

ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه و بازالت

حسن زیاری، مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
حسن دیواندری*، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران
ابوالفضل افشین، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: divandari@iauns.ac.ir

دریافت: ۹۶/۰۴/۰۶ - پذیرش: ۹۶/۰۹/۱۸

صفحه ۶۱-۷۴

چکیده

اصلاح و بهبود خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی گرم با استفاده از افزودنی‌های گوناگون همواره مورد توجه محققان و پژوهشگران بوده است. الیاف به عنوان یکی از انواع افزودنی‌ها و به دلیل ویژگی‌های مکانیکی مناسب، پتانسیل زیادی برای تغییر در عملکرد آسفالت دارند. تاکنون مطالعات گسترده‌ای به منظور بررسی عملکرد الیاف شیشه و بازالت به صورت مجزا در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. در پژوهش‌های گذشته کمتر اثر همزمان دو یا چند نوع افزودنی روی مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه قرار گرفته است. این تحقیق با هدف بررسی پارامترها و خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با دو نوع الیاف شیشه و بازالت بطور همزمان انجام شده است. بدین منظور نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد از این الیاف ساخته و تحت آزمایش‌های مقاومت وروانی مارشال، مدول برجهندگی، شیارشدگی، خزش دینامیکی و حساسیت رطوبتی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده به میزان بهینه از الیاف شیشه و بازالت در کنارهم، منجر به افزایش شاخص مارشال و عدد روانی در مخلوط آسفالتی می‌شود که این امر نشان دهنده مقاومت بیشتر در برابر تغییرشکل‌های دائمی از جمله شیارشدگی می‌باشد. با افزودن این الیاف به مقدار بهینه، مدول برجهندگی آسفالت افزایش قابل توجهی می‌یابد. علاوه بر این، افزایش چشمگیر شاخص *TSR* در نمونه‌های اصلاح شده با الیاف شیشه و بازالت، نشان دهنده تاثیرات مثبت ترکیب این دو نوع الیاف در برابر آسیب‌های رطوبتی رویه‌های انعطاف‌پذیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی اصلاح شده، الیاف شیشه، بازالت، آزمایش‌های عملکردی آسفالت

۱- مقدمه

اعمال بار و یا تغییرات دما، رویه‌های آسفالتی در معرض تنش‌های کششی و فشاری و تغییرشکل‌های گوناگونی قرار می‌گیرند که موجب بروز خرابی‌هایی از جمله ترک‌خوردگی شده و منجر به کاهش دوام و عمر روسازی‌ها می‌گردد. به همین منظور محققان و پژوهشگران در سال‌های اخیر راه کارهای

امروزه روسازی‌های آسفالتی بطور گسترده‌ای در ساخت راه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که هزینه‌های بسیار زیادی صرف احداث شبکه راه‌ها می‌شود، لذا حفظ و نگهداری این روسازی‌ها برای سال‌های طولانی هم از لحاظ زیست محیطی و هم از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه می‌باشد. در اثر

متنوعی را به منظور بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بررسی و پیشنهاد کرده‌اند. یکی از این راهکارها تغییر در اجزای تشکیل دهنده آسفالت و افزودن موادی است که می‌تواند با برطرف کردن نقاط ضعف مخلوط آسفالتی موجب تقویت آن شود. این تغییر می‌تواند از طریق افزودن الیاف‌های طبیعی و مصنوعی باشد که منجر به مسلح سازی مخلوط‌های آسفالتی و افزایش قابل توجه مقاومت کششی آن می‌شوند. استفاده از انواع الیاف، جهت ارتقای خصوصیات رفتاری مواد گوناگون یک ایده قدیمی می‌باشد ولی استفاده آن در بتن آسفالتی کاری نو و بدیع می‌باشد که در دهه‌های اخیر مطالعاتی بر روی آن صورت گرفته است. با آزمایشاتی که براون و همکاران (۱۹۹۰ م) بر روی الیاف در بتن آسفالتی انجام دادند به این نتیجه رسیدند که الیاف دارای استحکام کششی بالاتری نسبت به قیر هستند و پتانسیل کاربرد در آسفالت و ارتقای سازه‌ای آسفالت را دارند. همچنین مائورر و همکاران (۱۹۸۹ م) به این نتیجه رسیدند که الیاف در مقایسه با پلیمرهای افزودنی، بهتر و بیشتر در کاهش فرونشست آسفالت تاثیر گذارند (حجازی و همکاران، ۱۳۸۷). از آنجایی که بر اساس نتایج تحقیقات گذشته، عموماً استفاده از انواع الیاف به طور مشخصی اثرات مثبت و تقویت کننده‌ای بر خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی داشته اما به ندرت کاربرد دو نوع الیاف در کنار هم مورد مطالعه قرار گرفته است، در این تحقیق به مطالعه تاثیر همزمان استفاده از الیاف شیشه و بازالت بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است.

۲- پیشینه پژوهش

مطالعات گذشته نشان می‌دهند استفاده از الیاف در مخلوط‌های آسفالتی به شدت پارامترهای عملکردی آسفالت را بهبود می‌بخشد. بررسی مقالات و تحقیقات مختلف که کاربرد الیاف گوناگون در آسفالت را گزارش می‌دهند، نشان می‌دهد که استفاده از الیاف در بتن آسفالتی تاکنون با سه هدف عمده صورت پذیرفته است: بهبود مشخصات مکانیکی آسفالت، فراهم نمودن خاصیت رسانایی الکتریکی و ایجاد زمینه‌ای جدید با هدف مدیریت و استفاده از مصالح بازیافتی (حجازی و همکاران، ۱۳۸۷). افزودن انواع الیاف به مخلوط‌های آسفالتی نه تنها منجر

به افزایش مقاومت و بهبود پارامترهای خستگی مخلوط می‌شود، بلکه در عین حال افزایش شکل پذیری آن را نیز به همراه دارد. با وجود چنین خواص مطلوبی، الیاف از جمله شیشه و بازالت از بهترین افزودنی‌ها^۱ به منظور بهبود خواص مخلوط‌های آسفالتی می‌باشند. علاوه بر این با پیشرفت‌هایی که در زمینه تولید الیاف، به خصوص الیاف شیشه اتفاق افتاده است، اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با آن بسیار مقرون به صرفه‌تر از اصلاح قیر خواهد بود. استفاده از افزودنی‌ها از جمله الیاف، گرچه در ابتدا منجر به افزایش هزینه‌های ساخت می‌شود اما هزینه‌های ثانویه مربوط به عملیات تعمیر و نگهداری کاهش چشمگیری پیدا می‌کنند (Mahrez, Katman and Karim, 2003). نیهات در سال ۲۰۱۳ قابلیت استفاده از الیاف بازالت در مخلوط‌های آسفالتی گرم را مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش بر اساس نتایج بدست آمده از طرح اختلاط آسفالت، نمونه‌هایی در درصد قیر بهینه^۲ با درصد‌های مختلف الیاف بازالت ساخته و تحت آزمایش استقامت مارشال قرار گرفتند. با تحلیل نتایج بدست آمده مشخص شد که افزودن ۰/۵ درصد الیاف بازالت بالاترین مقاومت مارشال^۳ را در درصد قیر بهینه نتیجه می‌دهد (Morova, 2013). لینگ چن و همکاران به تحلیل عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تحت تاثیر الیاف بازالت و مقایسه آن با الیاف پلی استر پرداختند. در این تحقیق با ساخت نمونه‌های آسفالتی و انجام آزمایش‌های حساسیت رطوبتی^۴ طبق استاندارد AASHTO T283 و آزمایش پایداری چرخ به این نتیجه رسیدند که مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف بازالت نسبت به مخلوط‌های حاوی الیاف پلی استر و مخلوط‌های اصلاح نشده، مقاومت بیشتری در برابر آسیب‌های رطوبتی و ترک خوردگی دمای بالا از خود نشان می‌دهند (Chen and Yushi, 2012). طاهرخانی در سال ۲۰۱۶ به ارزیابی و مقایسه خواص مخلوط‌های آسفالتی حاوی الیاف شیشه و نانورس پرداخت. از الیاف شیشه به میزان ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزنی و نانورس به میزان ۲، ۴ و ۶ درصد در مخلوط آسفالتی استفاده شد. سپس مشخصات فنی آسفالت شامل استقامت مارشال، روانی، پارامترهای حجمی و مقاومت کششی غیرمستقیم^۵ ارزیابی شد. در نتیجه مشخص شد که الیاف شیشه تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی نسبت به نانورس

داشته است. علاوه بر این نتایج نشان داده است که مخلوط اصلاح شده با ۰/۲ درصد شیشه و ۶ درصد نانو رس بیشترین مقاومت مارشال و مخلوط حاوی ۰/۶ درصد شیشه و ۲ درصد نانو رس بیشترین مقاومت کششی غیر مستقیم را خواهند داشت (طاهرخانی، ۲۰۱۶). محرز و همکاران در سال ۲۰۰۵ به بررسی خواص تغییرشکل و گسیختگی آسفالت ماستیک اصلاح شده با الیاف شیشه پرداختند. به منظور ارزیابی اثر الیاف روی مخلوط‌های آسفالتی، نمونه‌هایی با و بدون الیاف ساخته و تحت اثر آزمایش‌های استقامت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش دینامیکی^۶ و مقاومت در برابر ترک‌های خستگی قرار گرفتند. نتایج آزمایشات نشان داد که افزودن این الیاف منجر به بهبود عمر خستگی آسفالت از طریق افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی و تغییرشکل‌های دائم^۷ می‌شود. که در عمل می‌تواند باعث افزایش مقاومت سازه‌ای و در نتیجه افزایش بارترافیکی شود (Mahrez, Katman and Karim, 2005). دیواندری و شعبانی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه را بررسی کردند و نتیجه گرفتند استفاده از الیاف شیشه باعث بهبود خواص عملکردی مخلوط آسفالتی می‌شود. در این پژوهش مشخص گردید استفاده از الیاف شیشه ای می‌تواند از بروز ترک در آسفالت که به عنوان یکی از خرابی‌های عمده روسازی انعطاف پذیر مطرح است جلوگیری کند و یا حداقل آن را کاهش دهد (دیواندری و شعبانی، ۲۰۱۶). در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۴ به اندازه‌گیری و مقایسه خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه و پلی استر پرداخته شد. با افزودن ۰.۱۵ درصد الیاف شیشه به مخلوط آسفالتی مشاهده شد مقاومت مارشال ۱۰ درصد، مقاومت کششی غیرمستقیم ۲۵ درصد و مدول برجهنگی ۳۸ درصد افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این میزان کرنش خزشی تجمعی در دمای ۶۰ درجه به میزان ۳۸ درصد و پتانسیل شیارشدگی در دمای ۵۰ درجه و عبور ۲۰۰۰ چرخ بارگذاری ۱۴ درصد کاهش پیدا می‌کند. ضمن این که میزان مقاومت لغزشی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه به میزان ۸ و ۱۱ درصد در شرایط خشک و مرطوب افزایش پیدا می‌کند (Shukla, Tiwari and Sitraman, 2014). در زمینه استفاده از الیاف شیشه در آسفالت گرم (WMA)^۸، فخری و حسینی مقاومت شیارشدگی^۹ و

حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم اصلاح شده با مصالح بازیافتی و الیاف شیشه را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد افزودن الیاف شیشه به تنهایی اگرچه منجر به افزایش مقاومت شیارشدگی می‌شوند اما بهبودی در وضعیت حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاصل نمی‌شود. علاوه بر این افزودن الیاف شیشه و مصالح بازیافتی به طور همزمان به مخلوط آسفالتی گرم بیشترین مقاومت شیارشدگی و حساسیت رطوبتی را نتیجه می‌دهد (Fakhri and Hosseini, 2017). با توجه به مزایای فوق‌الذکر استفاده از الیاف شیشه و بازالت، در این پژوهش سعی بر این است که پارامترهای عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با ترکیب این دو نوع الیاف مورد ارزیابی قرار گیرند.

۳- بیان مسئله

استفاده از الیاف شیشه و بازالت به منظور بهبود پارامترهای عملکردی آسفالت سابقه زیادی دارد و تقریباً در تمامی پژوهش‌های انجام شده نتایج مثبتی از این امر گرفته شده است. اما از آنجایی که در بیشتر این پژوهش‌ها تاثیر یک نوع الیاف بر مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است، در این تحقیق با ساخت نمونه‌های آسفالتی که به طور همزمان با هر دو نوع الیاف شیشه و بازالت اصلاح شده اند به سنجش خصوصیات عملکردی آسفالت پرداخته می‌شود.

۴- ضرورت تحقیق

بطور کلی افزودن الیاف به مخلوط‌های آسفالتی علاوه بر این که باعث کاهش ترک خوردگی می‌شود، موجب تغییر خواص ویسکوالاستیک آسفالت از جمله افزایش مدول دینامیکی، بهبود حساسیت رطوبتی، مقاومت در برابر شیارشدگی و یخ‌زدگی نیز می‌گردد. الیاف شیشه مقاومت کششی بالا و در عین حال کرنش حداکثر ۳ تا ۴ درصدی داشته و کاملاً الاستیک رفتار می‌کنند. این الیاف نقطه اشتعال بسیار بالایی در حدود ۸۱۵ درجه سانتی‌گراد داشته و تا حدود دمای ۳۱۵ درجه هیچگونه تغییری در ویژگی‌های مقاومتی آن‌ها مشاهده نمی‌شود. تجربه نشان داده است مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه و بازالت

ترکیب این الیاف به مخلوط، موجب بهبود پارامترهای عملکردی آسفالت مورد نظر خواهد شد.

۶- روش تحقیق

۶-۱- مواد و مصالح مورد استفاده

۶-۱-۱ قیر و مصالح سنگی

به منظور ساخت نمونه های آزمایشگاهی از قیر خالص ۷۰-۶۰ شرکت نفت پاسارگاد استفاده شده است. مصالح سنگی بکار رفته در این پژوهش از نوع سنگ شکسته کوهی معدن اسبچران رودهن می باشد. نتایج آزمایشات قیر و مشخصات فیزیکی مصالح سنگی در جداول ۱ و ۲ آمده است. دانه بندی مصالح سنگی نیز مطابق با دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای مخلوط های آسفالتی گرم انتخاب شده است. شکل ۱ نمودار دانه بندی انتخاب شده و حدود مجاز نشریه را نشان می دهد.

۶-۱-۲ الیاف

در این تحقیق از الیاف شیشه و بازالت در ساخت نمونه های آسفالتی به روش مارشال استفاده شده است (شکل ۲). به دلیل سهولت اجرای آزمایشگاهی از روش خشک برای اختلاط الیاف با مخلوط آسفالتی استفاده شده است. به این ترتیب که ابتدا الیاف با مصالح سنگی مخلوط و سپس قیر به آن اضافه شده است. مشخصات الیاف مورد استفاده در جدول ۳ آمده است.

نسبت به مخلوط های اصلاح نشده از عمر خستگی بالاتری برخوردار هستند که این به دلیل مقاومت بالای این الیاف در مقابل گسترش و رشد ترک ها می باشد. یکی از مزایای مهم کاربرد این الیاف، بهبود پارامترهای مقاومتی و شکل پذیری مخلوط های آسفالتی بدون افزایش درصد قیر می باشد که این ویژگی از خرابی هایی نظیر شیارشدگی و قیرزدگی به خصوص در فصول گرم سال جلوگیری می کند (Abtahi, Sheikhzadeh and Hejazi, 2010). با وجود چنین مزایایی و روند رو به رشد استفاده از الیاف به خصوص شیشه و بازالت در مخلوط های آسفالتی، لازم است عملکرد آن ها و تغییراتی که در خواص آسفالت بوجود می آورند دقیقاً مورد بررسی قرار گیرد تا در آینده استفاده از آن ها با ثمربخشی بیشتری صورت گیرد.

۵- فرضیات تحقیق

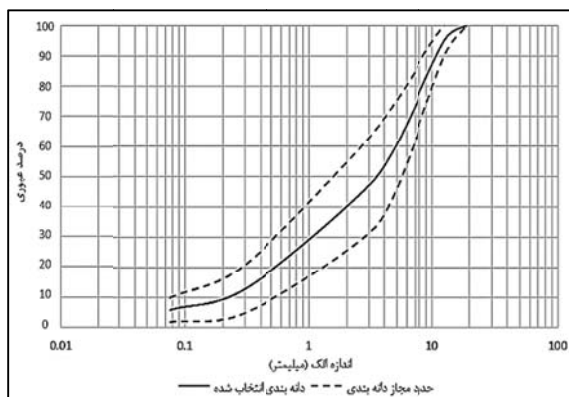
با توجه به هزینه های بالای تعمیر و نگهداری روسازی های آسفالتی، به نظر می رسد با اصلاح مخلوط های آسفالتی به کمک الیاف شیشه و بازالت، هم عمر آسفالت افزایش می یابد و هم هزینه های مربوط به تعمیر و نگهداری آسفالت به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. از آنجایی که استفاده از این الیاف در تحقیقات گذشته نتایج مثبتی در بر داشته است، لذا در این پژوهش فرض اصلی بر این است که افزودن درصد مشخصی از

جدول ۱. نتایج آزمایش های قیر

ردیف	شرح آزمایش	نتایج	استاندارد
۱	درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه (دهم میلی متر)	۶۵	ASTM-D5
۲	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)	۴۵	ASTM-D36
۳	درجه اشتعال (درجه سانتی گراد)	۳۱۰	ASTM-D92
۴	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۰۱	ASTM-D70
۵	شکل پذیری در دمای ۲۵ درجه (سانتی متر)	۱۰۰	ASTM-D113
۶	ویسکوزیته (ثانیه)	۶۸	ASTM-D2170

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

استاندارد	حدود مجاز (نشریه ۲۳۴)		نتایج	شرح آزمایش	ردیف
	رویه	آستر			
ASHTO-T96	۲۵	۳۰	۳/۲۲	حداکثر سایش به روش لوس آنجلس، درصد	۱
ASHTO-T85	۲/۵	۲/۸	۲/۲	حداکثر جذب آب مصالح درشت دانه، درصد	۲
ASHTO-T84	۲/۵	۲/۸	۲/۴	حداکثر جذب آب مصالح ریزدانه، درصد	۳
ASTM-D4791	۱۵	۱۵	۹	حداکثر سنگدانه‌های پهن و دراز، درصد	۴



شکل ۱. منحنی دانه بندی مصالح سنگی

جدول ۳. خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف شیشه

استاندارد	نتایج	شرح
-	E-Glass	نوع
-	سفید	رنگ
-	۱۳	قطر (μm)
-	۱۰	طول (mm)
ASTM-D5030	۱۴۰۰	مقاومت کششی (MPa)
ASTM-D792	۲/۶-۲/۵	وزن مخصوص (gr/cm^3)
ASTM-D7138	۸۴۰	نقطه ذوب ($^{\circ}\text{C}$)
ISO3344-1997	۰/۰۳	رطوبت (%)
ISO1887-1995	۰/۵۷	کاهش اشتعال (%)



(ب)



(الف)

شکل ۲. (الف) الیاف بازالت، (ب) الیاف شیشه

۶-۲- تعیین درصد قیر بهینه

به منظور تعیین درصد قیر بهینه، از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شد. در این روش ابتدا سه نمونه برای هرکدام از درصدهای قیر ۴، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ به روش استاندارد مارشال (ASTM D-1559) ساخته شد و سپس درصد بهینه قیر به کمک منحنی‌های مارشال^{۱۱} بدست آمد. این کار یک بار برای

مخلوط مصالح سنگی با دانه‌بندی حد وسط شماره ۴ بدون ییاف و بار دیگر برای همین ترکیب مصالح و دانه‌بندی اما با اضافه کردن ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۸ گرم از هرکدام از ییاف شیشه و بازالت انجام شد. در نهایت مجموعاً ۷۲ نمونه استوانه‌ای آسفالت ساخته و درصد قیر بهینه برای چهار ترکیب زیر تعیین شد. نتایج بدست آمده در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۴. نتایج طرح اختلاط آسفالت

حدود مجاز آیین‌نامه	ترکیب مصالح نمونه‌های آسفالتی				مشخصات نمونه‌های آسفالتی
	نوع ۴	نوع ۳	نوع ۲	نوع ۱	
	۰/۳	۰/۲	۰/۱	بدون ییاف	درصد ییاف (%)
حداقل ۸	۵/۸۱	۹/۸۱	۹/۵۸	۸/۲	مقاومت مارشال (KN)
۲-۳/۵	۳/۴۸	۳/۳۲	۳/۰۲	۲/۹۵	روانی مارشال (mm)
۳-۵	۳/۵۷	۳/۸۹	۴/۲	۴/۵۳	فضای خالی %
حداقل ۱۳	۲۴/۹	۱۷/۵۴	۱۵/۹۳	۲۱/۹۹	فضای خالی مصالح سنگی %
۶۰-۷۵	۷۴/۸	۷۱/۲۶	۶۹/۱۸	۶۳/۲۴	فضای خالی پرشده با قیر %
	۵/۷	۵/۴۵	۵/۲۵	۵/۰۵	درصد قیر بهینه

۶-۳- ساخت نمونه‌های اصلی

به منظور انجام آزمایش‌ها با توجه به متغیرهای این پژوهش، در مجموع ۴۸ نمونه استوانه‌ای ساخته شده است. جهت افزایش قابلیت اطمینان نتایج برای هرکدام از ترکیبات مصالح سنگی و ییاف، ۱۲ نمونه در درصد قیر بهینه ساخته شده است. سه نمونه برای آزمایش مدول برجهندگی و شیارشدگی، سه نمونه برای آزمایش خزش دینامیکی و شش نمونه هم برای آزمایش حساسیت رطوبتی تر و خشک مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌های آسفالتی در قالب استاندارد ۱۰ سانتی‌متری و با کمک متراکم کننده ژیراتوری ساخته شده‌اند.

شده در این تحقیق شامل آزمایش‌های مارشال، مدول برجهندگی^{۱۱}، شیارشدگی، خزش دینامیکی و حساسیت رطوبتی می‌باشد. آزمایش‌های مدول برجهندگی و خزش دینامیکی با دستگاه UTM-5 و آزمایش شیارشدگی با استفاده از دستگاه چرخ بارگذاری ساخته شده در دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شدند. به منظور محاسبه شاخص حساسیت رطوبتی نیز از دستگاه مقاومت کششی غیر مستقیم استفاده شد. تمامی نمونه‌ها با توجه به نتایج نهایی طرح اختلاط تهیه و با استفاده از دستگاه متراکم کننده چرخشی روسازی ممتاز (ژیراتوری^{۱۲}) متراکم شدند.

۷-۱- آزمایش مقاومت و روانی مارشال

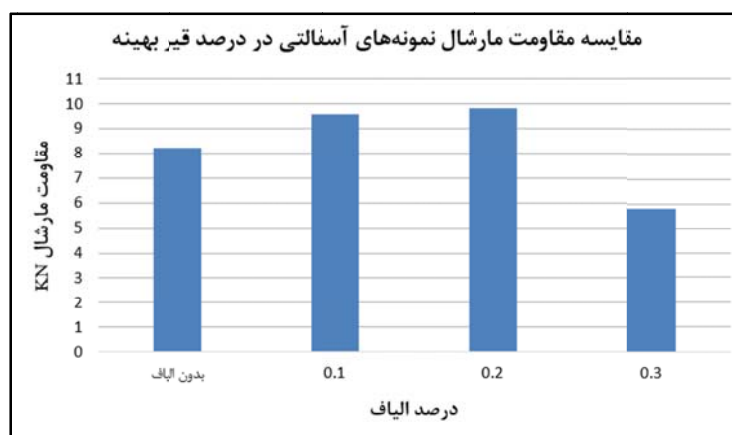
به منظور انجام این آزمایش نمونه‌ها ابتدا به مدت سی دقیقه در آب ۶۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری و سپس تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. دو ویژگی در این آزمایش تعیین می‌شود که عبارتند از بیشترین باری که نمونه بدون گسیختگی می‌تواند تحمل کند

۷-۷- آزمایش‌ها و نتایج

به منظور سنجش رفتار و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش‌های متعددی طراحی شده است. آزمایش‌های اصلی انجام

(مقاومت مارشال) و میزان تغییرشکل قطری نمونه که در لحظه گسیختگی رخ می‌دهد (روانی مارشال). مفهوم دیگری که به منظور ارزیابی سختی مخلوط آسفالتی بکار می‌رود، شاخص مارشال^{۱۳} می‌باشد که عبارت است از نسبت مقاومت مارشال به

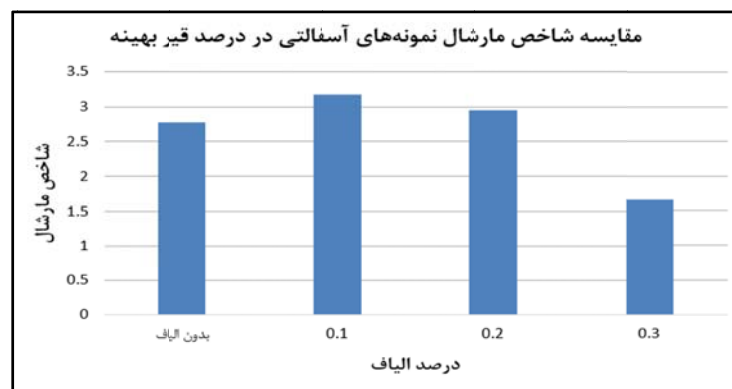
روانی آن. هرچه این مقدار بیشتر باشد نشان‌دهنده سختی بیشتر مخلوط و مقاومت بیشتر آن در برابر تغییرشکل‌های دائم می‌باشد. تغییرات مقاومت و شاخص مارشال برای درصدهای مختلف الیاف در نمودارهای ۱ و ۲ نشان داده شده است.



نمودار ۱. مقایسه مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف

با توجه به نمودار ۱، نتایج نشان می‌دهد افزودن الیاف شیشه و بازالت منجر به افزایش مقاومت مارشال در درصد قیر بهینه شده است. این افزایش در مقاومت می‌تواند به دلیل مقاومت کششی بالای این الیاف و نقش مسلح کننده‌ای باشد که در مخلوط آسفالتی ایفا می‌کنند. برای مثال با افزودن ۰/۱ درصد از این مواد به مخلوط آسفالتی، افزایش مقاومتی در حدود ۱۶/۸ درصد حاصل شده است. از طرفی در درصدهای بالای الیاف در مخلوط

آسفالتی، کم کم این مواد جای مصالح سنگی را در مخلوط می‌گیرند که منجر به کاهش مقاومت مارشال می‌شود. نمودار ۲ نیز نشان می‌دهد نسبت مقاومت به روانی مارشال با افزودن الیاف شیشه و بازالت افزایش یافته است که این مطلب نشان دهنده مقاومت اولیه بالاتر و تغییرشکل‌های دائمی کمتر نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده می‌باشد.



$$M_R = \frac{P(\vartheta + 0.2734)}{\delta t} \quad (1)$$

که در آن P حداکثر بار دینامیکی به نیوتن، ϑ ضریب پواسون، δ کل تغییر شکل برگشت پذیر به میلی‌متر و t ضخامت نمونه به میلی‌متر می‌باشد. در این تحقیق شکل بارگذاری نیمه‌سینوسی، زمان اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، تعداد پیش بارگذاری ۵۰، ضریب پواسون ۰/۳۵ و حداکثر سطح بارگذاری ۵۵۰ نیوتن اعمال شد. برای هر نمونه با ترکیب مشابه آزمایش سه بار و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تکرار و از میانگین نتایج در محاسبات استفاده شده است. در جدول ۵ نتایج حاصل از آزمایش مدول برجهندگی نشان داده شده است.

۷-۲- آزمایش مدول برجهندگی

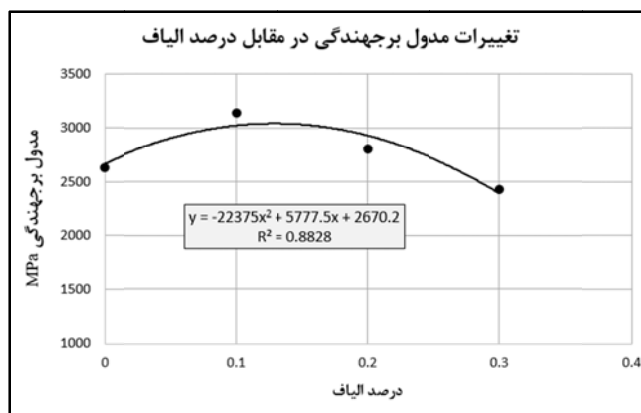
در این تحقیق مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی طبق استاندارد ASTM D-4123 از طریق آزمایش کشش غیرمستقیم با بارگذاری تکراری اندازه‌گیری شد. بار فشاری به شکل نیمه‌سینوسی و با اشکال مناسب دیگر به صورت قائم و قطری روی نمونه استوانه‌ای از طریق نوار بارگذاری اعمال و تغییرشکل افقی برگشت‌پذیر اندازه‌گیری می‌شود. مدول برجهندگی نمایانگر مقاومت مخلوط در برابر کرنش‌های برگشت‌پذیر می‌باشد که به منظور ارزیابی کیفیت نسبی مخلوط‌های آسفالتی به عنوان داده ورودی طراحی ضخامت، ارزیابی و یا تحلیل روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای یک بار دینامیکی به بزرگی P که تغییرشکل‌های افقی آن اندازه‌گیری شده‌اند، مدول برجهندگی از طریق رابطه (۱) تعیین می‌شود (Huang, 2004).

جدول ۵. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

نوع ۴	نوع ۳	نوع ۲	نوع ۱	ترکیب مصالح
۲۴۳۰	۲۸۱۰	۳۱۴۵	۲۶۳۰	مدول برجهندگی (MPa)

۲۳۴، ۳۰۰۰ مگاپاسکال توصیه شده است، بنابراین نتایج این آزمایش از این نظر قابل قبول می‌باشد. همانطور که در نمودار ۱ و مقاومت مارشال نیز مشاهده شد، در مقادیر بیشتر از ۰/۲ درصد، تاثیر مثبت قابل توجهی از الیاف شیشه و بازالت مشاهده نمی‌شود به نحوی که وجود ۰/۳ درصد از ترکیب این دو نوع الیاف در مخلوط، منجر به کاهش ۷/۶ درصدی در مدول برجهندگی شده است.

به منظور تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از این آزمایش، تغییرات مدول برجهندگی در نمودار ۳ ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تا جایی که الیاف نقش مسلح کننده ایفا کرده و منجر به افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی می‌شوند، با کاهش تغییرشکل‌ها، مدول برجهندگی افزایش یافته و پس از آن کاهش پیدا کرده است. با توجه به نمودار ۳، حداکثر مدول برجهندگی با افزودن ۰/۱۲ درصد از الیاف حاصل شده و برابر با ۳۰۴۳ مگاپاسکال می‌باشد. از آنجایی که حداکثر مقدار مجاز در نشریه



نمودار ۳. تغییرات مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف

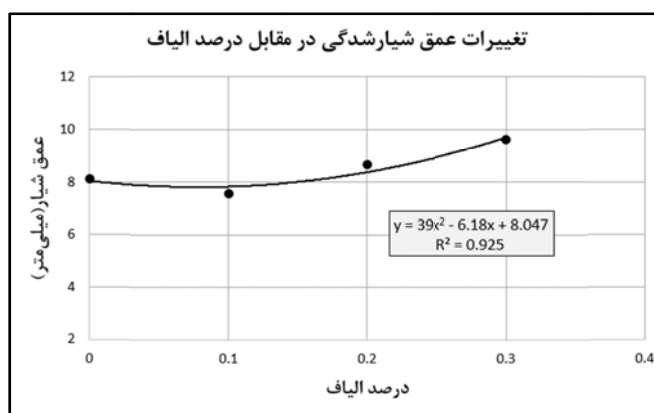
جدول ۶. نتایج آزمایش شیار شدگی

ترکیب مصالح	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳	نوع ۴
عمق شیار (میلی‌متر)	۸/۱۴	۷/۵۴	۸/۶۵	۹/۶۱

درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است. همانطور که در قسمت‌های قبل اشاره شد، افزایش مقاومت حاصل از افزودن الیاف شیشه و بازالت به نمونه‌های آسفالتی، منجر به کاهش تغییرشکل‌های دائمی در آن‌ها می‌شود. در نمودار ۴ نیز مشاهده می‌شود با افزودن ۰/۱ درصد از این الیاف، تغییرشکل‌ها بیشترین کاهش را به میزان حدوداً ۷ درصد داشته است.

۷-۳- آزمایش شیارشدگی

آزمایش اثر جای چرخ یا ویل تراک^{۱۴} به طور مستقیم برای اندازه‌گیری شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی متراکم شده استفاده می‌شود. به منظور انجام این آزمایش با دستگاه چرخ بارگذاری ساخته شده در دانشگاه علم و صنعت ایران، ابتدا نمونه‌های آسفالتی به مدت شش ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده‌اند. سه نمونه از هر ترکیب مصالح ۸۰۰۰ مرتبه تحت تنش ۷۰۰ کیلوپاسکال ناشی از عبور چرخ در دمای ۵۰



نمودار ۴. تغییرات عمق شیارها در نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف

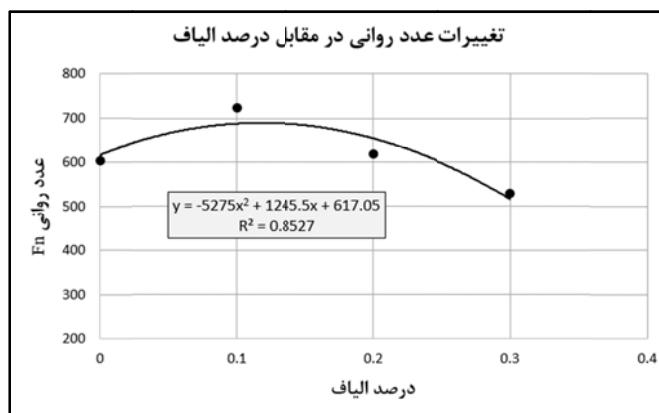
۷-۴- آزمایش خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی با تعیین کرنش تجمعی نمونه آسفالتی عملکرد آن را در برابر شیارشدگی مشخص می‌کند. مهمترین خروجی این آزمایش، نمودار تغییرات کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل بارگذاری می‌باشد که از سه بخش اصلی تشکیل می‌شود. تعداد سیکل متناظر با شروع ناحیه سوم عدد روانی^{۱۵} نامیده می‌شود. نکته قابل توجه در مورد ناحیه سوم این است که عدد روانی، تعداد بارگذاری است که تغییر مکان برشی در نمونه آسفالتی شروع می‌شود. در این پژوهش آزمایش خزش به وسیله دستگاه UTM-5 انجام شد. بار اعمال شده در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد بصورت نیمه‌سینوسی، شامل ۵۰۰ میلی ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی ثانیه استراحت طبق استاندارد استرالیا (Australian: AS 2891.12.1) در نظر گرفته شده است. مقدار تنش تماسی برابر ۲۰ کیلوپاسکال و تنش انحرافی معادل ۴۰۰ کیلوپاسکال تنظیم گردید. دو ضابطه برای اتمام آزمایش در نظر

گرفته شد: حداکثر کرنش ایجاد شده که ۱۰۰۰۰۰ میکرو در نظر گرفته شد و حداکثر تعداد بارگذاری که ۴۰۰۰۰ سیکل تعریف شد. به منظور آماده سازی نمونه‌ها قبل از انجام آزمایش نیز نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد (دیواندری و همکاران، ۱۳۹۴). نتایج حاصل از این آزمایش در جدول زیر آمده است. تغییرات عدد روانی نیز در نمودار ۵ رسم شده است. همانطور که در نمودار ۵ ملاحظه می‌شود، افزودن الیاف تا حدود ۰/۲ درصد منجر به افزایش عدد روانی در مخلوط آسفالتی شده است. برای اولین بار نتایج تحقیقات ویتزاک در سال ۲۰۰۲ نشان داد که عدد روانی حاصل از خزش دینامیکی، با مقاومت شیارشدگی آسفالت رابطه مستقیم دارد. بنابراین در صورت افزایش عدد روانی، پتانسیل شیارشدگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد که این امر منجر به کاهش عمق شیارهای ایجاد شده در آزمایش ویل تراک می‌گردد. با توجه به نمودارهای ۴ و ۵ در این تحقیق این موضوع کاملاً مشهود است.

جدول ۷. نتایج آزمایش خزش دینامیکی

ترکیب مصالح	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳	نوع ۴
عدد روانی	۶۰۵	۷۲۵	۶۱۹	۵۲۸



نمودار ۵. تغییرات عدد روانی در نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف

۷-۵- آزمایش حساسیت رطوبتی

هدف از انجام این آزمایش بررسی میزان حساسیت نمونه‌های آسفالتی به رطوبت می‌باشد که می‌توان با استفاده از نتایج آن تحلیل‌های مناسبی در مورد برخی خرابی‌های روسازی‌های آسفالتی نظیر عریان‌شدگی^{۱۶}، قیرزدگی و پیش‌بینی رفتار مخلوط‌های آسفالتی از جهت مقاومت در برابر پدیده‌هایی نظیر شیارشدگی و خستگی^{۱۷} ارائه کرد. در نشریه ۲۳۴ آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران به منظور بررسی حساسیت رطوبتی و دوام مخلوط‌های آسفالتی در برابر آب به سه روش اشاره شده است که دو روش آن که شامل تعیین مقاومت فشاری و تعیین مقاومت کششی می‌باشد طبق استانداردها انجام می‌شود. اما روش اصلی و بهتر در ارزیابی حساسیت رطوبتی، تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم طبق استاندارد AASHTO T-283 یا ASTM D-4867 می‌باشد. استاندارد AASHTO T-283 با عنوان "مقاومت مخلوط‌های قیری متراکم شده در برابر آسیب رطوبتی"، روشی برای پیش‌بینی آسیب ناشی از اثر رطوبت بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ارائه می‌کند (نویخت و عابدی، ۱۳۸۹). در این پژوهش طبق استاندارد AASHTO T-283 شش نمونه از هر ترکیب (سه نمونه در حالت خشک و سه نمونه در حالت تر) بعد از عمل‌آوری و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بصورت قطری بین نوارهای دستگاه مقاومت کششی غیر مستقیم قرار گرفتند. سپس بار از طریق جابجایی صفحه بارگذاری دستگاه و با سرعت ۵۰ میلی‌متر در دقیقه بر نمونه اعمال شده و

حداکثر بار فشاری و تغییر مکان متناظر با آن بدست می‌آید. سپس مقاومت کششی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D} \quad (2)$$

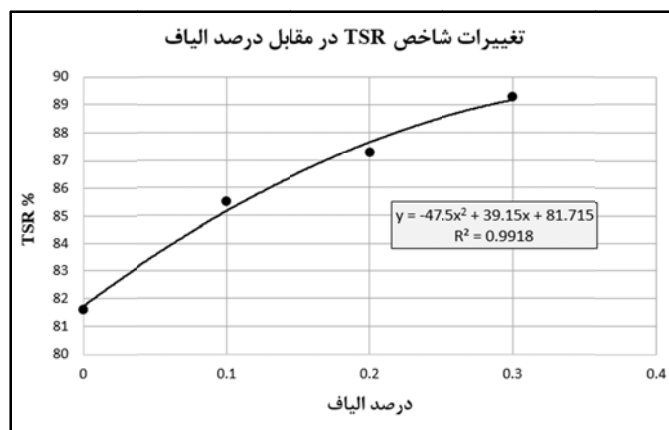
در این رابطه S_t مقاومت کششی به کیلوپاسکال، P حداکثر بار به نیوتن، t ضخامت نمونه به میلی‌متر و D قطر نمونه به میلی‌متر می‌باشد. شاخص کمی مقاومت مخلوط آسفالتی گرم در برابر اثر مخرب آب، به صورت نسبت مقاومت کششی پس از عمل‌آوری رطوبتی و ذوب و انجماد به مقاومت کششی اولیه و دست نخورده، بیان می‌شود. این شاخص به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌گردد.

$$TSR = \frac{S_2}{S_1} \quad (3)$$

در این رابطه نیز S_1 میانگین مقاومت کششی نمونه‌های خشک و S_2 میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تر می‌باشد. در نهایت شاخص TSR ^{۱۸} بصورت نسبت مقاومت کششی نمونه‌های تر به نمونه‌های خشک به عنوان شاخصی از حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گزارش می‌شود. نتایج این آزمایش در جدول ۸ آمده است. انتظار می‌رود با افزایش درصد الیاف و به دلیل مقاومت کششی بالای این مواد، عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر چرخه‌های ذوب و یخ بهبود یافته و شاخص TSR افزایش پیدا کند. این موضوع در نمودار ۶ مشاهده می‌شود. به عنوان مثال با افزودن ۰/۳ درصد از این الیاف، افزایشی معادل با ۹/۵ درصد در شاخص TSR حاصل می‌شود.

جدول ۸. نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

ترکیب مصالح	نوع ۱	نوع ۲	نوع ۳	نوع ۴
TSR %	۸۱/۶	۸۵/۵	۸۷/۳	۸۹/۳



نمودار ۶. تغییرات شاخص TSR در نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف

۸- نتیجه گیری

- افزودن الیاف شیشه و بازالت به مقدار بهینه منجر به کاهش پتانسیل شیارشدگی در مخلوط آسفالتی می‌شود. عدد روانی حاصل از آزمایش خزش دینامیکی بیشترین افزایش را با افزودن ۰/۱۲ درصد از این الیاف به میزان ۱۴/۱ درصد داشته است.

- عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر اثرات نامطلوب رطوبت با افزودن الیاف شیشه و بازالت بهبود می‌یابد.

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت استفاده از الیاف شیشه و بازالت در مخلوط‌های آسفالتی مطابق با آنچه پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهند منجر به بهبود خواص عملکردی آسفالت می‌شود. افزایش مقاومت مارشال و مدول برجهندگی، کاهش عمق شیارشدگی، افزایش عدد روانی و شاخص TSR همگی نشان دهنده این است که با اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با الیاف شیشه و بازالت می‌توان مخلوط‌های آسفالتی تولید نمود که مقاومت و عمر خستگی بیشتری داشته و در طول دوره بهره‌برداری عملکرد بهتری در برابر انواع خرابی‌ها از جمله ترک‌خوردگی، شیارشدگی، جدشدگی سنگدانه‌ها و عریان‌شدگی داشته باشد.

هدف از این پژوهش ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر همزمان الیاف شیشه و بازالت بر خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی بود. بدین منظور نمونه‌هایی در درصد قیر بهینه و با درصد‌های مختلف الیاف ساخته و آزمایش‌هایی بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج نشان داد افزودن ۰/۱ درصد الیاف شیشه و بازالت بهترین عملکرد را برای مخلوط آسفالتی به همراه دارد. خلاصه نتایج به شرح ذیل است:

- مقاومت مارشال با افزودن الیاف شیشه و بازالت به مخلوط آسفالتی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین افزایش در مقدار مقاومت مارشال با افزودن ۰/۲ درصد از الیاف شیشه و بازالت و به میزان ۱۸/۹ درصد حاصل می‌شود. علاوه بر این نسبت مقاومت به روانی مارشال نیز با اصلاح مخلوط‌های آسفالتی با این الیاف بهبود پیدا می‌کند.

- مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی با افزودن الیاف شیشه و بازالت تا مقدار معینی افزایش و پس از آن کاهش پیدا می‌کند. ۰/۱۲ درصد از این الیاف بیشترین افزایش در مدول برجهندگی را به میزان ۱۵/۷ درصد به همراه دارد.

- تغییر شکل‌های دائمی در آسفالت اصلاح شده با الیاف شیشه و بازالت کاهش پیدا می‌کند. نتایج آزمایش ویل تراک نشان می‌دهد با افزودن ۰/۱ درصد از این الیاف عمق شیارهای ایجاد شده در نمونه‌های آسفالتی به میزان ۷ درصد کاهش می‌یابد.

۹-سیاسگزاری

- دیواندري، ح.، مدرس، ا.، حسيني، م.، رستمي، م.، (۱۳۹۴)، "ارائه مدل شيارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غيرمستقیم و پارامترهای مارشال"، مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، سال اول، شماره دوم.

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از پرسنل محترم مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران (ABRC^{۱۸}) به ویژه بهادری به دلیل همکاری، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

۱۰-پی‌نوشت‌ها

- دیواندري، ح.، مدرس، ا.، رستمي، م.، حسيني، م.، (۱۳۹۴)، "ارایه مدل تخمین عدد روانی با استفاده از پارامترهای مارشال و نتایج آزمایش مقاومت کششی غيرمستقیم"، پژوهشنامه حمل و نقل، دوره دوازدهم، شماره دوم.
- زیاری، ح.، (۱۳۹۳)، "راهنمای کاربردی آزمایش‌های قیر و آسفالت"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ سوم.
- طباطبایی، الف.م.، (۱۳۹۴)، "روسازی راه"، مرکز نشر دانشگاهی، دانشگاه تهران، چاپ بیست و ششم.
- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۰)، "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل، موسسه قیر و آسفالت ایران، تجدید نظر اول.

1. Additive
2. Optimum Bitumen Content
3. Marshall Strength
4. Moisture Sensitivity
5. Indirect Tensile Strength
6. Dynamic Creep
7. Permanent Deformation
8. Warm Mix Asphalt (WMA)
9. Rutting
10. Marshall Curves
11. Resilient Modulus
12. Gyration
13. Marshall Index
14. Wheel Track
15. Flow Number
16. Stripping
17. Fatigue
18. Tensile Strength Ratio

مراجع

- نوبخت، ش.، عابدی، ح.، (۱۳۸۹)، "تاثیر نوع دانه‌بندی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم"، پنجمین کنگره ملی مهندسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- Abtahi, M., Sheikhzadeh, M., Hejazi, M. (2010), "Fiber-reinforced asphalt concrete", *Journal of Construction and Building Materials*, No. 24, pp. 871-877.
- AASHTO T 283, (2007), "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixture to Moisture-Induced Damage".

- حجازی، م.، شیخ‌زاده، م.، ابطحی، م.، سمنانی، د. (۱۳۸۷)، "بررسی کاربرد مواد نساجی گوناگون جهت تسلیح مکانیکی بتن آسفالتی و تحلیل نتایج حاصل با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران.

- دیواندري، ح.، شعبانی، م. (۱۳۹۵)، "بررسی عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف شیشه"، کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و مهندسی، دانشگاه استانبول، ترکیه.

- Mahrez, A., Katman, H., Karim, M. (2003), "Prospect of using glass fiber reinforced bituminous mixes", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation studies, Vol. 5, pp. 794-807.
- Mahrez, A., Katman, H., Karim, M. (2005), "Fatigue and deformation properties of glass fiber reinforced bituminous mixes", Journal of the Eastern Asia Society for Transportation studies, Vol. 6, pp. 997-1007.
-
- Morova, N. (2013), "Investigation of usability of basalt fiber in hot mix asphalt concrete", Journal of Construction and Building Material, No. 47, pp. 175-180.
- Shukla, M., Tiwari, D., Sitramanjaneyulu, K. (2014), "Performance characteristics of fiber modified asphalt concrete mixes", The International Journal of Pavement Engineering and Asphalt Technology (PEAT), Vol. 15, pp. 38-50.
- Taherkhani, H. (2016), "Investigation the properties of asphalt concrete containing glass fiber and nanoclay", Civil Engineering Infrastructure Journal, No. 49(1), pp. 45-58.
- Ziari, H., Divandari, H. (2013), "Presenting asphalt mixtures flow number prediction model using gyratory curves", International Journal of Civil Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 125-133.
- ASTM D 1559, (1989), "Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus".
- ASTM D 4123-82, (1995), "Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures".
- Australian AS 2891.12.1, (1995), "Methods of Sampling and Testing Asphalt – Determination of the Permanent Compressive Strain Characteristics of Asphalt – Dynamic Creep Test".
- Chen, L., Yushi, Y. (2012), "Analysis on asphalt mixture performance Influenced by basalt mineral fiber", Jiangsu Traffic Science Research Institute, Nanjing, China.
- Fakhri, M., Hosseini, A. (2017), "Laboratory evaluation of rutting and moisture damage resistance of glass fiber modified warm mix asphalt incorporation high RAP proportion", Journal of Construction and Building Materials, No. 134, pp. 626-640.
- Fu, Zh., Dang, Y., Guo, B., Huang, Y. (2016), "Laboratory investigation on the properties of asphalt mixture modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis", Journal of Traffic and Transportation Engineering, No. 3(5), pp. 412-426.
- Huang, Yang H. (2004) "Pavement Analysis and Design", 2nd. Edition, USA, University of Kentucky.

