

## بررسی تأثیر تابش اشعه فرابنفش بر پیرشدگی و رئولوژی و تغییرات ساختاری قیر در روسازی‌های آسفالتی

### مقاله علمی - پژوهشی

\* ندا کامبوزیا (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
الهام صفری، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
محمد رضا خاکباز، دانشجوی دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [nkamboozia@iust.ac.ir](mailto:nkamboozia@iust.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۸۰-۶۱

### چکیده

روسازی‌های آسفالتی، به عنوان یکی از اجزای اصلی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، همواره در معرض عوامل محیطی مختلفی مانند تابش فرابنفش قرار دارند. این نوع تابش به دلیل انرژی بالای خود، عاملی کلیدی در پدیده پیرشدگی قیر است که منجر به کاهش دوام و طول عمر روسازی می‌شود. با وجود تأثیر مخرب این پدیده، هنوز استانداردهای جامع و کافی برای ارزیابی آن تدوین نشده است. این مقاله، با هدف تبیین مکانیسم و پیامدهای پیرشدگی ناشی از تابش فرابنفش، به بررسی تغییرات ایجاد شده در خواص شیمیایی، رئولوژیکی و مکانیکی قیر و مخلوط‌های آسفالتی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که تابش فرابنفش با ایجاد رادیکال‌های آزاد و آغاز واکنش‌های زنجیره‌ای اکسیداسیون، باعث سخت شدن قیر، کاهش انعطاف‌پذیری و تضعیف مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دماهای پایین و بارهای تکراری می‌شود. همچنین، بررسی‌های میکروسکوپی حاکی از تغییرات قابل توجه در ریخت‌شناسی و ساختار سطحی آسفالت است که منجر به کاهش چسبندگی و تضعیف عملکرد خودترمیمی آن می‌شود. در ادامه، چالش‌های شبیه‌سازی آزمایشگاهی این پدیده و تأثیر پارامترهایی مانند طول موج، شدت تابش و ضخامت نمونه مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت، با توجه به اهمیت این موضوع به‌ویژه در مناطق با تابش خورشیدی بالا، راهکارهایی مانند استفاده از افزودنی‌های ضدپیرشدگی و اصلاح‌کننده‌های پلیمری برای افزایش مقاومت روسازی‌ها پیشنهاد شده است. این پژوهش، گامی مهم در جهت شناخت دقیق مکانیسم پیرشدگی نوری آسفالت و تدوین استانداردهای جدید برای افزایش دوام و کاهش هزینه‌های نگهداری زیرساخت‌های حمل‌ونقل است.

واژه‌های کلیدی: پیرشدگی قیر، تابش فرابنفش، روسازی آسفالتی، رئولوژی قیر

### ۱- مقدمه

با این حال، عملکرد و دوام این روسازی‌ها به شدت تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد. در میان این عوامل، تابش خورشیدی و به‌ویژه بخش فرابنفش آن، به دلیل انرژی بالای خود، یکی از

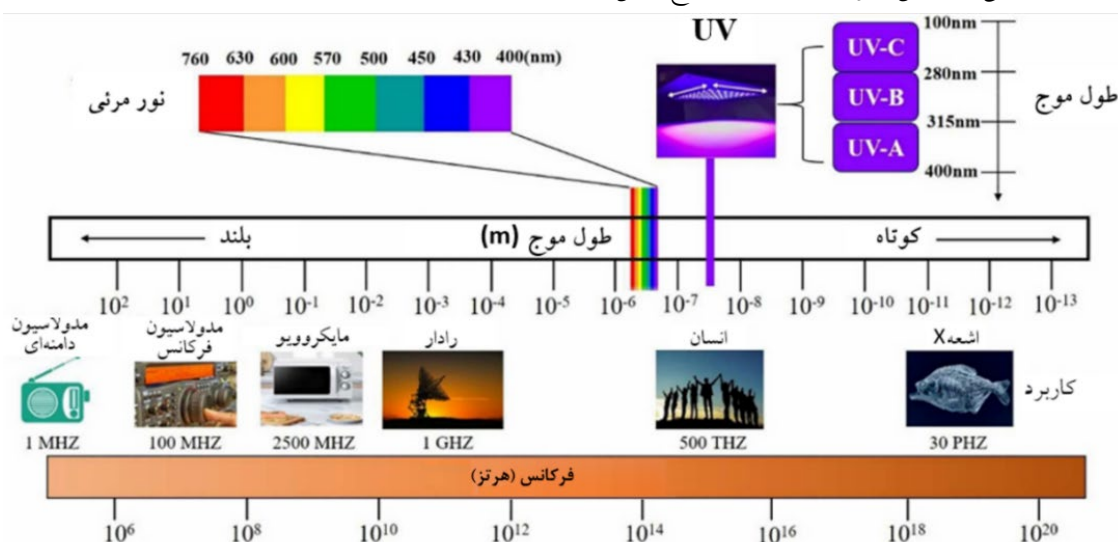
روسازی‌های آسفالتی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای زیرساخت حمل‌ونقل، نقشی حیاتی در توسعه اقتصادی، جابجایی ایمن و کارآمد و پایداری شبکه‌های شهری و بین‌شهری دارند.

می‌رسد، عمدتاً شامل نور فرابنفش (۴۰۰-۱۰۰۰ نانومتر)، نور مرئی (۷۰۰-۴۰۰ نانومتر) و تابش فروسرخ (۷۰۰ نانومتر-۱ میلی‌متر) است (Abouelsaad, White & Jamshidi, 2024). در میان این موارد، اشعه فرابنفش، نور مرئی و تابش فروسرخ به ترتیب تقریباً ۵، ۴۲ و ۴۹ درصد از کل انرژی خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد را تشکیل می‌دهند (Eltbaakh et al. 2011).

شکل ۱ تابش فرابنفش را که بر اساس طول موج به سه دسته UV-A (۴۰۰-۳۱۵ نانومتر)، UV-B (۳۱۵-۲۸۰ نانومتر) و UV-C (۲۸۰-۱۰۰ نانومتر) دسته‌بندی می‌شود را نشان می‌دهد (Guzmán, Sevilla, & Salas, 2023). UV-A که بخش عمده‌ای از اشعه فرابنفش خورشیدی را تشکیل می‌دهد، به عمق پوسته نفوذ می‌کند و با پیری زودرس مرتبط است. UV-B، با انرژی بیشتر، در درجه اول بر لایه‌های بیرونی پوسته تأثیر می‌گذارد و باعث آفتاب سوختگی و آسیب به DNA می‌شود. لایه اوزون تابش UV-C را جذب کرده و در نتیجه مسیر آن را به سطح زمین مسدود می‌کند (Yang et al. 2023a; Verma et al. 2024). به طور کلی، تابش خورشیدی با طول موج‌های کوتاه‌تر از ۳۰۰ نانومتر به طور عمده توسط لایه اوزون، اکسیژن، بخار آب و دیگر اجزای اتمسفر مسدود می‌شود که در نتیجه عملاً هیچ تابشی زیر ۳۰۰ نانومتر به سطح زمین نمی‌رسد (Lu & Khalil, 1996).

مهم‌ترین محرک‌های تخریب و کاهش عمر خدمت‌دهی به شمار می‌رود. پدیده پیرشدگی قیر در اثر این تابش، از سطح روسازی آغاز شده و به تدریج ساختار شیمیایی، ریزساختار و خواص مکانیکی آسفالت را تغییر می‌دهد. این فرآیند اگرچه به طور مستقیم بر کیفیت روسازی و هزینه‌های نگهداری آن تأثیرگذار است، اما در مقایسه با سایر انواع پیرشدگی، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته و استانداردهای کافی برای ارزیابی آن تدوین نشده است. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش شدت تابش فرابنفش در بسیاری از نقاط جهان، درک عمیق‌تر از مکانیسم‌های تأثیر این تابش بر قیر و مخلوط‌های آسفالتی بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. بررسی علمی این پدیده نه تنها می‌تواند به توسعه راهکارهای حفاظتی و انتخاب مواد مقاوم‌تر کمک کند، بلکه گامی مهم در جهت افزایش دوام روسازی‌ها و کاهش هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از خرابی زودرس خواهد بود (Xu et al., 2024; He et al., 2025; Liu et al., 2024).

تابش خورشیدی شامل امواج الکترومغناطیسی ساطع شده از خورشید است که طیف وسیعی از طول موج‌ها را در بر می‌گیرد. این طول موج‌ها را می‌توان به اشعه گاما، اشعه ایکس، اشعه فرابنفش، نور مرئی، تابش فروسرخ، مایکروویو و امواج رادیویی طبقه‌بندی کرد. تابش خورشیدی با عبور از جو زمین، در معرض جذب، پراکندگی و انعکاس توسط اجزای جوی قرار دارد. در نتیجه، بخشی از تابش خورشیدی که به سطح زمین



شکل ۱. توزیع طیف خورشیدی (He et al., 2025)

محاسبه شدت تابش فرابنفش شامل عواملی چون زاویه ارتفاع خورشید، طول موج تابش فرابنفش، شرایط جوی، موقعیت جغرافیایی و زمان است (Matzarakis, Rutz & Mayer, 2010; Capizzi, Napoli & Bonanno, 2012; Li et al. 2013; Fan et al., 2019). به طور کلی، محاسبات شدت تابش فرابنفش نیاز به داده‌های هواشناسی پیچیده و دقیقی دارد و بنابراین توسط هواشناسان و سازمان‌های حرفه‌ای انجام می‌شود. روش‌های خاص محاسبه و تحلیل را می‌توان در تحقیقات مختلف یافت کرد (Li et al. 2010, White et al. 2011, Mghouchi, Ajzoul & Bouardi, 2016). برای محاسبه زمان شبیه‌سازی شدت اشعه فرابنفش در فضای داخلی یک جاده خاص، مقدار کل انرژی تابش برای جاده در یک دوره زمانی معین بر شدت تابش فرابنفش در فضای داخلی تقسیم می‌شود (Sun et al. 2022a; Sun et al. 2022b). پیرشدگی در خرابی زود هنگام روسازی نقش دارد و می‌تواند توسط عوامل محیطی مختلف مانند گرما، بار، رطوبت، مواد شیمیایی و تابش خورشید ایجاد شود (Lasne et al. 2023). پیرشدگی ناشی از تابش خورشید اغلب با پیرشدگی حرارتی همراه است. برای نظارت و اندازه‌گیری میزان پیرشدگی، تحقیقات اغلب بر شاخص‌هایی مانند محصولات اکسیداسیون تمرکز دارند (Camargo et al. 2021). پیرشدگی آسفالت از طریق فرآیندهای اکسیداسیون حرارتی عمدتاً به اکسیداسیون و آروماتیک شدن نسبت داده می‌شود. با این حال، پیرشدگی ناشی از اشعه فرابنفش ممکن است به طور نامتناسبی تحت تأثیر گسستگی زنجیره‌ای و واکنش‌های تجزیه‌ای قرار گیرد که ترکیبات بزرگ را به ترکیبات کوچکتر تجزیه می‌کند (Hung and Fini 2020). پیرشدگی ناشی از اشعه فرابنفش از سطح روسازی شروع شده و محصولات پیرشده به تدریج به داخل روسازی نفوذ می‌کنند (Hung et al. 2019). در طول پیرشدگی، گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن مانند  $S=O$  و  $C=O$  در آسفالت به تدریج افزایش می‌یابند، در حالی که محتوای آلکان کاهش می‌یابد. با افزایش سن به طور بالقوه با مساحت این گروه‌ها که توسط طیف‌نگاری فرورسرخ تبدیل فوریه<sup>۹</sup> تعیین می‌شود، مرتبط است (Polacco et al. 2015, Wang et al. 2020a, Yang et al. 2023a).

تابش اشعه فرابنفش تاثیر قابل توجهی بر جامعه بشری از جمله جنبه‌هایی مانند سلامت انسان و عمر خدمت‌دهی زیرساخت‌ها دارد. به عنوان مثال، هنگامی که اشعه فرابنفش به بدن انسان تابش می‌کند، می‌تواند سنتز ویتامین دی را برای جلوگیری از نرمی اسنخوان و ترویج متابولیسم برخی از سلول‌ها ارتقا دهد (Kohli, Lim & Hamzavi, 2020; Erem & Razaque, 2021). اشعه فرابنفش اثر باکتری‌کشی نیز دارد (Wang et al. 2020b). با این حال، قرار گرفتن بیش از حد در معرض اشعه فرابنفش ممکن است باعث آسیب جبران‌ناپذیری به موجودات زنده و زیرساخت‌ها شود (Seyer & Sanlidag, 2020). علاوه بر این، برخی مطالعات نشان داده‌اند که اشعه فرابنفش قوی بر توسعه اقتصادی تاثیر خواهد گذاشت (Andersen, Dalgaard & Selaya, 2016). تابش فرابنفش دارای انرژی نسبتاً بالایی است که از تقریباً ۳٫۱ تا ۱۲٫۴ الکترون ولت متغیر است که برای مختل کردن ساختارهای مولکولی کافی است. این انرژی تاثیر بسیار زیادی بر مواد آلی مانند آسفالت دارد و واکنش‌های شیمیایی مانند اکسیداسیون و تخریب را القا می‌کند. نور مرئی، بخشی از تابش محسوس به چشم انسان، دارای محدوده انرژی تقریباً ۱٫۷۷ تا ۳٫۱ الکترون ولت است. این بخش نقش مهمی در تابش خورشیدی ایفا می‌کند و بر دمای سطح زمین تاثیر می‌گذارد و فرآیندهای بیولوژیکی مانند فتوسنتز را هدایت می‌کند (Mirwald et al. 2022; Mirwald, Nura & Hofko, 2022). محققان اثرات فرابنفش و نور مرئی را بر سرعت پیرشدگی و درجه پیری آسفالت با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که در محدوده طول موج ۳۶۵ - ۷۷۰ نانومتر، اشعه فرابنفش نسبت به نور مرئی، نرخ پیرشدگی بالاتر و اثرات پیری شدیدتری را القا می‌کند. در نتیجه، پیری ناشی از تابش اشعه فرابنفش، عامل اصلی تخریب آسفالت به وسیله نور خورشید است. تابش مادون قرمز، انرژی کمتری نسبت به نور فرابنفش و مرئی دارد و تقریباً از ۱٫۲۴ تا ۱٫۷۷ الکترون ولت متغیر است. این تابش عمدتاً از طریق گرمایش بر روی سطح زمین تاثیر می‌گذارد و منجر به افزایش دمای سطح می‌شود. انرژی حاصل از تابش مادون قرمز توسط سطح آسفالت جذب می‌شود و باعث افزایش دما و در نتیجه پیرشدگی تدریجی می‌شود. این فرآیند مشابه پیرشدگی حرارتی-اکسیداتیو است.

به‌ویژه در مناطق با تابش آفتاب شدید، موضوعی حیاتی است که نباید در طراحی و ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی نادیده گرفته شود (Xiang et al. 2019, Hung et al. 2019; Mouillet et al., 2014). این رادیکال‌های آزاد بسیار واکنش‌پذیر هستند و به راحتی با اکسیژن یا سایر رادیکال‌های آزاد واکنش می‌دهند تا پراکسیدها را تشکیل می‌دهند که واسطه‌های کلیدی در مکانیسم پیری هستند. تشکیل پراکسیدها، تجزیه و پیوند عرضی مولکول‌های آسفالت را تسریع می‌کند و همچنین بر ساختار کلونیدی آسفالت تأثیر می‌گذارد (Hung and Fini 2020). با پیشرفت اکسیداسیون، گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار بیشتری مانند کربونیل، سولفوکسید و گروه‌های استر در آسفالت ظاهر می‌شوند (Xiao et al. 2015; Hu et al. 2022; Liu et al. 2022a; Abraham, Verma & Kakade, 2023). این گروه‌های عاملی خواص شیمیایی آسفالت را تغییر می‌دهند، آن را در آب محلول‌تر می‌کنند و مقاومت آن را در برابر آسیب‌های ناشی از آب کاهش می‌دهند. علاوه بر این، پیرشدگی ناشی از اشعه فرابنفش منجر به تبخیر مولکول‌های کوچک روی سطح آسفالت می‌شود که منجر به از بین رفتن مواد و کاهش کارایی می‌شود (Zadshir et al. 2018, Zhu, Zhang & Zhang, 2019, Xiao et al. 2023). این تغییرات ساختاری بر خواص رئولوژیکی آسفالت مانند ویسکوزیته و الاستیسیته تأثیر می‌گذارند و عمر بهره‌برداری روسازی را کاهش می‌دهند. با تغییر شرایط محیطی جهانی، تأثیر تابش فرابنفش بر زیرساخت‌ها، به ویژه در مناطق مرتفع یا با عرض جغرافیایی پایین، شدیدتر می‌شود. با توجه به مکانیسم‌های متفاوت اساسی پیری اکسیداتیو حرارتی و پیری با اشعه فرابنفش، روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی پیری اکسیداتیو حرارتی، برای در نظر گرفتن تغییرات ناشی از پیری با اشعه فرابنفش مجهز نیستند (Crucho et al. 2020). بنابراین، درک چگونگی تغییر خواص آسفالت در اثر قرار گرفتن در معرض اشعه فرابنفش برای توسعه روش‌های استاندارد، حدود و راهکارهای مؤثر کاهش اثرات منفی آن بسیار مهم است.

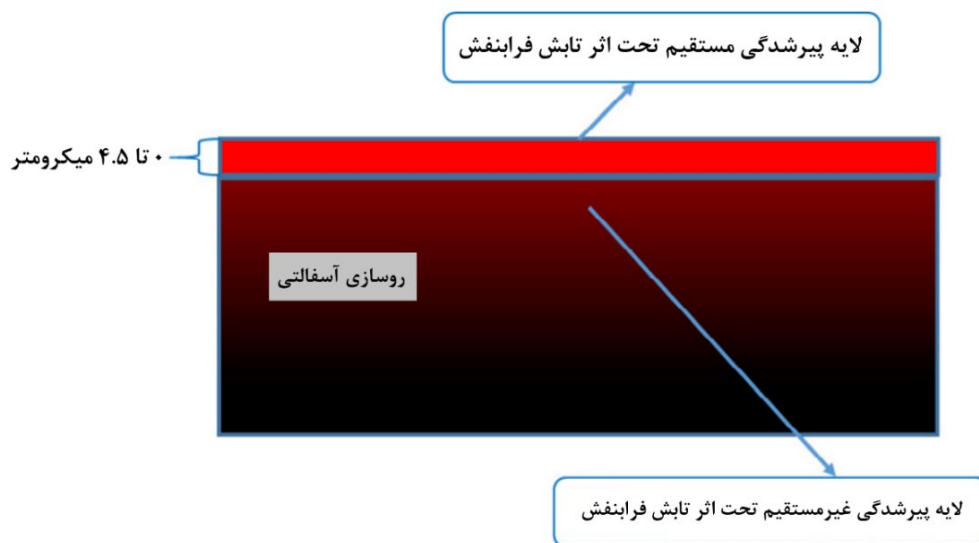
در یکی از مطالعات انجام‌شده، بر اساس نتایج آزمون کشش نهایی<sup>۱۱</sup> آزمون تغییرات دمایی و آزمون اجزای تشکیل‌دهنده، مدلی برای پیرشدگی ناشی از تابش فرابنفش ارائه شده است. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، در این مدل لایه سطحی آسفالت

فرآیندهای مذکور نشان می‌دهند که پیری ناشی از اکسایش و گرما یک فرآیند اکسیداسیون تدریجی است که ارتباط تنگاتنگی با تشکیل و انتشار مواد قطبی دارد (Hu et al. 2021; Wang et al. 2022b; Xu et al. 2022b). مکانیسم پیری آسفالت تحت تابش اشعه فرابنفش با پیری حرارتی-اکسیداتیو تفاوت‌های بنیادی دارد. در پیری حرارتی-اکسیداتیو، دما و اکسیژن محیط موجب اکسیداسیون تدریجی ترکیبات آسفالتی می‌شوند، در حالی که در پیری ناشی از اشعه فرابنفش، انرژی بالای پرتوهای فرابنفش توسط گروه‌های عاملی خاص مانند پیوندهای دوگانه و ترکیبات آروماتیک موجود در ساختار آسفالت جذب می‌شود. این جذب انرژی می‌تواند منجر به شکسته شدن پیوندهای شیمیایی، ایجاد رادیکال‌های آزاد و در نتیجه شروع زنجیره‌ای از واکنش‌های شیمیایی شدیدتر شود. به همین دلیل، سرعت و شدت پیری ناشی از اشعه فرابنفش معمولاً بیشتر از پیری حرارتی-اکسیداتیو است. هرچند هر دو نوع پیری در مراحل ابتدایی ممکن است منجر به تولید محصولات اکسیداسیونی مشابهی نظیر کتون‌ها، آلدیدها و اسیدهای کربوکسیلیک شوند، اما تابش فرابنفش می‌تواند واکنش‌های ثانویه‌ای مانند پلیمریزاسیون، شکست زنجیره‌ای و تولید ترکیبات اکسیژنه پیچیده‌تر را نیز فعال کند. این فرآیندها در نهایت منجر به تغییرات ساختاری عمیق‌تر و کاهش عملکرد مکانیکی و دوام آسفالت در برابر شرایط محیطی می‌شوند (Tang et al. 2023).

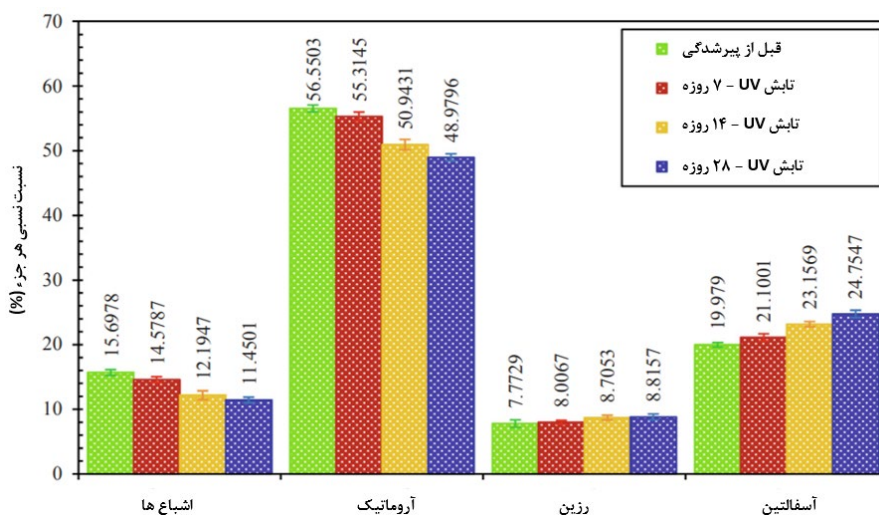
پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مکانیسم و نرخ پیری آسفالت تحت تأثیر حرارت و اکسیژن (پیری حرارتی-اکسیداتیو) با پیری ناشی از تابش اشعه فرابنفش، تفاوت قابل توجهی دارد. در حالی که پیری حرارتی-اکسیداتیو به‌طور عمده از طریق واکنش‌های اکسیداسیونی در دمای بالا صورت می‌گیرد، تابش فرابنفش با دارا بودن انرژی بالا، می‌تواند مستقیماً توسط گروه‌های عاملی خاص موجود در ساختار مولکولی آسفالت جذب شود. این فرآیند باعث شکسته شدن پیوندهای شیمیایی و تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود که آغازگر واکنش‌های زنجیره‌ای اکسیداسیونی پیچیده‌تر هستند. یکی از نتایج مهم این نوع پیری، افزایش قابل توجه غلظت گروه‌های عاملی کربونیل مانند کتون‌ها و آلدیدها است که منجر به سخت شدن و کاهش انعطاف‌پذیری آسفالت می‌شود. از این رو، تأثیر مخرب تابش فرابنفش بر خواص فیزیکی و شیمیایی آسفالت

شیمیایی و وزن مولکولی رزین‌ها و آسفالتن‌ها نسبت به آسفالت تازه می‌شود. این تغییرات، اختلاف غلظتی را بین لایه پیرشده و آسفالت تازه ایجاد کرده که منجر به فرایند نفوذ اجزای پیرشده به لایه زیرین می‌گردد؛ پدیده‌ای که با افزایش مدت زمان تابش اشعه فرابنفش عمق بیشتری پیدا می‌کند (Zeng et al. 2018).

تا عمق ۴/۵ میکرومتر به عنوان لایه پیرشدگی مستقیم و لایه زیرین به عنوان لایه پیرشدگی نفوذی معرفی شده است. در لایه پیرشدگی مستقیم، تابش اشعه فرابنفش موجب برانگیخته شدن مولکول‌ها یا شکستن پیوندهای کووالانسی و در پی آن، وقوع واکنش‌های تراکمی و تغییر در نسبت اجزای اصلی (ترکیبات اشباع، آروماتیک‌ها، رزین‌ها و آسفالتن‌ها) همچون شکل ۳ و تغییر ساختار



شکل ۲. مدلی از روسازی آسفالتی تحت اثر تابش اشعه فرابنفش (Zeng et al. 2018)



شکل ۳. نسبت‌های SARA مربوط به قیرهای بازیابی شده (Li et al. 2020)

زیرین نفوذ می‌کند. شدت و ماهیت این تخریب به عوامل متعددی مانند عرض جغرافیایی، شرایط جوی، ضخامت لایه آسفالت و حضور همزمان سایر عوامل محیطی نظیر رطوبت و دما وابسته است. از آنجا که مکانیسم‌های مرتبط با پیرشدگی ناشی از اشعه فرابنفش نسبت به پیری حرارتی و اکسیداتیو پیچیده‌تر و کمتر شناخته شده‌اند، بررسی جامع این پدیده و شناسایی عوامل مؤثر بر آن برای توسعه روش‌های ارزیابی دقیق‌تر و ارائه راهکارهای حفاظتی ضروری است. در ادامه، مهم‌ترین عوامل تداخلی در پیرشدگی فرابنفش و پارامترهای شبیه‌سازی آزمایشگاهی آن مورد بحث قرار می‌گیرند.

## ۲-۱- عوامل تداخلی در پیرشدگی با اشعه فرابنفش

شدت تابش اشعه فرابنفش بسته به عرض جغرافیایی و ضخامت روسازی متفاوت است. روسازی‌های آسفالتی در معرض تابش اشعه فرابنفش ناشی از تابش خورشید قرار دارند که در کنار سایر عوامل پیری مانند اکسیداسیون حرارتی و آسیب رطوبتی رخ می‌دهد ( Jamal, Lanotte & Giustozzi, 2022; Guo et al. 2023a). مطالعات اغلب شامل آزمایش نمونه‌های آسفالت گرفته‌شده از روسازی‌های قدیمی است که در آن نمونه‌های مغزه‌گیری شده برای تجزیه و تحلیل استخراج می‌شوند (Liang et al. 2023). برای مثال، تعدادی از محققان اثرات آزمایش‌های تسریع‌شده‌ی پیرشدگی ناشی از اشعه‌ی فرابنفش در محیط داخلی و پیرشدگی اکسیداتیو ناشی از نور طبیعی در فضای باز را طی یک سال بر عملکرد آسفالت مقایسه کردند. آن‌ها تغییرات مشابهی را در هر دو مورد یافتند که نشان می‌دهد آزمایش‌های تسریع‌شده با اشعه فرابنفش در فضای داخلی می‌توانند برای پیش‌بینی عمر خدمت‌دهی جاده‌ها استفاده شوند و همچنین به این معنی است که آزمایش‌های پیرسازی تسریع‌شده فرابنفش در فضای داخلی می‌توانند شرایط پیرسازی را در زیر نور طبیعی نشان دهند (Enfrin & Giustozzi, 2024a). در حال حاضر روش استاندارد برای پیرشدگی فرابنفش در آزمایش‌های داخلی وجود ندارد (Xiao et al. 2015). رویکردهای موجود برای بررسی پیرشدگی روسازی ناشی از اشعه فرابنفش به‌طور کلی به دو دسته اصلی روش‌های تجربی و روش‌های عددی تقسیم می‌شوند.

هدف اصلی از نگارش این مقاله، تبیین و تحلیل علمی نقش تابش اشعه فرابنفش در فرآیند پیرشدگی قیر و تغییرات ساختاری ناشی از آن در روسازی‌های آسفالتی است. به‌ویژه از آن جهت که این نوع پیرشدگی، برخلاف پیرشدگی حرارتی و اکسیداتیو، هنوز به‌طور جامع مورد مطالعه قرار نگرفته و روش‌های استاندارد و یکپارچه‌ای برای ارزیابی آن وجود ندارد. پژوهش حاضر تلاش می‌کند مکانیسم‌های شیمیایی و فیزیکی حاکم بر تخریب نوری قیر را روشن ساخته و تأثیرات آن بر ریزساختار، ریخت‌شناسی سطحی، ویژگی‌های رئولوژیکی و عملکرد مکانیکی آسفالت را بازنمایی کند. همچنین این مقاله به روش‌های آزمایشگاهی و عددی شبیه‌سازی تابش فرابنفش پرداخته و محدودیت‌ها و چالش‌های موجود در بازتولید شرایط واقعی محیطی را تحلیل می‌کند. شناسایی شکاف‌های دانشی در حوزه‌هایی همچون عمق نفوذ تابش، تأثیر ترکیب معدنی سنگدانه‌ها، اثر متقابل تابش با عوامل محیطی دیگر (رطوبت، دما، بارگذاری ترافیکی) و تغییرات مرتبط با اقلیم، از دیگر اهداف کلیدی این تحقیق است. در نهایت، این مقاله با ارائه تصویری جامع از اثرات چندبعدی تابش فرابنفش بر آسفالت، زمینه‌ساز توسعه رویکردهای نوین برای ارزیابی دقیق‌تر، طراحی مصالح مقاوم‌تر و اتخاذ راهکارهای حفاظتی به‌منظور افزایش دوام روسازی‌های آسفالتی و کاهش هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از خرابی زودرس خواهد بود.

## ۲- قرار گرفتن آسفالت در معرض اشعه فرابنفش و

### پدیده پیرشدگی

قرار گرفتن روسازی‌های آسفالتی در معرض تابش اشعه فرابنفش، یکی از مهم‌ترین عوامل تسریع‌کننده پدیده پیرشدگی محسوب می‌شود که به‌طور مستقیم بر دوام و عملکرد سازه‌های زیرساختی تأثیر می‌گذارد. این تابش، به‌ویژه در ناحیه UV-A، با دارا بودن انرژی کافی برای شکستن پیوندهای شیمیایی در مولکول‌های قیر، موجب بروز واکنش‌های زنجیره‌ای اکسیداسیونی، تشکیل رادیکال‌های آزاد و ایجاد ترکیبات قطبی می‌شود. نتیجه این فرآیند، تغییر تدریجی در ریزساختار و ویژگی‌های شیمیایی و مکانیکی آسفالت است که از سطح روسازی آغاز شده و به تدریج به لایه‌های

بیشترین تغییرات در خواص مکانیکی قیر، از جمله افزایش سختی و کاهش چسبندگی، در طول موج‌های بین ۳۲۰ تا ۳۶۰ نانومتر رخ می‌دهد. بر همین اساس، استفاده از طول موج ۳۴۰ نانومتر به‌عنوان شرایط استاندارد در بسیاری از آزمایش‌های پیرشدگی توصیه شده است (Wu et al. 2016; Rajib and Fini 2020; Hung et al. 2019; Jamal and Giustozzi 2022).

پیرشدگی ناشی از تابش فرابنفش، برخلاف پیری ناشی از گرما، وابستگی شدیدی به عمق قشر روسازی دارد. در مراحل اولیه، این نوع تابش تنها قادر است به چند میکرومتر از سطح نفوذ کند، اما با گذشت زمان، فرآورده‌های حاصل از تخریب نوری می‌توانند به لایه‌های زیرین منتقل شوند و موجب تغییرات ساختاری در عمق روسازی گردند. به‌عنوان نمونه، در یک مطالعه مشخص شد که عمق نفوذ از حدود ۴٫۵ میکرومتر در روز نخست، پس از ده روز به بیش از ۲۲۰۰ میکرومتر افزایش یافت. این رفتار به شکل‌گیری یک گرادیان پیری در عمق قیر منجر می‌شود که باید در تفسیر داده‌ها مدنظر قرارگیرد. برای تحلیل دقیق این پدیده، مدل‌های ریاضی متعددی مانند مدل دو مرحله‌ای پیشنهاد شده‌اند. در همین راستا، بسیاری از پژوهشگران توصیه می‌کنند که ضخامت لایه‌های آزمایشگاهی کمتر از ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شود تا تابش بتواند به طور یکنواخت بر نمونه تأثیر بگذارد (Zeng et al. 2018; Chen, Zhang & 2020; Koyun et al. 2021; Li et al. 2021a; Guo et al. 2023a; Feng et al. 2015; Hosseinezhad et al. 2020).

کنترل ضخامت نمونه‌ها نه تنها در صحت نتایج اهمیت دارد، بلکه بر تکرارپذیری آزمایش‌ها نیز تأثیر مستقیم می‌گذارد. روش‌هایی مانند لایه‌نشانی محلول‌های قیری بر صفحات شیشه‌ای، تبخیر حلال یا تراش نازک در دمای پایین به‌منظور کنترل دقیق ضخامت مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته استفاده از حلال‌های فرار مانند دی‌سولفید کربن یا تولوئن نیازمند رعایت اصول ایمنی و زیست‌محیطی است. روش‌های نوین‌تری مانند تبخیر یونی یا برش سرد نیز در برخی پژوهش‌ها به‌کار رفته‌اند تا یکنواختی لایه‌های نازک را افزایش دهند (Zadshir et al. 2020). عامل دما نیز در کنار نور، نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت پیری ایفا می‌کند. در دماهای پایین‌تر از ۵۰ درجه سلسیوس، فرآیندهای تخریب عمدتاً تحت تأثیر تابش فرابنفش قرار دارند؛ اما با افزایش دما، سهم اکسایش

در روش‌های تجربی، با استفاده از منابع نوری مصنوعی مانند لامپ‌های فرابنفش با طول موج و شدت‌های مختلف، شرایط تابش خورشید در دوره‌های زمانی مشخص شبیه‌سازی می‌شود تا رفتار مصالح در برابر تابش فرابنفش بررسی گردد (Zadshir et al., 2020). شبیه‌سازی‌های عددی، مکانیسم‌های تغییر خواص در طول پیرشدگی آسفالت در برابر اشعه فرابنفش را با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند Materials Studio بررسی می‌کنند (Hu et al. 2021; Gao et al. 2022; Xiao & Fan, 2022; Tang et al. 2023).

## ۲-۲- شبیه‌سازی و پارامترهای تأثیرگذار پیرشدگی نوری

### قیر

شدت فرآیند پیرشدگی ناشی از نور فرابنفش در نمونه‌های آسفالتی بسته به نوع منبع نوری و شرایط آزمایشگاهی می‌تواند بسیار متفاوت باشد. منابع نوری مختلفی در این مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به لامپ‌های زنون، فلورسنت فرابنفش، جیوه‌ای فشار بالا و دیودهای نورافشان اشاره کرد. در این میان، لامپ‌های فلورسنت فرابنفش به دلیل تطابق طیف تابش آن‌ها با طول موج‌های طبیعی نور خورشید، کاربرد بیشتری در آزمایش‌های شبیه‌سازی شده دارند (Xu et al. 2018; Zadshir et al. 2018). در مقابل، لامپ‌های جیوه‌ای فشار بالا با وجود توان تابشی زیاد، به علت تولید گرمای اضافی و دشواری در کنترل دما، به همراه مشکلات زیست‌محیطی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، استفاده از دیودهای نورافشان فرابنفش به عنوان جایگزینی پایدارتر و ایمن‌تر در سال‌های اخیر افزایش یافته است (Duan et al. 2022a; Lu et al. 2023; Kuang et al. 2014; Guo et al. 2023b).

شدت تابش در این آزمایش‌ها بین ۰٫۴۵ تا ۱۰۰۰ وات بر متر مربع متغیر است که بسته به نوع لامپ، تعداد آن‌ها و شرایط نصب قابل تنظیم است. در کنار شدت تابش، مدت زمان اعمال نور نیز نقشی کلیدی در میزان پیری ایفا می‌کند، به‌گونه‌ای که افزایش زمان تابش، حتی در شدت‌های کمتر، می‌تواند آثار مشابهی بر خواص قیر ایجاد کند. افزون بر این، طول موج تابش نوری یکی از عوامل تعیین‌کننده در شدت تأثیر بر رفتار قیر است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که

### ۳-۱- تأثیر تابش اشعه فرابنفش بر عملکرد آسفالت در دمای بالا

پایداری حرارتی و حساسیت دمایی آسفالت را می‌توان با شاخص‌هایی مانند نقطه نرمی، ویسکوزیته و نفوذپذیری آن توصیف کرد. مطالعات نشان داده‌اند که پس از پیرشدگی ناشی از تابش فرابنفش، نفوذپذیری آسفالت کاهش یافته و در مقابل، نقطه نرمی و ویسکوزیته آن افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده سخت‌تر شدن ماده و بهبود عملکرد آن در دماهای بالا است ( Cong et al. 2012; Xu et al. 2015; Zhu, Zhang & Zhang, 2019; Liu et al. 2020; Zhang et al. 2021a; Duan et al. 2022b).

با این حال، شاخص‌های متداول مانند نقطه نرمی و نفوذپذیری قادر به تبیین کامل رفتار رئولوژیکی آسفالت نیستند. در این زمینه، دستگاه رئومتر برشی دینامیکی<sup>۱۱</sup> با آزمون‌هایی نظیر جاروب دمای بالا، خزش و بازیابی تحت تنش چندگانه<sup>۱۲</sup> و نیز شاخص‌های  $R, Jnr, G^*/\sin\delta$  و ویسکوزیته برشی صفر<sup>۱۳</sup> به کار می‌رود تا مقاومت آسفالت در برابر تغییر شکل در دماهای بالا ارزیابی شود (Zadshir et al. 2020; Lu et al. 2023). بررسی‌ها نشان می‌دهد که  $G^*/\sin\delta$  پس از پیرشدگی بواسطه‌ی اشعه فرابنفش افزایش یافته و بیانگر بهبود اجزای الاستیک ماده است. هرچند که این شاخص به‌تنهایی توان انعکاس جامع رفتار دمای بالای آسفالت را ندارد (He et al., 2025).

نتایج آزمون بازیابی تحت تنش چندگانه حاکی از کاهش  $Jnr$  و افزایش  $R$  پس از پیرشدگی فرابنفش است که مقاومت بالاتر آسفالت در برابر تغییر شکل را تأیید می‌کند. با این حال، در آسفالت‌های اصلاح‌شده با پلیمر مانند SBS، تابش فرابنفش موجب تخریب زنجیره‌های پلیمری و فروپاشی ساختار شبکه‌ای شده و در نتیجه  $Jnr$  افزایش و  $R$  کاهش می‌یابد ( Yu et al. 2022; Liu et al. 2023b, Xiong et al. 2023). برای پیشگیری از این پدیده، افزودنی‌هایی نظیر گرافن اکسید، پودر لاستیک، عوامل ضدپیرشدگی و پسماندهای زیستی می‌توانند کارآمد باشند؛ به‌عنوان نمونه، افزودن ۲۲/۵ درصد پودر لاستیک به آسفالت پایه توانسته است حدود ۵۰ درصد از آسیب ناشی از پیرشدگی فرابنفش و اکسایشی-حرارتی را کاهش دهد ( Jamal et al. 2021; Xu et al. 2022c; Yang et al. 2023c; Borinelli et al. 2024; Jamal, Lanotte & Giustozzi, 2022).

حرارتی نیز افزایش می‌یابد و برآیند دو فرآیند، تحلیل مستقل اثر نور را دشوار می‌سازد. بر این اساس، برای تمرکز صرف بر تأثیر تابش، توصیه می‌شود که دمای آزمایش‌های داخلی کمتر از ۵۰ درجه نگه داشته شود ( Zeng et al., 2015; Guo et al., 2023b). در کنار همه این عوامل، مرحله‌ای از پیرشدگی کوتاه‌مدت پیش از تابش نوری نیز توسط بسیاری از محققان اعمال می‌شود. این مرحله، که معمولاً با استفاده از روش‌هایی مانند آزمون RTFOT یا TFOT اجرا می‌شود، شرایط ساخت و اجرای واقعی آسفالت را بازنمایی کرده و موجب می‌شود تأثیر تابش فرابنفش در شرایطی نزدیک‌تر به واقعیت سنجیده شود انجام این مرحله پیش‌زمینه‌ای ضروری برای بررسی دقیق‌تر اثرات تابش و افزایش قابلیت مقایسه نتایج در مطالعات مختلف تلقی می‌شود (Hu et al. 2018; Hung and Fini 2020).

### ۳-۲- قرار گرفتن در معرض تابش فرابنفش و خواص ماکروسکوپی آسفالت

همان‌طور که اشاره شد، روسازی‌های آسفالتی در طول عمر بهره‌برداری خود در معرض عوامل محیطی متعددی قرار دارند که از میان آن‌ها، تابش اشعه فرابنفش نقش پررنگی در فرآیند پیرشدگی و کاهش دوام دارد. این نوع پیرشدگی نه تنها خواص ماکروسکوپی آسفالت را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه موجب تغییرات عمیق در ریزساختار و ریخت‌شناسی سطحی آن نیز می‌شود. اثرات تابش فرابنفش طیف وسیعی از ویژگی‌های آسفالت از تغییر در عملکرد حرارتی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دماهای بالا و پایین، تا کاهش طول عمر خستگی و تضعیف چسبندگی میان آسفالت و مصالح سنگی را دربر می‌گیرد. همچنین، تابش مداوم این پرتوها بر توانایی خودترمیمی، پایداری در برابر رطوبت و ریخت‌شناسی سطحی آسفالت تأثیر می‌گذارد و در نهایت می‌تواند دوام کلی روسازی را به شدت کاهش دهد. در این بخش، ابتدا تأثیر تابش اشعه فرابنفش بر رفتار مکانیکی آسفالت در شرایط حرارتی و بارگذاری مختلف بررسی می‌شود، سپس اثرات آن بر چسبندگی، پایداری آبی، ظرفیت خودترمیمی و تغییرات ماکروسکوپی و میکروسکوپی سطح آسفالت مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

مطالعات متعددی بر حساسیت بالای آسفالت نسبت به تابش فرابنفش در دماهای پایین تأکید دارند و این مسئله به‌ویژه در مناطق با شدت بالای تابش خورشیدی، از اهمیت بیشتری برخوردار است. بنابراین، لازم است راهکارهای پیشگیرانه و تقویت‌کننده برای مقابله با اثرات پیرشدگی فرابنفش به‌طور جدی مدنظر قرار گیرند (Zadshir et al. 2020; Sun et al. 2021; Yao, Song & Li, 2023; Zhou, Li & Yan, 2023; Wang et al. 2023b; Enfrin and Giustozzi, 2024b).

### ۳-۳- تأثیر تابش اشعه فرابنفش بر عملکرد خستگی آسفالت

عملکرد خستگی آسفالت به توانایی آن در مقاومت در برابر آسیب ناشی از بارگذاری‌های مکرر در دماهای متوسط مرتبط است و نقشی کلیدی در برآورد طول عمر روسازی دارد. اگرچه پارامتر  $G^* \sin \delta$  می‌تواند برای ارزیابی رفتار خستگی به‌کار رود، اما به دلیل اندازه‌گیری در محدوده ویسکوالاستیک خطی و عدم لحاظ اثرات واقعی بارگذاری ترافیکی و ساختار روسازی، تصویر دقیقی از آسیب‌پذیری خستگی ارائه نمی‌دهد (Zhang et al. 2018, Osmari et al. 2019; Zhang et al. 2020). روش‌های رایج برای سنجش مقاومت خستگی آسفالت شامل آزمون جاروب دامنه خطی<sup>۱۶</sup> آزمون خمشی نیم‌دایره‌ای شیاردار و آزمون خستگی غیرمستقیم است (Liu et al. 2022, Wang et al. 2023a). مطالعات نشان داده‌اند که پس از پیرشدگی ناشی از تابش اشعه فرابنفش، طول عمر خستگی آسفالت ماتریسی و آسفالت اصلاح‌شده با SBS به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. همچنین پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که شاخص G-R نیز با کاهش مقاومت خستگی آسفالت پس از پیرشدگی ناشی از اشعه فرابنفش همبستگی دارد و مقدار آن به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (Liang et al. 2023; Hu et al. 2023).

### ۳-۴- تأثیر تابش اشعه فرابنفش بر عملکرد چسبندگی آسفالت

چسبندگی میان آسفالت و مصالح سنگی از عوامل کلیدی در دوام روسازی‌های آسفالتی محسوب می‌شود و بررسی مکانیسم‌های

ویسکوزیته برشی صفر نیز به‌عنوان شاخصی مؤثر در ارزیابی پایداری دمای بالای آسفالت شناخته می‌شود و با افزایش مقاومت آن در برابر تغییر شکل رابطه مستقیم دارد. مطالعات نشان داده‌اند که ویسکوزیته برشی صفر با تشدید پیرشدگی ناشی از تابش فرابنفش افزایش یافته است. همچنین، آزمون کالریمتری پویشی تفاضلی<sup>۱۷</sup> نشان می‌دهد که با افزایش شدت پیرشدگی ناشی از اشعه فرابنفش، دمای اولیه تجزیه و دمای تغییر شکل آسفالت افزایش می‌یابد و نرخ کاهش جرم آن کاهش پیدا می‌کند، که بیانگر بهبود پایداری حرارتی و عملکرد دمای بالای آسفالت پس از پیرشدگی فرابنفش است (Liu et al. 2022b; Yao, Song & Li, 2023).

### ۳-۲- تأثیر تابش اشعه فرابنفش بر عملکرد آسفالت در دمای پایین

مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دماهای پایین، از عوامل کلیدی در ارزیابی عملکرد آسفالت در روسازی به‌شمار می‌رود. پیرشدگی ناشی از تابش فرابنفش، یکی از عوامل مهمی است که می‌تواند عملکرد مکانیکی آسفالت در این شرایط دمایی را کاهش دهد. شاخص‌های اصلی ارزیابی عملکرد آسفالت در دماهای پایین شامل  $G^*$ ،  $G-R$  و  $DSRF_n$  (بر مبنای آزمون رئومتر برشی دینامیکی) و نیز مقادیر  $S$  و  $m$  از آزمون رئومتر تیر خمشی<sup>۱۵</sup> هستند (Xu et al. 2015, Liu et al. 2020, Chen et al. 2021, Liu et al. 2022b). مطالعات مختلف نشان داده که با افزایش مدت تابش فرابنفش، مقدار شاخص  $G-R$  افزایش می‌یابد که بیانگر کاهش مقاومت ترک‌پذیری آسفالت است. همچنین، افزایش قابل‌توجه مقدار  $DSRF_n$  پس از پیرشدگی فرابنفش نشان‌دهنده کاهش انعطاف‌پذیری آسفالت در دماهای پایین است. نتایج حاصل از آزمون رئومتر تیر خمشی نیز گویای افزایش مقدار  $S$  و کاهش مقدار  $m$  در اثر پیرشدگی فرابنفش است که دلالت بر کاهش توانایی آسفالت در تحمل تنش‌های دمای پایین دارد (Liu et al. 2022b; Zhang et al. 2018). همچنین بررسی تطبیقی روش‌های مختلف پیرشدگی نشان داده که تابش فرابنفش تأثیر بیشتری بر عملکرد دمای پایین آسفالت، به‌ویژه آسفالت اصلاح‌شده با SBS نسبت به سایر انواع پیرشدگی مانند اکسیداتیو حرارتی یا آبی دارد (Zhang et al. 2021b).

نشان داده است که نسبت مقاومت کششی<sup>۱۷</sup> نمونه‌های آسفالتی پس از پیرشدگی به شکل محسوسی کمتر از حالت اولیه بوده و این امر بیانگر افت پایداری آبی مخلوط آسفالتی است. علاوه بر این، انجام آزمایش‌های پیرشدگی در شرایط خشک و مرطوب نشان داده است که رطوبت می‌تواند موجب جداشدگی لایه سطحی آسفالت شود و بخش باقی‌مانده را مستعد ترک‌خوردگی و شکنندگی کند (Chen et al. 2023; Wang et al. 2023c).

### ۳-۶- تأثیر تابش اشعه فرابنفش بر عملکرد خودترمیمی آسفالت

آسفالت به‌عنوان یک ماده ویسکوالاستیک، به‌طور طبیعی از ظرفیت خودترمیمی برخوردار است. قابلیت که به آن اجازه می‌دهد ترک‌های موبینه و آسیب‌های سطحی ناشی از تنش‌های حرارتی یا بارهای ترافیکی سبک را بدون نیاز به مداخله خارجی تا حدی بهبود بخشد. این فرآیند عمدتاً به حضور اجزای سبک و سیال در فاز چند مولفه‌ای آسفالت، انرژی آزاد سطحی بالا و پدیده حرکت موئینگی وابسته است که در مجموع امکان جابه‌جایی و بازآرایی مولکول‌ها در ناحیه آسیب‌دیده و پرشدن شکاف‌ها را فراهم می‌آورند. با این حال، قرارگیری طولانی‌مدت در معرض تابش اشعه فرابنفش، با تخریب اجزای سبک، افزایش سختی و کاهش تحرک مولکولی، این توانایی ذاتی را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد. بنابراین، پیری ناشی از اشعه فرابنفش نه تنها منجر به کاهش خواص مکانیکی آسفالت می‌شود، بلکه توانمندی آن در بازیابی خودبه‌خودی نیز تضعیف می‌گردد، که این موضوع در درازمدت بر دوام و عملکرد روسازی تأثیر منفی خواهد گذاشت (Li et al. 2019). محققان با استفاده از ارزیابی‌های رئولوژیکی، آزمایش‌های موئینگی و اندازه‌گیری زاویه تماس نشان دادند که پیرشدگی ناشی از اشعه فرابنفش، موجب افزایش دمای آستانه لازم برای آغاز فرآیند خودترمیمی می‌شود. همچنین، نتایج این پژوهش حاکی از کاهش سیالیت آسفالت، کاهش ارتفاع خیز موئین و کاهش انرژی آزاد سطحی پس از پیرشدگی بود. این تغییرات به‌طور مستقیم با کاهش توانایی آسفالت در پر کردن ترک‌ها و بازیابی شبکه داخلی آن مرتبط است. علت اصلی این پدیده، تغییر در ترکیب شیمیایی آسفالت تحت تأثیر پیرشدگی است؛ به‌ویژه، اکسیداسیون و تشکیل گروه‌های قطبی موجب افزایش سختی و

کاهش این چسبندگی در اثر پیرشدگی ناشی از تابش اشعه فرابنفش اهمیت ویژه‌ای دارد. روش‌های ارزیابی چسبندگی شامل آزمون بیرون‌کشیدگی، آزمون انرژی سطحی و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) هستند (Hong, Zhang & Zhang, 2020; Gu et al. 2023). مطالعات نشان داده‌اند که پیرشدگی ناشی از اشعه فرابنفش موجب کاهش قابل‌توجه مقاومت کششی و کار چسبندگی آسفالت می‌شود. به‌عنوان نمونه، مقاومت کششی آسفالت ماتریسی پس از پیرشدگی حدود ۲۷٫۳ درصد کاهش یافت و افزایش آب‌دوستی آسفالت نیز به تضعیف پیوندهای چسبنده منجر شد. بررسی‌های مبتنی بر میکروسکوپ نیروی اتمی نیز نشان داد که با پیشرفت فرآیند پیرشدگی، چسبندگی انواع مختلف آسفالت کاهش یافته و این کاهش پس از حدود شش روز تابش فرابنفش محسوس‌تر بوده است (Yang et al. 2023b; Peng et al. 2020). به‌طور کلی، شدت کاهش چسبندگی با افزایش مدت زمان تابش فرابنفش تشدید می‌شود و در میان انواع آسفالت، مقاومت در برابر این پدیده متفاوت است. برای کاهش این اثرات، به‌کارگیری افزودنی‌هایی نظیر لاستیک بازیافتی، روغن‌های زیستی و عوامل ضدپیرشدگی توصیه می‌شود (Zeng et al. 2022; Ding et al. 2023).

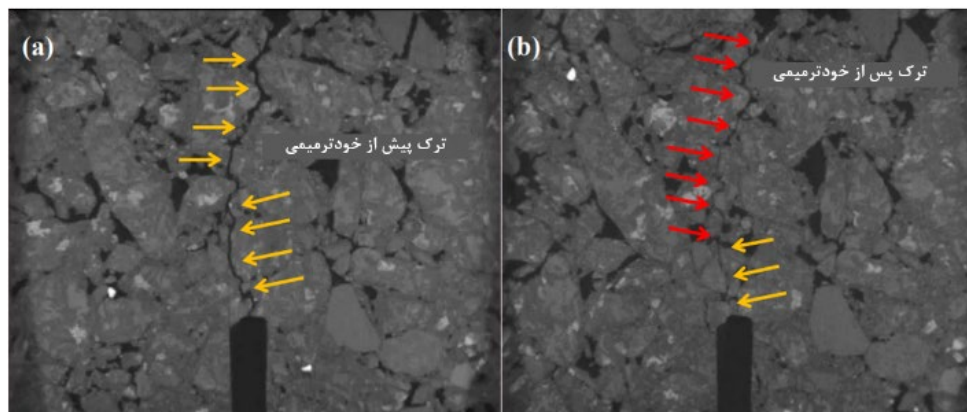
### ۳-۵- تأثیر آب و رطوبت بر پایداری آسفالت تحت تابش اشعه فرابنفش

آسیب ناشی از آب، یکی از چالش‌های اصلی در روسازی‌های آسفالتی محسوب می‌شود و از طریق نفوذ فیزیکی به مخلوط آسفالتی، موجب جداشدگی میان آسفالت و مصالح سنگی و کاهش عمر مفید روسازی می‌گردد (Zheng et al. 2019; Li et al. 2020a). اگرچه برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که وجود آب می‌تواند شدت پیرشدگی ناشی از تابش اشعه فرابنفش را کاهش دهد، اما مطالعات دیگر حاکی از افزایش آسیب‌پذیری رطوبتی هستند که این پدیده می‌تواند به دلیل مهاجرت مولکول‌های قطبی و حضور رادیکال‌های هیدروکسیل روی سطح آسفالت تشدید شود (Hung et al. 2017; Yang et al. 2023a).

یافته‌های اخیر نشان می‌دهد که مقاومت آسفالت در برابر آسیب‌های رطوبتی با افزایش مدت زمان پیرشدگی ناشی از اشعه فرابنفش کاهش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، آزمون یخ‌زدگی-ذوب

نیز نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان قرارگیری در معرض تابش، توانایی خودترمیمی آسفالت به‌طور پیوسته افت می‌کند و این روند می‌تواند به تشدید آسیب‌های خستگی و کاهش طول عمر روسازی منجر شود (Hung et al. 2019; Li et al. 2020b; Hung et al., 2021; Kabir & Fini, 2021).

کاهش تحرک مولکولی اجزای سبک آسفالت می‌شوند که فرآیند خودترمیمی را محدود می‌کند (Li et al., 2020b). بررسی‌های دیگری نیز بر این یافته‌ها صحه گذاشته‌اند. تعدادی از محققان با مطالعه آسفالت زیستی و مخلوط‌های اصلاح‌شده، گزارش کردند که تابش طولانی‌مدت اشعه فرابنفش موجب کاهش تدریجی اثربخشی خودترمیمی می‌شود. تحلیل جامع نتایج مطالعات موجود



شکل ۴. تصاویر اسکن CT از بتن‌های آسفالتی پس از تابش اشعه فرابنفش (a) قبل از خودترمیمی؛ (b) پس از خودترمیمی (Wu et al., 2019)

#### ۴- تأثیر تابش اشعه فرابنفش بر ریخت‌شناسی و ساختار سطحی آسفالت

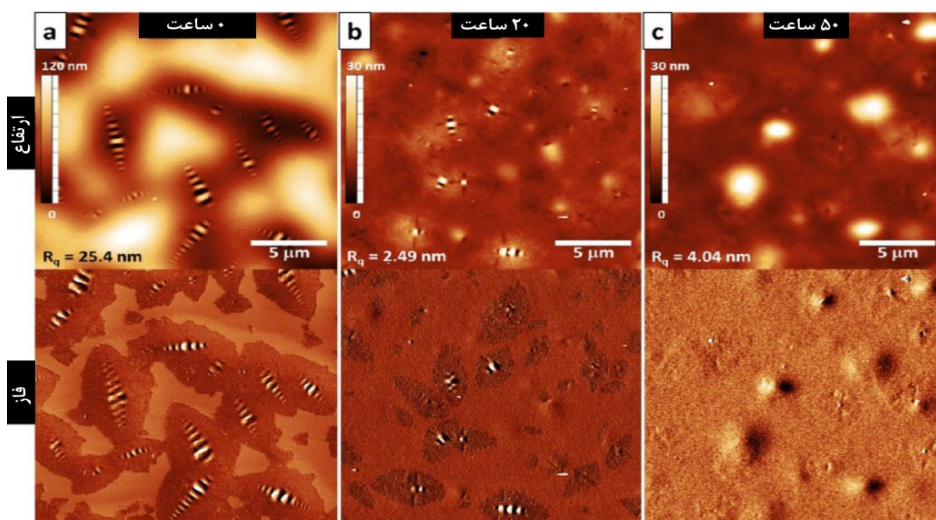
پیرشدگی ناشی از تابش اشعه فرابنفش موجب بروز تغییرات قابل توجهی در ریخت‌شناسی (مورفولوژی) آسفالت می‌شود که این تغییرات هم در ظاهر سطحی و هم در ساختار ریزمقیاس قابل شناسایی هستند. در مقیاس میکروسکوپی، سطح آسفالت که در حالت اولیه دارای بافتی نسبتاً یکنواخت، صاف و براق است، به تدریج تحت تأثیر تخریب نوری دچار زبری، چروکیدگی و کدورت می‌شود و رنگ آن از سیاه براق به خاکستری یا حتی سفید متمایل می‌گردد. این تغییر رنگ ناشی از تشکیل ترکیبات اکسیدشده و تبخیر اجزای سبک قیر است که سبب کاهش خاصیت چسبندگی و افزایش شکنندگی سطح می‌شود. در ادامه، ترک‌های ریز موضعی در لایه سطحی ایجاد شده و به مرور زمان با پیشرفت فرآیند تخریب، این ترک‌ها گسترش یافته و به ترک‌های بزرگ‌تر متصل می‌شوند. پیامد این فرآیند، جداشدگی تدریجی سنگدانه‌ها از بستر قیری و کاهش یکپارچگی سازه‌ای روسازی است. این

پدیده نه تنها موجب افت زیبایی ظاهری سطح جاده می‌شود، بلکه مقاومت آن در برابر بارگذاری‌های ترافیکی و عوامل محیطی را کاهش داده و در نهایت عمر خدمت‌دهی روسازی را به‌طور محسوسی محدود می‌کند (Hung et al. 2019; Xu et al. 2022a; Lopes et al. 2023; Wang, Cui & Feng, 2021; Yu et al. 2021). در مقیاس میکروسکوپی، تغییرات ریزساختاری ناشی از پیرشدگی اشعه فرابنفش با استفاده از ابزارهایی مانند میکروسکوپ نیروی اتمی<sup>۱۸</sup> و میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱۹</sup> قابل مشاهده است. در طول زمان، ریزترک‌ها شکل گرفته و عمیق‌تر می‌شوند و ناهمواری‌های بیشتری روی سطح پدید می‌آید. این پدیده ناشی از مهاجرت مولکولی، تبلور و تغییر در ساختار شیمیایی آسفالت است که نهایتاً به ایجاد ترک‌های میکروسکوپی منجر می‌شود (Zhang et al. 2021a; Li et al. 2021b; Duan et al. 2022b; Ding et al. 2023; Xiao et al. 2023; Sun et al. 2022a; Hung et al. 2020).

تغییرات زبری دارند، به گونه‌ای که در قیرهای اصلاح‌شده با پلیمرهای خاص، رفتار متفاوتی مشاهده شده است. در این راستا، بررسی تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از لایه‌های نازک قیر در یک تحقیق نشان می‌دهد که ریخت‌شناسی سطح در اثر پیرشدگی ناشی از تابش فرابنفش تغییرات چشمگیری را تجربه می‌کند. پیش از تابش، فیلم‌ها دارای ساختارهای زنبوری موسوم به «bee» هستند که منشأ آن‌ها به چین‌خوردگی لایه‌های مومی نسبت داده می‌شود. مقدار زبری سطحی این لایه‌ها پیش از تابش حدود ۲۵ نانومتر برآورد شد. پس از گذشت ۲۰ ساعت تابش فرابنفش، ساختارهای زنبوری همچنان دیده می‌شوند، اما به شکل محسوسی کاهش یافته و زبری سطحی به حدود ۲/۵ نانومتر افت می‌کند. این کاهش عمدتاً به تأثیر دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد در فرآیند پیرشدگی نسبت داده می‌شود. با گذشت ۵۰ ساعت تابش، ساختارهای زنبوری تقریباً به‌طور کامل ناپدید شده و تنها آثار کم‌رنگی از خطوط عدسی‌شکل آن‌ها باقی می‌ماند. همزمان، برجستگی‌های میکروسکوپی با منشأ ناشناخته بر سطح ظاهر می‌شوند که نشان‌دهنده تغییرات عمیق در ریزساختار قیر تحت اثر تابش فرابنفش است (شکل‌های ۵ و ۶) (Hung et al. 2019, Hong, Zhang & Zhang, 2020; ) (Wang et al. 2023c; Zhang et al. 2021b).

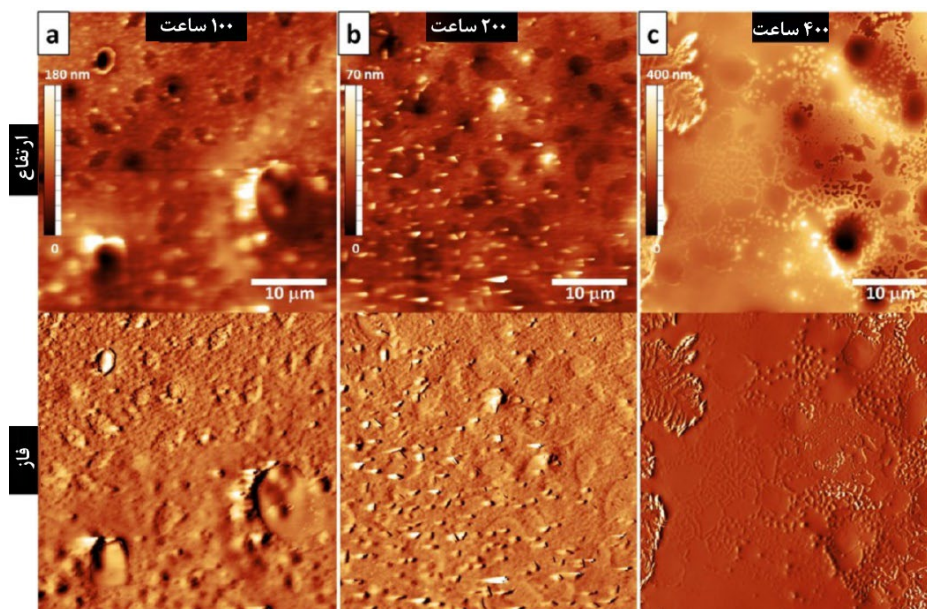
یکی از ویژگی‌های مهم ریزساختاری، ساختارهای زنبوری ناشی از وجود موم در آسفالت است. مطالعات نشان داده‌اند که با پیشرفت پیرشدگی، تعداد این ساختارها کاهش یافته و در نهایت ناپدید می‌شوند. این پدیده احتمالاً ناشی از اختلال در ساختار کلونیدی آسفالت، تغییرات فازی و کاهش توانایی موم‌ها و آسفالت‌ها در تشکیل شبکه‌های پایدار است. همچنین، شدت کاهش ساختارهای زنبوری در شرایط هوایی بیشتر بوده و به تغییر ترکیب شیمیایی آسفالت و تشکیل لایه سخت سطحی نسبت داده می‌شود (Hong, Zhang & Zhang, 2020; Zhang et al. 2021b; Ding et al. 2023, Liu et al. 2022b, Yang et al. 2023b).

زبری سطحی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی تغییرات ریخت‌شناسی به شمار می‌رود و معمولاً با معیارهایی همچون میانگین زبری و ریشه میانگین مربعات زبری سنجیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که زبری سطح در مراحل آغازین پیرشدگی کاهش یافته و سپس با پیشرفت فرآیند به تدریج افزایش می‌یابد؛ این رفتار با ایجاد ترک‌های ریز و محو شدن تدریجی ساختارهای زنبوری مرتبط است. علاوه بر این، ترکیب قیر و نوع اصلاح‌کننده‌های به‌کاررفته نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت و روند



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از لایه‌های نازک قیر که به مدت (a) صفر، (b) بیست و (c) پنجاه ساعت در معرض پیرشدگی ناشی از تابش فرابنفش قرار گرفته‌اند. مقدار زبری سطحی بر حسب ریشه میانگین مربعات برای هر تصویر به صورت  $R_q$  گزارش شده است.

(Hung et al., 2019)



شکل ۶. نمونه‌ای از تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی لایه‌های نازک قیر که به مدت (a) صد، (b) دویست و (c) چهارصد ساعت در معرض پیرشدگی ناشی از تابش فرابنفش قرار گرفته‌اند (Hung et al., 2019)

## ۵- نتیجه‌گیری

- تغییرات مکانیکی و ریزساختاری: افزایش سختی قیر، کاهش انعطاف‌پذیری، تغییر ساختار کلئیدی، کاهش مقاومت ترک‌خوردگی دمای پایین، افت طول عمر خستگی، کاهش چسبندگی قیر-سنگدانه و تضعیف پایداری آبی مشاهده شد.

- اثر ترکیبی با عوامل محیطی: رطوبت، دما و بارگذاری مکانیکی می‌توانند اثرات تخریبی تابش فرابنفش را تشدید کنند. در آسفالت‌های اصلاح‌شده با پلیمر، تخریب زنجیره‌های پلیمری شدیدتر و اثرات مخرب قابل توجه‌تر است.

- شاخص‌های شیمیایی و میکروسکوپی: افزایش گروه‌های قطبی (کربونیل، سولفوکسید، استر) و مهاجرت ترکیبات سبک به سطح باعث تغییر رفتار رئولوژیکی و کاهش ظرفیت خودترمیمی قیر می‌شود.

- عمق و نفوذ فرآیند: تابش در مراحل اولیه فقط چند میکرومتر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما با گذر زمان، لایه‌های زیرین نیز آسیب می‌بینند و گرادیان پیری عمقی شکل می‌گیرد.

- راهکارهای کاهش اثرات تابش فرابنفش: استفاده از افزودنی‌های ضدپیرشدگی، اصلاح‌کننده‌های معدنی و پلیمری پایدار، لایه‌های

با توجه به اهمیت دوام روسازی‌های آسفالتی در شبکه‌های حمل‌ونقل و تأثیر مستقیم عوامل محیطی بر عملکرد آن‌ها، تابش اشعه فرابنفش به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی تخریب قیر و کاهش عمر مفید روسازی‌ها شناخته شده است. درک مکانیسم‌های پیرشدگی نوری و شناسایی اثرات آن بر خواص شیمیایی، ریزساختاری و مکانیکی آسفالت، برای طراحی روسازی‌های مقاوم و تدوین استانداردهای مهندسی ضروری است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تابش اشعه فرابنفش، به‌ویژه در محدوده طول‌موج UV-A و UV-B یکی از مهم‌ترین عوامل تسریع‌کننده پیرشدگی قیر و کاهش دوام روسازی‌های آسفالتی است.

یافته‌های کلیدی به صورت زیر قابل ذکر است.

- مکانیسم پیرشدگی نوری: انرژی پرتو توسط گروه‌های عاملی حساس جذب شده و باعث شکستن پیوندهای شیمیایی، تولید رادیکال‌های آزاد و آغاز واکنش‌های زنجیره‌ای اکسیداسیونی می‌شود که با سرعت و شدت بیشتری نسبت به پیرشدگی حرارتی-اکسیداتیو رخ می‌دهد.

این مطالعه تأکید می‌کند که درک دقیق مکانیسم‌ها و تعامل تابش فرابنفش با سایر عوامل محیطی، پیش‌نیاز طراحی روسازی‌های مقاوم و تدوین استانداردهای موثر است و غفلت از این عامل می‌تواند منجر به برآورد غیرواقعی طول عمر و افزایش هزینه‌های نگهداری گردد.

پوششی مقاوم به اشعه فرابنفش، انتخاب سنگدانه‌های بازتابی مناسب و بهینه‌سازی طرح اختلاط و ضخامت لایه‌های سطحی می‌توانند از راهکارهای کاهش اثرات تابش فرابنفش باشد. -اهمیت استانداردسازی: گنجاندن آزمون‌های اختصاصی پیرشدگی نوری در استانداردهای طراحی و مدل‌سازی اثرات اقلیمی می‌تواند دوام روسازی را افزایش دهد و هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از خرابی زودرس را کاهش دهد.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Gamma Rays
- 2- X-Rays
- 3- Ultraviolet Rays (UV)
- 4- Visible Light
- 5- Infrared Radiation (IR)
- 6- Microwaves
- 7- Radio Waves
- 8- Deoxyribonucleic Acid (DNA)
- 9- Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)
- 10- Ultimate Tensile Strength (UTS)
- 11- Dynamic Shear Rheometer (DSR)
- 12- Multiple Stress Creep And Recovery (MSCR)
- 13- Zero-Shear Viscosity (ZSV)
- 14- Differential Scanning Calorimetry (DSC)
- 15- Bending Beam Rheometer (BBR)
- 16- Linear Amplitude Sweep (LAS)
- 17- Tensile Strength Ratio (TSR)
- 18- Atomic Force Microscope (AFM)
- 19- Scanning Electron Microscope (SEM)

## ۷- مراجع

-Borinelli, J. B., Enfrin, M., Blom, J., Giustozzi, F., Vuye, C., & Hernando, D. (2024). Investigating thermal and UV ageing effects on crumb rubber modified bitumen enhanced with emission reduction agents and carbon black. *Construction and Building Materials*, 449, 138452.

-Camargo, I. G. D. N., Dhia, T. B., Loulizi, A., Hofko, B., & Mirwald, J. (2021). Anti-aging additives: Proposed evaluation process based on literature review. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S134-S153.

-Capizzi, G., Napoli, C., & Bonanno, F. (2012). Innovative second-generation wavelets construction with recurrent neural networks for solar radiation

-Abouelsaad, A., White, G., & Jamshidi, A. (2024). State of the art review of ageing of bituminous binders and asphalt mixtures: Ageing simulation techniques, ageing inhibitors and the relationship between simulated ageing and field ageing. *Infrastructures*, 9(1), 8.

-Abraham, S. M., Verma, M., & Kakade, V. (2023). Aging resistance of bitumen modifiers: a comprehensive review. *Journal of Testing and Evaluation*, 51(5), 3533-3560.

-Andersen, T. B., Dalgaard, C. J., & Selaya, P. (2016). Climate and the emergence of global income differences. *The Review of Economic Studies*, 83(4), 1334-1363.

- tests and 1-year outdoor exposure. *Construction and Building Materials*, 449, 138425.
- Enfrin, M., & Giustozzi, F. (2024b). The role of polymer modification in mitigating 'sunburn' damage on asphalt roads. *Journal of Cleaner Production*, 439, 140929.
- Erem, A. S., & Razzaque, M. S. (2021). Vitamin D-independent benefits of safe sunlight exposure. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 213, 105957.
- Faisal Kabir, S., & Fini, E. H. (2021). Investigating aging and rejuvenation mechanism of biomodified rubberized bitumen. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(7), 04021142.
- Fan, J., Wu, L., Zhang, F., Cai, H., Ma, X., & Bai, H. (2019). Evaluation and development of empirical models for estimating daily and monthly mean daily diffuse horizontal solar radiation for different climatic regions of China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 168-186.
- Feng, Z. G., Bian, H. J., Li, X. J., & Yu, J. Y. (2015). FTIR analysis of UV aging on bitumen and its fractions. *Materials and Structures*, 49(4), 1381-1389.
- Gao, M., Fan, C., Chen, X., & Li, M. (2022). Study on ultraviolet aging performance of composite modified asphalt based on rheological properties and molecular dynamics simulation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 7894190.
- Guo, M., Liang, M., Liu, H., Bi, Y., & Du, X. (2023a). Study on the effect of different environmental factors on the aging gradient of asphalt binder based on field aging test. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1), 2245950.
- Guo, M., Yin, X., Liang, M., & Du, X. (2023b). Study on effect of thermal, oxidative and ultraviolet coupled aging on rheological properties of asphalt binder and their contribution rates. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1), 2239426.
- Guo, M., Zhang, S., Du, X., Tan, Y., & Luo, D. (2023c). Study on effect of various rejuvenators on virgin asphalt binders suffering various aging conditions and the unified evaluation index. *Construction and Building Materials*, 397, 132331.
- 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.
- Hosseinnezhad, S., Hung, A. M., Mousavi, M., Sharma, B. K., & Fini, E. (2020). Resistance mechanisms of biomodified binders against ultraviolet exposure. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(6), 2390-2398.
- forecasting. *IEEE Transactions on neural networks and learning systems*, 23(11), 1805-1815.
- Chen, Y., Wang, Y., Guo, S., Zhao, J., Feng, D., & Yi, J. (2023). Research on aging performance of hot mix fully recycled epoxy asphalt mixture with 100% RAP utilization-Take the surface course as the application target. *Construction and Building Materials*, 392, 131430.
- Chen, Z., Zhang, H., & Duan, H. (2020). Investigation of ultraviolet radiation aging gradient in asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 246, 118501.
- Chen, Z., Zhang, H., Duan, H., Wu, C., & Zhang, S. (2021). Long-term photo oxidation aging investigation of temperature-regulating bitumen based on thermochromic principle. *Fuel*, 286, 119403.
- Cong, P., Wang, J., Li, K., & Chen, S. (2012). Physical and rheological properties of asphalt binders containing various antiaging agents. *Fuel*, 97, 678-684.
- Crucho, J., Picado-Santos, L., Neves, J., Capitão, S., & Al-Qadi, I. L. (2020). Tecnico accelerated ageing (TEAGE)—a new laboratory approach for bituminous mixture ageing simulation. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(6), 753-765.
- da Silva Lopes, A. M., Neto, O. D. M. M., Lucena, L. C. D. F. L., do Nascimento, M. D. V., de Siqueira, M. V., de Sousa, T. M., & de Farias Monteiro, A. F. (2023). Impact of aging protocols on asphalt binder behavior: A laboratory and field study. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02629.
- Duan, H., Kuang, H., Zhang, H., Liu, J., Luo, H., & Cao, J. (2022a). Investigation on microstructure and aging resistance of bitumen modified by zinc oxide/expanded vermiculite composite synthesized with different methods. *Fuel*, 324, 124590.
- Duan, H., Long, J., Zhang, H., Luo, H., & Cao, J. (2022b). Effects of different carriers for zinc oxide (ZnO) particles on microstructure of ZnO/layered silicate composite and aging resistance of composite modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 349, 128773.
- El Mghouchi, Y., Ajzoul, T., & El Bouardi, A. (2016). Prediction of daily solar radiation intensity by day of the year in twenty-four cities of Morocco. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 823-831.
- Eltbaakh, Y. A., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., Othman, M. Y., Sopian, K., & Fadhel, M. I. (2011). Measurement of total and spectral solar irradiance: Overview of existing research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1403-1426.
- Enfrin, M., & Giustozzi, F. (2024a). Chemorheological deterioration of bitumen due to UV ageing: correlations between accelerated UV ageing

- radiation: A waste-based sunscreen for roads. *Journal of Cleaner Production*, 348, 131372.
- Jamal, M., Martinez-Arguelles, G., & Giustozzi, F. (2021). Effect of waste tyre rubber size on physical, rheological and UV resistance of high-content rubber-modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 304, 124638.
- Kohli, I., Lim, H. W., & Hamzavi, I. H. (2020). Caution regarding testing for long wavelength ultraviolet A1 and visible light effects on human skin in vivo. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 36(1).
- Koyun, A. N., Büchner, J., Wistuba, M. P., & Grothe, H. (2021). Laboratory and field ageing of SBS modified bitumen: Chemical properties and microstructural characterization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 624, 126856.
- Kuang, D., Yu, J., Feng, Z., Li, R., Chen, H., Guan, Y., & Zhang, Z. (2014). Performance evaluation and preventive measures for aging of different bitumens. *Construction and Building Materials*, 66, 209-213.
- Lasne, J., Lostier, A., Salameh, T., Athanasopoulou, E., Karagiannis, D., Kakouri, A., ... & Romanias, M. N. (2023). NOx emissions by real-world fresh and old asphalt mixtures: Impact of temperature, relative humidity, and UV-irradiation. *Urban Climate*, 49, 101457.
- Li, C., Wu, S., Chen, Z., Shu, B., Li, Y., Xiao, Y., & Liu, Q. (2019). Synthesis of Fe3O4-decorated Mg-Al layered double hydroxides magnetic nanosheets to improve anti-ultraviolet aging and microwave absorption properties used in asphalt materials. *Construction and Building Materials*, 220, 320-328.
- Li, M. F., Liu, H. B., Guo, P. T., & Wu, W. (2010). Estimation of daily solar radiation from routinely observed meteorological data in Chongqing, China. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2575-2579.
- Li, M. F., Tang, X. P., Wu, W., & Liu, H. B. (2013). General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. *Energy conversion and management*, 70, 139-148.
- Li, Y., Feng, J., Yang, F., Wu, S., Liu, Q., Liu, Z., & Jin, Y. (2021a). Gradient aging behaviors of asphalt aged by ultraviolet lights with various intensities. *Construction and Building Materials*, 295, 123618.
- Li, Y., Li, H., Nie, S., Wu, S., Liu, Q., Li, C., & Pang, L. (2020a). Negative impacts of environmental factors (UV radiation, water and different solutions) on bitumen and its mechanism. *Construction and Building Materials*, 265, 120288.
- Hu, D., Gu, X., Lyu, L., Pei, J., & Cui, B. (2021). Investigating the aging mechanism of asphaltene and its dependence on environmental factors through AIMD simulations and DFT calculations. *Science of The Total Environment*, 795, 148897.
- Hu, J., Wang, L., Wu, H., & Zhao, Z. (2023). Evaluation and mechanism analysis of coupling factors on asphalt aging based on dielectric properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(5), 04023062.
- Hu, J., Wu, S., Liu, Q., Hernández, M. I. G., & Zeng, W. (2018). Effect of ultraviolet radiation on bitumen by different ageing procedures. *Construction and Building Materials*, 163, 73-79.
- Hu, M., Ling, S., Sun, D., Lu, T., Ma, J., & Sun, Y. (2022). A sustainable high-viscosity modified asphalt modified with multiple anti-aging agents: Microchemical analysis and macro-rheological characterization. *Construction and Building Materials*, 339, 127701.
- Hung, A. M., & Fini, E. H. (2019). Absorption spectroscopy to determine the extent and mechanisms of aging in bitumen and asphaltenes. *Fuel*, 242, 408-415.
- Hung, A. M., Goodwin, A., & Fini, E. H. (2017). Effects of water exposure on bitumen surface microstructure. *Construction and Building Materials*, 135, 682-688.
- Hung, A. M., Kazembeyki, M., Hoover, C. G., & Fini, E. H. (2019). Evolution of morphological and nanomechanical properties of bitumen thin films as a result of compositional changes due to ultraviolet radiation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(21), 18005-18014.
- Hung, A., & Fini, E. H. (2020). Surface morphology and chemical mapping of UV-aged thin films of bitumen. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(31), 11764-11771.
- Hung, A., Li, M., & Fini, E. H. (2021). Effects of elemental sulfur on the aging trajectory and adhesion characteristics of rubber-modified bitumen. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(50), 16918-16925.
- He, Y., Hu, Q., Zhao, X., Zhang, J., Lyu, L., Li, Y., & Fini, E. H. (2025). Impacts of ultraviolet irradiation on asphalt binder: a comprehensive review. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1), 2472839.
- Jamal, M., & Giustozzi, F. (2022). Enhancing the asphalt binder's performance against oxidative ageing and solar radiations by incorporating rubber from waste tyres. *Construction and Building Materials*, 350, 128803.
- Jamal, M., Lanotte, M., & Giustozzi, F. (2022). Exposure of crumb rubber modified bitumen to UV

- data. *Construction and Building Materials*, 316, 125816.
- Mouillet, V., Farcas, F., Chailleux, E., & Sauger, L. (2014). Evolution of bituminous mix behaviour submitted to UV rays in laboratory compared to field exposure. *Materials and structures*, 47(8), 1287-1299.
- Osmari, P. H., Leite, L. F. M., Aragão, F. T. S., Cravo, M. C. C., Dantas, L. N., & Macedo, T. F. (2019). Cracking resistance evaluation of asphalt binders subjected to different laboratory and field aging conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 20(sup2), S663-S677.
- Peng, C., Huang, S., You, Z., Xu, F., You, L., Ouyang, H., ... & Dai, J. (2020). Effect of a lignin-based polyurethane on adhesion properties of asphalt binder during UV aging process. *Construction and Building Materials*, 247, 118547.
- Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., & Stastna, G. (2015). A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances In Colloid and Interface Science*, 224, 72-112.
- Rajib, A., & Fini, E. H. (2020). Inherently functionalized carbon from lipid and protein-rich biomass to reduce ultraviolet-induced damages in bituminous materials. *ACS Omega*, 5(39), 25273-25280.
- Seyer, A., & Sanlidag, T. (2020). Solar ultraviolet radiation sensitivity of SARS-CoV-2. *The Lancet Microbe*, 1(1), e8-e9.
- Sun, X., Peng, Q., Zhu, Y., Chen, Q., Yuan, J., & Zhu, Y. (2022a). Effects of UV Aging on Physical Properties and Physicochemical Properties of ASA Polymer-Modified Asphalt. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 1157687.
- Sun, X., Qin, X., Liu, Z., Yin, Y., Zou, C., & Jiang, S. (2020). New preparation method of bitumen samples for UV aging behavior investigation. *Construction and Building Materials*, 233, 117278.
- Sun, X., Xu, Q., Fang, G., Zhu, Y., Yuan, Z., Chen, Q., & Yuan, J. (2022b). Effect Investigation of Ultraviolet Ageing on the Rheological Properties, Micro-Structure, and Chemical Composition of Asphalt Binder Modified by Modifying Polymer. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 7190428.
- Sun, X., Yuan, J., Liu, Z., Qin, X., & Yin, Y. (2021). Evaluation and characterization on the segregation and dispersion of anti-UV aging modifying agent in asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 289, 123204.
- Tang, D., Zhao, Y., Xu, G., Yang, T., & Han, D. (2023). Research on the adsorption capacity between asphaltene and resin in asphalt with different aging degree: Experimental study and quantum-mechanical
- Li, Y., Ma, X., Tang, H., Pei, J., Li, D., Kang, C., & Ji, J. (2021b). Investigation on aging resistance of ternary compound carbon nitride (CN-Bi-Tr-DC) modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 313, 125522.
- Li, Y., Wu, S., Dai, Y., Li, C., Song, W., Li, H., & Shu, B. (2020b). Transitions of component, physical, rheological and self-healing properties of petroleum bitumen from the loose bituminous mixture after UV irradiation. *Fuel*, 262, 116507.
- Liu, Q., Yi, X., Falchetto, A. C., Cai, M., & Yu, B. (2024). UV-induced gradient aging of bitumen films: A comprehensive study. *Fuel*, 357, 130088.
- Lu, Y., & Khalil, M. A. K. (1996). The distribution of solar radiation in the earth's atmosphere: the effects of ozone, aerosols and clouds. *Chemosphere*, 32(4), 739-758.
- Liang, M., Guo, M., Xu, X., Liu, X., Liu, H., & Bi, Y. (2023). Study on accelerated aging rate of asphalt binder under multi-factors coupling conditions. *Construction and Building Materials*, 400, 132819.
- Liu, H., Zhang, Z., Tian, Z., & Lu, C. (2022a). Exploration for UV aging characteristics of asphalt binders based on response surface methodology: Insights from the UV aging influencing factors and their interactions. *Construction and Building Materials*, 347, 128460.
- Liu, H., Zhang, Z., Tian, Z., Li, N., Li, H., & Wang, P. (2022b). Optimization of the evaluation indexes for asphalt UV aging behaviors based on multi-scale characterization methods: From the evolution of their physical-chemical properties and microscope morphology. *Construction and Building Materials*, 347, 128532.
- Liu, L., Liu, Z., Hong, L., & Huang, Y. (2020). Effect of ultraviolet absorber (UV-531) on the properties of SBS-modified asphalt with different block ratios. *Construction and Building Materials*, 234, 117388.
- Lu, W., Peng, X., Lv, S., Yang, Y., Wang, J., Wang, Z., & Xie, N. (2023). High-temperature properties and aging resistance of rock asphalt ash modified asphalt based on rutting index. *Construction and Building Materials*, 363, 129774.
- Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 131-139.
- Mirwald, J., Nura, D., & Hofko, B. (2022). Recommendations for handling bitumen prior to FTIR spectroscopy. *Materials and Structures*, 55(2), 26.
- Mirwald, J., Nura, D., Eberhardsteiner, L., & Hofko, B. (2022). Impact of UV-Vis light on the oxidation of bitumen in correlation to solar spectral irradiance

- Wu, S., Ye, Y., Li, Y., Li, C., Song, W., Li, H., & Nie, S. (2019). The effect of UV irradiation on the chemical structure, mechanical and self-healing properties of asphalt mixture. *Materials*, 12(15), 2424.
- Xiang, Y., Xie, Y., Long, G., & Zeng, L. (2019). Ultraviolet irradiation of crumb rubber on mechanical performance and mechanism of rubberised asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 20(7), 1624-1637.
- Xiao, F., Amirkhanian, S. N., Karakouzian, M., & Khalili, M. (2015). Rheology evaluations of WMA binders using ultraviolet and PAV aging procedures. *Construction and Building Materials*, 79, 56-64.
- Xiao, J., Zhang, J., Zhang, H., Bi, Y., Yue, H., & Xu, R. (2023). Preparation and characterization of organic red mud and its application in asphalt modification. *Construction and Building Materials*, 367, 130269.
- Xiao, M. M., & Fan, L. (2022). Ultraviolet aging mechanism of asphalt molecular based on microscopic simulation. *Construction and Building Materials*, 319, 126157.
- Xiong, W., Liu, Y., Muhammad, Y., Han, F., Yang, L., Jin, X., ... & Li, J. (2023). MXene by regulating etching conditions enhanced UV resistance of SBS modified asphalt: Evaluating asphalt photo-oxidation and SBS degradation. *Construction and Building Materials*, 377, 131006.
- Xu, S., Dang, L., Yu, J., Xue, L., Hu, C., & Que, Y. (2018). Evaluation of ultraviolet aging resistance of bitumen containing different organic layered double hydroxides. *Construction and Building Materials*, 192, 696-703.
- Xu, S., Huang, J., Tighe, S., Zhang, C., Ma, H., Jia, X., & Zhou, X. (2022a). Aging evaluation of base and SBS modified bitumens under the coupling effect of multiple aging factors. *Construction and Building Materials*, 348, 128670.
- Xu, S., Wang, Y., Jia, X., Bian, C., Tighe, S., Zhang, C., ... & Zhang, C. (2022b). Anti-aging performance and mechanism analysis of styrene-butadiene-styrene modified bitumen containing antioxidant/cinnamic acid intercalated layered double hydroxides. *Construction and Building Materials*, 361, 129660.
- Xu, S., Yu, J., Zhang, C., & Sun, Y. (2015). Effect of ultraviolet aging on rheological properties of organic intercalated layered double hydroxides modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 75, 421-428.
- Xu, Z., Wang, H., & Xu, T. (2022c). Bituminous modifier selection and effects of dimethyl sulfoxide pretreated graphene contents on bituminous properties. *Construction and Building Materials*, 343, 128145.
- calculation. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137651.
- Verma, A., Zanoletti, A., Kareem, K. Y., Adelodun, B., Kumar, P., Ajibade, F. O., ... & Dwivedi, A. (2024). Skin protection from solar ultraviolet radiation using natural compounds: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(1), 273-295.
- Viana Guzmán, S., Baldi Sevilla, A., & Elizondo Salas, A. L. (2023). The solar irradiance coefficient as an empirical parameter in tests of accelerated aging by weathering on costa rican asphalt binders. *Journal of Testing and Evaluation*, 51(4), 2274-2281.
- Wang, F., Xiao, Y., Cui, P., Lin, J., Li, M., & Chen, Z. (2020a). Correlation of asphalt performance indicators and aging Degrees: A review. *Construction and Building Materials*, 250, 118824.
- Wang, J., Sui, M., Li, H., & Yuan, B. (2020b). The effects of ultraviolet disinfection on vancomycin-resistant *Enterococcus faecalis*. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(2), 418-429.
- Wang, K., Cheng, X., Zhu, Y., & Li, H. (2023a). Study on performance deterioration regularity of hot regenerated asphalt mixture under multiple aging factors. *Construction and Building Materials*, 369, 130568.
- Wang, L., Cui, S., & Feng, L. (2021). Research on the influence of ultraviolet aging on the interfacial cracking characteristics of warm mix crumb rubber modified asphalt mortar. *Construction and Building Materials*, 281, 122556.
- Wang, Q., Min, Z., Wong, Y. D., Shi, Z., & Huang, W. (2023b). Aging degradation of anhydride-cured epoxy asphalt binder subjected to ultraviolet exposure. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(1), 2171037.
- Wang, Y., Li, B., Li, D., Wei, D., Tu, C., Ren, X., & Zhang, Y. (2023c). Effects of oxygen isolation and light-oxygen coupling ultraviolet aging on adhesion, micromorphology, and functional groups of warm-mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(9), 04023309.
- Wang, Y., Wang, W., & Wang, L. (2022). Understanding the relationships between rheology and chemistry of asphalt binders: A review. *Construction and Building Materials*, 329, 127161.
- White, J. W., Hoogenboom, G., Wilkens, P. W., Stackhouse Jr, P. W., & Hoel, J. M. (2011). Evaluation of satellite-based, modeled-derived daily solar radiation data for the continental United States. *Agronomy Journal*, 103(4), 1242-1251.
- Wu, H., Li, L., Yu, J., Xu, S., & Xie, D. (2016). Effect of layered double hydroxides on ultraviolet aging properties of different bitumens. *Construction and Building Materials*, 111, 565-570.

- Zeng, S., Gong, X., Han, X., Xu, S., Xu, J., Li, X., & Yu, J. (2022). Effect of organic attapulgite on properties of SBS modified asphalt waterproofing membranes. *Construction and Building Materials*, 360, 129606.
- Zeng, W., Wu, S., Pang, L., Chen, H., Hu, J., Sun, Y., & Chen, Z. (2018). Research on Ultra Violet (UV) aging depth of asphalts. *Construction and Building Materials*, 160, 620-627.
- Zeng, W., Wu, S., Wen, J., & Chen, Z. (2015). The temperature effects in aging index of asphalt during UV aging process. *Construction and Building Materials*, 93, 1125-1131.
- Zhang, C., Wang, T., Yu, M., Xu, S., Feng, Z., Hu, C., & Duan, W. (2021a). Preparation and performance of 3-aminopropyltriethoxysilane surface modified layered double hydroxides on ultraviolet aging resistance of bitumen. *Construction and Building Materials*, 292, 123411.
- Zhang, C., Yu, J., Wang, T., Xu, S., Hu, C., & Duan, W. (2020). Evaluation of ultraviolet aging resistance of bitumen modified with isobutyltriethoxysilane surface organic grafted LDH. *Construction and Building Materials*, 241, 118016.
- Zhang, H., Chen, Z., Xu, G., & Shi, C. (2018). Evaluation of aging behaviors of asphalt binders through different rheological indices. *Fuel*, 221, 78-88.
- Zhang, S., Cui, Y., & Wei, W. (2021b). Low-temperature characteristics and microstructure of asphalt under complex aging conditions. *Construction and Building Materials*, 303, 124408.
- Zheng, D., Qian, Z. D., Li, P., & Wang, L. B. (2019). Performance evaluation of high-elasticity asphalt mixture containing inorganic nano-titanium dioxide for applications in high altitude regions. *Construction and Building Materials*, 199, 594-600.
- Zhou, S., Li, S., & Yan, C. (2023). Influence of fumed silica nanoparticles on the rheological and anti-aging properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, 397, 132388.
- Zhu, C., Zhang, H., & Zhang, Y. (2019). Influence of layered silicate types on physical, rheological and aging properties of SBS modified asphalt with multi-dimensional nanomaterials. *Construction and Building Materials*, 228, 116735.
- Xu, Y., Niu, K., Zhu, H., Chen, R., Ou, L., & Wang, J. (2024). Generation and evolution mechanisms of asphalt aging under the combined effects of intense UV radiation and large temperature variations. *Construction and Building Materials*, 438, 136786.
- Yang, B., Li, H., Sun, Y., Zhang, H., Liu, J., Yang, J., & Zhang, X. (2023a). Chemo-rheological, mechanical, morphology evolution and environmental impact of aged asphalt binder coupling thermal oxidation, ultraviolet radiation and water. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135866.
- Yang, J., Zhang, Z., Xue, J., Lei, J. A., Liu, Y., Wang, Y., & Fang, Y. (2023b). Variation and mechanism of asphalt-aggregate interface features under ultraviolet aging based on meso-and micro-observations. *Construction and Building Materials*, 400, 132830.
- Yang, X., Liu, G., Zhang, H., Meng, Y., Peng, C., He, X., & Liang, J. (2023c). Aging behavior of polyphosphoric acid/styrene-butadiene-styrene-modified bio-mixed asphalt based on high-temperature rheological properties and microscopic mechanism. *Construction and Building Materials*, 389, 131691.
- Yao, Q., Song, Y., & Li, Q. (2023). Research on creep and thermal stability of asphalt under outdoor aging (NEA) in Tibetan areas. *Systems Science & Control Engineering*, 11(1), 2180686.
- Yu, H., Lin, Y., Yu, J., Dong, N., Jin, J., & Guo, F. (2022). Recycling potential of used crumb rubber for second-round asphalt modification. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132797.
- Yu, H., Yao, D., Qian, G., Cai, J., Gong, X., & Cheng, L. (2021). Effect of ultraviolet aging on dynamic mechanical properties of SBS modified asphalt mortar. *Construction and Building Materials*, 281, 122328.
- Zadshir, M., Hosseinnezhad, S., Ortega, R., Chen, F., Hochstein, D., Xie, J., & Fini, E. H. (2018). Application of a biomodifier as fog sealants to delay ultraviolet aging of bituminous materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12), 04018310.
- Zadshir, M., Ploger, D., Yu, X., Sangiorgi, C., & Yin, H. (2020). Chemical, thermophysical, rheological, and microscopic characterisation of rubber modified asphalt binder exposed to UV radiation. *Road Materials and Pavement Design*, 21(sup1), S123-S139.

# Investigation of the Effect of Ultraviolet Radiation on Aging, Rheology, and Structural Changes of Bitumen in Asphalt Pavements

*Neda Kamboozia, Associate Professor, Department of Civil Engineering,  
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Elham Safari, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering,  
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Mohammad Reza Khakbaz, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering,  
Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.*

**E-mail: [nkamboozia@iust.ac.ir](mailto:nkamboozia@iust.ac.ir)**

Received: February 2026- Accepted: May 2026

## **ABSTRACT**

Asphalt pavements, as one of the key components of transportation infrastructure, are constantly exposed to various environmental factors, such as ultraviolet (UV) radiation. Due to its high energy, UV radiation is a critical factor in bitumen aging, leading to reduced durability and service life of pavements. Despite its destructive effects, comprehensive and sufficient standards for its assessment have not yet been fully established. This study aims to elucidate the mechanisms and consequences of UV-induced aging by examining the chemical, rheological, and mechanical changes in bitumen and asphalt mixtures. The results indicate that UV radiation, by generating free radicals and initiating chain oxidation reactions, leads to bitumen hardening, reduced flexibility, and weakened resistance to low-temperature cracking and repeated loading. Moreover, microscopic analyses reveal significant changes in the morphology and surface structure of asphalt, resulting in decreased adhesion and compromised self-healing performance. The study also discusses the challenges of laboratory simulation of this phenomenon and the influence of parameters such as wavelength, radiation intensity, and sample thickness. Finally, considering the importance of this issue, particularly in regions with high solar exposure, strategies such as using anti-aging additives and polymer modifiers are proposed to enhance pavement resistance. This research represents an important step toward a precise understanding of asphalt photodegradation mechanisms and the development of new standards to improve durability and reduce maintenance costs in transportation infrastructure.

**Keywords:** Bitumen Aging, Ultraviolet Radiation, Asphalt Pavement, Bitumen Rheology