی الیاف مختلف در مخلوط آسفالتی گرم دریافتند که الیاف می‌تواند خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط را تغییر داده و منجر به بهبود مدول دینامیک، آسیب رطوبتی و مقاومت در برابر شیارشدگی شده و ترک‌های خستگی را کاهش دهد (زیاری و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین، افزودن الیاف، قیر

را سفت کرده و با ایجاد شکل سه‌بعدی موجب پایداری قیرهای مخلوط می‌شود و پدیده ریزش قیر را کاهش می‌دهد (زیاری و همکاران، ۱۳۹۵). بنابراین، با توجه به مضرات فیلتر سیگار بر محیط‌زیست و همچنین با توجه به خصوصیات الیاف و نتایج مثبت به‌دست آمده از استفاده از الیاف مختلف در آسفالت، یکی از راه‌های استفاده مجدد از این زباله سمی، استفاده از آن به صورت محافظت شده با قیر یا مواد دیگر مثل پارافین (به منظور جلوگیری از پخش آلودگی) در بتن‌های آسفالتی است.

شفابخش و همکاران (۲۰۱۴) به منظور استفاده مجدد از مواد زاید، به ارزیابی رفتار دینامیک مخلوط آسفالتی گرم حاوی خرده شیشه پرداختند. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که مخلوط آسفالتی گرم حاوی خرده شیشه، دارای خصوصیات دینامیک بهتر نسبت به مخلوط آسفالتی گرم معمولی می‌باشد. در این راستا، مهاجرانی و همکاران (۲۰۱۷) با مقادیر مختلف فیلتر سیگار محافظت شده با قیر و پارافین، نمونه‌های آسفالتی ساختند و آزمایش‌های مختلف حجمی و مکانیکی را روی نمونه‌ها انجام دادند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان داد که افزودن فیلتر سیگار محافظت شده با قیر، برای شرایط ترافیکی کم، متوسط و زیاد و فیلتر سیگار محافظت شده با پارافین برای شرایط ترافیکی کم قابل استفاده می‌باشد. همچنین، مشاهده شد که افزودن فیلتر سیگار به آسفالت باعث کاهش جذب نور خورشید و در نتیجه آن باعث بهبود پدیده جزیره گرمایی می‌شود. همچنین، عبدالقدیر و مهاجرانی (۲۰۱۵) با ارزیابی اثر دما بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در آجرهای رسی افزوده شده با فیلتر سیگار به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما، انتشار گازهای گلخانه‌ای به مقدار قابل توجهی کم می‌شود و مقاومت فشاری و مقاومت کششی آجر نیز کاهش می‌یابد و اثر اندکی بر جذب آب می‌گذارد.

مورا و زربینو (۲۰۱۷) از الیاف شیشه به عنوان افزودنی در آسفالت استفاده کرده و مشاهده کردند که الیاف شیشه باعث بهبود رفتار شکست در دماهای کم و

آسفالتی و همچنین تأثیر آن بر خرابی رطوبتی هنور ناشناخته است و نیاز به تحقیق بیشتر خواهد داشت.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. سنگدانه

مصالح سنگی برای این تحقیق از نوع شکسته و سیلیسی انتخاب شد. سنگ‌دانه‌های مورد استفاده که از دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ اشتو (اشتو، ۱۹۹۳) انتخاب شده بودند، دارای دانه‌بندی پیوسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر بودند.

۲-۲. قیر

انتخاب قیر مناسب در هر پروژه به عواملی چون نوع دانه‌بندی مصالح سنگی، شرایط جوی، ترافیک عبوری، محل اجرای طرح و ضخامت آسفالت اجرایی بستگی دارد. قیر مورد استفاده در این پژوهش قیر PG64-22 مطابق مشخصات جدول ۱ بود که از نظر درجه طبقه‌بندی برای محل انجام پروژه (شهر یزد با شرایط آب و هوایی گرم و خشک) مناسب است.

متوسط می‌شود و همچنین، به این نتیجه رسیدند که افزودن بیش از ۵۰٪ الیاف شیشه باعث بهتر شدن رفتار شیارشدگی و کاهش تغییر شکل دائمی می‌شود.

امروزه، با توجه به تعبیه سطل‌های زباله مخصوص جمع‌آوری فیلتر سیگار در سرتاسر دنیا و همچنین جمع‌آوری فیلترهای رها شده در طبیعت، منبع خوبی برای جمع‌آوری فیلتر سیگار به منظور انجام فرایند آزمایشگاهی به‌دست آمده است. بنابراین، در این تحقیق، با توجه به مضرات زیست‌محیطی فراوان فیلتر سیگار و همچنین ناشناخته بودن اثرهای آن بر آسفالت، استفاده از فیلتر سیگار کامل محافظت شده با قیر در مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قرار گرفت و آزمایش‌های ارزیابی مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های آسفالتی، تعیین شاخص سختی کشش غیرمستقیم و روش تحلیل آماری داده برای تعیین درصد بهینه قیر و فیلتر سیگار به روش سطح پاسخ روی نمونه‌های آسفالتی انجام گرفت. اما با توجه به جدید بودن موضوع استفاده از فیلتر سیگار در آسفالت، تأثیر این مورد بر خواص عملکردی مخلوط‌های

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های عملکردی قیر مورد استفاده در این پژوهش

آزمایش	واحد	استاندارد	نتایج	
			حداقل	حداکثر
میزان رطوبت	درصد	۱۸	---	---
ویسکوزیته	درجه سلسیوس	۰/۳۳۲	---	۳
نقطه اشتعال	درجه سلسیوس	۳۳۴	۲۳۰	---
برش دینامیک اولیه	کیلوپاسکال	۱	۱/۱۴	---
RTFO، درصد تغییر جرم	درصد	۵/۷	---	۱
MSCR Test، ترافیک استاندارد (jnr3.2)	--	۳/۹	---	۴/۵
MSCR Test، ترافیک استاندارد (jnrdiff%)	درصد	۱۹	---	۷۵
RTFO، برش دینامیک	کیلوپاسکال	۲/۳۱	۲/۲	---
PAV، برش دینامیک (۲۵ درجه سلسیوس)	کیلوپاسکال	۱۶۳۲	---	۵۰۰۰
PAV، سختی خزشی (۱۲- درجه سلسیوس)	مگا پاسکال	۹۶/۲۳	---	۳۰۰
m-Value (۱۲- درجه سلسیوس)	--	۰/۳۰۲	۰/۳	---

۲-۳. فیلتر سیگار

فیلترهای سیگار جمع‌آوری شده ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در گرمکن و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار گرفتند. این فرایند به منظور از بین بردن رطوبت موجود در فیلترها انجام گرفت. بعد از خشک شدن، به کمک یک بار فشاری، فضای خالی موجود در فیلترهای سیگار به حداقل رسانده شد. این کار به منظور جلوگیری از آزاد

شدن قیر اضافه در ترکیب آسفالتی انجام گرفت. فیلترهای سیگار دارای مواد مضر برای محیط‌زیست می‌باشند. بنابراین، برای جلوگیری از تماس مستقیم با آب و هوا و پخش آلودگی، سطح فیلترهای موجود، با قیر داغ با دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس پوشانده شد. سپس، فیلترهای آغشته شده به قیر به منظور سرد شدن در فضای آزاد قرار گرفت. شکل ۱ فیلترها را قبل و بعد از آغشته شدن به قیر نشان می‌دهد.



شکل ۱. فیلتر سیگار مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آسفالتی: الف) قبل از اختلاط قیر و ب) بعد از اختلاط قیر

۲-۴. آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق، نمونه‌های آسفالتی با استفاده از روش استاندارد طراحی مخلوط مارشال با ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شد. میزان قیر بهینه برای هر نمونه برابر ۵٪ بود. در این مطالعه، به منظور

انجام آزمایش مارشال، ۸ نمونه و در درصدهای مختلف فیلتر (۱۰، ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب) ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفتند. وزن فیلترهای سیگار استفاده شده در هر نمونه آسفالتی، با و بدون آغشته شدن به قیر، در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. وزن فیلترهای سیگار استفاده شده در نمونه‌های آسفالتی با و بدون آغشته شدن به قیر

وزن فیلتر سیگار بدون قیر (گرم)	وزن فیلتر سیگار با قیر (گرم)	میزان فیلتر سیگار (کیلوگرم بر متر مکعب)
۷/۳۲	۵	۱۰
۱۰/۹۸	۷/۵	۱۵
۱۷/۹۲	۱۲/۵	۲۵

۳. مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های

آسفالتی

یکی از مهمترین مؤلفه‌ها در روسازی‌های آسفالتی، پایداری است. پایداری، مقاومت روسازی آسفالتی در برابر فشارهای افقی و تنش برشی ناشی از ترافیک است (اکبولوت و همکاران، ۲۰۱۲). در آزمایش مارشال، اندازه‌گیری مقاومت پایداری و جریان مخلوط آسفالتی مطابق با استاندارد ASTM D1559 انجام شد. بدین صورت که مخلوط آسفالتی به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب ۶۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور شد و سپس بارگذاری با سرعت ثابت فشاری ۵۰/۸ میلی‌متر در دقیقه روی نمونه اعمال گشت. همچنین، یکی از مهمترین پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش پایداری، نسبت پایداری (کیلونیوتن) به جریان (میلی‌متر)، که شاخص مارشال^۱ (MQ) نامیده می‌شود، است. شاخص مارشال، نشان‌دهنده سختی، مقاومت در برابر تنش برشی، تغییرشکل دائمی و به عبارت دیگر شیارشدگی می‌باشد (تهامی و همکاران، ۲۰۱۸).

۳-۲. الگوی آماری سطح پاسخ

روش سطح پاسخ^۲ که به اختصار RSM نامیده می‌شود، ترکیبی از ریاضیات و آمار است. RSM نه تنها تأثیر متغیرهای مختلف آزمون، بلکه تأثیر متعامل بین متغیرها را از طریق تصاویر سه‌بعدی مشخص می‌کند (بیه‌را و همکاران، ۲۰۱۸). RSM یک روش ارجح می‌باشد، زیرا می‌تواند همزمان چندین عامل با سطوح مختلف و اثرهای متقابلشان را با مشاهدات کمی در نظر بگیرد. به طور کلی،

RSM برای حل چندشاخه‌ای و بهینه‌سازی چندین پاسخ در بسیاری از آزمایش‌ها به‌کار گرفته شده است (امباتی و ایانا، ۲۰۰۰). این روش در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون معرفی شد، و تا به امروز نیز از آن به عنوان یکی از ابزارهای طراحی آزمایش استفاده می‌شود. در این تحقیق، از این روش به منظور تعیین درصد قیر بهینه برای درصدهای مختلف فیلتر سیگار استفاده شد. همچنین، برای انجام مطالعات و آنالیزهای آماری و تولید طرح‌های آزمایش از نرم‌افزار Design Expert استفاده شد.

۳-۳. شاخص سختی کششی غیرمستقیم^۳ (TIit)

آزمایش کشش غیرمستقیم، ابزار مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی است (دیواندری و همکاران، ۱۳۹۲). این آزمایش براساس آیین‌نامه ASTM D6931-12، با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سلسیوس، با استفاده از دستگاه کشش غیرمستقیم انجام شد و بعد از به‌دست آوردن نیروی لازم جهت شکستن نمونه‌ها، مقاومت کششی غیرمستقیم^۴ (ITS) از رابطه (۱) به‌دست آمد:

$$ITS = \frac{2P_{max}}{\pi Dt} \quad (1)$$

که ITS مقاومت کششی نمونه‌ها (مگاپاسکال)، P_{max} بار اعمالی در زمان شکست (نیوتن)، D قطر نمونه‌ها (میلی‌متر) و t ارتفاع نمونه‌ها (میلی‌متر) است. صفحه شکست و زاویه گسیختگی نمونه‌های آسفالتی به وسیله دستگاه کشش غیرمستقیم در شکل ۲ نشان داده شده است.

^۳- Indirect Tensile Strength Index

^۴- Indirect Tensile Strength

^۱- Marshall Quotient

^۲- Response Surface Methodology



شکل ۲. نحوه شکست نمونه‌های آسفالتی به وسیله دستگاه کشش غیرمستقیم

به نمونه اولیه افزایش می‌یابد. همچنین، مشاهده شد که با افزایش ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار به مخلوط آسفالتی، مقاومت مارشال به میزان ۱۵٪ نسبت به مخلوط اولیه افزایش و به میزان ۲۲٪ نسبت به مخلوط ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش می‌یابد. این افزایش مقاومت می‌تواند به دلیل مقاومت کششی بالای الیاف سلولزی و همچنین نقش مسلح کننده این الیاف باشد. اما با افزایش این الیاف به مخلوط آسفالتی، نقش سنگ‌دانه‌ها کم‌رنگ‌تر شده و الیاف جای سنگ‌دانه‌ها را می‌گیرد که به دنبال آن کاهش مقاومت رخ داده است.

با توجه شکل ۴ که نتایج روانی^۱ به دست آمده را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که افزایش فیلتر سیگار سبب افزایش روانی می‌شود. چون که افزایش الیاف موجب افزایش فضای خالی بین مصالح سنگی و کاهش درگیری بین سنگ‌دانه‌ها شده و در نتیجه، منجر به کاهش اصطکاک داخلی و افزایش روانی می‌گردد (طاهرخانی و کاظمی ثانی، ۱۳۹۳).

شاخص سختی کششی غیرمستقیم، یک پارامتر برای بررسی چقرمگی یک ماده در جذب انرژی و تغییر شکل بدون شکستگی است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۵). این شاخص، با استفاده از منحنی تنش نرمال شده- کرنش که از طریق آزمایش ITS حاصل می‌شود، به دست می‌آید. بدین گونه که مساحت زیر نمودارهای تنش نرمال شده-کرنش هر یک از نمونه‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف فیلتر سیگار به دست آمد و مورد ارزیابی قرار گرفت.

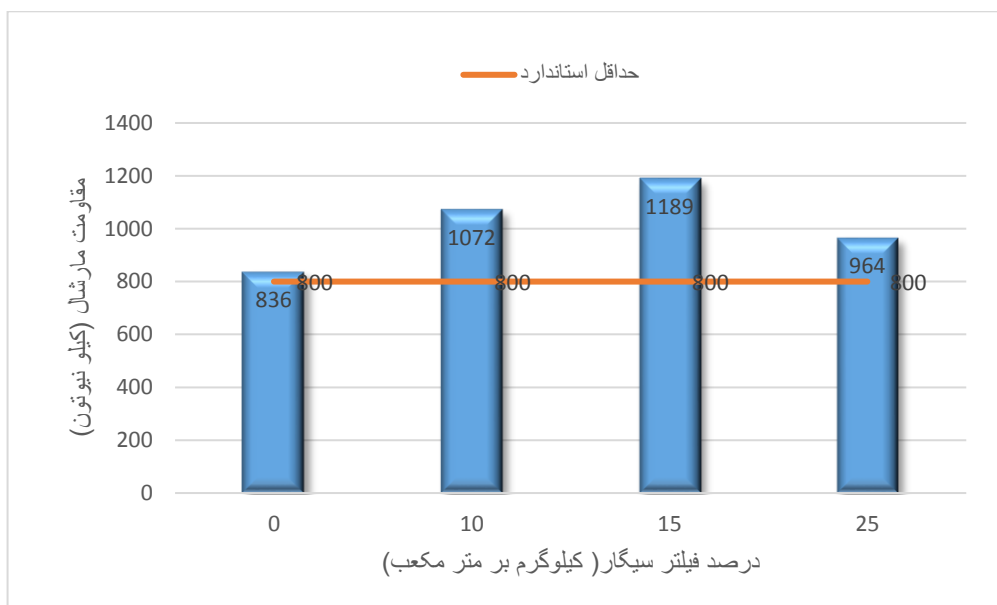
۴. نتایج و بحث

۴-۱. ارزیابی مشخصات فیزیکی و مکانیکی

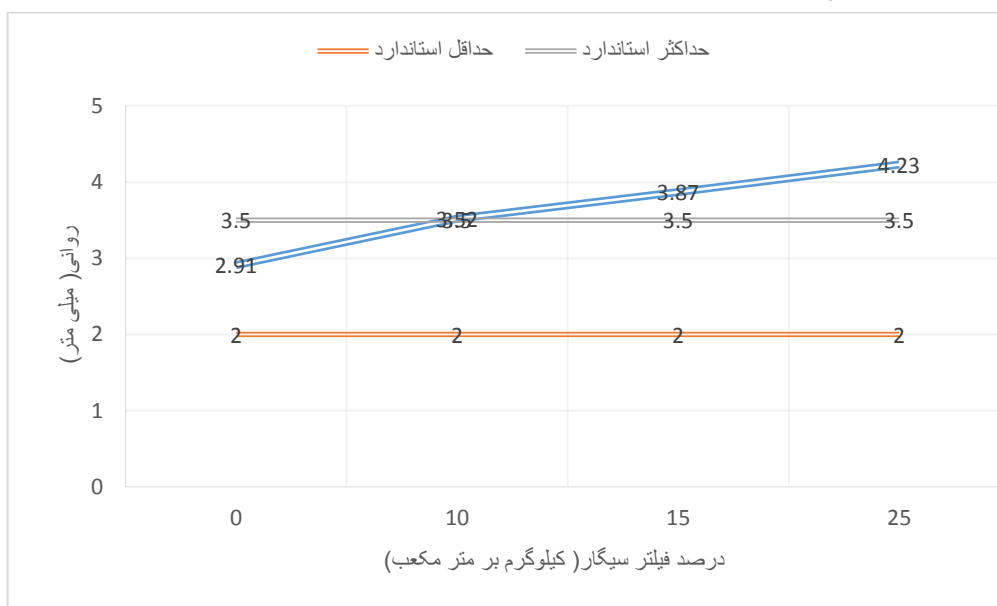
نمونه‌های آسفالتی

نتایج به دست آمده از آزمایش مارشال در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که با افزایش ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار به مخلوط آسفالتی، مقاومت مارشال به میزان ۲۸٪ نسبت

^۱ - Flow



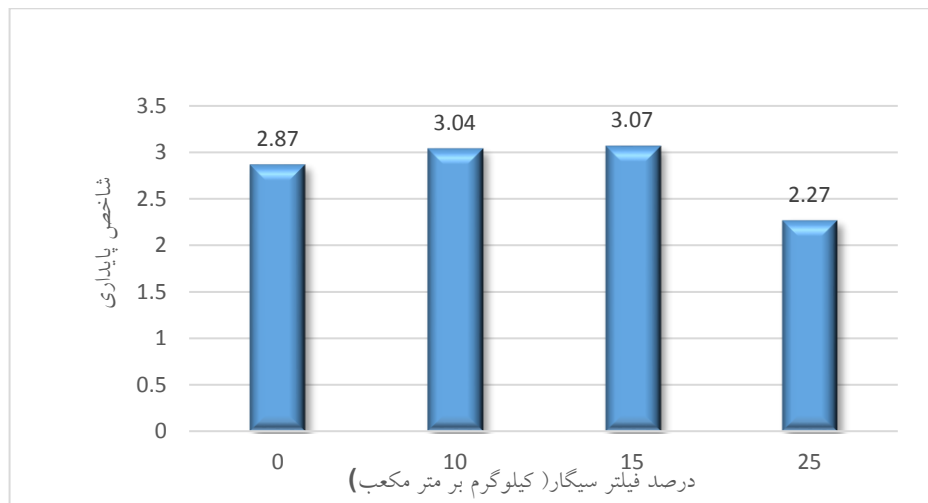
شکل ۳. مقایسه مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف فیلتر سیگار



شکل ۴. مقایسه روانی نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف فیلتر سیگار

که نشان‌دهنده مقاومت اولیه بیشتر و تغییرشکل‌های دائمی کمتر نمونه‌ی اصلاح شده آسفالتی است. همچنین، مشاهده شد که افزایش فیلتر سیگار تا ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب، افزایش شاخص پایداری را به دنبال دارد. اما با افزایش بیش از حد فیلتر، شاخص پایداری کاهش می‌یابد، زیرا با استفاده بیش از حد از الیاف، قیر مصرفی در مخلوط افزایش می‌یابد و در نتیجه با افزایش بیش از حد قیر، شاخص پایداری مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد (طاهرخانی و افروزی، ۱۳۹۵).

مفهوم دیگری که در این آزمایش مورد ارزیابی قرارگرفت، شاخص پایداری بود که عبارت است از نسبت مقاومت مارشال به روانی. هر اندازه این مقدار بیشتر باشد، مخلوطی سخت‌تر و مقاوم‌تر در برابر تغییرشکل‌های دائمی به‌دست می‌آید (مونرا و اوسا، ۲۰۱۴). با توجه به نتایج به‌دست آمده که در شکل ۵ قابل مشاهده است، مشخص شد که مقدار شاخص پایداری (مارشال) با افزایش ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار به میزان ۷٪ نسبت به نمونه اولیه افزایش داشت



شکل ۵. نتایج شاخص پایداری برای نمونه‌های با درصد‌های مختلف فیلتر سیگار

توصیفی نتایج آزمایشگاهی متغیرهای وابسته تحقیق و رگرسیون خطی متغیرهای وابسته عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف قیر و فیلتر سیگار به- دست آمد.

تحلیل توصیفی نتایج آزمایشگاهی و بررسی نرمال بودن آنها بررسی شده، و سپس مدل رگرسیون خطی بر داده‌های تحقیق برازش داده شده است. همانطور که در جداول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، به ترتیب آماره‌های

جدول ۳. آماره‌های توصیفی نتایج آزمایشگاهی متغیرهای وابسته تحقیق

متغیر	Mean		Std. Deviation Statistic	Variance Statistic	Skewness Statistic	Kurtosis Statistic
	Statistic	Std. Error				
Stability (kN)	952.7333	16.67461	6.458048	41.70638	.001	.639
Flow (mm)	3.2396	.15612	.60466	.366	.293	-1.188
VMA (%)	23.7680	.62183	2.40835	5.800	-4.26	-1.509
VFA (%)	72.4873	1.91857	7.43058	5.5214	-6.18	-1.135

جدول ۴. رگرسیون خطی متغیرهای وابسته عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف قیر و فیلتر سیگار

مدل خطی	R	R ²	Adjusted R ²	Std. Error of the Estimate
Stability (kN)	.423 ^a	.179	.042	63.21526
Flow (mm)	.981 ^a	.962	.955	.12801
VMA (%)	.667 ^a	.445	.353	1.93712
VFA (%)	.899 ^a	.808	.775	3.52129

Predictors: (Constant), Bit, Filter

بهبود درصد قیر، ۵ نوع متغیر پاسخ در طرح آزمایش در نظر گرفته شد که این متغیرها شامل مقاومت مار شال، روانی، درصد فضای خالی آسفالت، درصد فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر هستند. در جدول ۵، نتایج به دست آمده به صورت عددی نشان داده شده است.

۴-۲. تحلیل سطح پاسخ

در این مطالعه، دو عامل مستقل مقدار فیلتر و درصد قیر در طرح آزمایش در نظر گرفته شدند. مقدار فیلتر در سه درصد متفاوت (۱۰، ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب) و همچنین مقدار قیر در درصد‌های متفاوت (۴، ۵/۵، ۵، ۵/۵ و ۶) در نظر گرفته شد. برای دستیابی به مقادیر

جدول ۵. نتایج به‌دست آمده از برنامه Design Expert

Source	Dev.	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	Press
مقاومت مارشال					
Linear	۶۳/۲۲	۰/۱۷۸۷	۰/۰۴۱۱۸	-۰/۲۹۸۶	۷۵۸۲۲/۳۲
2Fi	۶۵/۷۴	۰/۱۸۵۸	-۰/۰۳۶۲	-۰/۹۴۱۷	۱/۱۳۴E+۰۰۵
Quadratic	۲۳/۱۶	۰/۹۱۷۳	۰/۸۷۱۴	۰/۷۸۹۷	۱۲۲۷۹/۵۷
Cubic	۲۶/۵۰	۰/۹۲۷۹	۰/۸۳۱۷	۰/۵۹۶۷	۲۳۵۴۶/۰۸
روانی					
Linear	۰/۱۳	۰/۹۶۱۶	۰/۹۵۵۲	۰/۹۴۰۰	۰/۳۱
2Fi	۰/۱۳	۰/۹۶۲۳	۰/۹۵۲۰	۰/۹۲۸۵	۰/۳۷
Quadratic	۰/۱۰	۰/۹۸۰۹	۰/۹۷۰۳	۰/۹۲۱۲	۰/۴۰
Cubic	۰/۰۷۰	۰/۹۹۴۳	۰/۹۸۶۷	۰/۹۴۹۸	۰/۲۶
درصد فضای خالی مصالح سنگی					
Linear	۱/۹۴	۰/۴۴۵۱	۰/۳۵۲۶	۰/۱۴۴۰	۶۹/۴۸
2Fi	۱/۹۷	۰/۴۷۲۹	۰/۳۲۹۱	۰/۱۱۳۸	۷۱/۹۴
Quadratic	۰/۳۵	۰/۹۸۶۴	۰/۹۷۸۸	۰/۹۵۵۸	۳/۵۹
Cubic	۰/۴۲	۰/۹۸۷۱	۰/۹۷۰۰	۰/۸۰۶۵	۱۵/۷۱
میزان فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر					
Linear	۳/۵۲	۰/۸۰۷۵	۰/۷۷۵۴	۰/۶۸۹۶	۲۴۰/۰۰
2Fi	۳/۳۳	۰/۸۴۱۹	۰/۷۹۸۸	۰/۶۷۰۷	۲۵۴/۵۸
Quadratic	۲/۰۲	۰/۹۵۲۴	۰/۹۲۶۰	۰/۸۷۹۰	۹۳/۵۷
Cubic	۱/۹۸	۰/۹۶۹۵	۰/۹۲۸۷	۰/۶۵۳۸	۲۶۷/۶۷

برای پیش‌بینی تابع مقاومت مکانیکی، تغییر شکل یا روانی در لحظه شکست، درصد فضای خالی مصالح سنگی و نیز درصد قیر موجود وابسته به دو متغیر درصد قیر و مقدار فیلتر سیگار از روش سطح پاسخ با نرم‌افزار Design Expert استفاده شد. تابع پیشنهادی نرم‌افزار برای هر سه متغیر از نوع درجه دو است. در جدول ۶ توابع درجه دو پیشنهادی و مقدار ضریب رگرسیون آورده شده است.

برای پیش‌بینی تابع مقاومت مکانیکی، تغییر شکل یا روانی در لحظه شکست، درصد فضای خالی مصالح سنگی و نیز درصد قیر موجود وابسته به دو متغیر درصد قیر و مقدار فیلتر سیگار از روش سطح پاسخ با نرم‌افزار

جدول ۶. توابع پیشنهادی به‌دست آمده از روش سطح پاسخ برای متغیرهای تحقیق

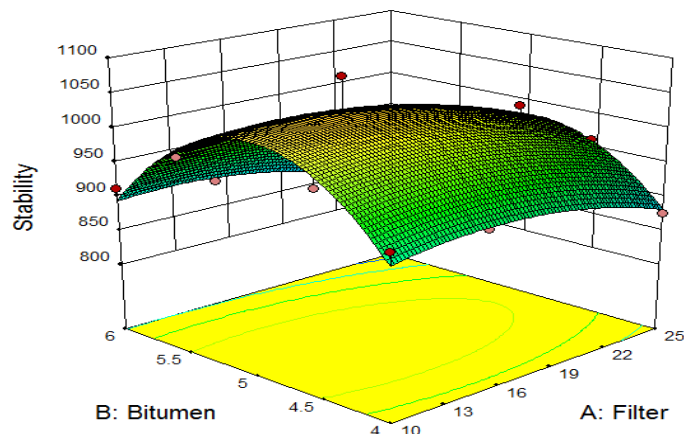
Variable	Suggested Functions	R ²
Stability (kN)	$-2185.59048 + (19.69143 \times \text{Filter}) + (1248.63810 \times \text{Bitumen}) - (1.19429 \times \text{Filter} \times \text{Bitumen}) - (0.4880 \times \text{Filter}^2) - (124.66667 \times \text{Bitumen}^2)$	0.9279
Flow (mm)	$2.77162 + (0.087916 \times \text{Filter}) - (0.98441 \times \text{Bitumen}) + (3.53143 \times 10E - 3 \times \text{Bitumen} \times \text{Filter}) - (1.74933E - 3 \times \text{Filter}^2) + (0.16410 \times \text{Bitumen}^2)$	0.9943
VMA (%)	$2.77162 + (0.087916 \times \text{Filter}) - (8.67549 \times \text{Bitumen}) - (0.087925 \times \text{Bitumen} \times \text{Filter}) - (0.069877 \times \text{Filter}^2) + (0.96529 \times \text{Bitumen}^2)$	0.9871
VFA (%)	$-66.16850 + (5.34402 \times \text{Filter}) + (28.99006 \times \text{Bitumen}) - (0.30230 \times \text{Bitumen} \times \text{Filter}) - (0.099374 \times \text{Filter}^2) - (151774 \times \text{Bitumen}^2)$	0.9695

VMA=Voids in mineral aggregate, PC=Bitumen Content

مارشال کاهش می‌یابد. بنابراین، مقدار فیلتر و درصد قیر باید کنترل شود و برای دستیابی به بیشترین مقاومت باید از مقدار فیلتر و درصد قیر در حد وسط استفاده شود.

شکل ۶، نتایج به دست آمده برای متغیر مقاومت مارشال را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش میزان فیلتر و درصد قیر، مقاومت

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Stability
◆ Design points above predicted value
◆ Design points below predicted value
1088
823
X1 = A: Filter
X2 = B: Bitumen

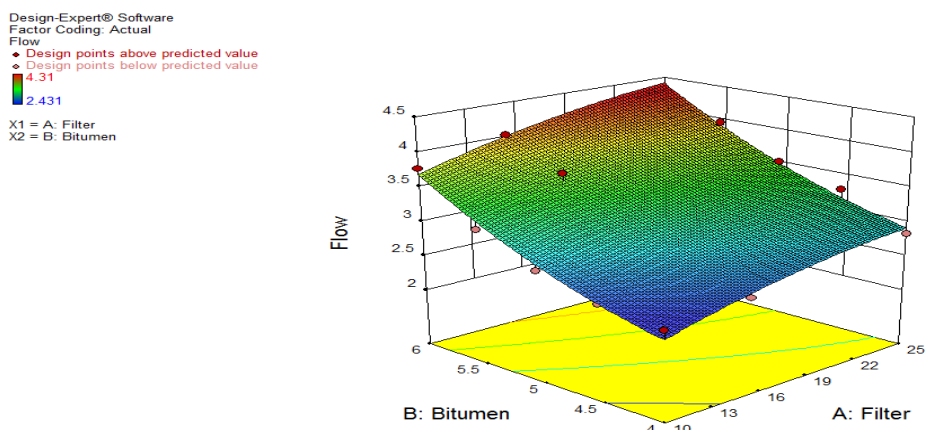


شکل ۶. تأثیر مقدار فیلتر و درصد قیر بر مقاومت مارشال

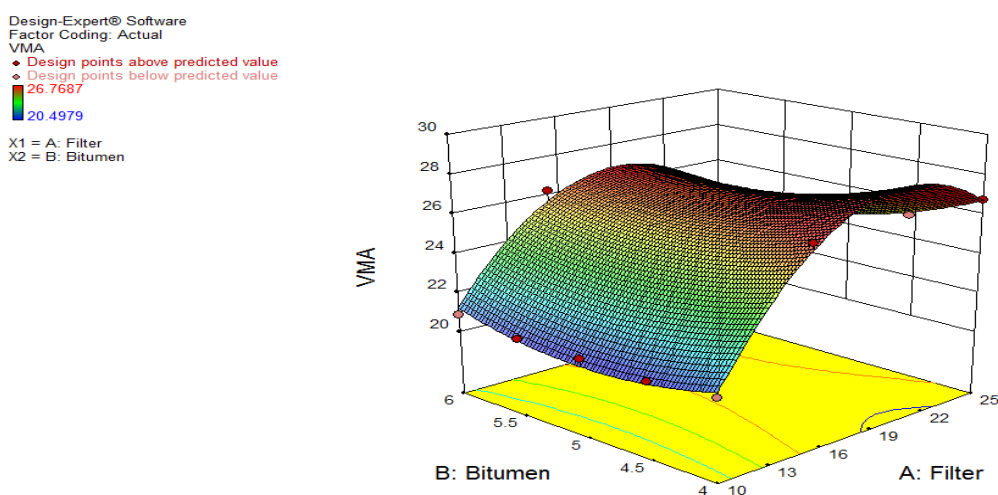
افزایش می‌یابد، چرا که افزودن فیلتر سیگار به صورت کامل، خود عاملی است در جهت افزایش فضای خالی. میزان فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر، عامل مهمی در بهینه‌سازی درصد قیر در مخلوط آسفالت است. شکل ۹، تأثیر مقدار فیلتر و درصد قیر را بر میزان فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزایش میزان فیلتر عامل منفی بر میزان فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر است، چرا که با افزایش مقدار فیلتر، میزان فضای خالی افزایش می‌یابد بنابراین، مقدار فیلتر باید به خوبی کنترل شود. همچنین، با افزایش میزان قیر نیز فضای خالی افزایش می‌یابد، چرا که فیلتر، با جذب قیر، عاملی است در جهت افزایش فضای خالی.

شکل ۷، نتایج به دست آمده برای متغیر روانی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش میزان فیلتر و درصد قیر، مقدار روانی افزایش می‌یابد، چرا که افزایش فیلتر موجب افزایش فضای خالی مخلوط آسفالتی و همچنین کاهش اصطکاک داخلی بین سنگ‌دانه‌ها می‌شود و افزایش روانی را به دنبال دارد و نشان‌دهنده تغییر شکل‌های بیشتر است. بنابراین، همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، استفاده از مقادیر زیاد فیلتر و درصد قیر مجاز نیست.

درصد فضای خالی مصالح سنگی به عنوان عاملی دیگر برای به دست آوردن درصد قیر بهینه در شکل ۸ قابل مشاهده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد قیر و مقدار فیلتر، میزان فضای خالی



شکل ۷. تأثیر مقدار فیلتر و درصد قیر بر روانی



شکل ۸. تأثیر مقدار فیلتر و درصد قیر بر فضای خالی مصالح سنگی

غیرمستقیم کاهش می‌یابد. به این صورت که با افزایش ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار، مقاومت کشش غیرمستقیم نسبت به نمونه اولیه به میزان ۲۲٪ کاهش یافت. افزایش درصد فیلتر که خود نوعی الیاف سلولزی است باعث جذب قیر و کمتر شدن ضخامت قیر در اطراف سنگ‌دانه می‌شود. بنابراین، کاهش مقاومت را به دنبال دارد (زیاری و همکاران، ۱۳۹۵). لازم به ذکر است که این کاهش مقاومت کششی مسأله چندان مهمی نمی‌تواند باشد. زیرا، اغلب تحقیقات نشان داده‌اند که الیاف باعث افزایش جذب انرژی مخلوط و مانع از باز شدن ترک‌ها شده و عمر خستگی را افزایش می‌دهد (طاهرخانی و کاظمی ثانی، ۱۳۹۳).

با توجه به نتایج نرم‌افزار، میزان قیر بهینه برای نمونه‌های حاوی ۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار برابر ۵/۱۵ درصد و برای نمونه‌های حاوی ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار، به ترتیب ۵ و ۴/۹ درصد به دست آمد.

۳-۴. نتایج آزمایش تعیین شاخص سختی کشش غیر مستقیم (TIIt)

نتایج به دست آمده از آزمایش کشش غیرمستقیم در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌گردد که با افزایش درصد فیلتر سیگار، مقاومت کششی

ارزیابی اثر کاربرد فیلتر سیگار بر طرح اختلاط آسفالت به روش آزمایشگاهی و تحلیل سطح پاسخ

Design-Expert® Software

Factor Coding: Actual

PCBitumen

◆ Design points above predicted value

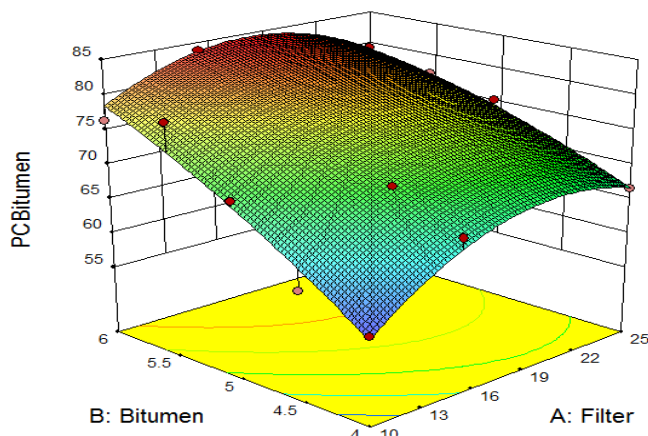
◆ Design points below predicted value

83.8593

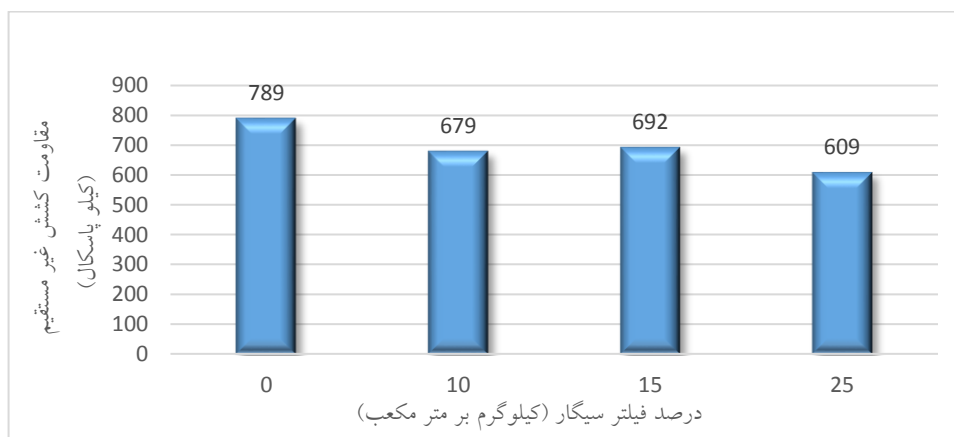
57.3165

X1 = A: Filter

X2 = B: Bitumen



شکل ۹. تأثیر مقدار فیلتر و درصد قیر بر میزان فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر



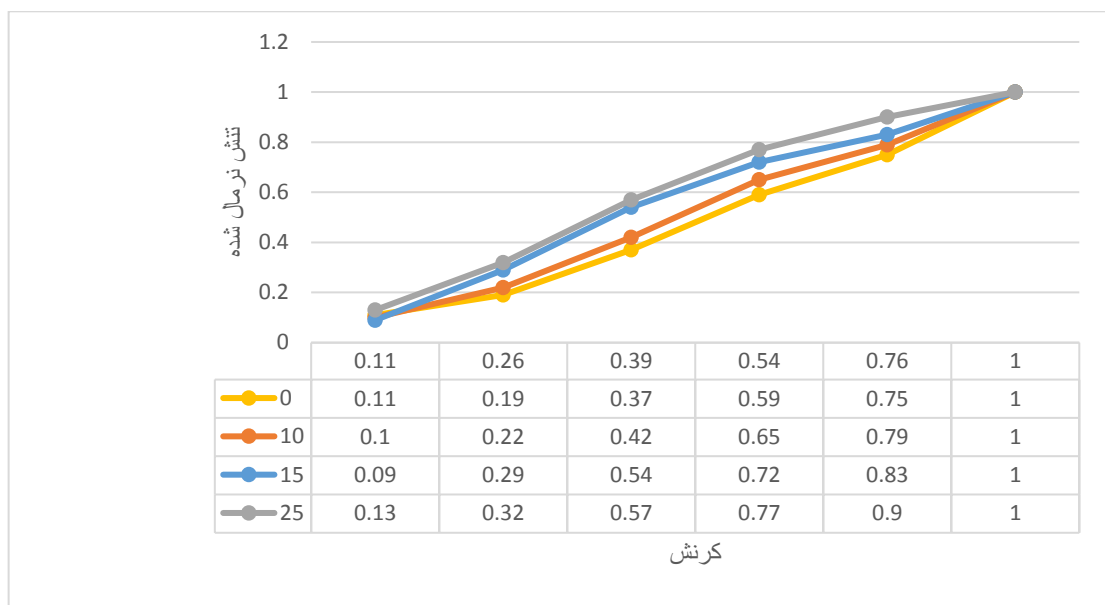
شکل ۱۰. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم برای نمونه‌های با درصد‌های مختلف فیلتر سیگار

آمده، مشاهده می‌شود که با افزایش میزان فیلتر سیگار، انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی نیز افزایش می‌یابد.

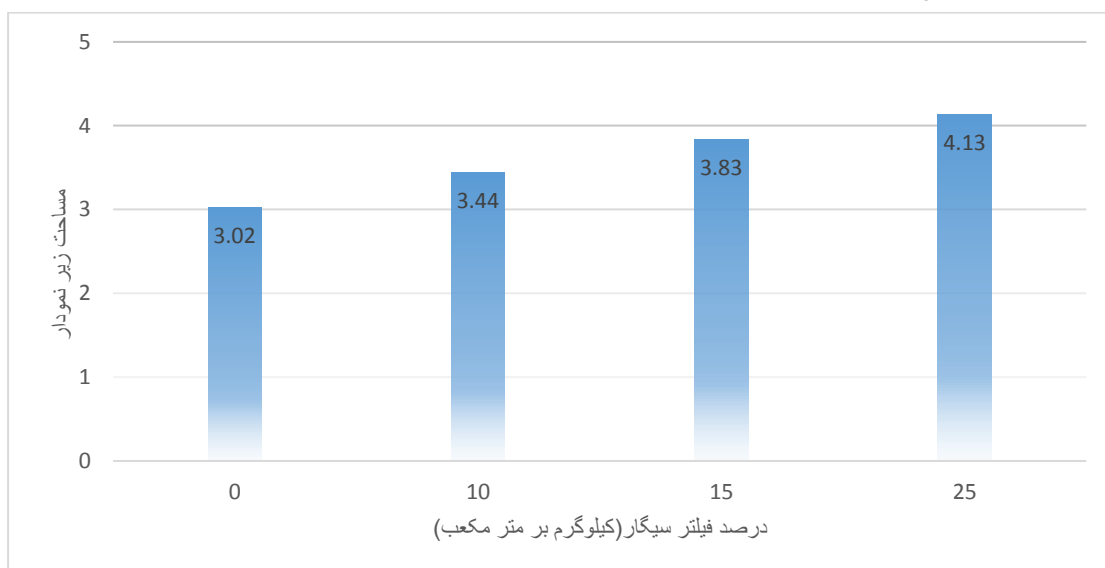
۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی حاوی فیلتر سیگار محافظت و اندود شده با قیر مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به‌دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

برای بررسی انعطاف‌پذیری مخلوط‌های مورد مطالعه، منحنی‌های تنش نرمال شده- کرنش رسم شد و پارامترهای موجود در معادله (۲) برای هر منحنی محاسبه شد. شکل ۱۱، منحنی‌های تنش نرمال شده- کرنش را برای نمونه‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف فیلتر سیگار نشان می‌دهد. مساحت زیر نمودارهای به‌دست آمده در شکل ۶، میزان انرژی شکست را نشان می‌دهد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مطابق نتایج به‌دست



شکل ۱۱. نمودار تنش نرمال شده- کرنش نمونه‌های آسفالتی با درصدهای مختلف فیلتر سیگار



شکل ۱۲. مساحت زیر نمودارهای تنش نرمال شده- کرنش نمونه‌های آسفالتی با درصدهای مختلف فیلتر سیگار

- افزایش مقدار فیلتر سیگار در آسفالت، منجر به کاهش مقاومت پایداری، افزایش روانی و همچنین افزایش فضای خالی مصالح سنگی می‌شود. مقدار بهینه میزان فیلتر سیگار، ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

- با افزایش درصد قیر، میزان مقاومت پایداری و روانی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. همچنین، میزان فضای خالی به علت جذب قیر توسط فیلتر، افزایش می‌یابد. مقدار بهینه قیر مصرفی برای استفاده از فیلتر سیگار در

- استفاده از ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار به عنوان افزودنی در آسفالت، مقاومت مارشال را به مقدار ۲۸٪ افزایش می‌دهد.

- افزایش فیلتر سیگار در آسفالت، منجر به افزایش روانی و انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی گرم می‌شود.

- استفاده از ۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار به عنوان افزودنی در آسفالت، منجر به افزایش ۷ درصدی شاخص پایداری می‌شود که مقاومت اولیه بیشتر و کاهش تغییرشکل‌های دائمی را به دنبال دارد.

آسفالت، برای نمونه‌های حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب، به ترتیب برابر با ۵/۱۵، ۵ و ۴/۹ به دست آمد. - با افزایش ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب فیلتر سیگار به مخلوط آسفالتی، مقاومت کششی غیرمستقیم به میزان ۲۲٪ کاهش می‌یابد، که علت آن جذب قیر توسط الیاف و کاهش ضخامت قیر روی سنگ‌دانه‌ها می‌باشد.

۶. مراجع

دیواندری، ح.، مدرس، ا.، حسینی علی آباد، س. م. و رستمی انکاس، م. ۱۳۹۲. "ارایه مدل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و پارامترهای مارشال". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱(۲): ۵۴-۶۱.

زیاری، ح.، قاسمی، ک. ا. و باباگلی، ر. ۱۳۹۵. "ارزیابی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)". مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۲(۲): ۶۲-۶۷.

زیاری، ح.، دیواندری، ح. و افشین، ا. ۱۳۹۶. "ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه و بازالت". فصلنامه علمی- ترویجی جاده، ۹۲: ۶۱-۷۴.

طاهرخانی، ح. و کاظمی ثانی، ب. ۱۳۹۳. "بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کربن و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی". مهندسی حمل و نقل، ۷(۱): ۸۷-۱۰۳.

طاهرخانی، ح. و افروزی، س. ۱۳۹۵. "ارزیابی شیارافتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی". مهندسی حمل و نقل، ۸(۴): ۵۸۸-۵۶۷.

AASHTO. 1993. "Guide for design of pavement structures". American Association of State Highway and Transportation Officials, New York.

Abdul kadir, A. and Mohajerani, A. 2015. "Effect of heating rate on gas emissions and properties of fired clay bricks and fired clay bricks incorporated with cigarette butts". Appl. Clay Sci., 104: 269-276.

Akbulut, H., Güreş, C., Çetin, S. and Elmacı, A. 2012. "Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures". Constr. Build. Mater., 36: 430-436.

Ambati, P. and Ayyanna, C. 2000. "Optimizing medium constituents and fermentation condition for citric acid production from palmyra jiggery using response surface method". World J. Microbiol. Biotech., 17: 331-335.

Arabani, M. and Tahami, S. A. 2017. "Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture". Constr. Build. Mater., 149: 350-358.

Booth, D. J., Gribben, P. and Parkinson, K. 2015. "Impact of cigarette butt leachate on tidepool snails". Mar. Pollut. Bull., 95: 362-364.

Behera SK, Meena H, Chakraborty S, Meikap BC. 2018. Application of response surface methodology (RSM) for optimization of leaching parameters for ash reduction from low-grade coal. Int J Min Sci Technol, China University of Mining & Technology; 28(4):621-9.

Huang, B., Shu, X. and Li, G. 2005. "Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavement". Cement Concrete Res., 35: 2008-2013.

Kofteci, S. and Nazary, M. 2018. "Experimental study on usability of various construction wastes as fine aggregate in asphalt mixture". Constr. Build. Mater., 185: 369-379.

Li, W., Cai, L., Wu, Y., Liu, Q., Yu, H. and Zhang, C. 2018. "Assessing recycled pavement concrete mechanical properties under joint action of freezing and fatigue via RSM". Constr. Build. Mater., 164: 1-11.

Mohajerani, A., Kadir, A.A. and Larobina, L. 2016. "A practical proposal for solving the world's cigarette butt problem: Recycling in fired clay bricks". Waste Manage., 52: 228-244.

Mohajerani, A., Tanriverdi, Y., Nguyen, B. T., Wong, K. K., Dissanayake, H. N., Johnson, L., Whitfield, D., Thomson, G., Alqattan, E. and Rezaei, A. 2017. "Physico-mechanical properties of asphalt concrete incorporated with encapsulated cigarette butts". Constr. Build. Mater., 153: 69-80.

Morea, F. and Zerbino, R. 2017. "Improvement of asphalt mixture performance with glass macro-fibers". Constr. Build. Mater., 164: 113-120.

- Munera, J. C. and Ossa, E. A. 2014. "Polymer modified bitumen: Optimization and selection". *Mater. Design*, 62: 91-97.
- Shafabakhsh, G. H., & Sajed, Y. (2014). Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials; case study: Glass cullet. *Case Studies in Construction Materials*, 1, 96-103.
- Tahami, S. A., Arabani, M. and Foroutan Mirhosseini, A. 2018. "Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 170: 547-556.

