

مروری بر تأثیر مواد ضایعاتی به‌عنوان فیلر بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داغ

مقاله علمی - مروری

زانا کریمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پویان ایار (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
علی سلیمانی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ayar@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۲۸۸-۲۵۹

چکیده

این پژوهش به مرور تحلیلی کاربرد مواد ضایعاتی به‌عنوان فیلر معدنی در مخلوط‌های آسفالتی داغ می‌پردازد؛ رویکردی که به‌طور هم‌زمان می‌تواند به مدیریت پسماندهای صنعتی، کشاورزی و شهری و نیز بهبود عملکرد و دوام رو سازی کمک کند. خلأ اصلی در پژوهش‌های موجود، پراکندگی نتایج و نبود یک چهارچوب منسجم برای پیوند دادن تغییرات ریز ساختاری ماستیک با رفتار عملکردی مخلوط آسفالتی است. در این مقاله، ابتدا نقش فیلر در تشکیل ماستیک، چسبندگی و کنترل پارامترهای حجمی تبیین می‌شود. سپس مواد ضایعاتی بر اساس منشأ در سه گروه زیست‌توده‌ای، شهری و صنعتی - ساختمانی دسته‌بندی شده و اثر آن‌ها بر دسایت رطوبتی، تغییر شکل دائمی، ترک‌خوردگی و خستگی بر پایه داده‌های آزمایشگاهی مطالعات منتخب مقایسه می‌گردد. یافته‌ها نشان می‌دهد کارایی این مواد به شدت تابع ماهیت شیمیایی، بافت سطحی، توزیع اندازه ذرات، در صد جایگزینی و کیفیت فرآوری است. در بیشتر موارد، یک بازه بهینه برای جایگزینی مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که مصرف بیش از حد فیلر می‌تواند با افزایش نیاز به قیر، برهم‌زدن تعادل حجمی و سخت‌شدن بیش از اندازه ماستیک قیری، بخشی از مزیت‌های اولیه را خنثی کند. افزون بر این، مرور حاضر یک دوگانگی مهم را برجسته می‌سازد: بهبود یک شاخص عملکردی لزوماً به معنای بهبود هم‌زمان سایر شاخص‌ها نیست. در برخی مواد، افزایش سختی و پایداری با افزایش خطر شکنندگی یا کاهش مقاومت در برابر رطوبت همراه است. از این رو، تصمیم‌گیری مهندسی باید بر پایه مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی و متناسب با شرایط اقلیمی و ترافیکی انجام گیرد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی داغ، فیلر ضایعاتی، ماستیک قیری، حساسیت رطوبتی، شیارشدگی

۱-مقدمه

مختلف به‌ویژه صنعت راه‌سازی به‌عنوان یک رویکرد پایدار و اقتصادی مورد توجه محققان قرار گرفته است (Khedaywi, Haddad, et al., 2025). در میان اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالتی داغ، فیلر به دلیل تأثیر قابل توجه بر خواص رئولوژیکی قیر، پر کردن فضاهای خالی و افزایش مقاومت مکانیکی، نقشی کلیدی ایفا می‌کند. مطالعات نشان داده است که جایگزینی فیلرهای معدنی متداول مانند آهک و سیمان با

رشد روزافزون جمعیت و توسعه صنایع، منجر به تولید حجم عظیمی از پسماندهای صنعتی، کشاورزی و شهری شده است که رهایی از آن‌ها به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی در سراسر جهان تبدیل شده است. روش‌های سنتی مدیریت پسماند نظیر دفن و سوزاندن، نه تنها پرهزینه و ناکارآمد هستند، بلکه تهدیدی جدی برای سلامت اکوسیستم به شمار می‌آیند. از این رو، بازیافت و استفاده مجدد از ضایعات در صنایع

شکنندگی و بیشینه سازی تحمل ترک را نشان داده‌اند (He et al., 2025).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این زمینه، هنوز پرسش‌های مهمی پیرامون انتخاب نوع بهینه فیلر ضایعاتی، تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها و همچنین سازگاری با شرایط اقلیمی و ترافیکی وجود دارد. شکل ۱ نمای کلی از دسته‌بندی فیلرهای ضایعاتی و اثرات آن‌ها بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را در این مقاله ارائه می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، این مواد بر اساس منشأ به سه گروه اصلی شامل فیلرهای شهری و بازیافتی، صنعتی - ساختمانی و زیست‌توده‌ای تقسیم شده‌اند. همچنین، اثرات هر دسته بر شاخص‌های عملکردی نظیر مقاومت در برابر شیارشدگی، دوام رطوبتی، سختی و رفتار خستگی به صورت شماتیک نشان داده شده است. علاوه بر این، مفهوم بازه بهینه مصرف و تعادل عملکردی نیز در این شکل برجسته شده است؛ به‌گونه‌ای که افزایش مقدار فیلر اگرچه می‌تواند برخی ویژگی‌ها نظیر سختی و مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی را بهبود دهد، اما ممکن است به کاهش انعطاف‌پذیری یا افزایش حساسیت به ترک منجر شود. از این رو، انتخاب نوع فیلر و میزان مصرف آن باید با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و ترافیکی و بر اساس یک رویکرد چندشاخصه انجام گیرد.

فیلرهای ضایعاتی، می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌ها، عملکرد آسفالت را نیز بهبود بخشد (Choudhary et al., 2020c). انواع مختلفی از پسماندها تاکنون به عنوان فیلر مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به پودر سرامیک، خاکستر سبوس برنج، خاکستر دانه خرما، کوارتز ضایعاتی، خاکستر برگ بامبو، سرباره فولاد و ... اشاره کرد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد دامنه فیلرهای ضایعاتی قابل استفاده در مخلوط آسفالتی داغ (HMA) صرفاً محدود به ضایعات کشاورزی یا پسماندهای معدنی رایج نیست، بلکه طیف متنوعی از پسماندهای صنعتی - شهری قابل تبدیل به پودر (نظیر ضایعات سرامیکی، لجن تصفیه‌خانه‌ها، سیلت‌ها و پسماندهای معدنی بازیافتی) نیز به‌عنوان فیلر قابل طرح هستند و می‌توانند از طریق تغییر رئولوژی ماستیک و بهبود قفل‌بست ریزدانه‌ها، بر شاخص‌هایی نظیر پایداری، شیارشدگی و ترک‌خوردگی اثرگذار باشند (Khedaywi et al., 2025; Solouki (waste silt) et al., 2023; Kahveci & Özen, 2024 (waste sludge drinking water); Sherre & Liao, 2021). همچنین، برخی ضایعات با منشأ انرژی - معدنی نظیر پسماند زغال‌جیگ، به‌عنوان جایگزین فیلر در تحلیل‌های شکست، رفتار کوتاه‌مدت و بلندمدت مخلوط را تحت تأثیر قرار داده و وجود نسبت‌های بهینه برای حداقل سازی



شکل ۱. دسته‌بندی فیلرهای ضایعاتی بر اساس منشأ و نمایش شماتیک اثرات آن‌ها بر شاخص‌های عملکردی مخلوط آسفالتی، شامل شیارشدگی، دوام رطوبتی، سختی و خستگی، به‌همراه مفهوم بازه بهینه مصرف و مبادله عملکرد

از سوی دیگر، مقدار بهینه فیلر نیز اهمیت زیادی دارد. افزایش بیش از حد فیلر می‌تواند منجر به شکنندگی مخلوط شود، در حالی که کمبود آن موجب کاهش پایداری و افزایش حساسیت به رطوبت خواهد شد. تحقیقات نشان می‌دهد که به طور معمول مقدار فیلر در آسفالت داغ حدود ۴ تا ۱۰ درصد وزنی مصالح سنگی متغیر است و بسته به نوع فیلر و شرایط پروژه باید بهینه‌سازی شود (Khedaywi, Haddad, et al., 2025).

بنابراین، انتخاب نوع و مقدار مناسب فیلر در طراحی مخلوط آسفالتی، نقشی تعیین‌کننده در افزایش عمر سرویس‌دهی و کاهش هزینه‌های نگهداری راه دارد. در ادامه به معرفی انواع مواد جامد ضایعاتی استفاده شده در مخلوط‌های آسفالت داغ به‌عنوان فیلر پرداخته می‌شود.

۳-فیلرهای ضایعاتی

برخلاف ضایعات پلیمری که غالباً به‌عنوان اصلاح‌کننده قیر یا افزودنی‌های خاص به کار می‌روند و از منظر تعریف فیلر (ذرات ریزدانه قابل اختلاط خشک با مصالح) همواره محل بحث هستند، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های اخیر بر فیلرهایی متمرکز است که ماهیت معدنی - خاکستری داشته و به صورت پودر قابل جایگزینی با فیلرهای متداول هستند.

این فیلرها معمولاً از سه منشأ اصلی حاصل می‌شوند:

- (۱) پسماندهای کشاورزی - زیست‌توده (مانند خاکسترها)،
- (۲) پسماندهای شهری - تصفیه‌خانه‌ها (مانند سیلت و لجن)،
- (۳) پسماندهای صنعتی - ساختمانی و انرژی‌پایه (مانند پودر بلوک بتنی، آجر و پسماند زغالی). جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد اثرگذاری این فیلرها عمدتاً از طریق تغییر ریزساختار ماستیک، افزایش سطح تماس و بهبود چسبندگی قیر - سنگدانه و نیز تغییرات پارامترهای حجمی مخلوط رخ می‌دهد و معمولاً یک مقدار بهینه برای بهینه‌سازی مزایا وجود دارد (He et al., 2025; Kahveci & Özen, 2024; Solouki et al., 2023).

۳-۱-فیلر بازیافتی آسفالت (RAP)

فیلر بازیافتی آسفالت از ریزدانه‌های حاصل از مصالح آسفالتی بازیافتی به دست می‌آید و برخلاف بسیاری از فیلرهای معدنی ختنی، معمولاً حامل بخشی از قیر پیرشده نیز هست. این ویژگی

هدف این مطالعه، مرور و تحلیل پژوهش‌های اخیر در خصوص کاربرد انواع فیلرهای ضایعاتی در مخلوط‌های آسفالت داغ است. در این راستا، ابتدا مبانی نظری و نقش فیلر در آسفالت معرفی می‌شود؛ سپس انواع ضایعات مورد استفاده به‌عنوان فیلر بررسی و اثر آن‌ها بر خواص مکانیکی و عملکردی مخلوط‌ها تحلیل می‌گردد. در نهایت، چشم‌اندازها و خلأهای پژوهشی آتی به منظور توسعه رویکردهای پایدار در مهندسی رو سازی ارائه خواهد شد.

۲-پیشینه تحقیق

مخلوط آسفالتی داغ متشکل از مصالح سنگی با دانه‌بندی مناسب، قیر و فیلر است (Lesueur, 2009). فیلر، به‌عنوان یکی از اجزای مخلوط آسفالت، نقش مهمی در خواص عملکردی آسفالت دارد. تغییرات در نوع و مقدار فیلر می‌تواند بر خواص مخلوط آسفالت تأثیر بگذارد. فیلر در آسفالت به‌عنوان ذرات معدنی ریز مانند پودر سنگ، آهک هیدراته، خاکستر بادی و سایر مواد مناسب با اندازه ذرات کمتر از ۷۵ میکرون تعریف می‌شود که حدود ۷۰ درصد آن از الک نمره ۰.۰۷۵ میلی‌متر عبور می‌کند (Shamsaei et al., 2020).

به‌طور کلی، نقش‌های اصلی فیلر در مخلوط‌های آسفالتی عبارت‌اند از:

افزایش چسبندگی قیر و مصالح سنگی از طریق تشکیل ماستیک قیری (ترکیب قیر و فیلر)؛ کاهش حفرات خالی و تراکم بهتر مخلوط؛ بهبود مقاومت در برابر رطوبت و شیارشدگی؛ افزایش سختی و مدول الاستیسیته مخلوط و ارتقای دوام در برابر ترک‌خوردگی و خستگی (Choudhary et al., 2020a).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فیلر تأثیر زیادی بر عملکرد مخلوط دارند. به‌عنوان مثال:

-فیلرهای غنی از سیلیس و کوارتز، باعث افزایش سختی و کاهش تغییرشکل دائمی می‌شوند (Tacıroğlu et al., 2022).

-فیلرهای حاوی اکسید کلسیم و اکسید منیزیم مانند سرباره فولاد، با افزایش خاصیت قلیایی، چسبندگی قیر - سنگدانه را بهبود می‌بخشند (Osuolale et al., 2023).

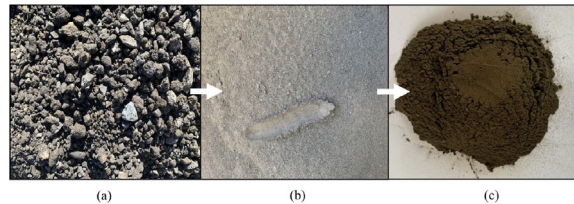
-فیلرهای آلی مانند خاکستر برگ بامبو، به دلیل دارا بودن ترکیبات سلولزی و کربنی، رفتار متفاوتی در مقایسه با فیلرهای معدنی نشان می‌دهند (Ismanti & Yasufuku, 2017).

(حدود ۷۶۶ ژول بر متر مربع) و بار بیشینه (حدود ۱۰،۴ کیلونیوتن) افزایش یافته و در آزمون خستگی نیز عمر خستگی و چرخه‌های رشد ترک بهبود پیدا کرده است. بنابراین، دو شکل ۳ و ۴ در کنار نتایج شکست - خستگی یک تفسیر منسجم ارائه می‌کنند: RAP می‌تواند به‌ویژه در شرایط رطوبتی، افت عملکرد ناشی از آب را کاهش دهد و هم‌زمان در صورت انتخاب روش اختلاط مناسب، مقاومت ترک‌خوردگی و خستگی را نیز تقویت کند (Shirvani & Sarkar, 2025).

مطابق شکل ۵، نتایج آزمون Hamburg نشان می‌دهد عمق شیار نهایی برای مخلوط شاهد ۵،۳۲ میلی‌متر، برای مخلوط ۱ برابر ۵،۲۸ میلی‌متر و برای مخلوط ۲ برابر ۵،۶۲ میلی‌متر است. بنابراین، مخلوط ۱ از نظر شیار نهایی تقریباً هم‌تراز با شاهد (کاهش حدود ۰،۸٪) عمل کرده، در حالی که مخلوط ۲ افزایش شیار نهایی حدود ۵،۶٪ را نشان می‌دهد. همچنین شیب خزشی به‌ترتیب برای شاهد ۰،۱۶۲ میلی‌متر بر ۱۰۰۰ چرخه، برای مخلوط ۱، ۰،۱۵۷ میلی‌متر بر ۱۰۰۰ چرخه و برای مخلوط ۲، ۰،۱۹۸ میلی‌متر بر ۱۰۰۰ چرخه گزارش شده است؛ یعنی در مخلوط ۲ نرخ تجمع تغییرشکل دائم حدود ۲۲٪ بالاتر از شاهد است، در حالی که مخلوط ۱ کاهش خفیف (حدود ۳٪) نسبت به شاهد دارد. از منظر تحلیلی، این شکل به‌طور مستقیم نشان می‌دهد اثر RAP بر شیارشدگی به روش اختلاط وابسته است؛ روش ۱ رفتار شیارشدگی را کنترل کرده و نزدیک به مخلوط مرجع نگه می‌دارد، اما روش ۲ هم مقدار شیار و هم نرخ رشد آن را افزایش می‌دهد (Shirvani & Sarkar, 2025).

مطابق شکل ۶ عمر خستگی ($10^3 \times$ چرخه) برای مخلوط شاهد ۴،۲۶۲، برای مخلوط ۱ برابر ۶،۴۵۷ و برای مخلوط ۲ برابر ۴،۱۶۷ گزارش شده است؛ به عبارت دیگر، مخلوط ۱ افزایش عمر خستگی حدود ۵۱،۵٪ نسبت به شاهد دارد، در حالی که مخلوط ۲ حدود ۲،۲٪ کمتر از شاهد است. هم‌زمان، شیب ناحیه خطی منحنی تغییرشکل - چرخه به‌ترتیب برای شاهد ۰،۶۱۸ میلی‌متر بر ۱۰۰۰ چرخه، برای مخلوط ۱، ۰،۴۱۱ میلی‌متر بر ۱۰۰۰ چرخه و برای مخلوط ۲، ۰،۶۶۱ میلی‌متر بر ۱۰۰۰ چرخه گزارش شده است؛ کاهش معنی‌دار شیب در مخلوط ۱ (حدود ۳۳،۵٪ کمتر از شاهد) نشان می‌دهد نرخ تجمع تغییرشکل در سیکل‌های تکراری کاهش یافته و پیشروی آسیب خستگی کندتر شده است، در حالی که افزایش شیب در مخلوط ۲ (حدود ۷٪ بیشتر از شاهد) با عدم بهبود عمر خستگی سازگار است.

سبب می‌شود RAP نه‌تنها از طریق پرکنندگی و اصلاح ساختار ریزدانه‌ها، بلکه از مسیر اثرگذاری بر فاز چسباننده (به‌واسطه حضور قیر پیرشده) بر عملکرد مخلوط اثر بگذارد. از این رو، RAP می‌تواند به صورت هم‌زمان بر شکست، خستگی و حساسیت رطوبتی مؤثر باشد و مقدار و کیفیت این اثر، به نحوه اختلاط و توالی افزودن اجزاء وابسته خواهد بود (Shirvani & Sarkar, 2025).



شکل ۲. فرایند تبدیل RAP به RAP: (a) RAP: (b) RAP: (c) Powder (Shirvani & Sarkar, 2025)

در مطالعه (Shirvani & Sarkar, 2025)، RAP به‌طور کامل جایگزین فیلر معدنی مخلوط شاهد شده و دو سناریوی اختلاط برای روشن شدن نقش توالی افزودن مقایسه گردیده است. برای ارزیابی جامع، آزمون SCB جهت سنجش شکست - انرژی شکست، آزمون خستگی کششی غیرمستقیم برای رشد ترک تحت بارگذاری تکراری، آزمون Hamburg Wheel Tracking برای شیارشدگی و نیز Modified Lottman - TSR برای حساسیت رطوبتی اجرا شده است. این آزمون‌ها اجازه می‌دهد اثر RAP در محور ترک‌خوردگی و در محور تغییرشکل دائم و دوام رطوبتی به‌صورت هم‌زمان بررسی شود و نتیجه‌گیری صرفاً به یک شاخص محدود نگردد.

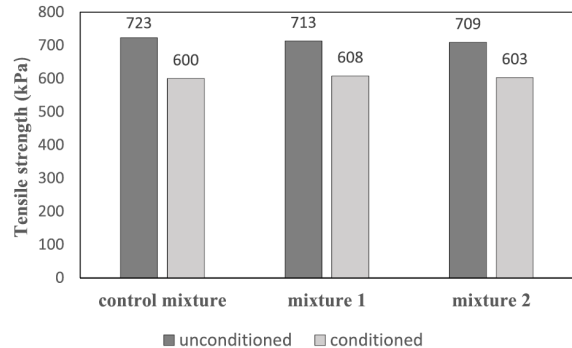
مطابق شکل ۳، مقایسه ITS در حالت خشک و مرطوب نشان می‌دهد، اگرچه ITS خشک در مخلوط‌های دارای RAP ممکن است نسبت به شاهد اندکی کاهش یابد، اما در حالت مرطوب، ITS مخلوط‌های دارای RAP به‌ویژه در سناریوی اختلاط برتر - بالاتر از شاهد گزارش شده است؛ این رفتار به‌صورت منطقی با نقش هیدروفوب‌تر RAP و کاهش افت چسبندگی در حضور آب تفسیر می‌شود. همچنین مطابق شکل ۴، TSR مخلوط شاهد حدود ۸۳٪ و برای مخلوط‌های دارای RAP حدود ۸۵٪ گزارش شده است که بهبود مقاومت رطوبتی را تأیید می‌کند (Shirvani & Sarkar, 2025). در محور ترک‌خوردگی نیز، نتایج شکست نشان می‌دهد در سناریوی اختلاط برتر، انرژی شکست SCB

۳-۲- پودر شیشه ضایعاتی (GP)

پودر شیشه ضایعاتی به عنوان فیلر بازیافتی، از خردایش و ریزکردن شیشه‌های ضایعاتی حاصل شده و به صورت بالقوه می‌تواند جایگزین بخشی از فیلر سنگ‌آهکی در مخلوط‌های آسفالتی گردد. اهمیت این ماده در آن است که تغییر ماهیت فیلر (از سنگ‌آهکی به شیشه) می‌تواند رئولوژی ماستیک و ویژگی‌های ویسکوالاستیک مخلوط را دگرگون سازد؛ بنابراین انتظار می‌رود برخی شاخص‌ها بهبود یابند و برخی دیگر تحت شرایط دمایی - بارگذاری متفاوت، رفتار نامطلوب نشان دهند. از این رو، ارزیابی GP ناگزیر باید چندشاخصه بوده و هم‌زمان مقاومت در برابر تغییر شکل دائم و رفتار ترک‌خوردگی - خستگی را پوشش دهد (Barraj et al., 2023).

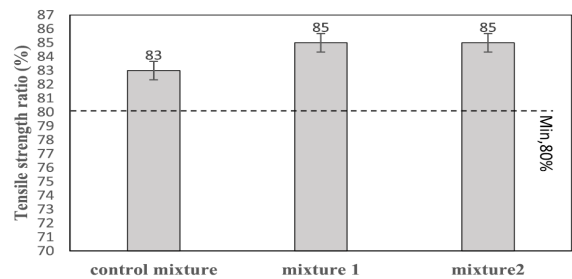
در مطالعه (Barraj et al., 2023)، یک مخلوط شاهد با فیلر سنگ‌آهکی و دو مخلوط اصلاح‌شده با ۲۵٪ و ۵۰٪ جایگزینی فیلر سنگ‌آهکی توسط پودر شیشه (به ترتیب GP25 و GP50) بررسی شده است. نتایج طراحی نشان می‌دهد حضور GP حتی می‌تواند مقدار فیر بهینه را تغییر دهد (برای شاهد و مخلوط‌های اصلاح‌شده مقادیر متفاوتی گزارش شده است)، که خود بیانگر اثر فیلر بر ویسکوزیته ماستیک و نسبت فیر مؤثر است. برای ارزیابی عملکرد، آزمون‌های دینامیکی و مکانیکی شامل مدول مرکب، زاویه فاز و آزمون عدد روانی (FN) به کار رفته‌اند تا هم سختی و اتلاف انرژی و هم مقاومت شیارشدگی در شرایط بارگذاری تکراری سنجیده شود. مطابق شکل ۷ تغییرات زاویه فاز با دما نشان می‌دهد با افزایش دما سهم رفتار ویسکوز افزایش می‌یابد، اما در عین حال مخلوط‌های حاوی GP در بسیاری از دماها زاویه فاز پایین‌تری نسبت به شاهد دارند؛ این مشاهده معمولاً به معنای سهم الاستیک بیشتر و سفت‌تر شدن مخلوط تفسیر می‌شود، که می‌تواند در برخی سناریوها به کاهش کرنش و بهبود رفتار ترک‌خوردگی - خستگی کمک کند. با این حال، مطابق شکل ۸، مقادیر FN با افزایش سطح جایگزینی GP کاهش یافته است؛ از دیدگاه مهندسی، کاهش FN نشان‌دهنده ورود زودتر مخلوط به ناحیه تغییر شکل دائم و در نتیجه افزایش ریسک شیارشدگی تحت بارگذاری ترافیکی در دماهای بالا است. بنابراین، این دو شکل به صورت مکمل یک دوگانگی مهم را تثبیت می‌کنند: GP می‌تواند پاسخ ویسکوالاستیک و سختی را تقویت کند، اما هم‌زمان ممکن است مقاومت شیارشدگی را تضعیف نماید؛ از این رو، درصد جایگزینی باید کاملاً وابسته به اقلیم، سهم ترافیک سنگین و حساسیت پروژه به شیارشدگی تنظیم گردد (Barraj et al., 2023).

جمع‌بندی شکل ۶ روشن می‌کند که کارایی RAPF در بهبود خستگی، بیش از هر چیز تابع روش اختلاط بوده و روش اختلاط ۱ بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد (Shirvani & Sarkar, 2025).



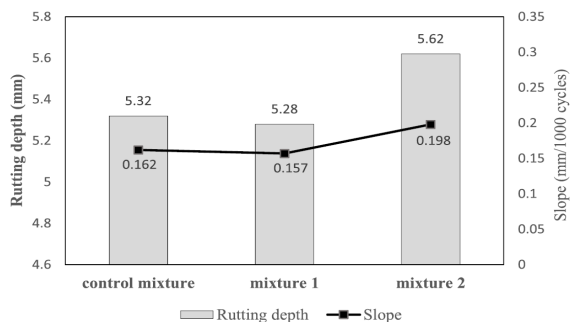
شکل ۳. مقادیر مقاومت کششی نمونه شاهد و نمونه‌های اصلاح

شده با RAPF (Shirvani & Sarkar, 2025)



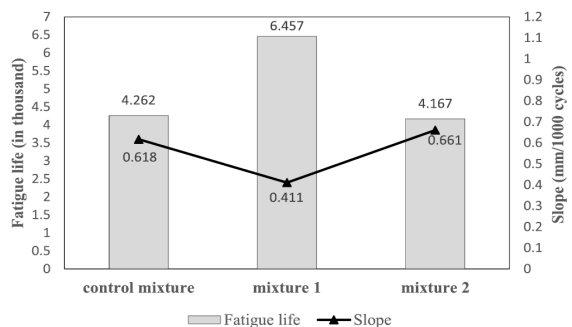
شکل ۴. مقادیر نسبت مقاومت کششی نمونه شاهد و نمونه‌های

اصلاح شده با RAPF (Shirvani & Sarkar, 2025)



شکل ۵. مقدار عمق شیار در برابر شیب خزش

(Shirvani & Sarkar, 2025)



شکل ۶. مقادیر عمر خستگی در برابر شیب ناحیه خطی در منحنی

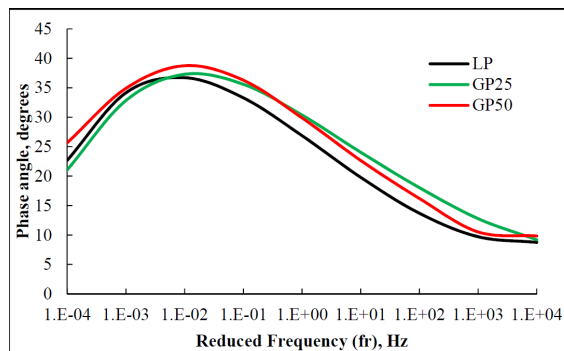
جابه‌جایی - تعداد سیکل بار (Shirvani & Sarkar, 2025)

که موجب افزایش چسبندگی قیر-سنگدانه می‌شوند (Shamsaei et al., 2020; Aljubory et al., 2021).

در پژوهش (Khedaywi, Bani Baker, et al., 2025)، WCP به صورت جایگزینی فیلر آهکی در سطوح ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ (برحسب وزن فیلر معدنی) وارد طرح شد و نمونه‌های ماستیک و HMA متناظر ساخته شدند. برای ماستیک‌ها، آزمون‌های سوپریپو شامل ویسکوزیته دورانی، رئومتر برشی دینامیکی و رئومتر تیر خمشی روی حالت‌های بدون پیرشدگی، RTFO و PAV اجرا شد تا شاخص‌های کارایی - اختلاط، مقاومت شیارشدگی، خستگی و ترک‌خوردگی دمای پایین ارزیابی گردد. در مقیاس مخلوط نیز علاوه بر طراحی مارشال و کنترل پارامترهای حجمی و OBC، آزمون‌های پایداری و روانی مارشال، خزش دینامیکی (برای مدول برگشتی، مدول خزش و عمق شیار) و مدول کششی غیرمستقیم در دماهای مختلف اجرا شد تا اثر WCP بر پاسخ مکانیکی مخلوط در شرایط نزدیک به بهره‌برداری بررسی شود (Khedaywi, Bani Baker, et al., 2025).

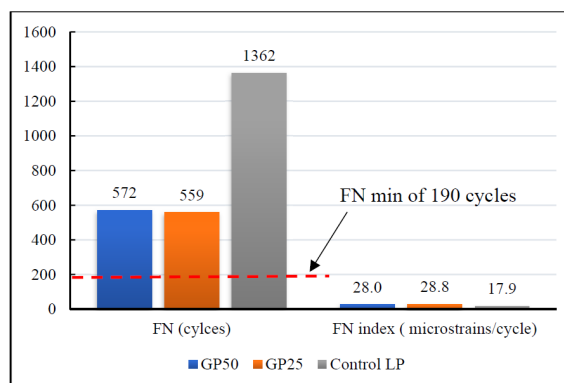
مطابق شکل ۱۰، ویسکوزیته دینامیکی ماستیک در ۱۳۵ سانتی‌گراد با افزایش درصد WCP روند افزایشی دارد و مقادیر از حدود ۱۳۲۵ میلی‌پاسکال ثانیه در ۰٪ WCP به حدود ۱۷۶۳ میلی‌پاسکال ثانیه در ۱۰۰٪ WCP می‌رسد (در میانه مسیر نیز حدود ۱۴۳۸، ۱۵۷۵ و ۱۶۲۹،۳ میلی‌پاسکال ثانیه گزارش شده است)؛ تفسیر مهندسی این نمودار آن است که افزایش سطح ویژه مؤثر فیلر و شدت برهم‌کنش قیر - فیلر، مقاومت جریان را بالا برده و عملاً به نیاز احتمالی به دمای اختلاط - تراکم بالاتر اشاره می‌کند.

هم‌زمان، مطابق شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، افزایش WCP در ماستیک‌ها در حالت بدون پیرشدگی، بهبود خفیف پارامتر شیارشدگی ($G^*/\sin\delta$) و افزایش اندک سختی را نشان می‌دهد، اما در حالت PAV، افزایش ($G^*\sin\delta$) و نیز تغییرات BBR (افزایش سختی خزشی و کاهش m-value) به این معناست که با وجود بهبود محدود در دمای بالا، حساسیت به خستگی و ترک دمای پایین می‌تواند اندکی نامطلوب‌تر شود. در مقیاس مخلوط، مطابق شکل ۱۴، پایداری مارشال با افزایش WCP به طور معنی‌دار افزایش یافته و از ۱۴،۱۹ (۰٪) کیلونیوتن به ۱۵،۳۴ کیلونیوتن (۲۵٪) و ۱۵،۳۶ (۵۰٪) رسیده و در نهایت در ۱۰۰٪ WCP به ۱۶،۸۸ کیلونیوتن افزایش یافته است؛ در مقابل، روانی تا ۷۵٪ افزایش یافته (حدود ۱۵،۵ در ۷۵٪) و سپس در ۱۰۰٪ کاهش نشان می‌دهد (حدود ۱۳،۷۴۶ کیلونیوتن). این الگو نشان می‌دهد که WCP می‌تواند ظرفیت تحمل بار (پایداری) را تقویت کند، اما پاسخ



شکل ۷. زاویه فاز منحنی‌های اصلی در اندازه نیمه‌لگایتی

(Barraj et al., 2023)



شکل ۸. مقایسه نتایج FN (Barraj et al., 2023)

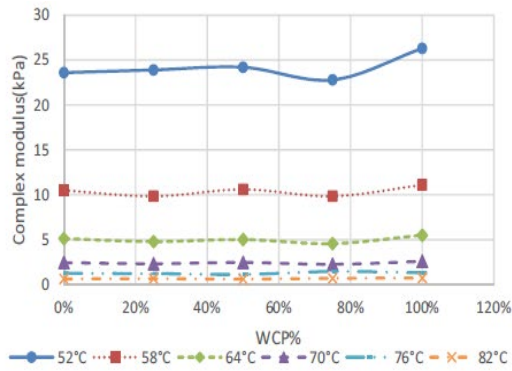


شکل ۹. پودر سرامیک ضایعاتی

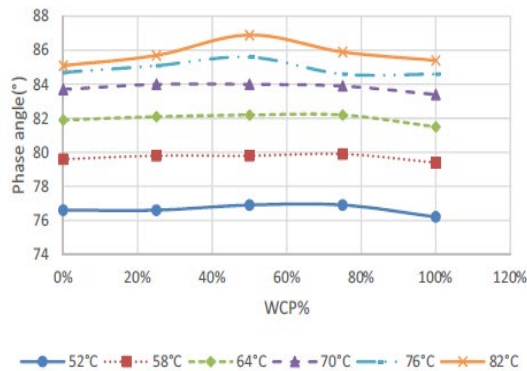
(Khedaywi, Bani Baker, et al., 2025)

۳-۳- پودر ضایعات سرامیکی (WCP)

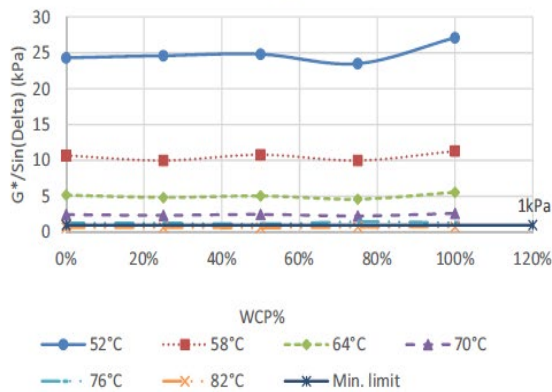
ضایعات سرامیکی یکی از پسماندهای پرحجم صنعت ساختمان و کاشی‌کاری است که بخش زیادی از آن قابلیت بازیافت مستقیم ندارد. استفاده از این ضایعات به صورت پودر ریزدانه به عنوان فیلر در آسفالت، یک رویکرد پایدار محسوب می‌شود. تحقیقات نشان داده است که جایگزینی فیلر سنگ آهک با WCP باعث بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی، افزایش دوام خستگی و کاهش حساسیت رطوبتی می‌شود. دلیل این موضوع، سطح زبر ذرات سرامیک و ترکیبات معدنی غنی از سیلیس و آلومینا است



(a)

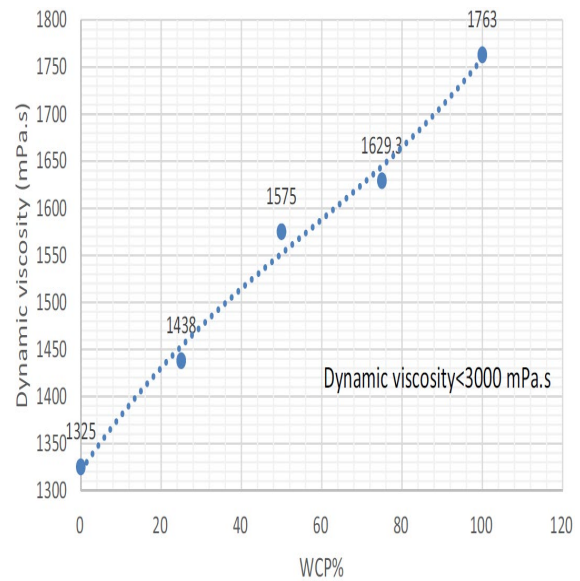


(b)



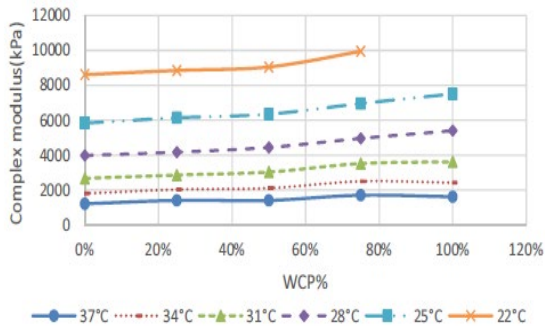
(c)

تغییر شکل پلاستیک (flow) یک رفتار غیرخطی دارد و بهینه‌سازی درصد جایگزینی باید هم‌زمان با کنترل معیارهای حجمی و عملکردی انجام شود. همچنین مطابق نتایج گزارش شده در بخش آزمون‌های عملکردی، در آزمون خزش دینامیکی بیشترین مقادیر مدول‌ها غالباً در ۱۰۰٪ WCP مشاهده شده و در آزمون مدول کششی غیرمستقیم، درصد بهینه به دما وابسته گزارش شده است (در ۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد حدود ۲۵٪ WCP و در ۴۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۵۰٪ WCP)، که نشان می‌دهد «بهینه WCP» باید بر مبنای اقلیم و دمای بهره‌برداری تعیین شود (Khedaywi, Bani Baker, et al., 2025).

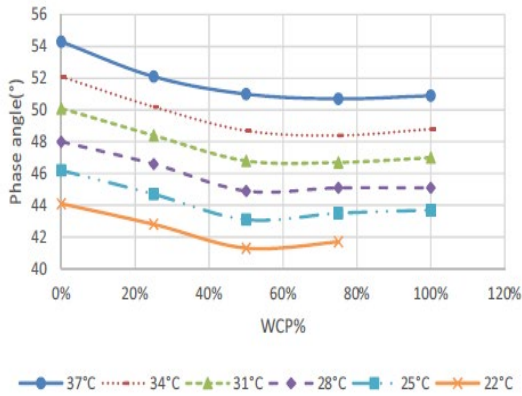


شکل ۱۰. ویسکوزیته دینامیکی ماستیک‌های WCP (Khedaywi, Bani Baker, et al., 2025)

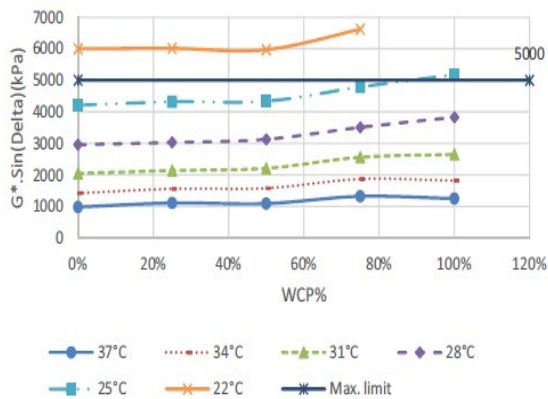
شکل ۱۱. نتایج آزمون DSR برای (a): قیر پایه (b): مدول برشی و دما (c): شاخص شیارشدگی و دما برای درصدهای مختلف ماستیک آسفالتی WCP پیرنشده (Khedaywi, Bani Baker, et al., 2025)



(a)



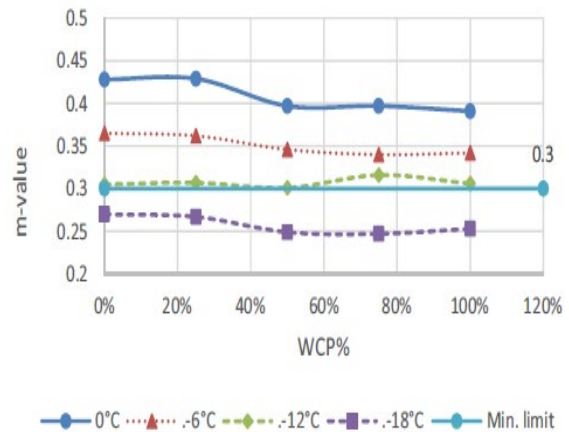
(b)



(c)



(a)



(b)

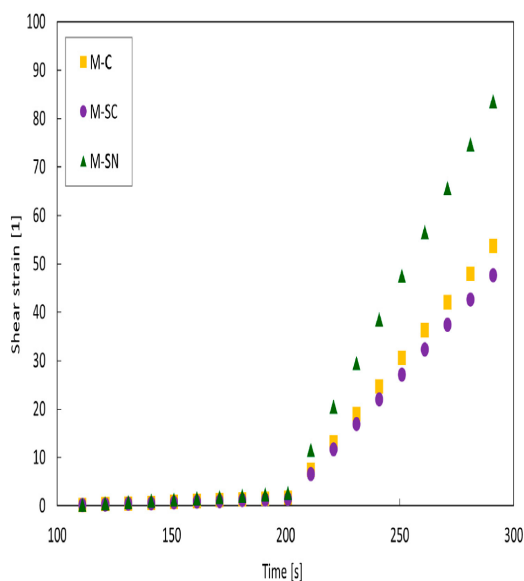
شکل ۱۲. نتایج آزمون BBR برای قیر PAV شده

(a): سختی خزشی و دما برای ماستیک با درصد‌های مختلف WCP (a): m-value با دما برای ماستیک با درصد‌های مختلف WCP (Khedaywi, Bani Baker, et al., 2025)

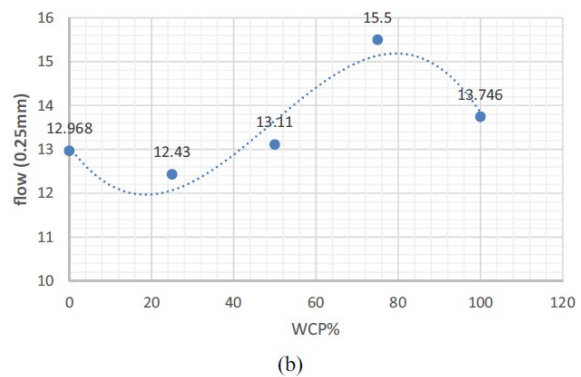
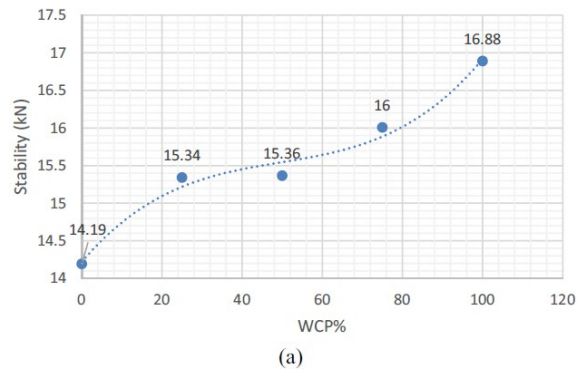
شکل ۱۳. نتایج آزمون DSR (a): برای قیر پیرشده (b): مدول برشی و دما (c): شاخص شیارشدگی و دما برای درصد‌های مختلف ماستیک آسفالتی WCP پیرشده (Khedaywi, Bani Baker, et al., 2025)

رفتار سیلت را به فیلرهای متداول نزدیک‌تر سازد (Solouki et al., 2023).

مطابق شکل ۱۶ که نتایج MSCR را نمایش می‌دهد، تحلیل شاخص Jnr به‌عنوان معیار کرنش غیرقابل‌بازگشت، برای تفسیر شیارشدگی محوری است: افزایش Jnr به معنای افزایش تمایل به تغییرشکل دائم و کاهش مقاومت شیارشدگی است، در حالی که کاهش Jnr و افزایش درصد بازیابی، رفتار مطلوب‌تر را نشان می‌دهد. این شکل معمولاً تفاوت مشخصی میان سیلت خام و سیلت اصلاح شده ایجاد می‌کند و از آن می‌توان نتیجه گرفت اصلاح حرارتی، با اصلاح سطح ذرات و کاهش رفتار نامطلوب، پاسخ شیارشدگی را به نمونه کنترل نزدیک می‌سازد. مطابق شکل ۱۷ (استقامت مارشال) و شکل ۱۸ (ITSR)، پیوند بین ماستیک و مخلوط تکمیل می‌شود: نزدیک شدن استقامت و بهبود ITSR در نمونه اصلاح شده نشان می‌دهد اثر اصلاح فقط مکانیکی نیست، بلکه در سطح اتصال قیر - سنگدانه و دوام در شرایط مرطوب نیز نقش دارد. سپس مطابق شکل ۱۹ (ITSM)، تغییر سختی مؤثر مخلوط و حساسیت دمایی قابل تحلیل است و می‌توان نشان داد که سیلت اصلاح شده، در قیاس با سیلت خام، رفتار سازگارتر و نزدیک‌تری به فیلر مرجع ایجاد می‌کند. جمع‌بندی شکل‌ها نشان می‌دهد که برای سیلت، کیفیت فرآوری و نه صرفاً درصد مصرف عامل تعیین‌کننده در پذیرش به‌عنوان فیلر است (Solouki et al., 2023).



شکل ۱۶. نتایج آزمایش‌های MSCR برای همه نمونه‌های ماستیک در دمای ۶۰ (Solouki et al., 2023)



شکل ۱۴. آزمون استقامت مارشال برای نمونه‌های WCP-HMA
(a): مقادیر استقامت (b): مقادیر روانی
(Khedaywi, Bani Baker, et al., 2025)

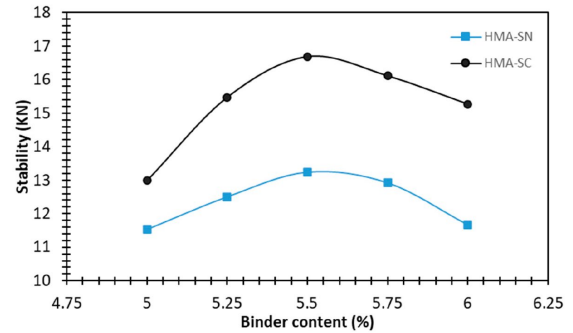


شکل ۱۵. سیلت اصلاح نشده (سمت چپ) و سیلت اصلاح شده با حرارت (شکل سمت راست) (Solouki et al., 2023)

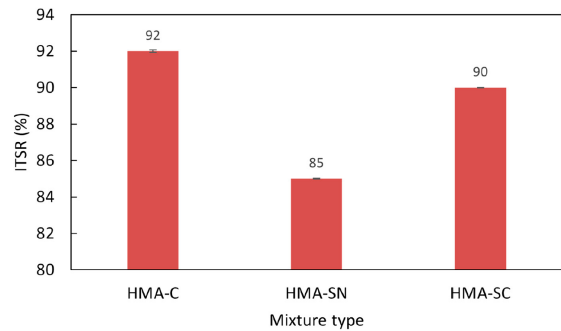
۳-۴- سیلت خام و سیلت کلسینه‌شده (SC و SN)

سیلت یکی از ریزدانه‌های جانبی حاصل از فرآیندهای مرتبط با تولید یا شستشوی مصالح سنگی است که به‌صورت طبیعی ریزدانه بوده، اما به دلیل ماهیت رس‌مانند و ویژگی‌های سطحی می‌تواند از منظر چسبندگی و حساسیت رطوبتی چالش ایجاد کند. در این راستا، بررسی سیلت خام در کنار سیلت اصلاح شده حرارتی (کلسینه‌شده) اهمیت می‌یابد، زیرا اصلاح حرارتی می‌تواند با تغییر ریزساختار و کاهش آب‌دوستی فعالیت‌های نامطلوب سطحی،

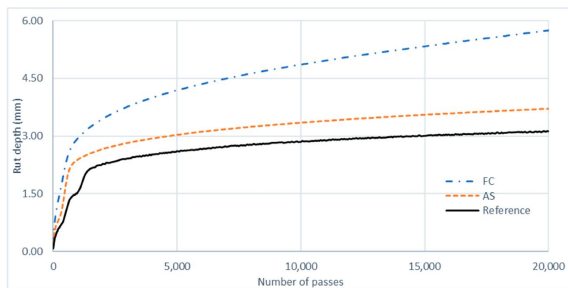
بنابراین استفاده از آن بدون پایش همزمان شیارشدگی و معیارهای رطوبتی، قابل دفاع نیست (Kahveci & Özen, 2024). مطابق شکل ۲۰ که منحنی شیارشدگی را نمایش می‌دهد، تحلیل باید هم بر عمق شیار نهایی و هم بر شیب رشد شیار در فاز خزشی متمرکز باشد؛ زیرا ممکن است دو مخلوط در عمق نهایی نزدیک باشند اما نرخ رشد شیار متفاوتی داشته باشند که از منظر عملکرد بلندمدت معنی‌دار است. مطابق شکل ۲۱ (استقامت مارشال و TSR)، تفسیر باید صریحاً نشان دهد افزایش استقامت خشک به تنهایی معیار کافی نیست؛ چنانچه TSR کاهش معنی‌دار داشته باشد، مزیت مکانیکی می‌تواند با افت دوام جبران شود. در شکل ۲۲ (Rut depth و creep slope)، جمع‌بندی عددی شیارشدگی ارائه می‌شود و می‌توان توضیح داد که کاهش همزمان Rut depth و creep slope به معنای بهبود واقعی مقاومت شیارشدگی است، در حالی که ناهمخوانی میان این دو شاخص، نشانه پیچیدگی رفتار ویسکوالاستیک و حساسیت به ریزساختار ماستیک است. نتیجه کلی استخراج‌شده از این شکل‌ها آن است که DWTS فیلری حساس به نوع و درصد است و معیار پذیرش آن باید با وزندهی همزمان به شیارشدگی و حساسیت رطوبتی انجام گیرد (Kahveci & Özen, 2024).



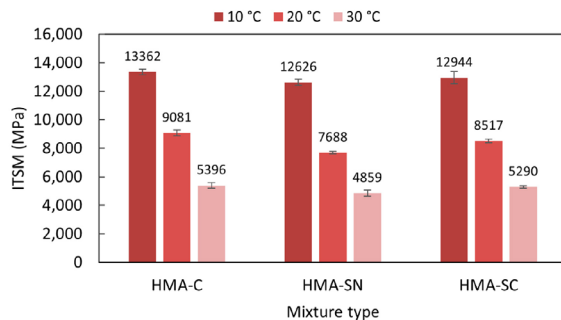
شکل ۱۷. استقامت مارشال برای نمونه‌های HMA (Solouki et al., 2023)



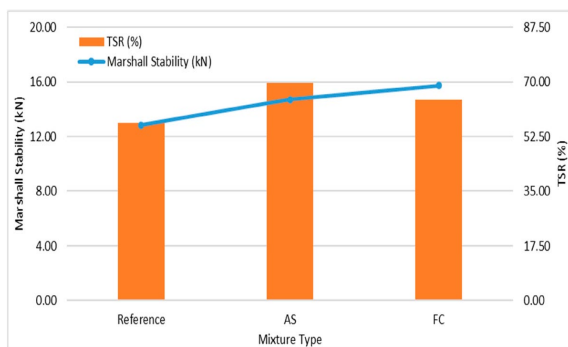
شکل ۱۸. نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم برای نمونه‌های HMA (Solouki et al., 2023)



شکل ۲۰. منحنی شیارشدگی برای مخلوط‌های HMA (Kahveci & Özen, 2024)



شکل ۱۹. مدول سفتی کشش غیرمستقیم برای نمونه‌های HMA (Solouki et al., 2023)

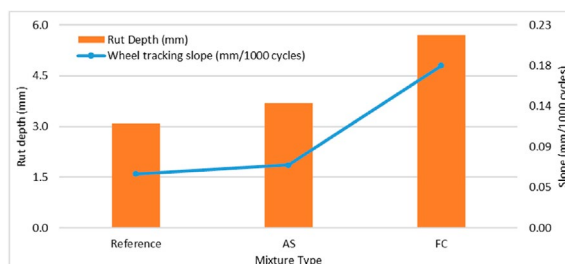


شکل ۲۱. استقامت مارشال و مقادیر TSR برای مخلوط‌ها (Kahveci & Özen, 2024)

۳-۵- لجن تصفیه‌خانه آب شرب (DWTS)

لجن تصفیه‌خانه آب شرب یکی از پسماندهای شهری با حجم بالا و پیامدهای زیست‌محیطی است که در صورت فرآوری می‌تواند به‌عنوان جزء فیلر در HMA مطرح گردد. تفاوت در نوع منعقدکننده‌ها و شرایط تولید لجن، می‌تواند سبب تفاوت در ترکیب و رفتار سطحی شود؛ از این رو، ارزیابی نوع‌محور و عملکردمحور برای این ماده ضروری است. از منظر مکانیزمی، DWTS ممکن است سختی و استقامت خشک را تغییر دهد، اما همزمان می‌تواند بر چسبندگی و حساسیت رطوبتی اثرگذار باشد؛

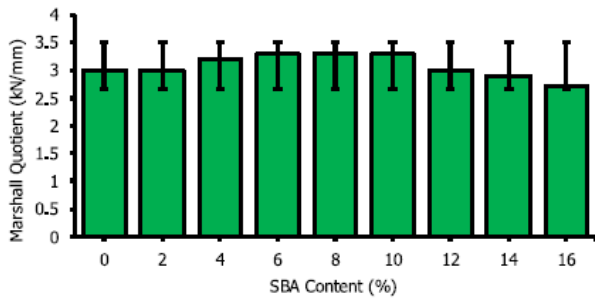
نتایج حجمی و مکانیکی به صورت تجمیعی در شکل ۲۳ (زیر شکل های a تا h) گزارش شده‌اند؛ همان‌طور که در شکل ۲۳-f قابل مشاهده است، پایداری مارشال با افزایش SBA تا محدوده‌ی میانی افزایش یافته و مقدار آن از ۷,۶ کیلو نیوتن برای مخلوط شاهد به حدود ۹,۰ کیلو نیوتن در حوالی ۸٪ SBA رسیده است، سپس در درصدهای بالاتر کاهش نشان می‌دهد (Imoh et al., 2026). از طرف دیگر، مطابق شکل ۲۳-a، مقدار MQ نیز با افزایش SBA تا محدوده‌ی بهینه افزایش یافته و در حدود ۶ تا ۱۰ درصد SBA به حدود ۳,۳ کیلو نیوتن بر میلی‌متر نزدیک می‌شود که نشان‌دهنده‌ی افزایش سختی و مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی است (Imoh et al., 2026). از منظر پارامترهای حجمی نیز همان‌طور که از شکل ۲۳-b و ۲۳-g مشخص است، چگالی حجمی تا حدود ۸٪ SBA افزایش یافته (تا حدود ۲,۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و درصد فضای خالی از ۴,۹٪ در شاهد به حدود ۳,۵٪ در بازه‌ی ۶ تا ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده و همچنان در محدوده‌ی قابل قبول طراحی باقی مانده است (Imoh et al., 2026).



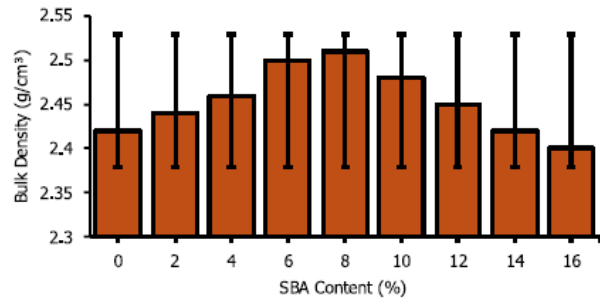
شکل ۲۲. مقادیر آزمایش HWT برای عمق شیارشدگی و شیب خزش مخلوط‌ها (Kahveci & Özen, 2024)

۳-۶- خاکستر باگاس نیشکر (SBA)

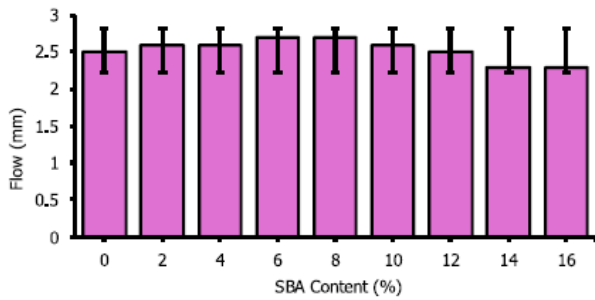
در مطالعه (Imoh et al., 2026)، از خاکستر باگاس نیشکر به‌عنوان جایگزین جزئی فیلر معدنی در مخلوط آسفالتی داغ استفاده شده و عملکرد مکانیکی و حجمی مخلوط‌ها در بازه‌ی جایگزینی ۰ تا ۱۶ درصد ارزیابی شده است. روند کلی آماده‌سازی و چهارچوب روش تحقیق در مقاله ارائه شده و پژوهش به صورت تلفیقی (آزمایشگاهی-عددی) طراحی شده است. همچنین فرایند تولید SBA شامل خشک‌کردن، احتراق کنترل‌شده و سرندکردن تا عبور از الک ۰,۰۷۵ میلی‌متر بوده است. برای ارزیابی عملکرد مخلوط، از آزمون مارشال استفاده شده و نمونه‌ها با درصدهای مختلف SBA ساخته شده‌اند.



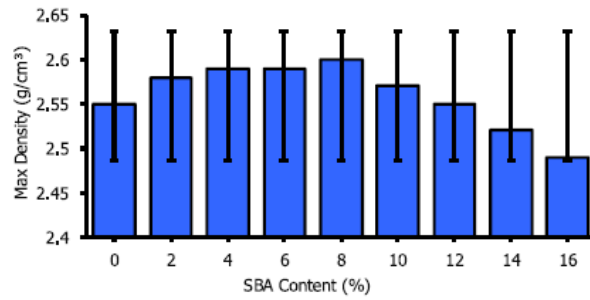
(a)



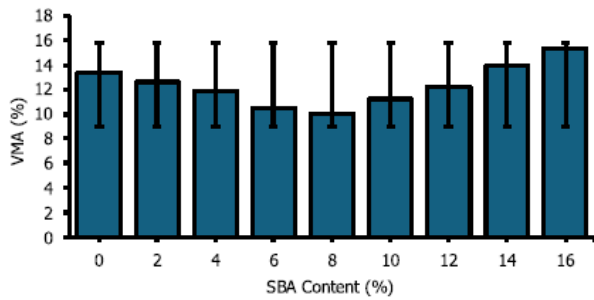
(b)



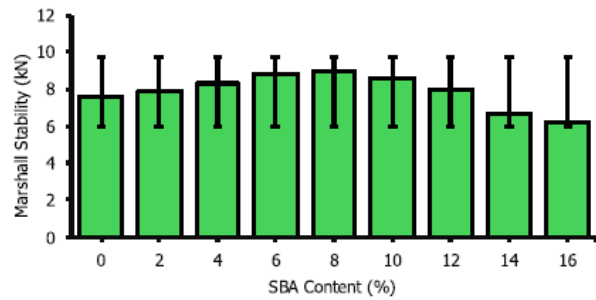
(c)



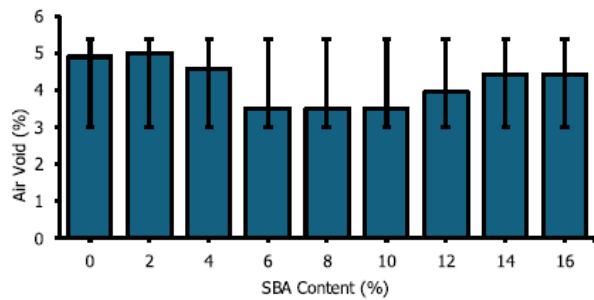
(d)



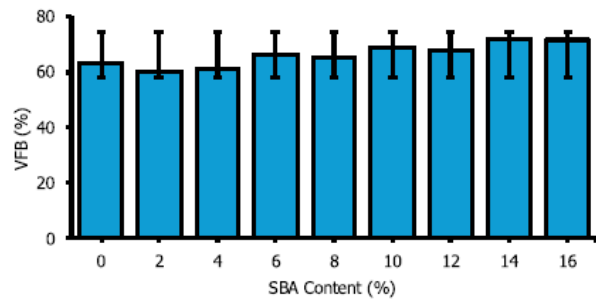
(e)



(f)



(g)



(h)

شکل ۲۳. نتایج حجمی: (a) ضریب مارشال (kN/mm); (b) چگالی حجمی (g/cm³); (c) روانی (mm); (d) چگالی بیشینه (g/cm³); (e) VMA (%); (f) پایداری مارشال (kN); (g) درصد فضای خالی هوا (%); (h) VFB (%). (Imoh et al., 2026).

توسط FEM مناسب گزارش شده و خطاهای نسبی کم هستند که این موضوع از تبیین مکانیزم‌های رفتاری و اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی پشتیبانی می‌کند (Imoh et al., 2026). بر این اساس، مقاله نتیجه می‌گیرد که استفاده‌ی کنترل‌شده از SBA به‌عنوان جایگزین فیلر، به‌ویژه در بازه‌ی ۶ تا ۱۰ درصد، می‌تواند بهبود همزمان در پایداری، سختی و تراکم‌پذیری مخلوط ایجاد کند؛ در مقابل، افزایش بیش از حد SBA به‌دلیل اثر بیش‌پرکنندگی و اختلال در تراکم و پیوند سنگدانه - قیر می‌تواند موجب افت عملکرد شود (Imoh et al., 2026).

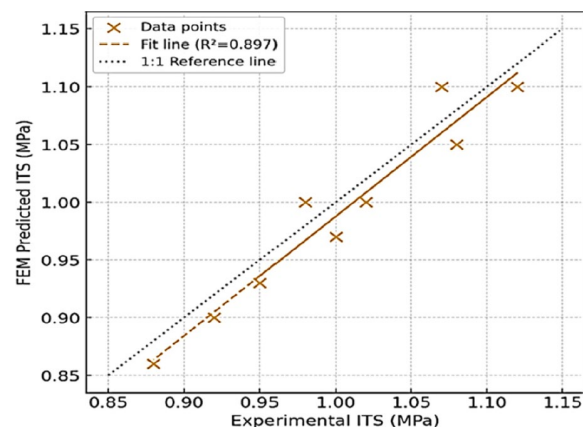
علاوه بر نتایج مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم نیز ارزیابی شده و مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با نتایج مدل اجزای محدود ارائه شده است. همان‌طور که از جدول ۱ برداشت می‌شود، ITS آزمایشگاهی از ۰٫۹۵ مگاپاسکال برای شاهد تا حدود ۱٫۱۲ مگاپاسکالدر ۸٪ افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر SBA کاهش پیدا کرده است، در حالی که مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط FEM نیز روند مشابهی را نشان می‌دهند (Imoh et al., 2026). همچنین همان‌طور که در شکل ۲۴ مشخص است، همبستگی بین ITS آزمایشگاهی و ITS پیش‌بینی‌شده

جدول ۱. مقایسه‌ی مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده با روش اجزای محدود (FEM) در درصد‌های مختلف SBA، همراه با خطای مطلق و خطای نسبی (Imoh et al., 2026)

SBA (%)	Experimental ITS (MPa)	FEM ITS (MPa)	Absolute Error (MPa)	Relative Error (%)
0	0.95	0.93	0.02	2.1
2	0.98	1.00	0.02	2.0
4	1.02	1.00	0.02	2.0
6	1.08	1.05	0.03	2.8
8	1.12	1.10	0.02	1.8
10	1.07	1.10	0.03	2.8
12	1.00	0.97	0.03	3.0
14	0.92	0.90	0.02	2.2
16	0.88	0.86	0.02	2.3

عربی هستند. هسته خرما به طور متوسط حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از وزن کل میوه را تشکیل می‌دهد؛ بنابراین، تخمین زده می‌شود که سالانه بین ۹۵۰ هزار تا ۱٫۴ میلیون تن ضایعات هسته خرما در سطح جهان تولید شود. این حجم چشمگیر از پسماندهای آلی در صورت عدم مدیریت صحیح می‌تواند به چالش‌های زیست‌محیطی منجر شود. با این حال، استفاده از هسته خرما در کاربردهای مهندسی، به‌ویژه به‌عنوان فیلر در مخلوط‌های آسفالتی، فرصتی مناسب برای بازیافت ضایعات و ارتقاء پایداری در صنعت راه‌سازی فراهم می‌آورد (Tahami et al., 2018).

در میان فیلهای ضایعاتی کشاورزی، خاکستر پوسته برنج (RHA) به دلیل دارا بودن مقدار بالای سیلیس آمورف و خاصیت پوزولانی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. استفاده از RHA در مخلوط‌های آسفالتی باعث افزایش مدول سختی، بهبود مقاومت در برابر رطوبت و ارتقای دوام خستگی می‌شود. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که جایگزینی فیلر معدنی با RHA در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ درصد می‌تواند منجر به افزایش ۲۰ تا ۳۰ درصدی مقاومت مارشال و بهبود قابل توجه در شاخص TSR گردد (Tahami et al., 2018). این نتایج نشان می‌دهد که RHA علاوه بر کمک به مدیریت پسماند کشاورزی،



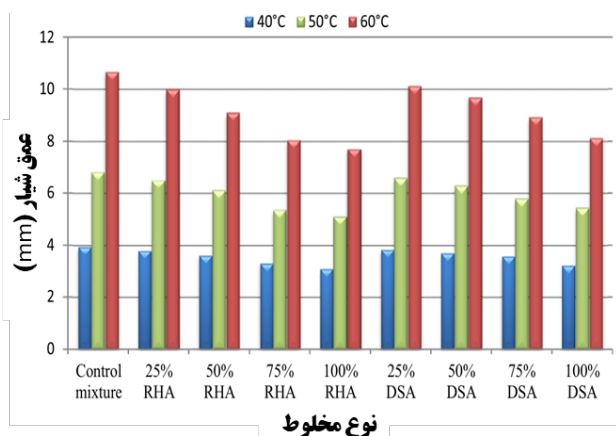
شکل ۲۴. همبستگی بین مقادیر ITS به‌دست‌آمده از آزمایش و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط روش اجزای محدود برای آسفالت داغ اصلاح‌شده با SBA (Imoh et al., 2026)

۳-۷- خاکستر هسته خرما و خاکستر سبوس برنج (DSA و

RHA)

بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) در سال ۲۰۲۳، تولید جهانی خرما به بیش از ۹٫۵ میلیون تن در سال رسیده است. کشورهای اصلی تولیدکننده خرما شامل مصر، ایران، عربستان سعودی، الجزایر، عراق، پاکستان و امارات متحده

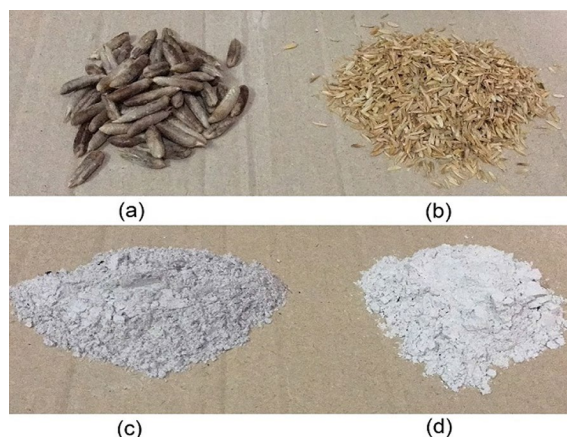
می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت به دما در قیر تحت تأثیر فیلرهای DSA و RHA کاهش یافته است و مخلوط‌های آسفالت حاوی فیلرهای DSA و RHA عملکرد بهتری در دماهای بالا نشان می‌دهند، به این معنی که مخلوط‌های RHA و DSA برای اقلیم‌های گرم مناسب‌تر هستند (Tahami et al., 2018). همچنین نتایج نشان داد که در میان همه مخلوط‌های آسفالتی، جایگزینی فیلر طبیعی با ۱۰۰٪ RHA بالاترین مقاومت را در برابر تغییر شکل دائمی نشان داد. علاوه بر این، مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی با ۷۵٪ RHA تقریباً مشابه مخلوط‌های حاوی ۱۰۰٪ RHA بود. همچنین، مقاومت در برابر شیار مخلوط‌های آسفالتی DSA با افزایش درصد DSA در سه دمای آزمایش بهبود یافت. در شکل ۲۷ عمق شیار مخلوط‌های مختلف نشان داده شده است (Tahami et al., 2018).



شکل ۲۷. عمق شیار مخلوط‌های آسفالتی در سه دمای مختلف (Tahami et al., 2018)

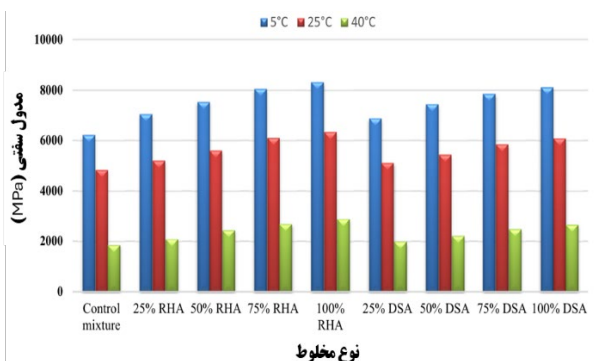
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۲۸، در صورت استفاده از فیلر RHA، جایگزینی فیلر معمولی با ۷۵٪ RHA منجر به بهترین عملکرد خستگی می‌شود. همچنین، طول عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با افزایش محتوای DSA بهبود یافت و جایگزینی کامل فیلر معمولی با DSA بالاترین مقاومت در برابر خستگی را در میان تمام مخلوط‌ها نشان داد. تفاوت بین تأثیرات DSA و RHA بر عملکرد خستگی ممکن است به دلیل سفتی این مخلوط‌ها باشد، زیرا مخلوط‌های حاوی RHA مدول سفتی بالاتری نسبت به مخلوط‌های DSA دارند. بنابراین، مدول سفتی بالاتر ممکن است باعث شود مخلوط RHA نسبتاً شکننده‌تر باشد (Moghaddam et al., 2015).

گزینه‌ای کارآمد و پایدار برای جایگزینی فیلرهای سستی در مخلوط‌های آسفالتی محسوب می‌شود.



شکل ۲۵. مصالح زیست توده و خاکسترها. هسته‌های خرما (a)، سبوس برنج (b)، خاکستر هسته خرما (c)، خاکستر سبوس برنج (Tahami et al., 2018)(d)

شکل ۲۶ نشان می‌دهد که استفاده از فیلرهای RHA و DSA منجر به افزایش مدول سفتی مخلوط‌های آسفالتی شده است. دماهای آزمایشی نشان داد که بهترین جایگزینی برای افزایش مدول سفتی، جایگزینی فیلر رایج با ۱۰۰٪ DSA و RHA بود (Tahami et al., 2018).



شکل ۲۶. مدول سفتی مخلوط‌ها در سه دمای مختلف (Tahami et al., 2018)

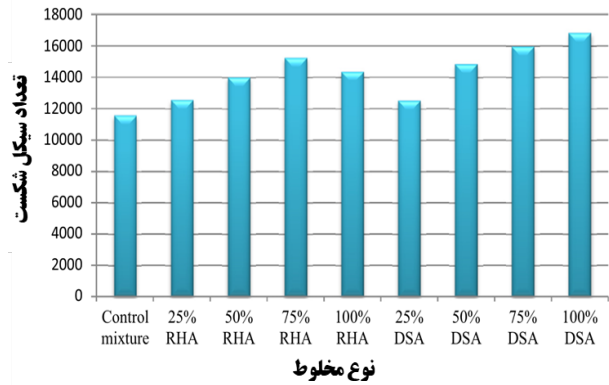
نتایج نشان داد که با افزایش دما، تفاوت بین مقادیر مدول سفتی مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی DSA یا RHA بیشتر شد. به‌عنوان مثال، مخلوط حاوی ۱۰۰٪ DSA در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد دارای مدول سفتی ۲۸٪ بیشتر از مخلوط کنترل بود، در حالی که در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، سفتی مخلوط DSA به میزان ۴۴٪ بیشتر از مخلوط کنترل بود (Tahami et al., 2018).

RHA حدود ۱۹,۴۵٪ و برای DSA ۷۵٪ حدود ۵,۲۱٪ بهبود یافته است و مطابق نتایج ITS نیز افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم برای RHA ۷۵٪ و DSA ۷۵٪ به ترتیب حدود ۳۱,۲۶٪ و ۱۸,۵۱٪ گزارش شده است؛ بنابراین، همان‌طور که در شکل‌های مربوط به ITS قابل مشاهده است، RHA در این مطالعه عملکرد کششی-رطوبتی قوی‌تری نسبت به DSA نشان می‌دهد، هرچند نویسنده‌گان تأکید کرده‌اند که بهبود ITS را نباید مستقیماً معادل بهبود خستگی دانست، زیرا خستگی در این پژوهش به صورت مستقیم مورد آزمایش قرار نگرفته است.

نکته‌ی کلیدی و همسو با رویکرد عدم قطعیت و وابستگی به منبع آن است که (Aziz et al., 2026) صراحتاً اختلاف شدت بهبود DSA نسبت به برخی مطالعات پیشین را به تفاوت در کانی‌شناسی سنگدانه و شرایط کلسینه‌کردن/ریزدانگی خاکستر نسبت می‌دهند و نتیجه می‌گیرند عملکرد DSA به منبع ماده و سیستم مخلوط بسیار حساس است؛ این تفسیر، دلیل مشاهده‌ی بازه بهینه و غیرقابل تعمیم بودن برخی اعداد به همه پروژه‌ها را تقویت می‌کند.

از منظر شیارشدگی نیز (Aziz et al., 2026) با آزمون Wheel Tracking نشان داده‌اند که مخلوط ۷۵٪ RHA عمق شیار را حدود ۴۱,۴۲٪ نسبت به شاهد کاهش داده، در حالی که ۷۵٪ DSA برخلاف شاخص‌های مارشالی مناسب، باعث افزایش عمق شیار به میزان حدود ۱۷,۱۶٪ شده است؛ بنابراین، همان‌طور که از نتایج WTT قابل استنتاج است، DSA می‌تواند از نظر پایداری و MQ مطلوب باشد اما در پروژه‌های حساس به شیارشدگی (ترافیک سنگین/دماهای بالا) نیازمند احتیاط و کنترل درصد/طرح اختلاط است (Aziz et al., 2026).

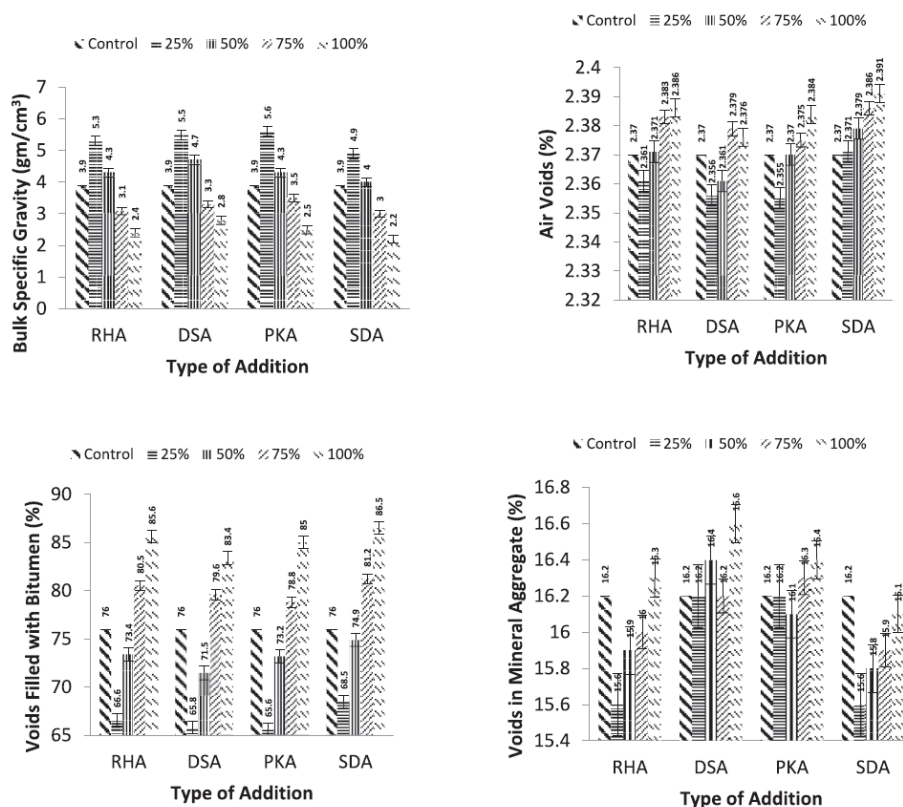
در نهایت، (Aziz et al., 2026) با تحلیل چرخه‌عمر نشان داده‌اند که RHA ۷۵٪ علاوه بر بهبود مکانیکی-عملکردی، اثرات زیست‌محیطی کل را نیز حدود ۷,۷۶٪ کاهش می‌دهد و برخی شاخص‌های میانی مانند پتانسیل تغییر اقلیم و تشکیل ذرات معلق نیز کاهش داشته‌اند؛ بنابراین، همان‌طور که در نتایج LCA مشاهده می‌شود، RHA در این مطالعه یک گزینه‌ی متوازن‌تر از منظر عملکرد-محیط‌زیست ارائه می‌کند (Aziz et al., 2026).



شکل ۲۸. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی (Tahami et al., 2018)

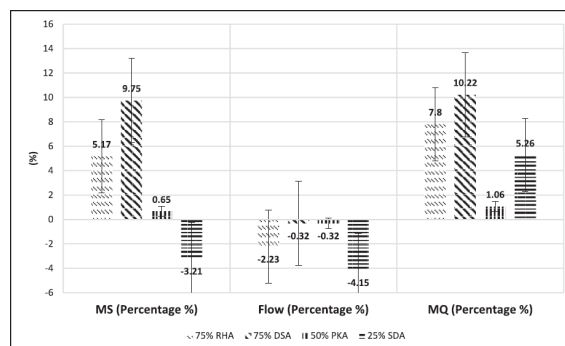
در مطالعات جدیدتر، (Aziz et al., 2026) همین خانواده‌ی خاکسترهای طبیعی را در یک چهارچوب ارزیابی چند شاخصه بررسی کرده‌اند و علاوه بر RHA و DSA، دو خاکستر دیگر خاکستر هسته پالم و خاکستر خاک اره (PKA و SDA) را نیز وارد مقایسه کرده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲۹ قابل مشاهده است، نتایج مارشال همراه با پارامترهای حجمی برای سطوح جایگزینی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ ارائه شده و در میان گزینه‌ها، کمترین مقدار AV٪ مربوط به ۷۵٪ RHA بوده که حدود ۲۰,۵۱٪ کمتر از مخلوط شاهد گزارش شده است؛ هم‌زمان، برای ۷۵٪ RHA مقدار VFB حدود ۵,۹۲٪ افزایش و VMA حدود ۱,۲۳٪ کاهش داشته که به‌عنوان نشانه‌ی بهبود ساختار داخلی و پرشدگی بهتر حفرات قابل تفسیر است.

از منظر شاخص‌های مارشالی نیز مطابق شکل ۳۰، بیشترین افزایش MS مربوط به ۷۵٪ DSA بوده که حدود ۹,۷۵٪ بالاتر از شاهد گزارش شده است و ۷۵٪ RHA نیز MS را حدود ۵,۱۷٪ افزایش داده است؛ همچنین MQ برای ۷۵٪ RHA و ۷۵٪ DSA به ترتیب تا حدود ۷,۸۰٪ و ۱۰,۲۲٪ افزایش یافته که بیانگر افزایش سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل است، درحالی‌که مقادیر Flow برای همه‌ی مخلوط‌های اصلاح‌شده همچنان در محدوده‌ی قابل قبول ترافیک سنگین باقی مانده‌اند (Aziz et al., 2026). در ارزیابی جاساسیت رطوبتی، (Aziz et al., 2026) گزارش کرده‌اند که RMS برای ۷۵٪



شکل ۲۹. پارامترهای حجمی مارشال برای هر درصد افزودنی به صورت جداگانه (Aziz et al., 2026)

افت تراکم‌پذیری یا تغییر نامطلوب ساختار داخلی تعبیر شود؛ در مقابل، برای ۵۰٪ PKA کمترین Gmm گزارش شده و تغییرات VMA و VFB نیز نشان می‌دهد که برای SDA و PKA (در درصدهای منتخب) ساختار حجمی به پایداری و پرشدگی مطلوب RHA نزدیک نمی‌شود (Aziz et al., 2026). در ارزیابی مارشال نیز مطابق شکل ۳۰ اگرچه برخی بهبودهای محدود برای PKA و SDA مشاهده شده، اما این دو ماده در مقایسه با ۷۵٪ RHA و ۷۵٪ DSA عملکرد یکنواخت و قوی‌تری ارائه نکرده‌اند و مقاله نتیجه می‌گیرد که گزینه‌های منتخب بهینه برای بهبود پارامترهای مارشال به ترتیب ۷۵٪ RHA، ۷۵٪ DSA، ۵۰٪ PKA و ۲۵٪ SDA هستند، با این تفاوت که شدت بهبودهای PKA و SDA نسبت به دو گزینه‌ی اصلی کمتر است (Aziz et al., 2026).

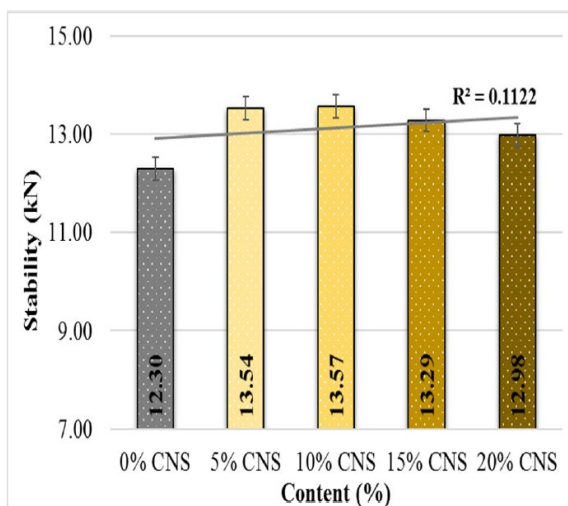


شکل ۳۰. درصد تغییرات خواص مکانیکی نسبت به مخلوط شاهد (Aziz et al., 2026)

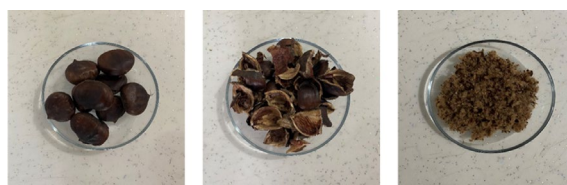
در کنار RHA و DSA (Aziz et al., 2026) دو خاکستر ضایعاتی دیگر یعنی PKA و SDA را نیز به‌عنوان جایگزین فیلر معدنی بررسی کرده‌اند و همان‌طور که از شکل ۲۹ قابل مشاهده است، اثر این دو فیلر بر پارامترهای حجمی و شاخص‌های مارشال نسبت به RHA/DSA کم‌دامنه‌تر بوده است. مطابق نتایج شکل ۲۹، بیشترین AV در میان درصدهای منتخب مربوط به ۲۵٪ SDA بوده که حدود ۲۵،۶۴٪ نسبت به شاهد افزایش یافته و این افزایش AV می‌تواند به‌عنوان نشانه‌ای از

۳-۸- پوسته‌ی شاه‌بلوط آسیاب‌شده (CNS)

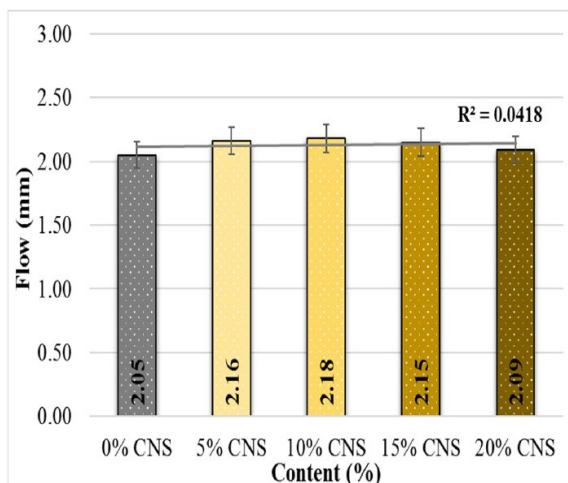
از پوسته‌ی شاه‌بلوط آسیاب‌شده به‌عنوان یک ضایعات زیست‌توده‌ای برای جایگزینی جزئی فیلر در مخلوط آسفالتی داغ استفاده شده و سطوح جایگزینی ۰/۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ نسبت به مخلوط شاهد (۰٪ CNS) بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۳۱ مشخص است، ماده‌ی اولیه پوسته‌ی شاه‌بلوط به‌صورت ضایعات جمع‌آوری شده و پس از خشک‌کردن و آسیاب تا اندازه‌ی عبوری از ۷۵ میکرون آماده شده است، به‌طوری‌که رفتاری شبیه فیلر (نه الیاف درشت) در مخلوط دارد (İnce, 2026).



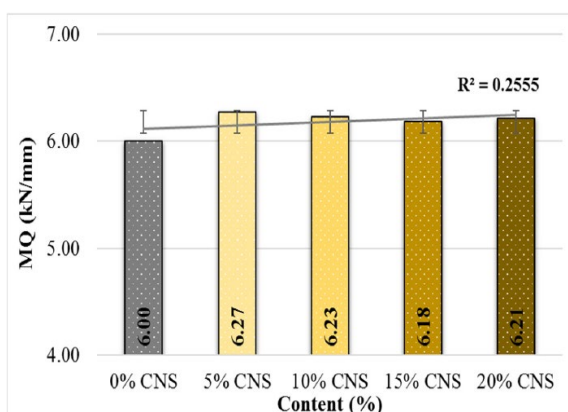
شکل ۳۲. نتایج پایداری برحسب مقدار CNS (İnce, 2026)



شکل ۳۱. پوسته شاه‌بلوط (İnce, 2026)



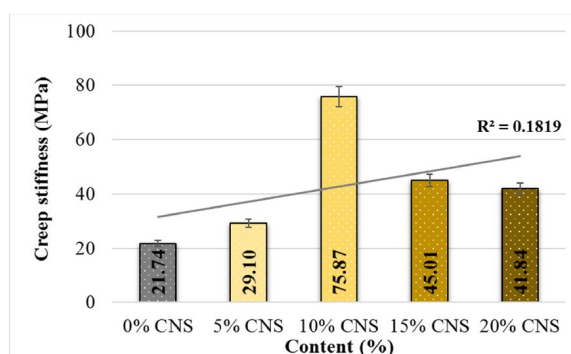
شکل ۳۳. نتایج روانی برحسب مقدار CNS (İnce, 2026)



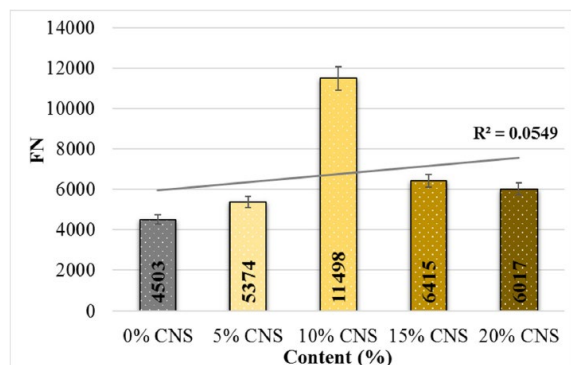
شکل ۳۴. مقادیر ضریب مارشال (MQ) برحسب مقدار CNS (İnce, 2026)

در بخش مارشال، همان‌طور که در شکل ۳۲ قابل مشاهده است، پایداری مارشال با افزودن CNS به‌طور کلی نسبت به شاهد افزایش یافته و بیشترین بهبود در سطح جایگزینی ۱۰٪ گزارش شده است؛ به‌طور کمی، مقاله بیان می‌کند که نسبت به شاهد، افزایش پایداری در سطوح مختلف رخ داده و مقدار بیشینه مربوط به ۱۰٪ CNS بوده است (İnce, 2026). در شکل ۳۳، تغییرات اندکی نشان می‌دهد و این رفتار به این معنا تفسیر می‌شود که افزودن CNS عمدتاً سختی/مقاومت را افزایش داده بدون آنکه تغییر شکل‌پذیری پلاستیک را به‌طور شدید دگرگون کند (İnce, 2026). از منظر MQ نیز، همان‌طور که در شکل ۳۴ مشخص است، MQ با افزودن CNS افزایش داشته و این افزایش به‌عنوان بهبود مقاومت در برابر تنش‌های برشی و تغییر شکل دائمی تفسیر شده است (İnce, 2026). در ارزیابی دوام رطوبتی، همان‌طور که در شکل ۳۵ قابل مشاهده است، در صد RMS با افزودن CNS روند افزایشی دارد و مقاله نتیجه می‌گیرد که این ماده می‌تواند مقاومت در برابر خرابی ناشی از رطوبت را تقویت کند؛ در این میان، سطح ۱۰٪ CNS به‌عنوان سطحی که بیشترین بهبود RMS را ارائه می‌دهد گزارش شده است (İnce, 2026).

برای تحلیل شیارشدگی و رفتار خزشی، نتایج خزش دینامیکی و شاخص FN گزارش شده است. همان‌طور که در شکل ۳۸ دیده می‌شود، سختی خزشی با افزودن CNS افزایش پیدا می‌کند و مقاله بیان می‌کند که بالاترین سختی خزشی مربوط به ۱۰٪ CNS است (İnce, 2026). علاوه بر این، همان‌طور که در شکل ۳۹ قابل مشاهده است، مقدار FN برای شاهد حدود ۴۵۰۳ گزارش شده و با افزودن CNS افزایش می‌یابد، به‌طوری که برای ۱۰٪ CNS مقدار FN حدود ۱۱۴۹۸ گزارش شده است؛ این جهش به‌عنوان افزایش چشمگیر مقاومت در برابر شیارشدگی تحت بارگذاری تکراری تفسیر شده است.

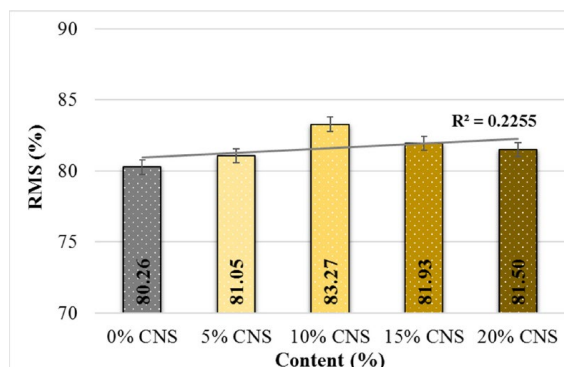


شکل ۳۸. تغییرات مقادیر سختی خزش بر حسب مقدار CNS (İnce, 2026)



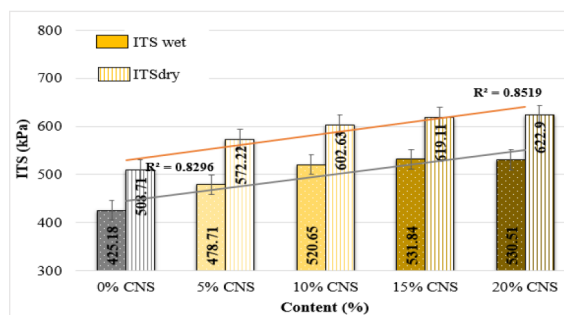
شکل ۳۹. مقادیر FN برای نمونه‌ها (İnce, 2026)

(İnce, 2026) در ارزیابی خستگی نیز، همان‌طور که از شکل ۴۰ قابل مشاهده است، نمونه‌ی شاهد با کمترین تعداد سیکل بارگذاری دچار شکست شده و نمونه‌های دارای CNS، به‌ویژه ۱۰٪، تعداد سیکل بیشتری تا شکست نیاز داشته‌اند که نشان‌دهنده‌ی بهبود عمر خستگی است (İnce, 2026). مقاله همچنین اشاره می‌کند که بهبودهای خستگی و شیارشدگی می‌تواند به ماهیت لیگنوسولوزی و شبکه‌ی فیبری CNS مرتبط باشد که موجب توزیع تنش بهتر و تأخیر در شروع/گسترش ترک می‌شود (İnce, 2026).

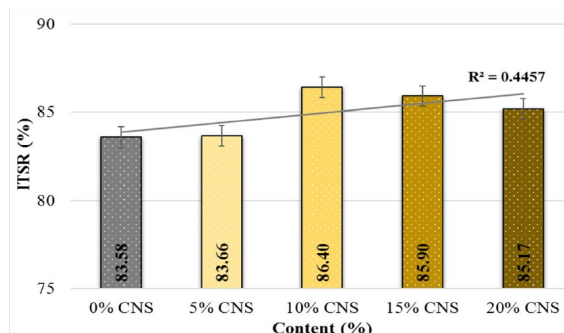


شکل ۳۵. مقادیر درصد پایداری مارشال باقیمانده (RMS) بر حسب مقدار CNS (İnce, 2026)

برای سنجش مقاومت کششی و حساسیت رطوبتی، ITS و ITSr ارائه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۳۶ قابل مشاهده است، ITS در هر دو حالت خشک و شرطی شده افزایش پیدا کرده و مقاله این موضوع را به بهبود چسبندگی و قفل‌ویست مکانیکی بهتر در ماستیک نسبت می‌دهد (İnce, 2026). همچنین همان‌طور که در شکل ۳۷ مشخص است، ITSr با افزایش CNS (تا حد مشخص) افزایش یافته و با توجه به معیار رایج بالاتر از ۸۰٪، مقاله نتیجه می‌گیرد که عملکرد رطوبتی مخلوط‌های اصلاح‌شده قابل قبول بوده و سطح ۱۰٪ از نظر حساسیت رطوبتی نتیجه‌ی مطلوب‌تری ارائه می‌دهد (İnce, 2026).

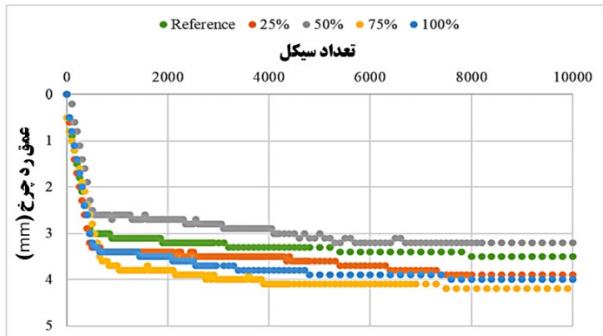


شکل ۳۶. مقادیر ITS (İnce, 2026)



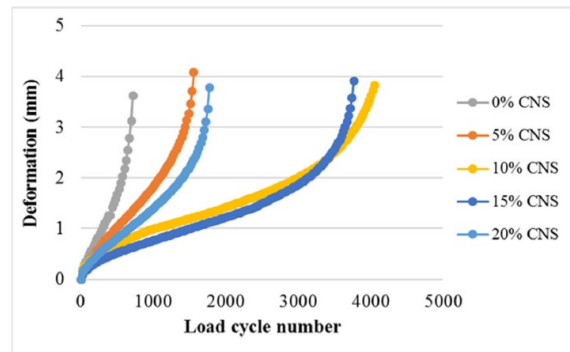
شکل ۳۷. مقادیر ITSr برای نمونه‌ها (İnce, 2026)

نمونه به دست آمد. بیشترین مقادیر اندازه گیری شده به عنوان ۴,۲ میلی متر در نمونه های با جایگزینی ۷۵٪ WQS ثبت شده است. در نتیجه، تمام نمونه ها حداکثر حد مشخصات یعنی ۱۲,۵ میلی متر را تضمین می کنند. (Tacıroğlu et al., 2022).



شکل ۴۲. نتایج عمق رد چرخ نمونه ها
(Tacıroğlu et al., 2022)

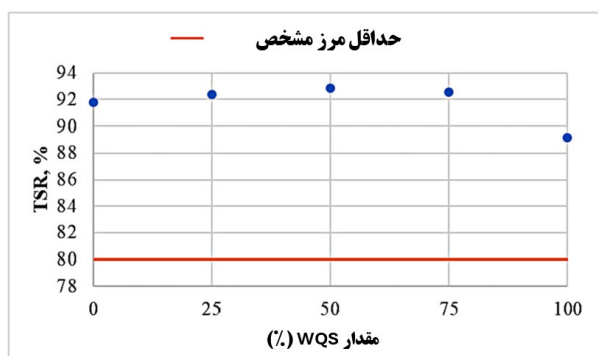
۳-۹- خاکستر برگ بامبو (BLA) و پودر سرباره فولاد (SSP) به عنوان یک فیلر زیست محیطی از سوزاندن برگ بامبو به دست می آید و غنی از ترکیبات سلولزی و کربنی است. مطالعات نشان داده اند که BLA می تواند تا حدودی مقاومت خستگی مخلوط را افزایش دهد اما عملکرد آن در برابر رطوبت ضعیف تر از فیلرهای معدنی است (Ismanti & Yasufuku, 2017). در مقابل، SSP حاصل فرآوری سرباره فولاد بوده و به دلیل دارا بودن اکسید کلسیم و منیزیم، موجب افزایش چسبندگی قیر-سنگدانه و بهبود مقاومت در برابر رطوبت و شیارشدگی می شود. ترکیب BLA و SSP می تواند یک گزینه پایدار و اقتصادی در طراحی روسازی های نوین باشد (Osuolale et al., 2023). مقدار بالاتر پایداری مارشال باقی مانده (RMS) نشان دهنده مخلوطی است که مقاومت بیشتری در برابر رطوبت دارد. شکل ۴۳ مقادیر RMS را برای هر ترکیب نشان می دهد. تمام مخلوطها حداقل الزامات ۸۰٪ RMS مشخص شده در ASTM D6927-6 را برآورده کردند. فیلرهایی با درصد بالای ترکیبات نامحلول کلسیم دار مقاومت بیشتری در برابر رطوبت نشان دادند. وجود کلسیم در ترکیب پودر سرباره فولاد SSP (۹۴,۵۴٪) باعث ارائه بالاترین مقادیر RMS شد که چسبندگی قیر به فیلر را بهبود می بخشد (Huang et al., 2007). مشابه با SSP، مخلوطهای خاکستر برگ بامبو BLA (۹۲,۰۱٪) مقاومت کمتری در برابر رطوبت نشان دادند زیرا ترکیبات فیلر آن ها کلسیم کمتری نسبت



شکل ۴۰. منحنی های تعداد سیکل بارگذاری-تغییر شکل برای نمونه ها

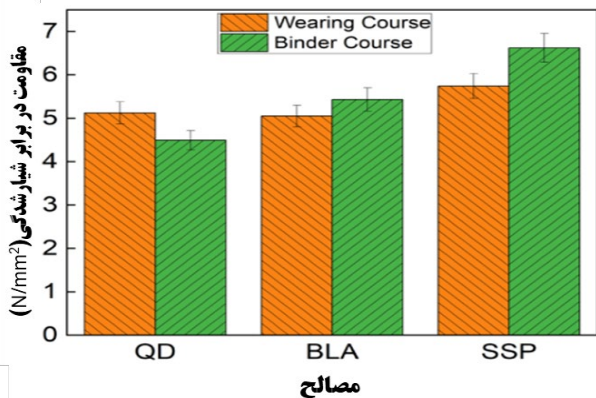
۳-۱۰- ماسه کوارتز ضایعاتی (WQS)

ماسه کوارتز ضایعاتی یکی دیگر از ضایعات است که به عنوان محصول جانبی فرآیندهای صنعتی تولید می شود. ماسه کوارتز به طور کلی در صنایع شیشه و ریخته گری استفاده می شود (Tacıroğlu et al., 2022). مقادیر TSR در شکل ۴۱ نشان داده شده است همان طور که در شکل ۴۱ مشاهده می شود، تمام مقادیر TSR بالاتر از حداقل مقدار مشخصات هستند، به این معنی که تمام نمونه ها قابل قبول بوده و با مشخصات مورد نیاز مطابقت دارند. بالاترین مقدار TSR در مخلوط حاوی ۵۰٪ WQS به دست آمده است. (Tacıroğlu et al., 2022).



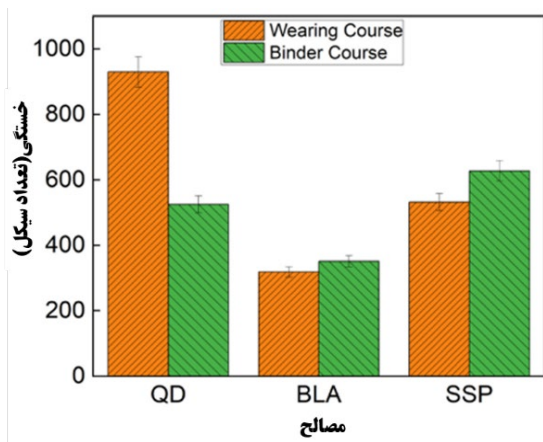
شکل ۴۱. نسبت های مقاومت کششی براساس مقدار WQS
(Tacıroğlu et al., 2022)

همان طور که در شکل ۴۲ مشاهده می شود، کمترین عمق شیار چرخ در نمونه هایی با جایگزینی ۵۰٪ WQS رخ داده است. نتایج آزمون رد چرخ هامبورگ با مقادیر TSR سازگار است. بر اساس نتایج TSR، نمونه با حساسیت رطوبتی کمتر، نمونه ای با جایگزینی ۵۰٪ WQS بود. بهترین عملکرد شیارشدگی نیز با همین



شکل ۴۴. تأثیر فیلرهای خاکستر برگ بامبو (BLA) و پودر سرباره فولاد (SSP) بر مقاومت شیارشدگی (Osuolale et al., 2023)

خاصیت چسبندگی قیر نقش مهمی در عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ایفا می‌کند (Li et al., 2017). QD در مخلوط BC استحکام بالاتری در برابر خستگی نشان داد و در مقایسه با BLA، که کمترین مقدار را داشت، ۶۵٫۸٪ افزایش داشت، درحالی‌که SSP بهترین عملکرد را هنگام ترکیب در مخلوط WC در مقایسه با BLA با ۴۴٪ افزایش داشت، همان‌طور که در شکل ۴۵ نشان داده شده است. BLA در واقع تأثیر چندانی بر خاصیت سفتی در هر دو مخلوط نداشت، بنابراین سایر فیلرها اگر استفاده شوند، در چرخه‌های بارگذاری مکرر عملکرد بهتری خواهند داشت. مطالعات قبلی (Li et al., 2017) نشان می‌دهند که SSP می‌تواند به‌عنوان فیلر در مخلوط‌های بتن آسفالتی استفاده شود زیرا حاوی اجزای قلیایی است که به‌طور مناسبی با اسید موجود در قیر پیوند می‌خورند و سفتی مخلوط را برای ایجاد یک مخلوط پایدار که قادر به مقاومت در برابر تغییر شکل است، فراهم می‌کند (شکل ۴۴).

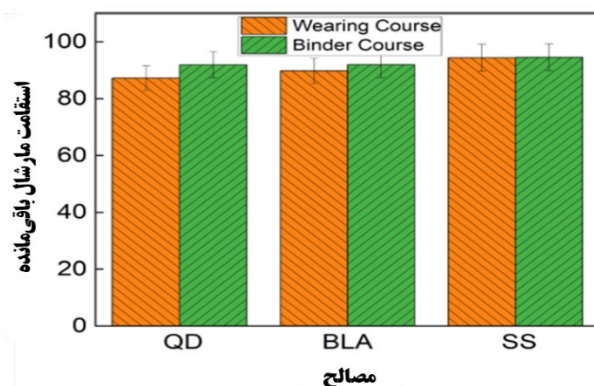


شکل ۴۵. تأثیر فیلرهای خاکستر برگ بامبو (BLA) و پودر سرباره فولاد (SSP) بر خستگی (Osuolale et al., 2023)

به SSP داشتند. کمترین مقدار پایداری مارشال حفظ‌شده RMS در مخلوط QD (۹۱٫۹٪) یافت شد زیرا حاوی مقدار زیادی سیلیس و کلسیم نسبتاً کمی است. طبق گفته (Choudhary et al., 2020b)، مشخص شده است که برخی از فیلرها هنگام حضور کلسیت $[CaCO_3]$ و دولومیت $[CaMg(CO_3)_2]$ بهتر به قیر می‌چسبند و در برابر آب مقاومت ایجاد می‌کنند.

هرچه مقدار ضریب مارشال برای یک مخلوط آسفالتی بیشتر باشد، مقاومت ماده در برابر بارهای برشی، تغییر شکل دائمی، و در نتیجه شیارشدگی بیشتر است (Gao et al., 2018; Mistry & Roy, 2021). همان‌طور که در شکل ۴۴ مشاهده می‌شود؛ تأثیر همه فیلرهای مختلف بر MQ نشان داده شده است. مشاهده شد که تمام فیلرها در محدوده مجاز مشخصات هستند و این روند با مطالعات قبلی همخوانی دارد (Gao et al., 2018; Mistry & Roy, 2021). لایه رویه نشان می‌دهد که SSP با MQ بالاترین مقدار (۵٫۷۴ کیلونیوتن بر میلی‌متر) را در مقایسه با BLA (۵٫۱۲ کیلونیوتن بر میلی‌متر) و QD (۵٫۰۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر) دارد.

به‌طور مشابه، MQ لایه میانی نشان می‌دهد که SSP (۶٫۶۲ کیلونیوتن بر میلی‌متر) بالاترین مقاومت در برابر شیارشدگی را دارد و پس از آن QD (۵٫۴۳ کیلونیوتن بر میلی‌متر) و BLA (۴٫۴۹ کیلونیوتن بر میلی‌متر) قرار دارند. از سوی دیگر، SSP در مقایسه با مخلوط کنترل (QD) با ۲۱٫۹۲٪ افزایش یافته است. تحقیقات اخیر نیز نشان می‌دهد که فیلر با ذرات ریز، مخلوط‌هایی با سختی بالا ایجاد می‌کند (Choudhary et al., 2020b; Melotti et al., 2013; Modarres et al., 2015).



شکل ۴۳. تأثیر فیلرهای خاکستر برگ بامبو (BLA) و پودر سرباره فولاد (SSP) بر حساسیت رطوبتی (Osuolale et al., 2023)

۱۱-۳- خاکستر بلال ذرت (CCA)

خاکستر بلال ذرت یک فیلر ضایعاتی با منشأ زیست توده‌ای است که از پسماندهای کشاورزی تولید می‌شود و پس از فرآوری به شکل ریزدانه، قابلیت جایگزینی بخشی از فیلر معدنی متداول در HMA را دارد. این ماده از منظر توسعه پایدار واجد اهمیت است، زیرا ضمن مدیریت پسماند کشاورزی، می‌تواند مصرف فیلر طبیعی را کاهش دهد. با توجه به ماهیت خاکسترها (سطح ویژه و تخلخل بالقوه بالاتر)، انتظار می‌رود CCA بر قیر بهینه و شاخص‌های حجمی اثرگذار باشد و لذا وجود سطح بهینه مصرف از دیدگاه مهندسی قابل انتظار است (Asebiomo et al., 2025).



شکل ۴۶. ذرت فرآوری نشده در حالت خام خودش

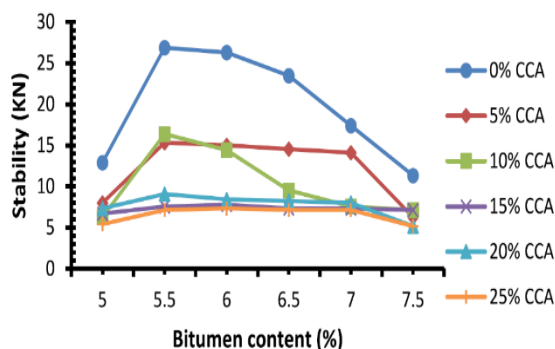
(Asebiomo et al., 2025)



شکل ۴۷. خاکستر ذرت فرآوری شده

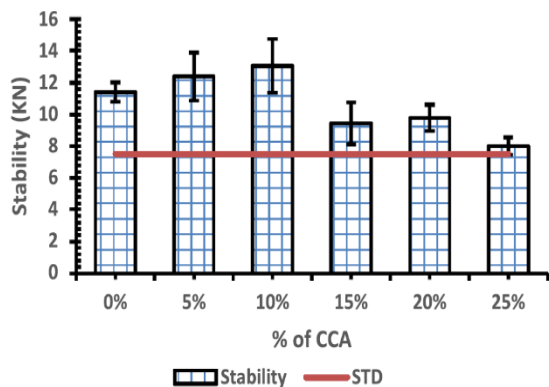
(Asebiomo et al., 2025)

مطابق شکل ۴۸ که پایداری مارشال بر حسب درصد قیر را نشان می‌دهد، تعیین قیر بهینه از طریق منحنی استقامت قابل استخراج است: افزایش استقامت تا نقطه اوج و سپس افت، بیانگر آن است که افزایش قیر تا سطحی مشخص به بهبود پیوستگی و پرشدگی منافذ می‌انجامد، اما پس از آن اثر روان‌کننده و کاهش اصطکاک داخلی می‌تواند پایداری را کاهش دهد. نقش CCA در این میان، تغییر ویسکوزیته ماستیک و نسبت قیر مؤثر به ریزدانه‌هاست؛ بنابراین جابه‌جایی نقطه ماکسیمم استقامت، حاکی از اثر فیلر بر ساختار داخلی مخلوط است. مطابق شکل‌های ۴۹ و ۵۰ جمع‌بندی به این صورت شکل می‌گیرد که پژوهش ۱۵٪ CCA را به‌عنوان سطح بهینه گزارش کرده و مقادیر $OBC = 6.3\%$. پایداری ۱۴,۴ کیلونیوتن و عدد روانی ۳,۸ میلی‌متر را همراه با شاخص‌های حجمی مناسب اعلام می‌کند. تفسیر این نتایج آن است که در سطح بهینه، اثر پرکنندگی و بهبود ویسکوزیته ماستیک غالب است، در حالی که در درصدهای بالاتر، احتمال افزایش جذب قیر و برهم خوردن تعادل حجمی، روند بهبود را محدود می‌کند (Asebiomo et al., 2025).



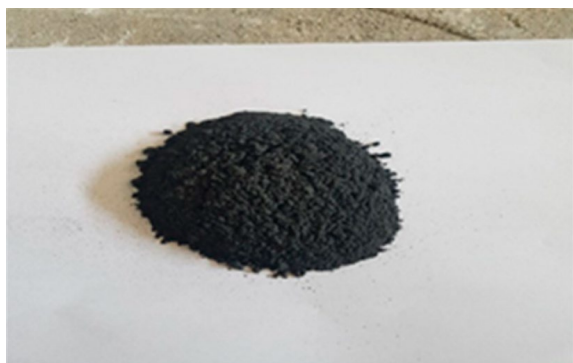
شکل ۴۸. ارتباط بین استقامت و درصد قیر در درصدهای مختلف

فیلر CCA (Asebiomo et al., 2025)



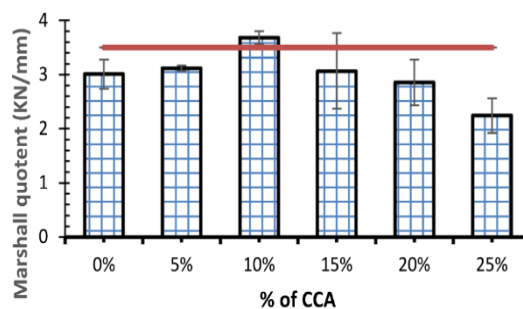
شکل ۴۹. استقامت مارشال در درصد قیر بهینه برای درصدهای مختلف

مختلف CCA (Asebiomo et al., 2025)



شکل ۵۲. پوسته‌های گردو بعد از سوزاندن

(Kadhim et al., 2025)

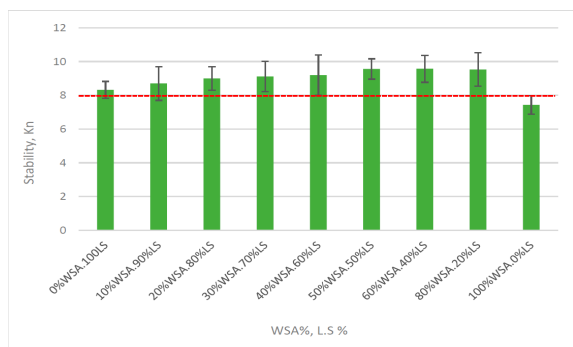


■ MARSHAL QUOTIENT (KN/mm) — STD

شکل ۵۰. نسبت مارشال در درصد قیر بهینه برای درصدهای

مختلف CCA (Asebiomo et al., 2025)

مطابق شکل ۵۳ که استقامت مارشال را بر حسب درصد جایگزینی WSA نشان می‌دهد، وجود نقطه بهینه به صورت روشن قابل استخراج است: افزایش درصد WSA تا سطح مشخصی موجب افزایش پایداری می‌شود، اما پس از آن افت مشاهده می‌گردد. تحلیل علمی این روند آن است که در درصدهای میانی، افزایش ویسکوزیته ماستیک و بهبود قفل‌وبست ریزدانه‌ها عامل غالب است، در حالی که در درصدهای بسیار بالا، افزایش جذب قیر و کاهش قیر مؤثر و نیز تغییرات نامطلوب در ساختار حجمی، مخلوط را از وضعیت بهینه خارج می‌کند. برای تبیین مکانیزمی این پیک، در شکل ۵۴ (Air voids) و شکل ۵۵ (VMA) نشان داده می‌شود که وضعیت حجمی در حوالی درصد بهینه در محدوده مناسب قرار دارد و در درصدهای بالاتر از بهینه، تغییرات VMA می‌تواند مسیر آسیب‌پذیری را تغییر دهد؛ به طور مشخص، تخلخل نامناسب می‌تواند نفوذپذیری و حساسیت رطوبتی را تشدید کند و VMA نامتوازن نیز بر پایداری ماستیک و دوام اثرگذار است. جمع‌بندی نتایج شکل‌ها با نتیجه‌گیری مقاله همسو است: درصد بهینه حدود ۶۰٪ گزارش شده و جایگزینی کامل، رفتاری نامطلوب ایجاد می‌کند (Kadhim et al., 2025).



شکل ۵۳. استقامت مارشال در برابر درصدهای مختلف فیله

(Kadhim et al., 2025)



شکل ۵۱. پوسته‌های گردو قبل از سوزاندن

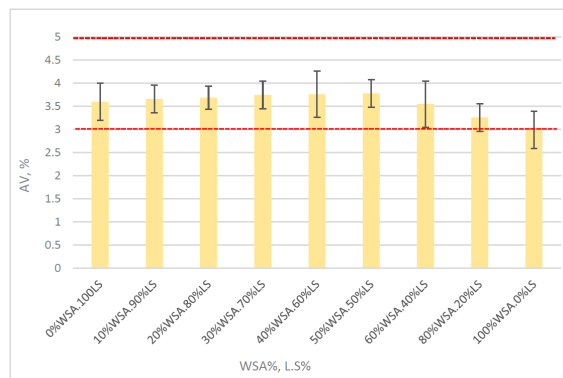
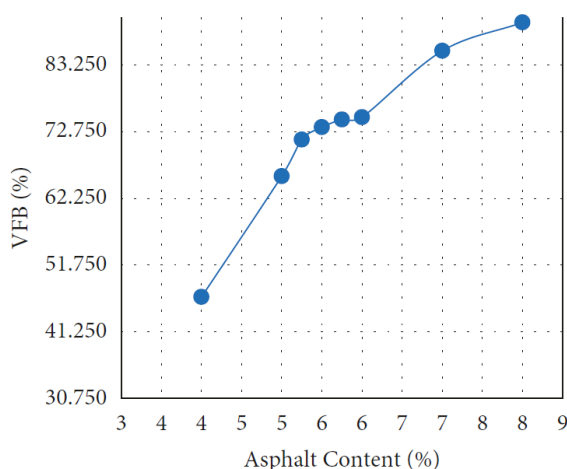
(Kadhim et al., 2025)

۳-۱۲- خاکستر پوست گردو (WSA)

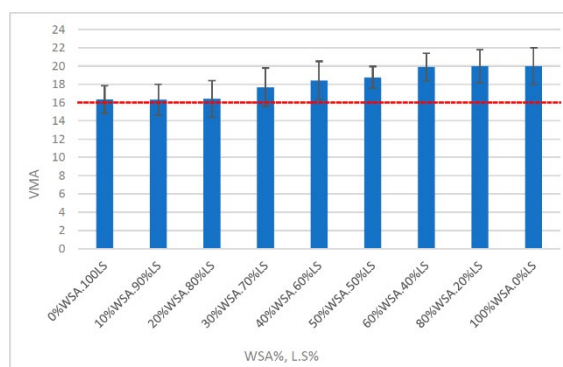
خاکستر پوست گردو یک فیله ضایعاتی زیست‌توده‌ای است که از پسماند کشاورزی حاصل می‌شود و پس از تبدیل به خاکستر و آماده‌سازی ریزدانه، قابلیت جایگزینی با فیله آهکی را دارد. به لحاظ تعریف فنی، WSA یک ماده کاملاً پودری است و از منظر مفهومی، ابهامی در جایگاه آن به عنوان فیله وجود ندارد. با توجه به ماهیت خاکسترها، انتظار می‌رود در درصدهای میانی، اثر پرکنندگی و افزایش ویسکوزیته ماستیک به بهبود استقامت منجر شود، اما در درصدهای بالا به دلیل افزایش جذب قیر و کاهش قیر مؤثر یا اختلال در تعادل حجمی، افت عملکرد رخ دهد (Kadhim et al., 2025).

درصد، مقادیر مختلف درصد قیر ساخته شد تا شاخص‌های مارشال و پارامترهای حجمی استخراج گردد. سپس در درصد فیلر منتخب، جایگزینی فیلر مرجع با CHA در سطوح ۰.۲۵٪، ۰.۵۰٪، ۰.۷۵٪ و ۱.۰۰٪ انجام و عملکرد مخلوط بر اساس پایداری، روانی و شاخص‌های حجمی کنترل شد. همچنین برای سنجش حساسیت رطوبتی از شاخص پایداری باقیمانده مطابق چهارچوب‌های رایج استفاده گردید تا رفتار مخلوط در شرایط خشک و شرایط مرطوب مقایسه شود. مطابق شکل ۵۶ تعیین OBC بر پایه همگرایی سه معیار کلیدی صورت گرفته است: قیر متناظر با بیشینه پایداری، قیر متناظر با بیشینه چگالی و قیر متناظر با مقدار هدف فضای خالی؛ در نتیجه، شکل ۵۶ نشان می‌دهد OBC یک نقطه تعادلی است که هم‌زمان پاسخ مکانیکی و الزامات حجمی را برآورده می‌کند. بر اساس نتایج گزارش شده، مقدار OBC حدود ۰.۵۷٪ برآورد شده و در درصد فیلر ۶.۵٪، جایگزینی ۰.۷۵٪ فیلر مرجع با CHA بهترین توازن را ایجاد کرده است؛ به گونه‌ای که مقادیر پایداری مارشال ۱۶،۸۲ کیلونیوتن، روانی ۴،۹۸۳ میلی‌متر، فضای خالی هوا ۴.۳۵٪ و VFB حدود ۷۳.۷۲٪ حاصل شده است (Tessema et al., 2022).

همچنین در شکل ۵۷، روند افزایشی RS با افزایش درصد قیر به صورت روشن مشاهده می‌شود و از دیدگاه مکانیزمی می‌توان آن را به افزایش ضخامت فیلم قیری، پیوستگی بیشتر ماستیک و کاهش مسیرهای نفوذ آب نسبت داد؛ به بیان دیگر، شکل ۵۷ عملاً نشان می‌دهد بهبود مقاومت رطوبتی در این طرح، تابعی از تقویت پوشش قیری و کاهش احتمال جدشدگی در حضور آب است (Tessema et al., 2022).



شکل ۵۴. درصد فضای خالی مصالح سنگی در برابر درصدهای مختلف فیلر (Kadhim et al., 2025)



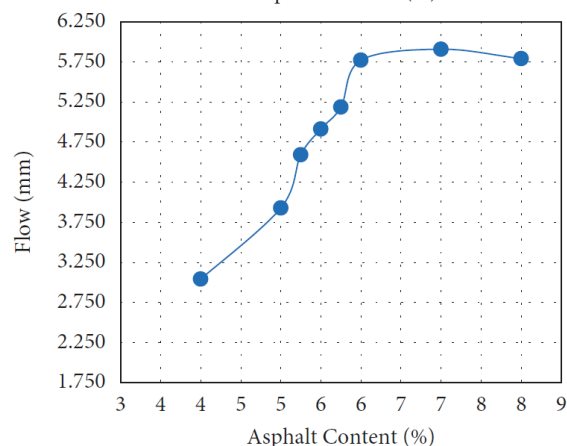
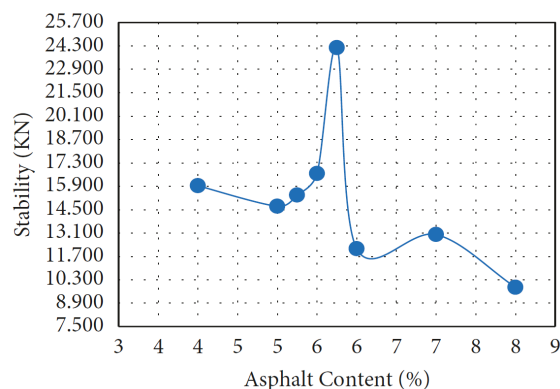
شکل ۵۵. درصد فضای خالی مصالح سنگی در برابر درصدهای مختلف فیلر (Kadhim et al., 2025)

۳-۱۳- خاکستر پوسته قهوه (CHA)

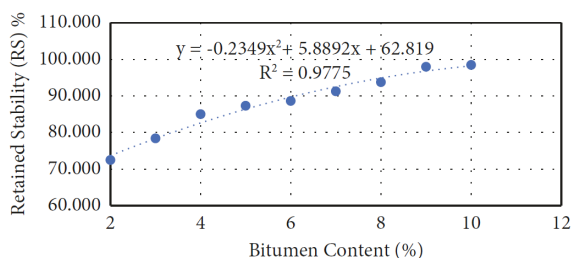
خاکستر پوسته قهوه به عنوان یک فیلر ضایعاتی با منشأ کشاورزی، از سوزاندن و فرآوری پسماند قهوه حاصل می‌شود و پس از ریزکردن، قابلیت جایگزینی با فیلرهای معدنی متداول نظیر گرسنگ را پیدا می‌کند. از منظر مهندسی روسازی، منطبق استفاده از CHA بر این فرض استوار است که ذرات ریز خاکستر می‌توانند با بهبود پرکنندگی، افزایش ویسکوزیته ماستیک و اصلاح ساختار ریزدانه‌ها، بر شاخص‌های پایداری و دوام مخلوط اثرگذار باشند. افزون بر این، به کارگیری این ماده در چهارچوب استفاده از پسماندهای کشاورزی، رویکردی هم‌راستا با اهداف کاهش مصرف منابع طبیعی و مدیریت پسماند تلقی می‌شود (Tessema et al., 2022).

در مطالعه (Tessema et al., 2022)، ارزیابی CHA مبتنی بر طراحی مارشال و استخراج درصد بهینه قیر در نرخ‌های مختلف فیلر انجام شده است. بدین منظور، ابتدا چهار درصد فیلر ۰.۵٪، ۰.۶۵٪، ۰.۷۵٪ و ۰.۸٪ (نسبت به وزن سنگدانه) بررسی و برای هر

گردآوری داده‌های تجربی گزارش شده در منابع مختلف، امکان مقایسه مستقیم عملکرد فیلرها را از جنبه‌هایی نظیر درصد بهینه مصرف، تأثیر بر شاخص‌های مکانیکی (مانند پایداری مارشال، مقاومت فشاری و کششی، مدول سختی، دوام در برابر رطوبت و ترک‌خوردگی)، و نیز اثرات آن‌ها بر ویژگی‌های حجمی و رئولوژیکی فراهم می‌کند. همچنین در این جدول نوع منشأ فیلر (زیست‌توده، صنعتی، ساختمانی و ...) مشخص شده تا ارزیابی هم‌زمان عملکرد فنی و ملاحظات زیست‌محیطی امکان‌پذیر باشد. بدین ترتیب، جدول ۲ نه تنها یک فهرست توصیفی از فیلرها، بلکه ابزاری تحلیلی برای مقایسه کمی و کیفی گزینه‌های مختلف محسوب می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به اینکه انتخاب فیلر مناسب تابع شرایط اقلیمی، نوع بارگذاری، اهداف عملکردی پروژه و محدودیت‌های اجرایی است، در جدول ۳ فیلرها بر اساس شاخص‌های اولویت‌دار پروژه دسته‌بندی شده‌اند. در این جدول تلاش شده است تا ارتباط میان شرایط بهره‌برداری (نظیر اقلیم گرم یا سرد، رطوبت بالا، نیاز به مقاومت در برابر ترک‌خوردگی یا تغییرشکل دائمی، و پروژه‌های کم‌ترافیک یا پرترافیک) و عملکرد نسبی فیلرها به صورت کاربردی تبیین شود. علاوه بر معرفی گزینه‌های پیشنهادی برای هر شرایط، فیلرهایی که در مطالعات مختلف عملکرد ضعیف‌تر یا نتایج محدودتری نشان داده‌اند نیز مشخص شده‌اند تا فرآیند تصمیم‌گیری مهندسی با دیدی واقع‌بینانه و مبتنی بر شواهد انجام گیرد. در مجموع، ترکیب اطلاعات جداول ۲ و ۳ یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره فراهم می‌کند که در آن هم شاخص‌های فنی و مکانیکی و هم ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی قابل ارزیابی هستند. این رویکرد موجب می‌شود انتخاب فیلر صرفاً بر اساس یک پارامتر منفرد انجام نشود، بلکه مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی، دوام بلندمدت، سازگاری با مصالح پایه و شرایط اقلیمی پروژه به صورت یکپارچه مدنظر قرار گیرد. بنابراین، این بخش می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی و کاربردی برای انتخاب بهینه فیلرهای ضایعاتی در پروژه‌های راهسازی و ساختمانی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵۶. شاخص‌های مارشال با درصدهای مختلف برای نمونه‌های آماده شده با فیلر CHA (Tessema et al., 2022)



شکل ۵۷. استقامت باقی‌مانده درصدهای قیر (Tessema et al., 2022)

۴- یافته‌ها

به‌منظور جمع‌بندی نظام‌مند نتایج حاصل از بررسی فیلرهای ضایعاتی، در جدول ۲ مشخصات فنی و عملکردی انواع فیلرهای مطالعه‌شده به صورت تطبیقی ارائه شده است. این جدول با

جدول ۲. جدول جمع‌بندی مقایسه‌ای فیلرها

منبع	افزایش / کاهش شاخص	نتیجه کلیدی	درصد بهینه گزارش شده	منشأ/ماهیت	فیلر ضایعاتی
Imoh et al., (2026)	پایداری ↑ ضریب مارشال ↑ مقاومت کششی ↑ (تا بهینه)	پایداری مارشال از ۷۰٫۶ به ۹۰۰ کیلونیوتن در ۸٪ افزایش یافت	۶ تا ۱۰٪	زیست‌توده	خاکستر باگاس نیشکر
Aziz et al., (2026)	پایداری ↑ ضریب مارشال ↑ مقاومت کششی ↑ دوام رطوبتی ↑ شیارشدگی ↓	عمق شیار حدود ۴۱٫۴۲٪ کاهش یافت (در ۷۵٪)	۷۵٪	زیست‌توده	خاکستر پوسته برنج
Aziz et al., (2026)	پایداری ↑ ضریب مارشال ↑ مقاومت کششی ↑ دوام رطوبتی ↑ شیارشدگی ↑	پایداری مارشال حدود ۹٫۷۵٪ افزایش یافت، اما عمق شیار حدود ۱۷٫۱۶٪ بیشتر شد	۷۵٪	زیست‌توده	خاکستر هسته خرما
Aziz et al., (2026)	پایداری ± ضریب مارشال ± عملکرد کلی: بهبود محدود	اثرگذاری کلی ضعیف‌تر از برنج/خرما گزارش شده است	۲۵ تا ۱۰۰٪	زیست‌توده	خاکستر کود خشک
Aziz et al., (2026)	پایداری ± ضریب مارشال ± حساسیت رطوبتی ↑	در برخی سطوح افزایش فضای خالی مشاهده شده است	۲۵ تا ۱۰۰٪	زیست‌توده	خاکستر خاکاره
(Ince, 2026)	پایداری ↑ روانی ± ضریب مارشال ↑ دوام رطوبتی ↑ مقاومت کششی ↑ سختی ↑ شیارشدگی ↓ خستگی ↑	در ۱۰٪، پایداری ≈ ۱۰۰٫۳٪ و مقاومت کششی ≈ ۲۵۰٫۱٪ افزایش یافت	۵ تا ۲۰٪؛ بهینه ۱۰٪	زیست‌توده	پوسته شاه‌بلوط آسیاب‌شده
Asebiomo et al., (2025)	پایداری ↑ (تا بهینه)	در ۱۵٪، قیر بهینه ۶۰٫۳٪ و پایداری ۱۴٫۴ کیلونیوتن گزارش شده است مقدار بهینه حدود ۶۰٪ گزارش شده است	بهینه ۱۵٪	زیست‌توده	خاکستر بلال ذرت
Kadhim et al., (2025)	پایداری ↑ (تا بهینه)	بهبود در سطح بهینه گزارش شده است	بهینه ≈ ۶۰٪	زیست‌توده	خاکستر پوست گردو
Tessema et al., (2022)	پایداری ↑ (در بهینه) دوام رطوبتی ↑	بهبود در سطح بهینه گزارش شده است	وابسته به شرایط طرح اختلاط و فرآوری	زیست‌توده	خاکستر پوسته قهوه
Osolale et al., (2023)	خستگی ↑ دوام رطوبتی ± عملکرد کلی وابسته به شرایط	بهبود خستگی گزارش شده است	بسته به مطالعه	زیست‌توده	خاکستر برگ بامبو
Khedaywi, Haddad, et al., (2025)	پایداری ↑ سختی ↑ شیارشدگی ↓	ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه از ≈ ۱۷۶۳ mPa·s به ۱۳۲۵ افزایش یافت	وابسته به شرایط طرح اختلاط و فرآوری	ساختمانی/صنعتی	پودر ضایعات سرامیکی
Barraj et al., (2023)	سختی/رفتار ویسکوالاستیک ↑ عدد روانی ↓ شیارشدگی ↑	در برخی مطالعات با افزایش درصد، عدد جریان کاهش یافته است	وابسته به شرایط طرح اختلاط و فرآوری	شهری/صنعتی	پودر شیشه ضایعاتی
Tacıroğlu et al., (2022)	دوام رطوبتی ↑ (در بهینه) شیارشدگی ↓ (در بهینه) در درصد بالا شیارشدگی ↑	بهترین عملکرد در ۵۰٪؛ بیشترین عمق شیار ≈ ۴۲ میلی‌متر در ۷۵٪	بهینه ۵۰٪	صنعتی/معدنی	ماسه کوارتز ضایعاتی
Osolale et al., (2023)	دوام رطوبتی ↑ مقاومت در برابر تغییرشکل ↑	بهبود دوام رطوبتی و مقاومت تغییرشکل گزارش شده است	وابسته به شرایط طرح اختلاط و فرآوری	صنعتی	پودر سرباره فولاد
Solouki et al., (2023)	مقاومت کششی ↓	کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم	وابسته به شرایط طرح اختلاط و فرآوری	طبیعی/فرآوری‌شده	سیلت خام/اصلاح‌شده حرارتی
Kahveci & (Özen, 2024)	پایداری ↑ شیارشدگی ↑	افزایش پایداری و افزایش عمق شیار	وابسته به شرایط طرح اختلاط و فرآوری	شهری	لجن تصفیه‌خانه آب شرب

^۱ منظور از ± این است که نتیجه یک‌دست و قطعی نیست؛ وابسته به درصد، طرح اختلاط و فرآوری است و یا شرایط آزمون می‌تواند بهبود یا افت داشته باشد.

جدول ۳. جدول انتخاب فیلر مناسب با توجه به شرایط پروژه

شرایط پروژه	شاخص‌های اولویت‌دار	فیلرهایی که طبق مرور بیشتر هم‌راستا گزارش شده‌اند	نکته مبادله عملکردی
اقلیم گرم و ترافیک سنگین	تغییر شکل دائمی (شیارشُدگی) و سختی مناسب	خاکستر پوسته برنج (در درصد بهینه)، پوسته شاه‌بلوط (در درصد بهینه)، فیلرهای معدنی مانند پودر سرامیکی	افزایش سختی ممکن است ریسک ترک/شکندگی را بالا ببرد؛ درصد بهینه و کنترل حجمی ضروری است
اقلیم مرطوب/بارندگی بالا	دوام رطوبتی و چسبندگی	خاکستر پوسته برنج، پوسته شاه‌بلوط، فیلرهای قلیایی مانند پودر سرباره فولاد	افزایش فضای خالی یا فراوری نامناسب می‌تواند اثر را معکوس کند
اقلیم سرد/حساس به ترک	ترک‌پذیری و خستگی	موادی که در درصد بهینه بهبود خستگی گزارش کرده‌اند (مانند پوسته شاه‌بلوط)	سخت‌شدن زیاد ماستیک قیری می‌تواند ترک را تشدید کند؛ از افزایش بی‌رویه فیلر پرهیز شود
پروژه‌های کم‌ریسک/آزمایشی	شاخص‌های حجمی همراه با حداقل دوام رطوبتی	فیلرهایی با داده محدود مانند خاکستر کود خشک و خاکاره (با کنترل دقیق حجمی)	داده‌های عملکردی مستقیم باید تکمیل شود (شیارشُدگی و ترک)

۵- نتیجه‌گیری

شاخص‌های حجمی، دوام رطوبتی، تغییر شکل دائمی و رفتار شکست/خستگی لحاظ شوند و اولویت هر شاخص با توجه به اقلیم و ترافیک پروژه تعیین گردد. در زیر مهمترین نتایج مطالعه حاضر ارائه گردید است:

- با استفاده از پودر آسفالت بازیافتی دوام رطوبتی در برخی سناریوها اندکی بهبود یافته و نسبت مقاومت کششی از حدود ۸۳٪ به حدود ۸۵٪ رسیده است، اما شیارشُدگی به روش اختلاط حساس است و می‌تواند از بهبود جزئی تا بدتر شدن تغییر کند.

- پودر شیشه ضایعاتی با وجود تقویت سختی و برخی شاخص‌های قیر، در برخی درصدها عدد جریان را کاهش داده و نشان می‌دهد مخلوط زودتر وارد ناحیه تغییر شکل دائمی می‌شود؛ بنابراین در صد مصرف باید به صورت محافظه‌کارانه و پروژه‌محور تنظیم شود.

- پودر ضایعات سرامیکی سبب سخت‌شدن ماستیک قیری می‌شود؛ که ویسکوزیته را در دمای ۱۳۵ درجه از حدود ۱۳۲۵ به حدود ۱۷۶۳ میلی پاسکال ثانیه افزایش داده است که می‌تواند

مرور و تحلیل مطالعات نشان داد که استفاده از ریزدانه‌های پرکننده‌ی ضایعاتی می‌تواند همزمان مسیر کاهش مصرف منابع طبیعی و ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داغ را فراهم کند، اما میزان موفقیت آن به شدت به سه عامل وابسته است: ماهیت ماده و ریزساختار/ بافت سطحی آن، درصد جایگزینی و سناریوی فراوری و اختلاط. نتایج به‌طور کلی بیانگر وجود بازه‌ی بهینه برای بسیاری از فیلرهاست؛ به این معنا که تا سطحی مشخص، اثر پرکنندگی، بهبود چسبندگی و بهینه شدن پارامترهای حجمی غالب است، اما با افزایش بیش از حد، به دلیل افزایش نیاز به قیر، برهم خوردن تعادل حجمی، سخت‌شدن بیش از اندازه‌ی ماستیک قیری یا کاهش کارپذیری، بخشی از مزیت‌ها کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، این مرور نشان داد اتکا به یک شاخص (مثلاً پایداری مارشال یا مقاومت کششی) می‌تواند گمراه‌کننده باشد، زیرا در بسیاری از موارد مبادله‌ی عملکردی میان شیارشُدگی، ترک‌خوردگی/خستگی و دوام رطوبتی دیده می‌شود. بنابراین نتیجه‌گیری مهندسی باید بر پایه‌ی یک چارچوب چندشاخصه انجام گیرد که در آن، هم‌زمان

پیشنهادها برای تحقیقات آینده

- به جای اتکا به یک شاخص، بهینه‌یابی درصد فیلر بر پایه «چندمعیاره» انجام شود؛ به گونه‌ای که هم‌زمان معیارهای حجمی، شاخص‌های رطوبتی، شیارشدگی و مکانیک شکست - خستگی در تصمیم‌گیری دخیل باشند.

- اثر روش اختلاط و ترتیب افزودن فیلر به‌صورت نظام‌مند بررسی و استاندارد سازی شود؛ زیرا نتایج نشان می‌دهد حتی برای یک ماده ثابت، تغییر سناریوی اختلاط می‌تواند عملکرد را بهبود دهد یا تضعیف کند (نمونه بارز: RAPF).

- دوام‌سنجی پیشرفته شامل پیرشدگی کوتاه‌مدت - بلندمدت، چرخه‌های رطوبت - خشکی و (در صورت نیاز) یخ‌زدگی - ذوب، برای تشخیص پایداری اثر فیلر در طول زمان توسعه داده شود تا انتخاب‌ها صرفاً مبتنی بر رفتار کوتاه‌مدت نباشد.

- برای فیلرهایی که ویسکوزیته ماستیک را افزایش می‌دهند (مانند WCP)، اثرات اجرایی (دمای اختلاط - تراکم، کارایی، تراکم‌پذیری و حساسیت به خطای اجرا) به‌صورت صریح در کنار مزایای مکانیکی گزارش شود.

۶- مراجع

-Asebiomo, J. O., Aderinola, O. S., Ejigboye, P. O., Olusegun, V., Aderemi, P., & Titiloye, O. (2025). Evaluation of corn cob ash as mineral filler in asphalt mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 18(6), 1574-1585 .

-Aziz, P. W., EL-Maaty, A. E. A., & Younes, M. A. (2026). Evaluating the performance of hot asphalt mixtures using natural materials waste. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 36, 101881 .

-Barraj, F., Mahfouz, S., Kassem, H., Khatib, J., Goulias, D., & Elkordi, A. (2023). Investigation of using crushed glass waste as filler replacement in hot asphalt mixtures. *Sustainability*, 15(3), 2241 .

-Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020a). Analysis and comparison of asphalt mixes containing waste fillers using a novel ranking methodology. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020064 .

مقاومت شیار شدگی را تقویت کند اما کارپذیری و کنترل تراکم را حساس‌تر می‌سازد.

-ماده کوآرتز ضایعاتی یک سطح میانی جایگزینی بهترین کارایی را نشان داده است؛ برای مثال در ۰.۵٪ جایگزینی هم دوام رطوبتی و هم شیارشدگی مطلوب‌تر گزارش شده، در حالی که در ۷۵٪ بیشترین عمق شیار حدود ۴/۲ میلی‌متر ثبت شده است.

-سیلت خام به دلیل آبدوستی می‌تواند حساسیت رطوبتی را افزایش دهد، اما اصلاح حرارتی رفتار را به فیلر مرجع نزدیک می‌کند و در دمای ۶۰ درجه پاسخ شیارشدگی/خزش بهبود می‌یابد؛ بنابراین فرآوری در این فیلر تعیین‌کننده است.

-نتایج نشان می‌دهد لجن تصفیه‌خانه آب شرب ممکن است برخی شاخص‌های خشک را تقویت کند، اما اگر شاخص‌های رطوبتی افت کند مزیت مکانیکی در میدان پایدار نمی‌ماند؛ لذا پذیرش آن باید هم‌زمان بر مبنای دوام رطوبتی و تغییرشکل دائمی باشد.

-در خاکستر پوسته پسته برنج در سطح ۷۵٪ جایگزینی، کاهش عمق شیار حدود ۴۱/۴۲٪ گزارش شده و هم‌زمان افزایش مقاومت کششی و بهبود دوام رطوبتی مشاهده شده است؛ با این حال افزایش سختی می‌تواند در پروژه‌های حساس به ترک نیازمند محدودیت درصد باشد.

-با کاربرد خاکستر هسته خرما اگرچه در سطح ۷۵٪ پایداری مارشال حدود ۹/۷۵٪ افزایش یافته است، اما در آزمون شیارشدگی افزایش عمق شیار حدود ۱۷/۱۶٪ گزارش شده؛ یعنی بهبود شاخص‌های مارشالی لزوماً تضمین‌کننده کاهش شیار واقعی نیست.

-در خاکستر باگاس نیشکر وجود بازه بهینه روشن است؛ پایداری مارشال از ۷/۶ در شاهد به حدود ۹/۰ کیلونیوتن در حوالی ۸٪ افزایش یافته و در درصدهای بالاتر افت کرده است، پس درصدهای بالا می‌تواند اثر معکوس داشته باشد.

-پوسته شاه‌بلوط آسیاب‌شده در ۱۰٪ جایگزینی هم‌زمان پایداری مارشال حدود ۱۰/۳٪ را افزایش و مقاومت کششی مرطوب را حدود ۲۵/۱٪ بهبود یافته داده است؛ اما در درصدهای بالاتر احتمال افزایش نیاز قیر و سخت شدن بیش از حد ماستیک قیری وجود دارد.

- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2), 42-82 .
- Li, C., Chen, Z., Wu, S., Li, B., Xie, J., & Xiao, Y. (2017). Effects of steel slag fillers on the rheological properties of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 145, 383-391 .
- Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M., & Rizzo, S. (2013). A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. *Waste Management*, 33(9), 1906-1917 .
- Mistry, R., & Roy, T. K. (2021). Performance evaluation of bituminous mix and mastic containing rice husk ash and fly ash as filler. *Construction and Building Materials*, 2, 121187 .
- Modarres, A., Rahmanzadeh, M., & Ayar, P. (2015). Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts. *Journal of Cleaner Production*, 91, 262-268 .
- Moghaddam, T .B., Soltani, M., Karim, M. R., Shamshirband, S., Petković, D., & Baaj, H. (2015). Estimation of the rutting performance of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures by adaptive neuro-fuzzy methodology. *Construction and Building Materials*, 96, 550-555.
- Osuolale, O. M., Arinkoola, A. O., & Olawuyi, O. A. (2023). Performance evaluation of bamboo leaf ash and steel slag powder as alternative filler in asphaltic mixes. *Journal of Engineering Research*, 11(4), 334-346 .
- Shirvani, D., & Sarkar, A. (2025). Technical evaluation of using reclaimed asphalt pavement materials as filler in hot mix asphalt. *Results in Engineering*, 106048 .
- Solouki, A., Tataranni, P., Tarsi, G., & Sangiorgi, C. (2023). Waste silt as filler in hot mix asphalt: A laboratory characterization. *Applied Sciences*, 13(6), 3473 .
- Tacırođlu, M. V., Ergezer, F., Baykal, T., Eriskin, E., & Terzi, S. (2022). Investigation of waste quartz sand as filler in hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 342, 128004 .
- Tahami, S. A ., Arabani, M., & Mirhosseini, A. F. (2018). Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 170, 547-556 .
- Tessema, A. T., Wolelaw, N. M., & Alene, G. A. (2022). Experimental evaluation of coffee husk ash as a filler in hot mix asphalt concrete productions. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 6726700 .
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020b). Feasible utilization of waste limestone sludge as filler in bituminous concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117781 .
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020c). Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 234, 117271 .
- Gao, Y., Zhang, Y., Gu, F., Xu, T., & Wang ,H. (2018). Impact of minerals and water on bitumen-mineral adhesion and debonding behaviours using molecular dynamics simulations. *Construction and Building Materials*, 171, 214-222 .
- He, Y., Naseri, A., & Zarei, M. (2025). Study of the fracture properties of asphalt mixtures using Fresh Jig Coal Waste (FJCW) as a filler replacement under short-term and long-term conditions. *Construction and Building Materials*, 467, 140267 .
- Huang, B., Shu, X., & Chen, X. (2007). Effects of mineral fillers on hot-mix asphalt laboratory-measured properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(1), 1-9 .
- Imoh, U. U., Adeboje, A. O., Adekola, E. R., Hassan, R., & Rad, M. M. (2026). Effect of Sugarcane Bagasse Ash on the sustainable performance of hot-mix asphalt :A case study of experimental and numerical analysis. *Case Studies in Construction Materials*, e05769 .
- İnce, C. B. (2026). Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt Modified with Biomass-Based Waste Chestnut Shells as Filler Replacement. *Materials*, 19, 512(3).
- Ismanti, S., & Yasufuku, N. (2017). Effect of bamboo leaf ash addition in cemented bamboo chipssand soil mixture. *Lowland Technology International*, 19(1, June), 13-26 .
- Kadhim, Y. N., Abdulasool, A. T., Dulaimi, A., Pinto, H. A. S., & Bernardo, L .F. A. (2025). Influence of Walnut Shell Ash and Limestone Filler in Hot Mix Asphalt. *Journal of Composites Science*, 9(1), 22 .
- Kahveci, T. E., & Özen, H. (2024). Utilisation of Waste Sludge from Drinking Water Treatment as a Filler Material in Hot Mix Asphalt. *Materials*, 17(7), 1528 .
- Khedaywi, T., Bani Baker, M., & Al-Kattab, T. (2025). Effect of waste ceramic powder on the properties of asphalt binder and asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 18(3), 691-71.
- Khedaywi, T., Haddad, M., & Hwarie, S. (2025). Effect of waste iron powder on properties of asphalt concrete mixtures: state of the art. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 18(1), 91-101 .

A Review of the Influence of Waste Materials as Filler on the Performance of Hot Mix Asphalt (HMA)

Zana Karimi, M.Sc., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Pooyan Ayar, Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Ali Soleimani, Ph.D., Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: ayar@iust.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

This research presents an analytical review of utilizing waste materials as mineral filler in Hot Mix Asphalt (HMA); an approach that simultaneously addresses industrial, agricultural, and municipal waste management while improving pavement performance and durability. The primary gap identified in existing literature is the scattered nature of results and the lack of a coherent framework linking mastic microstructural changes to the functional behavior of the asphalt mix. This paper first elucidates the role of filler in mastic formation, adhesion, and volumetric parameter control. Subsequently, waste materials are categorized into biomass, municipal, and industrial-construction groups, and their effects on moisture susceptibility, permanent deformation, cracking, and fatigue are compared based on experimental data from selected studies. Findings reveal that the efficiency of these materials is highly dependent on their chemical nature, surface texture, particle size distribution, replacement percentage, and processing quality. An optimal replacement range is observed in most cases; excessive filler can neutralize initial benefits by increasing bitumen demand, disrupting volumetric balance, and causing excessive hardening of the bituminous mastic. Furthermore, the review highlights a critical duality: improving one performance index does not necessarily guarantee improvement in others. In some materials, increased stiffness and stability are accompanied by an increased risk of brittleness or reduced moisture resistance. Consequently, engineering decisions must be based on a set of performance indices tailored to specific climatic and traffic conditions.

Keywords: Hot Mix Asphalt (HMA), Waste Filler, Bituminous Mastic, Moisture Susceptibility, Rutting