

مروری بر خصوصیات مکانیکی روسازی آسفالتی مسلح شده با الیاف طبیعی گیاهی به عنوان راهکار دوست دار محیط زیست در مهندسی روسازی

مقاله علمی - پژوهشی

ساجد برادران، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
سید علی ضیائی*، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sa-ziaee@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۱۹۲-۱۶۷

چکیده

با توجه به مشکلات زیست محیطی ناشی از روسازی آسفالتی، از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف زیاد منابع غیرقابل تجدید، توجه به مسائل محیط زیستی در مهندسی راه و روسازی بسیار اهمیت دارد. به کارگیری الیاف طبیعی گیاهی به عنوان روشی دوست دار محیط زیست و سازگار با اهداف توسعه پایدار در مهندسی راه و روسازی مورد استقبال محققین و مهندسين قرار گرفته است. استفاده از این الیاف به کاهش مصرف مواد و مصالح غیرقابل تجدید و کاهش انتشار کربن کمک می‌کند، زیرا این مواد از منابع تجدیدپذیر به دست می‌آیند. همچنین، الیاف طبیعی گیاهی باعث بهبود خصوصیات مکانیکی روسازی‌های آسفالتی و افزایش دوام و عمر مفید آن‌ها می‌شوند، که این امر به کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری مکرر و در نتیجه مصرف کمتر منابع منجر می‌شود. پژوهش حاضر با هدف بررسی آخرین پیشرفت‌های تحقیقاتی در مورد استفاده از الیاف طبیعی گیاهی در روسازی آسفالتی انجام شده است. ابتدا اطلاعات اولیه درباره الیاف طبیعی، شامل انواع، ترکیبات، و خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی هر یک، توصیف شد. سپس خصوصیات رئولوژیکی، عملکرد در دماهای پایین، مقاومت در برابر خستگی و مقاومت برشی قیر اصلاح شده با الیاف طبیعی گیاهی و عملکرد روسازی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با این الیاف، از جمله عملکرد در دماهای بالا و پایین، حساسیت به رطوبت و مقاومت در برابر خستگی، مورد بررسی قرار گرفت. در نتیجه، الیاف طبیعی به عنوان یک اصلاح کننده دوست دار محیط زیست و امیدوارکننده در روسازی آسفالتی معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: روسازی آسفالتی، الیاف طبیعی گیاهی، خصوصیات مکانیکی، اصلاح کننده دوست دار محیط زیست، توسعه پایدار

۱-مقدمه

ترافیکی در حال افزایش است (Pinkofsky and Jansen, 2018; Baradaran and Ameri, 2023). چنین افزایش حجم بار و ترافیک سنگین نیازمند عملکرد بهینه تر جاده‌ها برای پاسخگویی به نیازهای مختلف از جمله حمل و نقل بدون تأخیر محصولات تجاری و صنعتی است. تکرار بارهای ترافیکی که جاده‌ها در طول عمر خود تجربه می‌کنند، به همراه عوامل محیطی، منجر به تغییر

طبق مطالعات انجام شده و گزارش‌های بدست آمده از کشورهای مختلف، بیش از ۹۰ درصد روسازی‌ها در اروپا، آمریکای شمالی و چین از آسفالت تشکیل شده است (Sultan et al., 2016; Roberts et al., 1996; Milad et al., 2020). با افزایش جمعیت و در پی آن گسترش راه‌های ارتباطی و ترانزیت، گسترش فعالیت‌های اقتصادی از طریق جاده‌ها، حجم ترافیک جاده‌ای و بار

طبیعی در مخلوط با دانه‌بندی باز^۶ برای کمک به جلوگیری از ریزش قیر استفاده شد (Allen et al., 2000). بعداً الیاف طبیعی به مخلوط‌های آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای^۷ اضافه گردید. رفته رفته با استقبال زیاد مهندسين و محققين شاغل در حوزه روسازی در دهه‌ی اخیر، استفاده از الیاف طبیعی در انواع مخلوط آسفالتی بیشتر شده است. لازم به ذکر است اگرچه الیاف مصنوعی بیشتر در روسازی‌ها استفاده می‌شود، اما می‌تواند مشکلات زیست محیطی زیادی مانند آلودگی‌های دریایی و جوی را اضافه کند (Dris et al., 2016).

الیاف طبیعی منشأ گیاهی دارند (Gupta et al., 2021; Sarayu et al., 2016). مقادیر زیادی ضایعات کشاورزی گیاهی در کشورهای توسعه‌یافته مانند ساقه‌های ذرت و باگاس نیشکر تولید می‌شوند، اما بیشتر آنها سوزانده شده و گازهای گلخانه‌ای زیادی از خود تولید می‌کنند (Liu et al., 2017; Li et al., 2020). این عمل نه تنها منابع را هدر می‌دهد، بلکه موجب افزایش آلودگی هوا و تغییرات آب و هوایی نیز می‌شود. الیاف طبیعی مانند کنف، سیزال، نارگیل، موز و انواع دیگر امروزه در صنعت راه و روسازی استفاده می‌شود. مطالعات نشان داده است که مقاومت را می‌توان با افزایش الیاف در مخلوط‌های SMA افزایش داد. علاوه بر این، استفاده از الیاف طبیعی استحکام و دوام بهتری می‌دهد و از ریزش قیر^۸ از مخلوط جلوگیری می‌کند (Tataranni and Sangiorgi, 2021; Ma et al., 2018; Gupta et al., 2019; Hassan et al., 2010; Abtahi et al., 2005). همچنین نتایج مطالعات نشان می‌دهد که الیاف طبیعی در مطالعات آزمایشگاهی و عملی نسبت به سایر افزودنی‌ها دیگر ترجیح داده می‌شوند، زیرا کار با آنها آسان بوده، نسبت به دما بی‌اثر هستند و تأثیر بهینه‌ای در ریزش قیر دارند. افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی خواص ویسکوالاستیک آن را تغییر می‌دهد. مدول دینامیکی را بهبود بخشیده، حساسیت مخلوط به رطوبت^۹ را کاهش می‌دهد، مقاومت در برابر شیارشدگی^{۱۰} را بهبود می‌بخشد و مقاومت در برابر ترک‌های انعکاسی^{۱۱} را افزایش می‌دهد (Su et al., 2019; Ye et al., 2008; Kathari et al., 2018; Guo et al., 2020; Echols, 2015; Park et al., 1989). استفاده از این الیاف در روسازی‌ها یک عمل سبز و پایدار است. علاوه بر این، الیاف طبیعی با استفاده از مواد زائد و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای^{۱۲} ناشی از سوزاندن

شکل، ترک‌های خستگی^۱، ناپایداری و سایر اشکال خرابی می‌شود که در نهایت عملکرد و دوام ساختار روسازی را تضعیف می‌کند. شناسایی و پیش‌بینی بیشترین خرابی‌هایی که یک روسازی احتمالاً در طول عمر خدمت‌دهی خود تجربه می‌کند، از مهم‌ترین عوامل برای طراحی مناسب روسازی محسوب می‌شود. به همین دلیل، امروزه با استفاده از فناوری‌های نوین، می‌توان علاوه بر بهبود کیفیت خدمات، به کاهش هزینه‌های چرخه عمر و افزایش ایمنی رانندگی نیز دست یافت. این فناوری‌ها به ساخت، توسعه، نگهداری و افزایش کیفیت روسازی‌ها در برابر خرابی‌های مختلف کمک می‌کنند (Baradaran and Ameri, 2023; Ayar et al., 2022). در سالیان اخیر توجه فزاینده‌ای به اصلاح‌کننده‌هایی که می‌توانند استحکام و دوام روسازی آسفالتی را بهبود بخشند، معطوف شده است (Cheng et al., 2019; Fatemi et al., 2020; Ziaee et al., 2023; Ziaee and Behnia, 2020). اصلاح‌کننده‌ها از جمله پلیمرها، پلاستیک‌ها (Baradaran et al., 2024; Lim et al., 2024; Hao et al., 2024; Li et al., 2024) ، پودر لاستیک^۲ (Xie et al., 2024; Yang et al., 2024; Farina et al., 2024; Guo et al., 2024; Baradaran and Bhat et al., 2024; Aliha., 2025) ، مواد ضایعاتی و نانومواد (Preethi and Ravichandran, 2024; Hong et al., 2020; Baradaran et al., 2024) برای بهبود عملکرد روسازی آسفالتی استفاده می‌شوند. با این حال، استفاده از این مواد در کنار ویژگی‌های مناسبی که به روسازی آسفالتی می‌بخشند، گاهی اوقات می‌تواند مشکلاتی را نیز ایجاد کنند (Li et al., 2021). به عنوان مثال، اتیلن - وینیل استات^۳ نمی‌تواند عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین را بهبود بخشد (He et al., 2023) و نانومواد برای استفاده در مقیاس بزرگ بسیار پرهزینه هستند (Zhang et al., 2021). از این رو توجه محققین در حوزه روسازی به استفاده از مواد طبیعی نظیر الیاف‌های بدست آمده از گیاهان طبیعی^۴ که قابلیت تولید فراوان و همچنین تجدیدپذیری دارند جلب شده است. الیاف طبیعی که شامل مواد نازک و رشته‌ای مانند لیگنین^۵ و الیاف بازال است (Vinod et al., 2021) برای دهه‌هاست که در روسازی آسفالت استفاده می‌شود. برطبق تاریخ ادبیات، نخستین تلاش‌ها برای استفاده از الیاف جهت اصلاح قیر در اوایل دهه ۱۹۹۰ ظاهر شدند (Peltonen, 1991). چندین سال بعد، الیاف

با هدف معرفی برخی از پرکاربردترین الیاف‌های طبیعی گیاهی شناخته شده در جهان و بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با این الیاف انجام گرفته است. برای دستیابی به این اهداف ابتدا به بررسی طبقه‌بندی الیاف طبیعی گیاهی پرداخته می‌شود سپس انواع الیاف گیاهی نظیر کتان، کنف، جوت، سبزال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس به بررسی خصوصیات و رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با این الیاف در برابر خرابی‌های گوناگون نظیر شیارشدگی، ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی پرداخته خواهد شد.

۲- طبقه‌بندی الیاف طبیعی گیاهی

الیاف طبیعی گیاهی را می‌توان به ۴ دسته کلی الیاف بدست آمده از پوسته، دانه، برگ گیاه و ساقه‌ی گیاه تقسیم‌بندی نمود. در ادامه به شرح هریک از این دسته‌بندی‌ها پرداخته می‌شود (Onuaguluchi and Banita, 2016; Al Faruque et al., 2022; Nurhanian et al., 2023).

۲-۱- الیاف بدست آمده از پوسته^{۱۳}

برخی از الیاف گیاهی طبیعی از پوسته بیرونی ساقه گیاه استخراج می‌شود که عمدتاً شامل جوت^{۱۴}، کتان^{۱۵}، کنف^{۱۶} و رامی^{۱۷} است و معمولاً با استحکام کششی بالا شناخته می‌شوند. به عنوان مثال، الیاف جوت، به عنوان یک الیاف سبز و با کارایی بالا، به طور گسترده‌ای به عنوان یک ماده تقویت‌کننده، ماده جاذب و بازدارنده شعله^{۱۸} در صنایع مختلف استفاده می‌شود (Boopalan et al., 2019; Guo et al., 2012).

۲-۲- الیاف بدست آمده از دانه^{۱۹}

الیاف بدست آمده از دانه به الیاف تک سلولی رشد یافته از سلول‌های اپیدرمی برخی از دانه‌های گیاهی اشاره دارد و شامل الیاف نارگیل^{۲۰}، الیاف پنبه چوب و الیاف پنبه است. با مزایای مقاومت در برابر سایش، دوام و هزینه کم (Araujo et al., 2018; Rao et al., 2000).

بقایای گیاهی به کاهش اثرات زیست‌محیطی روسازی‌های آسفالتی کمک می‌کنند. استفاده از الیاف طبیعی با اهداف پایداری جهانی مطابقت دارد و راه‌حلی عملی برای بهبود عملکرد روسازی و در عین حال به حداقل رساندن ردپای اکولوژیکی ارائه می‌دهد. البته باید بیان نمود اهداف پایداری جهانی و به حداقل رساندن ردپای اکولوژیکی و کاهش کربن، در تمامی شاخه‌های مهندسی عمران، در رده اولویت‌های ده گانه اعلام شده از سوی سازمان ملل متحد می‌باشد (Baradaran et al., 2024; Baradaran MS. et al., 2023; Ayar et al., 2022; Baradaran and Ameri, 2023; Salimi et al., 2024; Niri et al., 2024; Tareghian et al., 2024; Farahinia et al., 2024; Amirmia et al., 2024; Rajaei et al., 2025; Rajaei et al., 2025). تحقیقات بیشتر در خصوص درک رفتار طولانی مدت آسفالت تقویت شده با الیاف طبیعی می‌تواند نقش آن را به عنوان یک ماده کلیدی در آینده ساخت و نگهداری جاده‌ها تقویت کند (Xue et al., 2013; Liu et al., 2020; Landi et al., 2020). در نتیجه، استفاده از الیاف طبیعی در روسازی‌های آسفالتی نشان‌دهنده‌ی پیشرفت قابل توجهی در توسعه زیرساخت‌های پایدار است. از آنجایی که جامعه جهانی به اولویت دادن به پایداری زیست محیطی ادامه می‌دهد (Yazdi et al., 2024; Pargar et al., 2024; Balighi et al., 2024; Pournoori et al., 2024)، استفاده از قیرهای اصلاح شده با الیاف طبیعی می‌تواند نقش مهمی در کاهش ردپای کربن در روسازی آسفالتی ایفا کند. این رویکرد نه تنها از منابع فراوان و تجدیدپذیر استفاده می‌کند، بلکه با ارائه یک جایگزین سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه، چالش‌های اصلاح‌کننده‌های سنتی را نیز برطرف می‌کند. با پیشرفت تحقیقات، پتانسیل الیاف طبیعی برای افزایش طول عمر و انعطاف‌پذیری روسازی‌های آسفالتی احتمالاً گسترش می‌یابد و راه را برای جاده‌های سبزتر و بادوام‌تر در سراسر جهان هموار می‌کند (Kowalski et al., 2016; Gogoi et al., 2016).

با توجه به توضیحات بیان شده شناخت هریک از الیاف طبیعی پرکاربرد جهت استفاده در روسازی آسفالتی ضروری می‌باشد. همچنین بررسی رفتار مکانیکی روسازی آسفالتی حاوی هریک از الیاف طبیعی به تصمیم‌گیری محققین و دست اندرکاران جهت انتخاب بهتر گزینه‌های موجود برای بالا بردن کیفیت روسازی راه‌های کشور می‌تواند کمک نماید. به همین علت این پژوهش

۲-۳- الیاف بدست آمده از برگ^{۲۱}

این الیاف از برگ گیاهان بدست می‌آید. الیاف سیزال^{۲۲} یک الیاف سبز، سازگار با محیط زیست و با کارایی بالا است و از این رو، محققین مطالعاتی در مورد عملکرد آن به عنوان یک عامل تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها با اثر افزایشی بر خصوصیات مکانیکی بتن انجام داده‌اند (Chen et al., 2018).

۲-۴- الیاف بدست آمده از ساقه

الیاف بدست آمده از ساقه به الیاف استخراج شده از ساقه گیاهان از جمله باگاس^{۲۳}، ساقه ذرت و ساقه آفتابگردان و غیره اطلاق می‌شود. الیاف باگاس غنی از سلولز بوده و تا حدودی در خمیر و کاغذ، پنل‌های زیست توده استفاده شده است (Vijay et al., 2019; Vinod et al., 2021).

۳- انواع الیاف گیاهی طبیعی

۳-۱- الیاف کتان

الیاف کتان یک الیاف سلولزی است که از منابع طبیعی به دست می‌آید. الیاف کتان در یک محفظه توپی شکل در اطراف دانه‌های گیاه پنبه رشد می‌کند (شکل ۱). با این حال، کیفیت الیاف کتان به شدت تحت تأثیر درجه، رنگ، طول و ویژگی‌های الیاف است. کشورهایی که بیشتر الیاف کتان را تولید می‌کنند عبارتند از: ایالات متحده آمریکا، هند، چین، مصر، پاکستان، سودان و اروپای شرقی. ظاهر خارجی، روشنایی و رنگ معیارهای مهم برای درجه‌بندی الیاف پنبه هستند. رنگ کتان خام به طور معمول سفید یا خاکستری است، اما انواع رنگی دیگر مانند قرمز، بابونه و مایل به قهوه‌ای و غیره نیز موجود است. کیفیت الیاف کتان به شدت تحت تأثیر طولی است که الیاف کتان را به دو دسته اصلی تقسیم می‌کند: الیاف بلند با طول بیش از ۲۸ میلی‌متر و الیاف کوتاه با طول کمتر از ۲۸ میلی‌متر (Rana et al., 2014; Elms et al., 2001).

۳-۲- الیاف کنف

کنف به طور طبیعی یکی از انواع الیاف دوستدار محیط زیست و همچنین جزو قدیمی‌ترین انواع الیاف می‌باشد (شکل ۲). تاریخ جهان بیان می‌کند که قدیمی‌ترین آثار صنعت بشری تکه‌هایی از

پارچه کنفی هستند که در مقبره‌هایی با قدمت تقریباً ۸۰۰۰ قبل از میلاد کشف شده‌اند. در گیاه کنف، الیاف در بافت‌های ساقه وجود دارد که به ایستادن گیاه کمک می‌کند. با انجام این کار این الیاف استحکام و سفتی را به درخت می‌بخشند. این استحکام و سفتی بالای الیاف کنف باعث می‌شود که آنها به ماده‌ای مفید برای استفاده به عنوان تقویت‌کننده در مواد کامپوزیتی تبدیل شوند. در سال‌های اخیر افزایش تصاعدی در استفاده از کنف برای کاربردهای مختلف وجود داشته است (Shahzad, 2012).



شکل ۱. الیاف کتان (Ruan, 2007)



شکل ۲. الیاف کنف (Buritatum et al., 2023)

۳-۳- الیاف جوت

همانطور که بیان شد این الیاف از ساقه گیاه جوت استخراج می‌شود، دارای طول بلند و نرم با ظاهری براق می‌باشد (شکل ۳). جوت ارزان‌ترین الیاف طبیعی است و به دلیل رنگ و ارزش نقدی آن الیاف ارزشمند محسوب می‌شود. الیاف جوت عمدتاً از سلولز^{۲۴}، لیگنین^{۲۵} و پکتین^{۲۶} تشکیل شده است. چین، هند و بنگلادش تولیدکنندگان اصلی جوت در جهان هستند. شرایط گرم و مرطوب برای رشد گیاهان جوت مناسب است. درجه‌بندی الیاف جوت با توجه به رنگ، استحکام و طول الیاف آن انجام می‌شود.



شکل ۴. الیاف سیزال (Oda et al., 2012)

۳-۵- الیاف نارگیل

الیاف نارگیل از پوسته بیرونی نارگیل گرفته شده و از دانه‌های نخل نارگیل به دست می‌آید (شکل ۵). این الیاف یکی از انواع الیاف‌های طبیعی بوده که به وفور در مناطق گرمسیری موجود است (در دنیا: ۰,۷۸ میلیون تن در سال؛ در هند: ۰,۱۶ میلیون تن در سال). ساختار سلول الیافی نارگیل نازک و توخالی است و از دیواره‌های ضخیم سلولز تشکیل شده است. الیاف نارگیل حاوی یک ماده شیمیایی پیچیده بوده که موجب می‌شود نسبت به سایر الیاف بسیار سخت‌تر، درشت‌تر و دارای انعطاف‌پذیری کمتری باشد (Abiola et al., 2014; Wang et al., 2020).



شکل ۵. الیاف نارگیل (Ru et al., 2022)

۳-۶- الیاف بامبو

در میان الیاف طبیعی، بامبو به دلیل سرعت رشد سریع و جهانی بودن، بسیار مهم است (شکل ۶). بامبو گروهی از گیاهان همیشه سبز که بیش از ۱۴۵۰ گونه در آب و هوای متنوع - از سرد کوهستانی تا مناطق گرمسیری یافت می‌شود. چین به عنوان "مرکز بامبو" شناخته می‌شود زیرا بیش از ۴۰۰ گونه بامبو تحت حاکمیت این کشور رشد می‌کند. چین از نظر تعداد انواع، فراوانی و همچنین

الیاف جوت معمولاً به رنگ سفید مایل به قهوه‌ای هستند و طول آنها در محدوده ۰,۹-۴,۵ متر است. لازم به ذکر است الیاف جوت در برابر رطوبت، اسید و اشعه ماوراء بنفش مقاومت کمتری دارند. برعکس، بافت ظریف آنها و همچنین مقاومت آنها در برابر گرما و آتش، طیف گسترده‌ای از کاربردها را در صنایعی مانند نساجی، عمران و خودرو ارائه می‌کند (Lewin, 2006; Islam and Ahmed, 2012; Chattopadhyay, 1998; Wang et al., 2008).



شکل ۳. الیاف جوت (Mansourian et al., 2016)

۳-۴- الیاف سیزال

سیزال در سال ۱۹۰۳ از مکزیک آورده شد و گیاهی است که به هوای گرم و نور زیاد نیاز دارد و مناسب برای مناطق نیمه خشک می‌باشد. باهیا بزرگترین تولیدکننده سیزال از برزیل است که ۹۵,۶ درصد از کل تولید داخلی را به خود اختصاص می‌دهد و با داشتن ۲۰۰ هزار هکتار سیزال برزیل را به عنوان بزرگترین تولید کننده جهان قرار می‌دهد. ایالات متحده بزرگترین واردکننده محصولات برزیلی با بهره‌مندی از سیزال، به ویژه رشته‌ها و سیم‌ها است. چین نیز این الیاف سودمند را برای تولید صندل خریداری می‌کند. برگ‌های سیزال الیاف بسیار مقاومی تولید می‌کنند که می‌توان از آن در تولید جارو، کیف، کلاه، ریسمان، طناب، حصیر، فرش، سلولز برای تولید کاغذ با مقاومت بالا و انواع دیگر کاغذهای ریز استفاده کرد (شکل ۴). علاوه بر این کاربردها، می‌توان از این الیاف در صنعت خودروسازی و همچنین در صنایع مبلمان و ژئوتکستایل (حفاظت از دامنه‌ی تپه‌ها و شیروانی‌های خاکی، کشاورزی و روسازی راه‌ها) و در مخلوط پلی پروپیلن برای جایگزینی فایبرگلاس و کارهای عمرانی استفاده نمود (Oda et al., 2012).

۳-۷- الیاف باگاس

باگاس محصول زیستی از نیشکر است که پس از استخراج آب از نیشکر باقی می ماند (شکل ۸) و از انواع الیاف طبیعی محسوب می شود. برای هر ۱۰ تن نیشکر خرد شده، یک کارخانه قند نزدیک به ۳ تن باگاس مرطوب می تواند تولید نماید. باگاس عمدتاً به عنوان ماده خام سوزاننده در کوره های آسیاب نیشکر استفاده می شود. باگاس ها قدرت کالری پایینی دارند که این امر باعث می شود این فرآیند همراه با راندمان پایینی باشد. تقریباً ۹ درصد باگاس در تولید الکل (اتانول) استفاده می شود. اتانول جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی نیست، اما سوختی سازگار با محیط زیست است. اتانول یک ماده خام شیمیایی بسیار پرکاربرد است که می توان از آن مواد شیمیایی مختلفی تولید نمود. یک فرصت عالی در ساخت کامپوزیت های مبتنی بر باگاس برای طیف گسترده ای از کاربردها در ساختمان و کارهای عمرانی وجود دارد (Mansor et al., 2018; Ahmed et al., 2022; Li et al., 2020).



شکل ۷. الیاف موز (Ferreira da Costa et al., 2020)



شکل ۸. الیاف باگاس (Dang et al., 2016)

تولید زیاد، صنعت بامبو پیشرو در جهان را دارد. در سال ۲۰۱۰، مزارع بامبو در چین ۵,۳۸ میلیون هکتار بود. لازم به ذکر است که الیاف بامبو مدت هاست که به طور گسترده برای اهداف عمرانی و همچنین برای خمیر و کاغذ در صنعت استفاده می شود (Mera and Xu, 2014; Bystriakova and Kapos, 2005; Panda, 2011).



شکل ۶. الیاف بامبو (Banga et al., 2015)

۳-۷- الیاف موز^{۲۸}

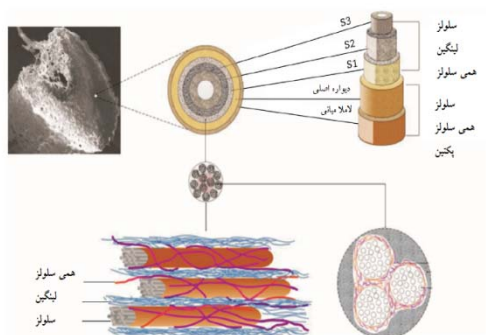
الیاف موز نوعی الیاف سلولزی است که از گیاه موز به دست می آید. الیاف موز، الیاف گیاهی طبیعی با خواص مکانیکی نسبتاً خوب بوده که با مواد معمولی مانند الیاف شیشه قابل مقایسه است. این ماده چگالی کمتری نسبت به الیاف شیشه دارد (شکل ۷). الیاف موز محصول زائد کشت موز بوده و دارای کاربردهای مفید می باشد. الیاف موز دارای استحکام بالا، وزن سبک، ازدیاد طول کمتر، کیفیت مقاومت در برابر آتش، جذب رطوبت قوی و همچنین زیست تخریب پذیر هستند. امروزه از این الیاف برای پوشاک و همچنین تولید کاغذ استفاده می شود. محصولاتتی مانند کاغذ صافی، کیسه کاغذ، کارت تبریک، پایه چراغ، پایه خودکار، کاغذهای تزئینی، طناب، حصیر و مواد کامپوزیت و غیره را می توان با استفاده از این الیاف تولید نمود. پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف موز توسط شرکت های خودروسازی برای ساخت پانل های محافظ زیر کف در اتومبیل های لوکس و همچنین در ساخت صنایع دستی و تزئینات منزل استفاده می شود. مواد مرکب از الیاف موز مورد استفاده در تابلوهای ساختمانی و تخته های مقاوم در برابر آتش نیز استفاده می شود (Ferreira et al., 2020; Bhatnagar et al., 2015; SachinYadav and Bhatnagar, 2015).

۴- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی الیاف گیاهی

طبیعی

ساختار الیاف گیاهی طبیعی یک ساختار حفره‌ای چندلایه با دیواره ضخیم است که در شکل ۹ نشان داده شده است. این سازه از دیوار اولیه، دیوار ثانویه و حفره تشکیل شده است که ضخامت دیواره اولیه کوچک و دیواره ثانویه از سه لایه تشکیل شده است. یعنی S1، S2 و S3 که ضخیم‌تر بوده و هر لایه دارای یک زنجیره طولانی از میکروفیبریل‌های سلولز ماریپیچی است (Madsen, 2004). برای انواع مختلف الیاف، میکروفیبریل‌های سلولزی آن‌ها دارای هندسه سلولی خاص، زاویه ماریپیچ میکروفیبریل (زاویه بین محور فیبر و میکروفیبریل‌های سلولزی) هستند. ریزساختار الیاف، زوایای ماریپیچ میکروفیبریل‌ها و ترکیبات شیمیایی، با هم بر خواص مکانیکی الیاف گیاهی تأثیر می‌گذارند (Gassan and Bledzki, 1997). مقدار لیگنین به تدریج از دیواره اولیه به دیواره ثانویه کاهش یافته، در حالی که میزان سلولز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که نتایج آزمایشگاهی و مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استحکام کششی الیاف طبیعی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاپاسکال است که بسیار بیشتر از الیاف مصنوعی است. از نظر شیمیایی، الیاف طبیعی گیاهی عمدتاً از سلولز و به دنبال آن همی سلولز^{۲۹}، لیگنین، پکتین و مواد مومی شکل تشکیل شده است (Madsen, 2004; Gassan and Bledzki, 1997; Bismarck et al., 2005). جدول ۱ ترکیب شیمیایی عناصر طبیعی مختلف را نشان می‌دهد.

در یک الیاف، سلولز جزو اصلی می‌باشد که به الیاف موردنظر استحکام، سفتی و پایداری ساختاری می‌دهد. ساختار شیمیایی سلولز یک ساختار بلوری بسیار منظم و پایدار است که از سه گروه هیدروکسیل تشکیل شده است که پیوندهای هیدروژنی قوی بین و درون مولکولی را تشکیل می‌دهند (Holt et al., 1973). علاوه بر این، لیگنین حاوی گروه‌های عاملی کربوکسیل، کربونیل و متوکسی است که به الیاف گیاه خواص آبدوستی و جذب آب قوی می‌دهد (Kumar et al., 2009). برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی الیاف مورد بررسی در این پژوهش به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.



شکل ۹ ساختار الیاف گیاهی طبیعی (Madsen, 2004)

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی الیاف‌های گیاهی طبیعی

مرجع	پکتین (درصد)	همی سلولز (درصد)	لیگنین (درصد)	سلولز (درصد)	نام الیاف
(Forteza-Verdejo et al., 2017; Rana et al., 2014; Rowell, 2008)	۰/۶	۵/۷	<۲	۸۲/۷-۹۰	کتان
	۰/۹	۱۵-۲۲/۴	۳/۷-۱۰	۶۸-۷۴/۴۰	کنف
	۰/۲-۱۰	۱۳/۶-۲۱	۱۲-۲۶/۹۰	۴۵-۷۱	جوت
	۲-۱۰	۱۲	۹/۹	۶۴-۶۷	سبزال
	۳-۴	۲۲/۳۰-۲۹/۱۰	۲۴-۳۶/۴۰	۳۴/۳۰-۵۳/۶۰	نارگیل
	۱۳/۲۰	۲۱/۱۰	۲۰/۳۰	۴۵/۳۰	بامبو
		۱۹	۵	۶۲-۶۴	موز
	۰/۶-۰/۸	۲۰-۲۵	۱۸-۲۴	۴۵-۵۵	باگاس

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی الیاف‌های گیاهی طبیعی

مرجع	ازدیاد طول (درصد)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	میزان رطوبت (درصد)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	نام الیاف
(Rana et al., 2014; Dittenber et al., 2012; Kabir et al., 2012)	۱/۱۶-۱/۵۰	۶-۱۳	۲۸۷-۸۰۰	۸	۱/۵۰-۱/۶۰	کتان
	۱/۵-۲/۷	۱۴/۵-۵۳	۲۲۳-۹۳۰	۹-۱۲	۱/۴	کنف
	۱/۲-۱/۵۰	۱۳-۲۶/۵۰	۳۹۳-۷۷۳	۱۲/۶۰	۱/۳-۱/۴	جوت
	۲-۷	۹-۳۸	۳۶۳-۷۰۰	۱۰-۲۲	۱/۳۳-۱/۵	سیزال
	۱۵-۵۱/۵	۲/۸-۶	۹۵-۲۳۰	۸	۱/۱۵-۱/۴۶	نارگیل
	۲/۵- ۳/۷	۱۱-۱۷	۱۴۰-۲۳۰	۸/۹	۰/۶-۱/۱	بامبو
	۳	۲۷-۳۲	۵۲۹-۹۱۴	۸/۷-۱۲	۱/۴	موز
	۰/۹	۱۵-۱۹	۱۸۰-۲۹۰		۱/۲	باگاس

برای الیاف سلولزی، می‌تواند مقاومت در دمای بالا، خصوصیات در دمای پایین را افزایش داده و همچنین حساسیت در برابر رطوبت را نیز کاهش دهد.

الیاف کنف

پیرمحمد و همکاران (Pirmohammad et al., 2020a) طی پژوهشی دریافتند که اضافه نمودن الیاف کناف به طول ۸ میلی‌متر به مقدار ۰,۳ درصد در مخلوط آسفالتی متراکم^{۳۱}، مقاومت ترک خوردگی مخلوط آسفالتی را در دمای پایین افزایش می‌دهد. در مطالعه دیگری که توسط پیرمحمد و همکاران انجام گردید (Pirmohammad et al., 2020b)، عملکرد مخلوط آسفالتی اصلاح شده با الیاف کناف و پشم بز در دمای پایین در نسبت‌های ۰,۱، ۰,۲ و ۰,۳ درصد وزن مخلوط و طول‌های ۴، ۸ و ۱۲ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفت. این مطالعه نتیجه گرفت که افزودن کناف به طول ۸ میلی‌متر و الیاف پشم به طول ۴ میلی‌متر به طور قابل توجهی انرژی شکست مخلوط آسفالتی را در دمای پایین بهبود می‌بخشد. هاینین و همکاران (Hainin et al., 2018) تایید نمودند که معرفی الیاف کناف ۳۰ میلی‌متری به مخلوط آسفالتی متراکم، نسبت استحکام کششی و مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی را

خصوصیات مکانیکی روسازی آسفالتی مسلح شده با

الیاف گیاهی طبیعی

الیاف کتان

وی‌وی (Weiwei, 2015) دریافت که الیاف کتان برای بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل دمای بالا روسازی آسفالتی مفید است. افزایش سفتی قیر می‌تواند مقاومت در برابر شیارشدگی آن را بهبود بخشد (de Sousa Neto et al., 2022). در مقابل، چقرمگی، کارپذیری و تراکم‌پذیری را کاهش می‌دهد (Sobhi et al., 2022). لی و همکاران (Li et al., 2022) کشف نمودند که میزان الیاف کتان به طور قابل توجهی بر سفتی و چقرمگی قیر تأثیر می‌گذارد و با در نظر گرفتن خصوصیات جامع قیر آسفالت اصلاح شده با الیاف کتان دریافتند که مقدار بهینه آن ۱٪ است. علاوه بر این، کایپینگ و همکاران (Kaiping et al., 2020) به این نتیجه رسیدند که مقاومت برشی^{۳۰} و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالتی حاوی الیاف کتان به ترتیب ۱۷,۱ و ۳۱,۹ درصد بیشتر از مخلوط آسفالتی حاوی الیاف لیگنین است. لیو و همکاران (Liu et al., 2020) در مطالعه‌ای که بر روی مخلوط آسفالتی حاوی الیاف کتان انجام دادند دریافتند که الیاف کتان به عنوان یک جایگزین بالقوه

فضای خالی هوا، مدول برجهندگی و استحکام کششی غیرمستقیم می‌گردد، در حالی که نسبت استحکام کششی اندکی کاهش یافته است.

الیاف سیزال

کار و همکاران (Kar et al., 2019) استفاده عملی از الیاف سیزال و خاکستر بادی در مخلوط آسفالت متراکم و SMA را از نظر مقاومت مارشال ارزیابی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که افزودن ۰/۳ درصد الیاف سیزال مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد. در مطالعه مشابهی، کومار (Kumar and Ravitheja, 2019) مشاهده کرد که پایداری و استحکام کششی آسفالت ماستیک سنگی کنترل تقریباً با آسفالت ماستیک سنگی حاوی ۰/۳ درصد الیاف سیزال قابل مقایسه است. سینگ و همکاران (Singh et al., 2022) به این نتیجه رسیدند که استفاده از ۰/۴ درصد الیاف سیزال، ۰/۳ درصد الیاف نارگیل و ۰/۳ درصد الیاف کاه برنج در SMA به طور قابل توجهی استحکام کششی و مقاومت مارشال SMA را بهبود می‌بخشد و ریزش قیر نیز کاهش می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر رامالینگام و همکاران در سال ۲۰۱۷ کاربرد الیاف سیزال را در بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی ارزیابی کردند (Ramalingam et al., 2017). چهار طول و درصد مختلف الیاف سیزال به مخلوط‌های آسفالتی اضافه شد و اثرات آن‌ها بر مقاومت مارشال، روانی^{۲۴} و درصد فضای خالی بتن آسفالتی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار کمی الیاف سیزال باعث بهبود خستگی و مقاومت در برابر رطوبت بتن آسفالتی شد. بر طبق نتایج این مطالعه، درصد و طول الیاف بهینه به ترتیب ۰/۰۵ درصد (وزن مصالح سنگی) و ۱۵ میلی‌متر بود. الیاف سیزال به عنوان یک الیاف طبیعی ضد آب، می‌تواند جایگزین الیاف سلولزی سنتی در SMA و بتن آسفالتی به عنوان تثبیت کننده شود.

الیاف نارگیل

حریاتی و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر الیاف کوار و نارگیل را بر مقاومت مارشال و مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی متخلخل^{۲۵} مطالعه کردند (Haryati et al., 2019). نتایج نشان داد که ترکیب ۱۰ درصد کوار و ۰/۳ درصد الیاف نارگیل می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت مارشال و مقاومت در برابر

افزایش می‌دهد. صیفیقه و همکاران (Syafiqah et al., 2021) متوجه افزایش قابل توجهی در مدول برجهندگی^{۲۶}، مقاومت مارشال و پایداری دینامیکی آسفالت SMA تقویت شده با الیاف کفاف به میزان ۰/۲ درصد شد. مصری و همکاران (Masri et al., 2022) بیان کرد که افزودن الیاف کفاف به مخلوط آسفالت متخلخل با دوز ۰/۶ درصد وزنی مخلوط، مدول برجهندگی مخلوط آسفالت را افزایش داد.

الیاف جوت

قوش و بانرجی کاربرد کامپوزیت‌های جوت-قیر را در روسازی آسفالتی مورد مطالعه قرار دادند (Banerhee and Ghosh, 2008). مشاهده شد که کامپوزیت جوت-قیر استحکام بالاتری از خود نشان می‌دهد، بنابراین می‌تواند به طور موثر مقاومت در برابر ترک خوردگی را بهبود بخشد. قوش و رائو در سال ۲۰۲۰ طی پژوهشی عنوان نمودند که ترک خوردگی انعکاسی یک مشکل عمده در روکش‌های آسفالتی است (Ghosh and Rao, 2020). استفاده از لایه مصنوعی ژئوتکنیکی بین روسازی قدیمی و لایه پوششی جدید می‌تواند به طور موثری ترک‌های انعکاسی را کاهش دهد. نتایج مطالعه نشان داد که الیاف جوت به عنوان یک الیاف طبیعی و سازگار با محیط‌زیست با خصوصیات مکانیکی مناسب، می‌تواند به عنوان ماده اولیه مناسب برای محصولات ژئوتکستایل پوشش آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد کاملاً مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست است. به گفته شنبارا و همکاران (Shanbara et al., 2018a,b) استفاده از الیاف جوت به طول ۱۴ میلی‌متر به مقدار ۰/۳۵ درصد وزن مخلوط، در مخلوط آسفالت سرد به طور قابل توجهی مقاومت در برابر شیارشدگی و استحکام کششی غیر مستقیم^{۲۷} مخلوط آسفالتی را بهبود بخشیده است. اسماعیل و همکاران (Ismael et al., 2022) نشان دادند که اصلاح SMA با الیاف جوت به طول ۷/۵ میلی‌متر و به میزان ۰/۵ درصد بر حسب وزن مخلوط، به طور قابل توجهی مقاومت در برابر شیارشدگی و پایداری دینامیکی را افزایش داده و ریزش قیر SMA را کاهش می‌دهد. گالو و همکاران (Gallo et al., 2021) تایید نمودند که افزودن الیاف جوت ۲۰ میلی‌متری به مقدار ۰/۲ درصد وزنی مخلوط به مخلوط آسفالتی باعث افزایش درصد

همکاران (Xia et al., 2021; 2024) عملکرد SMA و HMA ترکیب شده با الیاف لیگنین و بامبو را ارزیابی نمودند. نویسندگان متوجه شدند که دوام SMA بهتر از آسفالت مخلوط گرم متراکم است. با این حال، تأثیر مثبت استفاده از لیگنین و بامبو بر سیکل‌های ذوب و یخبندان تقریباً یکسان بود. محققان اظهار داشتند که مخلوط الیاف بامبو در مخلوط آسفالتی منجر به عملکرد بهتر پیری نسبت به مخلوط اصلاح شده با الیاف لیگنین شده است. بر اساس یافته‌های به دست آمده توسط جیا و همکاران (Jia et al., 2021)، گنجاندن الیاف بامبو در یک مخلوط آسفالتی به نسبت ۰٫۳ درصد وزن مخلوط به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک‌خوردگی ناشی از خستگی مخلوط آسفالتی را بهبود بخشید. منگ و همکاران (Meng et al., 2022) دریافتند که اصلاح قیر با الیاف بامبو، SBS و قیر حاوی ۳ درصد وزنی قیر سوپا منجر به عملکرد بهتری نسبت به قیر اصلاح شده با ۵ درصد SBS از نظر خصوصیات رئولوژیکی دارد.

الیاف موز

استفاده از الیاف موز به عنوان مسلح‌کننده در مخلوط‌های آسفالتی در ۳ سال گذشته افزایش یافته است. کومار و همکاران (shiva Kumar et al., 2019) به این نتیجه رسیدند که اصلاح SMA با ۰٫۳٪ وزنی مخلوط الیاف موز، مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک‌خوردگی را افزایش و ریزش قیر SMA را کاهش می‌دهد. داکاستا و همکاران (Ferreira da Costa et al., 2021) SMA اصلاح شده با الیاف موز را در طول‌ها و نسبت‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. عملکرد برتر از نظر استحکام کششی غیرمستقیم، مدول دینامیکی، مدول برجهندگی و ریزش قیر با افزودن الیاف موز به طول ۲۰ میلی‌متر به نسبت ۰٫۳ درصد وزنی مخلوط SMA مشاهده شد. در مطالعه دیگری که توسط داکاستا و همکاران انجام شد (Ferreira da Costa et al., 2020)، افزودن الیاف موز به طول ۲۰ میلی‌متر و به میزان ۰٫۳ درصد وزنی مخلوط به SMA، مقاومت مارشال و استحکام کششی غیرمستقیم را افزایش داد.

شیارشده‌گی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشید. کومار و راویتهجا در سال ۲۰۱۹ طی مطالعه‌ای تأثیر افزودنی‌های الیاف طبیعی (الیاف پوسته نارگیل، الیاف سیزال و الیاف موز) را بر روی خواص مخلوط آسفالتی SMA مورد مطالعه قرار دادند (Kumar and Ravitheja, 2019). بهینه بودن افزودن ۰٫۳٪ از الیاف نارگیل در تمامی ترکیب‌ها اثبات شد. خساونه و الیاسین (Khasawneh and Alyaseen, 2020) متوجه شدند که افزودن الیاف نارگیل با دوز ۰٫۴ درصد وزنی مصالح سنگی، مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، محققان بیان نمودند که الیاف نارگیل تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات حجمی مخلوط آسفالتی دارد. ماهاراج و همکاران (Maharaj et al., 2019) دریافتند که افزودن الیاف نارگیل به طول ۲٫۵ میلی‌متر به عنوان اصلاح‌کننده قیر به نسبت ۶ درصد وزنی قیر، خصوصیات رئولوژیکی قیر را از نظر مقاومت در برابر تغییرشکل و رفتار الاستیک بهبود می‌بخشد. در مطالعه‌ای که توسط پارمیتا (Parimita, 2020) انجام شد، مقاومت مارشال آسفالت SMA تقویت شده با ۰٫۳ درصد الیاف نارگیل و الیاف موز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن الیاف نارگیل و موز به صورت توأم به طور قابل توجهی مقاومت مارشال را بهبود می‌بخشد.

الیاف بامبو

شنگ و همکاران (sheng et al., 2019) در پژوهشی به بررسی استفاده از الیاف بامبو، لیگنین و پلی‌استر در مخلوط آسفالتی متراکم و SMA پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن ۰٫۲٪ الیاف بامبو به آسفالت متراکم و ۰٫۴٪ به SMA منجر به بروز عملکرد بهتری نسبت به مخلوط شاهد و مخلوط اصلاح شده با الیاف پلی‌استر و لیگنین شد. به طور مشابه، لیو و همکاران (Liu et al., 2021) عملکرد آسفالت حاوی ۰٫۴٪ لیگنین و ۰٫۳٪ الیاف بامبو را بررسی کردند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که هر دو الیاف خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی را در دمای پایین، دمای بالا و حساسیت به رطوبت بهبود می‌بخشند. با این حال، محققان اظهار داشتند که الیاف بامبو به طور قابل توجهی خصوصیات حرارتی مخلوط آسفالتی را بهبود می‌دهد. علاوه بر این، نویسندگان متوجه شدند که افزودن الیاف بامبو و لیگنین عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را که در معرض پیری طولانی‌مدت قرار دارند، بهبود می‌دهد. ژیا و

الیاف باگاس

ژانگ در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی دریافت که مخلوط آسفالتی حاوی ۳ درصد الیاف، دارای مقاومت قابل توجهی در برابر تغییر شکل دمای بالا می‌باشد (Zhang, 2020). لی و همکاران در سال ۲۰۲۰ گزارش دادند که افزودن الیاف باگاس به مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند تا حد زیادی مقاومت در دمای بالا و مقاومت در برابر ترک در دمای پایین مخلوط‌ها را بهبود بخشد. همچنین بیان کردند که در مقایسه با لیگنین، الیاف باگاس از نظر حرارتی پایدارتر است (Li et al., 2020). منصور و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی ۰,۳ درصد دوز الیاف باگاس را به عنوان تثبیت‌کننده به مخلوط‌های آسفالتی اضافه کردند و دریافتند که عمق شیارگی مخلوط‌های آسفالتی ۱۶ درصد کاهش یافت. این نشان داد که الیاف باگاس خصوصیات دمای بالای آسفالت را بهبود می‌دهد (Mansor et al., 2018). احمد و همکاران در سال ۲۰۲۲ پژوهشی با هدف

بررسی عملکرد الیاف بامبو و الیاف باگاس نیشکر بر خصوصیات مکانیکی مخلوط HMA انجام دادند (Ahmed et al., 2022). نتایج این مطالعه نشان داد که هر دو الیاف زمانی که به میزان ۰,۳ درصد به مخلوط آسفالتی اضافه می‌گردند، مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت در برابر شیارشدگی را بهتر اصلاح می‌کنند. در نهایت بر اساس این مطالعه ثابت شد که عملکرد و خصوصیات بتن آسفالتی تحت تأثیر نوع الیاف و مقدار آن است. در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۲۲ اکارش و همکاران (Akarsh et al., 2022) دریافتند که مخلوط‌های SMA حاوی ۵٪ وزنی مخلوط خاکستر باگاس نیشکر در برابر بارهای تکراری بیشتر از تمام مخلوط‌های آزمایش شده مقاومت می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که مقاومت در برابر رطوبت مخلوط SMA تا جایگزینی ۷,۵٪ خاکستر باگاس نیشکر بهبود یافته است. جدول ۳ نشان‌دهنده عملکردهای مکانیکی الیاف طبیعی اضافه شده در انواع مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد.

جدول ۳. عملکرد مکانیکی الیاف طبیعی اضافه شده در انواع مخلوط‌های آسفالتی

مرجع	عملکرد مکانیکی	طول به کار رفته (میلی‌متر)	مقدار به کار رفته (درصد وزنی)	اضافه شدن به	نام الیاف
(Liu et al., 2020)	افزایش مقاومت مارشال افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی دمای پایین افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی	۸-۴	۰/۲	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	کتان
(Li et al., 2022)	افزایش ویسکوزیته افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی بهبود مقاومت حرارتی قیر	۶-۴	۱-۳ (قیر)	قیر	کتان
(Li et al., 2022)	افزایش ویسکوزیته افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی	۱۰-۸	۱-۳ (قیر)	قیر	کتان
(Pirmohammad et al., 2020)	افزایش انرژی شکست افزایش چقرمگی شکست مد ۱	۱۲ و ۸ و ۴	۰-۱/۳	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	کنف
(Syafiqah et al., 2021)	افزایش مقاومت مارشال کاهش درصد فضای خالی هوا افزایش سفتی افزایش مدول برجهندگی	۱۰	۰-۰/۶	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	کنف

مرجع	عملکرد مکانیکی	طول به کار رفته (میلی متر)	مقدار به کار رفته (درصد وزنی)	اضافه شدن به	نام الیاف
	افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی				
(Sani et al., 2011)	افزایش مقاومت مارشال افزایش دوام	۳۰-۱۰	۵-۱ گرم	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	کنف
(Arshad et al., 2016)	افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش مدول دینامیکی کاهش درصد قیر بهینه	۶	-	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	کنف
(Pirmohammad et al., 2020)	افزایش انرژی شکست مد ۱ و ۲ افزایش چقرمگی شکست مد ۱ و ۲	۱۲، ۸ و ۴	۰-۱/۳	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	کنف
(Pirmohammad et al., 2020)	کاهش مدول برجهندگی افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی کاهش حساسیت به رطوبت	۳۰	۰-۱/۳ (مصلح)	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	کنف
(Pirmohammad and Mengharpey, 2020)	افزایش انرژی شکست افزایش چقرمگی شکست	۰٫۸	۰/۳ و ۰/۵ و ۰/۱	مخلوط آسفالت متراکم (WMA)	کنف
(Danoshini et al., 2021)	افزایش درصد فضای خالی هوا کاهش مدول برجهندگی	-	۰/۷ و ۰/۵ و ۰/۳	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	کنف
(Mansourian et al., 2016)	افزایش انرژی شکست مد ۱ و مد ترکیبی ۱ و ۲	۲۰	۰/۷ و ۰/۵ و ۰/۳	مخلوط آسفالت متراکم (WMA)	جوت
(Hassan et al., 2021)	افزایش مقاومت مارشال افزایش میزان قیر بهینه کاهش روانی کاهش درصد فضای خالی هوا	۲۰	۱ و ۰/۵	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	جوت
(Gallo et al., 2023)	افزایش درصد فضای خالی هوا با به کار بردن الیاف ۱۰ میلی متری افزایش مدول سفتی	۲۰ و ۱۰	۰/۳-۰/۱۰	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	جوت
(Gallo et al., 2021)	افزایش درصد فضای خالی هوا کاهش ITS افزایش مدول سفتی افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی	۲۰	۰/۳-۰/۱۰	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	جوت
(Kar et al., 2019)	افزایش مقاومت مارشال کاهش روانی کاهش درصد فضای خالی هوا کاهش ریزش قیر افزایش TSR	۱۰	۰/۴-۰/۳	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	سیزال

مرجع	عملکرد مکانیکی	طول به کار رفته (میلی متر)	مقدار به کار رفته (درصد وزنی)	اضافه شدن به	نام الیاف
(Karahancer et al., 2019)	افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم افزایش TSR	۳۰-۱۰۰۰	۱-۳	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	سیزال
(Razahi and Chopra, 2020)	افزایش مقاومت مارشال کاهش روانی افزایش درصد فضای خالی هوا کاهش ریزش قیر	۸۰۰-۱۲۰۰	۰-۲/۵	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	سیزال
(Namala and Penki, 2019)	افزایش TSR افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش مدول برجهندگی افزایش عمر خستگی	-	۰-۱/۵	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	سیزال
(Singh et al., 2022)	افزایش مقاومت مارشال کاهش روانی افزایش TSR افزایش ITS کاهش ریزش قیر	-	۰- ۰/۴	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	سیزال
(Kumar and Sunitha, 2016)	افزایش مقاومت مارشال افزایش روانی افزایش درصد فضای خالی هوا	۶	۰-۱/۵	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	سیزال
(Akhil and Ramu, 2019)	افزایش مقاومت مارشال افزایش روانی	۵	۰-۱/۵	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	سیزال
(Makendran, 2024)	افزایش عمر خستگی افزایش روانی افزایش درصد فضای خالی هوا	۷/۱۷-۵/۵	۰-۰/۳ (مصالح)	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	سیزال
(Meenia and Kaushal, 2022)	افزایش مقاومت مارشال کاهش تخلخل کاهش روانی	۲۰-۸	۰-۱/۷ (مصالح)	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	سیزال
(Oda et al., 2012)	کاهش ریزش قیر افزایش مقاومت کششی افزایش مدول برجهندگی	-	۰/۳ و ۰/۵	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	نارگیل
(Hadiwardoyo, 2013)	کاهش TSR افزایش مقاومت مارشال افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی	۱۲-۵/۵	۰/۱-۵/۵ (قیر)	قیر	نارگیل

مرجع	عملکرد مکانیکی	طول به کار رفته (میلی متر)	مقدار به کار رفته (درصد وزنی)	اضافه شدن به	نام الیاف
(Vale et al., 2014)	کاهش ریزش قیر افزایش مقاومت کششی افزایش مدول برجهندگی کاهش عمر خستگی	۴۰-۳۰	۰-۵/۷ (مصلح)	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	نارگیل
(Panda et al., 2013)	کاهش ریزش قیر افزایش مقاومت کششی افزایش مدول برجهندگی افزایش TSR	۳۵-۲۰	۰-۰/۷ (مصلح)	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	نارگیل
(Wan et al., 2019)	بهبود مقاومت در برابر لغزش افزایش مدول برجهندگی افزایش روانی	-	۰-۵/۷	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	نارگیل
(Khasawneh and Alyaseen, 2020)	افزایش مقاومت مارشال افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم	۱۰	۰-۰/۶ (مصلح)	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	نارگیل
(Rachman and Syammaun, 2019)	کاهش نفوذ پذیری کاهش ریزش قیر	۱۰-۱۵	۱ و ۳ و ۵ (قیر)	مخلوط آسفالت متخلخل	نارگیل
(Haryati et al., 2019)	افزایش مقاومت مارشال افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی	-	۰/۳ و ۰/۵	مخلوط آسفالت متخلخل	نارگیل
(Maharaj et al., 2019)	افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی	۲۵-۱۰۰	۰-۸ (قیر)	قیر	نارگیل
(Yousif et al., 2023)	افزایش سفتی افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش ویسکوزیته	-	۰-۱۰ (قیر)	قیر	نارگیل
(Liu et al., 2021)	افزایش مقاومت حرارتی افزایش مٹاومت در برابر ترک خوردگی افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی	-	۰/۳-۰/۶	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	بامبو
(Jia et al., 2021)	افزایش مقاومت برشی افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش مقاومت در برابر ترک خستگی	۶	۰-۰/۵ (قیر)	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	بامبو
(Sheng et al., 2019)	افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی افزایش TSR	۶	۰-۲/۵	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	بامبو
(Xia et al., 2021)	افزایش مقاومت در برابر خستگی افزایش چقرمگی شکست افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی	۸-۴	۰-۲/۶	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	بامبو
(Yu et al., 2021)	افزایش مقاومت مارشال افزایش مقاومت کششی	۲۰	۰/۲	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	بامبو

مرجع	عملکرد مکانیکی	طول به کار رفته (میلی متر)	مقدار به کار رفته (درصد وزنی)	اضافه شدن به	نام الیاف
	افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه				
(Ahmed et al., 2022)	افزایش مقاومت مارشال افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم	-	۰/۰-۲/۵	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	بامبو
(Xie et al., 2023)	افزایش سفتی افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی	۱	۳ و ۶ و ۹	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	بامبو
(Ferreira da Costa et al., 2020)	کاهش ریزش قیر افزایش مقاومت در برابر ترک خستگی افزایش عمر خستگی افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی	۲۰-۵	۰/۳	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	موز
(Ferreira da Costa et al., 2021)	کاهش ریزش قیر افزایش TSR افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش مقاومت مارشال	۲۰-۰	۰/۳	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	موز
(Kumar and Ravitheja, 2019)	افزایش ITS افزایش TSR	-	۰-۰/۴	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	موز
(Parimita, 2020)	افزایش روانی افزایش مقاومت مارشال کاهش درصد فضای خالی هوا	-	۰/۳	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	موز
(Shiva Kumar et al., 2019)	کاهش ریزش قیر افزایش ITS	۲۰-۳	۰-۱/۵	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	موز
(Ahmed et al., 2022)	افزایش مقاومت مارشال افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم	-	۰-۲/۵	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	باگاس
(Mansor et al., 2018)	کاهش میزان قیر بهینه کاهش ریزش قیر افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش مدول دینامیکی	۶	۰/۳	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه‌ای (SMA)	باگاس
(Li et al., 2020)	افزایش پایداری حرارتی افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی	۳۰- ۵۰	۰/۲	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	باگاس
(Xie et al., 2024)	افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی افزایش مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی	-	۰/۳	مخلوط آسفالت متراکم (HMA)	باگاس

مرجع	عملکرد مکانیکی	طول به کار رفته (میلی متر)	مقدار به کار رفته (درصد وزنی)	اضافه شدن به	نام الیاف
(Mendonca et al., 2021)	افزایش مقاومت کششی افزایش مدول برجهنگی افزایش مقاومت مارشال کاهش ریزش قیر	۲۰	۰/۳	مخلوط آسفالت ماستیک سنگدانه ای (SMA)	باگاس

۵- نتیجه گیری

شناخت هر یک از الیاف طبیعی پرکاربرد جهت استفاده در روسازی آسفالتی ضروری می باشد. استفاده از الیاف طبیعی می تواند خواص مکانیکی و دوام روسازی های آسفالتی را بهبود بخشد. همچنین، بررسی رفتار مکانیکی روسازی آسفالتی حاوی هر یک از این الیاف به تصمیم گیری محققان و دست اندرکاران در انتخاب بهتر گزینه های موجود برای بالا بردن کیفیت روسازی راه های کشور کمک شایانی می نماید. به همین علت، این پژوهش با هدف معرفی برخی از پرکاربردترین الیاف طبیعی گیاهی شناخته شده در جهان و بررسی خصوصیات مکانیکی مخلوط های آسفالتی مسلح شده با این الیاف انجام گرفته است. برای دستیابی به این اهداف، ابتدا به بررسی طبقه بندی الیاف طبیعی گیاهی پرداخته شد. این طبقه بندی شامل بررسی و تحلیل انواع مختلف الیاف طبیعی از جمله الیاف گیاهی و دسته بندی آن ها بر اساس ویژگی ها و خواص فیزیکی و شیمیایی می باشد. در این مرحله، الیاف گیاهی نظیر کتان، کنف، جوت و سیزال که از مهم ترین و پرکاربردترین الیاف طبیعی در صنعت روسازی محسوب می شوند، به طور دقیق معرفی و مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه، ویژگی ها و رفتار مکانیکی مخلوط های آسفالتی مسلح شده با این الیاف در برابر خرابی های گوناگون نظیر شیارشدگی، ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. شیارشدگی یکی از مهم ترین مشکلاتی است که در روسازی های آسفالتی به وجود می آید و بررسی تأثیر الیاف طبیعی در کاهش این مشکل، اهمیت زیادی دارد. همچنین، ترک خوردگی و حساسیت رطوبتی از دیگر مسائلی هستند که دوام و عمر مفید روسازی را تحت تأثیر قرار می دهند و

استفاده از الیاف طبیعی می تواند بهبود قابل توجهی در این زمینه ها ایجاد کند. این بررسی ها به ما امکان می دهد تا نه تنها شناخت عمیق تری از قابلیت ها و محدودیت های هر یک از این الیاف در کاربردهای روسازی آسفالتی پیدا کنیم، بلکه می تواند راهنمایی عملی برای بهبود کیفیت و دوام روسازی های موجود ارائه دهد. به این ترتیب، می توان با استفاده از یافته های این پژوهش، الیاف مناسب تری را برای شرایط مختلف محیطی و ترافیکی انتخاب کرده و به افزایش عمر مفید و عملکرد بهتر روسازی های آسفالتی در کشور کمک کرد. در نتیجه، این تحقیق می تواند به عنوان یک مرجع علمی و کاربردی برای محققان، مهندسان و تصمیم گیران حوزه راه سازی و روسازی مورد استفاده قرار گیرد و نقش مهمی در ارتقاء کیفیت و کارایی زیرساخت های حمل و نقل کشور ایفا نماید. به صورت کلی می توان نتایج زیر را ارائه داد:

- الیاف گیاهی طبیعی خصوصیات رئولوژیکی در دمای بالا، خاصیت خستگی و مقاومت برشی قیر را بهبود بخشید.
- الیاف گیاهی طبیعی به طور قابل توجهی عملکرد در دمای بالا و خستگی مخلوط های آسفالتی را افزایش داد، اما افزایش قابل توجهی در عملکرد دمای پایین و حساسیت به رطوبت نشان نداد.
- استفاده از الیاف گیاهی طبیعی در مخلوط های آسفالتی متخلخل و SMA به طور قابل توجهی باعث کاهش ریزش قیر و بهبود عملکرد مکانیکی مخلوط های آسفالتی می شود.
- افزودن الیاف گیاهی طبیعی به مخلوط های آسفالتی متخلخل، درصد فضای خالی و نفوذپذیری را کاهش می دهد.

۷- پی‌نوشت‌ها

1. Fatigue Cracking
2. Crumb Rubber
3. Ethylene-vinyl acetate (EVA)
4. Natural Plant Fibers
5. Lignin
6. Open Graded
7. Stone Mastic Asphalt (SMA)
8. Drain Down
9. Moisture Susceptibility
10. Rutting
11. Reflection Cracking
12. Greenhouse Gases (GHG)
13. Bast Fiber
14. Jute Fiber
15. Cotton Fiber
16. Hemp Fiber
17. Ramie Fiber
18. Flame Retardant
19. Seed Fiber
20. Coconut Fiber
21. Leaf Fiber
22. Sisal Fiber
23. Bagasse fiber
24. Cellulose
25. Lignin
26. Pectin
27. Bamboo Fiber
28. Banana Fiber
29. Hemicellulose
30. Shear Strength
31. Dense Graded Asphalt Mixture
32. Resilient Modulus
33. Indirect Tensile Strength
34. Flow
35. Porous Asphalt Mixture

به نظر می‌رسد الیاف طبیعی سفتی قیر را افزایش می‌دهند و در نتیجه مخلوط‌های سفت‌تر با عمر خستگی طولانی‌تری ایجاد می‌کنند. استفاده از الیاف طبیعی گیاهی در زمینه مهندسی عمران علی‌الخصوص روسازی و مهندسی راه به طور قابل توجهی به ویژه در پنج سال اخیر در حال افزایش است، با این حال، هنوز خلا‌های پژوهشی زیادی در ادبیات تحقیق وجود دارد که باید برطرف شود. فقدان اطلاعاتی همچون عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تقویت‌شده با الیاف طبیعی در معرض پیری طولانی‌مدت همچنان حس می‌شود. علاوه بر این، توانایی تجزیه زیستی الیاف طبیعی و تأثیر آن بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مورد توجه قرار نگرفته است. علاوه بر این، دوره تجزیه الیاف طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی در ادبیات تحقیق ارزیابی نشده است. اثر جذب روغن قیر و اجزای سبک توسط الیاف بر مقاومت در برابر پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی به خوبی مورد توجه قرار نگرفته است. از دیگر مواردی که می‌توان آن را ذکر کرد عملکرد دمای پایین SMA و مخلوط آسفالت متخلخل ترکیب شده با الیاف طبیعی می‌باشد که به خوبی مورد بررسی قرار نگرفته است. علاوه بر این، تأثیر دانه بندی درشت‌تر یا ریزتر مخلوط‌های آسفالتی متراکم بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با الیاف نیز باید ارزیابی شود. با توجه موارد بیان شده می‌توان پیشنهادات ذکر شده را جهت پیشنهاد برای آیندگان ارائه نمود.

-عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف طبیعی گیاهی که در معرض پیرشدگی طولانی مدت قرار دارند باید ارزیابی شود. -دوره تجزیه الیاف طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی باید مشخص شود.

-تأثیر تنش کرنش و نوع بارگذاری بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تقویت‌شده با الیاف طبیعی گیاهی باید ارزیابی شود. عملکرد مخلوط آسفالت متخلخل SMA اصلاح شده با الیاف طبیعی گیاهی در دمای پایین باید مورد بررسی قرار گیرد. -تأثیر دانه‌بندی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف طبیعی گیاهی باید بررسی شود. -ترکیب الیاف طبیعی گیاهی و مصنوعی در مخلوط‌های آسفالتی باید ارزیابی شود.

۸- مراجع

- Abiola, O. S., Kupolati, W. K., Sadiku, E. R., & Ndambuki, J. M. (2014). Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review. *Construction and Building Materials*, 54, 305-312.
- Abtahi, S. M., Sheikhzadeh, M., & Hejazi, S. M. (2010). Fiber-reinforced asphalt-concrete-a review. *Construction and Building Materials*, 24(6), 871-877.
- Ahmed, K. U., Geremew, A., & Jemal, A. (2022). The comparative study on the performance of bamboo fiber and sugarcane bagasse fiber as modifiers in asphalt concrete production. *Heliyon*, 8(7).

- Banerjee, P. K., & Ghosh, M. (2008). Studies on jute-asphalt composites. *Journal of applied polymer science*, 109(5), 3165-3172.
- Banga, H., Singh, V. K., & Choudhary, S. K. (2015). Fabrication and study of mechanical properties of bamboo fibre reinforced bio-composites. *Innovative Systems Design and Engineering*, 6(1), 84-98.
- Baradaran, M. S., Qazanfari, R., & Baradaran, S. (2023). Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule. *Materials Research Express*, 10(5), 055202.
- Baradaran, S., & Aliha, M. R. M. (2025). Mode I and Mode II fracture assessment of green asphalt pavements containing plastic waste and RAP at low and intermediate temperature. *Results in Engineering*, 25, 103734.
- Baradaran, S., & Ameri, M. (2023). Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies.
- Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A., & Underwood, B. S. (2024). Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature. *Construction and Building Materials*, 449, 138426.
- Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M., & Maleki, A. (2024). Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02740.
- Bhat, F. S., Gilani, T. A., Din, I. M. U., Aziz, G., Mir, M. S., Shah, A. H., & Mudasir, P. (2024). Integration of nano Al₂O₃ and nano SiO₂ in asphalt mixes: A comprehensive performance and durability evaluation. *Construction and Building Materials*, 412, 134687.
- Bhatnagar, R., Gupta, G., & Yadav, S. (2015). A review on composition and properties of banana fibers. *Cellulose*, 60, 65.
- Bismarck, A., Mishra, S., & Lampke, T. (2005). Plant fibers as reinforcement for green composites. In *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, CR Press. 52-128.
- Boopalan, M., Umapathy, M. J., & Jenyfer, P. (2012). A comparative study on the mechanical properties of jute and sisal fiber reinforced polymer composites. *Silicon*, 4, 145-149.
- Akarsh, P. K., Ganesh, G. O., Marathe, S., & Rai, R. (2022). Incorporation of Sugarcane Bagasse Ash to investigate the mechanical behavior of Stone Mastic Asphalt. *Construction and Building Materials*, 353, 129089.
- Akhil, N., & Ramu, P. (2019). Experimental investigations on the rut resistant surface layer with inclusion of marble dust and sisal fibers. *Materials Today: Proceedings*, 18, 3233-3246.
- Al Faruque, M. A., Salauddin, M., Raihan, M. M., Chowdhury, I. Z., Ahmed, F., & Shimo, S. S. (2022). Bast fiber reinforced green polymer composites: A review on their classification, properties, and applications. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 8006-8021.
- Allen Cooley Jr, L., Ray Brown, E., & Watson, D. E. (2000). Evaluation of open-graded friction course mixtures containing cellulose fibers. *Transportation Research Record*, 1723(1), 19-25.
- Amirnia, M., Sheikhi, M., Talebi, N., Pournoori, P., & Rajaei, A. (2024). Evaluation of hardened properties of structural concrete containing waste tiles and volcanic ash. In 5th. International Congress on Engineering, Technology & Applied Sciences, Auckland, New Zealand.
- Arash Rajaei, Nafiseh Talebi, Saeed Abrishami, the impacts of freeze-thaw cycles on polypropylene fiber-reinforced clayey soil stabilized with alkali-activated fly ash, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 22, 2025, e04439, ISSN 2214-5095
- Araújo Junior, C. P., Coaquira, C. A. C., Mattos, A. L. A., de Souza Filho, M. D. S. M., Feitosa, J. P. D. A., Moraes, J. P. S. D., & de Freitas Rosa, M. (2018). Binderless fiberboards made from unripe coconut husks. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 2245-2254.
- Arshad, A. K., Mansor, S., Shafie, E., & Hashim, W. (2016). Performance of stone mastic asphalt mix using selected fibres. *Jurnal Teknologi*, 78(7-2).
- Ayar, P., Baradaran, S., & Abdipour, V. S. (2022). A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA).
- Balighi, M., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. (2024). Numerical investigation of swelling soil behavior and its effect on gas well casing internal forces based on unsaturated soil mechanics, case study: Khangiran, Sarakhs. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*.

- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., & Tassin, B. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Marine pollution bulletin*, 104(1-2), 290-293.
- Echols, J. B. (1989). New mix method for fiber-reinforced asphalt. *Public Works*, 119(8).
- Elms, M. K., Green, C. J., & Johnson, P. N. (2001). Variability of cotton yield and quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(3-4), 351-368.
- Farahinia, E., Sheikhi, M., Amirhossein, D. T. Q., Rajaei, A., Ghodratnama, M., Banihashem, S. M., & Pournoori, P. (2024). Experimental and numerical exploration of mechanical properties of sawdust concrete due to the addition of waste glass powder. *International journal of sustainable building technology and urban development*, 15(3), 328-353.
- Farina, A., Ruffino, B., Kutay, E., & Ancil, A. (2024). Leaching behavior of metals from asphalt mixtures modified with crumb rubber from scrap tires. *Waste Management*, 179, 44-54.
- Fatemi, S., Zarei, M., Ziaee, S. A., Shad, R., Saadatjoo, S. A., & Tabasi, E. (2023). Low and intermediate temperatures fracture behavior of amorphous poly alpha olefin (APAO)-modified hot mix asphalt subjected to constant and variable temperatures. *Construction and Building Materials*, 364, 129840.
- Ferreira da Costa, L., Grangeiro de Barros, A., Lucena, L. C. D. F. L., & Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena, A. (2021). Asphalt mixture reinforced with banana fibres. *Road Materials and Pavement Design*, 22(8), 1881-1893.
- Ferreira da Costa, L., Lucena, L. C. D. F. L., Lucena, A. E. D. F. L., & Grangeiro de Barros, A. (2020). Use of banana fibers in SMA mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(1), 04019341.
- Forteza-Verdejo, M., Bumbaris, E., Burgstaller, C., Bismarck, A., & Lee, K. Y. (2017). Plant fibre-reinforced polymers: where do we stand in terms of tensile properties? *International Materials Reviews*, 62(8), 441-464.
- Gallo, P., Belhaj, M., & Valentin, J. (2023). Laboratory Study of Asphalt Concrete for Base Course with Reclaimed Asphalt, Recycling Agents, and Jute Fibres. *Applied Sciences*, 14(1), 239.
- Buritatum, A., Suddeepong, A., Akkharawongwhatthana, K., Horpibulsuk, S., Yaowarat, T., Hoy, M. & Rashid, A. S. A. (2023). Hemp fiber-modified asphalt concretes with reclaimed asphalt pavement for low-traffic roads. *Sustainability*, 15(8), 6860.
- Bystriakova, N., & Kapos, V. (2005). Bamboo diversity: The need for a Red List review. *Biodiversity*, 6(4), 12-16.
- Chattopadhyay, D. P. (1998). Introduction, chemistry and preparatory processes of jute. *Colourage*, 45(5).
- Chen, X., Liu, G., & Wang, X. (2018). Research progress on sisal fiber reinforced cement-based composite materials. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 37(11), 3481-3486.
- Cheng, Y., Li, L., Zhang, Y., Lv, Z., & Zhu, C. (2019). Quantitative analysis of effect and interaction of diatomite and basalt fiber on asphalt performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(12), 04019306.
- Choudhary, R., Kumar, V., Kumar, A., Pathak, S., & Kumar, A. (2022, April). Use of banana natural fiber as a stabilizing additive in open graded friction course. In *Recent Developments in Sustainable Infrastructure (ICRDSI-2020)—GEO-TRA-ENV-WRM: Conference Proceedings from ICRDSI-2020 Vol. 2*, 371-382. Singapore: Springer Singapore.
- Dang, L. C., Fatahi, B., & Khabbaz, H. (2016). Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. *Procedia engineering*, 143, 658-665.
- Danoshini, G., Baqadeem, A., Al-Shakhrit, A. K. S., Jasni, N. E., & Masri, K. A. (2021). Statistical analysis of stone mastic asphalt incorporating kenaf fibre. *Construction*, 1(1), 12-17.
- De Sousa Neto, V. F., Lucena, L. C. D. F. L., de Barros, A. G., Lucena, A. E. D. F. L., & Marinho Filho, P. G. T. (2022). Rheological evaluation of asphalt binder modified with zinc oxide nanoparticles. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01224.
- Dittenber, D. B., & GangaRao, H. V. (2012). Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1419-1429.

of asphalt mixtures. *Civil and Environmental Research*, 3(4), 63-73.

-Hainin, M. R., Idham, M. K., Yaro, N. S. A., Hussein, S. O. A. E., Warid, M. N. M., Mohamed, A., ... & Ramadhansyah, P. J. (2018, April). Performance of hot mix asphalt mixture incorporating kenaf fibre. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 140, p. 012092). IOP Publishing.

-Hao, G., He, M., Lim, S. M., Ong, G. P., Zulkati, A., & Kapilan, S. (2024). Recycling of plastic waste in porous asphalt pavement: Engineering, environmental, and economic implications. *Journal of Cleaner Production*, 440, 140865.

-Haryati, Y., Norhidayah, A. H., Nordiana, M., Juraidah, A., Hayati, A. N., Ramadhansyah, P. J., & Haryati, A. (2019, February). Stability and rutting resistance of porous asphalt mixture incorporating coconut shells and fibres. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 244, No. 1, p. 012043). IOP Publishing.

-Hassan, H. F., & Al-Jabri, K. S. (2005). Effect of organic fibers on open-graded friction course mixture properties. *International Journal of Pavement Engineering*, 6(1), 67-75.

-Hassan, M., Rashid, M., Danish, A., & Ahmed, A. (2021). The effect of using jute fiber on deformation resistance of asphalt concrete. *Proceedings of the CSCE*, 21.

-He, W., Zhao, Z., Yuan, J., & Xiao, F. (2023). Recent development of ethylene-vinyl acetate modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 363, 129800.

-Holt, C., Mackie, W., & Sellen, D. B. (1973). Degree of polymerization and polydispersity of native cellulose. In *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia* (Vol. 42, No. 3, pp. 1505-1512). New York: Wiley Subscription Services, Inc., a Wiley Company.

-Hong, H., Zhang, H., & Zhang, S. (2020). Effect of multi-dimensional nanomaterials on the aging behavior of asphalt by atomic force microscope. *Construction and Building Materials*, 260, 120389.

-Islam, M. S., & Ahmed, S. K. (2012). The impacts of jute on environment: An analytical review of Bangladesh. *Journal of environment and earth science*, 2(5), 24-31.

-Gallo, P., Valentin, J., & Mondschein, P. (2021, November). Asphalt Concrete for Binder Courses with Different Jute Fibre Content. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, Vol. 1203, No. 3, 032041.

-Gassan, J., & Bledzki, A. K. (1997). The influence of fiber-surface treatment on the mechanical properties of jute-polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28(12), 001-1005.

-Ghosh, M., & Rao, G. V. (2020). Study on comparative performance of different pavement models incorporated with newly developed jute geotextiles under static loading. *SN Applied Sciences*, 2(5), 797.

-Gogoi, R., Biligiri, K. P., & Das, N. C. (2016). Performance prediction analyses of styrene-butadiene rubber and crumb rubber materials in asphalt road applications. *Materials and Structures*, 49, 3479-3493.

-Guo, B., Zhang, T., Zhang, W., & Dou, Y. (2019). Influence of surface flame-retardant layer containing ammonium polyphosphate and expandable graphite on the performance of jute/polypropylene composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135, 2367-2375.

-Guo, F., Li, R., Lu, S., Bi, Y., & He, H. (2020). Evaluation of the effect of fiber type, length, and content on asphalt properties and asphalt mixture performance. *Materials*, 13(7), 1556.

-Guo, F., Shen, Z., Jiang, L., Long, Q., & Yu, Y. (2024). Study on the Performance of Asphalt Modified with Bio-Oil, SBS and the Crumb Rubber Particle Size Ratio. *Polymers*, 16(13), 1929.

-Gupta, A., Rodriguez-Hernandez, J., & Castro-Fresno, D. (2019). Incorporation of additives and fibers in porous asphalt mixtures: A review. *Materials*, 12(19), 3156.

-Gupta, M. K., Ramesh, M., & Thomas, S. (2021). Effect of hybridization on properties of natural and synthetic fiber-reinforced polymer composites (2001-2020): A review. *Polymer Composites*, 42(10), 4981-5010.

-Hadiwardoyo, S. P. (2013). Evaluation of the addition of short coconut fibers on the characteristics

- Kumar, S., Mohanty, A. K., Erickson, L., & Misra, M. (2009). Lignin and its applications with polymers. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 3(1), 1-24.
- L. Kaiping, L. Jiarong, L. Zuzhong, L. Yvxuan, C. Sai, (2017). Experimental study on cotton straw fiber modified asphalt mortar, *Appl. Chem. Eng.* 46 (01), 132-135.
- doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2017.01.016**
- Landi, D., Marconi, M., Bocci, E., & Germani, M. (2020). Comparative life cycle assessment of standard, cellulose-reinforced and end of life tires fiber-reinforced hot mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119295.
- Lewin, M. (2006). *Handbook of Fiber Chemistry*. Crc press.
- Li, H., Han, Y., Guangxun, E., Sun, Y., Wang, L., Liu, X. & Lin, Z. (2024). Recycling of waste polyethylene in asphalt and its performance enhancement methods: A critical literature review. *Journal of Cleaner Production*, 142072.
- Li, Y., Hao, P., Zhao, C., Ling, J., Wu, T., Li, D. & Sun, B. (2021). Anti-rutting performance evaluation of modified asphalt binders: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 339-355.
- Li, Z., Guo, T., Chen, Y., Liu, J., Ma, J., Wang, J., & Jin, L. (2022). Study on pavement performance of cotton straw cellulose modified asphalt. *Materials Research Express*, 9(2), 025508.
- Li, Z., Zhang, X., Fa, C., Zhang, Y., Xiong, J., & Chen, H. (2020). Investigation on characteristics and properties of bagasse fibers: Performances of asphalt mixtures with bagasse fibers. *Construction and Building Materials*, 248, 118648.
- Lim, S. M., He, M., Hao, G., Ng, T. C. A., & Ong, G. P. (2024). Recyclability potential of waste plastic-modified asphalt concrete with consideration to its environmental impact. *Construction and Building Materials*, 439, 137299.
- Liu, J., Li, Z., Chen, H., Guan, B., & Liu, K. (2020). Investigation of cotton straw fibers for asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020105.
- Ismael, M., Fattah, M. Y., & Jasim, A. F. (2022). Permanent deformation characterization of stone matrix asphalt reinforced by different types of fibers. *Journal of Engineering*, 28(2), 99-116.
- Jia, H., Sheng, Y., Lv, H., Kim, Y. R., Zhao, X., Meng, J., & Xiong, R. (2021). Effects of bamboo fiber on the mechanical properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 289, 123196.
- Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883-2892.
- Kar, D., Giri, J. P., & Panda, M. (2019). Performance evaluation of bituminous paving mixes containing sisal fiber as an additive. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 6, 189-206.
- Karahancı, Ş., Erişkin, E., Saltan, M., Terzi, S., Sarioğlu, O., & Küçükcapraz, D. Ö. (2019). Investigating the Utility Of Sisal In Hot Mix Asphalt As A Fiber. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(4), 906-912.
- Kathari, P. M., Sandra, A. K., & Sravana, P. (2018). Experimental investigation on the performance of asphalt binders reinforced with basalt fibers. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3, 1-9.
- Khasawneh, M. A., & Alyaseen, S. K. (2020). Analytic methods to evaluate bituminous mixtures enhanced with coir/coconut fiber for highway materials. *Materials Today: Proceedings*, 33, 1752-1757.
- Kowalski, K. J., Król, J., Radziszewski, P., Casado, R., Blanco, V., Pérez, D. & Wayman, M. (2016). Eco-friendly materials for a new concept of asphalt pavement. *Transportation Research Procedia*, 14, 3582-3591.
- Kumar, N. K., & Ravitheja, A. (2019). Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives. *Materials today: proceedings*, 19, 397-402.
- Kumar, N. R., & Sunitha, V. (2016). Experimental investigation of stone mastic asphalt with sisal fiber. *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*, 5, 546-550.

- Meenia, R., & Kaushal, M. (2022). A Study of Asphalt Mixes with Natural Fibre (Sisal Fiber) By Experiment. *International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology*, 10(3), 131-135.
- Mendonça, A. M. G. D., Neto, O. D. M. M., Rodrigues, J. K. G., de Lima, R. K. B., Silva, I. M., de Sousa Neto, V. F., & Guerra, T. D. (2021). Effect of the incorporation of sugarcane bagasse fibers in asphalt mixture dosed by the Superpave method. *Research, Society and Development*, 10(13), e80101320878-e80101320878.
- Meng, Y., Qin, P., Yaseen, M., Chen, J., Yan, T., Gan, W., & Li, J. (2022). Effect of tannic acid modified bamboo fiber on the performance of soybean bio asphalt/styrene butadiene styrene modified asphalt. *Polymer Composites*, 43(4), 2288-2302.
- Mera, F. A. T., & Xu, C. (2014). Plantation management and bamboo resource economics in China. *Ciencia y Tecnología*, 7(1), 1-12.
- Milad, A., Taib, A. M., Ahmeda, A. G., Solla, M., & Yusoff, N. I. M. (2020). A review of the use of reclaimed asphalt pavement for road paving applications. *Jurnal Teknologi*, 82(3).
- Namala, A., & Penki, R. (2019). Influence of sisal fiber on resilient modulus of hot mix asphalt with addition of marble dust. *J. Civ. Constr. Eng.*, 5(1), 8-23.
- Niri, S. R., Akhtarpour, A., Daliri, F., & Baradaran, M. S. (2024). Experimental investigation of dewatering silty tailings using electrokinetic method. *Canadian Geotechnical Journal*, (ja).
- Nurhanian, N., Syarifuddin, S., Armynah, B., & Tahir, D. (2023). Fiber-reinforced polymer composite: higher performance with renewable and eco-friendly plant-based fibers. *Polymers from Renewable Resources*, 14(3), 215-233.
- Oda, S., Fernandes Jr, J. L., & Ildefonso, J. S. (2012). Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 26(1), 13-20.
- Oda, S., Fernandes Jr, J. L., & Ildefonso, J. S. (2012). Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt
- Liu, K. P., Li, J. R., Li, Z. C., Gao, Q. H., Li, Z. X., & Chen, Q. (2017). Experimental study on cotton straw fiber modified asphalt mortar. *Applied Chemical Industry*, 46, 132-135.
- Liu, K., Li, T., Wu, C., Jiang, K., & Shi, X. (2021). Bamboo fiber has engineering properties and performance suitable as reinforcement for asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 290, 123240.
- Liu, Y., Xie, J., Wu, N., Ma, Y., Menon, C., & Tong, J. (2019). Characterization of natural cellulose fiber from corn stalk waste subjected to different surface treatments. *Cellulose*, 26, 4707-4719.
- Ma, X., Li, Q., Cui, Y. C., & Ni, A. Q. (2018). Performance of porous asphalt mixture with various additives. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(4), 355-361.
- Madsen, B. (2004). Properties of plant fiber yarn polymer composites: an experimental study. *Technical University of Denmark*.
- Maharaj, R., Ali, R., Ramlochan, D., & Mohamed, N. (2019). Utilization of coir fibre as an asphalt modifier. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 35(2), 59-74.
- Makendran, C. (2024, June). Bituminous mixes using Sisal fibre for controlling the fatigue cracks in rural roads in India. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing. Vol. 1326, No. 1, 012061.
- Mansor, S., Zainuddin, N. I., Aziz, N. A., Razali, M., & Joohari, M. I. (2018, October). Sugarcane bagasse fiber—An eco-friendly pavement of SMA. In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, Vol. 2020, No. 1.
- Mansourian, A., Razmi, A., & Razavi, M. (2016). Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers. *Construction and Building Materials*, 117, 37-46.
- Masri, K. A., Katini, N. H., Arshad, A. K., Shahnewaz, S., & Ferdaus, R. (2022). Microstructure analysis of porous asphalt incorporating kenaf fiber in the pavement. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1191-1195.

(pure mode III) in eco-friendly steel fiber-reinforced self-compacting concrete with waste tempered glass as coarse aggregates. *Scientific Reports*, 14(1), 9043.

–Preethi, S., & Ravichandran, P. T. (2024). Laboratory Investigation on Nanomaterial Modified Bituminous Concrete Mixes with Reclaimed Asphalt Pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1-15.

–Rachman, F., & Syammaun, T. (2019, November). Evaluation of asphalt porous mixture properties due to addition of Arenga pinnata and coconut fibers. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, *IOP Publishing*. Vol. 674, No. 1, 012022.

Rajaei, A., Sadeghzadeh, M., Shekhi, M., & Yousefi, M. (2025). Enhancing the Mechanical Properties of Sawdust Concrete with Silica Fume, Metakaolin, and Marble Powder. *Journal of Civil Aspects and Structural Engineering*, 2(1), 1-13.

–Ramalingam, S., Murugasan, R., & Nagabhushana, M. N. (2017). Laboratory performance evaluation of environmentally sustainable sisal fibre reinforced bituminous mixes. *Construction and Building Materials*, 148, 22-29.

–Rana, S., Pichandi, S., Parveen, S., & Fangueiro, R. (2014). Natural plant fibers: production, processing, properties and their sustainability parameters. *Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing: Eco-Friendly Raw Materials, Technologies, and Processing Methods*, 1-35.

–Rao, G. V., Kumar, J. S., & Banerjee, P. K. (2000). Characterization of a braided strip drain with coir and jute yarns. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(6), 367-384.

–Razahi, M., & Chopra, A. (2020). An experimental investigation of using sisal fiber and coir fiber as an additive in stone matrix asphalt. *International Journal of Advance Science and Technology*, 29(10S), 5111-5128.

–Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). Hot mix asphalt materials, *Mixture Design and Construction*.

–Rowell, R. M. (2008). Natural fibres: types and properties. In Properties and performance of natural-fibre Composites, *Wood head publishing*. 3-66.

–Ru, S., Zhao, C., & Yang, S. (2022). Multi-objective optimization and analysis of mechanical properties of

mixtures. *Construction and Building Materials*, 26(1), 13-20.

–Onuaguluchi, O., & Banthia, N. (2016). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96-108.

–Panda, H. (2011). *Bamboo Plantation and Utilization Handbook*: Asia Pacific Business Press Inc.

–Panda, M., Suchismita, A., & Giri, J. (2013). Utilization of ripe coconut fiber in stone matrix asphalt mixes. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2(4), 289-302.

–Pargar, J., Akhtarpour, A., & Baradaran, M. S. (2024). An Unsaturated Soil Mechanics-Based Numerical and Experimental Method to Assess Soil Settlement Due to Ground Water Level Rise. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1-26.

–Parimita, P. (2020, November). Influence of Natural Fibers as Additive on Characteristics of Stone Mastic Asphalt. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, *IOP Publishing*, Vol. 970, No. 1, 012021.

–Park, P., El-Tawil, S., Park, S. Y., & Naaman, A. E. (2015). Cracking resistance of fiber reinforced asphalt concrete at – 20 C. *Construction and Building Materials*, 81, 47-57.

–Peltonen, P. V. (1991). Characterization and testing of fibre-modified bitumen composites. *Journal of materials science*, 26, 5618-5622.

–Pinkofsky, L., & Jansen, D. (2018). Structural pavement assessment in Germany. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12, 183-191.

–Pirmohammad, S., Shokorlou, Y. M., & Amani, B. (2020a). Laboratory investigations on fracture toughness of asphalt concretes reinforced with carbon and kenaf fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, 226, 106875.

–Pirmohammad, S., Shokorlou, Y. M., & Amani, B. (2020b). Influence of natural fibers (kenaf and goat wool) on mixed mode I/II fracture strength of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 239, 117850.

–Pournoori, P., Davarpanah TQ, A., Rajaei, A., Ghodrtnama, M., Abrishami, S., & Masoodi, A. R. (2024). Experimental exploration of fracture behavior

- Singh, S., Khairandish, M. I., Razahi, M. M., Kumar, R., Chohan, J. S., Tiwary, A., & Zakaria, S. Z. S. (2022). Preference index of sustainable natural fibers in stone matrix asphalt mixture using waste marble. *Materials*, 15(8), 2729.
- Sobhi, S., Hesami, S., Poursoltani, M., Ayar, P., & Mullapudi, R. S. (2022). Coupled effects of gilsonite and Sasobit on binder properties: Rheological and chemical analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(3), 04021470.
- Su, Z., Muhammad, Y., Sahibzada, M., Li, J., Meng, F., Wei, Y. & Zhang, L. (2019). Preparation and properties of aminated graphene fiber incorporated modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 229, 116836.
- Sultan, S. A., & Guo, Z. (2016). Evaluating the performance of sustainable perpetual pavements using recycled asphalt pavement in China. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 5(3), 200-209.
- Syafiqah, S. N., Masri, K. A., Jasni, N. E., & Hasan, M. (2021, February). Performance of stone mastic asphalt incorporating Kenaf fiber. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 641, No. 1, p. 012001). *IOP Publishing*.
- Tareghian, B., Baradaran, M. S., & Akhtarpour, A. (2024). The effect of sand-crumb rubber mixture treatment on the seismic response of a low-rise building located on liquefiable soil. *Discover Geoscience*, 2(1), 11.
- Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2021). A preliminary laboratory evaluation on the use of shredded cigarette filters as stabilizing fibers for stone mastic asphalts. *Applied Sciences*, 11(12), 5674.
- Vale, A. C. D., Casagrande, M. D. T., & Soares, J. B. (2014). Behavior of natural fiber in stone matrix asphalt mixtures using two design methods. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(3), 457-465.
- Vijay, R., Singaravelu, D. L., Vinod, A., Sanjay, M. R., & Siengchin, S. (2019). Characterization of alkali-treated and untreated natural fibers from the stem of parthenium hysterophorus. *Journal of Natural Fibers*.
- Vinod, A., Vijay, R., Singaravelu, D. L., Sanjay, M. R., Siengchin, S., Yagnaraj, Y., & Khan, S. (2021). Extraction and characterization of natural fiber from stem of cardiospermum halicababum. *Journal of Natural Fibers*, 18(6), 898-908.
- coir fiber from coconut forest waste. *Forests*, 13(12), 2033.
- Ruan, Y. L. (2007). Rapid cell expansion and cellulose synthesis regulated by plasmodesmata and sugar: insights from the single-celled cotton fibre. *Functional Plant Biology*, 34(1), 1-10.
- SachinYadav, G. G., & Bhatnagar, R. (2015). A review on composition and properties of bagasse fibers. *Cellulose*, 45, 55.
- Salimi, A., Kamboozia, N., & Aliha, M. R. M. (2024). Experimental Investigation of the self-healing capability of Roller-Compacted Concrete (RCC) containing epoxy-filled glass tubes through fracture properties. *Case Studies in Construction Materials*, e03369.
- Sani, M. A., ABD LATIB, A. Z., Ng, C. P., Yusof, M. A., Ahmad, N., & Rani, M. A. M. (2011). Properties of coir fibre and kenaf fibre modified asphalt mixes. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 9, 1274-1285.
- Sarayu, K., Gopinath, S., Ramachandra, M. A., & Iyer, N. R. (2016). Structural stability of basalt fibers with varying biochemical conditions-a invitro and invivo study. *Journal of Building Engineering*, 7, 38-45.
- Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites—a review. *Journal of composite materials*, 46(8), 973-986.
- Shanbara, H. K., Ruddock, F., & Atherton, W. (2018a). A laboratory study of high-performance cold mix asphalt mixtures reinforced with natural and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, 172, 166-175.
- Shanbara, H. K., Ruddock, F., & Atherton, W. (2018b). Predicting the rutting behaviour of natural fibre-reinforced cold mix asphalt using the finite element method. *Construction and Building Materials*, 167, 907-917.
- Sheng, Y., Zhang, B., Yan, Y., Li, H., Chen, Z., & Chen, H. (2019). Laboratory investigation on the use of bamboo fiber in asphalt mixtures for enhanced performance. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 4629-4638.
- Shiva Kumar, G., Shankar, A. R., & Ravi Teja, B. V. S. (2019). Laboratory evaluation of SMA mixtures made with polymer-modified bitumen and stabilizing additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(4), 04019026.

- Xue, Q., Feng, X. T., Liu, L., Chen, Y. J., & Liu, X. L. (2013). Evaluation of pavement straw composite fiber on SMA pavement performances. *Construction and Building Materials*, 41, 834-843.
- Yang, S., Zhu, H., Tan, Q., Yang, X., Chen, Y., & Lei, L. (2024). Application of TOR as a secondary modifier for the preparation of crumb rubber modified asphalt with excellent storage stability. *Construction and Building Materials*, 428, 135863.
- Yazdi, A. N., Akhtarpour, A., Abdalhusein, M. M., & Baradaran, M. S. (2024). Experimental investigation of the volume change of a swelling clay and its improvement. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(3), 1008-1031.
- Ye, Q. S., Wu, S. P., Chen, Z., & Liu, Z. F. (2008). Rheological properties of asphalt mixtures containing various fibers. *Journal of Central South University of Technology*, 15, 333-336.
- Yousif, R. A., Tayh, S. A., & Jasim, A. F. (2023). The Effect of Coconut Powder on Asphalt Binder Performance under Laboratory Conditions. *Journal of Engineering & Technological Sciences*, 55(5).
- Yu, D., Jia, A., Feng, C., Liu, W., Fu, T., & Qiu, R. (2021). Preparation and mechanical properties of asphalt mixtures reinforced by modified bamboo fibers. *Construction and Building*
- Zhang, H., Duan, H., Zhu, C., Chen, Z., & Luo, H. (2021). Mini-review on the application of nanomaterials in improving anti-aging properties of asphalt. *Energy & Fuels*, 35(14), 11017-11036.
- Zhang, Y., 2020. Study on Surface Modification of Bagasse Fiber and Properties of Asphalt Slurry. Chang'an University, Xi'an.
- Ziaee, S. A., & Behnia, K. (2020). Evaluating the effect of electric arc furnace steel slag on dynamic and static mechanical behavior of warm mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123092.
- Ziaee, S. A., Fatemi, S., Zarei, M., & Fini, E. H. (2023). Introduction of calcium lignosulfonate to delay aging in bituminous mixtures. *Construction and Building Materials*, 400, 132798.
- Vinod, A., Vijay, R., Singaravelu, D. L., Sanjay, M. R., Siengchin, S., Yagnaraj, Y., & Khan, S. (2021). Extraction and characterization of natural fiber from stem of *cardiospermum halicababum*. *Journal of Natural Fibers*, 18(6), 898-908.
- Wan, C. N. C., Ting, T. L., & Jaya, R. P. (2019). Chemical and physical properties of coconut fiber in asphalt mixture: A review.
- Wang, G., Qu, P., Huang, H., Wu, G., & Yan, H. (2020). Evaluation of Coconut Coir Dust/Modified Urea-Formaldehyde Resins as a Growing Medium for Pepper Seedlings. *HortTechnology*, 30(3), 322-330.
- Wang, W. M., Cai, Z. S., & Yu, J. Y. (2008). Study on the chemical modification process of jute fiber. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 3(2), 155892500800300203.
- Weiwei L. (2015). Study on performance of asphalt mixture with cotton stalk fiber: Chang'an University.
- Xia, C., Wu, C., Liu, K., & Jiang, K. (2021). Study on the durability of bamboo fiber asphalt mixture. *Materials*, 14(7), 1667.
- Xia, C., Xu, M., Li, Q., Liu, K., & Jiang, K. (2024). Study on the Freeze-Thaw Cycle Durability of Bamboo Fiber Asphalt Mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 17(3), 535-548.
- Xie, H., Jia, Y., Zhu, C., Liu, W., Li, Z., & Huang, Z. (2024a). Investigation of Surface Modification of Bagasse Fibers: Performance of Asphalt Binders/Mixtures with Bagasse Fibers. *Buildings*, 14(5), 1352.
- Xie, J., Zhao, X., Liu, Y., Ge, D., Wang, S., Ding, Z., & Lv, S. (2024b). Microbial treatment of waste crumb rubber: Reducing energy consumption and harmful emissions during asphalt production process. *Journal of Cleaner Production*, 142778.
- Xie, T., Ren, W., Chen, Y., Sheng, J., & Wang, L. (2023). Enhancing the Performance of Asphalt Mastic with Natural Fiber Reinforcement: Basalt and Bamboo Fibers. *Applied Sciences*, 13(13), 7946.

Review of the Mechanical Properties of Asphalt Pavement Reinforced with Natural Plant Fibers as an Eco-Friendly Solution in Pavement Engineering

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

*Seyed Ali Ziaee, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

E-mail: sa-ziaee@um.ac.ir

Received: January 2025- Accepted: April 2025

ABSTRACT

Considering the environmental problems caused by asphalt pavement, such as greenhouse gas emissions and the high consumption of non-renewable resources, it is crucial to address environmental issues in road and pavement engineering. The use of natural plant fibers as an eco-friendly method compatible with the goals of sustainable development in this field has gained acceptance among researchers and engineers. Fibers such as jute, cotton, banana, coconut, and hemp help reduce the consumption of non-renewable materials and lower carbon emissions since they are sourced from renewable resources. Additionally, natural plant fibers enhance the mechanical properties of asphalt pavements, increasing their durability and service life. This, in turn, reduces the need for frequent maintenance and conserves resources. The current research aimed to investigate the latest developments in using natural plant fibers in asphalt pavement. It began with an overview of basic information about natural fibers, including their types, compositions, and physical, mechanical, and chemical properties. The study then examined the rheological properties, low-temperature performance, fatigue resistance, and shear strength of bitumen modified with natural plant fibers. It also evaluated the mechanical performance of asphalt mixtures modified with these fibers, including high and low-temperature performance, moisture susceptibility, and fatigue resistance. The findings introduced natural fibers as an eco-friendly and promising modifier in asphalt pavement.

Keywords: Asphalt Pavement, Natural Plant Fibers, Mechanical Performance, Eco-Friendly Modifiers, Sustainability