بهینه‌یابی مقدار الیاف کولار، شیشه و موکت در مخلوط‌های آسفالتی حاوی RAP بر اساس معیارهای BMD

مقاله علمی – پژوهشی

محمودرضا کی منش*، دانشیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
جلال ایوبی‌نژاد، استادیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
مجتبی ترابی میرزائی، دانشجوی دکتری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mrkeymanesh@pnu.ac.ir
دریافت: ۱٤۰۳/۱۰/۱۷– پذیرش: ۱٤۰٤/۰۳/۰۱
صفحه ٤۹٦-٤۸۳

چکیده

رویه‌های آسفالتی به عنوان بالاترین بخش روسازی راه‌ها در ارتباط مستقیم با امنیت و راحتی استفاده کنندگان راه بوده و هر خرابی در این رویه‌ها کیفیت خدمات راه‌ها را به صورت قابل توجهی کاهش می‌دهد. لذا در سالیان اخیر تحقیقات زیادی در خصوص خرابی‌های رویه‌های آسفالتی انجام شده است و علاوه بر معرفی خرابی‌های مهم روسازی، طیف وسیعی از مواد و مصالح برای افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر این خرابی‌ها پیشنهاد شده است. از سوی دیگر توسعه راه‌ها و همچنین بهسازی رویه‌ها، مقدار زیادی تراشه آسفالت کنده شده از سطح راه‌ها را ایجاد کرده و استفاده از آنها در ساخت مخلوط‌های آسفالتی از جهت کاهش هزینه (به دلیل داشتن قیر) و مزایای زیست محیطی، به امری مهم تبدیل کرده است. اما این تراشه‌های آسفالت به دلایل گوناگون دارای ضعف‌های مهمی هستند که بایستی از مواد و مصالح مختلف برای کاهش این ضعف‌ها استفاده کرد. بر همین اساس در این تحقیق از سه نوع الیاف کولار، شیشه و موکت برای بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و بدون تراشه آسفالت بازیافتی استفاده شده است و برای تعیین مقدار بهینه این الیاف‌ها از روش طرح اختلاط متعادل استفاده شده است. در نهایت نتایج این تحقیق نشان داد که نمونه‌های حاوی ۰٫۱ و ۰٫۳ درصد الیاف کولار و فاقد تراشه آسفالت بازیافتی و نیز نمونه‌های حاوی ۰٫۳ و ۰٫۵ درصد الیاف کولار با ۵۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی، دارای حداقل‌های لازم بر اساس معیارهای طرح اختلاط متعادل هستند.

واژه‌های کلیدی: الیاف کولار، الیاف شیشه، الیاف موکت، تراشه آسفالت بازیافتی، بهینه یابی، طرح اختلاط متعادل

۱-مقدمه

راه‌ها از جمله ارزشمندترین دارائی‌های هر کشوری به حساب می‌آید و طول عمر بهره‌مندی از این راه‌ها تاثیر قابل توجهی در اقتصاد هر کشوری دارد. سازه راه از بخش‌های مختلفی تشکیل می‌شود و هر کدام از این بخش‌های در طول عمر راه تاثیر بسیار زیادی دارند. در بین بخش‌های مختلف سازه راه بالاترین بخش که در تماس مستقیم با ترافیک عبوری از راه می‌باشد، بیشتر از جنس مخلوط‌های آسفالتی است. مخلوط‌های آسفالتی ترکیبی از مصالح سنگی، قیر و مواد افزودنی هستند و ویژگی هر کدام از این اجزا بر طول عمر مخلوط‌های آسفالتی تاثیر گذار است (Yang , 2013). در طی سالیان گذشته

محققـان از مواد و مصـــالح گونـاگونی برای افزایش عمر مخلوط‌های آسـفالتی استفاده کرده‌اند که در یک طبقه بندی این افزودنی‌ها را می‌توان به سـه دسـته کلی تقسیم نمود. دسته اول جایگزین‌های مصـالح سـنگی می‌باشد که از صفر تا صد درصد می‌تواند جایگزین مصـالح سـنگی گردد. از جمله این مصـالح می‌توان به سـرباره فولاد، مواد پلیمری، تراشـه آسفالتی بازیافتی و... اشاره کرد .(Tayfur, 2007)

دسـته دوم افزودنی‌های قیر هسـتند که به صـورت درصـدی جایگزین قیر مصـرفی می‌شوند و در ترکیب با قیر و در نهایت با مصـالح سـنگی خصـوصـیات قیر مصرفی را اصلاح می‌کنند. از جملـه این مواد می‌توان بـه افزودنی‌هـای پلیمری، نانو مواد، بازیافتی و ... اشاره کرد.

دسـته سوم افزودنی‌ها مواد مسلح کننده مخلوط‌های آسفالتی هستند این مواد را در اصطلاح کلی الیاف نام گذاری می‌کنند .(Shaker,2023 and Ameri, 2020)

الیاف‌ها از جنس مواد و مصالح گوناگونی هستند که با ساختار نـازک، انعطاف پذیر و نسـبت طول به عرض بالا مشـخص می‌شوند. الیاف‌ها را می توان در هر دو شکل طبیعی و مصنوعی یـافـت و در موارد مختلفی از صـنـایع گرفته تا فن آوری‌های پیشـرفته کاربرد دارند. از جمله کاربردهای الیاف‌ها در تسـلیح مخلوط‌های آسـفالتی می‌باشد. الیاف با بهبود خواص مکانیکی، کاهش تغییر شـکل و افزایش مقاومت در برابر عوامل محیطی، دوام مخلوط هـای آسـفـالت را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند.

(Ameri, et al., 2019 and Zadparast 2023)

در تحقیقات مرتبط با الیاف مشخص شده است که:

-الیاف‌های طبیعی از جمله لیگنین، باگاس و ... می‌تواند بهبود قابل توجهی در خواص آسـفالت مانند کاهش ترک خوردگی و افزایش دوام نشان داده‌اند. الیاف طبیعی سازگار با محیط زیست هستند و می‌توانند عمر روسازی را طولانی کنند.

(Wu, et al., 2024 and Xie, et al., 2024)

-الیاف‌های مصـنوعی مانند الیاف پلی اسـتر، کربن و... باعث بهبود مقاومت برشـی و مقاومت در برابر آسـیب رطوبت در مخلوط‌های آسـفالت می شـوند. به عنوان مثال، افزودن ۱٫۵٪ فیبر کربن باعث افزایش پایداری مارشال تا ۴۵٪ می‌شود. (Allwan, et al., 2024).

-افزودن الیاف بامبو سـختی و عملکرد ترک‌خوردگی مخلوط آسـفـالـت را در دمای متوسـط افزایش می‌دهد، اما بهبودها در دمای بالا قابل توجه نیستند.

-استفاده از الیاف می‌تواند مقدار قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی را تغییر دهد. همچنین اسـتفاده از الیاف شـیشـه باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد.

-الیاف آرامید به صورت قابل توجهی مقاومت سایش را بهبود می‌بخشـد. همچنین اسـتفاده از الیاف آرامید و شـیشـه موجب افزایش مقاومت کشـشـی غیر مسـتقیم مخلوط‌های آسـفالتی می‌گردد

(Gupta, et al., 2021 and Wiśniewski, et al., 2020)

-طول الیاف بر خصـوصـیات مخلوط‌های آسـفالتی از جمله پـایـداری در دمـای بـالا، مقـاومت در برابر ترک‌های پایین و حساسیت به آب تاثیرگذار است .(Guo, et al., 2020)

-نکته بسـیار مهم در خصـوص کاربرد الیاف در مخلوط‌های آسـفالتی که در تحقیقات مختلف نیز اشـاره شده است، توزیع یکنواخت الیاف در مخلوط‌های آسـفالتی اسـت که بایسـتی محققان در زمان افزودن الیاف به مخلوط قیر و سنگدانه به آن توجه نمایند.

(Allwan, et al., 2024 and Wu, et al., 2024)

تحقیقات در خصوص افزایش عمر مخلوط‌های آسفالتی در حضور انواع مختلف افزودنی‌ها توسط موسسات و پژوهشگران مختلفی انجام شـده است. در این تحقیقات خرابی‌های مختلفی شـامل ترک خوردگی، شـیار شـدگی، خسـتگی، عریان شدگی، مقاومت مارشال و ... مورد بررسی قرار گرفته است.

(مقدم و همکاران، ۲۰۱۱ و عمار و همکاران، ۲۰۲۰).

در این تحقیقـات تنهـا افزایش مقـاومت در برابر خرابی با افزودن مواد و مصـالح مختلف بیشـتر مورد توجه قرار گرفته اسـت اما اولویتی برا خرابی‌ها در نظر گرفته نشـده اسـت. از طرفی تحقیقـات اخیر نشـان می‌دهد که مخلوط آسـفالتی با عملکرد مناسـب بایسـتی در برابر دو خرابی متداول رویه‌های آسفالتی شامل شیار شدگی و ترک‌خوردگی مقاومت نشان دهد. ازاین‌رو، طبق طراحی بـه روش طرح اختلاط متعـادل طرح اختلاط مناسـب بایسـتی در مورد بهترین عملکرد در برابر شیار شدگی و ترک‌خوردگی انتخاب شود.

در کنـار این دو خصـوصـیت عملکردی برخی محققان بررسـی حسـاسـیت رطوبتی را نیز بسـیار موثر دانسـته‌اند. لذا، در طی چند سال گذشته برای ارائه طرح اختلاط بهینه به روش

طرح اختلاط متعادل سه خصوصیت شیار شدگی، ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی به وسیله محققان و موسسات مختلف استفاده شده است.

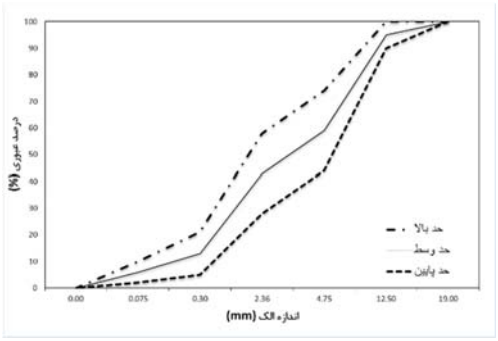
(Ziaee, et al., 2023 and Advanced Asphalt Technologies, LLC. 2011).

بر همین اساس در این تحقیق به بررسی و بهینه یابی تاثیر افزودن سه نوع الیاف مختلف شامل الیاف موکت، الیاف شیشه و الیاف کولار در مخلوطهای آسفالتی گرم و همچنین مخلوطهای آسفالتی گرم حاوی تراشه آسفالت باریافتی پرداخته شده است. برای بهینه یابی و تعیین درصد مناسب استفاده از هر الیاف از روش طرح اختلاط متعادل بهره گرفته شده است.

۲-مواد و مصالح

۲-۱-مصالح سنگی

مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق از نوع آهکی و شکسته کوهی بوده و از معدنی در جنوب شرق تهران تهیه شده است. مشخصات این مصالح در جدول شماره ۱ ارائه شده است. دانه بندی این مصالح طبق دانه بندی ارائه شده در نشریه ۲۳٤ راههای ایران و دانهبندی شماره ٤ پیوسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر میباشد که در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانهبندی مصالح سنگی

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی

شرح	استاندارد	نتیجه
حداکثر سایش به روش لس آنجلس (درصد)	AASHTO T96	۲۲/۳
حداکثر ضریب تورق (درصد)	BS 812	۱٦
حداقل شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ٤ (درصد)	ASTM D5821	۹۳
حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)	AASHTO T85	۲/۲
حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریز دانه)	AASHTO T84	۲/٤
وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی درشت دانه	ASTM C127	۲/۵۹
وزن مخصوص واقعی مصالح سنگی ریز دانه	ASTM C128	۲/۳۲

جدول ۲. مشخصات الیافهای مورد استفاده در تحقیق

نام ویژگی	الیاف کولار	الیاف موکت	الیاف شیشه
شرکت سازنده	پیشرو مبتکر پیوند	الیاف ترمه	پیشرو مبتکر پیوند
چگالی (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۱،٤۵	۰،۹۱	۲،٦
طول (میلیمتر)	٦	۱۲	۲۰
استحکام کششی(مگا پاسکال)	۳٦۲۰	۱٤۰۰	۳٤٤۵
پایه ماده تشکیل دهنده	پارا آرامید	پلیپرو پیلن	فیبر شیشه

۲-۲-الیافهای بکار رفته

در این تحقیق از سه نوع الیاف موکت، کولار و شیشه در سه درصد ۰،۱، ۰،۳ و ۰،۵ درصد وزنی مصالح سنگی استفاده شده است. الیاف موکت استفاده شده از نوع پلی پروپیلین بوده و هر سه الیاف در زمان اختلاط قیر و سنگدانه اضافه شده و در زمان ترکیب به صورت بصری دارای پخش یکنواختی بودهاند. خصوصیات این الیافها در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۳-تراشه آسفالت بازیافتی

در این تحقیق از تراشه آسفالت بازیافتی بدست آمده از بزرگراههای شرق تهران و نگهداری شدن در معدن اسب چران دماوند استفاده شده است. مصالح تراشه آسفالت بازیافتی دارای دانه بندی مشابه دانه بندی مصالح سنگی (٤ پیوسته نشریه ۲۳٤ راههای ایران) بوده و به مدت یک ماه در محل معدن نگهداری شده است. مشخصات این مصالح در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات تراشه آسفالت بازیافتی

دانه‌بندی	شماره ٤ پیوسته
عمر روسازی	۷ سال
مدت دپو	۱ ماه
مقدار قیر	٤,٥ درصد
افزودنی	ندارد

۲-٤-قیر مصرفی

در این تحقیق از قیر مصـــرفی از نوع قیر PG64-22 تولید شـرکت نفت پاسارگاد تهران استفاده شده است. مشخصات این قیر در جدول ٤ ارائه شـــده اســـت. مقدار قیر مصـــرفی در این تحقیق برای نمونه شـاهد با اسـتفاده از روش قیر بهینه مارشال برابر ٤,۸ درصـد بدست آمد و در ادامه این مقدار قیر در تمامی نمونه‌ها استفاده شده است.

جدول ٤. مشخصات قیر مصرفی

عنوان مشخصه	استاندارد مربوطه	حدود قابل قبول		نتیجه
		حداقل	حداکثر	
وزن مخصوص	T228	-	-	۱,۰۱۳
درجه نفوذ در ۲۵ سانتی گراد	T49	٦۰	۷۰	٦۲
نقطه نرمی (ساچمه- حلقه) بر حسب سانتی‌گراد	T53	٤۹	٥٦	٤۹,٥
مقدار کشش در۲۵ سانتی‌گراد بر حسب سانتی‌متر	T51	۱۰۰<	-	۱۰۰<
درجه اشتعال (روباز- کلوبند) بر حسب درجه سانتی‌گراد	T48	۲۳۲	-	۳۱۲

۲-٥-ساخت نمونه‌های آسفالتی

برای ســـاخت نمونه‌های آســـفالتی ابتدا مقدار قیر بهینه با اســـتفاده از روش مارشـــال بر روی نمونه شـــاهد و به مقدار ٤,۸ درصد تعیین شد. در ادامه تمامی نمونه‌ها با این درصد قیر ساخته شـده‌اند. برای آماده سـازی مصـالح سنگی این مصالح به مدت ١٦ سـاعت در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و در نهایت با قیر دمای اختلاط ترکیب شده‌اند.

۲-٥-۱- آماده سازی تراشه آسفالت بازیافتی

برای آماده سازی تراشه آسفالت بازیافتی در این تحقیق قبل از اختلاط مصـالح سنگی و قیر، مصالح تراشه آسفالت بازیافتی بـه مـدت ۲ ســـاعت در دمای اختلاط قرار گرفته و در نهایت در همان دما با ترکیب قیر و سنگدانه ترکیب شده است.

۲-٦-آزمایشات و طرح های اختلاط تحقیق

آزمایشـات مورد اسـتفاده در این تحقیق برای ارزیابی رفتار عملکردی مخلوط‌های آسفالتی برای مشخص کردن مقدار بهینه مواد و مصـالح اسـتفاده شـده شـامل آزمایش خزش دینامیکی، مقاومت کششی غیرمستقیم و ترک کششی غیرمستقیم بر اساس شـــاخص انعطـاف‌پـذیری ایلینوی بر روی نمونـه‌های تحقیق انجام‌گرفته اســـت. نمونه‌های تحقیق بر اســـاس مواد و مصـــالح استفاده شده دارای نام گذاری مختلفی هستند که این نام گذاری در جدول ٥ ارائه شده است.

جدول ٥. نام گذاری نمونه‌های تحقیق

ردیف	درصد RAP	الیاف موکت	الیاف شیشه	الیاف کولار	نام مخلوط
1	0	0	0	0	AC
2	0	0.1	0	0	10CF
3	0	0.3	0	0	30CF
4	0	0.5	0	0	50CF
5	0	0	0.1	0	10GF
6	0	0	0.3	0	30GF
7	0	0	0.5	0	50GF
8	0	0	0	0.1	10CvF
9	0	0	0	0.3	30CvF
10	0	0	0	0.5	50CvF
11	50	0	0	0	50RAP
12	50	0.1	0	0	50RAP10CF
13	50	0.3	0	0	50RAP30CF
14	50	0.5	0	0	50RAP50CF
15	50	0	0.1	0	50RAP10GF
16	50	0	0.3	0	50RAP30GF
17	50	0	0.5	0	50RAP50GF
18	50	0	0	0.1	50RAP10CvF
19	50	0	0	0.3	50RAP30CvF
20	50	0	0	0.5	50RAP50CvF

۲-۶-۱- آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی

برای ارزیابی و مقایسه مقاومت ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در دمای میانی در این تحقیق از آزمایش شاخص انعطاف پذیری ایلینوی استفاده شده است. مخلوط‌های مورد استفاده در تحقیق شامل مخلوط‌هایی حاوی انواع الیاف و تراشه آسفالت بازیافتی است. این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و طبق استاندارد AASHTO TP124 انجام می‌شود. بر همین اساس ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۱۶۰ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر با درصد فضای خالی ۷±۱ درصد با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری ساخته شده است. نمونه‌های بدست آمده تحت برش قرار گرفته و از هر نمونه ٤ نمونه SCB شکل با ضخامت ۵۰ میلی‌متر، قطر ۱۵۰ میلی‌متر و شیار ۱۵±۱ میلی‌متر با ضخامت شیار ۲,۲۵ میلی‌متر ایجاد شده است. نمونه‌های بدست آمده قبل از انجام آزمایش در چمبر با دمای ۲۵±۰,۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت نگهداری شده‌اند و در نهایت تحت بارگذاری ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفته است. در نهایت مقدار شاخص انعطاف پذیری ایلینوی (FI) با استفاده از روابط مندرج در AASHTO TP124 بدست آمده است. برای هر طرح اختلاط ٤ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و مقدار FI گزارش شده در نمودارها میانگین ٤ نمونه آزمایش شده می‌باشد.

(American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001).

۲-۶-۲-آزمایش کشش غیرمستقیم

آزمایش کشش غیر مستقیم در این تحقیق با هدف بررسی مقاومت کششی و سختی مخلوط‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف کولار، شیشه و موکت و همچنین تراشه آسفالت بازیافتی انجام شده است. این آزمایش طبق استاندارد AASHTO T283 انجام می‌شود. پارامتر خروجی این آزمایش مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم بوده و معمولاً برای اندازه گیری مقدار حساسیت به رطوبت در دو حالت تر و خشک انجام می‌شود. بر همین اساس نمونه‌هایی با شعاع ۵۰ میلی‌متر و فضای خالی بین ٦ تا ۸ درصد (در این تحقیق ۷±۰,۵ درصد) با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری متراکم شده است. برای هر طرح اختلاط ٦ نمونه آماده شده و ۳ نمونه به صورت تر و ۳ نمونه به صورت خشک مورد آزمایش قرار گرفته است. نمونه‌های خشک به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. نمونه‌های تر ابتدا به مقدار ۵۵ تا ۸۰ درصد اشباع‌شده و سپس به مدت ١٦ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شوند. سپس به مدت ٢٤ ساعت در دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد و درنهایت به مدت ۱۲۰ دقیقه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قبل از آزمایش قرار گرفته‌اند. در نهایت هر دو سری نمونه با اعمال یک بارگذاری کرنش ثابت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفته و مقدار مقاومت فشاری بدست آمده و طبق روابط مندرج در استاندارد آزمایش تبدیل به مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم شده است.

اما پارامتر اصلی این آزمایش مقدار حساسیت رطوبتی نمونه است که با پارامتر TSR نشان داده می‌شود و از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم تر به مقاومت کششی غیرمستقیم خشک و به‌صورت درصد به دست آمده است.

۲-۶-۳-آزمایش خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی در این تحقیق با هدف بررسی مقاومت شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی تحقیق استفاده شده است. مقاومت شیار شدگی ارتباط مستقیمی با تغییر شکل‌های دائمی دارد. یکی از روش‌های اندازه‌گیری ویژگی تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی، اعمال چندین هزار بار تکراری به‌وسیله یک آزمایش بار تکرارشونده و ثبت تغییر مکان‌های دائمی به‌عنوان تابعی از سیکل بارگذاری است. در این تحقیق برای انجام آزمایش خزش دینامیکی از استاندارد AS2891 و محاسبه مقدار عدد روانی(FN) به عنوان شاخصی برای ارزیابی مقدار مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. از همین رو در این تحقیق طبق استاندارد مطرح شده نمونه‌هایی با شعاع و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر با درصد فضای خالی ۵ درصد با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری متراکم شده است. نمونه‌های آماده شده طبق روند اعلام شده در استاندارد مدتی در دمای محیط نگهداری شده است. در نهایت در دمای آزمایش (۵۰ درجه سانتی‌گراد) قرار گرفته و با هم‌دما شدن نمونه‌ها آزمایش آنها شروع شده است. برای همین منظور از یک دستگاه UTM25 با اعمال بار ٤۰۰ کیلوپاسکال و با اعمال ۰,۵ ثانیه بارگذاری و ۱,۵ ثانیه باربرداری آزمایش انجام شده و مقدار FN برابر تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای ورود به ناحیه سوم کرنش تجمعی بدست آمده است. مقدار FN گزارش شده برای هر نمونه میانگین FN بدست آمده از ۳ تکرار می‌باشد .

Advanced Asphalt Technologies, LLC. (2011).

۲-٦-٤-طرح اختلاط متعادل

فاکتورهای موثر برای انتخاب یک طرح اختلاط بهینه و همچنین بهنیه یابی مواد و مصالح مختلف قابل استفاده در مخلوطهای آسفالتی از دیرباز به عنوان یکی از دغدغه‌های پژوهشگران حوزه روسازی‌های آسفالتی بوده است. محققین مختلفی برای این مورد راهکارها و پارامترهای متعددی را مورد بررسی قرار دادند. از جمله روش اختلاط سوپر پیو، مارشال و غیره که در سالیان گذشته مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. اما از طرفی استفاده از مواد و مصالح بازیافتی و فناوری‌های جدید در تولید مخلوطهای آسفالتی روش‌های مرسوم طراحی و طرح اختلاط را به چالش کشیده است. طبق مطالعات اخیر یک رویکرد باقابلیت اطمینان بالا برای توصیف دقیق عملکرد مخلوطهای آسفالتی بایستی عملکرد مخلوطهای آسفالتی را در برابر دو خرابی اصلی یعنی شیار شدگی و ترک‌خوردگی ناشی از خستگی مورد بررسی قرار داده و طرح مناسب را با توجه به این دو شاخص انتخاب کند. رویکرد طرح اختلاط تعادلی بر همین اساس است. اگرچه شیار شدگی و ترک‌خوردگی ازجمله خرابی‌های اصلی روسازی آسفالتی هستند اما خرابی‌های دیگر نظیر آسیب‌های رطوبتی نیز در رابطه با ویژگی‌های عملکردی مخلوطهای آسفالتی وجود دارد که روش طرح اختلاط متعادل می‌تواند در طرح اختلاط خود آن‌ها را نیز ارزیابی کند. در این تحقیق برای بررسی شیار شدگی از آزمایش خزش دینامیکی، برای بررسی حساسیت رطوبتی از آزمایش کشش غیرمستقیم و برای ارزیابی ترک‌خوردگی ناشی از خستگی در دمای میانی از شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی استفاده شده است.

مهمترین مساله در استفاده از روش طرح اختلاط تعادلی توجه به حدود مرزی است. حدود مرزی در واقع حداقل‌هایی هستند که هر خروجی آزمایش بایستی کسب نماید تا از نظر روش طرح اختلاط تعادلی مناسب تشخیص داده شود. مقدار این حدود مرزی برای هر کدام از آزمایشات تحقیق در جدول ٦ ارائه شده است.

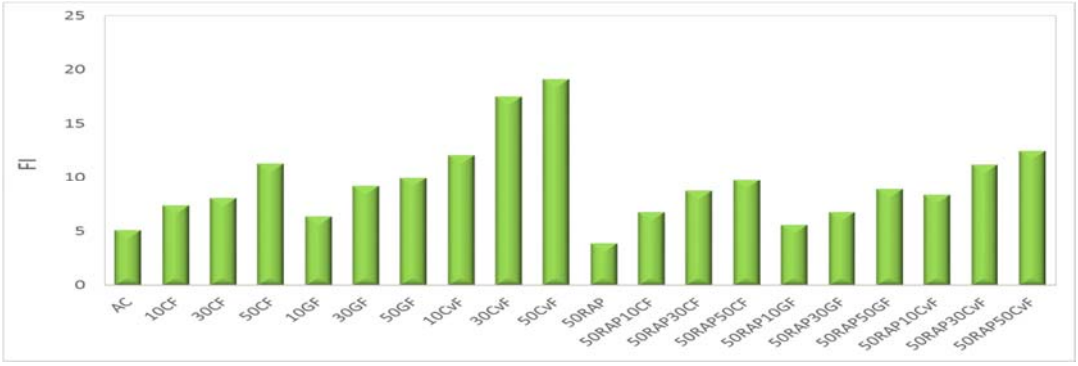
۳-نتایج و تحلیل آن

۳-۱-آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی

آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی قابل‌اعتمادترین و مرسوم‌ترین آزمایش برای بررسی عملکرد رفتار ترک‌خوردگی در دمای میانی است. شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی در این تحقیق با هدف بررسی ترک خوردگی مخلوطهای آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص انعطاف پذیری ایلینوی در این تحقیق با نماد FI نشان داده شده است. این آزمایش برخلاف بسیاری از آزمایشات مرتبط با بررسی ترک خوردگی در دمای مثبت (۲۵ درجه سانتی‌گراد) انجام شده است. نتایج مربوط به این آزمایش در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ٦. مقدار حدود مرزی برای هر یک از آزمایشات

نام آزمایش	پارامتر خروجی آزمایش	مقدار حدود مرزی
خزش دینامیکی	FN	740 Advanced Asphalt Technologies, LLC. (2011)
حساسیت رطوبتی	TSR	80 American Association of State Highway and Transportation Officials. (2000)
شاخص انعطاف پذیری ایلینوی	FI	8 (Al-Qadi, et al., 2019)



شکل ۲. نتایج آزمایش شاخص انعطاف پذیری ایلینوی

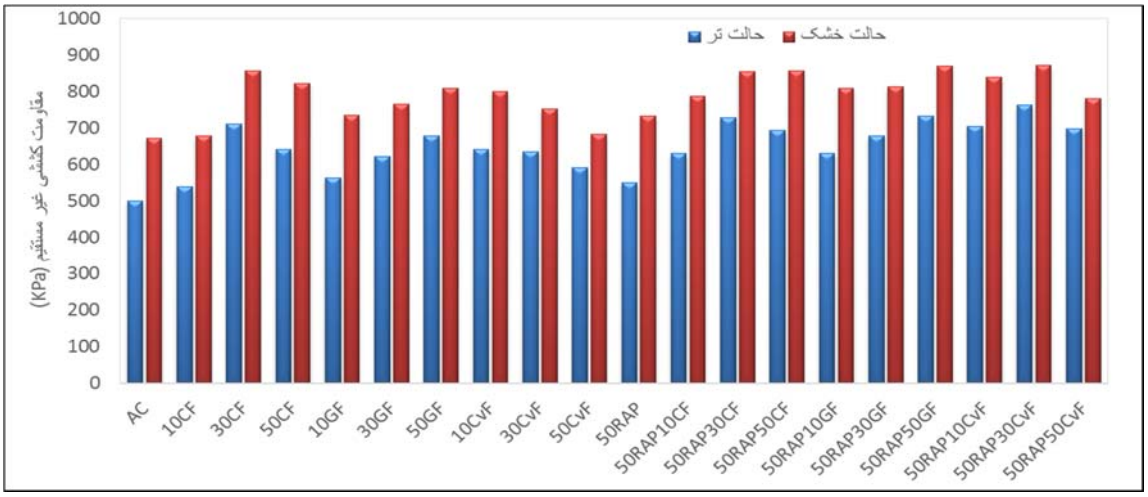
همانگونه که از نتایج برمی‌آید افزودن مواد و مصالح مختلف تحقیق در مقدار شاخص انعطاف پذیری ایلینوی مخلوط‌های آسفالتی تاثیر متفاوتی دارد که نیازمند طبقه بندی برای بررسی داده‌ها هستیم. طبقه بندی لحاظ شده شامل طبقه بندی بین الیاف‌های مختلف و همچنین طبقه‌بندی بین نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و نمونه‌های بدون تراشه آسفالت بازیافتی است. بررسی نمودار شکل ۲ نشان داد که: افزوده شدن تراشه آسفالت بازیافتی سبب کاهش در مقدار شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی شده است. این مقدار کاهش عدد قابل توجهی بوده و می‌توان چنین بیان کرد که افزوده شدن ۵۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی در حدود بیش از ۲۰ درصد سبب کاهش مقدار شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی شده است.

مقایسه نتایج نمونه‌های حاوی الیاف موکت نشان می‌دهد که افزودن الیاف موکت سبب بهبود مقدار شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی می‌شود. این بهبود با افزایش مقدار درصد الیاف موکت افزایشی است اما همانگونه که از نمودار برمی‌آید بین دو نمونه ۰,۳ درصد و ۰,۱ درصد بهبود چندان قابل توجه نیست اما با افزایش مقدار الیاف تا ۰,۵ درصد افزایش بسیار قابل توجه‌تر می‌گردد. در بیشترین مقدار بهبود در نتیجه افزوده شدن ۰,۵ درصد الیاف موکت شاهد افزایش بیش از ۱۰۰ درصدی در مقدار شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی هستیم. روند فوق در نتیجه افزوده شدن تراشه آسفالت بازیافتی به مخلوط حاوی الیاف موکت نیز ادامه‌دار بوده با این تفاوت که در نتیجه افزودن شدن تراشه آسفالت بازیافتی بهبود حاصل شده در نتیجه افزایش مقدار الیاف موکت از ۰,۱ تا ۰,۳ درصد قابل توجه‌تر شده است. بررسی نتایج نمونه‌های حاوی الیاف شیشه نشان می‌دهد که افزوده شدن این الیاف نیز سبب بهبود در مقدار شاخص انعطاف پذیری ایلینوی شده است اما روند بهبود مشاهده شده با افزوده شدن الیاف موکت متفاوت‌تر است. در نتایج مربوط به این نمونه مشاهده می‌شود که بین نتایج افزوده شدن ۰,۱ و ۰,۳ درصد الیاف شیشه افزایش قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود اما افزودن ۰,٤ درصد الیاف شیشه نتیجه در حدود افزودن ۰,۳ درصد الیاف شیشه با کمی افزایش نشان داده است.

روند فوق در نتیجه افزوده شدن تراشه آسفالت بازیافتی نیز قابل مشاهده است به گونه‌ای که افزوده شدن اولین درصد الیاف شیشه سبب جبران افت شاخص انعطاف پذیری ایلینوی در نتیجه افزوده شدن تراشه آسفالت بازیافتی شده است و بیشترین بهبود در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و الیاف شیشه مربوط به نمونه حاوی ۰,۵ درصد الیاف شیشه است. بررسی نتایج نمونه‌های حاوی الیاف کولار نشان از بهبود قابل توجه در مقدار شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی در نتیجه افزوده شدن این الیاف است. به گونه‌ای که بیشترین مقدار شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی در بین تمامی نمونه‌های بررسی شده با و بدون تراشه آسفالت بازیافتی مربوط به نمونه حاوی ۰,۵ درصد الیاف کولار می‌باشد. از نکات دیگر قابل توجه در نتایج مربوط به افزودن الیاف کولار افزایش قابل زیادی در مقدار شاخص انعطاف پذیری ایلینوی در نتیجه افزایش مقدار الیاف کولار از ۰,۱ درصد به ۰,۳ درصد است. روند فوق در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نیز تکرار شده و شاهد بهبود مقدار شاخص انعطاف پذیری ایلینوی در نتیجه افزوده شدن الیاف کولار و تراشه آسفالت بازیافتی هستیم.

۳-۲-آزمایش کشش غیرمستقیم

آزمایش کشش غیر مستقیم در این تحقیق با توجه به هدف اصلی از انجام آن که بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد، طبق روند پیشنهادی AASHTO T283 انجام شده است. بر همین اساس ٦ نمونه برای هر حالت ساخته شده و سه نمونه تحت شرایط خشک و سه نمونه تحت شرایط آسیب دیده رطوبتی (نمونه تر) مورد آزمایش قرار گرفته است. روند انجام هر کدام از این دو مورد بیان شده به صورت کامل در فصل سوم بیان شده است. نتایج این آزمایش در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم

همانگونه که بیان شد و از نمودار برمی‌آید، اولین طبقه بندی بین نتایج بین نمونه‌های تر و خشک است و به همین جهت در دو بخش متفاوت نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۱-نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نمونه‌های خشک

نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نمونه‌های خشک در نمودار شکل ۳ مربوط به ستون‌های قرمز می‌باشد در این مقایسه مشخص است که:

افزودن تراشه آسفالت بازیافتی در حدود ۱۰ درصد بهبود در مقاومت کششی غیر مستقیم خشک ایجاد می‌کند. این اتفاق با توجه به اینکه افزودن تراشه آسفالت بازیافتی به نوعی سختی مخلوط را بالا می‌برد، در بسیاری از تحقیقات مشابه نیز مشاهده شده است. نتایج آزمایش کششی غیر مستقیم خشک برای نمونه‌ها حاوی الیاف موکت نشان می‌دهد که افزودن بیش از ۰,۱ درصد از این الیاف می‌تواند در مقامت کششی غیر مستقیم خشک تاثیر گذار باشد و افزودن ۰,۱ درصد تاثیر نه چندان زیادی بر این مقاومت دارد. مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم خشک برای نمونه‌های حاوی الیاف موکت در حالت حداکثر مربوط به نمونه حاوی ۰,۳ الیاف است که بیش از ۲۵ درصد بهبود را ارائه کرده است. هر چند نتایج مربوط به نمونه حاوی ۰,۵ درصد الیاف موکت نیز نتیجه مشابهی را نشان داده و مقدار بهبود مشخص شده در حدود ۲۲ درصد است. از طرفی بررسی نتایج نمونه‌های حاوی الیاف موکت و تراشه آسفالت بازیافتی نشان از تفاوت در نتایج دارد چرا که نتایج این نمونه‌ها در حالت استفاده از ۰,۱ درصد الیاف موکت در حدود ۱۶ درصد بهبود و در حالت استفاده از ۰,۳ و ۰,۵ درصد بهبود حدوداً ۲۷ درصدی را نشان داده است. نتایج بررسی نمونه‌های الیاف کولار نشان می‌دهد که استفاده از این ماده در نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم خشک تفاوهای بیشتری را نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف موکت از خود نشان داده است. چرا که در حالت استفاده از ۰,۱ درصد الیاف کولار حدوداً ۲۰ درصد بهبود مشاهده می‌شود اما در دو حالت ۰,۳ و ۰,۵ درصد الیاف کولار روند بهبود کاهشی بوده و کمتر از ۱۵ درصد است. در طرف مقابل استفاده از الیاف کولار در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی تاثیر گذاری متفاوت‌تری را نشان می‌دهد چرا که بین تمامی نمونه‌های نمونه حاوی ۰,۳ درصد الیاف کولار بیشترین مقاومت کششی غیر مستقیم خشک را کسب کرده که نسبت به نمونه شاهد بهبود بیش از ۳۰ درصدی را مشاهده می‌کنیم. این نتیجه کمی بالاتر از مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم خشک نمونه حاوی ۰,۱ درصد الیاف و تراشه آسفالت باریافتی است. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم مربوط به نمونه‌های حاوی الیاف شیشه نشان می‌دهد که استفاده از ۰,۵ درصد الیاف شیشه بیش‌ترین بهبود را نسبت به دو درصد دیگر استفاده از این الیاف دارد. مقدار متناظر این بهبود نسبت به نمونه شاهد بیش از ۲۰ درصد است. همچنین نکته قابل ذکر در خصوص نتایج الیاف شیشه این است که ترکیب درصدهای مختلف الیاف شیشه با تراشه آسفالت بازیافتی نیز باعث بهبود مقاومت کششی غیر مستقیم خشک شده است.

۳-۲-۲- نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم نمونه‌های تر

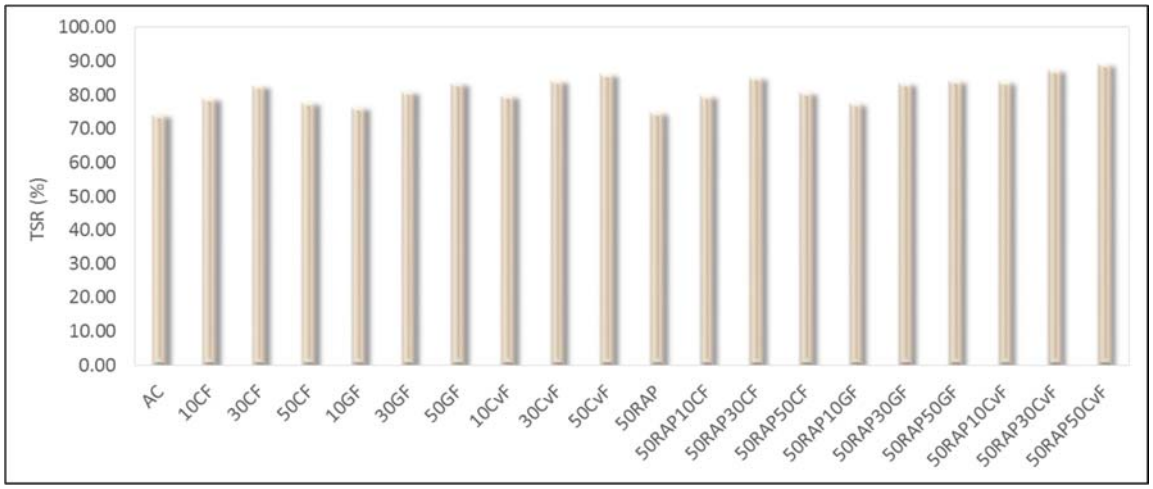
همانگونه که بیان شد نمونه‌های تر نمونه‌های هستند که آسیب رطوبتی دیده‌اند اما افزودن تراشه آسفالت بازیافتی و الیاف‌های مختلف این تحقیق توانسته است بر مقاومت کششی غیر مستقیم این نمونه‌ها نیز تاثیرگذار باشد. نتایج مربوط به آزمایش کشش غیر مستقیم تر در این تحقیق در نمودار شکل ۳ ستون‌های آبی رنگ نشان داده شده‌اند. نتایج مربوط به افزودن تراشه آسفالت بازیافتی به جای بخشی از مصالح سنگی نشان می‌دهد که افزودن این مصالح به صورت جزئی مقادیر مقاومت کششی غیر مستقیم تر را افزایش داده است. این افزایش کمتر از ۱۰ درصد است. نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم تر برای نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف موکت نشان می‌دهد که افزودن الیاف موکت توانسته است در مقابل آسیب‌های رطوبتی مقاومت کرده و مقاومت کششی غیر مستقیم تر را افزایش دهد. در بین نمونه‌های حاوی درصدهای ۰,۱، ۰,۳ و ۰,۵ درصد الیاف موکت نمونه حاوی ۰,۳ درصد الیاف موکت با اختلاف قابل توجه بیشترین مقاومت را از خود نشان داده است. این افزایش به گونه‌ای است که نسبت به نمونه شاهد افزایشی بیش از ۴۰ درصدی را مشاهده می‌کنیم.

روند فوق در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و درصدهای مختلف الیاف نیز تکرار شده است. در بین این نمونه‌ها، نمونه حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی و ۰,۳ درصد الیاف موکت بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم تر را نشان داده است.

نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم‌تر نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف الیاف کولار نشان می‌دهد که افزودن این الیاف در درصدهای مختلف باعث بهبود مقاومت کششی غیر مستقیم تر می‌شود. این روند در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نیز تکرار شده است، با این تفاوت که در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نمونه حاوی ۰,۱ درصد و ۰,۳ درصد بیشترین مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم تر را کسب کرده‌اند اما در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نمونه حاوی ۰,۳ درصد الیاف کولار بیشترین مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم تر را به خود اختصاص داده است. نتایج آزمایش کششی غیر مستقیم تر در نمونه‌های حاوی الیاف شیشه نشان می‌دهد که در هر دو حالت با تراشه آسفالت بازیافتی و بدون تراشه آسفالت بازیافتی افزودن این الیاف باعث بهبود مقاومت کششی غیر مستقیم تر می‌شود، هرچند این افزایش در حالت استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی بیشتر و قابل توجه‌تر است.

۳-۳- حساسیت رطوبتی

از نتایج دیگری که از آزمایش کشش غیرمستقیم می‌توان دریافت کرد، پارامتر TSR است که معرف حساسیت رطوبتی نمونه است. این پارامتر از تقسیم آزمایش کشش غیرمستقیم تر به خشک به صورت درصدی بدست می‌آید. نتایج TSR نمونه‌ها در شکل ٤ بیان‌شده است. حداقل این پارامتر طبق استاندارد برابر ۸۰ درصد می‌باشد.



شکل ٤. نتایج پارامتر TSR

نتایج شـــاخص TSR نمونه‌های مختلف تحقیق مربوط به هر الیاف به صـورت جداگانه مورد بحث و بررسـی قرار گرفته اسـت. همچنین بین نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و نمونـه‌هـای بـدون تراشـــه آســـفـالت بازیافتی نیز طبقه بندی جداگانه‌ای لحاظ شـده است. نتایج بررسی شاخص TSR برای نمونه‌های این تحقیق نشان داد که:

افزودن الیاف موکت به صـورت بسیار جزئی توانسته است شـاخص TSR را بهبود دهد به گونه‌ای که بیشـترین بهبود در نمونه‌های بدون تراشـه آسفالت بازیافتی مربوط به نمونه حاوی ۰,۳ درصد الیاف موکت و در حدود ۱۰ درصد بهبود بوده و در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی مربوط به همین نمونه ۰,۳ درصد و در حدود کمتر از ۱۵ درصد می‌باشد.

افزودن الیاف شیشه در حالت عدم استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی کمتر از ده درصـد مقدار شـاخص TSR را بهبود داده است و بیشترین مقدار بهبود مربوط به نمونه حاوی ۰,۵ درصد الیاف شـیشه است. در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی اما افزودن الیاف شـیشـه تاثیر گذاری بیشـتری داشـته و در دو نمونه حاوی ۰,۳ و ۰,۵ درصـد الیاف شـیشه بهبود بیش از ۱۲ درصدی در شاخص TSR را از خود نشان داده است.

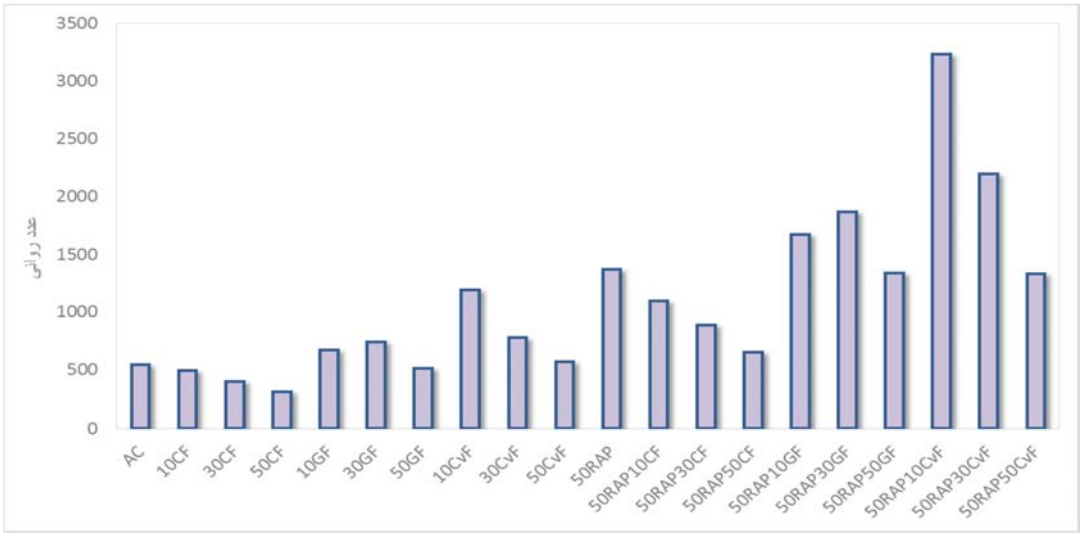
همـانگونـه کـه از نتایج برمی‌آید بیشـــترین تاثیر در بهبود حسـاسـیت رطوبتی در حالت اسـتفاده ۰,۸ درصـد الیاف چند جزئی رخ داده اســت. نمونـه‌هـای حاوی این مقدار الیاف در تمامی حالات تحقیق (شـامل تراشـه آسـفالت بازیافتی یا بدون آن، شـامل جوانساز در درصدهای مختلف یا بدون آن) توانسته اسـت، بالاترین نتایج را بدست آورد و لذا با در نظر گرفتن تنها پارامتر TSR می‌توان مقدار بهینه استفاده از الیاف چند جزئی را ۰,۸ درصد مصالح سنگی معرفی کرد.

از نتایج دیگری که از نمودار شـکل ٤ می‌توان گرفت تاثیر بسـیار ناچیز تراشـه آسـفالت بازیافتی در پارامتر TSR اسـت. از طرفی اسـتفاده از جوانسـاز مقدار حسـاسـیت به رطوبت را کاهش داده است. این مقدار کاهش اما با افزایش مقدار جوانساز چندان تغییری نداشته است.

افزودن الیـاف کولار بـه مـانـنـد دو الیاف دیگر باعث بهبود شـــاخص TSR شـــده اســـت. اما یک تفاوت فاحش در نتایج مربوط بـه الیاف کولار وجود دارد و آن مقدار بهبود اســـت در این الیاف بهبود شـاخص TSR از هر دو الیاف قبل بیشتر بوده و در حالت بدون تراشـــه آســـفالت بازیافتی نمونه حاوی ۰,۵ درصـد الیاف کولار بیش از ۱۵ درصـد بهبود نشـان داده و در حالت با تراشه آسفالت همین نمونه بیش از ۲۰ درصد بهبود را نشان داده است.

۳-٤-خزش دینامیکی

در این تحقیق آزمـاش خزش دینـامیکی برای ارزیـابی عملکرد شـیار شـدگی مخلوط‌های آسـفالتی به‌عنوان یکی از آزمایش‌های عملکردی مطرح در BMD انجام‌شده است. نتایج مربوط به آزمایش خزش دینامیکی در تحقیق جاری در شـــکل ۵ معرفی شـده اسـت و لازم به یادآوری است که هر ستون از نمودار نشـــانگر مقدار عدد روانی میانگین ســـه نمونه آزمایش شده است.



شکل ۵. نتایج آزمایش خزش دینامیکی

برای بررسی نتایج آزمایش خزش دینامیکی در این تحقیق به مانند آزمایش کشش غیرمستقیم، چند طبقه بندی لحاظ شده است. طبقه بندی اول بین نوع الیاف‌ها می‌باشد و نتایج هر الیاف به صورت جدا ارائه شده است. طبقه بندی دوم مربوط به نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و نمونه‌های بدون تراشه آسفالت بازیافتی است. از نتایج ارائه شده در نمودار شکل ۵ برمی‌آید که:

افزودن تراشه آسفالت بازیافتی با توجه به اینکه سختی مخلوط را افزایش می‌دهد، به صورت قابل ملاحظه‌ای بر عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی این تحقیق اثر گذار بوده است به گونه‌ای که مقایسه بین نتایج حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی و نمونه شاهد نشان از بهبود بیش از صد درصدی در عدد روانی حکایت دارد. بررسی نتایج نمونه‌های حاوی الیاف موکت نشان داد که افزودن الیاف موکت موجب کاهش در عدد روانی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد. این کاهش با افزایش درصد الیاف موکت در مخلوط‌های آسفالتی افزایش یافته به گونه‌ای که نمونه حاوی ۰,۵ درصد الیاف موکت بیش از ٤۰ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش عدد روانی را از خود نشان داده است. روند فوق در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نیز ادامه دار بوده است و مقدار کاهش در این نمونه‌ها با شدت بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون تراشه آسفالت بازیافتی رخ داده است. نتایج این نمونه‌ها نشان می‌دهد که بیشترین کاهش در نمونه حاوی ۰,۵ درصد الیاف موکت بوده که کاهش حدودا ۵۰ درصدی در عدد روانی را از خود نشان داده است. نتایج آزمایش خزش دینامیکی در نمونه‌های حاوی الیاف شیشه نشان داد که افزودن این الیاف برخلاف نمونه‌های حاوی الیاف موکت باعث بهبود عدد روانی مخلوط آسفالتی می‌گردد. نتایج نشان داد که افزودن ۰,۳ درصد الیاف شیشه به مانند افزودن ۰,۱ درصد الیاف شیشه می‌تواند بهبود بیش از ۳۰ درصدی را نسبت به نمونه شاهد در عدد روانی از خود نشان دهد. از طرفی افزودن تراشه آسفالت بازیافتی و الیاف شیشه روند مشابهی را دارد و با افزایش مقدار الیاف شیشه تا ۰,۳ درصد مقدار عدد روانی افزایشی می‌شود. در بین نمونه‌های حاوی الیاف شیشه و تراشه آسفالت بازیافتی نمونه حاوی ۰,۳ درصد الیاف شیشه نسبت به نمونه حاوی تنها تراشه آسفالت بازیافتی بیش از ۳۰درصد بهبود را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های مسلح شده با درصدهای مختلف الیاف کولار نشان داد که افزودن این الیاف تا درصد ۰,۱ درصد سبب افزایش عدد روانی می‌گردد. از درصد ۰,۱ درصد تا ۰,۵ با وجود افزایش نسبت به نمونه شاهد، کاهش نسبت به نمونه حاوی الیاف ۰,۱ درصد مشاهده می‌شود. روند فوق در نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نیز ادامه‌دار بوده و نمونه حاوی ۰,۱ درصد الیاف کولار و تراشه آسفالت بازیافتی بیشترین مقدار عدد روانی را در بین تمامی نمونه‌ها با الیاف‌های مختلف به خود اختصاص داده است.

۳-۵-تعیین مقادیر بهینه مطابق با رویکرد BMD

در این رویکرد ابتدا همانگونه که در بخش قبل مشخص شد، آزمایشات عملکردی مرتبط با هر خرابی تعیین می‌شود. در این تحقیق آزمایش خزش دینامیکی با خروجی عدد روانی برای بررسی شیار شدگی، آزمایش کشش غیر مستقیم و شاخص TSR برای بررسی حساسیت رطوبتی و آزمایش شاخص انعطاف پذیری ایلینوی با پارامتر FI برای بررسی ترک خوردگی تحت اثر خستگی انتخاب شد. در ادامه در جدول ۷ بررسی حداقل‌ها انجام شده است. بر همین اساس نام طرح اختلاط‌هایی که زرد رنگ شده‌اند، حداقل در یک آزمایش قادر به کسب حداقل‌ها نبوده، قرمز برای طرح اختلاط‌هایی است که در بیش از یک آزمایش حداقل‌ها را پاس نرده و در نهایت رنگ سبز طرح اختلاط‌هایی را معرفی می‌کند که تمامی حداقل‌ها را پاس کرده باشد.

طبق داده‌های ارائه شده در جدول ۷ و بررسی نتایج به روش طرح اختلاط متعادل ٤ نمونه توان کسب حداقل نتایج روش طرح اختلاط متعادل را داشته‌اند. این چهار نمونه عبارتند از: دو نمونه حاوی ۰,۱ و ۰,۳ درصد الیاف کولار و همچنین نمونه حاوی ۵۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی و ۰,۳ و ۰,۵ درصد الیاف کولار.

در بین طرح‌های منتخب از بین نمونه‌های بدون تراشه آسفالت بازیافتی نمونه حاوی ۰,۲ درصد الیاف کولار با توجه به اینکه حداقل الیاف ممکن استفاده شده، مطلوب تر است. همچنین در بین نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی نمونه حاوی ۰,۳ درصد الیاف کولار و ۵۰ درصد تراشه آسفالت بازیافتی استفاده مطلوب‌تری دارد.

جدول ۷. طرح اختلاط متعادل

ردیف	نام مخلوط	TSR	خزش	FI
1	AC	74.4	545	5.1
2	10CF	79.3	493	7.4
3	30CF	83.1	400	9.5
4	50CF	78.1	309	11.3
5	10GF	76.6	667	6.4
6	30GF	81.3	740	8.5
7	50GF	83.8	514	10
8	10CvF	80.1	1189	12.1
9	۳۰CvF	84.6	774	17.5
10	50CvF	86.5	566	19.1
11	50RAP	75.1	1363	3.9
12	50RAP10CF	80.1	1093	6.8
13	50RAP30CF	85.4	883	8.4
14	50RAP50CF	81.1	649	9.81
15	50RAP10GF	77.9	1672	5.1
16	50RAP30GF	83.6	1869	6.8
17	50RAP50GF	84.4	1329	8.9
18	50RAP10CvF	84.1	3232	8.4
19	50RAP30CvF	87.6	2194	11.2
20	50RAP50CvF	89.4	1324	12.5

۵- نتیجه‌گیری

همانگونه که در بخش‌های قبل بیان شد، در این تحقیق خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه آسفالت بازیافتی و سه مدل مختلف الیاف شامل الیاف شیشه، موکت و کولار مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از سه آزمایش خزش دینامیکی، شاخص انعطاف پذیری ایلینوی و حساسیت رطوبتی استفاده شده است. در نهایت برای تعیین مقدار بهینه مواد و مصالح تحقیق از روش طرح اختلاط متعادل استفاده گردیده است. بر همین اساس خلاصه نتایج این تحقیق عبارتند از:

-نتایج آزمایش شاخص انعطاف پذیری ایلینوی نشان داد که تراشه آسفالت بازیافتی باعث کاهش مقدار شاخص انعطاف پذیری ایلینوی می‌شود. الیاف موکت در تمام درصدها سبب افزایش مقدار شاخص انعطاف پذیری ایلینوی شده و مناسب‌ترین درصد آن ۰,۵ درصد می‌باشد. الیاف شیشه و کولار در روند کلی رفتاری مشابه الیاف شیشه داشته و در هر دو الیاف مقدار ۰,۵ درصد بیشترین مقدار شاخص انعطاف پذیری ایلینوی را نشان داده است.

-نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان داد که استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی سبب افزایش عدد روانی می‌شود. افزودن الیاف شیشه تا ۰,۳ درصد، سبب افزایش عدد روانی شده و از آن درصد به بعد باعث کاهش عدد روانی می‌گردد. الیاف موکت در تمامی درصدها، سبب کاهش عدد روانی شده و الیاف کولار تا ۰,۱ درصد سبب افزایش عدد روانی شده است.

-نتایج آزمایش مقاومت کشش غیر مستقیم نشان داد که استفاده از تراشه آسفالت بازیافتی تاثیر ناچیز بر مقاومت کشش غیر مستقیم دارد. افزودن الیاف شیشه تا ۰,۳ درصد سبب افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم تر و خشک می‌گردد. الیاف شیشه در هر سه درصد ۰,۱، ۰,۳ و ۰,۵ افزایش در مقاومت کشش غیرمستقیم تر و خشک نشان داده اشت. اما الیاف کولار تا ۰,۱ درصد افزایش نشان داده و در درصدهای ۰,۳ و ۰,۵ نسبت به نمونه حاوی ۰,۱ درصد الیاف کولار کاهش نشان می‌دهد.

-نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نشان داد که افزودن تراشه آسفالت بازیافتی به صورت ناچیز مقدار پارامتر TSR را کاهش می‌دهد. اما الیاف شیشه و الیاف کولار در هر سه درصد بررسی شده، افزایش در مقدار پارامتر TSR نشان داده‌اند. الیاف موکت تا ۰,۳ درصد افزایش نشان داده است.

-بر اساس روش طرح اختلاط متعادل و با در نظر گرفتن حداقل‌های مربوط به هر آزمایش چهار نمونه CvF10، CvF30، RAP50CvF30، RAP50CvF50 به‌عنوان نمونه‌های که توان پاس کردن حداقل‌های مربوط به روش طرح اختلاط متعادل را داشته‌اند، معرفی شد.

٦- مراجع

-American Association of State Highway and Transportation Officials. (2001). Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Illinois Flexibility Index Test (I-FIT). *AAshtoo TP124-20, Washington,* DC, USA.

-Advanced Asphalt Technologies, LLC. (2011). A manual for design of Hot Mix asphalt with commentary (Vol. 673). *Transportation Research Board.*

-Ameri, M., Shaker, H., Badarloo, B., & Jafari, F. (2020). Numerical and experimental investigation on the modified of hot mix asphalt

-Omar, H. A., Yusoff, N. I. M., Mubaraki, M., & Ceylan, H. (2020). Effects of moisture damage on asphalt mixtures. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 600-628.
-Shaker, H., Ameri, M., Aliha, M. R. M., & Rooholamini, H. (2023). Evaluating low-temperature fracture toughness of steel slag aggregate-included asphalt mixture using response surface method. *Construction and Building Materials,* 370, 130647.
-Tayfur, S., Ozen, H., & Aksoy, A. (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials,* 21(2), 328-337.
-Wu, J., Zhao, Z., Jiang, C., Yang, Y., Sun, Z., Yuang, J., & Xiao, F. (2024). Recent development and application of natural fiber in asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production,* 141832.
-Wiśniewski, D., Słowik, M., Kempa, J., Lewandowska, A., & Malinowska, J. (2020). Assessment of impact of aramid fibre addition on the mechanical properties of selected asphalt mixtures. Materials, 13(15).
doi.org/10.3390/ma13153302
-Xie, H., Jia, Y., Zhu, C., Liu, W., Li, Z., & Huang, Z. (2024). Investigation of Surface Modification of Bagasse Fibers: Performance of Asphalt Binders/Mixtures with Bagasse Fibers. *Buildings*, 14(5), 1352.
-Yang, J., & Tighe, S. (2013). A review of advances of nanotechnology in asphalt mixtures. *Procedia-Social and Behavioral Sciences,* 96, 1269-1276.
-Zhou, F., Im, S., Sun, L., & Scullion, T. (2017). Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA. *Road Materials and Pavement Design,* 18(sup4), 405-427.
-Ziaee, S. A., Fatemi, S. S., Shaker, H., Ameri, M., & Saadatjoo, S. A. (2023). Optimization of CLS Content of Asphalt Mixtures Based on Balanced Mix Design Approach. *Advances in Civil Engineering,* 2023(1), 7594186.
-Zadparast, S. N., & Ameri, M. (2023). Analyzing the Functional Features of HMA Mixtures Containing Multi-Component Polymeric and Glass Fibers. *Journal of Civil Engineering & Materials Application,* 7(3).
concrete containing crumb rubber and waste pet. *Tehnički vjesnik,* 27(4), 1186-1193.
-American Association of State Highway and Transportation Officials. (2000). Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. Aashto T283-99, *Washington, DC*, USA.
-Allwan, N. A., Al-Rubaee, R. H., & Shubber, A. A. (2024). Study of Improving the Mechanical Characteristics of HMA by Using Carbon Fiber. *Nanotechnology Perceptions*, 362-372.
-Ameri, M., Nemati, M., & Shaker, H. (2019). Experimental and numerical investigation of the properties of the Hot Mix Asphalt Concrete with basalt and glass fiber. *Frattura ed Integrità Strutturale,* 13(50), 149-162.
-Advanced Asphalt Technologies, LLC. (2011). A manual for design of Hot Mix asphalt with commentary (Vol. 673). *Transportation Research Board.*
-Al-Qadi, I. L., Ozer, H., Zhu, Z., Singhvi, P., Mohamed Ali, U., Sawalha, M., & Zehr, T. G. (2019). Development of long-term aging protocol for implementation of the Illinois flexibility index test (I-FIT). *Illinois Center for Transportation/Illinois Department of Transportation.*
-Jia, H., Sheng, Y., Lv, H., Kim, Y. R., Zhao, X., Meng, J., & Xiong, R. (2021). Effects of bamboo fiber on the mechanical properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials,* 289, 123196.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123196
-Gupta, A., Castro-Fresno, D., Lastra-Gonzalez, P., & Rodriguez-Hernandez, J. (2021). Selection of fibers to improve porous asphalt mixtures using multi-criteria analysis. *Construction and Building Materials,* 266, 121198.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121198
-Guo, F., Li, R., Lu, S., Bi, Y., & He, H. (2020). Evaluation of the effect of fiber type, length, and content on asphalt properties and asphalt mixture performance. *Materials,* 13(7), 1556.
-Moghaddam, T. B., Karim, M. R., & Abdelaziz, M. (2011). A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes. *Scientific Research and Essays,* 6(4), 670-682.

Optimizing the amount of Kevlar, Glass and Carpet Fibers in Asphalt Mixtures Containing RAP based on BMD Criteria

Mahmoud Reza Keymanesh, Associate Professor, Civil Engineering Group,
Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.
Jalal Ayoubinejad, Assistant Professor, Civil Engineering Group,
Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.
Mojtaba Torabi Mirzaee, Ph.D., Student, Civil Engineering Group,
Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.
E-mail: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT
Asphalt pavements, as the highest part of road paving, are directly related to the safety and comfort of road users, and any failure in these pavements significantly reduces the quality of road services. Therefore, in recent years, a lot of research has been done regarding the failures of asphalt pavements. On the other hand, the development of roads as well as the improvement of procedures have stored a large amount of reclaimed asphalt pavement removed from the surface of the roads and their use in the production of asphalt mixtures in order to reduce the cost (due to the presence of bitumen) and biological benefits. It has made the environment an important matter. But these reclaimed asphalt pavement have important weaknesses for various reasons, and different materials should be used to reduce these weaknesses. Accordingly, in this research, three types of Kevlar, glass and carpet fibers have been used to improve the performance characteristics of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and without reclaimed asphalt pavement, and the method of balanced mixing design has been used to find the optimal amount of these fibers. Has been the results of this research showed that the samples containing 0.1 and 0.3% of Kevlar fibers and the samples containing 50% of recycled asphalt chips and containing 0.3 and 0.5% of Kevlar fibers have the minimum requirements based on the criteria of balanced mixing plan.

Keywords: Kevlar Fibers, Carpet Fibers, Reclaimed Asphalt Pavement, Optimization, Balanced Mixing Design