

مروری بر تأثیر افزودنی‌های مختلف بر خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA)

مقاله علمی - پژوهشی

پویان ایار*، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
ساجد برادران، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
سپهر عبدی‌پور وسطی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ayar@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۸۶-۵۷

چکیده

یکی از انواع مخلوط‌های آسفالتی که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده و با افزایش کاربرد در بسیاری از کشورهای جهان همراه است، مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) می‌باشد که در اواسط دهه ۶۰ میلادی طراحی و معرفی گردید. طراحی و تولید این نوع آسفالت همواره با مشکلاتی از قبیل شیار شدگی، سایش و ضعف در برابر تحمل بارهای ترافیکی همراه بوده است. در این پژوهش تأثیر افزودنی‌های گوناگون از قبیل مواد آلی، معدنی، طبیعی، پلیمری و غیر پلیمری بر روی مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع افزودنی‌هایی مانند اتیلن وینیل استات، نانو افزودنی‌ها، الیاف به‌دست‌آمده از گیاه سیسال، ضایعات بازالت دیاربکر، سرباره فولاد موجب بهبود خصوصیات مخلوط SMA مانند افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی، افزایش عمر خستگی، بهبود حساسیت رطوبتی و کاهش خاصیت ریزش قیر شدند. به عنوان مثال با افزودن ۶ درصد اتیلن وینیل استات به قیر عدد روانی تقریباً ۴۳ درصد افزایش یافت. همچنین افزودن نانو Fe_2O_3 به مخلوط‌های SMA به طور متوسط موجب بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی به میزان ۳۳ درصد گردید. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های طبیعی و به‌کارگیری مواد و مصالح سنگدانه‌ای بازیافتی و ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌های موجود، موجب کاهش هزینه ساخت و اجرا می‌گردد. لازم به ذکر است که این امر از جنبه زیست‌محیطی نیز حائز اهمیت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی درشت‌دانه SMA، افزودنی، خرابی آسفالت، مقاومت در برابر شیار شدگی، ریزش قیر

۱- مقدمه

اصلاح‌کننده‌ها به موادی اطلاق می‌شود که با اضافه نمودن آن‌ها به قیر یا مخلوط آسفالتی، می‌توان خواص یا رفتارهای مدنظر را بهبود بخشید. لازم به ذکر است که در استفاده از چند افزودنی محدودیتی وجود ندارد و گاهی باید چند اصلاح‌کننده یا افزودنی

در سراسر جهان با پیشرفت روزافزون علم همواره مهندسی راه و ترابری به دنبال بهبود خصوصیات خاصی از فناوری آسفالت بوده‌اند. یکی از راه‌های مرسوم برای بهبود شاخصه‌های مختلف، استفاده از افزودنی‌ها یا اصلاح‌کننده‌ها است. افزودنی یا

بارگذاری این نوع آسفالت، شبکه‌ای مناسب و مطمئن برای توزیع مناسب بارهای وارده ایجاد خواهد شد (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰) طبق معیارهای بیان شده در مورد طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی SMA (نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹) برای اجزای مختلف تشکیل‌دهنده مخلوط SMA، حداکثر اندازه مصالح درشت‌دانه برای تأمین شرایط فوق در این نوع مخلوط آسفالتی ۲۵ میلی‌متر است. معمولاً حداکثر اندازه مصالح درشت‌دانه بین ۱۲٫۵ تا ۱۹ میلی‌متر انتخاب می‌گردد. همچنین در مورد دیگر مشخصات مصالح سنگی درشت‌دانه، مقدار شکستگی در یک جبهه معادل ۱۰۰٪ و در دو جبهه حداقل ۹۰٪، مقدار سایش به روش لس‌آنجلس حداکثر ۳۰٪، افت وزنی در مقابل سولفات سدیم حداکثر ۱۵٪، میزان جذب آب حداکثر ۲٪ و شاخص دوام حداقل ۴۰ پیشنهاد می‌گردد. باید توجه نمود که میزان سنگ‌دانه‌های سوزنی و پولکی شکل با نسبت ۳ به ۱ حداکثر ۲۰٪ مورد قبول است. مصالح ریزدانه در این مخلوط‌ها بین ۲۰ تا ۲۸٪ نسبت به کل مخلوط استفاده می‌شود. طبق معیارهای به‌دست‌آمده از پژوهش‌های گوناگون، تمامی مصالح ریزدانه به‌کاررفته در مخلوط SMA باید شکسته، محکم و بادوام بوده و عاری از هرگونه مواد مضر باشد (NAPA, 2002). درصد شکستگی این مصالح ۱۰۰٪، حداکثر میزان افت وزنی در مقابل سولفات سدیم ۱۵٪ و حداکثر حد روانی ۲۵٪ پیشنهاد می‌گردد (نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹). بخش دیگری از مواد تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی SMA فیلر است که این بخش علاوه بر افزایش مقاومت فشاری و برشی، باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش تغییر شکل نسبی می‌گردد. دیگر نقش‌های مهم فیلر، افزایش کندروانی و سفتی قیر است. حداکثر میزان وزنی رد شده از الک ۰/۰۲ میلی‌متر برای فیلر در مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای ۲۰٪ پیشنهاد می‌گردد و باید توجه داشت، همان‌طور که گفته شد فیلر برخی خواص مخلوط آسفالتی را بهبود بخشیده اما میزان مصرفی آن در مخلوط نباید از ۸ تا ۱۳٪ کل مصالح سنگی تجاوز نماید (نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹).

یکی از مهم‌ترین بخش تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای، قیر است. قیر مصرفی باید قیر از نوع خالص طبقه‌بندی شده براساس درجه نفوذ یا عملکردی باشد. همچنین قیر اصلاح‌شده نیز می‌توان استفاده نمود. همانند دیگر

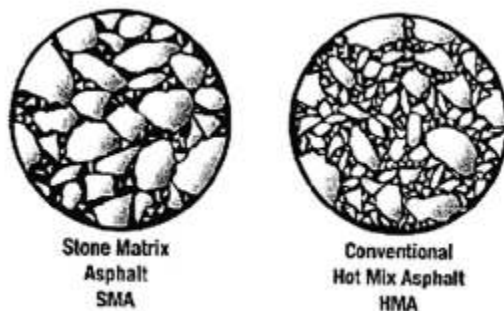
باهم بصورت هم‌زمان به آسفالت اضافه شوند تا هرکدام ضعف مدنظر را پوشش و بهبود بخشند. عملکرد مورد انتظار در آن پروژه، افزودنی انتخاب می‌گردد. از جمله عوامل تأثیرگذار استفاده از افزودنی‌ها در آسفالت، می‌توان به مواردی از قبیل کاهش قیمت تولید آسفالت، کاهش مرمت‌های دوره‌ای، افزایش فواصل بهسازی رویه‌های آسفالتی، کاهش ضخامت لایه‌های آسفالتی، به‌کارگیری ضایعات صنایع مختلف در تولید آسفالت و به‌کارگیری تولیدات جدید صنعتی و ابزارآلات پیشرفته در تولید و اجرای آسفالت، اشاره نمود (عباس حاج محمدرضایی، ۱۳۷۸). به‌کارگیری مواد با خاصیت‌های گوناگون در قیر، موجب کاهش پدیده‌هایی همچون تغییر شکل‌های ماندگار و قیر زدگی رویه‌های آسفالتی، تأخیر و جلوگیری از رو آمدن ترک‌ها، کاهش پدیده سخت و پیر شدن قیر، افزایش تاب‌آوری در برابر خستگی، جلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی و انقباضی در رویه و جلوگیری از عریان شدگی سنگ‌دانه می‌شود.

مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای^۱ (SMA) در اواسط دهه ۶۰ میلادی توسط دکتر زیچنر، مهندس آلمانی و مدیر آزمایشگاه روسازی طراحی و معرفی گردید. طراحی و تولید این نوع آسفالت به دلیل بهبود مشکلات و ضعف‌های عملکردی از قبیل شیارشدگی، سایش و ضعف در برابر بارهای ترافیکی و مشکلات مربوط به لاستیک‌های یخ‌شکن^۲ بوده که با وجود این نوع آسفالت، مشکلات بیان‌شده کاهش یافته است (MAKARCHIAN, KARIMI, MOGHADAS, N, 2016).

با گسترش روزافزون علم و فناوری، طرح‌های متفاوت اختلاط نیز برای این نوع رویه آسفالتی از جانب مهندسين دیگر کشورها از جمله هلند و ایالات متحده آمریکا به‌دست‌آمده است بطوریکه طرح اختلاط SMA را می‌توان به دو دسته آلمانی و تولید دیگر کشورها (البته کم و بیش شبیه به ساختار آلمانی) تقسیم‌بندی نمود (Krzysztof, 2019 Blazejowski). به‌طورکلی مخلوط SMA از نوع آسفالت گرم بوده که دارای مخلوط دانه‌بندی گسسته بصورت یک بخش سنگ‌دانه درشت و مخلوط قیر به همراه فیلر (پرکننده) و بخش ریزدانه و افزودنی‌های موردنظر هست. لازم به ذکر است که طبق تحقیقات به عمل آمده طی سالیان گذشته، هرچه مقدار مصالح درشت‌دانه بیشتر باشد، تماس سنگ‌دانه به سنگ‌دانه افزایش یافته و در زمان

شب از دیگر مزایای این نوع مخلوط آسفالتی می‌باشند. البته همان‌طور که هر ترکیب آسفالتی مزایا و معایب خاص خودش را داراست، لذا، این نوع مخلوط آسفالتی نیز دارای معایبی همچون ریزش قیر، هزینه بالای مخلوط در مقایسه با مخلوط آسفالتی گرم به دلیل تفاوت در ترکیبات و همچنین خطر بروز انواع قیرزدگی‌های موضعی^۳ بر روی سطح به دلیل خطای رخ داده در هنگام طراحی وجود دارد (Blazejowski, 2019). مشکل ریزش قیر و قیرزدگی عموماً در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (شکل ۱) به دلیل ساختار آن‌که با دانه‌بندی میان‌تهی همراه است، بیشتر به چشم می‌خورد. وجود فضای خالی نسبتاً زیاد بین مصالح سنگی درشت‌دانه و مصرف قیر زیاد، این امکان را برای آسفالت فراهم می‌آورد تا نسبت به قیرزدگی و ریزش قیر مستعدتر عمل نماید. برای رفع این مشکل، می‌توان از اصلاح‌کننده‌های مختلف از جمله الیاف معدنی و آلی و یا اصلاح‌کننده‌های پلیمری و غیر پلیمری نیز بهره برد. همچنین بکار بردن مصالح جایگزین شونده نیز می‌تواند در رفع این مشکل راهگشا باشد (نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹).

آسفالت‌ها، انتخاب قیر مناسب به کیفیت و دانه‌بندی مصالح سنگی، شرایط جوی محل پروژه و میزان آمد و شد وسایل نقلیه بستگی خواهد داشت. حداقل میزان قیر در مخلوط‌های SMA، ۶٪ است که این میزان معمولاً بیشتر از مقدار قیر مخلوط‌های آسفالتی گرم با دانه‌بندی پیوسته است. علت این اختلاف میزان مصرف قیر در مخلوط آسفالتی SMA و دیگر انواع مخلوط آسفالتی، دانه‌بندی گسسته و مقدار نسبتاً زیاد فیلر در مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای است (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰). لازم به ذکر است وجود مقادیر زیاد قیر در این‌گونه مخلوط‌ها باعث افزایش دوام، جلوگیری از پیرشدگی آسفالت تحت شرایط مختلف و افزایش ضخامت غشا اطراف سنگ‌دانه‌ها می‌گردد. (نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹). با توجه به موارد بیان‌شده در مورد ترکیبات مخلوط SMA، می‌توان مزایایی نسبت به دیگر انواع آسفالت از قبیل مقاومت بیشتر در برابر شیارشدگی (تغییر شکل دائمی) و ضربه، افزایش زبری سطح، افزایش انعطاف‌پذیری، دوام و پایداری بالاتر را نام برد. همچنین لازم به ذکر است که کاهش برخی نواقص از قبیل ترک‌های انعکاسی، صدا، پاشش آب هنگام بارندگی، هزینه تعمیر و نگهداری و انعکاس نورهای مزاحم در



شکل ۱. مقایسه بین مخلوط‌های SMA و HMA

(نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹)

پلیمری و غیر پلیمری بر عملکرد مخلوط آسفالتی SMA پرداخته و با معایب و مزایای هر کدام شرح داده می‌شود.

در ادامه، در این پژوهش به بررسی تأثیر انواع افزودنی و اصلاح‌کننده‌های گوناگون از قبیل اصلاح‌کننده‌های معدنی، آلی،

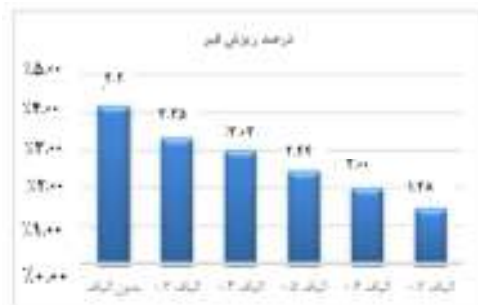
۲- تأثیر افزودنی‌ها بر ویژگی‌های مختلف SMA

ابتدا در بخش نخست به بررسی تأثیر انواع افزودنی از جمله الیاف حاوی اربوسل چرب و گیاه سیسال بکاررفته در مخلوط‌های آسفالتی SMA پرداخته و سپس در بخش بعدی، اختلاط افزودنی‌هایی مانند نشاسته و گیلسونایت با قیر در مخلوط SMA مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در پایان این بخش، تأثیر انواع افزودنی‌ها از جمله سرباره فولاد و ضایعات بازالت دیاربکر به‌عنوان جایگزین مصالح سنگی در مخلوط SMA مطرح و مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۱- اختلاط افزودنی‌ها در مخلوط آسفالتی

(Saedi and Alizadeh,2020) به بررسی تأثیر الیاف‌های حاوی اربوسل‌های^۴ چرب بر ویژگی‌های مخلوط SMA با مقادیر ۰/۳ تا ۰/۷ درصد وزنی مخلوط پرداختند. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده، استفاده از مخلوط

حاوی ۰/۵ درصد الیاف ریزش قیر را بهبود بخشیده و حداکثر مقاومت مارشال نیز مربوط به این نمونه است (شکل ۱). همچنین افزایش مقاومت مارشال منجر به بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل دائمی خواهد گردید. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، مخلوط حاوی ۰/۵ درصد وزنی الیاف در برابر شیارشدگی و تغییر شکل دائمی رفتار بهتری از خود نشان می‌دهند. نتایج آزمایش‌های آب جوشان و حساسیت رطوبتی به روش لاتمن نشان‌دهنده افزایش مقدار TSR^۵ و تأثیر مثبت این نوع الیاف در برابر آسیب‌های رطوبتی و عریان‌شدگی در مخلوط‌های SMA می‌باشند. بر اساس نتایج این تحقیق، زمانی که الیاف به میزان ۰/۵ درصد وزنی مخلوط باشند، بیشترین مقدار ریزش قیر به کمتر از ۰/۳ درصد کاهش‌یافته و محدودیت‌های تعیین‌شده آیین‌نامه را برآورده می‌نماید (شکل ۳). طبق نتایج بدست آمده، با افزایش مقدار الیاف در مخلوط SMA، مقدار ریزش قیر کاهش پیدا کرده است.



شکل ۲. منحنی مقایسه‌ای درصد ریزش قیر از مخلوط‌های تهیه‌شده (Saedi and Alizadeh,2020)



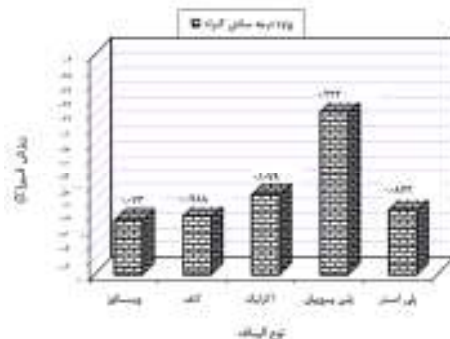
شکل ۳. نمودار مقایسه‌ای شاخص مارشال نمونه‌های تهیه شده بر حسب کیلوگرم بر میلی‌متر (Saedi and Alizadeh,2020)

ویسکوز^۶ از گروه الیاف سلولزی در مخلوط آسفالتی SMA به میزان ۰/۳ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی پرداختند. محققین در

(Mohammadzadeh and Niazi,2011) در تحقیقی به بررسی تأثیر الیاف آکرلیک^۶ از گروه الیاف مصنوعی و الیاف

می‌باشند (شکل ۴). در ادامه با بررسی شیب منحنی سختی خمشی سطح کرنش، بیان داشتند که سختی خمشی مخلوط حاوی الیاف آکرلیک نسبت به مخلوط‌های حاوی ویسکوز دارای حساسیت بیشتری نسبت به سطح کرنش اعمالی بوده و همچنین نتایج نشان‌دهنده عمر خستگی بیشتر مخلوط حاوی آکرلیک نسبت به مخلوط‌های حاوی الیاف ویسکوز می‌باشند که این امر به دلیل بالا رفتن سطح کرنش‌ها و در نتیجه افزایش مقدار تنش‌های وارد بر مخلوط می‌باشد. این افزایش سبب رشد ترک‌هایی موئین و گسیخته شدن پیوند بین قیر و مصالح سنگی شده که در نتیجه سختی مخلوط دچار کاهش سریع و رسیدن به شرایط گسیختگی نیز خواهد گردید.

این تحقیق اثر کاربرد این الیاف بر خواص خستگی و ریزش مخلوط آسفالتی را در نظر گرفته و میزان درصد قیر بهینه، ریزش قیر، شاخص سختی مارشال، سختی خمشی و عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی SMA حاوی الیاف را ارزیابی نمودند. بر اساس تحلیل اطلاعات نتایج به دست آمده، مخلوط‌های SMA حاوی الیاف سلولزی مانند الیاف ویسکوز درصد قیر بهینه بیشتر نسبت به مخلوط‌های SMA حاوی الیاف مصنوعی نظیر آکرلیک می‌باشند. در نتیجه میزان استفاده بیشتر از قیر منجر به صرف هزینه بیشتر برای تهیه مخلوط آسفالتی حاوی الیاف سلولزی نسبت به مصنوعی می‌گردد. همچنین آن‌ها دریافتند که مخلوط‌های SMA حاوی الیاف ویسکوز، پتانسیل ریزش قیر کمتری نسبت به مخلوط‌های حاوی آکرلیک را دارا



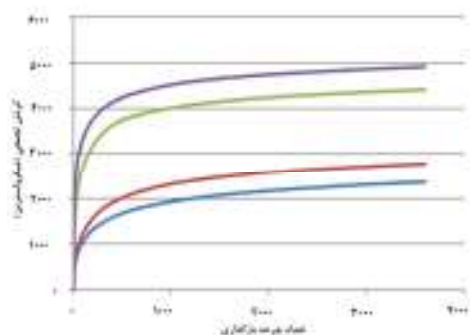
شکل ۴. مقایسه ریزش قیر مخلوط‌های SMA حاوی ۰/۳ درصد وزنی الیاف در دمای ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد (Mohammadzadeh and Niazi, 2011)

اصلاح شده با ۴ درصد پودر پوست تخم‌مرغ بود. از طرفی نتایج آزمون خزش دینامیکی نشان داد که مخلوط حاوی ۴ درصد پودر پوست تخم‌مرغ کمترین مقدار عدد روانی را خواهد داشت (شکل ۶). در نهایت از منظر اجرایی جمع‌آوری پوست تخم‌مرغ دشوار می‌باشد.

(K.A Masri et al. 2021) به بررسی اثر پودر پوست تخم‌مرغ بر مخلوط آسفالتی SMA پرداختند (شکل ۵). در این تحقیق، به منظور بررسی تغییر خواص این افزودنی بر مخلوط آسفالتی، آزمایش‌ها مدول ارتجاعی و خزش دینامیکی انجام گردید. نتایج نشان‌دهنده بهبود مدول ارتجاعی مخلوط‌های



شکل ۵. پودر پوست تخم‌مرغ مورد استفاده در تحقیق (K.A Masri et al. 2021)



شکل ۶. مشخصات خزش SMA (K.A Masri et al.2021)

آزمایش استقامت مارشال، به مقادیر میزان قیر بهینه و الیاف مورد نیاز سیسال دست یافتند. میزان قیر بهینه ۶/۲۱ درصد، استقامت مارشال ۱۴/۸۲ و میزان روانی نیز معادل ۳/۶ میلی‌متر گزارش شده‌اند. در مورد میزان الیاف بهینه سیسال نیز، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با به‌کارگیری ۰/۲۸ درصد از این الیاف، استقامت مارشال مخلوط‌های SMA به میزان قابل قبولی بهبود یافته و به‌طور قابل توجهی خاصیت ریزش قیر نیز کاهش می‌یابد.

جدول ۱. مقایسه نتایج در نمونه‌های اصلاح شده و اصلاح نشده با الیاف سیسال (Naveen Kumar R, V Sunitha, 2016)

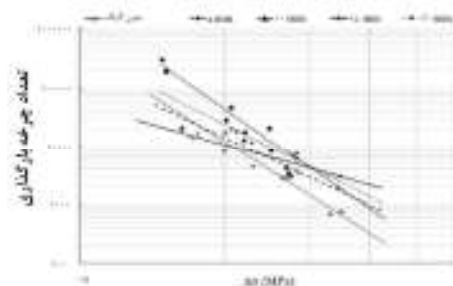
مشخصات استاندارد	مخلوط اصلاح شده	مخلوط اصلاح نشده	پارامتر مورد نظر
	۱۴/۸۲	۱۱/۵۷۵	استقامت مارشال (KN)
۲-۴	۳/۶	۳/۹۰	روانی (mm)
۴	۳/۹۲	۳/۷۰	(%) میزان فضای خالی
۵/۸	۶/۱۸	۶/۲۱	(%) میزان قیر
۱۷	۱۸/۲۶	۱۸/۸۴	VMA (%)
	۷۸/۲۲	۷۷/۳۱	VFB (%)

در دمای ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد، با افزایش طول الیاف، روند کاهش در مدول برجهنگی مشاهده گردید. با این حال، در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد، مقادیر مدول در مقایسه با دو دمای آزمایش دیگر به شدت کاهش یافت و با طول الیاف همبستگی نشان نداد. در آزمایش مدول دینامیکی مقادیر متوسط مدول‌های دینامیکی مخلوط‌های بدون الیاف در مقایسه با مخلوط‌های تقویت شده با

(Naveen Kumar R, V Sunitha, 2016) به بررسی تأثیر الیاف سخت به‌دست‌آمده از گیاه سیسال^۱ در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. گیاه سیسال، بومی مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری آمریکای شمالی و جنوبی است، اما در حال حاضر باتوجه به پیشرفت کشاورزی، به‌طور گسترده در کشورهای گرمسیری دیگر جهان مانند آفریقا، غرب هند و خاور دور رشد می‌کند. کومار و همکاران در این تحقیق ابتدا با بررسی

(Ferreira da Costa, et al 2020) به بررسی تأثیر الیاف موز در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. به این منظور الیاف موز با ۴ اندازه مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر و با نسبت وزنی ثابت ۰/۳٪ به کار گرفته شد. آزمایش‌های مدول برجهنگی و دینامیکی، خزش دینامیکی و خستگی به روش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌ها به انجام رسید. طبق نتایج آزمایش‌ها

بود. در شکل (۷) عمرخستگی برحسب اختلاف تنش نمایش داده شده است. در پایان نتیجه گرفته شد که الیاف موز با طول بلندتر ولی با تعداد کمتر نسبت به الیاف موز با طول کوتاه‌تر ولی با تعداد بیشتر منجر به بهبود بیشتر خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی SMA می‌شود.

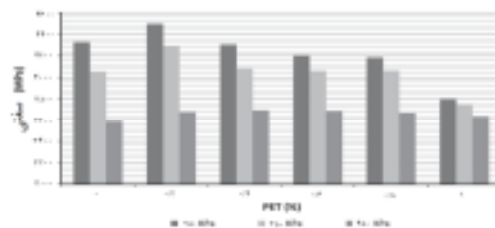


شکل ۷. عمر خستگی در برابر اختلاف تنش (Ferreira da Costa, et al 2020)

به این منظور پلی‌اتیلن ترفتالات با نسبت وزنی ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد وزنی به مخلوط آسفالتی SMA اضافه گردید. پس از انجام آزمایش‌های مدول برجهندگی و خستگی به روش کشش غیرمستقیم نتایج نشان داد که با افزودن تا ۰/۲ درصد PET در تمامی سطوح تنش مقدار مدول برجهندگی افزایش می‌یابد و سپس با افزایش مقدار PET، این مقدار کاهش پیدا می‌کند. همچنین سفتی مخلوط در مقدار ۰/۲٪ از PET افزایش یافت. با این حال، افزودن مقدار بیشتری PET باعث می‌شود که سفتی مخلوط روند نزولی داشته باشد. در شکل (شکل ۸) سفتی نمونه‌ها در سطوح تنش مختلف نمایش داده شده است. در آزمون خستگی به روش کشش غیرمستقیم، مخلوط‌های اصلاح شده با PET در مقایسه با مخلوط‌های بدون PET عمر خستگی بیشتری داشتند.

الیاف ۲۰ میلی‌متری تفاوت چندانی حاصل نشد. این رفتار نیز برای اندازه‌های الیاف ۵ و ۱۵ میلی‌متر نیز صادق بود. با این حال، تمامی مخلوط‌های تقویت شده با الیاف مقاومت بیشتری نسبت به مخلوط‌های بدون الیاف دارند. افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و افزایش عمر خستگی در نمونه‌های حاوی الیاف موز به طول ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر

(Panda, M., Suchismita, A., & Giri, J, 2013) به بررسی تاثیر الیاف نارگیل رسیده در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. به این منظور از این الیاف به میزان ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد استفاده شد. پس از انجام آزمایش‌های مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم، نتایج نشان داد که به طور کلی افزودن الیاف نارگیل موجب افزایش استقامت مارشال و وزن مخصوص و کاهش روانی و فضای خالی مخلوط آسفالتی SMA می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزودن ۰/۳٪ الیاف برای بهبود قابل توجه نتایج آزمون مارشال مناسب است. علاوه بر این مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های SMA با افزایش دمای آزمایش کاهش یافت. به طور کلی در هر دمایی، مخلوط‌های حاوی الیاف از مقاومت کششی بالاتری نسبت به مخلوط‌های دیگر برخوردار بودند. همچنین افزودن ۰/۳٪ الیاف نارگیل موجب افزایش عمر خستگی شد. (Moghaddam, T. B et al 2012) به بررسی تاثیر پلی‌اتیلن ترفتالات^{۱۱} در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند.

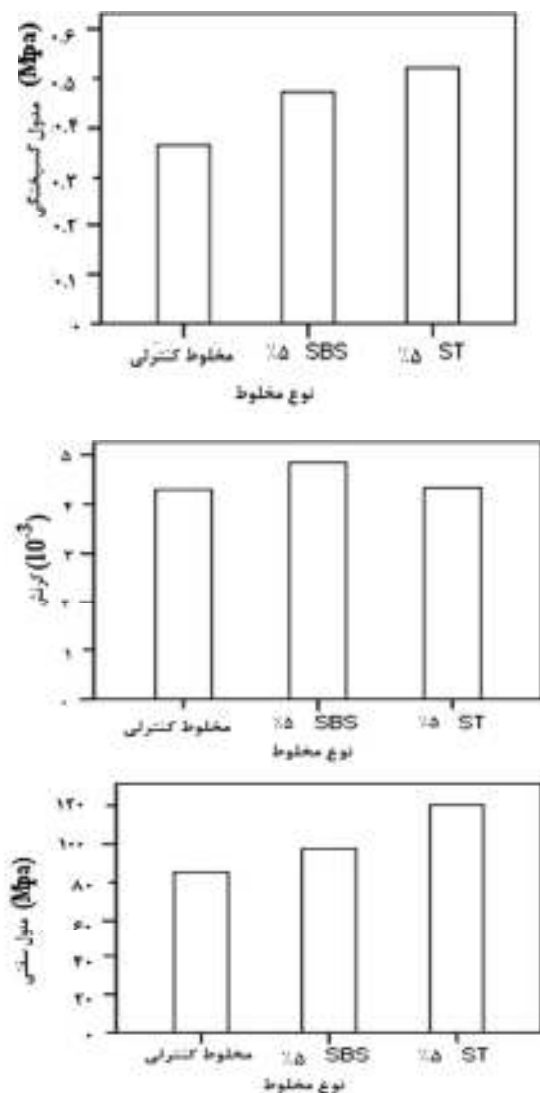


شکل ۸. نتیجه آزمون مدول سفتی برای درصد‌های مختلف PET در سه سطح تنش (Moghaddam, T. B et al 2012)

۲-۲- اختلاط افزودنی‌ها با قیر در مخلوط SMA

تحلیل و بررسی قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نشاسته در مقایسه با مخلوط‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با استایرن بوتادین - استایرن^{۱۱} (SBS)، بهبود بیشتری از خود نشان دادند. درجه نفوذ قیر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با افزایش میزان ماده اصلاح‌کننده، کاهش یافته که نشان‌دهنده بهبود مقاومت برشی در دمای میانه تا دماهای بالا است.

(Al-Hadidy AI, Tan Yi-qiu, Ayman Talib Hameed, 2011) به بررسی تأثیر نشاسته با نسبت‌های ۲/۵ و ۵ و ۷/۵ درصد وزنی قیر به‌عنوان اصلاح‌کننده و مقایسه آن‌ها با مخلوط‌های اصلاح‌شده با استایرن بوتادین - استایرن پرداختند. آزمایش‌هایی نظیر استقامت مارشال، شاخص نسبت مارشال، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، مقاومت در برابر شیارشدگی و مدول ارتجاعی بر روی مخلوط‌های SMA اصلاح‌شده با نشاسته انجام گرفت و نتایج آن با مخلوط‌های اصلاح‌نشده با نشاسته مورد



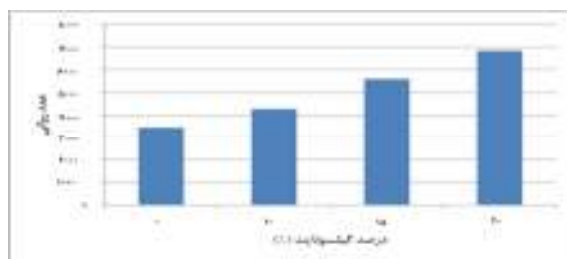
شکل ۹. خصوصیات مقاومت خمشی SBS و ST-MSMA (Al-Hadidy AI, Tan Yi-qiu, Ayman Talib Hameed, 2011)

طبیعی گیسونایت (شکل ۱۰) در طبقه‌بندی اصلاح‌کننده‌های هیدروکربنی قیر قرار داشته و می‌توان از آن جهت اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی استفاده کرد. جهت بررسی تأثیر این ماده بر روی خواص قیر و آسفالت، آزمایش‌هایی از قبیل درجه نفوذ، نقطه نرمی، کندروانی کینماتیکی بر روی قیر و آزمایش‌های مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، مدول برجهنگی، خزش دینامیکی و ویل تراک^{۱۳} را بر روی مخلوط اصلاح‌شده انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن پودر گیسونایت سبب کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه نرمی، کندروانی کینماتیکی و شاخص نفوذ گردیده است. همچنین گیسونایت موجب بهبود نتایج آزمایش استقامت مارشال، کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی، مدول برجهنگی، خزش دینامیکی و مقاومت شیار شدگی می‌گردد (شکل ۱۱ و ۱۲).

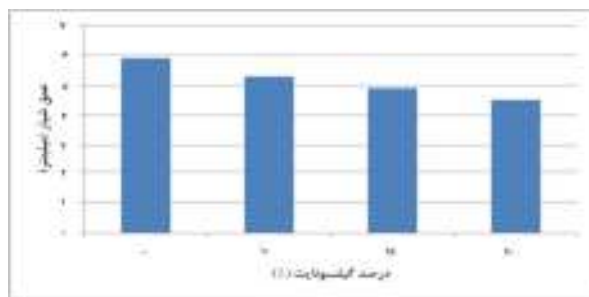
محققین در این پژوهش بیان می‌دارند که نقطه نرمی قیر نیز با افزایش میزان ماده اصلاح‌کننده افزایش یافته که این امر نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل بوده و ریزش قیر را بهبود می‌بخشد. باید توجه داشت که این موضوع می‌تواند باعث افزایش مدول ارتجاعی نیز شود (شکل ۹). در ادامه، نویسندگان با بررسی اثرات نشاسته بر اصلاح خواص مخلوط آسفالتی، دریافتند که همچنین با استفاده از نشاسته در مخلوط آسفالتی می‌توان شیار شدگی، حساسیت به رطوبت و دما را کاهش داده و اصلاح‌کننده نشاسته می‌تواند به‌عنوان ماده ضد عریان شدگی نیز استفاده شود. در این تحقیق نشان داده شد که استفاده از نشاسته بین ۵ تا ۷/۵ درصد وزنی می‌تواند عملکرد مناسبی را فراهم نماید. (Babagoli, 2015) به بررسی تأثیر پودرمعدنی گیسونایت^{۱۴} (قیرطبیعی) به میزان‌های صفر، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیر، در مخلوط SMA پرداخت. لازم به ذکر است که قیر



شکل ۱۰. قیر طبیعی گیسونایت (Babagoli, 2015)



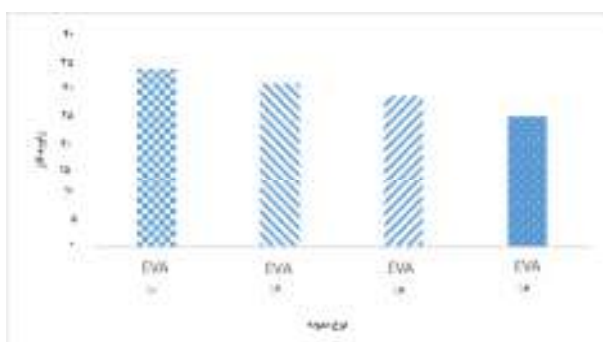
شکل ۱۱. نتایج عدد روانی (Babagoli, 2015)



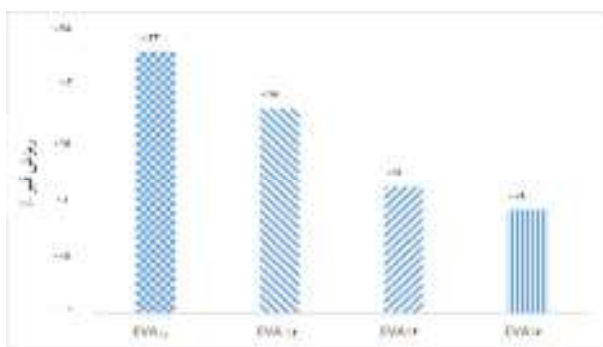
شکل ۱۲. نتایج آزمایش ویل تراک (Babagoli, 2015)

نمونه‌ها با افزایش مقدار EVA کاهش می‌یابد. در شکل (۱۳) نتایج زاویه فاز گزارش شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ریزش قیر مخلوط‌های حاوی EVA به کمتر از ۲ درصد کاهش یافت و این بهبود چشمگیری را در مقابل مخلوط‌های اصلاح‌نشده نشان می‌دهد (شکل ۱۴). در نهایت آزمون نتایج آزمایش خزش دینامیکی نیز نشان داد که با افزایش درصد EVA عدد روانی نیز افزایش خواهد یافت. با افزودن ۶ درصد EVA عدد روانی ۴۳ درصد افزایش پیدا کرد.

(Amin Chegenizadeh et al,2021) به بررسی تأثیر اتیلن وینیل استات^{۱۴} (EVA) به میزان ۲ تا ۶ درصد، در مخلوط آسفالتی SMA پرداخته و آزمایش‌هایی از قبیل آزمون خمش چهار نقطه‌ای، ویل تراک، شلنبرگ^{۱۵} و خزش دینامیکی را بر روی نمونه‌ها به منظور بررسی اثر افزودنی EVA بر مخلوط آسفالتی انجام دادند. نتایج آزمون خمش چهار نقطه‌ای نشان داد که چرخه شکست، مقاومت در برابر شیارشدگی و عمر خستگی با افزایش میزان EVA بهبود یافته است. مخلوط حاوی ۶ درصد EVA بیشترین عمر خستگی را داشت. همچنین زاویه فاز



شکل ۱۳. زاویه فاز مخلوط‌ها (Amin Chegenizadeh et al, 2021)

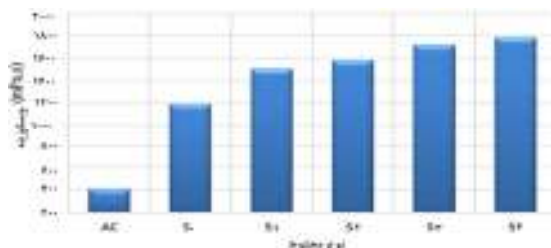


شکل ۱۴. نتایج ریزش قیر در حضور EVA (Amin Chegenizadeh et al,2021)

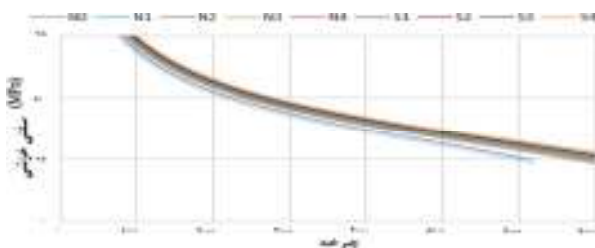
می‌باشند. در این تحقیق از الیاف سلولز و پلیمر استایرن بوتادین استایرن (SBS) در کنار درصدهای مختلف ذرات رس نانو مونت موریلونیت در محدوده ۱ تا ۴ درصد وزنی قیر استفاده شد. ویژگی‌های عملکردی مختلف آسفالت شامل استقامت مارشال و روانی، ویژگی‌های خزشی و مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط‌های SMA که دارای مقادیر مختلف ذرات نانو رس

تأثیر نانو رس‌ها در مخلوط آسفالتی SMA را مورد بحث و بررسی قرار دادند. به دلیل ساختار صفحه‌ای ذرات نانو رس و داشتن نسبت طول به عرض زیاد، این مواد اثرات قابل توجهی در خواص قیر خواهند داشت. در این مقاله اثرات نانورس‌ها در دو دسته از مخلوط‌های SMA در دمای بالا بررسی شده است. دسته اول دارای الیاف بوده و دسته دوم دارای افزودنی پلیمری

مخلوط‌های SMA حاوی قیر اصلاح‌شده با پلیمر باعث افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی شده است (شکل ۱۶). علاوه بر این، مخلوط SMA حاوی ۳ درصد نانو رس دارای بیشترین مقاومت در برابر شیار شدگی و کمترین تغییر شکل پلاستیک نسبت به سایر مخلوط‌ها را داشته است.



شکل ۱۵. ویسکوزیته چرخشی قیر اصلاح‌شده با نانو رس (Mahmoud Ameri et al, 2017)



شکل ۱۶. سختی خزشی (Mahmoud Ameri et al, 2017)

SMA در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. به منظور بررسی تغییر در ویژگی‌های مخلوط اصلاح‌شده، آزمایش حساسیت رطوبتی، خستگی به روش کشش غیرمستقیم، مارشال، ویل تراک بر روی نمونه‌ها انجام گردید. نتایج نشان داد که SBR به صورت مایع و با اضافه نمودن به مخلوط قیر و سنگدانه‌ها، مقاومت در برابر خستگی و شیارشدگی، مقاومت مارشال و ریزش قیر را کاهش داده اما با اضافه نمودن SBR مایع و پس از قیر به مخلوط باعث افزایش پارامتر حساسیت رطوبتی و اضافه کردن آن قبل از قیر به مخلوط موجب کاهش چشم‌گیر این پارامتر می‌گردد. همچنین طبق نتایج به دست آمده، افزایش درصد پلیمر SBR به صورت جامد و مخلوط در قیر باعث افزایش مقاومت در برابر خستگی، شیارشدگی، مقاومت مارشال و کاهش میزان ریزش قیر می‌گردد. (Ameli and Choubda, 2019)

به بررسی تأثیر افزودنی ساسوبیت^{۱۹} با نسبت ۱،۲،۳،۴ درصد وزنی قیر در مخلوط SMA و تأثیر آن بر مقاومت کششی غیرمستقیم، پارامترهای حجمی، وزنی و مقاومت در برابر

هستند، نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین نتایج آزمون‌های کلاسیک قیر و ویسکوزیته چرخشی (شکل ۱۵) در قیرهای اصلاح‌شده با SBS و قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر- نانو رس نشان‌دهنده افزایش ویژگی‌های عملکردی قیر در حضور ذرات نانو رس است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که

(Al-Hadidy AI and Tan Yi-qiu, 2010) به بررسی تأثیر دو نوع پلیمر پلاستومر^{۱۶} و پلی‌پروپیلن^{۱۷} در مخلوط آسفالتی SMA با استفاده از آزمایش‌های مارشال، مقاومت کششی و فشاری استاتیکی و شاخص نسبت مارشال بر روی نمونه‌ها پرداختند. همچنین خصوصیات رئولوژیکی قیر قبل و بعد از پیرشدگی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج تحقیق نشان دهنده افزایش این خصوصیات قبل و بعد از پیرشدگی شده است. همچنین نقطه نرمی قبل و بعد از پیرشدگی با افزودن پلیمر پلاستومر افزایش خواهد یافت، که این امر نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل بوده و مقدار شاخص نسبت مارشال این نتایج را تأیید می‌نماید. مقادیر شاخص نفوذ نشان‌دهنده کاهش حساسیت به دما در مخلوط‌های حاوی پلیمر پلاستومرها است. (Behbahani, Moniri, Takhtfirooz, 2018)

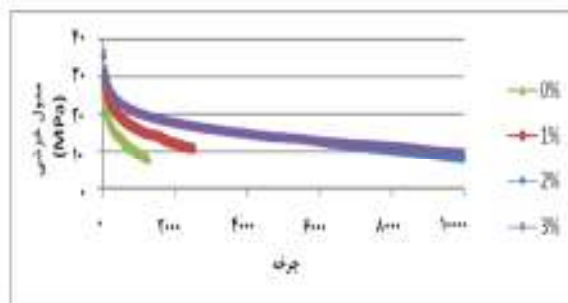
به بررسی اثر افزودنی پلیمری استایرین بوتادین رابر^{۱۸} به صورت مخلوط در قیر در درصدهای ۳، ۵، ۷ درصد وزنی قیر و همچنین مایع به صورت مستقیم به میزان ۳ درصد وزنی قیر در مخلوط جهت بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط

وزنی قیر و ۰/۶ درصد وزنی مخلوط استفاده شده است و نسبت استقامت مارشال به روانی، فرو ریزش قیر از مخلوط و آزمایش تعیین درصد شیارشدگی به روش فرانسوی نیز انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میزان قیر بهینه برای نمونه‌های بدون افزودنی ۶/۰۳ درصد، برای نمونه‌های حاوی الیاف ۶/۳۹ درصد، نمونه‌های حاوی SBS ۶/۶۷ درصد و در نهایت برای نمونه‌های حاوی الیاف و SBS به صورت توأم ۶/۵۶ درصد است (شکل ۱۸). بر اساس نتایج حاصل از آزمایش استقامت مارشال، نمونه‌های حاوی SBS و الیاف به صورت توأم، دارای استقامت بالاتر و شیارشدگی کمتر نسبت به نمونه‌های فاقد افزودنی است (شکل ۱۹). همچنین باید دانست که نمونه‌های حاوی الیاف پروپلاست و SBS به صورت توأم علاوه بر بهبود خصوصیات مکانیکی، موجب کاهش ریزش قیر نیز خواهند شد.

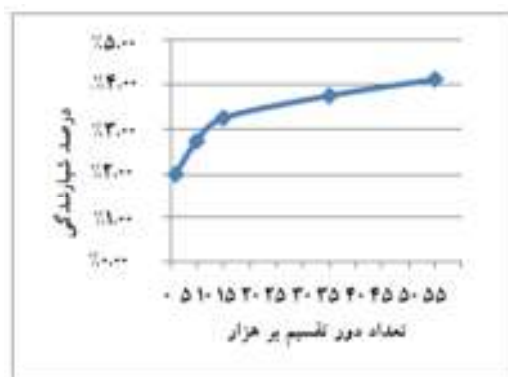
شیارشدگی مخلوط‌های SMA با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ساسوبیت تأثیر قابل توجهی بر قیر خالص گذاشته و باعث بهبود نقطه نرمی، درجه نفوذ، ویسکوزیته قیر و درجه عملکردی قیر نیز می‌گردد.

همچنین نمونه‌های حاوی ساسوبیت در آزمایش مدول برجهندگی، کشش غیرمستقیم، خزش دینامیکی (شکل ۱۷) عملکرد بهتری از خود نسبت به نمونه‌های شاهد نشان داد. باید توجه نمود که ساسوبیت باعث کاهش دمای اختلاط و تراکم و هزینه ساخت نمونه‌های آسفالتی SMA نیز خواهد گردید.

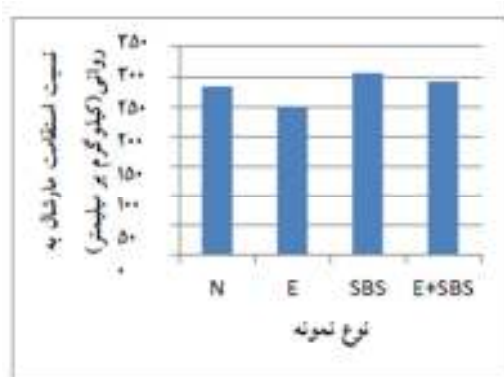
(Saedi, Sadeghian asl, Yasrebi, 2017) به بررسی تأثیر توأم الیاف پروپلاست و استایرن بوتادین استایرن در مخلوط آسفالتی SMA و تعیین درصد قیر بهینه با استفاده از آزمایش مقاومت مارشال پرداختند. مواد افزودنی SBS و الیاف پروپلاست بر مبنای مطالعات گذشته، به ترتیب به مقدار ۵ درصد



شکل ۱۷. مقایسه نتایج حاصل از آزمایش خزش برای نمونه‌های با درصد مختلف ساسوبیت (Ameli and Choubdar, 2019)



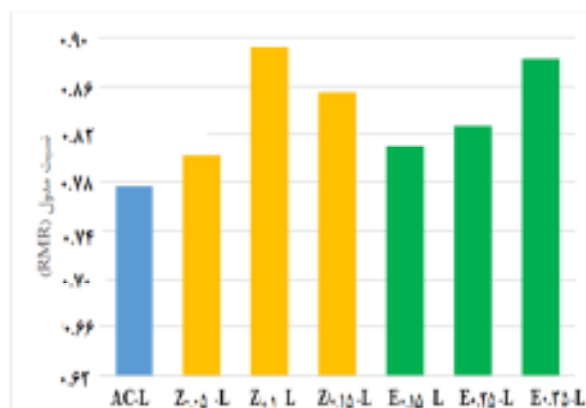
شکل ۱۸. منحنی درصد شیارشدگی در نمونه‌های حاوی SBS و الیاف (Saedi, Sadeghian asl, Yasrebi, 2017)



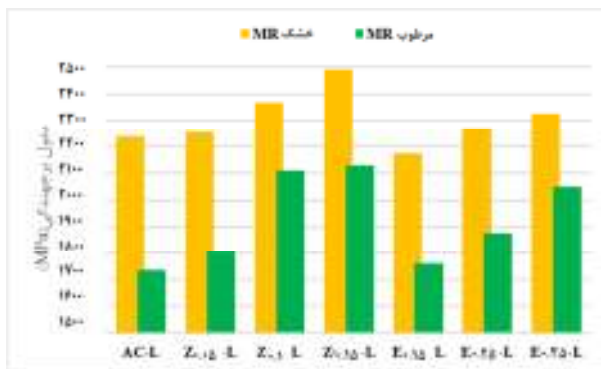
شکل ۱۹. نتایج آزمایش نسبت استقامت مارشال به روانی (Saedi, Sadeghian, Yasrebi, 2017)

ایونیک به ترتیب با مقادیر ۰/۱ و ۰/۳۵ درصد وزنی قیر بیشترین مقادیر سفتی را به خود اختصاص دادند (شکل ۲۱). همچنین با مقادیر ذکر شده از دو افزودنی چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها و مقاومت کششی غیرمستقیم بهبود داده شد (شکل ۲۲). لازم به ذکر است که اثر زایکوترم بر مصالح آهکی بیشتر از ایونیک بوده و ایونیک از این نظر صرفه اقتصادی نخواهد داشت. همچنین مشاهده گردید که زایکوترم به مقدار ۰/۱۵ درصد موجب بهبود مقاومت در برابر شیار شدگی و خستگی مخلوط آسفالتی SMA نیز می‌گردد.

(Ameri and Zoormand, 2019) به بررسی تأثیر دو افزودنی ایونیک^{۲۰} به میزان ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵ درصد و زایکوترم^{۲۱} به میزان ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ درصد وزنی قیر، بر مخلوط‌های SMA پرداختند. در این پژوهش، آزمایش‌های مدول برجهنگی (شکل ۲۰)، مقاومت کششی غیرمستقیم، آب جوشان و خزش دینامیکی روی نمونه‌های آسفالتی جهت سنجش حساسیت رطوبتی و مقاومت در برابر شیار شدگی انجام گردید. نتایج آزمایش آب جوشان نشان داد که زایکوترم و ایونیک به‌عنوان افزودنی‌های ضد عریان شدگی موفق عمل کرده و باعث بهبود عریان شدگی می‌شوند. نمونه‌های حاوی زایکوترم و



شکل ۲۰. نسبت مدول برجهنگی (Ameri and Zoormand, 2019)



شکل ۲۱. تغییرات مدول برجهنگی نمونه‌های مختلف در حالت خشک و اشباع (Ameri and Zoormand, 2019)



شکل ۲۲. مقاومت کشش غیرمستقیم برای دو حالت خشک و اشباع (Ameri and Zoormand, 2019)

نشان داد که گرافیت به میزان ۱۵ درصد وزنی قیر نسبت به سایر مقادیر از نظر پاسخ الاستیک، انرژی جذب شده، رفتار تغییر شکل پس از بروز ترک اولیه و همچنین سیکل‌های بارگذاری که منجر به خرابی می‌گردد، موثرتر است. در جدول (جدول ۲) نتایج آزمایش مارشال گزارش شده است.

(Kök, B. V. et al, 2017) به بررسی تاثیر گرافیت بر خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. به این منظور گرافیت با سه نسبت ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیر به قیر اضافه گردید. پس از انجام آزمایش‌های مارشال، آزمایش خستگی به روش کشش غیرمستقیم و مدول سفتی انجام گرفت و نتایج

جدول ۲. نتایج آزمایش مارشال نمونه‌های مختلف

(Kök, B. V. et al, 2016)

نوع نمونه	G_{mb}	V_a (%)	VMA (%)	VFA (%)	استقامت مارشال (kgf)	میزان روانی (mm)
G0	۲/۳۰۷	۳/۵۹	۱۷/۰۷	۷۹/۹۱	۹۶۲/۵۵	۶/۸۰
G10	۲/۳۱۳	۳/۳۴	۱۶/۸۶	۸۰/۱۰	۹۳۸/۲۳	۶/۳۳
G15	۲/۳۰۶	۳/۵۹	۱۷/۰۸	۷۸/۹۶	۹۲۹/۴۰	۶/۶۲
G20	۲/۳۰۸	۳/۵۳	۱۷/۰۲	۷۹/۲۷	۹۰۵/۱۸	۶/۸۶

میزان ۱۷ تا ۲۹ درصد کاهش می‌یابد. همچنین بر طبق نتایج نانو Al_2O_3 می‌تواند شیارشدگی قیر را کاهش دهد که در نتیجه تغییر شکل دائمی در مخلوط‌های SMA نیز کاهش پیدا می‌کند. در پایان پس از مقایسه نتایج و با در نظر گرفتن جنبه اقتصادی و فنی، مقدار ۰/۶ درصد نانو ذرات اکسید آلومینیوم به عنوان مقدار بهینه تعیین گردید.



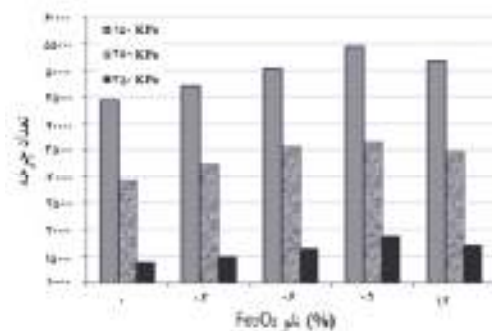
شکل ۲۳. نانو ذرات اکسید آلومینیوم مورد استفاده در این مطالعه (Chelovian, A., & Shafabakhsh, G, 2017)

پرداختند. به این منظور به میزان ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ درصد وزنی قیر از این افزودنی‌ها به قیر اضافه گردید. تأثیر این نانو افزودنی‌ها بر رفتار مکانیکی مخلوط SMA با استفاده از آزمایشات ویل تراک، خستگی به روش کشش غیرمستقیم و مدول برجهنگی بررسی شد. نتایج این تحقیق استفاده از نانو ذرات را برای افزایش عمر خستگی مخلوط‌های SMA پیشنهاد می‌کند. بر طبق نتایج آزمایش‌ها، نمونه‌های حاوی نانو افزودنی در مقایسه با نمونه‌های معمولی عمر بیشتری دارند. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از ۱/۲٪ نانو SiO_2 و ۰/۹٪ نانو TiO_2 بیشترین عمر خستگی برای مخلوط SMA در تمام دما و تنش‌ها بدست آمده است. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که احتمال بروز ترک و شروع پدیده خستگی در مخلوط‌های اصلاح شده با ۱/۲٪ نانو SiO_2 یا ۰/۹٪ نانو TiO_2 در مقایسه با نمونه‌های شاهد به طور قابل توجهی کمتر باشد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که مقدار بهینه نانو ذرات TiO_2 و SiO_2 برای کاهش شیارشدگی در مخلوط‌های SMA به ترتیب ۰/۹٪ و ۱/۲٪ می‌باشد. شکل (۲۵) نتایج عمق شیارشدگی را نشان می‌دهد. عمق شیارشدگی نمونه‌ها بستگی زیادی به بارگذاری و دما دارد و افزودن نانو ذرات به قیر باعث بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی نمونه‌های SMA می‌گردد.

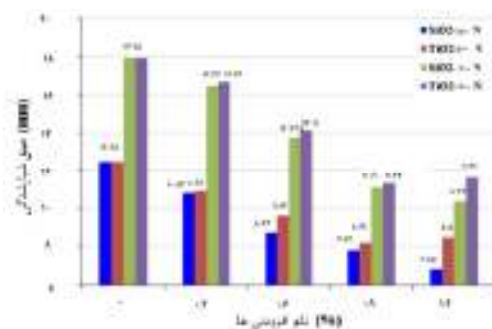
(Chelovian, A., & Shafabakhsh, G, 2017) به بررسی تاثیر نانو ذرات اکسید آلومینیوم (شکل ۲۳) در مخلوط SMA پرداختند. به این منظور نانو ذرات اکسید آلومینیوم با نسبت ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ درصد به قیر افزوده شد. آزمایشات خزش دینامیکی، ویل تراک و خستگی به روش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزودن نانو Al_2O_3 در تمامی دما و تنش‌ها، کرنش نهایی به

(Kordi, Z., & Shafabakhsh, G, 2017) با افزودن نانو Fe_2O_3 به قیر به میزان ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ درصد وزنی قیر به بررسی تاثیر این نانو افزودنی در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که برای دماها و تنش‌های مختلف، عمر خستگی^{۲۲} نمونه‌ها با درصد مطلوب (۰/۹٪ نانو Fe_2O_3) نسبت به نمونه شاهد بین ۱۵ تا ۳۵٪ افزایش پیدا کرد. افزایش عمر خستگی منجر به تعویق در بروز ترک‌های ناشی از خستگی می‌گردد. در شکل (۲۴) عمر خستگی نمونه‌های SMA حاوی نانو Fe_2O_3 در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. افزودن نانو Fe_2O_3 منجر به افزایش عمر خستگی می‌شود. همچنین در دماها و میزان بارگذاری مختلف، میزان شیارشدگی نمونه‌های حاوی ۰/۹ درصد نانو Fe_2O_3 حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد کمتر از میزان عمق شیارشدگی در نمونه‌های شاهد است. بنابراین، افزودن نانو Fe_2O_3 به مخلوط‌های آسفالتی به طور متوسط موجب بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی به میزان ۳۳٪ می‌شود.

(Sadeghnejad, M., & Shafabakhsh, G., ۲۰۱۷) به بررسی تاثیر نانو SiO_2 و نانو TiO_2 در مخلوط آسفالتی SMA



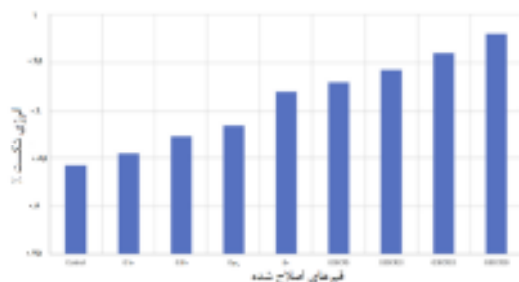
شکل ۲۴. عمر خستگی نمونه‌های SMA حاوی نانو Fe₂O₃ در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد (Kordi, Z., & Shafabakhsh, G.)



شکل ۲۵. عمق شیاردگی در مقابل میزان نانوافزودنی برای مخلوط‌های مختلف SMA در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد (Sadeghnejad, M., & Shafabakhsh, G 2017)

شد. بر اساس مقادیر انرژی شکست^{۲۴} نمونه‌ها که در شکل ۲۶ نمایش داده شده، افزودن گیلسونایت باعث افزایش انرژی شکست می‌گردد. دلیل این امر افزایش الاستیسیته نمونه‌ها با استفاده از گیلسونایت است که منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها در برابر ترک خوردگی می‌گردد. همچنین، استفاده از خرده لاستیک نیز منجر به بهبود انرژی شکست گردید. بیشترین مقدار انرژی شکست متعلق به نمونه حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک است. مخلوط‌های حاوی گیلسونایت مقدار انرژی شکست کمتری نسبت به مخلوط‌های اصلاح شده با گیلسونایت و خرده لاستیک داشت.

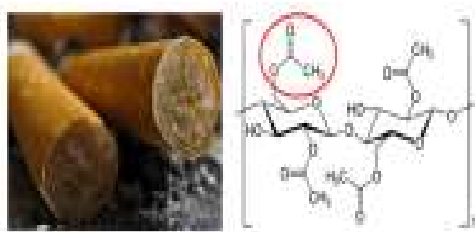
(Ameli, A. et al 2021) به بررسی تاثیر گیلسونایت بر خصوصیات مخلوط‌های SMA حاوی خرده لاستیک^{۲۳} پرداختند. به این منظور در این مطالعه ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد وزنی قیر گیلسونایت و ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ درصد خرده لاستیک بکار گرفته شد. بر اساس نتایج آزمون ITS، مقادیر ITS مخلوط‌های اصلاح شده با گیلسونایت بیشتر از نمونه‌های اصلاح نشده بود. با افزایش مقدار گیلسونایت، مقادیر ITS افزایش یافت. همچنین استفاده از خرده لاستیک منجر به افزایش مقدار ITS شده است. مخلوط SMA حاوی ۲۰٪ خرده لاستیک بیشترین مقدار ITS را دارا بود. همچنین، در تمامی مخلوط‌ها افزودن خرده لاستیک منجر به افزایش مقاومت در برابر رطوبت



شکل ۲۶. مقادیر انرژی شکست نمونه‌های مختلف حاوی افزودنی (Ameli, A. et al, 2021)

دورانی، ویسکوزیته قیر حاوی الیاف ته سیگار روند افزایشی داشت که به دلیل جامد بودن الیاف در نمونه قیر می‌باشد. همچنین معیارهای ترک‌خوردگی خستگی با آزمایش جاروب دامنه خطی^{۲۵} شبیه‌سازی شد و مقاومت در برابر آسیب احتمالی ناشی از خستگی کاهش یافت.

(Rahman, M. T. et al, 2020) به بررسی تاثیر الیاف ته سیگار در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند (شکل ۲۷). به این منظور ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد الیاف ته سیگار به قیر اضافه شد. نتایج آزمایش درجه نفوذ و نقطه نرمی نمونه‌های قیر اصلاح شده با الیاف ته سیگار شباهت زیادی به نمونه شاهد نشان داد که بدون هیچ‌گونه افزودنی تهیه شده است. در آزمایش ویسکوزیته

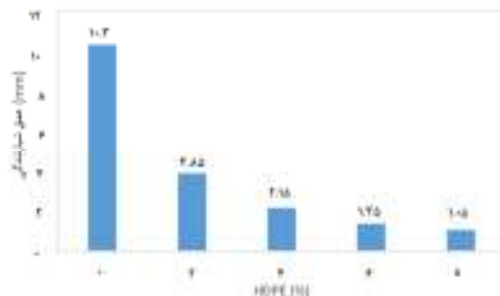


شکل ۲۷. الیاف ته سیگار بر اساس استات سلولز (سمت چپ) و ساختار پلیمری استات سلولز (راست). یکی از گروه‌های استات سلولز با دایره قرمز مشخص شده است.

(Rahman, M. T. et al, 2020)

حاوی افزودنی را نشان می‌دهد. حداقل عمق شیارشدگی برای نمونه حاوی ۸ درصد افزودنی به مقدار ۱/۰۵ میلی‌متر ثبت شد. همچنین حداقل و حداکثر مقادیر استقامت مارشال^{۲۷} به ترتیب ۱۷ و ۱۹/۲ کیلونیوتن برای نمونه‌های حاوی صفر و ۴ درصد HDPE اندازه‌گیری شد. در آزمون خمش چهارنقطه‌ای، افزودن HDPE به مخلوط‌های SMA سفتی خمشی اولیه را افزایش می‌دهد که این مقدار، بسیار بیشتر از مخلوط شاهد SMA بود. بیشترین مقدار سفتی خمشی اولیه^{۲۸} برای مخلوط‌های SMA حاوی ۲٪ HDPE، به مقدار ۶۶۲۴ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

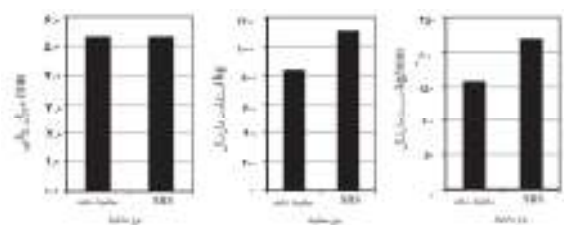
(Chegenizadeh et al, 2021) به بررسی تاثیر پلی‌اتیلن با چگالی زیاد^{۲۶} (HDPE) بر خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. به این منظور از HDPE به میزان ۲، ۴، ۶، ۸ درصد وزنی قیر استفاده شد. آزمایش‌های مقاومت مارشال، ویل تراک و آزمون خمش چهارنقطه‌ای انجام گرفت. مقاومت شیارشدگی مخلوط اصلاح شده با HDPE بیشتر از مخلوط آسفالتی SMA بدون افزودنی بود. با افزودن ۲٪ HDPE عمق شیارشدگی از ۱۰/۳ میلی‌متر به ۳/۸۵ میلی‌متر کاهش یافت. شکل (۲۸) عمق شیارشدگی نمونه‌های SMA



شکل ۲۸. عمق شیارشدگی نمونه‌های SMA حاوی افزودنی (Chegenizadeh et al, 2021)

به بهبود مقاومت در برابر رطوبت و افزایش مقاومت در برابر پیرشدگی شدند. (Sengul, C. E et al, 2013) به بررسی تاثیر پلیمر استایرن بوتادین استایرن در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. بر طبق مطالعه صورت گرفته استقامت مارشال و مقادیر نسبت مارشال^{۳۰} مخلوط‌های حاوی SBS نسبت به مخلوط‌های کنترل بیشتر بود. در شکل (۲۹) پارامترهای آزمون مارشال برای مخلوط‌های شاهد و دارای SBS نشان داده شده است. با توجه به مقادیر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم، مخلوط‌های SBS نسبت به مخلوط‌های شاهد مقاومت بیشتری در برابر رطوبت دارند. همچنین مخلوط‌های اصلاح شده با SBS منجر به افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی شدند.

(Nguyen, H. P. et al, 2021) به بررسی تاثیر توام نانوسیلیس و پلی‌وینیل‌کلرید^{۲۹} در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. به این منظور PVC به میزان ۵ درصد و نانو سیلیس به میزان ۱، ۳، ۵ درصد به قیر اضافه گردید. وقتی PVC و نانو سیلیس به صورت جداگانه به مخلوط‌های SMA اضافه شدند. خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های SMA بهبود یافت. هنگامی که هر دو افزودنی‌ها با هم به مخلوط SMA اضافه شدند، خصوصیات مخلوط‌های SMA به طور قابل توجهی بهبود یافت. مخلوط‌های SMA اصلاح شده در دماهای بالا مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل نشان دادند. همچنین مخلوط‌های SMA حاوی ۵٪ PVC و ۱٪ نانو سیلیس منجر



شکل ۲۹. پارامترهای مارشال برای مخلوط‌های شاهد و SBS (Sengul, C. E et al, 2013)

آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته چرخشی، رثومتر برشی دینامیکی، مدول برجهدگی، خزش دینامیکی و خستگی انجام شد. نتایج نشان داد که پلیمر EVA در بهبود خصوصیات قیر خالص بسیار موثر است و عملکرد SMA را در برابر دما و تعداد چرخه‌های بارگذاری تا لحظه خرابی به ویژه در آزمایش خزش دینامیکی به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. در نهایت ۴٪ EVA به دلیل ملاحظات اقتصادی به عنوان مقدار بهینه در

(Aboutalebi Esfahani, M., & Mirian, V, 2020) به ارزیابی عملکرد پلیمر اتیلن‌وینیل استات (EVA) و الیاف شیشه و ترکیب آنها در مخلوط SMA پرداختند. خصوصیات فیزیکی قیر اصلاح شده با EVA به مقدار ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی قیر و خصوصیات مکانیکی مخلوط SMA ساخته شده توسط ۳، ۴ و ۵ درصد از EVA و ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد الیاف شیشه مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور،

فیزیکی قیر را بهبود می‌بخشد. همچنین آزمایش پایداری در ذخیره‌سازی^{۳۳} نشان داد که استفاده از SBR/PPA و CNT باعث افزایش پایداری در ذخیره‌سازی قیر می‌شود. بر اساس نتایج آزمایش ITS، مقادیر ITS مخلوط‌های حاوی افزودنی SBR/PPA بیشتر از مخلوط شاهد بود. با افزودن CNT به اتصال دهنده‌های اصلاح شده SBR/PPA، مقادیر ITS افزایش یافت. همچنین، مقدار ITS با افزایش CNT تا ۱/۵ درصد بهبود داده شد. با افزودن مقادیر بیشتر CNT به مخلوط SMA، مقادیر ITS کاهش یافت. بر اساس نتایج آزمون مدول برجهنگی، استفاده از SBR/PPA باعث افزایش مقدار مدول برجهنگی می‌گردد. این افزایش باعث بهبود انعطاف‌پذیری مخلوط‌ها با افزودن SBR/PPA می‌شود. همچنین، استفاده از CNT تا ۱/۵ درصد باعث افزایش سفتی نمونه‌ها می‌شود. با افزودن CNT بیشتر از ۱/۵ درصد، مقدار مدول برجهنگی کاهش می‌یابد. نتایج انرژی شکست مخلوط‌ها نشان داد که SBR/PPA منجر به افزایش انرژی شکست نمونه‌ها می‌شود. همچنین، افزودن CNT انرژی شکست مخلوط‌ها را افزایش داده و با افزایش مقدار CNT تا ۱/۵ درصد، انرژی شکست بهبود می‌یابد. با افزودن مقدار CNT بیشتر، مقادیر انرژی شکست کاهش یافت. شکل (۳۰) انرژی شکست مخلوط‌های اصلاح شده را نشان می‌دهد.

نظر گرفته شد. در ادامه نتایج نشان داد الیاف شیشه با ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی کل مخلوط بر عملکرد SMA به دلیل شکنندگی و انعطاف ناپذیری بالا در برابر بارگذاری دینامیکی تأثیر منفی می‌گذارد. با این حال، در همه آزمایش‌ها، الیاف شیشه با ۰/۱ درصد وزنی کل مخلوط تأثیر منفی نداشت و نتایج را در مقایسه با نمونه بدون الیاف بهبود بخشید. به دلیل شکنندگی زیاد الیاف شیشه با نسبت ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی کل مخلوط، خصوصیات عملکردی مخلوط SMA حاوی الیاف شیشه و پلیمر EVA بهبود داده نشد و منجر به ختشی شدن اثرات مثبت EVA گردید. با این حال، ترکیب ۴٪ پلیمر EVA با ۰/۱٪ الیاف شیشه باعث بهبود جزئی در عملکرد SMA در مقایسه با نمونه بدون الیاف شد. (Ameli, A., et al 2020) به بررسی تأثیر پلی فسفریک اسید^{۳۱}، استایرن بوتادین رابر و نانولوله‌های کربنی^{۳۲} (CNT) در مخلوط SMA پرداختند. در این مطالعه نانولوله‌های کربنی به میزان ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد، استایرن بوتادین رابر (SBR) به میزان ۲ درصد و پلی فسفریک اسید (PPA) به میزان ۰/۵ درصد وزنی به قیر اضافه گردید. آزمایش‌های مختلفی از قبیل نقطه نرمی، درجه نفوذ و رئومتر برشی دینامیکی بر روی قیر انجام شد. همچنین آزمایش مدول برجهنگی، مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) و نسبت انرژی شکست بر روی مخلوط آسفالتی SMA انجام گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از SBR/PPA خواص



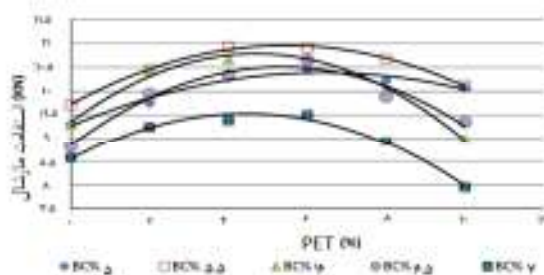
شکل ۳۰. انرژی شکست مخلوط‌های مختلف (Ameli, A. et al, 2020)

PET به مقدار ۲ و ۴٪، استقامت مارشال ابتدا به طور قابل توجهی افزایش یافت، اما با افزایش مقدار بیشتر از ۴٪، استقامت مارشال روند نزولی پیدا کرد (شکل ۳۱). در مقابل، میزان روانی با یک روند نزولی شروع و با افزودن بیشتر PET به مخلوط

(Ahmadinia, E., et al 2011) به بررسی تأثیر پلی اتیلن ترفتالات در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. به این منظور PET با درصد‌های مختلف ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰٪ پس از اختلاط قیر و مصالح سنگی به مخلوط اضافه می‌گردد. با اضافه نمودن

جهت استفاده در مخلوط آسفالتی SMA ۶ درصد وزنی قیر بود که این مقدار منجر به افزایش استقامت مارشال و نسبت مارشال شد.

افزایش یافت. یاتوجه به بهبود نسبت مقاومت مارشال، PET سفتی مخلوط را افزایش داده و مقاومت آن را در برابر تغییر شکل دائمی را بهبود می‌بخشد. در پایان مقدار مناسب PET

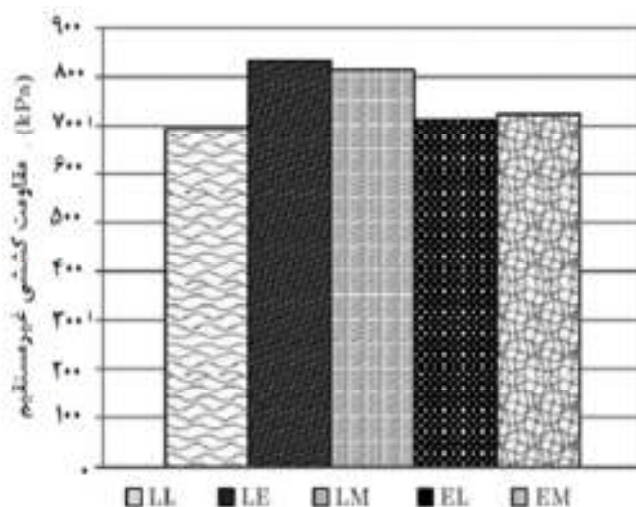


شکل ۳۱. استقامت مارشال در مقابل میزان PET استفاده شده برای هر میزان قیر (Ahmadinia, E., et al, 2011)

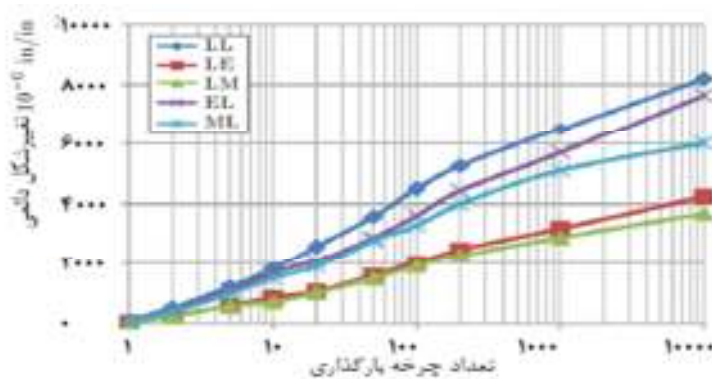
۲-۳- استفاده از افزودنی‌ها به‌عنوان جایگزین مصالح سنگی (Askeri Karakus, 2011)

استفاده شوند. (A.Behnood, M.Ameri, 2012) به بررسی تأثیر سرباره فولاد، که در ایران مقادیر قابل‌توجهی هر ساله به‌عنوان محصول جانبی از صنایع فولاد تولید می‌شود، در مخلوط‌های آسفالتی SMA پرداختند. استفاده از سرباره‌های فولادی در پروژه‌های صنعتی به دلایل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک رویکرد ارزشمند است. سنگ‌دانه‌های سرباره فولادی دارای شکل بسیار زاویه‌ای بوده و دارای بافت سطحی زیر هستند. سرباره‌های فولادی فرآوری شده دارای خواص مکانیکی مطلوبی برای جایگزینی سنگ‌دانه‌ها، از جمله مقاومت در برابر سایش، سختی و مقاومت برشی زیاد می‌باشند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سرباره فولادی به‌عنوان بخش درشت سنگ‌دانه‌ها می‌تواند باعث افزایش استقامت مارشال، افزایش مدول برجهندگی، مقاومت کششی (شکل ۳۲) و افزایش مقاومت در برابر رطوبت شده و همچنین نتایج آزمون خزش دینامیکی (شکل) نشان می‌دهد مخلوط‌های حاوی سرباره فولاد به‌عنوان بخش درشت‌دانه مصالح در برابر تغییر شکل دائمی (شیارشده‌گی) مقاومت بهتری داشته و عمق شیار شدگی در آن‌ها کمتر است. همچنین محققین در این آزمایش دریافتند که سرباره فولاد دارای مقادیر نسبت مارشال بالاتری بوده که بیانگر سفتی زیاد و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی است.

در پژوهشی به بررسی تأثیر ضایعات بازالت دیاربرگر^{۳۴} کارخانه‌های فرآوری سنگ به‌عنوان سنگ‌دانه و مواد معدنی پرکننده به میزان ۱۰/۱ درصد وزنی کل، در مخلوط آسفالتی SMA پرداخت. در این پژوهش، ابتدا برخی از خواص مهم مواد زائد ریز و درشت بازالت مستخرج از کارخانه‌های فرآوری بازالت در دیاربرگر، با انجام آزمایش‌هایی مانند تجزیه و تحلیل شیمیایی، وزن مخصوص، جذب آب، آزمایش لس‌آنجلس، دوام در برابر محلول سدیم سولفات و شاخص پوکی مشخص شد و می‌توان گفت که بازالت دیاربرگر برای تولید SMA در حد قابل قبولی قرار دارد. سپس در بخش بعدی آزمایش‌های مارشال و روانی نیز بررسی گردید که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد استفاده از ضایعات بازالت در مخلوط آسفالتی، استقامت مارشال را افزایش داده و ریزش قیر را در حد مطلوب نگه می‌دارد که خود نشان‌دهنده بهبود خواص مخلوط آسفالتی SMA با به کار بردن این ضایعات است. همچنین نتایج آزمایش مارشال نشان داد که مخلوط حاوی ضایعات بازالت از مقاومت بالایی برخوردار بوده و خواص ریزش قیر بهبود یافته است. در نهایت باتوجه به نتایج این پژوهش می‌توان گفت استفاده از ضایعات بازالت در تولید SMA تنها مشکلات زیست‌محیطی را برطرف می‌سازد بلکه مواد ساخت پایدارتر و ارزان‌تری را نیز تولید کرده و مواد زائد می‌توانند به‌عنوان سنگ‌دانه‌ها و مواد معدنی پرکننده در SMA



شکل ۳۲. نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی (A.Behnood, M.Ameri, 2012)

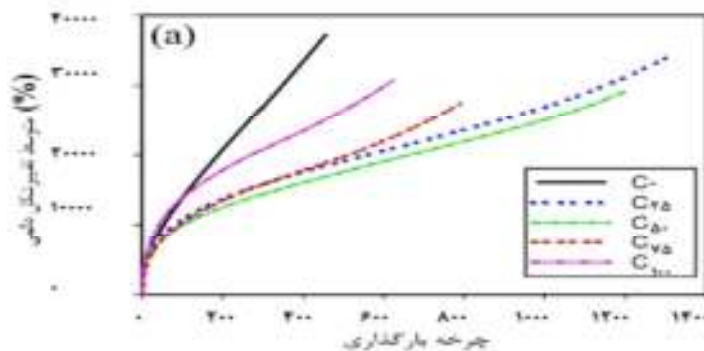


شکل ۳۳. نتایج آزمایش‌های خزش دینامیکی (A.Behnood, M.Ameri, 2012)

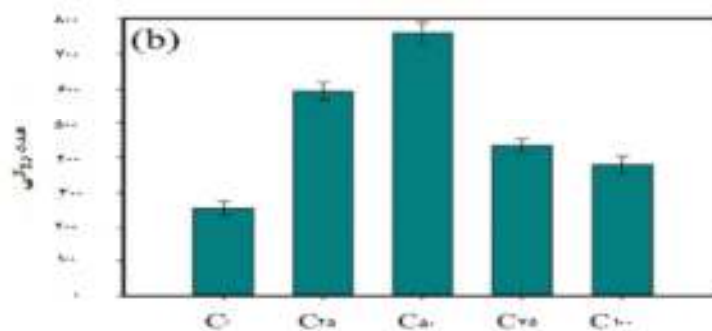
به رطوبت دارد. همچنین با استفاده از ۵۰ درصد پودر کربن آمورف در مخلوط SMA، مدول ارتجاعی و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط افزایش یافته و نتایج آزمایش خزش دینامیکی و آزمایش ویل تراک نشان می‌دهد که استفاده از این مقدار کربن موجب بهبود شیار شدگی شده است (شکل ۳۴).

(Mohammad Saeed Pourtahmasb and Mohamed Rehan Karim, 2014) به بررسی تأثیر مصالح بتن بازیافتی^{۳۹} (RCA) در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. لازم به ذکر است که این مصالح با تخریب سازه‌های بتنی مانند ساختمان‌ها، پل‌ها و سدها تولید گردیده و بازیافت مواد زائد مانند بتن بازیافتی، مزایای زیست‌محیطی بسیاری در پی دارد.

(Habibnejad Korayem et al 2020) به بررسی تأثیر پودر کربن آمورفس^{۳۵} - نوعی از مواد زائد که در طول فرایند تولید پارافین به دست می‌آید، به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. در این تحقیق، حساسیت رطوبتی، مدول ارتجاعی و شیار شدگی مخلوط‌های SMA حاوی ۱۰۰-۰ درصد پودر کربن به عنوان فیلر مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش انرژی آزاد سطح^{۳۳} نشان داد که استفاده از پودر کربن آمورفس در مخلوط‌های آسفالتی، باعث کاهش خرابی ناشی از ضعف چسبندگی و به تبع آن افزایش مقاومت در برابر رطوبت خواهد گردید. با توجه به نتایج آزمون^{۳۷} RMR،^{۳۸} TSR و آب جوشان^{۳۸}، بکارگیری تا ۵۰ درصد پودر کربن آمورف در مخلوط SMA به عنوان ماده پرکننده تأثیر مثبت قابل توجهی بر عملکرد حساسیت



(الف)



(ب)

شکل ۳۴. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌های اصلاح شده SMA (الف) کرنش متوسط دائمی، (ب) عدد روانی (Habibnejad Korayem et al 2020)

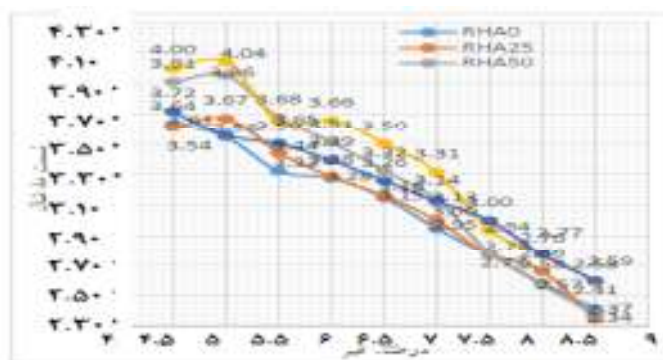
می‌یابد. نتایج تجربی آزمایش‌ها نشان داد که مخلوط‌های SMA حاوی درصد‌های مختلف RCA موجب کاهش چگالی، پایداری، VMA و VFA و افزایش حد روانی شدند. همچنین مقاومت مارشال و روانی مخلوط‌های SMA حاوی ۲۰ درصد و ۴۰ درصد RCA روند قابل قبولی را از خود نشان داده و می‌تواند به راحتی الزامات استاندارد را برای حجم ترافیک متوسط برآورده سازد. با این وجود، بهتر است از مخلوط‌های SMA با بیش از ۴۰ درصد محتوای RCA برای مسیرهایی با ترافیک کم استفاده گردد. (Kordani, Soltani Aghdam, Zarei, 2020)

به بررسی تأثیر خاکستر پوسته برنج که از جنبه‌های زیست‌محیطی نیز مورد توجه است، در مخلوط آسفالتی SMA پرداختند. در این تحقیق، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد فیلر با خاکستر پوسته برنج در مخلوط آسفالتی SMA جایگزین گردید. فیلر خاکستر پوسته برنج موجب افزایش چسبندگی قیر و قفل و بست بهتر مصالح در

در این تحقیق به بررسی امکان جایگزین شدن مصالح بتن بازیافتی با عنوان جایگزین جزئی سنگدانه‌های درشت و ریز در مخلوط آسفالتی SMA پرداخته می‌شود. نتیجه حاصل از آزمایش‌های مارشال مخلوط حاصل با استفاده از تحلیل واریانس دو عاملی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نشان داد که میزان قیر جذب شده مخلوط SMA با افزایش میزان RCA به دلیل تخلخل بیشتر بتن و ملات متصل به سطح بتن خرد شده افزایش یافته است. با این حال، در طول آزمایش، مشخص شد که غوطه‌ور شدن RCA در آب و شستشوی آن‌ها قبل از استفاده در مخلوط‌های آسفالتی، با کاهش جذب قیر و افزایش چسبندگی بین RCA و سایر موارد موجود در مخلوط، باعث افزایش چشمگیر عملکرد RCA در مخلوط‌های SMA می‌گردد. افزودن RCA به مخلوط‌های آسفالتی به‌طور قابل توجهی VTM^۴ مخلوط‌ها را افزایش داده در حالی که مقادیر چگالی آن‌ها کاهش

نیز می‌شود و مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد فیلر خاکستر پوسته برنج، دارای بیشترین روانی می‌باشد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، مخلوط حاوی ۷۵ درصد فیلر خاکستر پوسته برنج بیشترین مقاومت در برابر شیارشدگی را شاهد بوده و با افزایش درصد فیلر وزن مخصوص نیز افزایش پیدا کرده است.

یکدیگر شده و در نتیجه مقاومت مارشال (شکل ۳۵) را نیز افزایش داده است. با افزایش مقدار قیر از ۶/۵ درصد، مقاومت مارشال نیز کاهش پیدا کرده است. طبق اعلام نویسندگان مقاله، مخلوط SMA در درصد قیر بهینه، بیشترین مقاومت مارشال، نسبت مقاومت و وزن مخصوص را دارا خواهد بود (شکل ۳۶) همچنین افزایش مقدار قیر باعث افزایش روانی به صورت خطی



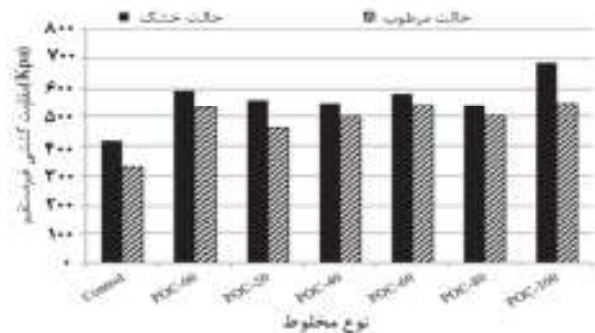
شکل ۳۵. نتایج نسبت مارشال جهت تعیین میزان شیارشدگی (Kordani, Soltani Aghdam, Zarei, 2020)



شکل ۳۶. نتایج وزن مخصوص (Kordani, Soltani Aghdam, Zarei, 2020)

غیرمستقیم بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده میزان مطلوب POC به عنوان جایگزین بخش ریزدانه بین ۴۰ تا ۶۰ درصد متغیر است. این میزان موجب افزایش مقدار مدول برجهنگدی، مقاومت در برابر شیارشدگی، مقاومت کششی و مقاومت در برابر رطوبت می‌گردد. در شکل (۳۷) نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم گزارش شده است. تمامی تأثیرات و ویژگی‌های افزودنی‌های بررسی‌شده در مقالات بیان‌شده در این تحقیق، در جدول ۳ دسته‌بندی و نشان داده شده‌اند.

(Babalghaith, A. M., ۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به ارزیابی تأثیر کلینکر روغن پالم^{۴۱} (POC) به عنوان جایگزین بخش ریزدانه بر خواص مکانیکی مخلوط‌های SMA پرداخته شد. طیف وسیعی از مخلوط‌های آسفالتی با جایگزینی ریزدانه با میزان مختلف کلینکر (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ درصد) تهیه شد. علاوه بر این، ۵۰ درصد خاکستر حاصل از سوختن روغن نخل به‌عنوان پرکننده در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد. آزمایش‌های مدول برجهنگدی، ویل تراک، خزش دینامیکی، مقاومت کششی



شکل ۳۷. مقاومت کششی غیرمستقیم برای مخلوط‌ها در شرایط مختلف (Babalghaith, A. M., ۲۰۲۰)
جدول ۳. اثرات مواد مختلف بر روی آسفالت SMA

مرجع	اثرگذاری ماده	نام ماده	نحوه اضافه شدن
Saedi and Alizadeh, 2020	بهبود خواص ریزش قیر، افزایش مقاومت مارشال، بهبود رفتار در برابر تغییر شکل دائمی	آربوسل چرب	به مخلوط
Mohammadzadeh and Niazi, 2011	افزایش درصد قیر بهینه و عمر خستگی مخلوط آکرلیک نسبت به مخلوط ویسکوز، بهبود ریزش قیر مخلوط ویسکوز نسبت به مخلوط آکرلیک	آکرلیک و ویسکوز	
Masri et al. 2021	افزایش مدول ارتجاعی، کاهش خزش دینامیکی، بهبود مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی	پودر پوست تخم مرغ	
Kumar R, Sunitha, 2016	بهبود خواص ریزش قیر، افزایش مقاومت مارشال	گیاه سیسال	
Ferreira da Costa, et al 2020	افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی خستگی، افزایش عمر خستگی	الیاف موز	
Panda, Suchismita and Giri, 2013	افزایش عمر خستگی، افزایش استقامت مارشال و وزن مخصوص، کاهش فضای خالی و میزان روانی	الیاف نارگیل	
Moghaddam et al 2012	افزایش مدول برجهندگی و عمر خستگی، کاهش سفتی مخلوط‌ها	پلی اتیلن ترفتالات	
Babagoli, 2015	کاهش درجه نفوذ، افزایش نقطه روانی، کندروانی کینماتیکی، بهبود حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و مقاومت شیارشدگی	گیلسونایت	به قیر
Al-Hadidy AI, Tan Yi-qiu, Ayman Talib Hameed, 2011	کاهش شیارشدگی، حساسیت به رطوبت و دما و استفاده به عنوان ماده ضدعریان شدگی	نشاسته	
Chegenizadeh et al, 2021	بهبود چرخه شکست، مقاومت شیارشدگی، عمر خستگی، ریزش قیر، کاهش زاویه فاز مخلوط	اتیلن وینیل استات	
Ameri et al, 2017	بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی و کاهش تغییر شکل پلاستیک	نانو رس	
Al-Hadidy AI and Tan Yi-qiu, 2010	افزایش خواص رئولوژیکی، افزایش نقطه نرمی، بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل، کاهش حساسیت به دما	پلاستومر پلیمر و پلی پروپیلن	
Behbahani, Moniri, Takhtfirooz, 2018	افزایش مقاومت در برابر خستگی، شیار شدگی، مقاومت مارشال و کاهش ریزش قیر	پلیمر استایرین بوتادین رابر	
Ameli and Choubda, 2019	بهبود نقطه نرمی، درجه نفوذ، ویسکوزیته قیر و درجه عملکردی قیر، کاهش دمای اختلاط و کاهش هزینه ساخت	ساسوبیت	

Saedi, Sadeghian asl, Yasrebi, 2017	استقامت بیشتر، شیارشدگی کمتر، کاهش ریزش قیر، بهبود خواص مکانیکی	پروپلاست و استایرن بوتادین استایرن	عنوان جایگزین مصالح سنگی
Ameri and Zoormand, 2019	بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت در برابر خستگی و شیار شدگی	زایکوترم و ایوانیک	
Kök et al, 2017	بهبود پاسخ الاستیک قیر، افزایش انرژی جذب شده، بهبود رفتار در برابر تغییر شکل دائمی	گرافیت	
Chelovian and Shafabakhsh, 2017	کاهش کرنش نهایی، کاهش شیارشدگی	نانو ذرات اکسید آلومینیوم	
Kordi and Shafabakhsh, 2017	افزایش عمر خستگی، کاهش شیارشدگی	نانو اکسید فریک	
Sadeghnejad and Shafabakhsh, 2017	افزایش عمر خستگی، کاهش ترک خوردگی، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی	نانو اکسید تیتانیوم و نانو اکسید سیلیس	
Ameli et al 2021	افزایش مقاومت در برابر رطوبت، افزایش انرژی شکست، افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی	گیلسونایت و خرده لاستیک	
Rahman et al, 2020	افزایش ویسکوزیته، افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی خستگی	الیاف ته سیگار	
Chegenizadeh et al, 2021	افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، افزایش استقامت مارشال	پلی اتیلن با چگالی زیاد	
Nguyen et al, 2021	افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، افزایش مقاومت در برابر رطوبت و پیرشدگی	نانو سیلیس و پلی وینیل کلرید	
Sengul et al, 2013	افزایش استقامت و نسبت مارشال، افزایش مقاومت در برابر رطوبت و شیارشدگی	استایرن بوتادین استایرن	
Aboutalebi Esfahani and Mirian, V, 2020	الیاف شیشه خصوصیات عملکردی مخلوط را بهبود بخشیده و اثرات مثبت اتیلن وینیل استات در مخلوط را کاهش می دهد.	اتیلن وینیل استات و الیاف شیشه	
Ameli, A et al, 2020	افزایش پایداری در ذخیره سازی، افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم، افزایش مدول برجهندگی، افزایش انرژی شکست.	پلی فسفریک اسید، استایرن بوتادین رابر و نانولوله کربنی	
Ahmadinia, E et al, 2011	افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی، افزایش استقامت و نسبت مارشال، افزایش میزان روانی	پلی اتیلن ترفتالات	
Karakus, 2011	بهبود ریزش قیر، بهبود خواص نظیر عریان شدگی، شیار شدگی	بازالت دیاریکر	
Behnood, Ameri, 2012	افزایش پایداری مارشال، مدول ارتجاعی، مقاومت کششی، مقاومت در برابر رطوبت و تغییر شکل دائمی	سرباره فولاد	
Habibnejad Korayem et al 2020	بهبود شیارشدگی، حساسیت به رطوبت ودما	پودر کربن آمورف	
Pourtahmasb and Karim, 2014	کاهش چگالی، افزایش روانی، بهبود پایداری، بهبود مقاومت مارشال	مصالح بتن بازیافتی	
Kordani, Soltani Aghdam, Zarei, 2020	افزایش چسبندگی قیر، قفل و بست مصالح در یکدیگر، کاهش مقاومت مارشال، افزایش روانی و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی	خاکستر پوسته برنج	
Babalghaith, A. M., 2020	افزایش مدول برجهندگی، افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی، افزایش مقاومت کششی و مقاومت در برابر رطوبت	کلینکر روغن پالم	

۳- نتیجه گیری

ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (نشریه ۲۰۶) که آخرین ویرایش آن مربوط به سال‌ها قبل می‌باشد، بروزرسانی گردد.

هدف از این تحقیق بررسی تاثیر افزودنی‌های گوناگون از جمله افزودنی‌های طبیعی، پلیمری، غیر پلیمری، مصالح و مواد بازیافتی در مخلوط آسفالتی SMA می‌باشد. باتوجه به نتایج بدست آمده، تاثیرات این افزودنی‌ها در مجموع باعث بهبود خواص گوناگون مخلوط آسفالتی مانند افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی، افزایش عمر خستگی، بهبود حساسیت رطوبتی، کاهش خاصیت ریزش قیر و مواردی از این قبیل می‌باشد. بصورت خلاصه نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

به طور کلی به کار بردن الیاف مانند پروپلاست و استایرن بوتادین استایرن و گیاه سیسال در آسفالت SMA می‌تواند خاصیت ریزش قیر را بهبود بخشیده و همچنین باعث افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با جایگزین کردن مواد و مصالح بازیافتی مانند بتن بازیافتی، یا ضایعاتی مانند سرباره فولاد و ضایعات بازالت دیاربکر، به جای بخشی از مصالح در مخلوط SMA می‌توان خاصیت ریزش قیر که یکی از معایب بزرگ این نوع مخلوط آسفالتی می‌باشد را بهبود بخشیده و مقاومت در برابر شیارشدگی را نیز افزایش داد.

نتایج همچنین نشان می‌دهد که با به کار بردن افزودنی‌های طبیعی و در دسترس و ارزان و همچنین استفاده از مواد و مصالح سنگدانه‌ای بازیافتی و ضایعاتی به جای بخشی از سنگدانه موجود، می‌توان هزینه ساخت و اجرای این نوع آسفالت را کاهش داد. لازم به ذکر است که با این کار، مشکلات زیست محیطی ناشی از ساخت و اجرای مخلوط‌های آسفالتی متداول نیز کاهش خواهد یافت. پیشنهاد می‌گردد باتوجه به مباحث زیست محیطی که در سالیان اخیر مورد توجه بسیاری از کشورها و دانشمندان قرار گرفته است، محققین بر روی تاثیر پسماند مواد غذایی و یا مصالح ساختمانی که بیشترین سهم را از تولید زباله و پسماند خشک و تر ساکنان کره زمین را تشکیل می‌دهند، تحقیق نموده و نتایج را با دیگر پژوهشگران به اشتراک گذارند.

همچنین پیشنهاد می‌گردد که باتوجه به گسترش روز افزون دانش در مبحث مخلوط آسفالتی SMA در ایران و جهان و به دست آمدن نتایج مختلف در تحقیقات دانشمندان، آیین‌نامه طراحی و

۴- پی‌نوشت‌ها

- 1 - Stone Mastic Asphalt
- 2 -Studded Tires
- 3 - Fat Spots
- 4 -Arbocel
- 5 -Tensile Strength Ratio
- 6 - Acrylic
- 7 -Viscous
- 8 – Sisal
- 9- Indirect Tensile Strength (ITS)
- 10- Polyethylene terephthalate (PET)
- 11 - Styrene-Butadiene-Styrene
- 12- Gilsonite
- 13 -Wheel Track Test
- 14 - Ethylene Vinyl Acetate
- 15 - Schellenberg Test
- 16 - Plastomers Polymer
- 17 - Polypropylene
- 18 - Styrene-Butadiene-Rubber
- 19 - Sasobit
- 20- Evonik
- 21 –Zycotherm
- 22- Fatigue Life
- 23- Crumb Rubber
- 24- Fracture energy
- 25- Linear Amplitude Sweep (LAS)
- 26- High-density polyethylene (HDPE)
- 27- Marshall Stability
- 28- Initial Flexural Stiffness
- 29- Polyvinyl Chloride (PVC)
- 30- Marshall Quotient (MQ)
- 31- Polyphosphoric Acid (PPA)
- 32- Carbon Nanotube
- 33- Storage Stability
- 34 - Diyarbakır Basalt
- 35- Amorphous Carbon Powder
- 36- Surface Free Energy (SFE)

S., (2021), "The effects of gilsonite and crumb rubber on moisture damage resistance of stone matrix asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 274, 122052.

-Ameli, A., Khabbaz, E. H., Babagoli, R., Norouzi, N., & Valipourian, K., (2020), "Evaluation of the effect of carbon nano tube on water damage resistance of Stone matrix asphalt mixtures containing polyphosphoric acid and styrene butadiene rubber", *Construction and Building Materials*, 261, 119946.

-Ameri, M., Mohammadi, R., Vamegh, M., & Molayem, M., (2017), "Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 156, pp.107-113.

-Ameri, M., Vamegh, M., Amiri, I., & Cahvoshian Naeni, S. F., (2018), "Moisture Sensitivity Evaluation of Modified hot mix asphalt with Zycotherm and Evonic", *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 9 (special), pp.27-42.

-Babagoli, R., (2016), "laboratory evaluation of the effect of natural bitumen powder (gilsonite) on performance of stone matrix asphalt mixtures", *journal of transportation engineering*, pp.1-12

-Babalghaith, A. M., Koting, S., Sulong, N. H. R., Karim, M. R., & AlMashjary, B. M., (2020), "Performance evaluation of stone mastic asphalt (SMA) mixtures with palm oil clinker (POC) as fine aggregate replacement", *Construction and building materials*, 262, 120546.

-Behbahani, H, Moniri, A, Takht Firooz, M., (2018), "Investigation of the effect of SBR polymer on the creativity and grooving behavior of coarse-grained mastic asphalt mixtures", *Journal of Transportation Engineering*, 11 (2), pp.371-383, (in Persian)

-Behnood, A., & Ameri, M., (2012), "Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag" *Scientia Iranica*, 19(5), pp.1214-1219.

37 -Resilient Modulus Ratio (RMR)

38 - Boiling Water Test

39 -Recycled Concrete Aggregates (RCA)

40 - Voids in Total Mix (VTM)

41- Palm Oil Clinker (POC)

۵- مراجع

-آیین نامه روسازی راه های آسفالتی ایران، (۱۳۹۰)، "نشریه شماره ۲۳۴"، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری.

-حاج محمدرضائی، ع.، (۱۳۷۷)، "مجموعه کاربردی راه و آسفالت: جهت استفاده مهندسين و تکنسین های آزمایشگاهی و مکانیک خاک"، تهران، آدنا.

- "طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای (SMA)", (۱۳۷۹)، نشریه شماره ۲۰۶، سازمان برنامه و بودجه کشور، معاونت فنی و تدوین معیارها.

-Aboutalebi Esfahani, M., & Mirian, V., (2020), "Evaluation of glass fibres, ethylene vinyl acetate and their combination on stone mastic asphalt", *Australian Journal of Civil Engineering*, pp.1-14.

-Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Shafigh, P., (2011), "Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt", *Materials & Design*, 32(10), pp.4844-4849.

-AI, A. H., & Yi-qiu, T., (2011), "The Effect of Plastomers Polymer Type and Concentration on Asphalt and Moisture Damage of SMA Mixtures", *Al-Rafadain Engineering Journal*, 19(5).

-Al-Hadidy, A. I., Yi-Qiu, T., & Hameed, A. T., (2011), "Starch as a modifier for asphalt paving materials", *Construction and Building Materials*, 25(1), pp.14-20.

-Ameli, A., Pakshir, A. H., Babagoli, R., Habibpour, A., Norouzi, N., & Davoudinezhad,

- Kordi, Z., & Shafabakhsh, G. (2017). Evaluating mechanical properties of stone mastic asphalt modified with Nano Fe₂O₃. *Construction and Building Materials*, 134, pp.530-539.
- Kumar, N. R., & Sunitha, V., (2016), "Experimental investigation of stone mastic asphalt with sisal fiber", *Int. J. Eng. Res. Technol.(IJERT)*, 5, pp.546-550.
- Makarchian, M., Karimi, A. & Moghadas, N. F., (2016), "Evaluation of the effects of fiber and aggregate type on mechanical characteristics of stone mastic asphalt (SMA) and its comparison hot mix asphalt, (in Persian), (HMA).
- Masri, K. A., Ganesan, E., Ramadhansyah, P. J., Doh, S. I., Syafiqah, S. N., Jaafar, Z. M., & Mashros, N., (2021), "Stress and Strain Characteristic of Stone Mastic Asphalt Incorporating Eggshell Powder", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 682, No. 1, pp. 012056.
- Moghaddam, T. B., Karim, M. R., & Syammaun, T., (2012), "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles", *Construction and Building Materials*, 34, pp.236-242.
- Mohammadzadeh, M. A., & Niazi, Y., (2010), "fiber stabilizers effects on fatigue properties of stone matrix asphalt", *journal of transportation research fall 2010*, pp.275- 289.
- National Asphalt Pavement Association (NAPA) (2002), "Designing and Constructing SMA Mixtures".
- Nguyen, H. P., Cheng, P., & Nguyen, T. T. (2021), "Properties of Stone Matrix Asphalt Modified with Polyvinyl Chloride and Nano Silica", *Polymers*, 13(14), pp.2358.
- Panda, M., Suchismita, A., & Giri, J., (2013), "Utilization of ripe coconut fiber in stone matrix asphalt mixes. *International Journal of Transportation Science and Technology*", 2(4), pp.289-302.
- Blazejowski, K., (2019), "Stone matrix asphalt: Theory and practice", CRC Press.
- Chegenizadeh, A., Tokoni, L., Nikraz, H., & Dadras, E., (2021), "Effect of ethylene-vinyl acetate (EVA) on stone mastic asphalt (SMA) behavior", *Construction and Building Materials*, 272, pp.121628.
- Chegenizadeh, A., Peters, B., & Nikraz, H., (2021), "Mechanical properties of stone mastic asphalt containing high-density polyethylene: An Australian case", *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00631.
- Chelovian, A., & Shafabakhsh, G., (2017), "Laboratory evaluation of Nano Al₂O₃ effect on dynamic performance of stone mastic asphalt", *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(2), pp.131-138.
- Choubdar, A., & Ameli, A., (2020), "Evaluation of Rutting Potential of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures Containing Polymer and Non-Polymer Additives", *Journal of Transportation Research*, 17(1), pp.83-102.
- Ferreira da Costa, L., Lucena, L. C. D. F. L., Lucena, A. E. D. F. L., & Grangeiro de Barros, A., (2020), "Use of Banana Fibers in SMA Mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(1), 04019341.
- Karakuş, A., (2011), "Investigating on possible use of Diyarbakir basalt waste in Stone Mastic Asphalt", *Construction and Building Materials*, 25(8), pp.3502-3507.
- Kök, B. V., Yilmaz, M., & Erkus, Y., (2017), "Effects of graphite on mechanical properties of stone mastic asphalt pavement", *Journal of civil engineering and management*, 23(8), pp.1013-1020.
- Korayem, A. H., Ziari, H., Hajiloo, M., Abarghoie, M., & Karimi, P., (2020), Laboratory evaluation of stone mastic asphalt containing amorphous carbon powder as filler material. *Construction and Building Materials*, 243, 118280.

- Saedi, S. & Alizadeh. AA., (2020), "Investigation of the effect of additives containing fatty arbusles on bitumen collapse potential and moisture properties of aggregate mastic asphalt", The 12th Bitumen, Asphalt & Machinery National Conference & Exhibition (in Persian).
- Sengul, C. E., Oruc, S., Iskender, E., & Aksoy, A., (2013), "Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance", Construction and Building Materials, 41, pp.777-783.
- Zarei, M., Abdi Kordani, A., Soltani Aghdam, H., (2020), "Laboratory evaluation of the effect of using Rice Husk Ash (RHA) Filler on the mechanical characteristics of Stone Matrix asphalt (SMA)", Journal of Transportation Research, pp.20-32.
- Pourtahmasb, M. S., & Karim, M. R., (2014), "Utilization of recycled concrete aggregates in stone mastic asphalt mixtures", Advances in Materials Science and Engineering.
- Rahman, M. T., Mohajerani, A., & Giustozzi, F., (2020), "Possible use of cigarette butt fiber modified bitumen in stone mastic asphalt", Construction and Building Materials, 263, 120134.
- Sadeghnejad, M., & Shafabakhsh, G., (2017), "Use of Nano SiO₂ and Nano TiO₂ to improve the mechanical behaviour of stone mastic asphalt mixtures", Construction and Building Materials, 157, pp.965-974.
- Saedi, S, Sadeghian Asl, G, Yathribi, S H. (2017), "The combined effect of styrene butadiene styrene and proplast in improving the performance of coarse-grained mastic asphalt", Journal of Transportation Engineering, (in Persian), 10 (2), pp.385-399.

A Review on the Effect of Various Additives on Mechanical Properties of Stone Mastic Asphalt (SMA)

Pooyan Ayar, Assistant Professor, Department of Highway and Transportation Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran.

Sajed Baradaran, M.Sc., Student, Department of Highway and Transportation Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran.

Sepehr Abdipour Vosta, Ph.D., Student, Department of Highway and Transportation Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran.

E-mail: ayar@iust.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

One type of asphalt mixture that has been very popular in recent years is the Stone Mastic Asphalt (SMA), which introduced in the mid-1960s. The use of this type of mixture has been associated with some problems such as rutting, abrasion, and weakness against heavy traffic loads. In this research, the effect of various additives such as organic, mineral, polymeric, and non-polymeric materials on the behavior of SMA mixtures has been investigated. According to the results, the effects of these additives such as Sisal plant fiber, Diyarbakir basalt wastes, and steel slag improved the rutting and fatigue resistance, as well as moisture sensitivity of SMA. In addition, the bitumen drain down will be reduced. For example, by adding 6% of ethylene-vinyl acetate to bitumen, the flow number increased by almost 43% and the addition of nano Fe₂O₃ to asphalt mixtures improved the rutting resistance by 33%. Also, using recycled and waste materials as replacement of aggregates and utilizing available and inexpensive additives can reduce the construction costs. It should be noted that this can decline environmental issues caused by the construction and implementation of conventional asphalt mixtures.

Keywords: Stone Mastic Asphalt (SMA), Additives, Pavement Distress, Rutting Resistance, Drain Down