

H. Ziari*

Professor, Iran University of
Science and Technology,
Tehran, Iran.

e-mail: h.ziari@iust.ac.ir

M. Hajiloo

Iran University of Science
and Technology, Tehran,
Iran.

e-mail:
m_hajiloo@civileng.iust.ac.ir

Design of Asphalt Mixtures Containing RAP by Balanced Mix Design (BMD) Method

The mix design of asphalt mixtures is one of the most important factors that affect their performance. Given the importance of the performance assessment of asphalt mixtures and volumetric parameters, a new method called balanced mix design (BMD) had been created. This method considers volumetric parameters as the initial criterion. The ultimate criterion to determine an appropriate range for the optimum bitumen percentage is the proper rutting and cracking performance of the asphalt mixture. In this study, five different asphalt mixture designs were first investigated using the Superpave method, using low (25%) and high (50%) percentages of RAPs and vegetable oil as a recycling agent. Then the mixtures were designed using the BMD method considering three different bitumen contents for each mixture. The Hamburg Wheel Tracking and I-FIT tests were performed to assess the rutting and cracking resistance, respectively. The results of this study show that the optimum binder content (OBC) obtained by BMD method is different from the Superpave method. The highest discrepancies are observed when 25% and 50% of the RAP materials are used without rejuvenator. In these mixtures, the results show that the OBC obtained by the BMD method compared to the Superpave method for mixtures containing 25 and 50% RAP without rejuvenator increased by 9.56 and 22.18%, respectively. In terms of performance, the percentage of OBC by the Superpave method is not suitable for mixtures containing RAP and rejuvenator.

Keywords: Balanced mix design (BMD), Reclaimed asphalt pavements (RAPs), Rejuvenator, Superpave, Hamburg Wheel Tracking test, Cracking.

* Corresponding author

Received 26 February 2022, Revised 25 May 2022, Accepted 15 June 2022.
DOI: 10.22091/cer.2022.7959.1366

طرح مخلوط‌های آسفالتی حاوی تراشه به روش طرح اختلاط متعادل شده

حسن زیاری*

استاد، دانشکده عمران، دانشگاه

علم و صنعت ایران.

پست الکترونیک:

h.ziari@iust.ac.ir

مجتبی حاجیلو

دانشکده عمران، دانشگاه علم و

صنعت ایران.

پست الکترونیک:

M_hajiloo@civileng.iust.ac.ir

یکی از مهم‌ترین عواملی که بر عملکرد یک مخلوط آسفالتی تأثیرگذار است طرح اختلاط می‌باشد. اهمیت ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در کنار پارامترهای حجمی باعث شکل‌گیری روش جدیدی به نام طرح اختلاط متعادل شده (BMD) گردیده است. در این روش پارامترهای حجمی به عنوان معیار اولیه مدل نظر قرار می‌گیرد. معیار نهایی به منظور تعیین یک بازه مناسب برای درصد قیر بهینه، عملکرد مناسب مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدنگی و ترک خوردگی می‌باشد. در این تحقیق با به کارگیری دو درصد ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه و روغن گیاهی به عنوان جوانساز، طرح اختلاط پنج مخلوط آسفالتی مختلف، ابتدا به روش سوپرپیو انجام شده است. در ادامه با در نظر گرفته سه درصد قیر مختلف برای هر مخلوط، طرح اختلاط مخلوطها با روش BMD انجام شده است. آزمایش شیارشدنگی هامبورگ و آزمایش I-FIT به ترتیب به منظور ارزیابی مقاومت در برابر شیارشدنگی و ترک خوردگی در طرح مخلوطها به روش BMD مورد استفاده گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که درصد قیر بهینه بدست آمده از روش BMD متفاوت از درصد قیر بهینه حاصله از روش سوپرپیو می‌باشد. بیشترین مقادیر تغییر درصد قیر بهینه مربوط به نمونه حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه بدون جوانساز می‌باشد. درصد قیر حاصله از روش BMD نسبت به روش سوپرپیو برای مخلوط حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه بدون جوانساز، به ترتیب ۹/۵۶ و ۲۲/۱۸ درصد افزایش یافته است. از نظر عملکردی مقدار درصد قیر بهینه حاصل از روش سوپرپیو برای مخلوط‌های حاوی تراشه و جوانساز مناسب نیست.

وازگان کلیدی: طرح اختلاط متعادل شده (BMD)، تراشه، جوانساز، سوپرپیو، آزمایش شیارشدنگی هامبورگ، ترک خوردگی.

۱- مقدمه

مشکلات استفاده از تراشه برهمنوردن تعادل بین آسفالت^۲ و مالتن^۳ در قیر به دلیل پدیده پیرشدنگی^۴ می‌باشد [۳]. در سال‌های اخیر استفاده از جوانسازها^۵ با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت به منظور تبدیل خصوصیات قیر پیرشده به قیر تازه رشد چشمگیری داشته است [۴، ۵].

در سال‌های اخیر افزایش حجم تراشه‌های آسفالتی، مزیت‌های اقتصادی و زیستمحیطی باعث استفاده مجدد از تراشه در مخلوط‌های آسفالتی شده است [۱]. استفاده از تراشه‌های آسفالت در درصدهای مختلف رشد چشمگیری در سال‌های اخیر داشته است [۲]. یکی از

² Asphaltene

³ Maltene

⁴ Aging

⁵ Rejuvenators

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۰۷، بازنگری ۱۴۰۱/۰۳/۰۴، پذیرش ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

(DOI): 10.22091/cer.2022.7959.1366

در سال‌های اخیر روش BMD در تحقیقات مختلفی با اهداف گوناگون مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳-۱۵]. پوهشگران از روش BMD بهمنظور تعیین درصد قیر بهینه مخلوطهای آسفالتی حاوی تراشه و تعیین درصد بهینه جوانساز استفاده کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش BMD می‌تواند به انتخاب دقیق‌تر درصد جوانساز بهینه کمک کند [۱۶].

باروس^{۱۲} و همکاران در تحقیقی عملکرد متعادل شده مخلوطهای آسفالتی حاوی سه درصد مختلف را مورد بررسی قرار داده‌اند. افزایش درصد تراشه‌های آسفالتی در مخلوطها باعث افزایش نرخ رشد ترک و افزایش مقاومت در برابر شیارشدنگی می‌شود. نویسنده‌گان این تحقیق معتقدند که انجام آزمایش‌های عملکردی می‌تواند منجر تضمین طرح مخلوطهای حاوی تراشه شود [۱۷].

صبوری در تحقیقی درصد قیر بهینه مخلوطهای حاوی ۰، ۲۰ و ۴۰ درصد تراشه را ابتدا با روش سوپرپیو و سپس با روش BMD تعیین کرده است. بهمنظور ارزیابی خصوصیات خستگی و شیارشدنگی به ترتیب از مدل آسیب‌پیوسته ویسکوالاستیک ساده شده^{۱۳} و جاروب تنش سه محوری^{۱۴} استفاده شده است. مهم‌ترین دستاوردهای تحقیق این است که مقدار قیر بهینه حاصله از روش BMD از مقدار قیر بهینه محاسبه شده به روش سوپرپیو کمتر است [۱۸].

تحقیقان در پژوهشی با رسم نمودارهای تعامل طراحی مخلوط متعادل^{۱۵} درصد جوانساز بهینه را بهمنظور رسیدن به مخلوط با عملکرد مناسب تعیین کرده‌اند. از نتایج این تحقیق می‌توان به این نکته اشاره کرد که

یکی از چالش‌های استفاده از تراشه^۶ و جوانساز در مخلوطهای آسفالتی، طرح اختلاط مخلوط بهمنظور رسیدن به بهترین عملکرد می‌باشد [۶]. پیمانکاران، مهندسان مشاور و محققان معمولاً از روش سطح یک سوپرپیو^۷ بهمنظور طرح مخلوطهای حاوی تراشه استفاده می‌کنند [۷]. در روش سوپرپیو مقدار قیر بهینه مخلوطهای آسفالتی بر اساس خصوصیات حجمی مخلوط تعیین می‌شود. به کارگیری افزودنی‌های مختلف از قبیل تراشه و جوانسازها صلاحیت روش طراحی بر اساس روابط وزنی حجمی در سطح یک سوپرپیو را با تردید مواجه می‌کند [۸].

اهمیت ارزیابی عملکرد مخلوطهای آسفالتی در کنار پارامترهای حجمی باعث شکل‌گیری روش جدیدی به نام طرح اختلاط متعادل (BMD^۸) شده مخلوط شده است [۹]. هدف طرح متعادل شده، متعادل کردن مقاومت در برابر شیارشدنگی و ترک‌خوردگی مخلوطهای آسفالتی می‌باشد. در روش BMD پارامترهای حجمی به عنوان معیار اولیه مدنظر قرار می‌گیرد. معیار نهایی بهمنظور تعیین یک بازه مناسب برای درصد قیر بهینه، عملکرد مناسب مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدنگی و ترک‌خوردگی می‌باشد [۱۰]. اگرچه می‌توان گفت که مفهوم طرح اختلاط متعادل شده در دهه ۱۹۸۰ بیان شد [۱۱]. اما در سال ۲۰۰۶ مفهوم BMD توسط موسسه حمل و نقل تگزاس آمریکا^۹ در یک گزارش معرفی شد. در آن گزارش، از آزمایش شیارشدنگی هامبورگ^{۱۰} بهمنظور ارزیابی مقاومت شیارشدنگی و از آزمایش ارزیابی روکش^{۱۱} برای ارزیابی مقاومت ترک‌خوردگی ناشی از خستگی استفاده شده است [۱۲].

¹² Barros

¹³ Simplified Viscoelastic Continuum Damage (S-VECD)

¹⁴ Triaxial Stress Sweep (TSS)

¹⁵ Balanced mix design interaction plots

⁶ Reclaimed asphalt pavement (RAP)

⁷ Superpave

⁸ Balanced mix design (BMD)

⁹ Texas Transportation Institute (TTI)

¹⁰ Hamburg Wheel Tracking Test

¹¹ Overlay tester (OT)

باشد باید از روش BMD استفاده شود و صرفاً به روش‌های طرح اختلاط حجمی^{۲۲} اکتفا نشود [۲۲].

مروری بر تحقیقات کم انجام شده در زمینه BMD نشان می‌دهد جای کار بسیاری در زمینه طرح مخلوط‌های حاوی تراشه و جوانسانز به روش BMD وجود دارد. در این تحقیق با به‌کارگیری دو درصد پایین (۲۵ درصد) و بالای تراشه (۵۰ درصد) و جوانسانز گیاهی طرح اختلاط پنج مخلوط آسفالتی مختلف ابتدا به روش سوپرپیو انجام شده است. در ادامه با در نظر گرفته سه درصد قیر مختلف (درصد قیر حاصله از روش سوپرپیو و ۰/۶ درصد بالا و پایین آن) برای هر مخلوط، طرح اختلاط مخلوط‌ها با روش BMD انجام شده است. آزمایش شیارشده‌گی هامبورگ به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر شیارشده‌گی و آزمایش شاخص انعطاف‌پذیری ایلینویز (I-FIT)^{۲۳} به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در طرح مخلوط‌ها به روش BMD مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق از جنس آهکی می‌باشد. مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. تصویری از مصالح سنگی مصرفی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- قیر

نوع قیر به‌کاررفته در این پژوهش قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ می‌باشد. در جدول ۲ مشخصات قیر مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است.

استفاده از روش BMD دوام^{۱۶} مخلوط آسفالتی را تضمین خواهد کرد [۱۹].

زامینس^{۱۷} و همکاران در تحقیقی مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد تراشه آسفالتی را ابتدا به روش مارشال طراحی کرده‌اند. این مخلوط پارامترهای حجمی مورد نیاز در روش مارشال را برآورده نکرده است. سپس با روش BMD درصد قیر بهینه مخلوط را با انجام آزمایش شیارشده‌گی فرانسوی^{۱۸} به‌منظور ارزیابی شیارشده‌گی و شاخص انعطاف‌پذیری (FI^{۱۹}) به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی تعیین کرده‌اند. از نظر آن‌ها مخلوط حاوی ۱۰۰ تراشه که با روش BMD طرح شده باشد برای جاده‌های که حداکثر ۳۰۰ بار هم‌ارز^{۲۰} در روز دارند قابل استفاده می‌باشد [۲۰].

پژوهشگران در تحقیقی طراحی مخلوط‌های حاوی ۳۰ و ۵۰ درصد تراشه به روش BMD انجام داده‌اند. آن‌ها مخلوط‌هایی با درصد قیر مختلف بدون توجه به پارامترهای حجمی آن ساخته‌اند و بر اساس عملکرد مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و شیار شده‌گی درصد قیر بهینه را تعیین کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از روش سوپرپیو در طرح اختلاط مخلوط‌های حاوی تراشه عملکرد مناسب این مخلوط‌ها را تضمین خواهد کرد [۲۱].

در مقاله‌ای دیگر، درصد قیر بهینه چهار مخلوط ایالت مینیسوتا^{۲۱} با درصد تراشه ۲۰ و ۲۵ و دانه‌بندی مختلف را به روش BMD تعیین گردید. محققان مخلوط‌ها را با سه درصد قیر (قیر بهینه و قیر بهینه $\pm ۰/۵$ درصد) مورد آزمایش شیارشده‌گی هامبورگ و آزمایش I-FIT قرار داده‌اند. در آن تحقیق توصیه شده است برای اینکه مخلوط‌های آسفالتی دوام و پایداری قابل قبولی داشته

¹⁶ Durable

¹⁷ Zaumanis

¹⁸ French rutting test

¹⁹ Flexibility index (FI)

²⁰ Equivalent single axle loads

²¹ Minnesota Asphalt Mixtures

²² volumetric mix design approach

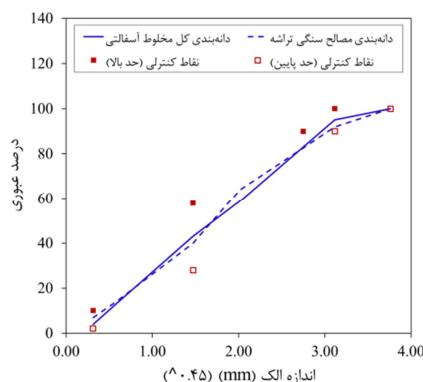
²³ Illinois flexibility index test (I-FIT)

جدول ۱- مشخصات سنگدانه‌های مصرفی

استاندارد	حدود مجاز	مقادیر		خواص فیزیکی
		سنگدانه تراشه	سنگدانه تازه	
ASTM C127	-	۲/۵۹۳	۲/۶۵۹	وزن مخصوص مصالح درشت دانه (gr/cm ^۳)
ASTM C128	-	۲/۴۶۴	۲/۶۳۹	وزن مخصوص مصالح درشت ریزدانه (gr/cm ^۳)
ASTM C131	حداکثر ۲۵	۲۳/۵	۲۱/۵	درصد سایش به روش لس آنجلس (%)
ASTM D5821	۵۰ حداقل	۹۷	۹۸	شکستگی در یک سمت (%)
ASTM D5821	۸۰ حداقل	۹۴	۹۵	شکستگی در دو سمت (%)
ASTM C127	۲/۵ حداکثر	۰/۸	۰/۷	جذب آب (%)
ASTM D2419	۵۰ حداقل	۶۹	۷۲	ارزش ماسه‌ای (%)



شکل ۱- (الف) روغن گیاهی، (ب) مصالح سنگی آهکی معدن اسب چران تهران و (ج) تراشه آسفالتی حاصل از تراش لایه رویه آزاده آزادگان تهران



شکل ۲- دانه‌بندی مصالح سنگی تراشه و ترکیب مصالح سنگی
کل مخلوط آسفالتی

در جدول ۳ مشخصات جوانساز مورد استفاده آورده شده است. در شکل ۱ تصویری از جوانساز مصرفی نشان داده شده است.

۳- روشن تحقیق

در این تحقیق از روغن گیاهی خوراکی به عنوان جوانساز استفاده شده است.

۲-۴ - حوانساز

در این تحقیق از روغن گیاهی خوراکی به عنوان جوانساز استفاده شده است.

تراشه مورد استفاده از تراش لایه رویه آزادراه آزادگان تهران تهیه شده است. عمر تقریبی این تراشه حدود ده سال برآورد شده است. در شکل ۲ نمودار دانه‌بندی تراشه و دانه‌بندی ترکیب مصالح سیگی مخلوط آسفالتی، نشان داده شده است. درصد قیر تراشه ۵/۶ درصد می‌باشد. مشخصات سنگدانه‌های تراشه در جدول ۱ و مشخصات قیر استخراج شده از تراشه در جدول ۲ آورده شده است. همچنین تصویری از تراشه مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۴ - حوانساز

در این تحقیق از روغن گیاهی خوراکی به عنوان جوانساز استفاده شده است.

طرح اختلاط پنج مخلوط آسفالتی مختلف ابتدا به روش سوپرپیو انجام شده است.

در این تحقیق با به کارگیری دو درصد پایین (۲۵ درصد) و بالای تراشه (۵۰ درصد) و جوانساز روغن گیاهی

جدول ۲- مشخصات قیر تازه و قیر پیرشده استخراج شده از تراشه

استاندارد	حدود مجاز	مقادیر		خصوصیات
		قیر تراشه	قیر تازه	
ASTM D-70	-	۱/۰۴	۱/۰۳	وزن مخصوص (gr/cm ^۳)
ASTM D-5	۷۰-۶۰	۲۹	۶۶	درجہ نفوذ (دهم میلی متر)
ASTM D-36	۵۶-۴۹	۶۱	۵۰	نقاطه نرمی (درجہ سانتی گراد)
ASTM D-113	بیشتر از ۱۰۰	۳۴	۱۰۰ ⁺	خاصیت انگشتی (سانتی متر)
ASTM D-92	بزرگ‌تر از ۲۳۲	۲۸۰	۳۰۵	نقاطه اشتعال (درجہ سانتی گراد)
AASHTO T 316	کمتر از ۳	۲/۷۸۳	۰/۳۶۰	ویسکوزیتی در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد (Pa.s)

جدول ۳- مشخصات جوانساز مورد استفاده

مشخصات	استاندارد	روغن گیاهی (V)	نوع جوانساز
cSt گرانروی کینماتیک در ۱۰۰ درجه سانتی گراد،	ASTM D 445	۱۵/۵	
نقاطه اشتعال	ASTM D 92	۲۹۰	
رنگ	-	زرد شفاف	
وزن مخصوص در ۱۵ درجه سانتی گراد, Kg/m ^۳	ASTM D 1298	۹۲۵	

توجه شده است و درصد جوانسازهای بهینه به شرح زیر تعیین شده‌اند.

به‌منظور تعیین درصد جوانساز بهینه ابتدا بایستی قیر پیرشده تراشه از مصالح تراشه استخراج و بازیابی شود. ابتدا توسط دستگاه اکسترکشن^{۲۴} مطابق استاندارد AASHTO T164 با استفاده از حلال تری کلرواتیلن^{۲۵} قیر از سنگدانه‌های تراشه جدا می‌شود. سپس با استفاده از دستگاه تغکیک کننده گریز از مرکز^{۲۶} فیلر موجود در محلول جدا می‌شود. قدم بعدی جداسازی کامل حلول از قیر می‌باشد که این کار با دستگاه تبخیر کننده چرخان^{۲۷} مطابق استاندارد ASTM D5404 و سپس دستگاه ابسون^{۲۸} مطابق استاندارد ASTM 1856 انجام خواهد

در ادامه با در نظر گرفته سه درصد قیر مختلف (درصد قیر حاصله از روش سوپرپیو و ۰/۶ درصد بالا و پایین آن) برای هر مخلوط طرح اختلاط مخلوط‌ها با روش طرح اختلاط متعادل شده (BMD) انجام شده است. از آزمایش شیارشده‌گی هامبورگ به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر شیارشده‌گی و آزمایش I-FIT به‌منظور ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی استفاده شده است.

۳-۱-۳- تعیین درصد جوانساز بهینه

اولین قدم در ساخت مخلوط‌های آسفالتی حاوی جوانساز تعیین درصد بهینه جوانساز می‌باشد. یک از روش‌های بسیار مرسوم، در دسترس و کم‌هزینه به‌منظور تعیین درصد جوانساز بهینه استفاده از آزمایش درجه نفوذ و نقاطه نرمی می‌باشد. بسیاری از محققان به‌منظور تعیین درصد جوانساز بهینه، جوانساز را صرفاً به قیر پیرشده اضافه می‌کنند و نقش قیر جدید را در جوانسازی قیر پیر شده در نظر نمی‌گیرند اما در این تحقیق به این مهم

²⁴ Extraction

²⁵ Trichloroethylene

²⁶ Centrifuge

²⁷ Rotary evaporator

²⁸ Abson

طرح مخلوطهای آسفالتی حاوی تراشه به روش طرح اختلاط متعادل شده

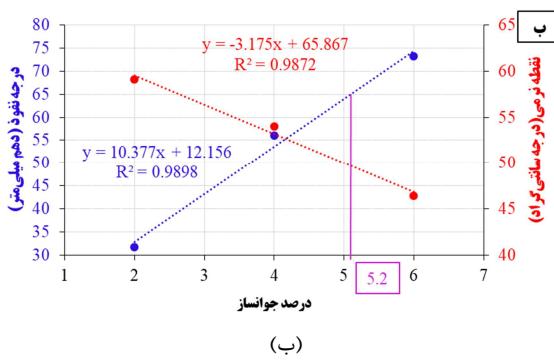
مقدار بهینه جوانساز تعیین گردیده است. ترکیب‌های قیری مختلف ساخته شده به صورت زیر است:

(الف) ترکیب ۲۵ درصد قیر پیر شده بازیابی شده از تراشه به اضافه ۷۵ درصد قیر جدید.
(۲۵% RAPB+۷۵% VB)

(ب) ترکیب ۵۰ درصد قیر پیر شده بازیابی شده از تراشه به اضافه ۵۰ درصد قیر جدید.
(۵۰% RAPB+۵۰% VB)

درصد جوانسازی که درجه نفوذ دو ترکیب مختلف قیر را به مقدار قیر شاهد (جدید) رسانده و درجه نرمی آن در بازه نقطه نرمی قیر شاهد (۱۴۶) تا ۱۵۲ درجه سانتی‌گراد) قرار گیرد به عنوان درصد جوانساز بهینه انتخاب می‌شود.

در شکل ۴ نحوه تعیین درصد بهینه‌ی جوانساز برای هر ترکیب قیر نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، درصد جوانساز بهینه برای ترکیب الف و ب، به ترتیب ۴/۱ و ۵/۲ درصد بدست آمده است.

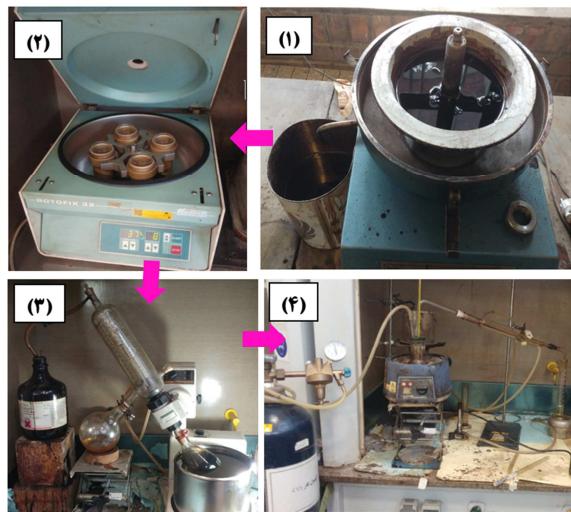


(ب)

شکل ۴- تعیین درصد جوانساز بهینه، (الف) ترکیب حاوی ۲۵ درصد قیر پیر شده و (ب) ترکیب حاوی ۵۰ درصد قیر پیر شده

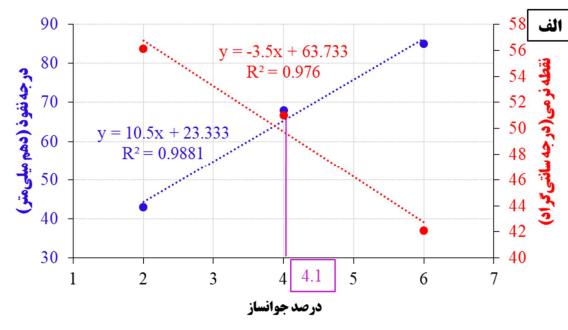
برای داشتن مخلوط مناسب از نظر پارامترهای ۰۰۲ حجمی و عملکردی استفاده از تراشه در درصدهای بالای ۵۰ درصد را توصیه نکرده است [۲۶]. بنابراین در این تحقیق، تراشه در دو درصد ۲۵ و ۵۰ درصد کل مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. درصد ۲۵ بهمنظور مرز میان حد پایین و بالای تراشه مورد استفاده و درصد ۵۰ نیز باهدف استفاده از درصد بالای تراشه مصرفی انتخاب گردیده است. همچنین از رونمایی به

شد. تصویری از دستگاه‌های مورد استفاده در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳- مراحل استخراج و بازیابی قیر از صالح سنگی تراشه، (۱) دستگاه اکسترکشن، (۲) دستگاه سانترفیوژ، (۳) دستگاه تبخيرکننده دورانی و (۴) دستگاه ابسون

پس از بازیابی قیر پیر شده تراشه دو ترکیب مختلف قیر پیر شده و قیر جدید آمده شده و سپس درصدهای مختلف جوانساز به صورت جداگانه به آن‌ها اضافه شده و



(الف)

شکل ۴- تعیین درصد جوانساز بهینه، (الف) ترکیب حاوی ۲۵ درصد قیر پیر شده و (ب) ترکیب حاوی ۵۰ درصد قیر پیر شده

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

در تحقیقات مختلف، بسته به هدف تحقیق، تراشه در درصدهای مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اکثر منابع مرز بین درصد پایین و بالای استفاده از تراشه آسفالتی را ۲۵ درصد معرفی کرده‌اند [۲۳، ۲۴]. از طرفی تحقیقاتی استفاده بیشتر از ۵۰ درصد تراشه را توصیه نکرده‌اند [۲۵]. به عنوان مثال گزارش FHWIA-ICT-12-

[۲۸] انجام شده است. تعداد دوران اولیه، طراحی و ماکریم به ترتیب ۸، ۱۰۰ و ۱۶۰ در نظر گرفته شده است. دمای اختلاط و تراکم به ترتیب برابر ۱۴۷-۱۵۳ و ۱۳۸-۱۴۲ درجه سانتی گراد تعیین شده است. مطابق استاندارد AASHTO R30، قبل از تراکم مخلوطهای آسفالتی برای تعیین درصد قیر بهینه، نمونه‌ها دو ساعت در دمای تراکم قرار داده شده‌اند. در جدول ۵ معیارهای طرح مخلوطهای آسفالتی به روش سوپرپیو آورده شده است.

عنوان جوانساز استفاده شده است. در این تحقیق جوانساز در درصد بهینه خود به تراشه آسفالتی که دو ساعت در دمای اختلاط قرار گرفته است اضافه خواهد شد. در مجموع پنج مخلوط معرفی شده در جدول ۴ مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۳- طرح اختلاط به روش سوپرپیو

در این تحقیق طراحی اولیه نه مخلوطهای آسفالتی به روش طرح اختلاط سطح یک سوپرپیو مطابق AASHTO [۲۷] و M323 استانداردهای AASHTO

جدول ۴- نام‌گذاری مخلوط‌ها

ردیف	درصد تراشه مخلوط	نام‌گذاری مخلوط
۱	نمونه شاهد	C
۲	مخلوط حاوی ۲۵ درصد تراشه بدون جوانساز	25% RAP
۳	مخلوط حاوی ۲۵ درصد تراشه و جوانساز روغن گیاهی	25%RAP+V
۴	مخلوط حاوی ۵۰ درصد تراشه بدون جوانساز	50% RAP
۵	مخلوط حاوی ۵۰ درصد تراشه و جوانساز روغن گیاهی	50% RAP+V

جدول ۵- معیارهای طرح اختلاط به روش سوپرپیو

مشخصات حجمی	معیارها
Va	۴ درصد
VMA	۱۴ درصد حداقل
VFA	۷۵-۶۵ درصد
(F/Pbe) به قیر	۱/۲-۰/۶
Gmm@Nini=8	کوچکتر یا مساوی ۸۹ درصد
Gmm@Nmax=160	کوچکتر یا مساوی ۹۸ درصد



شکل ۵- تصویری از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری مورد استفاده در این تحقیق (دستگاه آزمایشگاه قیر و مخلوطهای آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران)

(دانشگاه علم و صنعت ایران)

تصویری از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری مورد استفاده در این تحقیق که متعلق به آزمایشگاه قیر و مخلوطهای آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد در شکل ۵ آورده شده است.

پارامترهای حجمی و درصد قیر بهینه مخلوطها در جدول ۶ آورده شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، استفاده از ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه، درصد قیر بهینه را به ترتیب ۱۰ و ۱۹ درصد افزایش داده است.

در صد قیر بهینه نسبت به حالتی که جوانساز استفاده نمی‌شود کاهش خواهد یافت. سایر پارامترها در محدوده مورد نظر طرح اختلاط به روش سوپرپیو (جدول ۵) می‌باشد.

دلیل افزایش درصد قیر بهینه، وجود قیر پیرشده در تراشه می‌باشد، که نمی‌تواند نقش قیر تازه را در مخلوط ایفا کند. اما با استفاده از جوانساز درصد قیر بهینه مخلوط کاهش می‌یابد. چراکه جوانساز موجب رساندن مشخصات قیر پیر شده به قیر تازه خواهد شد و در نتیجه

جدول ۶- نتایج طرح اختلاط به روش سوپرپیو

F/Pbe	VFA	VMA	Gmb	Gmm	Pb	مخلوط	ردیف
۰/۸۹	۷۲/۱۶	۱۴/۳۷	۲/۳۸۵	۲/۴۸۴	۴/۹۱	C	۱
۰/۸۰	۷۳/۹۴	۱۵/۳۵	۲/۳۴۰	۲/۴۳۸	۵/۴۲	25% RAP	۲
۰/۸۱	۷۳/۸۰	۱۵/۲۷	۲/۳۴۰	۲/۴۳۷	۵/۲۹	25% RAP+V	۳
۰/۷۸	۷۴/۳۲	۱۵/۵۷	۲/۳۱۶	۲/۴۱۳	۵/۸۶	50% RAP	۴
۰/۸۱	۷۳/۴۶	۱۵/۰۷	۲/۳۱۹	۲/۴۱۶	۵/۴۲	50% RAP+V	۵

۳-۴- طرح اختلاط متعادل شده

- در صد قیر بهینه (B)
- در صد قیر بهینه به اضافه ۰/۶ درصد (B+0.6)
- در صد قیری که معیارهای مورد نظر برای آزمایش‌های شیارشده و ترک‌خوردگی را به صورت همزمان برآورده سازد، به عنوان در صد قیر بهینه مخلوط گزارش خواهد شد. معیارهای مورد نظر هر آزمایش در جدول ۷ آورده شده است.

۴- آزمایش‌ها

در این قسمت آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق شرح داده شده است.

۱- آزمایش FTIR

در این تحقیق از آنالیز^{۳۰} FTIR به منظور شناسایی جوانسازها و همین‌طور تعیین گروههای عاملی که در قیر وجود دارند و می‌توانند در عملکرد پیرشده تأثیرگذار باشند استفاده شده است. با استفاده از نتایج FTIR می‌توان درک بهتری از تعامل بین قیر و جوانساز داشت.

در این تحقیق از روش طراحی حجمی با بهینه‌سازی عملکرد^{۲۹} مذکور در استاندارد AASHTO PP 105 [۲۹] به منظور طرح اختلاط متعادل شده مخلوطهای آسفالتی استفاده شده است. مراحل طرح اختلاط متعادل شده مورد استفاده در این تحقیق به صورت گام‌به‌گام عبارت است:

- ۱- ابتدا در صد قیر بهینه به روش سوپرپیو تعیین می‌گردد.

۲- از مجموعه آزمایش‌های بیان شده در استاندارد AASHTO MP 46 [۳۰]، آزمایش‌های مذکور در جدول ۷ به منظور ارزیابی مقاومت در برابر شیارشده و ترک‌خوردگی انتخاب شده است. جزئیات مربوط به این آزمایش‌ها در بند ۴ شرح داده شده است.

۳- هر مخلوط با سه در صد قیر ذکر شده در زیر ساخته می‌شود و تحت آزمایش‌های مذکور در گام دوم قرار می‌گیرند.

- در صد قیر بهینه منهای ۰/۶ درصد (B-0.6)

³⁰ Fourier transform infrared (FTIR)

²⁹ volumetric design with performance optimization

جدول ۷- آزمایش‌های انتخابی از آزمایش‌های مورد تأیید در استاندارد AASHTO MP 46

نام آزمایش	هدف آزمایش	معیار	دماهی آزمایش	استاندارد
شیارشدنگی هامبورگ	ارزیابی مقاومت در برابر شیارشدنگی	عمق شیارشدنگی پس از ۱۰ هزار سیکل کمتر از ۱۲/۵ میلی‌متر باشد	۵۰ درجه سانتی‌گراد	AASHTO T 324
I-FIT	ارزیابی مقاومت در برابر ترک‌خوردنگی	$FI \geq 5$	۲۵ درجه سانتی‌گراد	AASHTO TP 124

اگرچه تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی و تغییرات ساختاری قیر بسیار پیچیده است، یک رویکرد ساده و پرکاربرد این است که قیر به صورت مخلوطی از چهار جزء آسفالتن^{۳۴}، آروماتیک^{۳۵}، رزین^{۳۶} و ترکیبات اشباع^{۳۷} در نظر گرفته شود [۲]. آزمایش^{۳۸} SARA با هدف تعیین درصد این چهار جزء مطابق استاندارد ASTM D4124 انجام می‌شود. در این تحقیق این آزمایش بر روی قیر تازه، قیر پیرشده و قیر پیرشده حاوی تراشه انجام شده است.

قیرهایی که به‌طور معمول برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرند از دو فاز روغنی^{۳۹} و غیرروغنی^{۴۰} تشکیل شده‌اند. آسفالتن و مالتن به ترتیب مهم‌ترین اجزای بخش غیر روغنی و روغنی می‌باشند. بر طبق مدل کلوئیدی^{۴۱} که محبوب‌ترین مدل در بین مدل‌های شناخت اجزای داخلی قیر می‌باشد، قیر کلوئیدی است که حاوی میسل‌ها^{۴۲} است. بر طبق این مدل، آسفالت‌ها در مرکز میسل قرار دارند و توسط لایه‌ای از هیدروکربن‌هایی با وزن مولکولی پایین‌تر احاطه شده‌اند و در فاز روغنی پراکنده شده‌اند. بنابراین خاصیت ویسکوالاستیک به صورتی چشمگیری وابسته به نرخ

افزایش غلظت نسبی دو گروه عاملی کربونیل^{۴۳} و سولفوکسید^{۴۴} توسط محققین بسیاری به عنوان شاخص‌های اکسیداسیون و پیرشدنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مساحت زیر هر عدد موج مربوط به یک گروه عاملی مشخص نسبت به مساحت کل به عنوان شاخص‌هایی بهمنظور مقایسه عملکرد پیرشدنگی قیرهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه و مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

$$\text{Carbonyl Index}(I_{C=O}) = \frac{A_{1700}}{\sum A} \quad (1)$$

$$\text{Sulfoxide Index}(I_{S=O}) = \frac{A_{1032}}{\sum A} \quad (2)$$

که در این روابط $\sum A$ عبارت است از:

$$\sum A = A_{1700} + A_{1600} + A_{1460} + A_{1377} + A_{1032} + A_{956} + A_{866} + A_{814} + A_{723}$$

دو گروه عاملی مهم کربونیل و سولفوکسید معیار اکسیداسیون نسبی در طول فرآیند پیرشدنگی می‌باشند. به مجموع شاخص کربونیل و سولفوکسید شاخص قطبی گفته می‌شود و از این شاخص نیز بهمنظور ارزیابی پیرشدنگی قیرها استفاده می‌شود [۲].

۲-۴- آزمایش استاندارد جداسازی قیر به چهار بخش (SARA)

³³ asphaltene

³⁴ aromatic

³⁵ resin

³⁶ saturate

³⁷ saturate, aromatic, resin, and asphaltene (SARA)

³⁸ oily phase

³⁹ non-oily phase

⁴⁰ colloidal model

⁴¹ micelles

³¹ carbonyl

³² sulfoxide

همراه تصویر یک نمونه بعد از انجام آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- (الف) دستگاه شیارشدگی هامبورگ آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک (برند tanifuji مدل TR-332) و (ب) تصویر یک نمونه بعد از آزمایش

۴-۴- آزمایش ترکخوردگی I-FIT

این آزمایش به منظور ارزیابی ترکخوردگی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، مطابق استاندارد AASHTO TP124 [۳۴] بر روی نمونه های SCB^{۴۴} انجام شده است. قبل از تراکم، عمل آوری کوتاه مدت (۴ ساعت در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد) مطابق استاندارد AASHTO R30 بر روی نمونه ها اعمال شده است. نمونه ها با درصد فضای خالی ۷ درصد ساخته شده اند. قطر، ضخامت و عمق ترک (ناچ) نمونه های SCB به ترتیب ۱۵۰، ۵۰ و ۱۵ میلی متر می باشد. نمونه ها تحت بارگذاری مونوتونیک با نرخ ثابت ۵۰ میلی متر بر دقیقه قرار می گیرند تا شکسته شوند. تصویری از دستگاه بارگذاری مونوتونیک ۶۰۰ کیلونیوتونی دانشکده صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، به همراه تصویری از نمونه و شرایط بارگذاری در شکل ۷ نشان داده شده است.

^{۴۴} Semi-circular bending (SCB)

آسفالت نسبت به سایر اجزای قیر مانند مالتن ها می باشد. هنگامی که قیر پیر می شود آروماتیک های قطبی ^{۴۲} به آسفالت تبدیل می شوند. علاوه بر این، در فرایند پیرش دگر آروماتیک های نفتیکی به آروماتیک های قطبی تبدیل می شوند که متعاقباً اکسید می شوند و به آسفالت تبدیل می شوند. در طی این فرایند بخش مالتن کاهش و بخش آسفالت افزایش می یابد [۳۱]. (نرخ آسفالت به مالتن افزایش می یابد)

یکی از شاخص هایی که در این آزمایش مورد بررسی قرار می گیرد شاخص کلولیدی ^{۴۳} (CII) می باشد. این شاخص به صورت نسبت مجموع دو جزء آروماتیک و رزین به مجموع دو جزء آسفالت و ترکیبات اشباع تعريف می شود. هر چه این شاخص بزرگ تر باشد نشان دهنده آن است که پیرش دگر قیر مورد نظر کمتر است [۲].

۴-۳- آزمایش شیارشدگی هامبورگ

این آزمایش مطابق استاندارد AASHTO T324 [۳۲] انجام شده است. قبل از تراکم، عمل آوری کوتاه مدت (۴ ساعت در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد) مطابق استاندارد AASHTO R30 [۳۳] بر روی مخلوط ها اعمال شده است. نمونه ها با درصد فضای خالی ۷ درصد، قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع حدود ۶۰ میلی متر ساخته شده اند. برای هر مخلوط دو تکرار در نظر گرفته شده است. این آزمایش در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد انجام شده است. در این تحقیق به منظور ارزیابی مقاومت در برابر شیار شدگی مخلوط های آسفالتی در طرح اختلاط به روش متعادل شده، از معیار حداکثر عمق شیار شدگی ۱۲/۵ میلی متر بعد از ۱۰ هزار سیکل (۰ هزار عبور چرخ) استفاده شده است. تصویری از دستگاه شیار شدگی هامبورگ مورد استفاده در این تحقیق که متعلق به آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان تهران می باشد به

⁴² polar aromatics

⁴³ colloidal instability index (CII)

۱-۵- آزمایش FTIR

طیف FTIR مربوط به روغن گیاهی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۸-الف نشان داده شده است. همچنین طیف FTIR قیر تازه، قیر پیرشده استخراج شده از تراشه، قیر پیرشده حاوی روغن گیاهی، در شکل ۸-ب نشان شده است.

جوانسازهایی که جزو دسته تری گلیسرید/ فتای اسید^{۴۶} قرار می‌گیرند پیک‌های قوی در ۱۱۶۲ و ۱۷۴۴ دارند. روغن گیاهی خوراکی مورد استفاده در این تحقیق در دسته تری گلیسرید/ فتای اسید قرار دارد. این دو پیک در شکل ۸ به خوبی قابل تشخیص است. وجود پیک در موج ۱۱۶۲ و ۱۷۴۴ احتمالاً به ترتیب مربوط به دی‌الکیل / آریل سولفون‌ها^{۴۷} و استر/آلدوئید^{۴۸} می‌باشد. پیک‌های دیگر که مختص جوانسازهای گیاهی می‌باشند و با دیدن آن‌ها می‌توان به تری گلیسرید/ فتای اسید بودن جوانساز پی برد عبارت‌اند از: ۱۰۹۷، ۷۲۰، ۱۲۴۰ و ۳۰۰۸ [۳]، که همه این پیک‌ها در نمودار FTIR مربوط به روغن گیاهی خوراکی مورد استفاده در این تحقیق قابل تشخیص است.

پیرشدنگی باعث افزایش شاخص کربونیل و سولفوکسید می‌شود. شاخص‌های کربونیل و سولفوکسید و شاخص قطبی ساختاری برای قیرهای مورد نظر از نمودارهای FTIR محاسبه شده و در شکل ۹ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مطابق انتظار شاخص کربونیل و سولفوکسید و مجموع آن‌ها در قیر پیر شده بزرگ‌تر از قیر شاهد می‌باشد. شاخص کربونیل قیر شاهد نزدیک به صفر می‌باشد. با پیر شدن قیر شاخص‌های معرف پیرشدنگی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال مجموع شاخص کربونیل و سولفوکسید قیر پیرشده نسبت به قیر تازه ۳/۷ برابر شده است. استفاده جوانساز منجر به



شکل ۷- دستگاه بارگذاری مونوتونیک ۶۰۰ کیلونیوتونی دانشکده صنایع دانشگاه علم و صنعت ایران به همراه نمونه SCB و شرایط بارگذاری.

برای هر مخلوط ۴ نمونه SCB مورد آزمایش قرار گرفته است. القادی^{۴۹} در سال ۲۰۱۹ بیان کرد که قراردادن نمونه‌ها به مدت ۳ روز در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد با هدف اعمال پیرشدنگی بلندمدت، همانند قراردادن آن‌ها به مدت ۵ روز در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد (معیار استاندارد AASHTO R30) است [۳۵]. به دلیل صرفه‌جویی در وقت و انرژی در این تحقیق نمونه‌های SCB قبل از آزمایش به منظور اعمال پیرشدنگی بلندمدت، ۳ روز در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده‌اند. شاخص (FI) نمونه‌ها از رابطه ۳ محاسبه شده است:

$$FI = \frac{G_f}{|m|} * 0.01 \quad (3)$$

که در این رابطه FI شاخص انعطاف‌پذیری، G_f انرژی شکست و m مقدار شیب در نقطه عطف قسمت دوم منحنی بارگذاری می‌باشد.

۵- نتایج و بحث در آن‌ها

⁴⁶ Triglyceride/fatty acid

⁴⁷ dialkyl/aryl sulfones

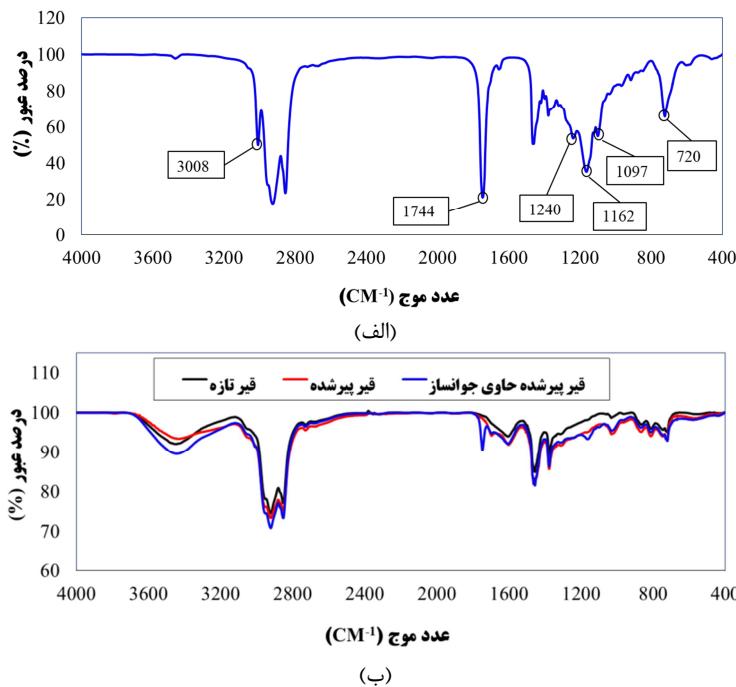
⁴⁸ ester/aldehyde

⁴⁵ Al-Qadi

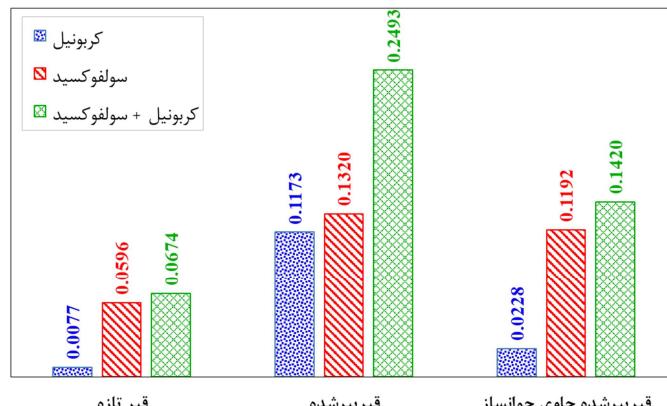
طرح مخلوطهای آسفالتی حاوی تراشه به روش طرح اختلاط متعادل شده

توانایی بازیابی ترکیب شیمیایی قیر پیر شده را داشته است.

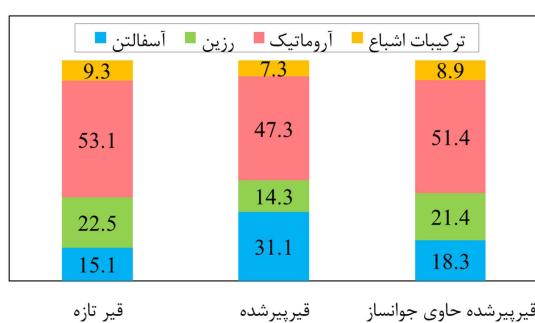
کاهش شاخصهای معرف پیرشدگی قیر شده است. این مهم نشان دهنده آن است که استفاده روغن گیاهی



شکل ۸- نمودار FTIR (الف) روغن گیاهی مورد استفاده به عنوان جوانساز و (ب) قیر تازه، قیرپیرشده و قیرپیرشده حاوی جوانساز



شکل ۹- شاخصهای کربونیل، سولفوکسید و مجموع آن دو حاصله از نمودار FTIR



شکل ۱۰- نتایج آزمایش SARA قیر تازه، قیرپیرشده و قیرپیرشده حاوی جوانساز

۲-۵ آزمایش SARA

چهار جز تفکیک شده قیر تازه، قیرپیرشده و قیرپیرشده حاوی جوانساز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است قیرپیرشده مقدار آسفالت بیشتری نسبت به قیر تازه دارد. با استفاده از جوانساز مقدار آسفالت کاهش و محتوای مالتن افزایش یافته است. بنابراین می‌توان گفت استفاده از روغن گیاهی به عنوان جوانساز موجب بازیابی ترکیبات شیمیایی قیرپیرشده می‌شود.

افزایش مقدار آسفالتن و کاهش آروماتیک در طی فرآیند پیرشگی برابر $1/6$ شده است که نسبت به قیر تازه $48/3$ درصد کاهش یافته است.

همچنین مقدار شاخص کلولئیدی در جدول ۸ محاسبه شده است. مقدار این شاخص برای قیر تازه برابر $3/1$ می باشد. این شاخص برای قیر پیرشده تراشه به دلیل

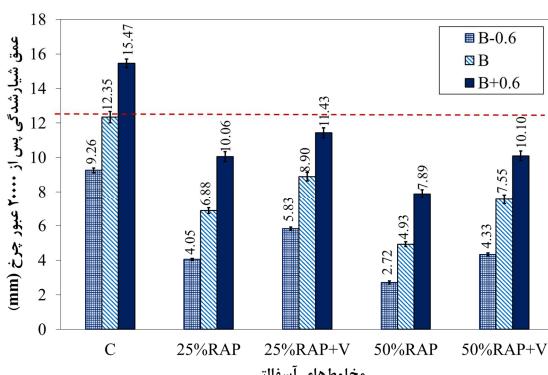
جدول ۸- مقدار پارامتر CII

CII	آسفالتن+ ترکیبات اشاع	آروماتیک+ رزین	نوع قیر
۳/۱۰	۲۴/۴	۷۵/۶	قیر تازه
۱/۶۰	۳۸/۴	۶۱/۶	قیرپیرشده
۲/۶۸	۲۷/۲	۷۲/۸	قیرپیرشده حاوی جوانساز

قیر پیرشده در مخلوط و در نتیجه افزایش سختی مخلوط می باشد.

استفاده از جوانساز به دلیل آنکه باعث کاهش سختی قیر پیرشده می شود، عمق شیارشدنگی مخلوط را نسبت مخلوطهای حاوی تراشه بدون جوانساز افزایش داده است. به عنوان مثال عمق شیارشدنگی مخلوطهای حاوی $5/0$ درصد تراشه و جوانساز نسبت به نمونه بدون جوانساز $5/3$ درصد افزایش یافته است.

با استفاده از جوانساز مقدار آسفالتن کاهش یافته و درصد آروماتیک و رزین افزایش می یابد، این مهم باعث می شود مقدار شاخص کلولئیدی افزایش یافته به مقدار $2/68$ برسد. به عبارتی مقدار شاخص کلولئیدی قیرپیرشده حاوی جوانساز نسبت به قیر پیرشده $6/7$ درصد افزایش یافته است. نتایج نشان می دهد که استفاده روغن گیاهی توانایی بازیابی ترکیب شیمیایی قیر پیر شده را داشته است.



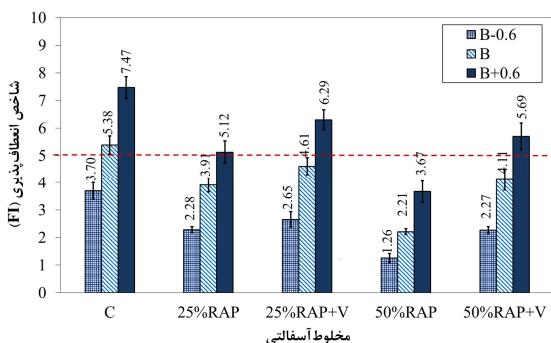
شکل ۱۱- عمق شیارشدنگی حاصل از آزمایش شیارشدنگی هامبورگ

در نمونه های حاوی تراشه و جوانساز بیشترین عمق شیارشدنگی مربوط به نمونه $25\%RAP+V$ در درصد قیر $B+0.6$ است که برابر $11/43$ میلی متر می باشد. استفاده همزمان از جوانساز و قیر بیشتر باعث شده تا اثر روان سازی افزایش یابد و عمق شیارشدنگی افزایش یابد. تنها نمونه ای که عمق شیارشدنگی آن از حد آستانه $12/5$ میلی متر بالاتر رفته است نمونه شاهد در درصد قیر $B+0.6$ که برابر $15/47$ میلی متر است.

۳-۵- عمق شیارشدنگی

استفاده از تراشه در مخلوطهای آسفالتی مقاومت در برابر شیارشدنگی را افزایش می دهد. دلیل آن این است که قیر پیرشده موجود در تراشه سختی مخلوط را افزایش می دهد و در نتیجه آن، تغییر شکل های ماندگار در مخلوط کاهش می یابد [۳۶]. عمق شیارشدنگی مخلوطهای آسفالتی در درصد قیرهای مختلف، بعد از 10 هزار سیکل (20 هزار عبور) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این تحقیق عمق شیارشدنگی مخلوطهای حاوی 25 و 50 درصد تراشه در هر سه درصد قیر، نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است. به طوری که در درصد قیر بهینه، عمق شیارشدنگی مخلوط حاوی 25 و 50 درصد تراشه بدون جوانساز نسبت به نمونه شاهد به ترتیب 44 و 60 کاهش یافته است. با افزایش درصد تراشه مقاومت در برابر شیارشدنگی افزایش یافته است که دلیل آن وجود بیشتر

شکست سریع‌تر و در نتیجه افزایش مقدار شیب می‌شود. این مساله باعث کاهش مقدار FI می‌شود. استفاده از جوانساز موجب افزایش نرمی مخلوط و در نتیجه کاهش مقدار شیب می‌شود. در بین نمونه‌های حاوی جوانساز و تراشه بیشترین مقدار FI برابر $6/29$ است که مربوط به نمونه حاوی 25 درصد تراشه و جوانساز در درصد قیر $B+0.6$ می‌باشد. در همه مخلوطها با افزایش درصد قیر به دلیل کاهش سختی مخلوط مقدار FI افزایش یافته است. در درصد قیر یکسان مقدار شاخص FI در همه نمونه کمتر از نمونه شاهد می‌باشد. این روند در تحقیق دیگری نیز بیان شده است [۴۲].



شکل ۱۲- شاخص FI حاصل از آزمایش ترکخوردگی I-FIT

۵-۵- طرح اختلاط متداول شده

درصد قیر بهینه حاصله از روش سوپرپیو مبتنی خصوصیات حجمی مخلوط می‌باشد. در این قسمت درصد قیر بهینه همه مخلوطها با استفاده از روش BMD محاسبه شده است. برای این منظور تأثیر تغییر قیر بهینه بر عملکرد شیارشده و ترکخوردگی مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن در بند ۱-۵ و ۲-۵ بیان شده است. پنج مخلوط مورد نظر در این تحقیق با سه درصد قیر (قیر بهینه (B)، قیر بهینه با اضافه $0/6$ درصد قیر (B+0.6) و قیر بهینه منهای $0/6$ درصد قیر (B-0.6)) ساخته شده‌اند و مورد ارزیابی عملکردی قرار گرفته‌اند. در شکل ۱۳ نمودار BMD مربوط به مخلوط شاهد نشان داده شده است. مطابق این نمودار، بازه مناسب درصد قیر برای اینکه عمق شیارشده مخلوط شاهد کمتر از $12/5$ میلی‌متر و شاخص FI بزرگ‌تر از 5 باشد $4/74$ تا $4/94$.

در درصد قیرهای مشابه، عمق شیارشده‌گی همه مخلوطها از نمونه شاهد کمتر است. به عبارتی از آنجایی که جوانساز گیاهی در درصد بهینه مورد استفاده قرار گرفته است، اثر نرم‌کنندگی آن در سطح قابل قبول است و منجر به بدتر شدن رفتار شیارشده‌گی نسبت به نمونه شاهد نمی‌شود.

افزایش درصد قیر، موجب افزایش نرمی مخلوط شده و درنتیجه در دمای بالا موجب کاهش سختی و کاهش مقاومت در برابر شیارشده‌گی می‌شود. این روند در همه مخلوطها مشاهده می‌شود. به عنوان مثال افزایش $1/2$ درصد قیر منجر به افزایش حدود 67 درصدی عمق شیارشده‌گی در نمونه شاهد شده است.

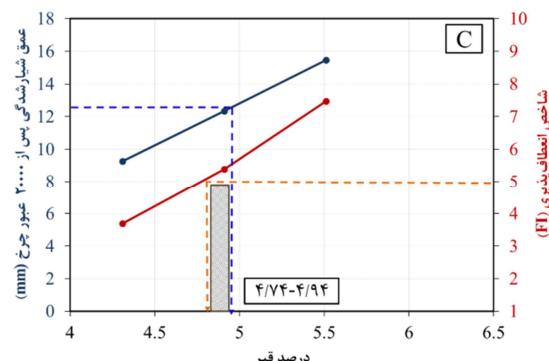
۴-۵- شاخص انعطاف‌پذیری (FI)

شاخص FI شاخصی توانمند در تعیین عملکرد ترکخوردگی مخلوطهای آسفالتی می‌باشد [۳۷]. این شاخص به تغییرات درصد تراشه، جوانساز و سایر افزودنی‌ها حساس است [۳۸].

همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است استفاده از تراشه موجب کاهش شاخص FI می‌شود. به صورتی که مقدار شاخص FI در نمونه حاوی 25 و 50 درصد تراشه بدون جوانساز نسبت به نمونه شاهد به ترتیب 27 و 59 درصد کاهش یافته است. دلیل این امر آن است که قیر پیر شده موجود در تراشه موجب افزایش شکنندگی و کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط می‌شود. با افزایش درصد تراشه، مقدار قیر پیر شده موجود در مخلوط افزایش می‌یابد و در نتیجه سطح پیرشده‌گی بیشتر می‌شود، که نتیجه آن کاهش شاخص FI خواهد بود [۳۹]. استفاده از تراشه موجب افزایش سختی مخلوط و در نتیجه کاهش مقاومت در برابر ترکخوردگی می‌شود [۴۰]. استفاده از جوانساز موجب افزایش شاخص FI و در نتیجه موجب افزایش مقاومت در برابر ترکخوردگی می‌شود [۴۱]. یکی از پارامترهای اثرگذار در محاسبه FI مقدار شیب می‌باشد. افزایش سختی مخلوط موجب

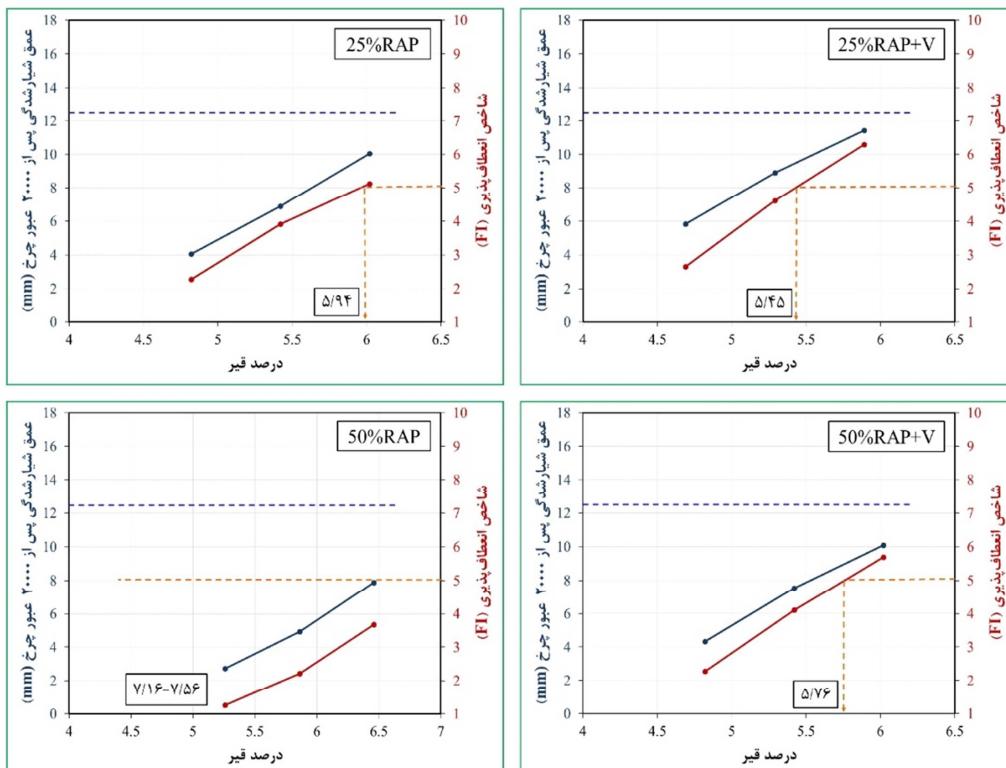
تعیین شده است. در نمونه حاوی ۵۰ درصد تراشه بدون جوانساز (50% RAP)، مقدار FI در هر سه درصد قیر کمتر از ۵ است. بنابراین درصد قیر بهینه در خارج از بازه $B \pm 0.6$ قرار دارد. بنابراین در این مخلوط درصد قیر متعادل شده با استفاده از برونو یا می محاسبه شده است. مقادیر درصد قیر بهینه حاصل از روش BMD در نمودارها نشان داده شده است. همچنین در جدول ۹ درصد قیر حاصله از روش سوپرپیو و BMD در کنار هم آورده شده است و مقدار تغییر درصد قیر نشان داده شده است. بیشترین مقادیر تغییر قیر مربوط به نمونه حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه بدون جوانساز می باشد که به ترتیب برابر $9/56$ و $22/18$ می باشد. بنابراین می توان گفت از نظر عملکردی مقدار درصد قیر بهینه حاصل از روش سوپرپیو برای مخلوطهای حاوی تراشه و جوانساز مناسب نیست. خصوصاً برای مخلوطهایی که در آنها از جوانساز استفاده نمی شود. بنابراین توصیه می شود درصد قیر بهینه مخلوطهای حاوی تراشه از روش BMD تعیین گردد.

درصد می باشد. این درصد به مقدار جزئی کمتر از درصد قیر بهینه محاسبه شده از روش سوپرپیو می باشد. اما در سایر مخلوطها درصد قیر محاسبه شده در روش BMD از روش سوپرپیو بزرگتر است.



شکل ۱۳- نمودار BMD مخلوط شاهد

نمودار BMD مخلوطهای حاوی تراشه و جوانساز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در همه مخلوطها به غیر از نمونه شاهد عمق شیارشدنگی در هر سه درصد قیر، کمتر از حد $12/5$ میلیمتر می باشد بنابراین در این مخلوطها عمق شیارشدنگی کنترل کننده نمی باشد. در این مخلوطها درصد قیر متعادل شده بر حسب شاخص FI



شکل ۱۴- نمودار BMD مخلوطهای حاوی تراشه و جوانساز:

جدول ۹- مقایسه درصد قیر حاصله از روش سوپرپیو و روش BMD

مقدار تغییر	درصد قیر بهینه		نام مخلوط
	BMD	روش سوپرپیو	
۳/۴۶ درصد کاهش یافته	۴/۷۴-۴/۹۴	۴/۹۱	C
۹/۵۹ درصد افزایش یافته	۵/۹۴	۵/۴۲	25%RAP
۳/۰۲ درصد افزایش یافته	۵/۴۵	۵/۲۹	25%RAP+V
۲۲/۱۸ درصد افزایش یافته	۷/۱۶-۷/۵۶	۵/۸۶	50% RAP
۶/۲۷ درصد افزایش یافته	۵/۷۶	۵/۴۲	50% RAP+V

۶- نتیجه‌گیری

- افزایش درصد قیر، موجب افزایش نرمی مخلوط شده و درنتیجه در دمای بالا موجب کاهش مقاومت در برابر شیارشدنگی می‌شود.
- حضور تراشه در مخلوط منجر به کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط و در نتیجه کاهش شاخص FI در آزمایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌شود. بهصورتی‌که مقدار شاخص FI در نمونه حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه بدون جوانساز نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲۷ و ۵۹ درصد کاهش یافته است
- بهکارگیری جوانساز، نرمی قیر و بهتیع آن شاخص FI افزایش می‌یابد و در نتیجه موجب افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌شود. در بین نمونه‌های حاوی جوانساز و تراشه بیشترین مقدار FI برابر ۶/۲۹ است که مربوط به نمونه حاوی ۲۵ درصد تراشه و جوانساز در درصد قیر ۰.۶ B+0.6 می‌باشد.
- در همه مخلوطها با افزایش درصد قیر با دلیل کاهش سختی مخلوط مقدار FI افزایش یافته است.
- در درصد قیر یکسان مقدار شاخص FI در همه نمونه کمتر از نمونه شاهد می‌باشد.
- درصد قیر بهینه حاصله از روش BMD در نمونه شاهد اندکی کمتر از روش سوپرپیو می‌باشد. اما در سایر مخلوطها درصد قیر بدست آمده از روش BMD بزرگ‌تر از روش سوپرپیو می‌باشد.

در این تحقیق ابتدا درصد قیر بهینه پنج مخلوط مختلف، شامل مخلوط شاهد، مخلوط حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه با و بدون جوانساز ابتدا با روش سوپرپیو بدست آمده است. در ادامه با به کارگیری روش طرح اختلاط متعادل شده درصد قیر بهینه مخلوطها بر اساس عملکرد مخلوطها بدست آمده است. برای این منظور از آزمایش شیارشدنگی هامبورگ و ترک‌خوردگی I-FIT بهمنظور ارزیابی عملکرد شیارشدنگی و ترک‌خوردگی استفاده از شده است. در ادامه نتایج این تحقیق بهصورت خلاصه بیان شده است.

- استفاده از تراشه به دلیل افزایش سختی مخلوط، مقاومت در برابر شیارشدنگی را افزایش می‌دهد. بهطوری‌که در درصد قیر بهینه، عمق شیارشدنگی مخلوط حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه بدون جوانساز نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۴۴ و ۶۰ کاهش یافته است.
- استفاده از جوانساز منجر به کاهش سختی مخلوط و در نتیجه افزایش عمق شیارشدنگی می‌شود، اما در درصد قیرهای مشابه، عمق شیارشدنگی همه مخلوطها از نمونه شاهد کمتر است. عمق شیارشدنگی مخلوطهای حاوی ۵۰ درصد تراشه و جوانساز نسبت به نمونه بدون جوانساز ۵۳ درصد افزایش یافته است.

مناسب نیست. خصوصاً برای مخلوطهایی که در آنها از جوانساز استفاده نمی‌شود. بنابراین بهتر است درصد قیر مخلوطهای حاوی تراشه از روش تعیین گردد.

- نتایج آزمایش‌های FTIR و SARA نشان می‌دهد که استفاده روغن گیاهی توانایی بازیابی ترکیب شیمیایی قیر پیر شده را داشته است.

- بیشترین افزایش درصد قیر حاصله از روش BMD نسبت به روش سوپرپیو، مربوط به نمونه حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه بدون جوانساز می‌باشد. درصد قیر حاصله از روش BMD نسبت به روش سوپرپیو برای مخلوط حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد تراشه بدون جوانساز، به ترتیب ۹/۵۶ و ۲۲/۱۸ درصد افزایش یافته است.

- از نظر عملکردی مقدار درصد قیر حاصل از روش سوپرپیو برای مخلوطهای حاوی تراشه و جوانساز

مراجع

- [1] Haghshenas, H., et al., *Research on high-rap asphalt mixtures with rejuvenators and WMA additives*. 2016, Nebraska Department of Transportation Research Reports. 146: Nebraska - Lincoln.
- [2] Haghshenas, H., et al., *Research on High-RAP Asphalt Mixtures with Rejuvenators-Phase II*. 2019, Nebraska Department of Transportation Research Reports. 217: Nebraska - Lincoln.
- [3] Haghshenas, H.F., et al., *Chemical Characterization of Recycling Agents*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020. 32(5): p. 060.٢٠٠٠
- [4] Behnood, A., *Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review*. Journal of Cleaner Production, 2019. 231(Sep): p. 171-182.
- [5] Haghshenas, H.F., et al., *Effect of softening additives on the moisture susceptibility of recycled bituminous materials using chemical-mechanical-imaging methods*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018. 30(9): p. 04018207.
- [6] Zhou, F., et al., *High RAP mixes design methodology with balanced performance*. FHWA/TX-11/0-6092-2 2011, United States. Federal Highway Administration: Texas Transportation Institute, College Station, Texas. .
- [7] Parnell, N.D., *The Development of Initial Asphalt Mixture Acceptance Criteria Using the SCB test and the I-FIT Test*. 2019: University of Arkansas.
- [8] Zaumanis, M., L. Poulikakos, and M. Partl, *Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters*. Materials & Design, 2018. 141: p. 185-201.
- [9] Yin, F., et al., *Performance Testing for Quality Control and Acceptance of Balanced Mix Design*, NCAT Report 20-02. 2020, National Center for Asphalt Technology (NCAT): Auburn University, Auburn, Alabama.
- [10] Newcomb, D. and F. Zhou, *Balanced Design of Asphalt Mixtures*, MN/RC 2018-22. 2018, Minnesota Department of Transportation Research Services & Library: Minnesota.
- [11] Monismith, C., J. Epps, and F. Finn, *Improved asphalt mix design (with discussion)*, in *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* 1985, Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol. 54. p. 340-406.
- [12] Zhou, F., S. Hu, and T. Scullion, *Integrated asphalt (overlay) mixture design, balancing rutting and cracking requirements*, FHWA/TX-06/0-5123-1. 2006, Texas Transportation Institute, Texas A & M University System: College Station, Texas
- [13] Dong, W. and S. Charmot, *Proposed tests for cold recycling balanced mixture design with measured impact of varying emulsion and cement contents*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018. 31(2): p. 04018387.
- [14] Zhou ,Z., et al., *Rutting and fatigue cracking performance of SBS-RAP blended binders with a rejuvenator*. Construction and Building Materials, 2019. 203(Apr): p. 294-303.
- [15] Ali, U.M., et al. *Three-dimensional balanced mix design for asphalt concrete*. in *International Airfield and Highway Pavements Conference 2019: Design, Construction, Condition Evaluation, and Management of Pavements*. 2019. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- [16] Im, S., P. Karki, and F. Zhou, *Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators*. Construction and Building Materials, 2016. 115(Jul): p. 727-734.
- [17] Barros, L., et al., *Implications of Including Reclaimed Asphalt Pavement Materials to Performance of Balanced Asphalt Concrete Mixes*. Transportation Research Record, 2019: p. 0361198119875666.
- [18] Sabouri, M., *Evaluation of performance-based mix design for asphalt mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*. Construction and Building Materials, 2020. 235(Feb): p. 117545.

- [19] Espinoza-Luque, A.F., I.L. Al-Qadi, and H. Ozer, *Optimizing rejuvenator content in asphalt concrete to enhance its durability*. Construction and Building Materials, 2018. 179(Aug): p. 642-648.
- [20] Zaumanis, M., et al., *Performance-based design of 100% recycled hot-mix asphalt and validation using traffic load simulator*. Journal of Cleaner Production, 2019. 237(Nov): p. 117679.
- [21] Meroni, F., et al., *Application of balanced mix design methodology to optimize surface mixes with high-RAP content*. Materials, 2020. 13(24): p. 5638.
- [22] Al-Khayat, H., et al., *Evaluation of the Minnesota Asphalt Mixtures Based on Balanced Mix-Design Approach*. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2021. 147(3): p. 04021045.
- [23] Izaks, R., et al., *Hot mix asphalt with high RAP content*. Procedia Engineering, 2015. 114(2015): p. 676-684.
- [24] Zaumanis, M. and R.B. Mallick, *Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art*. International Journal of Pavement Engineering, 2015. 16(1): p. 39-55.
- [25] Saride, S., D. Avirneni, and S.C.P. Javvadi, *Utilization of reclaimed asphalt pavements in Indian low-volume roads*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016. 28(2): p. 04015107.
- [26] Al-Qadi, I.L., et al., *Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures*, Report No: FHWA-ICT-12-002 2012, Illinois Center for Transportation, Rantoul, IL.
- [27] AASHTO, *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*. AASHTO M 323 ,۲۰۱۸ . AASHTO: Washington, D.C.
- [28] AASHTO, *Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures*. AASHTO R 35. 2015, AASHTO: Washington, DC.
- [29] AASHTO-PP105, *Standard Practice for Balanced Design of Asphalt Mixtures* 2020, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC:AASHTO.
- [30] AASHTO, *Standard Specification for Balanced Mix Design*. AASHTO MP 46. 2020, AASHTO: Washington, DC.
- [31] Chen, A., et al., *Research on the aging and rejuvenation mechanisms of asphalt using atomic force microscopy*. Construction and Building Materials, 2018. 167: p. 177-184.
- [32] AASHTO-T324, *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures* 2017, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC:AASHTO.
- [33] AASHTO-R30, *Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA)* 2015, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC:AASHTO.
- [34] AASHTO-TP124, *Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using Semicircular Bend Geometry (SCB) at Intermediate Temperature* 2016, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC:AASHTO.
- [35] Al-Qadi ,I.L., et al., *Development of long-term aging protocol for implementation of the Illinois flexibility index test (I-FIT)*.FHWA-ICT-19-009. 2019, Illinois Center for Transportation/Illinois Department of Transportation, Urbana.
- [36] Yousefi, A., et al., *Performance evaluation of asphalt mixtures containing warm mix asphalt (WMA) additives and reclaimed asphalt pavement (RAP)*. Construction and Building Materials, 2021. 268: p. 121200.
- [37] Ozer, H., et al., *Evaluation of I-FIT results and machine variability using MnRoad test track mixtures*. 2017, Illinois Center for Transportation.
- [38] Chen, C., *Validation of Laboratory Cracking Tests for Field Top-down Cracking Performance*. 2020, Auburn University.
- [39] Zhou, Z., et al., *Investigation of the oxidation ageing of RAP asphalt blend binders and mixtures*. International Journal of Pavement Engineering, 2022. 23(3): p. 571-587.
- [40] Bajaj, A., et al., *Evaluation and classification of recycling agents for asphalt binders*. Construction and Building Materials, 2020 :۲۶۰ . p. 119864.
- [41] Xie, Z., et al., *Laboratory evaluation of effect of addition methods of rejuvenators on properties of recycled asphalt mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020. 32(5): p. 04020101.
- [42] Yin, F., et al., *Characterising the long-term rejuvenating effectiveness of recycling agents on asphalt blends and mixtures with high RAP and RAS contents*. Road Materials and Pavement Design, 2017. 18(sup4): p. 273-292.