Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

ISSN: 2821-0549

Research Article

Mechanical and Microstructural Evaluation of Hot Mix Asphalt Modified with Lignin and Cellulose Nanofiber in the Presence of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Pouyan Nazarian[a], Hassan Divandari[b*], Mohsen Amouzadeh Omrani[C*], Hossein Ghasemnejad[d]

[a] Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad University, Amol, I. R. Iran.
[b*] Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, I. R. Iran.
[c*] Department of Civil Engineering, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, I. R. Iran.
[d] Department of Civil Engineering, Am.C., Islamic Azad University, Amol, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2026-06-13

Revised: 2026-07-10

Accepted: 2026-07-18

Keywords:

Lignin,
Cellulose Nanofiber (CNF),
Hot Mix Asphalt (HMA),
Fatigue,
Dynamic creep,
Microstructure.

ABSTRACT

In recent years, the use of bio-based additives and recycled materials in asphalt pavements has attracted considerable attention as a sustainable approach to improve mechanical performance, while reducing environmental impacts. In the present study, individual and combined effects of lignin and cellulose nanofiber (CNF) on the mechanical properties and microstructure of hot mix asphalt (HMA), as well as on the performance of HMA containing 50% reclaimed asphalt pavement (RAP), were comparatively investigated. For this purpose, lignin was incorporated at 10%, 15%, and 20% by weight of the binder, while CNF was added at dosages of 0.5%, 0.75%, and 1.0% by weight of the binder. Mechanical performance of the mixtures was evaluated using indirect tensile strength (ITS), dynamic creep, four-point bending fatigue, and low-temperature semicircular bending (SCB) fracture tests. From the standpoint of mechanical performance, lignin significantly enhanced mixture stiffness and resistance to permanent deformation, whereas CNF exhibited a comparatively smaller contribution to rutting resistance. In contrast, CNF was more effective in improving the viscoelastic response, fatigue resistance, and low-temperature cracking performance. The dynamic creep test indicated that mixture containing 15% lignin exhibited the highest rutting resistance, while incorporation of 0.75% CNF resulted in a more balanced response against permanent deformation. Fatigue evaluation showed that increasing the lignin content reduced fatigue life, whereas CNF consistently improved the fatigue performance of the asphalt

*** Corresponding author.**

E-mail address: ha.divandari@iau.ac.ir , mo.omrani@iau.ac.ir

How to cite this article: Nazarian, P., Divandari, H., Amouzadeh Omrani, M. and Ghasemnejad, H. (2026). Mechanical and microstructural evaluation of hot mix asphalt modified with lignin and cellulose nanofiber in the presence of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 12(2), pp.49-88.*

DOI: https://doi.org/ 10.22075/jtie.2026.41568.1773

mixtures. Among the hybrid mixtures, those containing 10% lignin with 0.75%–1.0% CNF exhibited the longest fatigue life. Furthermore, lignin improved indirect tensile strength and moisture resistance, whereas CNF contributed more effectively to enhancing fatigue life and fracture energy. The SCB test demonstrated that increasing the CNF content increased fracture energy and reduced mixture brittleness, while higher lignin contents decreased fracture toughness. Evaluation of RAP mixtures revealed that presence of aged binder improved rutting resistance but reduced fatigue and low-temperature fracture performance. Microstructural analyses further indicated that increasing the contents of both additives decreased binder homogeneity and promoted particle agglomeration. Considering the overall fatigue performance, fracture resistance, durability, and microstructural characteristics, the mixture containing approximately 10% lignin and 0.5%–0.75% CNF was identified as the optimum combination, providing the most balanced performance under different service temperatures. The findings demonstrate that combined and controlled use of lignin and cellulose nanofiber can effectively provide an appropriate balance between rutting resistance, fatigue performance, and low-temperature cracking resistance, thereby offering a promising strategy for developing sustainable asphalt mixtures containing recycled materials.

© 2026 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

مجله زیرساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه : https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en

شاپا: 2821-0549

مقاله پژوهشی

ارزیابی رفتار مکانیکی و ریزساختاری مخلوط آسفالتی گرم اصلاح‌شده با لیگنین و نانوفیبر سلولزی در حضور مصالح خرده‌آسفالتی

پویان نظریان[۱]، حسن دیواندری[۲*]، محسن عموزاده عمرانی[۳*]، حسین قاسم‌نژاد[٤]

[۱] گروه مهندسی عمران، واحد آیت‌الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.

[۲] گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. ha.divandari@iau.ac.ir

[۳] گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران، mo.omrani@iau.ac.ir

[٤] گروه مهندسی عمران، واحد آیت‌الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱٤۰۵/۰۳/۲۳

بازنگری مقاله: ۱٤۰۵/۰٤/۱۹

پذیرش مقاله: ۱٤۰۵/۰٤/۲۷

واژه‌های کلیدی:

لیگنین،

نانوفیبر سلولزی،

مخلوط آسفالتی گرم،

خستگی،

خزش دینامیکی،

ریزساختار.

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از افزودنی‌های زیست‌پایه و مصالح بازیافتی در روسازی‌های آسفالتی به‌منظور بهبود عملکرد مکانیکی و کاهش اثرات زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش‌حاضر، اثر لیگنین و نانوفیبر سلولزی به‌صورت جداگانه و ترکیبی بر خصوصیات مکانیکی و ریزساختار مخلوط‌های آسفالتی گرم و همچنین بر رفتار مخلوط‌های گرم حاوی ۵۰ درصد مصالح خرده‌آسفالتی به‌صورت مقایسه‌ای بررسی شد. بدین منظور، مقادیر مختلف لیگنین (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیر) و نانوفیبر سلولزی (۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد وزنی قیر) در ساخت مخلوط‌ها مورد استفاده قرار گرفت. عملکرد مکانیکی مخلوط‌ها با استفاده از آزمون‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش دینامیکی، خستگی تیر خمشی و مقاومت شکست در دمای پایین مورد ارزیابی قرار گرفت. از نظر عملکرد مکانیکی، لیگنین اثر قابل‌توجهی در افزایش سفتی و مقاومت در برابر تغییرشکل‌های ماندگار داشت، در حالی که نانوفیبر سلولزی اثر کمتری در این زمینه نشان داد. در مقابل، نانوفیبر سلولزی تأثیر مؤثرتری بر بهبود رفتار ویسکوالاستیک، افزایش مقاومت‌خستگی و بهبود رفتار ترک‌خوردگی در دمای پایین داشت. در آزمون خزش دینامیکی، بهترین عملکرد دمای بالا مربوط به ترکیب حاوی ۱۵ درصد لیگنین بود و افزودن نانوفیبر سلولزی، به‌ویژه در مقدار ۰/۷۵ درصد، موجب ایجاد

پست الکترونیک نویسنده مسئول: ha.divandari@iau.ac.ir

استناد به این مقاله: نظریان، پویان.، دیواندری، حسن.، عموزاده عمرانی، محسن و قاسم‌نژاد، حسین. (۱٤۰۵). ارزیابی رفتار مکانیکی و ریزساختاری مخلوط آسفالتی گرم اصلاح‌شده با لیگنین و نانوفیبر سلولزی در حضور مصالح خرده‌آسفالتی. *مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل*، ۱۲ (۲)، ٤۹-۸۸.

DOI: https://doi.org/ 10.22075/jtie.2026.41568.1773

رفتار متعادل‌تر در برابر تغییرشکل دائمی شد. در ارزیابی خستگی، افزایش مقدار لیگنین موجب کاهش عمر خستگی گردید، در حالی که استفاده از نانوفیبر سلولزی سبب افزایش عمرخستگی و بهبود رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی شد. در میان نمونه‌های ترکیبی، مخلوط‌های حاوی ۱۰ درصد لیگنین و ۰/۷۵ تا ۱ درصد نانوفیبر سلولزی بهترین عملکرد خستگی را نشان دادند. همچنین، استفاده از لیگنین موجب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم و بهبود مقاومت‌رطوبتی شد، در حالی که نانوفیبر سلولزی نقش مؤثرتری در افزایش عمر خستگی و انرژی شکست ایفا کرد. نتایج آزمون مقاومت شکست نشان داد که افزایش مقدار نانوفیبر سلولزی موجب افزایش انرژی شکست و کاهش شکنندگی مخلوط می‌شود، در حالی که افزایش لیگنین باعث کاهش چقرمگی می‌شود. بررسی مخلوط‌های حاوی مصالح خرده‌آسفالتی نشان داد که حضور قیر پیرشده موجب بهبود نسبی مقاومت در برابر شیارشدگی و کاهش مقاومت خستگی و شکست در دماهای پایین می‌شود. نتایج تحلیل ریزساختاری نشان داد که افزایش مقدار هر دو افزودنی موجب کاهش همگنی قیر و افزایش تمایل به تجمع ذرات می‌شود. بر اساس نتایج حاصل، با درنظر گرفتن همزمان رفتار خستگی، مقاومت شکست، دوام و نتایج ریزساختاری، ترکیب حاوی حدود ۱۰ درصد لیگنین و ۰/۵ تا ۰/۷۵ درصد نانوفیبر سلولزی به‌عنوان ترکیب بهینه، بهترین تعادل عملکردی را در شرایط مختلف دمایی نشان داد. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده ترکیبی و کنترل‌شده از لیگنین و نانوفیبر سلولزی می‌تواند تعادل مناسبی میان مقاومت شیارشدگی، عملکرد خستگی و مقاومت ترک‌خوردگی در دماهای پایین ایجاد کرده و زمینه توسعه مخلوط‌های‌آسفالتی پایدار و حاوی مصالح بازیافتی را فراهم سازد.

۱. مقدمه

عملکرد و دوام روسازی‌های آسفالتی به‌طور مستقیم به کیفیت قیر و رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی وابسته است؛ موادی که نقش اصلی در تحمل بارهای ترافیکی و مقاومت در برابر شرایط محیطی و دمایی ایفا می‌کنند (الطاهر و همکاران، ۲۰۲٦). در سال‌های اخیر، افزایش ترافیک‌های سنگین، نوسانات شدید اقلیمی و محدودیت منابع قیری باعث شده است که رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر تنش‌های حرارتی، رطوبتی و مکانیکی بیش از گذشته مورد توجه قرار گیرد (عموزاده عمرانی و حصیرچیان، ۲۰۲۰؛ آلمیدا و پیکادو سانتوس، ۲۰۲۲). قیر به‌عنوان ماده چسباننده اصلی در مخلوط‌های آسفالتی، دارای رفتار ویسکوالاستیک بوده و حساسیت بالایی نسبت به تغییرات دمایی دارد. این ویژگی سبب می‌شود قیر در دماهای بالا نرم و مستعد شیارشدگی[1] شده و در دماهای پایین، با افزایش سفتی و شکنندگی، احتمال ترک‌خوردگی[2] افزایش یابد. این رفتار وابسته به دما، ضرورت بهبود خصوصیات قیر را در جهت کاهش آسیب‌های متداول و افزایش طول عمر روسازی آشکار می‌سازد (چارهی و بابا، ۲۰۲٤). در سال‌های اخیر، استفاده از مصالح خرده‌آسفالتی[3] (RAP) به‌عنوان یک راهکار پایدار برای کاهش مصرف منابع قیری و هزینه‌های اجرایی مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، حضور قیر پیرشده در RAP می‌تواند موجب افزایش سفتی و کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط‌های آسفالتی شود (دیواندری و باشکول، ۲۰۲۱). بنابراین در پژوهش حاضر، از RAP به‌عنوان یک عامل مقایسه‌ای در کنار مخلوط پایه استفاده شده و تمرکز اصلی بر بررسی اثر افزودنی‌های زیستی بر بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی قرار دارد؛ اما حضور قیر پیرشده و سخت‌شده در RAP، ویژگی‌های چسبندگی و انعطاف‌پذیری مخلوط را تحت تأثیر قرار داده و در بسیاری از موارد موجب کاهش عملکرد در برابر خستگی[4] و ترک‌خوردگی می‌شود (تارسی و همکاران، ۲۰۲۰). در چنین شرایطی، نقش فناوری‌های اصلاح قیر و افزودنی‌های نوین، چه در سطح میکرو و چه نانو، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. هم‌زمان با نگرانی‌های زیست‌محیطی و محدودیت‌های منابع فسیلی، پژوهشگران رویکردی نوین را در پیش گرفته‌اند، که شامل استفاده از افزودنی‌های زیستی و پایدار برای اصلاح قیر تازه و بازیافتی است (مسکو و همکاران، ۲۰۲٤؛ عموزاده عمرانی و باباگلی، ۲۰۲۳). افزودنی‌هایی نظیر لیگنین و نانوفیبر سلولزی[5]، که از منابع تجدیدپذیر کشاورزی و جنگلی استخراج می‌شوند، ظرفیت مناسبی برای کاهش وابستگی به مواد نفتی و بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دمایی مختلف دارند (قابچی و کاسترو، ۲۰۲۱؛ وو و همکاران، ۲۰۲۱). توسعه این رویکردهای نوین زمینه‌ای ایجاد کرده است تا بتوان ضمن حفظ اصول مهندسی، به معیارهای پایداری و سازگاری زیست‌محیطی نیز پاسخ داد. با وجود مطالعات متعدد در باره استفاده از لیگنین، نانوفیبر سلولزی و مصالح خرده‌آسفالتی، بیشتر پژوهش‌های پیشین اثر هر یک از این افزودنی‌ها را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند و اطلاعات محدودی درباره عملکرد هم‌زمان لیگنین و نانوفیبر سلولزی در مخلوط‌های آسفالتی، به‌ویژه در حضور درصد بالای مصالح خرده‌آسفالتی، وجود دارد. همچنین در اغلب مطالعات، ارتباط میان رفتار رئولوژیکی چسبنده قیری، ویژگی‌های ریزساختاری و عملکرد مکانیکی مخلوط آسفالتی به‌صورت یکپارچه مورد ارزیابی قرار نگرفته است. این خلأ پژوهشی، ضرورت

1- Rutting
2- Cracking
3 - Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)
4 - Fatigue
5 - Cellulose Nanofibers (CNF)

انجام مطالعه حاضر را برای بررسی هم‌زمان این جنبه‌ها آشکار می‌سازد.

پژوهش حاضر با هدف بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم[1] و ارزیابی قابلیت استفاده از افزودنی‌های زیستی در حضور مصالح خرده‌آسفالتی انجام شده است. نوآوری اصلی پژوهش حاضر در استفاده هم‌زمان از دو افزودنی زیست‌پایه شامل لیگنین ضایعاتی حاصل از صنایع چوب و کاغذ و نانوفیبر سلولزی تولیدشده از جلبک‌های طبیعی، به‌منظور اصلاح قیر و بررسی اثرات منفرد و ترکیبی آن‌ها بر رفتار عملکردی مخلوط آسفالتی نهفته است (برخلاف اغلب مطالعات پیشین که هر یک از این افزودنی‌ها را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند). در این پژوهش، لیگنین با هدف افزایش سفتی و بهبود مقاومت در برابر شیارشدگی و نانوفیبر سلولزی به‌عنوان افزودنی تقویت‌کننده رفتار خستگی و مقاومت ترک‌خوردگی مورد استفاده قرار گرفت. استفاده هم‌زمان از این دو افزودنی امکان بررسی اثر هم‌افزایی آن‌ها بر بهبود رفتار عملکردی مخلوط آسفالتی در شرایط دمایی مختلف را فراهم ساخت. افزون بر این، برای بررسی نحوه پراکنش و اندرکنش افزودنی‌ها در ساختار قیر، از تحلیل‌های ریزساختاری و شیمی سطحی شامل SEM[2]، EDS[3] و Mapping استفاده شد. همچنین، به‌منظور ارزیابی عملکرد این افزودنی‌ها در سیستم‌های بازیافتی، رفتار مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد مصالح خرده‌آسفالتی نیز به‌صورت مقایسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت.

در مجموع، نتایج این پژوهش می‌تواند زمینه مناسبی برای توسعه مخلوط‌های آسفالتی پایدار، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست، به‌ویژه در حضور مصالح بازیافتی، فراهم سازد.

۲. پیشینه پژوهش

قیر نسبت به تغییرات دمایی حساسیت بالایی دارد و این ویژگی موجب می‌شود خواص فیزیکی و شیمیایی آن در دماهای مختلف به‌طور قابل توجهی تغییر کند (ویگل و استفان، ۲۰۱۸). این تغییرات رفتاری می‌تواند زمینه‌ساز بروز انواع مختلف خرابی‌ها در روسازی آسفالتی شود. به‌عنوان مثال، ترک‌خوردگی خستگی در دماهای متوسط و شیارشدگی در دماهای بالا از مهم‌ترین آسیب‌های عملکردی روسازی‌های آسفالتی به شمار می‌روند (ال‌خطیب و قوزلان، ۲۰۱٤؛ وی و همکاران، ۲۰۲۵؛ دسو و همکاران، ۲۰۱۸). از آنجا که روسازی‌ها همواره در معرض شرایط متغیر اقلیمی و بارگذاری ترافیکی قرار دارند، بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در بازه‌های مختلف دمایی و کاهش احتمال خرابی‌های مرتبط، همواره یکی از اهداف اصلی پژوهشگران بوده است. در این راستا، استفاده از افزودنی‌ها به‌منظور اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی، یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش حساسیت حرارتی و بهبود عملکرد روسازی محسوب می‌شود (روهیزی و همکاران، ۲۰۲۳؛ منصوری و مدرس، ۲۰۲۰). همچنین، در سال‌های اخیر، با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از افزودنی‌های زیست‌پایه و سازگار با محیط‌زیست در صنعت روسازی مورد توجه قرار گرفته است (گریلی و همکاران، ۲۰۱۹). پسماندهای کشاورزی و زیستی از جمله منابعی هستند که در دهه‌های اخیر به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های زیستی قیر و مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (گونتارد و همکاران، ۲۰۱۸). در این میان، لیگنین و نانوفیبرسلولزی به‌عنوان افزودنی‌های پلیمری زیست‌پایه، کاربرد گسترده‌ای در بهبود عملکرد روسازی‌های آسفالتی پیدا کرده‌اند (یائو و همکاران، ۲۰۲۲؛ آبِ و همکاران، ۲۰۲۲؛ آنتونی خوزه و همکاران، ۲۰۲۵). لیگنین یک پلیمر

1- Hot Mix Asphalt (HMA)
2 Scanning Electron Microscope (SEM)
3- Energy Dispersive Spectrometry (EDS)

طبیعی و کم‌هزینه است که عمدتاً از ضایعات صنایع چوب و کاغذ به‌دست می‌آید (تن و ورمریس، ۲۰۱۵). از سوی دیگر، نانوفیبر سلولزی با توسعه فناوری نانو، از سلولز به‌عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی جهان استخراج شده و در سال‌های اخیر در صنایع مختلف مهندسی مورد توجه قرار گرفته است (واسکز و همکاران، ۲۰۱٤).

مطالعات متعددی اثر لیگنین را بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی بررسی کرده‌اند که عمدتاً بر خواص ضدپیری و بهبود عملکرد در دماهای بالا متمرکز بوده‌اند (سان و همکاران، ۲۰۲۳؛ لی و همکاران، ۲۰۲۵؛ شو و همکاران، ۲۰۱۷). میزان مصرف لیگنین در این مطالعات بین ۳ تا ٤٥ درصد وزنی قیر گزارش شده است. نتایج اغلب این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از لیگنین موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا می‌شود (ژاوو و همکاران، ۲۰۲۰؛ شو و همکاران، ۲۰۲۱). به‌عنوان نمونه، نتایج آزمون رئومتر برشی دینامیکی[1] در برخی مطالعات نشان داده است که استفاده از ۵ تا ۱۰ درصد لیگنین موجب افزایش پارامتر شیارشدگی قیر شده و مقاومت آن را در برابر تغییر شکل دائمی بهبود می‌بخشد (گوئدنزی و همکاران، ۲۰۲۳). با وجود مزایای لیگنین در بهبود عملکرد دمای بالا، برخی مطالعات نشان داده‌اند که این افزودنی می‌تواند اثرات نامطلوبی بر رفتار قیر در دماهای متوسط و پایین داشته باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج آزمون‌هایی نظیر رئومتر برشی دینامیکی، رئومتر تیر خمشی[2]، آزمون بازیابی خزش تنش چندگانه[3] و آزمون جابجایی دامنه خطی (LAS) نشان داده‌اند که اگرچه مقاومت در برابر شیارشدگی افزایش می‌یابد، اما در برخی موارد شکل‌پذیری و عمر خستگی قیر کاهش پیدا می‌کند (شو و همکاران، ۲۰۱۷). به همین دلیل، استفاده هم‌زمان از یک افزودنی مکمل با قابلیت بهبود رفتار دماهای متوسط و پایین می‌تواند رویکرد مناسبی برای جبران این محدودیت‌ها باشد.

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد لیگنین، پژوهشگران علاوه بر آزمون‌های قیری، رفتار مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با این افزودنی را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مطالعات، از آزمون‌هایی نظیر مقاومت کششی غیرمستقیم[4]، ردیابی چرخ، غوطه‌وری مارشال، خستگی خمشی و خستگی کششی غیرمستقیم استفاده شده است (یوئی و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژیانگ و همکاران، ۲۰۲٤). نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که استفاده از لیگنین موجب افزایش مقاومت شیارشدگی و بهبود پایداری مخلوط‌های آسفالتی می‌شود، هرچند تأثیر آن بر عملکرد در دماهای پایین و مقاومت ترک‌خوردگی محدود گزارش شده است (عرفات و همکاران، ۲۰۱۹). در مقابل، نانوفیبر سلولزی به‌عنوان یکی از افزودنی‌های نوین زیست‌پایه، با توسعه فناوری نانو کاربرد گسترده‌ای در اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی یافته است (آنتونی ژوزه و همکاران، ۲۰۲۵). توانایی این افزودنی در پل‌زنی ترک‌ها و افزایش ظرفیت باربری، از مهمترین مزایای آن محسوب می‌شود (مهاجرانی و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از CNF می‌تواند مقاومت شکست و عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی را بهبود بخشد (کاسترو، ۲۰۲۰). اگرچه مقادیر مصرفی CNF در تحقیقات مختلف بین صفر تا ۱۰ درصد وزنی قیر گزارش شده است، اغلب پژوهش‌ها مقادیر کمتر از ۱ درصد را به‌عنوان محدوده بهینه معرفی کرده‌اند (قابچی و کاسترو، ۲۰۲٤؛ شعبانی و همکاران، ۲۰۲٤). علاوه بر این، استفاده از نانوفیبر سلولزی موجب بهبود خواص رئولوژیکی قیر، افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه و کاهش شدت خرابی‌هایی نظیر تغییرشکل دائمی شده است. همچنین بهبود مقاومت در برابر خزش دینامیکی[5]

1- Dynamic Shear Rheometer (DSR)
2 - Bending Beam Rheometer Test (BBR)
3 - Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)

4- Indirect Tensile Test (ITS)
5- Dynamic creep

و افزایش پایداری مارشال در مخلوط‌های اصلاح‌شده با CNF گزارش شده است.

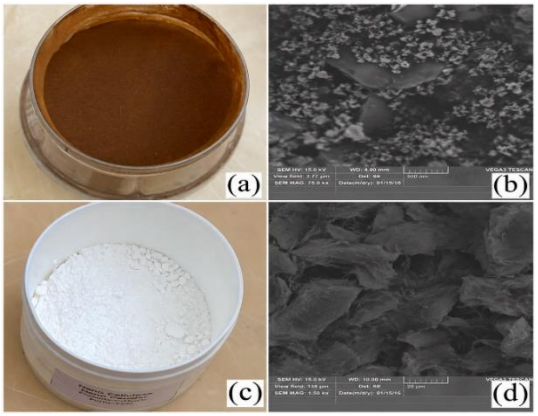
در سال‌های اخیر، استفاده از مصالح خرده‌آسفالتی به‌عنوان یکی از راهکارهای توسعه پایدار در صنعت روسازی مورد توجه گسترده قرار گرفته است (عموزاده عمرانی و همکاران، ۲۰۲۲). استفاده از RAP می‌تواند موجب کاهش مصرف منابع طبیعی، کاهش مصرف قیر تازه و کاهش هزینه‌های اجرایی شود . با این حال، حضور قیر پیرشده در RAP معمولاً موجب افزایش سفتی مخلوط و کاهش انعطاف‌پذیری آن می‌شود که این موضوع می‌تواند مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر ترک‌خوردگی، به‌ویژه در دماهای پایین، کاهش دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). به همین دلیل، استفاده از افزودنی‌های اصلاح‌کننده برای بهبود عملکرد مخلوط‌های حاوی RAP به یکی از موضوعات مهم پژوهشی تبدیل شده است. در این میان، آزمون نیم‌دایره خمشی[1] به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای ارزیابی مقاومت شکست و رفتار ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است (رن و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که پارامترهایی نظیر انرژی شکست، شاخص انعطاف‌پذیری و مقاومت ترک‌خوردگی، معیارهای مناسبی برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دماهای پایین هستند (محمدی و مدرس، ۲۰۲۲؛ رضازاد گوهری و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از افزودنی‌های پلیمری و زیست‌پایه می‌تواند اثرات منفی ناشی از حضور RAP را کاهش داده و عملکرد مخلوط آسفالتی را در برابر گسترش ترک بهبود بخشد (عطائیان و همکاران، ۲۰۲۳).

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه مصالح بازیافتی و افزودنی‌های زیست‌پایه، همچنان ابهاماتی در زمینه ارزیابی همزمان اثرات لیگنین و نانوفیبر سلولزی و همچنین رفتار این ترکیبات در حضور مصالح خرده آسفالتی وجود دارد. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرات منفرد و ترکیبی این دو افزودنی و همچنین ارزیابی عملکرد مخلوط‌های طراحی‌شده حاوی ۵۰ درصد مصالح خرده آسفالتی در مقایسه با مخلوط‌های مرجع (بدون RAP) انجام شده است. وجه تمایز این تحقیق، در ارائه یک ارزیابی یکپارچه شامل عملکرد مکانیکی، تحلیل ریزساختاری و مقایسه عملکرد در حضور و عدم حضور مصالح خرده آسفالتی می‌باشد.

۳. روش تحقیق

افزودنی‌های زیستی مورد استفاده در این تحقیق شامل لیگنین (LIG) و نانوفیبر سلولز (CNF) بود. پودر لیگنین از فاضلاب کارخانه تولید کاغذ به‌دست آمد. اسید سولفوریک ابتدا به فاضلاب اضافه شد و لیگنین با استفاده از فرآیند سانتریفیوژ جدا شد. لیگنین استخراج شده سپس برای حذف اسید باقی‌مانده و سایر ناخالصی‌ها شسته شد. سپس برای از بین بردن کامل رطوبت، در دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس خشک شد. در نهایت، لیگنین خشک شده آسیاب شد تا پودر مورد نظر به‌دست آید. شکل ۱-a تصویری از پودر لیگنین به‌دست آمده را نشان می‌دهد، در حالی که شکل ۱-b ساختار میکروسکوپی و مورفولوژی دانه‌ای آن را نشان می‌دهد. در جدول ۱، خواص شیمیایی و فیزیکی پودر لیگنین ارائه شده است.

1 -Semi-Circular Bending (SCB)



شکل ۱. تصاویر مواد و افزودنی‌های مورد استفاده در تحقیق: a) پودر لیگنین، b) تصویر میکروسکوپی لیگنین، c) CNF و d) تصویر میکروسکوپی از CNF

جدول ۱. خصوصیات پودر لیگنین

ویژگی (واحد)	نتیجه
محدوده اندازه دانه‌ها (میکرومتر)	۱۰ تا ۱۵۰
حالت فیزیکی	پودر جامد
رنگ	قهوه‌ای تیره
مقدار خاکستر پس از ۱۲ ساعت در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس (درصد)	۳/۳
مهم‌ترین عناصر تشکیل دهنده	C, H, O

نانوفیبر سلولزی (CNF) یکی از مشتقات پیشرفته سلولز است که به دلیل ساختار نانومقیاس، سطح ویژه بالا و خواص مکانیکی مطلوب، کاربرد گسترده‌ای در اصلاح مواد مهندسی از جمله چسبنده قیری و مصالح روسازی پیدا کرده است. سلولز به‌طور کلی از نظر طول الیاف و ساختار مولکولی دارای تنوع بالایی بوده و شامل اجزای مختلفی نظیر آلفا، بتا و گاما سلولز به‌همراه همی‌سلولز می‌باشد. در میان این اجزا، آلفا سلولز به‌دلیل خلوص بالا و سهم بالای فاز کریستالی، ماده اولیه اصلی در تولید نانوفیبر سلولزی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، نانوفیبر سلولزی از جلبک به‌عنوان یک منبع زیست‌پایه و تجدیدپذیر تولید شد. استفاده از جلبک به‌عنوان ماده اولیه، علاوه بر دسترسی مناسب و سازگاری زیست‌محیطی، امکان استخراج سلولز با ساختار یکنواخت و خلوص بالا را فراهم می‌کند. فرآیند تولید CNF از جلبک شامل ترکیبی از مراحل شیمیایی و مکانیکی است. در مرحله نخست، جلبک‌ها به‌منظور حذف آلودگی‌های سطحی تحت شستشوی اولیه قرار گرفتند. سپس اجزای آلی ناخواسته نظیر پروتئین‌ها و برخی پلی‌ساکاریدها با استفاده از یک محلول قلیایی از ساختار جلبک حذف شدند. به‌منظور حذف رنگدانه‌ها و دستیابی به سلولز سفیدشده، از عامل سفیدکننده مناسب در این مرحله استفاده شد. پس از آماده‌سازی اولیه، فرآیند هیدرولیز اسیدی به‌منظور حذف بخش آمورف سلولز انجام گرفت. این مرحله نقش کلیدی در افزایش درجه بلورینگی سلولز داشته و منجر به باقی‌ماندن فاز کریستالی غالب، که مشخصه اصلی نانوفیبر سلولزی است، می‌شود. از آنجا که آلفا سلولز به‌طور معمول شامل حدود ۲۰ درصد بخش آمورف و ۸۰ درصد بخش کریستالی است، حذف کنترل‌شده فاز آمورف، امکان استخراج نانوفیبرهایی با ساختار پایدار و خواص مکانیکی بهبودیافته را فراهم می‌سازد. در ادامه، برای دستیابی به ابعاد نانومقیاس، سلولز کریستالی حاصل تحت فرآیند آسیاب و تجزیه مکانیکی قرار گرفت. مرحله نهایی شامل شستشو و خنثی‌سازی باقی‌مانده مواد اسیدی و سپس خشک‌کردن محصول نهایی بود. به‌منظور بررسی مورفولوژی و ترکیب شیمیایی نانوفیبر سلولزی تولیدشده، از آزمون‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و نقشه‌برداری عنصری (EDS-Mapping) استفاده شد که یکنواختی ساختار و حضور عناصر اصلی تشکیل‌دهنده CNF را تأیید می‌کند.

شکل ۱- C تصویری از CNF به‌دست آمده را نشان می‌دهد، در حالی که شکل ۱- d دمای میکروسکوپی ساختار فیبری آن را نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های ۱-b و ۱- d به وضوح ماهیت دانه‌ای لیگنین را در مقابل مورفولوژی فیبری CNF تحت بزرگنمایی ۳۰۰۰× نشان می‌دهد. در جدول ۲، خواص فیزیکی و شیمیایی CNF

خلاصه شده است. مطابق جدول، CNF دارای قطری بین ۲۰ تا ۵۰ نانومتر بوده و طول آن بین ۲۰ تا ۱۸۰ میکرومتر متغیر بود. با این ابعاد، این ماده سطح مخصوص قابل توجهی بین ۳۱ تا ۳۳ متر مربع بر گرم ایجاد نموده که می‌تواند تعامل قابل توجهی با ساختار چسبنده قیری اطراف خود برقرار نماید.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و ظاهری CNF

ویژگی (واحد)	مقدار
قطر الیاف (نانومیلی‌متر)	۲۰ تا ۵۰
طول الیاف (میکرومتر)	۲۰ تا ۱۸۰
سطح مخصوص (متر مربع بر گرم)	۳۱ تا ۳۳
رنگ	سفید

برای تولید چسبنده قیری اصلاح شده، از قیر پایه با درجه نفوذ ۱۰۰-۸۵ و درجه عملکرد PG 58-16 استفاده شد. در جدول ۳، خواص اساسی قیر پایه ذکر شده است.

جدول ۳. خصوصیات پایه‌ای قیر خالص ۱۰۰-۸۵

ویژگی (واحد)	استاندارد	معیار	نتیجه
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس (دهم میلی‌متر)	ASTM D5/D5M-20	۱۰۰-۸۵	۹۳
نقطه نرمی (درجه سلسیوس)	ASTM D36/D36M-14(2020)	۵۲-۴۵	۴۸/۹
کشسانی در ۲۵ درجه سلسیوس (سانتی‌متر)	ASTM D113-17	حداقل ۱۰۰	۱۰۶
نقطه اشتعال (درجه سلسیوس)	ASTM D92-18	حداقل ۲۳۲	۳۰۸
دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM D70/D70M-21	۱/۰۱ تا ۱/۰۵	۱/۰۳
ویسکوزیته در ۱۲۰ درجه سلسیوس (سانتی‌استوکس)	ASTM D2170-19	-	۸۱۰
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه سلسیوس (سانتی‌استوکس)	ASTM D2170-19	حداقل ۲۵۰	۴۲۰
ویسکوزیته در ۱۵۰ درجه سلسیوس (سانتی‌استوکس)	ASTM D2170-19	-	۲۳۲
درجه خلوص (درصد)	ASTM D4-86(2020)	حداقل ۹۹	۹۹/۷

در پژوهش حاضر، اصلاح قیر پایه با استفاده از افزودنی‌های لیگنین و نانوفیبر سلولزی (CNF) به روش تر[1] و با بهره‌گیری از همزن دور بالا[2] انجام شد. انتخاب این روش به دلیل امکان دستیابی به پراکنش یکنواخت افزودنی‌ها در فاز قیری و بهبود برهم‌کنش میان قیر و مواد اصلاح‌کننده صورت گرفت (گونکا و همکاران، ۲۰۲۴). جدول ٤، طرح نام‌گذاری نمونه برای قیر اصلاح شده را نشان می‌دهد. قیر پایه ابتدا تا دمای ۱۶۰ تا ۱۶۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد تا ویسکوزیته آن کاهش یافته و شرایط مناسب برای اختلاط افزودنی‌ها فراهم شود. سپس قیر مذاب به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه در مخلوط‌کن دور بالا هم زده شد تا یکنواختی دمایی و سیالیت مناسب ایجاد گردد (ابراهیم، ۲۰۱۸). در نمونه‌های حاوی نانوفیبر سلولزی، مقدار مشخصی از افزودنی به‌صورت تدریجی طی ۵ دقیقه به قیر افزوده شد و سپس فرآیند اختلاط به مدت ٤۵ دقیقه با سرعت ٤۰۰۰ دور در دقیقه ادامه یافت. استفاده از سرعت بالا و زمان اختلاط کافی با هدف بهبود پراکنش نانوفیبرها و جلوگیری از تجمع ذرات انجام شد. برای آماده‌سازی نمونه‌های حاوی لیگنین، پودر لیگنین پیش از اختلاط به مدت یک ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس خشک شد تا رطوبت احتمالی آن حذف گردد. سپس لیگنین به‌صورت تدریجی طی ۵ دقیقه به قیر افزوده شد. در نمونه‌های کامپوزیتی، ابتدا لیگنین با قیر مخلوط شد و سپس نانوفیبر سلولزی به‌تدریج به مخلوط افزوده گردید. پس از تکمیل فرآیند افزودن، اختلاط به مدت ٤۵ دقیقه دیگر با سرعت ٤۰۰۰ دور در دقیقه و در دمای ثابت ۱۶۰ تا ۱۶۵ درجه سلسیوس ادامه یافت. این روش اختلاط نقش مؤثری در توزیع یکنواخت افزودنی‌ها و بهبود برهم‌کنش میان قیر و افزودنی‌های زیستی داشت (نورگی و همکاران، ۲۰۲۰؛ قابچی و کاسترو، ۲۰۲۱). در نهایت،

1- Wet process

2- High shear

قیرهای اصلاح‌شده برای ساخت مخلوط‌های آسفالتی و انجام آزمون‌های عملکردی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ٤. نسبت‌های اختلاط قیر با افزودنی‌ها

نام مخفف	لیگنین (درصد)	CNF (%)
REF	۰	۰
LIG10	۱۰	۰
LIG15	۱۵	۰
LIG20	۲۰	۰
CNF0.50	۰	۰/۵۰
CNF0.75	۰	۰/۷۵
CNF1.0	۰	۱/۰۰
LIG10-CNF0.5	۱۰	۰/۵۰
LIG10-CNF0.75	۱۰	۰/۷۵
LIG10-CNF1.0	۱۰	۱/۰۰
LIG15-CNF0.5	۱۵	۰/۵۰
LIG15-CNF0.75	۱۵	۰/۷۵
LIG15CNF1.0	۱۵	۱/۰۰
LIG20-CNF0.5	۲۰	۰/۵۰
LIG20-CNF0.75	۲۰	۰/۷۵
LIG20-CNF1.0	۲۰	۱/۰۰

مصالح‌سنگی مورد استفاده در پژوهش حاضر، شامل دو گروه از مصالح‌سنگی و خرده‌آسفالتی (RAP) بودند. همچنین مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی شامل دو گروه حاوی ۱۰۰ درصد مصالح سنگی (گروه یک) و حاوی ترکیب ۵۰ درصد مصالح سنگی و ۵۰ درصد مصالح RAP (گروه دو) بودند. انتخاب ۵۰ درصد RAP با توجه به استفاده از آن به‌عنوان درصدی نسبتاً بالا در مطالعات بازیافت آسفالتی و به‌منظور ارزیابی اثر افزودنی‌های زیست‌پایه در شرایط سخت‌تر ناشی از حضور قیر پیرشده و افزایش سفتی مخلوط انجام شد (کولبرت و یو، ۲۰۱۲). اختلاط مصالح‌سنگی و RAP در گروه دوم به طریقی صورت پذیرفت که دانه‌بندی نهایی به‌دست آمده برای این گروه با گروه اول مشابه باشد. جدول ۵، دانه‌بندی هدف در نظر گرفته شده برای مخلوط‌های آسفالتی و دانه‌بندی گروه یک را ارائه می‌نماید. همچنین جدول ٦، نحوه اختلاط مصالح سنگی و RAP را در مخلوط آسفالتی گروه دو ارائه می‌نماید. همان‌طور که در جدول ٦ ارائه شده است، درصد انتخابی از هر اندازه برای مصالح‌سنگی در دانه‌بندی شماره دو، به طریقی بود که پس از اختلاط به نسبت ۵۰/۵۰ با مصالح RAP، دانه‌بندی نهایی به‌دست آمده، مشابه گروه یک باشد.

جدول ۵. دانه‌بندی نهایی مخلوط آسفالتی گروه یک و محدوده مشخصات دانه‌بندی

اندازه الک (mm)	محدوده مشخصات (درصد ریزتر)	دانه‌بندی گروه یک
۱۹	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۰–۱۰۰	۹۵
٤/۷۵	٤٤–۷٤	۵۹
۲/۳٦	۲۸–۵۸	٤٤
۰/۳	۵–۲۱	۱۲
۰/۰۷۵	۲–۱۰	٦

جدول ٦. نحوه اختلاط مصالح سنگی و RAP در دانه‌بندی گروه ۲

اندازه الک (mm)	دانه‌بندی مصالح سنگی و RAP (درصد ریزتر)		نسبت اختلاط مصالح سنگی و RAP (درصد)		دانه‌بندی نهایی گروه دو (درصد ریزتر)
	مصالح سنگی	RAP			
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۵۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۸	۹۲	۵۰	۵۰	۹۵
٤/۷۵	٦۷	۵۱	۵۰	۵۰	۵۹
۲/۳٦	۵۲	۳٦	۵۰	۵۰	٤٤
۰/۳	۱۹	۵	۵۰	۵۰	۱۲
۰/۰۷۵	۱۱	۱	۵۰	۵۰	٦

جدول ۷، ساختار شیمیایی مصالح‌سنگی مورد استفاده در پژوهش حاضر را برای هر دو گروه از مصالح سنگی و مصالح RAP ارائه می‌نماید. با توجه به این جدول، هم مصالح سنگی که سیلیسی بودند و هم مصالح RAP، در

رده مصالح اسیدی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که آنالیز شیمیایی مصالح RAP، پس از استخراج قیر روی آن‌ها صورت پذیرفت.

جدول ۷. ساختار شیمیایی مصالح‌سنگی و RAP

ترکیب شیمیایی (درصد)	درصد وزنی	
	مصالح سنگی	مصالح RAP
SiO_2	۵۸/۸	۵۳/۹
CaO	۱٤/٤	۱۱/۸
Al_2O_3	۱۲/۳	۱۰/۹
FeO	۳/۲	۳/۸
MgO	۳/۷	۳/۳
K_2O	۱/٦	۱/۸
TiO_2	۰/۷	۱/۱
Na_2O	۰/٤	۰/۸
LOI	۳/۳	۹/٦
Other	۱/٦	۳/۰

جدول ۸، خصوصیات فیزیکی قیر فرسوده استخراج شده از مصالح RAP را ارائه می‌نماید. این مصالح از یک روسازی با عمر ۱۰ ساله به‌دست آمده و قیر اولیه دارای درجه نفوذ ۷۰-٦۰ بوده است. به دلیل فرسودگی قابل توجه مطابق جدول ۸، ویژگی‌های مهندسی پایه‌ای این قیر به میزان قابل توجهی حاکی از افزایش سفتی، کاهش انعطاف‌پذیری و افزایش ویسکوزیته هستند.

جدول ۸. خصوصیات فیزیکی قیر استخراج‌شده از مصالح RAP

ویژگی (واحد)	استاندارد	نتیجه
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دهم میلی‌متر)	ASTM D5/D5M-20	۳۲
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D36/D36M-14(2020)	۷۴
کشسانی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی‌متر)	ASTM D113-17	۳۳
نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D92-18	۲۶۴
دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM D70/D70M-21	۱/۰۸
ویسکوزیته در ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی استوکس)	ASTM D2170-19	۱۱۲۰

مقدار قیر بهینه[1] دو مخلوط آسفالتی مورد مطالعه با استفاده از روش مارشال تعیین شد. از آنجا که هدف اصلی پژوهش، بررسی اثر افزودنی‌های زیست‌پایه بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی بود، پس از تعیین مقدار قیر بهینه برای مخلوط‌های پایه، این مقادیر در تمامی مخلوط‌های اصلاح‌شده ثابت نگه داشته شد تا اثر افزودنی‌ها به‌صورت مستقل ارزیابی گردد.

مطابق الزامات نشریه ۲۳٤ برای ترافیک سنگین (بیش از ۱۰ میلیون محور معادل)، مقدار قیر بهینه بر اساس دستیابی به ٤ درصد فضای خالی تعیین شد. بر این اساس، مقدار قیر بهینه برای مخلوط‌های شماره یک و دو به‌ترتیب برابر با ۵/٤ و ٤/۹ درصد به دست آمد.

جدول ۹. تعیین محدوده مناسب درصد قیر برای مخلوط گروه یک مطابق معیارهای نشریه ۲۳٤

معیار (واحد)	حدود مشخصات	درصد قیر
استقامت مارشال (kg)	حداقل ۸۰۰	٦/۳-۰/۵
روانی (mm)	۳/۲-۵/۰	۵/۳-٦/٦
فضای خالی (٪)	۳-۵	٦/٤-۰/۰
فضای خالی مصالح سنگی (٪)	حداقل ۱۵	٦/۳-۰/۵
فضای خالی پرشده با قیر (٪)	٦۰-۷۵	۵/۳-۵/۵

جدول ۱۰. تعیین محدوده مناسب درصد قیر برای مخلوط گروه دو مطابق معیارهای نشریه ۲۳٤

معیار (واحد)	حدود مشخصات	درصد قیر
استقامت مارشال (kg)	حداقل ۸۰۰	٦/۳-۰/۵
روانی (mm)	۳/۲-۵/۰	۵/۳-۰/۵
فضای خالی (٪)	۳-۵	۵/۳-۷/۸
فضای خالی مصالح سنگی (٪)	حداقل ۱۵	٦/۳-۰/۵
فضای خالی پرشده با قیر (٪)	٦۰-۷۵	۵/۳-۲/۵

1- Optimum Bitumen Content (OBC)

جدول‌های ۹ و ۱۰ حدود درصد قیر را برای برآورده نمودن تمامی ملزومات استاندارد در حجم ترافیک سنگین به ترتیب در مخلوط‌های شماره یک و دو ارائه می‌نمایند. با بررسی این دو جدول می‌توان اینگونه ارزیابی نمود که در مقادیر درصد بهینه فوق، تمامی معیارهای استاندارد در مخلوط‌های مورد پژوهش، برآورده می‌شوند. بنابراین درصد قیر بهینه در مخلوط شماره یک (صرفاً حاوی مصالح سنگی طبق ترکیب جدول ۵) برابر با ۵/٤ درصد و در مخلوط شماره دو (حاوی ۵۰ درصد مصالح سنگی و ۵۰ درصد مصالح RAP طبق ترکیب ارائه شده در جدول ٦) برابر با ٤/۹ درصد انتخاب گردید.

٤. مطالعات آزمایشگاهی

برنامه اصلی مطالعات آزمایشگاهی پژوهش حاضر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی طرح شده مطابق توضیحات بخش قبل انجام شد. برای ارزیابی میزان همگنی چسبنده‌های قیری مختلف در مقیاس ریزساختاری از روش SEM (EDS & Mapping) استفاده شد. با این تکنیک عناصر اصلی تشکیل دهنده چسبنده‌ها و کیفیت توزیع آن‌ها در ساختار قیر بررسی گردید. بخش دوم برنامه آزمایشگاهی پژوهش حاضر، شامل ارزیابی خصوصیات رفتاری و عملکردی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با افزودنی‌های پایه‌زیستی بود. این ارزیابی‌ها شامل بررسی خصوصیات دوام در شرایط مرطوب، مقاومت در برابر تغییرشکل‌های ماندگار در دمای بالا با روش خزش دینامیکی و مقاومت خستگی در دماهای متوسط بود. همچنین رفتار نمونه‌ها در دمای پایین با روش خمش نیم‌دایره (SCB) مورد مطالعه قرار گرفت.

٤-۱. ارزیابی ریزساختاری قیرهای اصلاح شده

دستیابی به ساختاری همگن و توزیع مناسب افزودنی یک پیش نیاز اساسی برای به‌دست آوردن کیفیت بهینه و خواص مهندسی برتر در قیر اصلاح شده و در نهایت در مخلوط‌های آسفالتی است. توزیع افزودنی‌های زیستی با استفاده از نقشه‌برداری طیف‌سنجی پراکنده انرژی (EDS) در این مطالعه ارزیابی شد. EDS تکنیکی است که برای تعیین نوع عناصر موجود در یک نمونه و توزیع آن‌ها استفاده می‌شود. نمونه‌های قیر اصلاح‌شده زیستی، که به تفصیل در جدول ٤ آمده است، روی ورقه‌های آلومینیومی با سطح تقریبی ۲ سانتی‌متر مربع و ضخامت حدود ۱ میلی‌متر قرار گرفتند. اطمینان از یک سطح کاملاً صاف برای تجزیه و تحلیل دقیق بسیار مهم بود. جدای از نمونه‌های ارائه شده در جدول ٤، لیگنین و CNF نیز با استفاده از EDS مورد بررسی قرار گرفتند.

٤-۲. آزمایش‌های مکانیکی HMA

یک ارزیابی جامع روی عملکرد HMA[1] اصلاح شده در دماهای مختلف انجام شد. برای مطالعه رفتار در دماهای بالا، از DCT استفاده شد. علاوه بر این، خواص دمای متوسط نمونه‌ها با استفاده از BBFT مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. رفتار دوام HMAها از طریق آزمون ITS قبل و بعد از قرار دادن نمونه‌ها در معرض رطوبت ارزیابی شد. همچنین رفتار نمونه‌ها در دمای پایین با روش SCB مورد مطالعه قرار گرفت.

٤-۲-۱. دوام

برای ارزیابی دوام، روش Lottman اصلاح شده مطابق با استاندارد AASHTO T283 استفاده شد (آشتو، ۲۰۱٤). نمونه‌های هر مخلوط به سه گروه تقسیم شدند. گروه اول شامل نمونه‌های استوانه‌ای بود که تحت آزمایش ITS (ITSd) بدون قرار گرفتن در معرض هیچ شرایط خاصی قرار گرفتند. گروه دوم شامل نمونه‌هایی از هر مخلوط بود که در شرایط اشباع و انجماد- ذوب

[1] Hot Mix Asphalt (HMA)

(ITSs) قرار گرفتند. این نمونه‌ها در حالی که کاملاً در آب غوطه‌ور بودند در یک محفظه خلأ قرار گرفتند و به مدت ۲۰ دقیقه تحت فشار خلأ تقریباً ۲۵ میلی‌متر جیوه قرار گرفتند. پس از رهاسازی خلأ، نمونه‌ها به مدت یک ساعت دیگر در آب نگهداری شدند (دیواندری و همکاران، ۲۰۱۵). بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، این شرایط منجر به یک سطح اشباع تقریبی ۸۰ درصد شد که با الزامات استاندارد این روش مطابقت دارد (آشتو، ۲۰۱٤). در مرحله بعد، نمونه‌های اشباع شده به مدت ۱۵ ساعت در فریزر در دمای ۱۸- درجه سلسیوس نگهداری شدند. پس از آن، نمونه‌ها به مدت ۲٤ ساعت در حمام آب ٦۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. پس از انجام این مراحل، همان‌طور که قبلاً ذکر شد، پارامتر ITSs اندازه‌گیری شد. روابط (۱) و (۲) محاسبات مربوط به ITS و نسبت مقاومت کششی (TSR)[1] را ارائه می‌دهند.

$$ITS = \frac{2P}{\pi t d} \qquad (۱)$$

$$TSR = \frac{ITS_s}{ITS_d} \times 100 \qquad (۲)$$

در معادلات بالا، P بار شکست در آزمون ITS بر حسب kN، t ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر و d قطر نمونه بر حسب میلی‌متر است. همچنین، ITSd و ITSs به ترتیب نشان‌دهنده ITS نمونه قبل و بعد از قرار گرفتن در شرایط اشباع و یخ-ذوب، در کیلوپاسکال است.

٤-۲-۲. خزش دینامیکی

برای ارزیابی عملکرد HMA در دماهای بالا و پتانسیل تغییرشکل‌های دائمی، از آزمون خزش دینامیکی استفاده شد. نمونه‌ها به مدت ٦ ساعت قبل از آزمایش در یک محفظه با دمای کنترل شده قرار گرفتند. آزمایش در دمای ٤۰ درجه سلسیوس انجام شد که دمای سطح و هسته نمونه دقیقاً برابر شد. در مجموع، نمونه تحت ۳٦۰۰ چرخه بارگذاری قرار گرفت که شامل یک دوره پالس ۰/۵ ثانیه و یک دوره استراحت ۱/۵ ثانیه بود. به عبارت دیگر، مدت زمان هر آزمون تقریباً ۲ ساعت بود. تنش انحرافی اعمال شده در هر سیکل ۵۰۰ کیلوپاسکال بود. علاوه بر ارزیابی منحنی کرنش تجمعی در برابر چرخه‌های اعمال شده، مدول سفتی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شد (الوی و ژانگ، ۲۰۲۱؛ چفات و همکاران، ۲۰۲٤).

$$S_t = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_{3600} - \varepsilon_{1200}} \qquad (۳)$$

در این معادله، St مدول سفتی بر حسب کیلوپاسکال، σa تنش انحرافی بر حسب کیلوپاسکال، ε_{1200} کرنش تجمعی در چرخه بارگذاری ۱۲۰۰ و ε_{3600} کرنش در پایان آزمون است.

٤-۲-۳. مقاومت در برابر خستگی

برای ارزیابی تأثیر افزودنی‌های زیستی بر عمر خستگی HMA در دماهای متوسط، از آزمون خمش پرتو استفاده شد. آزمایش در دمای ۲۰ درجه سلسیوس تحت روش کرنش ثابت انجام شد. علاوه بر ارائه بینشی دقیق از رفتار خستگی HMA، روش خمش پرتو می‌تواند اطلاعات دقیق و مهمی در مورد خواص ویسکوالاستیک ماده تحت بارگذاری چرخه‌ای ارائه دهد. حداکثر تنش کششی با استفاده از رابطه (٤) محاسبه می‌شود.

$$\sigma_t = \frac{3aP}{bh^2} \qquad (٤)$$

در این معادله، a فاصله مرکز تا مرکز گیره‌ها (۰/۱۱۹ متر)، P نشان‌دهنده بار اعمال شده بر حسب نیوتن، b نشان‌دهنده عرض نمونه بر حسب متر و h ارتفاع نمونه بر حسب متر است. بعلاوه، حداکثر کرنش کششی در این روش با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است.

1- Tensile Strength Ratio (TSR)

$$\varepsilon_t = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4a^2} \qquad (۵)$$

که δ نشان‌دهنده حداکثر تغییرشکل در مرکز تیر بر حسب متر و L طول تیر بین فاصله گیره خارجی (۰/۳۵۷ متر) است.

پس از محاسبه حداکثر تنش کششی و کرنش می‌توان چندین پارامتر را در این روش تعیین کرد. یکی از متغیرهای مهم، سفتی خمشی است که با استفاده از رابطه (٦) می‌توان آن را تخمین زد.

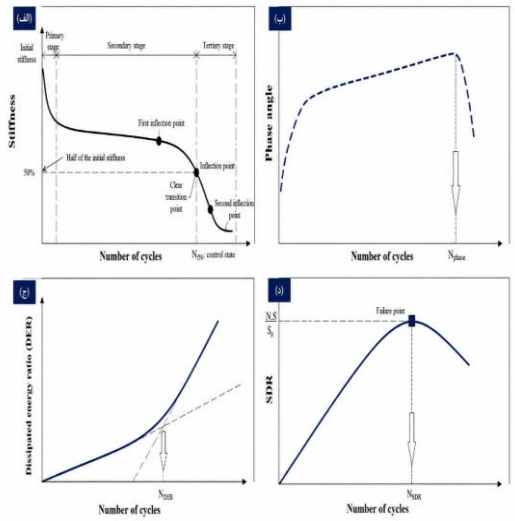
$$S = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \qquad (٦)$$

علاوه بر این، زاویه فاز[1] بر حسب درجه را می‌توان با استفاده از رابطه (۷) تخمین زد.

$$\varphi = 360\, f.s \qquad (۷)$$

در این معادله، f نشان‌دهنده فرکانس بارگذاری بر حسب هرتز و S نشان‌دهنده تأخیر زمانی بین Pmax و δmax است.

تعاریف متعددی برای عمر خستگی در آزمایش خمش تیر ارائه شده است. در مطالعه حاضر، از تعاریف ارائه شده در شکل ۲ برای HMA حاوی افزودنی‌های زیستی استفاده شد. به طور کلی، تست‌های خستگی با استفاده از روش تنش ثابت یا کرنش ثابت انجام می‌شود. در این تحقیق از روش کرنش ثابت استفاده شد. با توجه به شکل ۲–الف، یک معیار رایج برای تعریف عمر خستگی، کاهش سفتی اولیه به ۵۰ درصد مقدار اولیه آن است. در این شرایط، نمونه در آستانه انتقال از فاز دو به فاز سه منحنی رفتار شکست است، جایی که انتشار ترک رخ می‌دهد و ریزترک‌ها به ماکروترک تبدیل می‌شوند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). تعریف دوم، همانطور که در شکل ۲–ب نشان داده شده است، از متغیر زاویه فاز استفاده می‌کند. بر اساس این رویکرد، عمر خستگی معادل تعداد سیکل‌های بارگذاری در نظر گرفته می‌شود که منجر به کاهش شدید زاویه فاز می‌شود (رن و همکاران، ۲۰۲۳).



شکل ۲. شماتیک تعاریف مختلف عمر خستگی در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر: الف) ۵۰ درصد کاهش سفتی اولیه، ب) کاهش شدید زاویه فاز، ج) نسبت انرژی اتلاف شده و د) نسبت تخریب سختی

تعریف عمر خستگی ارائه شده در شکل ۲–ج از مفهوم انرژی تلف شده برای تخمین عمر خستگی استفاده می‌کند. مقدار انرژی تلف شده در هر سیکل بارگذاری که بر حسب ژول بیان می‌شود را می‌توان با استفاده از رابطه (۸) محاسبه کرد.

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin(\varphi_i) \qquad (۸)$$

در این رابطه، σi تنش در چرخه i است که با استفاده از رابطه (٤) می‌توان آن را تخمین زد. علاوه بر این، εi کرنش در چرخه i است که می‌تواند با استفاده از رابطه (۵) تخمین زده شود. زاویه فاز در چرخه i ام (φi) را نیز می‌توان با استفاده از رابطه (۷) تخمین زد. انرژی تلف شده تجمعی در هر چرخه دلخواه (N) شامل انرژی تلف

1- Phase angle

شده از چرخه i به چرخه هدف است و با استفاده از رابطه (۹) قابل تخمین است.

$$W_N = \sum_{i}^{N} W_i \qquad (۹)$$

شکل ۲-ج تعریفی از عمر خستگی را نشان می‌دهد که از نسبت انرژی تلف شده (DER) استفاده می‌کند. تعریف این نسبت در رابطه (۱۰) ارائه شده است.

$$DER = \frac{NW_0}{W_N} \qquad (۱۰)$$

در معادله فوق، N نشان‌دهنده چرخه مورد نظر، W_0 انرژی تلف‌شده اولیه و W_N نشان‌دهنده انرژی تلف شده تجمعی است که با استفاده از رابطه (۹) تخمین زده می‌شود.

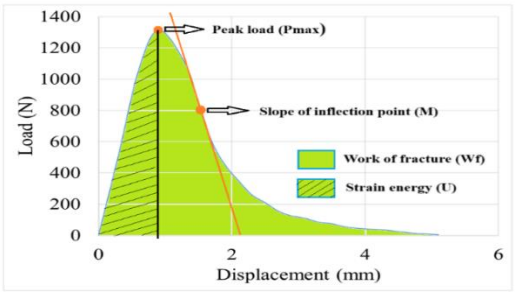
شکل ۲-د چهارمین معیار برای عمر خستگی را ارائه می‌دهد که به عنوان مبنایی برای تجزیه و تحلیل رفتار HMAهای اصلاح شده در این مطالعه عمل می‌کند. این معیار که با نام نسبت تخریب سختی (SDR) شناخته می‌شود، با استفاده از رابطه (۱۱) قابل برآورد است.

$$SDR = \frac{N_i S_i}{S_0} \qquad (۱۱)$$

در این معادله، N_i عدد سیکل بارگیری است که SDR در آن محاسبه می‌شود. S_i سختی مربوط به سیکل N_i و S_0 سختی اولیه است که در سیکل ۵۰ بارگذاری (یعنی پایان بارگذاری اولیه) محاسبه می‌شود.

٤-۲-٤. مقاومت شکست در دمای پایین

برای ارزیابی رفتار مخلوط آسفالتی در دمای پایین از روش خمش نیم‌دایره (SCB) استفاده شد. آزمایش SCB در دمای ۱۰- درجه سلسیوس و با نرخ بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای دستیابی به دماهای مدنظر، نمونه قبل از انجام آزمایش به مدت ٦ ساعت در یک محفظه کنترل دما قرار داده شده و پس از تثبیت دما، آزمایش انجام می‌شد. یکی از خروجی‌های مهم روش SCB، منحنی تغییرات نیرو در برابر تغییرشکل است. که با استفاده از آن، متغیرهای اصلی روش محاسبه می‌شوند. شکل ۳، شماتیکی از این منحنی و پارامترهای مهمی که از آن قابل استخراج هستند را نشان می‌دهد.



شکل ۳. شماتیک نمودار بار- تغییر شکل در آزمایش SCB

با استفاده از نمودار شکل ۳، پارامتر نشانه کار شکست[1] (G_f) برای نمونه‌های مختلف آسفالتی محاسبه گردید. این پارامتر با استفاده از رابطه (۱۲) قابل برآورد است.

$$G_f = \frac{W_f}{(R-a)\times t} \qquad (۱۲)$$

در این رابطه، W_f، قابلیت جذب انرژی قبل از وقوع شکست است که با محاسبه مساحت کل زیر منحنی شکل ۳، برحسب ژول، محاسبه و برآورد می‌شود. R، شعاع نمونه (برابر با ۷۵ میلی‌متر) است. پارامتر a، طول ترک اولیه است که در پژوهش حاضر برابر با ۲۰ میلی‌متر بود و پارامتر t، ضخامت نمونه که برابر با ۵۰ میلی‌متر بود.

اگرچه G_f میزان انرژی جذب شده را تا وقوع شکست کامل نمایندگی می‌کند (کل مساحت نشان داده شده در شکل ۳)، ولی رفتار آسفالت پس از نقطه پیک می‌تواند انعطاف‌پذیری ماده را بهتر نمایش دهد. بدین منظور، از نشانه انعطاف‌پذیری (FI)[2] استفاده شده که بیشتر بر رفتار HMA پس از نقطه پیک متمرکز است

1- Fracture Energy (Gf)

2- Flexibility Index

(بخش سبز منهای بخش هاشورخورده در نمودار شکل ۳). این نشانه با استفاده از رابطه ۱۳ قابل برآورد است.

$$FI = 0.01 \times \frac{G_f}{M} \quad (۱۳)$$

در این رابطه، G_f از رابطه ۱۲ و متغیر M از شکل ۳ به‌دست می‌آید.

۵. نتایج و تجزیه و تحلیل

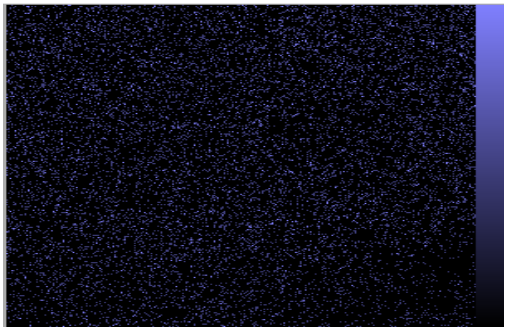
۵-۱. همگنی ریزساختار

کیفیت توزیع افزودنی‌ها در ساختار چسبنده قیری با آنالیز ریزساختار و با روش EDS انجام شد. درکنار پارامترهای مکانیکی و فیزیکی، این روش یک معیار مناسب برای انتخاب مقدار بهینه افزودنی ارائه می‌نماید (نظریان و همکاران، ۲۰۲۵). در پژوهش حاضر، همگنی هر نمونه مورد تجزیه و تحلیل بر اساس رویکرد پیشنهادی محمدی و مدرس (۲۰۲۲) با اعمال اصلاحات به صورت کمی ارزیابی شد. جدول ۱۱، درصد عناصر مختلف شناسایی شده در نمونه‌های مورد ارزیابی را در مپ‌های EDS ارائه می‌نماید. مطابق این جدول، عناصر اصلی در ساختار CNF، شامل کربن و اکسیژن بود. بیشترین درصد وزنی در ساختار لیگنین را به ترتیب عناصر کربن، اکسیژن، کلر و پتاسیم تشکیل می‌دادند. در مقابل، قیر خالص به طور عمده شامل کربن و گوگرد بود. همان‌طور که پیشتر بیان گردید، علاوه بر مصالح خام اولیه، جدول ۱۱، درصد وزنی عناصر مختلف را برای چسبنده‌های قیری حاوی افزودنی‌های زیست‌پایه ارائه می‌نماید. در این روش، علاوه بر تشخیص عناصر اصلی تشکیل‌دهنده یک ماده، امکان بررسی چگونگی توزیع این عناصر در ساختار ماده نیز وجود دارد. این کار با استفاده از مپ‌های به‌دست آمده از آنالیز EDS امکان‌پذیر است.

جدول ۱۱. درصد وزنی عناصر شناسایی شده در روش EDS

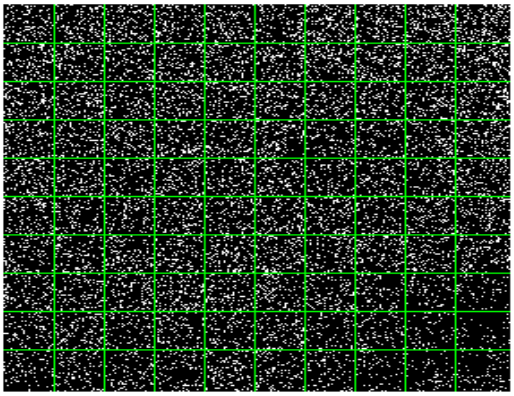
نوع ماده یا چسبنده قیری	عنصر شناسایی شده (٪)														
	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Fe	مجموع
CNF	۴۲/۵۵	۰/۴۷	۵۰/۸۷	۰/۵۷	۰/۸۲	۰/۷۰	۰/۶۷	۰/۷۳	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۲۳	۱۰۰
پودر لیگنین	۲۸/۲۱	۱/۸۳	۲۲/۵۰	۵/۳۳	۲/۰۳	۰/۷۲	۱/۱۴	۱/۱۴	۵/۷۵	۱۵/۷۵	۱۴/۰۵	۱/۴۶	۰/۰۹	۱۰۰
قیر خالص	۷۹/۹۱	۰/۰۰	۱/۰۱	۰/۴۷	۰/۵۸	۰/۶۳	۰/۷۶	۰/۶۰	۱۵/۱۱	۰/۳۱	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۱۶	۱۰۰
CNF0.50	۸۰/۷۹	۱/۱۵	۵/۲۰	۱/۳۲	۰/۸۲	۰/۸۱	۲/۶۹	۰/۲۴	۶/۰۱	۰/۲۷	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۸	۱۰۰
CNF0.75	۸۰/۲۷	۰/۵۰	۲/۲۱	۰/۲۵	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۷۷	۰/۴۸	۱۳/۸۴	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۲۵	۱۰۰
CNF1.0	۸۳/۱۶	۰/۶۸	۲/۱۷	۰/۷۴	۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۷۴	۰/۵۸	۹/۷۶	۰/۳۸	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۰۹	۱۰۰
LIG10	۸۲/۳۶	۰/۵۸	۲/۰۴	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۶۸	۰/۶۵	۰/۵۸	۱۰/۱۳	۰/۷۰	۰/۳۹	۰/۱۷	۰/۰۵	۱۰۰
LIG15	۸۱/۱۳	۰/۴۸	۱/۶۹	۰/۸۷	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۶۶	۰/۶۳	۱۱/۴۷	۰/۹۶	۰/۵۰	۰/۲۶	۰/۰۹	۱۰۰
LIG20	۷۵/۲۵	۱/۳۹	۵/۸۱	۰/۸۱	۰/۶۹	۰/۷۴	۱/۰۴	۰/۷۱	۱۱/۱۱	۱/۱۸	۰/۹۴	۰/۳۱	۰/۰۲	۱۰۰
LIG10-CNF0.5	۸۰/۵۵	۰/۶۶	۱/۷۳	۰/۸۴	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۷۱	۱۱/۷۰	۰/۶۹	۰/۴۶	۰/۲۵	۰/۰۹	۱۰۰
LIG10-CNF0.75	۸۰/۰۲	۰/۵۵	۱/۷۸	۰/۹۰	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۷۲	۱۱/۸۸	۰/۷۴	۰/۴۰	۰/۳۶	۰/۱۳	۱۰۰
LIG10-CNF1.0	۷۹/۲۹	۰/۵۶	۱/۲۷	۰/۵۳	۰/۸۳	۰/۹۶	۰/۸۶	۰/۸۶	۱۳/۲۰	۰/۷۲	۰/۵۴	۰/۲۶	۰/۱۲	۱۰۰
LIG15-CNF0.5	۸۲/۴۰	۰/۷۴	۱/۳۶	۰/۴۲	۰/۶۰	۰/۶۵	۰/۶۸	۰/۴۱	۱۱/۴۸	۰/۵۵	۰/۴۲	۰/۱۵	۰/۱۴	۱۰۰
LIG15-CNF0.75	۸۱/۰۴	۰/۶۰	۱/۴۷	۰/۶۷	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۷۶	۱۱/۵۸	۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۲۸	۰/۱۱	۱۰۰
LIG15CNF1.0	۷۹/۸۲	۰/۶۹	۲/۲۶	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۹۱	۱/۳۰	۰/۶۸	۱۰/۷۰	۰/۹۲	۰/۵۳	۰/۳۴	۰/۱۴	۱۰۰
LIG20-CNF0.5	۸۳/۸۹	۰/۶۵	۲/۳۲	۰/۸۰	۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۷۸	۰/۴۵	۹/۰۷	۰/۳۶	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۰۹	۱۰۰
LIG20-CNF0.75	۸۳/۴۴	۱/۱۲	۲/۶۷	۰/۹۵	۰/۷۱	۰/۶۵	۰/۷۳	۰/۴۷	۸/۳۲	۰/۴۱	۰/۲۹	۰/۱۴	۰/۱۰	۱۰۰
LIG20-CNF1.0	۸۴/۱۴	۰/۸۵	۲/۷۳	۱/۰۲	۰/۸۱	۰/۹۰	۰/۸۶	۰/۵۳	۷/۰۹	۰/۴۶	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۱۱	۱۰۰

شکل ٤، نمونه‌ای از مپ‌های به‌دست آمده برای عنصر گوگرد را در نمونه LIG10-CNF0.50 نشان می‌دهد. این مپ‌ها توزیع عنصر مربوطه را در ابعاد ٦٤×٦٤ میکرومتر درون نمونه آنالیز شده با یک طیف رنگی نمایش می‌دهند.



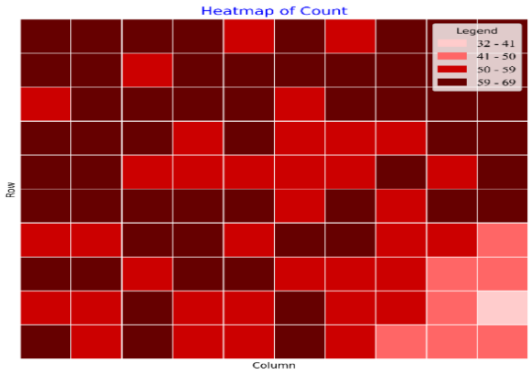
شکل ٤. نمونه‌ای از مپ‌های EDS برای توزیع عنصر گوگرد در نمونه LIG10-CNF0.5

در آنالیز همگنی، هر کدام از مپ‌های به‌دست آمده، ابتدا با Python 3.13.2 پردازش شده و مطابق شکل ٥، به ١٠٠ مش مساوی تقسیم‌بندی شدند. در پردازش تصویر صورت گرفته، تعداد کل نقاط شناسایی شده در مپ که بیانگر عنصر گوگرد بودند، برابر با ٥٧٠٥ بود.



شکل ٥. مپ شکل ٤ پس از پردازش و مش‌بندی

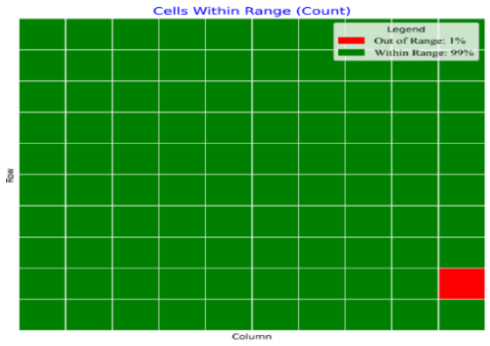
با توجه به اینکه کل مپ به ١٠٠ سلول برابر تقسیم شده، برای یک توزیع یکنواخت در کل مپ، تعداد نقاط شناسایی شده در هر سلول باید یک درصد کل تعداد نقاط شناسایی شده باشد. این عدد برای مپ کورد تحلیل در شکل ٤ برابر با ٥٧ نقطه در یک سلول خواهد بود (برابر با یک درصد ٥٧٠٥). شکل ٦، طیف توزیع عنصر گوگرد را در مپ مورد نظر به صورت هیت‌مپ نشان می‌دهد. در این نقشه بخش‌های تیره‌تر نشان‌دهنده تمرکز بیشتر عنصر گوگرد در مپ هستند.



شکل ٦. هیت‌مپ توزیع عنصر گوگرد در LIG10-CNF0.5

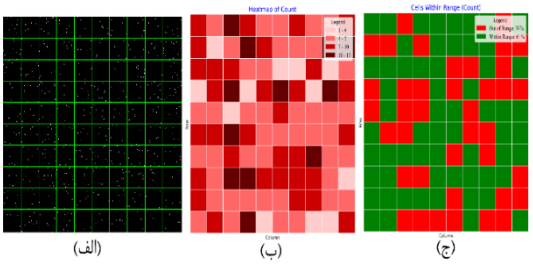
طیف رنگی نشان داده شده در شکل ٧، محدوده تعداد نقاط شناسایی شده را نشان می‌دهد. در این آنالیز، یک انحراف ٣٠ درصدی از مقدار میانگین تعداد نقاط به عنوان معیاری برای یک سلول غیرهمگن در نظر گرفته شد. به عنوان مثال، همان‌طور که بالاتر گفته شد، برای عنصر گوگرد در این مپ میانگین تعداد نقاط برابر با ٥٧ عدد بوده است. بنابراین با انحراف از میانگین ٣٠ درصدی، محدوده تعداد نقاط شناسایی شده در یک سلول یا مش برای آن‌که آن سلول جزو بخش‌های همگن نقشه در نظر گرفته شود، باید بین ٤٠ تا ٧٤ نقطه باشد. در شکل ٧، مش‌هایی که تعداد نقاط شناسایی شده در آن‌ها در محدوده فوق قرار داشت با رنگ سبز و بقیه با رنگ قرمز نشان داده شدند. مطابق شکل، در این مپ ٩٩ سلول در محدوده قابل قبول قرار داشته و تنها یک سلول به عنوان سلول ناهمگن شناسایی گردید. به عبارت دیگر

مپ نهایی نشان‌دهنده یک ضریب همگنی (HC)[1] برابر با ۹۹ درصد بوده است.



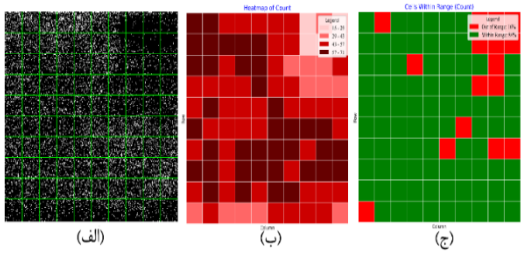
شکل ۷. سلول‌های همگن و ناهمگن

شکل ۸ مراحل آنالیز مپ را برای عنصر کلسیم در نمونه LIG10-CNF0.5 نشان می‌دهد. برای این مپ، درصد سلول‌های همگن با میزان انحراف کمتر از ۳۰ درصد از مقدار میانگین مطابق شکل ۸ (ج) برابر با ٦١ درصد بود. به عبارت دیگر، مقدار ضریب همگنی توزیع ذرات کلسیم در این مپ، HC=61% تعیین گردید.



شکل ۸. مراحل تحلیل نقشه EDS برای عنصر Ca در نمونه LIG10CNF0.5: الف) نقشه شبکه‌بندی شده، ب) هیت‌مپ، ج) درصد سلول‌های همگن و ناهمگن

به عنوان یک نمونه دیگر، شکل ۹، مراحل تحلیل را برای آنالیز توزیع همگنی عنصر گوگرد (S) در مپ CNF0.5 نشان می‌دهد. مطابق شکل، درصد سلول‌های همگن برای این عنصر در مپ مورد بررسی، برابر با ٨٤ درصد به‌دست آمد.



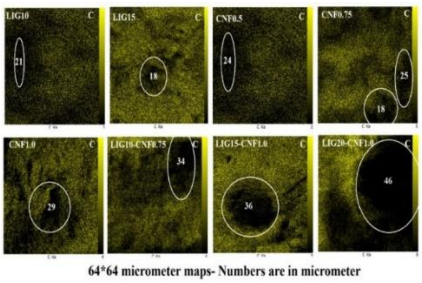
شکل ۹. مراحل تحلیل نقشه EDS برای عنصر S در نمونه CNF0.5: الف) نقشه شبکه‌بندی شده، ب) هیت‌مپ، ج) درصد سلول‌های همگن و ناهمگن

با توجه به نتایج، بالاترین ضریب همگنی برای افزودنی‌های خام و قیر اصلاح نشده به‌دست آمده و افزودن هر کدام از افزودنی‌های پایه‌زیستی، منجر به کاهش در ضریب همگنی شده است. در نمونه‌های حاوی یکی از افزودنی‌ها، بالاترین ضریب همگنی برای کمترین مقدار افزودنی به‌دست آمده و با افزایش مقدار افزودنی به طور پیوسته مقدار HC کاهش یافت. علی‌رغم تغییراتی که در ضریب همگنی قابل مشاهده است، به طور کلی مقادیر HC در نمونه‌های حاوی CNF کمتر از نمونه‌های حاوی لیگنین بوده است. این مسأله در پژوهش‌های پیشین اثبات شده است که لیگنین سازگاری مناسبی با قیر دارد ولی افزایش بیش از حد آن با معضلات افزایش سفتی و ویسکوزیته همراه است که می‌تواند فرایند اختلاط را با چالش مواجه نماید (نورگبی و همکاران، ۲۰۲۰). برخلاف آن CNF به دلیل اندازه به مراتب کوچکتر، سطح مخصوص بسیار بالا و ساختار فیبرمانند، تمایل بیشتری به تجمع داشته و دستیابی به یک توزیع مناسب آن درون قیر سخت‌تر است. به همین دلیل، مقادیر HC در نمونه‌های حاوی CNF، مقداری کمتر به‌دست آمده است. اثبات شده است که در صورت دستیابی به یک توزیع مناسب و همگن، CNF می‌تواند خواص ویسکوالاستیک قیر را تقویت نموده و مقاومت خستگی آن را بهبود دهد (شعبانی و همکاران، ۲۰۲٤)؛ مسأله‌ای

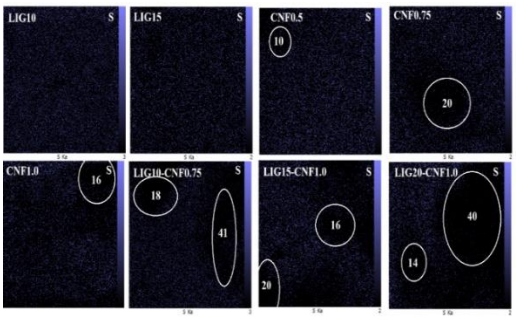
1- Homogeneity Coefficient

که تا حد زیادی برای نمونه‌های قیری مورد پژوهش نیز صادق بوده است.

همچنین، در نمونه‌های حاوی هر دو افزودنی، ضریب HC با افزایش مقدار آن‌ها با شدت بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی یک ماده کاهش یافته است. بررسی جزئیات ریزساختار مپ‌ها نشان داد که افزایش درصد و نوع افزودنی در قیر، منجر به افزایش نواحی غیرهمگن یا سلول‌های قرمز (یا کاهش سلول‌های سبز) در آنالیز همگنی گردید. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تصاویری از مپ‌ها را برای عناصر کربن و گوگرد به عنوان دو نمونه از عناصر اصلی تشکیل‌دهنده نمونه‌های قیری در نمونه‌های کامپوزیتی نشان می‌دهند. مطابق شکل‌ها، تغییرات قابل توجهی در توزیع عناصر در مپ‌ها قابل مشاهده است. در این دو شکل و مپ‌های مختلف نواحی با تمرکز نسبتاً پایین از عنصر مورد نظر نشان داده شده‌اند. تغییرات در توزیع عناصر، با افزایش مقدار افزودنی‌ها نیز شدت یافته‌اند. این مسأله به ویژه در نمونه‌های کامپوزیتی که حاوی هر دو نوع افزودنی بودند، بیشتر مشهود بود. اعدادی که در داخل این نواحی نوشته شده‌اند نشان‌دهنده اندازه قطر بزرگتر ناحیه بیضی‌شکل یا قطر دایره هستند که حفره به وجود آمده را نشان می‌دهند. به طور مشخص تعداد و اندازه این نواحی با افزایش مقدار افزودنی بزرگتر شده‌اند. شدت این نواحی در نمونه‌های حاوی CNF مقداری بالاتر از نمونه‌های اصلاح شده با لیگنین بوده است. ولی بزرگترین نواحی خالی در نمونه‌های حاوی هر دو افزودنی قابل مشاهده بود.



شکل ۱۰. نواحی با تمرکز عنصری کم و بالا در مپ‌های کربن برای نمونه‌های مختلف



شکل ۱۱. نواحی با تمرکز عنصری کم و بالا در مپ‌های گوگرد برای نمونه‌های مختلف

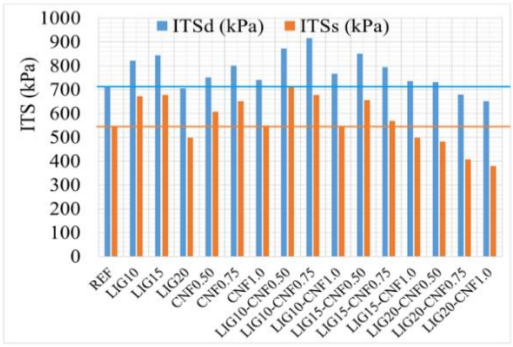
آنالیزهای فوق اثبات نمودند که با افزایش مقدار هر دو افزودنی پایه‌زیستی، کیفیت توزیع کاهش یافته و این کاهش منجر به کوچک‌تر شدن مقدار HC گردید. کیفیت و چگونگی توزیع افزودنی، یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی است که بر ویژگی‌های مهندسی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی تولید شده تأثیر می‌گذارد. در ادامه، نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی روی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته و با خصوصیات ریزساختاری چسبنده‌های قیری مقایسه خواهند شد.

۵-۲. دوام

برای ارزیابی دوام مخلوط‌های آسفالتی از روش AASHTO T283 استفاده شد. شکل ۱۲، میانگین نتایج آزمایش ITS را قبل از قرارگیری در شرایط اشباع و یخبندان (ITSd) و پس از آن (ITSs) برای دانه‌بندی گروه یک نشان می‌دهد. خطوط آبی و نارنجی به ترتیب مقدار پارامترهای قبل را برای مخلوط آسفالتی حاوی نمونه REF نشان می‌دهند. این مقادیر برای نمونه REF به ترتیب برابر با ۷۱۵ و ۵۴۲ مگاپاسکال بودند. در نمونه‌های حاوی لیگنین، دو گروه LIG10 و LIG15 عملکرد بهتری را نسبت به نمونه REF در هر دو شرایط داشته‌اند. در حالی که برای نمونه LIG20 یک کاهش قابل توجه در هر دو شرایط اتفاق افتاد. در بین مخلوط‌های اصلاح شده با CNF، بهترین رفتار در نمونه

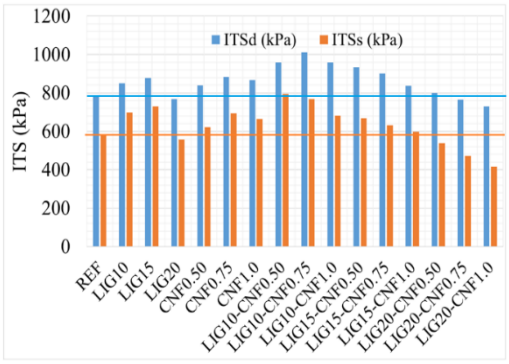
حاوی مقدار متوسط CNF اتفاق افتاد. به غیر از نمونه‌های حاوی حداکثر افزودنی‌ها، در سایر موارد، پودر لیگنین عملکرد بهتری را نسبت به CNF داشته ولی در بیشترین مقادیر، خلاف آن صادق بود. نمونه LIG20 در هر دو شرایط خشک و اشباع ضعیف‌تر از نمونه REF بوده است. در حالی که نمونه CNF1.0 تقریباً رفتاری مشابه یا اندکی بهتر از نمونه REF داشت. این نتایج نشان می‌دهند که اگر این افزودنی‌ها به تنهایی استفاده شوند، حداکثر مقدار مفید برای لیگنین و CNF به ترتیب برابر با ۱۵ و ۰/۷۵ درصد قیر بوده است.

یک نتیجه قابل توجه، رفتار ضعیف نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ۲۰ و برخی از نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد لیگنین بوده است. براساس نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های پیشین، هر دو افزودنی لیگنین و CNF می‌توانند چسبندگی قیر و سنگ و در نتیجه دوام مخلوط‌های آسفالتی را بهبود ببخشند. البته در تمامی این پژوهش‌ها بر انتخاب یک مقدار مناسب و بهینه از افزودنی‌ها تأکید شده است (عطائیان و همکاران، ۲۰۲۳). ارزیابی‌های ریزساختاری پژوهش حاضر اثبات نمودند که مقدار بیش از حد این افزودنی‌ها تأثیر بسزایی بر ساختار چسبنده و همگنی آن دارند. تعامل مفید بین افزودنی‌ها و چسبنده، که در لیگنین شامل اتصال شیمیایی و تغییرات در قطبیت قیر و در مورد CNF بیشتر از طریق قفل و بست فیزیکی و چسبندگی رخ می‌دهد، فرآیندی است که در فصل مشترک قیر و افزودنی اتفاق می‌افتد. تجمع ذرات افزودنی در ساختار اشباع شده از افزودنی در مناطقی خاص به میزان زیادی، سطح مخصوص مفید را کاهش داده و در نتیجه این تعامل‌ها را تضعیف می‌نماید. از طرف دیگر بخش‌هایی از چسبنده که فاقد توزیع مناسبی از افزودنی است به شدت به نفوذ رطوبت حساس خواهد بود. در واقع مناطق تجمع و اشباع افزودنی‌ها باعث تمرکز تنش در ساختار شده که منافذ کوچکی در آن ایجاد نموده و محلی برای نفوذ و عبور آب فراهم می‌نمایند. تحت تأثیر این فرآیند آب به فصل مشترک قیر و سنگدانه نفوذ کرده و در آنجا به دام می‌افتد (نادیروف و همکاران، ۲۰۲۵).



شکل ۱۲. مقایسه میانگین نتایج آزمایش مقاومت کششی‌غیرمستقیم قبل و بعد از قرارگیری در شرایط اشباع و یخبندان برای دانه‌بندی گروه ۱

شکل ۱۳، مقادیر ITSd و ITSs را برای نمونه‌های دانه‌بندی گروه دو مقایسه نموده است. در نمونه‌های حاوی لیگنین، بهترین عملکرد قبل و بعد از قرارگیری در شرایط رطوبت و یخبندان، در نمونه LIG15 مشاهده شد. عملکرد نمونه LIG20 در هر دو وضعیت قبل و بعد از قرارگیری در معرض رطوبت و یخبندان، نامطلوب ارزیابی می‌شود. به طوری‌که مقادیر هر دو پارامتر ITSd و ITSs کمتر از نمونه REF به‌دست آمد. این مشاهدات تا حدود زیادی در نمونه‌های کامپوزیتی نیز تکرار گردید. با این تفاوت که در نمونه‌های کامپوزیتی، صرف‌نظر از مقدار CNF، ترکیب حاوی ۱۰ درصد لیگنین بهترین عملکرد را نسبت به تمامی نمونه‌ها داشته است. البته مقادیر ITSd و ITSs در نمونه‌های اصلاح شده با ۱۵ درصد لیگنین در مخلوط‌های کامپوزیتی همچنان بالاتر از نمونه REF بود. در این گروه از نمونه‌ها نیز عملکرد مخلوط‌های حاوی ۲۰ درصد لیگنین نامطلوب بوده است.

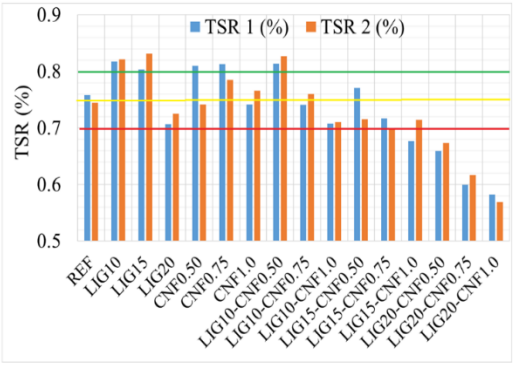


شکل ۱۳. مقایسه میانگین نتایج آزمایش مقاومت کششی‌غیرمستقیم قبل و بعد از قرارگیری در شرایط اشباع و یخبندان برای دانه‌بندی گروه ۲

شکل ١٤، مقادیر TSR را برای مخلوط‌های گروه یک و دو مقایسه نموده است. از کل ١٦ نمونه آسفالتی، در ١١ مخلوط نمونه‌های ساخته شده با دانه‌بندی ٢ که حاوی ٥٠ درصد مصالح RAP بودند، دوام بالاتری را نسبت به نمونه‌های مخلوط یک داشتند. رفتار دوام مخلوط‌های حاوی RAP از چند جنبه باید با مصالح سنگی مورد مقایسه قرار گیرد. اول آن‌که مصالح RAP به دلیل وجود پوشش قیری، درصد جذب آب کمتری را نسبت به سنگدانه‌های مصالح سنگی خواهند داشت. این مسأله می‌تواند عملکرد مخلوط حاوی مصالح RAP را در شرایط رطوبت و یخبندان ارتقا دهد. از طرف دیگر این مصالح به دلیل قرارگیری در معرض عوامل مخرب محیطی و بارهای ترافیکی، مرغوبیت کمتری نسبت به مصالح بکر داشته و از این جنبه دوام پایین‌تری در معرض عوامل مخرب خواهند داشت. بنابراین می‌توان اینگونه استنباط نمود که برآیند دو اثر فوق، منجر به بهبود رفتار دوام مخلوط‌های طراحی شده با دانه‌بندی گروه دو نسبت به گروه یک گردید. شکل ١٤ محدوده TSR قابل قبول را براساس معیارهای تعیین شده در استانداردهای مختلف با دو خط سبز و قرمز رنگ نشان داده است. مطابق شکل، این محدوده در بازه ٧٠ تا ٨٠ درصد با میانگین ٧٥ درصد قرار دارد (ایساکسون و کیگوندو، ٢٠٠٥). اگر حداقل مقدار TSR=75% به عنوان میانگین معیارهای تعیین شده در دستورالعمل‌های مختلف، ملاک ارزیابی مخلوط‌های مورد پژوهش قرار گیرد، نمونه REF تنها در صورت طراحی با دانه‌بندی شماره یک، این معیار را برآورده می‌کند. در حالی‌که دو نمونه LIG10 و LIG15 برای هر دو دانه‌بندی مقداری بالاتر از ٨٠ درصد برای TSR به‌دست داده‌اند. مقایسه دو افزودنی پایه‌زیستی حاکی از تأثیرات کمتر CNF نسبت به لیگنین بر رفتار دوام هر دو نوع مخلوط است. لیگنین به دلیل ساختار شیمیایی خود دارای ماهیتی آب‌زدا بوده و سازگاری بهتری نسبت به CNF با قیر از خود نشان می‌دهد (نورگبی و همکاران، ٢٠٢٠). این عوامل، ارتقا چسبندگی قیر و سنگدانه و مقاومت بیشتر در برابر نفوذ رطوبت را در پی دارند. ویژگی‌هایی که عریان‌شدگی[1] ناشی از فرآیند سخت اشباع شدن و یخبندان در استاندارد AASHTO T283 را تعدیل می‌نمایند. در مقابل وجود گروه‌های هیدروکسیل در CNF می‌تواند آب‌دوستی چسبنده قیری را افزایش و در نتیجه تا حدی تأثیرات مفید آن را بر خصوصیات دوام مخلوط آسفالتی تحت تأثیر قرار دهد.

نکته جالب توجه دیگر، عملکرد بسیار ضعیف نمونه‌های کامپوزیتی به ویژه مخلوط آسفالتی حاوی ٢٠ درصد لیگنین است که حتی معیار TSR=70% را نیز تأمین نکرده است. از دیدگاه دوام، بهترین مخلوط کامپوزیتی برای هر دو نوع دانه‌بندی LIG10-CNF0.5 بوده که تقریباً بالاترین مقدار TSR را به‌دست داده است.

1- Stripping

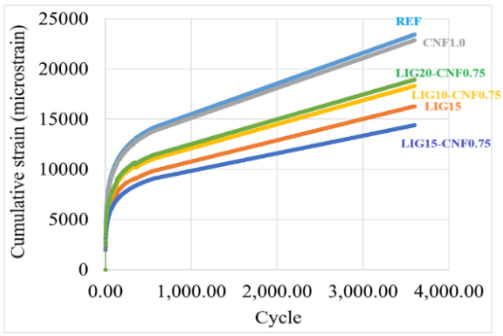


شکل ١٤. مقایسه مقادیر TSR در دانه‌بندی‌های گروه ١ و ٢

٥-٣. مقاومت در برابر شیارشدگی

شکل ١٥، نمودار روند تغییرات کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری را در آزمایش خزش دینامیکی برای مخلوط‌هایی که بهترین عملکرد را در گروه افزودنی مربوطه ارائه نموده‌اند و برای دانه‌بندی گروه یک ارائه می‌نماید. تمام نمونه‌های مورد مقایسه عملکرد بهتری را نسبت به نمونه REF ارائه نمودند. همچنین صرف‌نظر از نوع، مقدار و ترکیب، هر دو افزودنی پایه‌زیستی، مقاومت مخلوط را در برابر تغییرشکل‌های ماندگار افزایش دادند. در بین نمونه‌هایی که صرفا حاوی یک افزودنی بودند و نمونه‌های کامپوزیتی، مخلوط‌های LIG15 و LIG15-CNF0.75 به ترتیب بالاترین مقاومت شیارشدگی را داشتند.

نمودارهای شکل ١٥، به طور واضحی تأثیرات بیشتر لیگنین را نسبت به CNF بر مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی گروه یک نشان می‌دهند. به طوری‌که نمونه CNF1.0 که بالاترین مقاومت خزشی را در مقایسه با سایر نمونه‌های حاوی CNF داشت، تنها به میزان ناچیزی کرنش تجمعی کمتری نسبت به نمونه REF داشته است. در حالی‌که در نمونه‌های حاوی لیگنین، صرف نظر از مقدار CNF، یک افت نسبتاً قابل توجه در مقدار کرنش تجمعی قابل مشاهده بود. این مسأله را می‌توان به عملکرد لیگنین در ساختار قیر در مقایسه با CNF نسبت داد. در واقع، تغییرات ایجاد شده در مخلوط‌های حاوی لیگنین از دو اثر فیزیکی-شیمیایی حاصل می‌شود. دانه‌های لیگنین از یک طرف به عنوان یک پرکننده مؤثر عمل می‌کنند که مستقیماً در افزایش سفتی و ویسکوزیته قیر نقش دارد. از طرف دیگر، لیگنین با جذب برخی از اجزای سبک‌تر و متحرک‌تر قیر، در کاهش تمایل مخلوط آسفالت به جریان نیز نقش دارد. مزیت کلیدی لیگنین نسبت به CNF در این زمینه، سازگاری عالی عناصر تشکیل دهنده آن با قیر است. این سازگاری، که عمدتاً به دلیل وجود حلقه‌های آروماتیک و ساختارهای هیدروکربنی در لیگنین است، نه تنها اثرات فیزیکی مفید، بلکه برهمکنش‌های شیمیایی مطلوب را نیز ممکن می‌سازد (کالامپوکیس و همکاران، ٢٠٢٢).

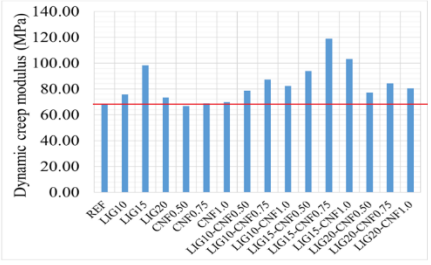


شکل ١٥. نمودار تغییرات کرنش تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری در آزمایش خزش دینامیکی برای دانه‌بندی گروه یک

شکل ١٦، مقادیر مدول خزشی دینامیکی را برای نمونه‌های مختلف در دانه‌بندی شماره یک مقایسه می‌کند. به جز نمونه CNF0.5، تمام نمونه‌های حاوی افزودنی زیستی افزایش مدول خزش را نشان دادند. بهترین عملکرد در بین نمونه‌های اصلاح‌شده با یک افزودنی واحد در نمونه LIG15 و پس از آن LIG10 مشاهده شد. علاوه بر این، در بین نمونه‌های کامپوزیتی اصلاح‌شده با ترکیب از لیگنین و CNF، نمونه LIG15-CNF0.75 بهترین عملکرد را نشان داد.

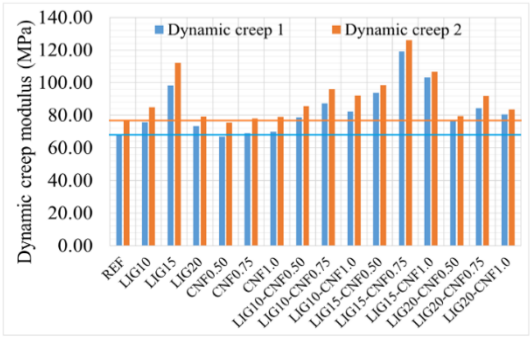
نتایج شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تأیید می‌کنند که لیگنین در مقایسه با CNF به طور قابل توجهی مقاومت در برابر شیارشدگی را افزایش می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، نقش لیگنین در چسبنده صرفاً فیزیکی نبوده و از طریق فعل و انفعالات شیمیایی با مولکول‌های آسفالت، فراتر از یک پرکننده معمولی عمل می‌کند. لیگنین یک پلیمر شاخه‌دار با ساختار سه‌بعدی حاوی گروه‌های عاملی هیدروکسیل و متوکسی است که امکان فعل و انفعالات با آسفالت را فراهم می‌کنند. لیگنین از طریق پیوند هیدروژنی به ساختار آسفالت نفوذ می‌کند، چسبندگی و ویسکوزیته را افزایش می‌دهد و منجر به مخلوطی سفت‌تر می‌شود. علاوه بر این، لیگنین سیالیت آسفالت را کاهش می‌دهد و در نتیجه پتانسیل شیارشدگی را کاهش می‌دهد (گائو و همکاران، ۲۰۲۰).

کاهش مدول خزشی مشاهده شده برای مقادیر لیگنین بیش از ۱۵ درصد را می‌توان به کاهش اثربخشی چسبنده در آسفالت نسبت داد. به عبارت دیگر، مقادیر بیش از حد لیگنین بر تراکم‌پذیری تأثیر می‌گذارد و منجر به خواص مکانیکی ضعیف‌تر، از جمله کاهش مقاومت خزشی می‌شود. نتایج تجزیه و تحلیل ریزساختاری نیز تا حد زیادی از رفتار مکانیکی مشاهده شده در شکل ۱۶ پشتیبانی می‌کند. همان‌طور که در نتایج ضریب همگنی نشان داده شده است، کیفیت ریزساختاری چسبنده با افزایش مقدار افزودنی، به ویژه لیگنین، کاهش می‌یابد. به طوری‌که کمترین مقادیر HC برای نمونه‌های ۲۰ درصد لیگنین ثبت شد.



شکل ۱۶. مقایسه مدول خزشی دینامیکی در مخلوط‌های آسفالتی طرح شده با دانه‌بندی گروه یک

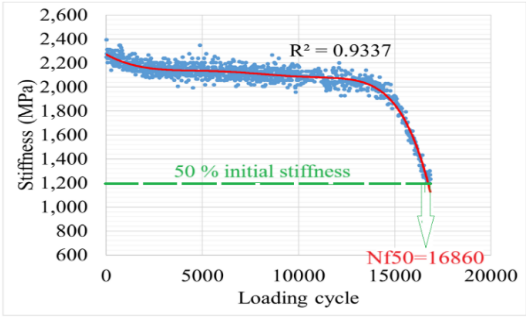
شکل ۱۷ نشان می‌دهد که استفاده از ۵۰ درصد مصالح RAP موجب افزایش مدول خزشی دینامیکی در تمامی مخلوط‌ها شده است، به‌طوری که مقدار مدول خزشی نسبت به مخلوط‌های فاقد RAP حدود ۳ تا ۱۴ درصد افزایش یافت. این افزایش را می‌توان ناشی از دو عامل اصلی دانست: نخست، حضور قیر پیرشده موجود در RAP که به دلیل اکسیداسیون و افزایش سختی، مقاومت مخلوط را در برابر تغییرشکل دائمی افزایش می‌دهد و دوم، کاهش مقدار قیر بهینه در مخلوط گروه دو که موجب کاهش قیر مؤثر و در نتیجه کاهش قابلیت جریان مخلوط می‌شود. از آنجا که در این پژوهش آزمایش مستقلی برای جداسازی اثر این دو عامل انجام نشده است، تعیین سهم دقیق هر یک امکان‌پذیر نیست؛ با این حال، با توجه به ثابت بودن سایر شرایط طرح اختلاط، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سفتی ناشی از قیر پیرشده RAP عامل غالب بوده و کاهش مقدار قیر مؤثر نیز به‌عنوان عامل مکمل در افزایش مقاومت شیارشدگی نقش داشته است. همچنین تفکیک کمی سهم قیر پیرشده و کاهش مقدار قیر مؤثر نیازمند طراحی مخلوط‌های شاهد مستقل با مقدار قیر ثابت یا استفاده از قیر بازیافتی بدون تغییر درصد قیر است که خارج از دامنه پژوهش حاضر بوده است.



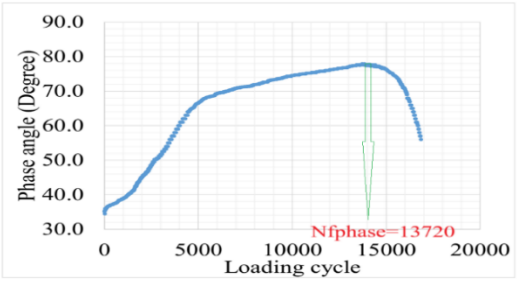
شکل ۱۷. مقایسه مدول خزشی دینامیکی مخلوط‌های طرح شده با دانه‌بندی یک و دو

٥-٤. مقاومت در برابر خستگی

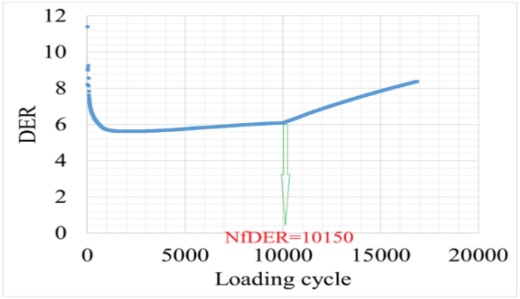
شکل‌های ۱۸ الی ۲۱، منحنی‌های خستگی را به ترتیب برای چهار تعریف عمر خستگی معرفی شده در شکل ۲، برای نمونه CNF0.75 تحت کرنش اولیه ۵۰۰ میکروکرنش[1] و برای دانه‌بندی گروه یک نشان می‌دهند.



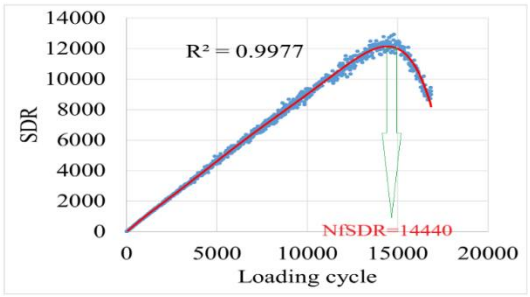
شکل ۱۸. عمر خستگی (Nf50) برای نمونه CNF0.75 و دانه‌بندی گروه یک



شکل ۱۹. عمر خستگی (Nfphase) برای نمونه CNF0.75 و دانه‌بندی گروه یک



شکل ۲۰. عمر خستگی (NfDER) برای نمونه CNF0.75 و دانه‌بندی گروه یک



شکل ۲۱. عمر خستگی (NfSDR) برای نمونه CNF0.75 و دانه‌بندی گروه یک

گرچه معیارهای خستگی مختلفی برای خروجی روش آزمایش خمش تیرچه پیشنهاد شده است، اما کاهش ۵۰ درصدی در سفتی اولیه، همچنان یک تعریف اساسی است. این تعریف یک رویکرد عملی و قابل اندازه‌گیری برای تعیین عمر خستگی HMA ارائه می‌دهد (منشینگ و همکاران، ۲۰۱۶). این تعریف در شکل ۱۸ نشان داده شده، که در آن نمونه مورد بررسی پس از ۱۶۸۶۰ چرخه بارگذاری، ۵۰ درصد کاهش در سفتی اولیه را تجربه کرد.

دومین معیار بررسی‌شده، همانطور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است، نقطه حداکثر منحنی تغییر زاویه فاز را در نظر می‌گیرد. بررسی هر دو معیار N_{f50} و N_{fphase} می‌تواند بینش جامع‌تری در مورد رفتار خستگی HMA به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک ارائه دهد. معیار N_{fphase} معمولاً با طیف وسیعی از رفتار خستگی مرتبط است که در آن رفتار ویسکوز بر رفتار الاستیک غالب است و منجر به اتلاف انرژی بیشتر به صورت گرما در مقایسه با انرژی ذخیره شده می‌شود (عامری و همکاران، ۲۰۱۷). طبق شکل ۱۹، مقدار N_{fphase} برابر با ۱۳۷۲۰ سیکل بود که عمر خستگی را تقریباً ۱۹ درصد کمتر از معیار N_{f50} تخمین می‌زند. این مشاهده با یافته‌های سایر محققان در مورد HMAهای مختلف سازگار است. معیار N_{fphase} نشان‌دهنده تغییرات ریزساختاری در نمونه و

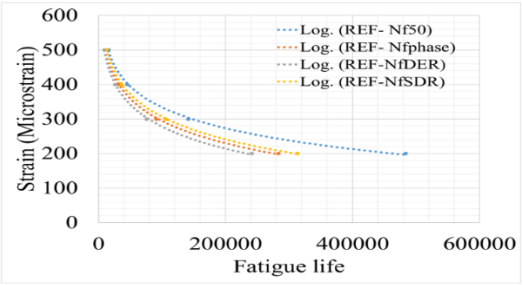
1- Microstrain

انتشار ریزترک‌ها است. به عبارت دیگر، مراحل اولیه رشد ترک خستگی را تخمین می‌زند، در حالی که معیار N_{f50} یک ویژگی ماکروسکوپی را نشان داده و وقوع ترک‌های ماکرو را پیش‌بینی می‌نماید (لاچنس ترمبلی و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، معیار N_{fphase} به عنوان یک هشدار اولیه برای شکست خستگی عمل می‌کند، در حالی که معیار N_{f50} نشان می‌دهد که شکست به مرحله بحرانی رسیده است.

طبق شکل ۲۰، معیار N_{fDER}، تخمین عمر خستگی کمتری نسبت به دو روش قبلی ارائه می‌دهد. بر اساس این معیار، عمر خستگی نمونه ۱۰۱۵۰ سیکل است که به ترتیب ٤٠ و ٢٦ درصد کمتر از مقادیر به‌دست آمده از معیارهای N_{f50} و N_{fphase} است. معیار N_{fDER} بخشی از انرژی تلف شده را که مستقیماً در ترک‌خوردگی ناشی از خستگی نقش دارد، در نظر می‌گیرد. مشابه معیار N_{fphase}، این معیار مراحل اولیه شکست خستگی را قبل از ورود نمونه به فاز انتشار ترک، شناسایی می‌کند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۶).

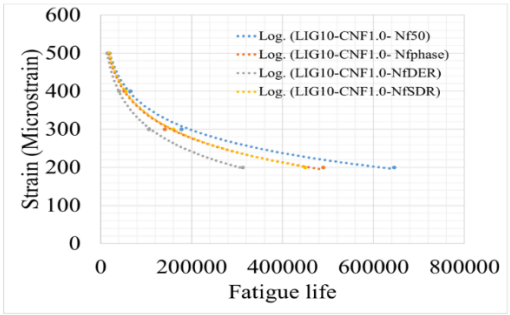
معیار N_{fSDR} که در شکل ۲۱ ارائه شده است، تخمینی از نرخ تخریب یکپارچگی نمونه ارائه می‌دهد. طبق شکل، عمر خستگی تخمینی بر اساس این معیار ١٤٤٤٠ چرخه بارگذاری است که کمترین تفاوت را با معیار N_{f50} نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، این معیار نیز تخمینی از مراحل نهایی شکست خستگی در نمونه ارائه می‌دهد.

شکل ۲۲، منحنی‌های عمر-کرنش خستگی را برای نمونه REF بر اساس تعاریف مختلف عمر خستگی و دانه‌بندی گروه یک مقایسه می‌کند. طبق شکل، در تمام سطوح کرنش در محدوده ۲۰۰ تا ۵۰۰ میکروکرنش، حداکثر عمر خستگی برای N_{f50} و پس از آن به ترتیب برای N_{fSDR}، N_{fphase} و N_{fDER} حاصل شد. این نتایج نشان می‌دهد که تعاریف مبتنی بر کاهش سفتی مخلوط، یعنی N_{f50} و N_{fSDR}، مراحل نهایی خستگی پس از ورود به منطقه بحرانی شکست را پیش‌بینی می‌کنند. در مقابل، تعریف مبتنی بر زاویه فاز (N_{fphase}) و به ویژه N_{fDER} که مبتنی بر انرژی تلف شده است، دقت بالاتری در تشخیص شکست خستگی در مراحل اولیه نشان می‌دهد. با این وجود، طبق نتایج ارائه شده در شکل ۲۲، بالاترین و پایین‌ترین سطح اطمینان در پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط به ترتیب مربوط به تعاریف N_{fDER} و N_{f50} است.



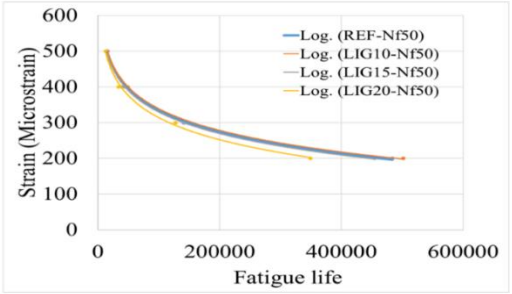
شکل ۲۲. مقایسه بین تعاریف مختلف عمر خستگی برای ترکیب REF و دانه‌بندی گروه یک

شکل ۲۳، منحنی‌های عمر خستگی را برای نمونه LIG10-CNF1.0 و دانه‌بندی گروه یک مقایسه می‌کند. مشابه شکل ۲۲، معیار N_{f50} بالاترین عمر خستگی را نشان داد. در همین حال، معیارهای N_{fphase} و N_{fSDR} منجر به مقادیر نسبتاً مشابهی در محدوده کرنش مورد مطالعه شدند. علاوه بر این، تعریف N_{fDER} کمترین مقدار عمر خستگی را نشان داد. مقایسه منحنی‌های خستگی در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان می‌دهد که رفتار خستگی مخلوط‌های HMA حاوی افزودنی‌های زیستی تا حدودی با نمونه REF متفاوت است.



شکل ۲۳. قایسه بین تعاریف مختلف عمر خستگی در نمونه LIG10-CNF1.0 برای دانه‌بندی گروه یک

برای تجزیه و تحلیل بیشتر تأثیر نوع و مقدار افزودنی بر عمر خستگی، شکل ۲٤ عمر خستگی مخلوط‌های حاوی درصدهای مختلف لیگنین را با نمونه REF بر اساس معیار N_{f50} مقایسه می‌کند. همان‌طور که نشان داده شده است، بالاترین عمر خستگی، با کمی تفاوت نسبت به نمونه REF، برای مخلوط LIG10 مشاهده شد. با این حال، افزایش مقدار لیگنین به ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی قیر، اثربخشی مورد نظر را طبق معیار N_{f50} ارائه نداد. لیگنین می‌تواند از چندین طریق بر خواص مهندسی HMA، از جمله عمر خستگی، تأثیر بگذارد. این ماده خواص ویسکوالاستیک قیر را تغییر می‌دهد و به تعادل رفتار الاستیک و ویسکوز کمک می‌کند (رن و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، لیگنین به عنوان یک آنتی‌اکسیدان عمل می‌کند و پیری قیر ناشی از دمای بالا در طول تولید و اختلاط را کاهش می‌دهد. این ویژگی به ویژه برای مقاومت در برابر خستگی آسفالت مفید است (یائو و همکاران، ۲۰۲۲). از سوی دیگر، سفتی بیش از حد در مخلوط به دلیل افزودن لیگنین که در شکل ۱٦ مشهود است می‌تواند شکنندگی را افزایش داده و به طور قابل توجهی بر مقاومت در برابر خستگی تأثیر بگذارد. علاوه بر این، توزیع ضعیف لیگنین در ساختار قیر، که به وضوح در درصدهای بالاتر مشاهده می‌شود، یکی دیگر از عوامل مهم است که بر کارایی آن تأثیر می‌گذارد.

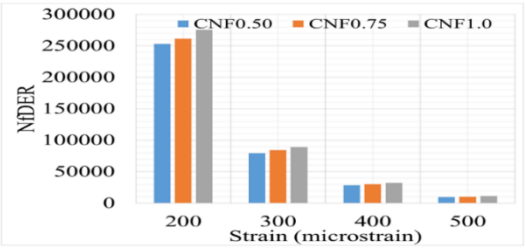


شکل ۲٤. مقایسه عمر خستگی طبق تعریف Nf50 در نمونه REF و نمونه‌های حاوی لیگنین در مخلوط گروه یک

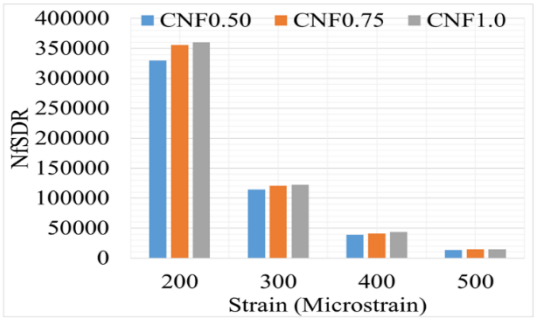
یکی از اهداف کلیدی پژوهش حاضر، دستیابی به عملکرد متعادل در دماهای مختلف با ترکیب درصد کمی از CNF در چسبنده اصلاح‌شده با لیگنین بود. شکل‌های ۲۵ و ۲٦ نشان می‌دهند که حتی در درصدهای پایین، CNF می‌تواند مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

همان‌طور که در شکل‌های ۲۵ و ۲٦ نشان داده شده است، در هر چهار سطح کرنش مورد بررسی، افزایش محتوای CNF از ۰/۵ به ۱/۰ درصد وزنی قیر، به طور پیوسته عمر خستگی مخلوط‌های آسفالت را بهبود بخشید. تأثیرات مفید افزودن یک درصد CNF بر N_{fDER} (شکل ۲۵) از حدود ۸/۸ درصد در کرنش اولیه ۲۰۰ میکرواسترین به ۱٦/۲ درصد در کرنش ۵۰۰ میکرواسترین افزایش یافت. به طور مشابه، برای N_{fSDR} (شکل ۲٦) میزان افزایش در سطوح کرنش فوق به ترتیب ۹/۲ و ۷/۵ درصد بود.

برخلاف لیگنین که بیشتر از طریق فعل و انفعال شیمیایی بر عملکرد تأثیر می‌گذارد، تأثیر CNF بر عملکرد مخلوط آسفالت، به ویژه عمر خستگی، عمدتاً فیزیکی است. CNF یک شبکه نانومقیاس تقویت‌شده در قیر تشکیل می‌دهد که به عنوان یک تکیه‌گاه در ساختار قیر عمل می‌کند. اگرچه اثر اصلی آن فیزیکی است، اما تا حدودی برهم‌کنش شیمیایی نیز رخ می‌دهد. این برهم‌کنش‌های شیمیایی عمدتاً از اصلاحات سطحی و برهم‌کنش بین گروه‌های هیدروکسیل روی CNF و اجزای قیر ناشی می‌شوند (شعبانی و همکاران، ۲۰۲٤).

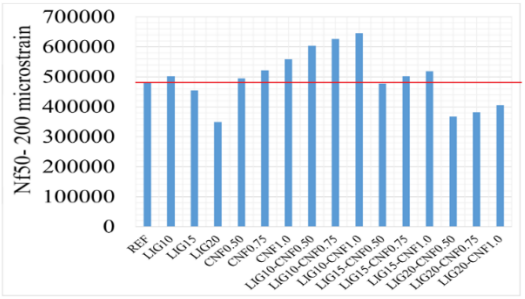


شکل ۲۵. تأثیر CNF بر عمر خستگی طبق معیار NfDER در مخلوط گروه یک در کرنش‌های مختلف



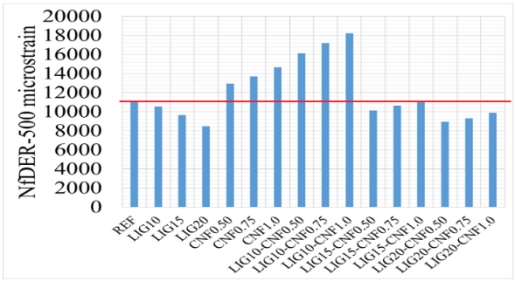
شکل ۲۶. تأثیر CNF بر عمر خستگی طبق معیار NfSDR در مخلوط گروه یک در کرنش‌های مختلف

برای ارزیابی دقیق‌تر تأثیرات استفاده ترکیبی از افزودنی‌های زیستی بر عمر خستگی، شکل ۲۷ مقایسه‌ای از عمر خستگی بر اساس معیار N_{f50} در کرنش اولیه ۲۰۰ میکروکرنش را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، هیچیک از نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد لیگنین عملکرد قابل قبولی در مقایسه با نمونه REF نشان ندادند. در مقابل، بالاترین عمر خستگی در بیشتر موارد برای نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد لیگنین مشاهده شد. اثرات مفید CNF بر عمر خستگی در همه گروه‌ها به وضوح مشهود است. به طور خاص، در نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ۱۵ درصد لیگنین، استفاده از ۰/۷۵ و ۱ درصد CNF منجر به بهبود عملکرد خستگی در مقایسه با نمونه REF شد.



شکل ۲۷. مقایسه عمر خستگی نمونه‌های مختلف برمبنای Nf50 در کرنش اولیه ۲۰۰ میکروکرنش در مخلوط یک

شکل ۲۸، مقایسه فوق را برای N_{fDER} در بالاترین سطح کرنش آزمایش شده (۵۰۰ میکروکرنش) انجام می‌دهد. تحت این شرایط، تنها نمونه‌های اصلاح‌شده با CNF به تنهایی و نمونه‌های کامپوزیتی حاوی حداکثر ۱۰ درصد لیگنین، عمر خستگی بالاتری نسبت به نمونه REF نشان می‌دهند. کاهش اثربخشی لیگنین در شکل ۲۸ در مقایسه با شکل ۲۷ را می‌توان به تفاوت در ماهیت تعاریف خستگی بر اساس معیارهای N_{f50} و N_{fDER} نسبت داد. N_{fDER} بیشتر به زاویه فاز یا خواص ویسکوز مخلوط وابسته است تا سفتی آن، در حالی که N_{f50} بیشتر به یکپارچگی و سفتی مخلوط مربوط می‌شود. از آنجایی که تأثیرات لیگنین در درجه اول بر سفتی است، انتظار می‌رود که اثرات مفید آن در N_{f50} بیشتر از N_{fDER} باشد.

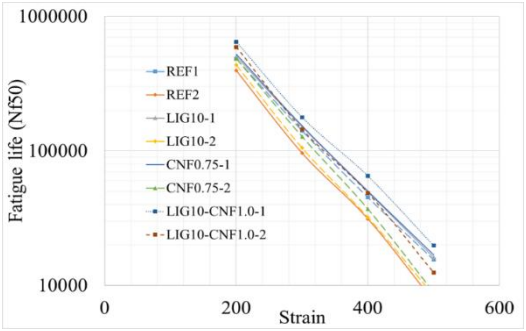


شکل ۲۸. مقایسه عمر خستگی نمونه‌های مختلف برمبنای N_{fDER} در کرنش اولیه ۲۰۰ میکروکرنش در مخلوط یک

شکل ۲۹، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی طرح شده با مصالح‌سنگی گروه یک و دو را برای تعدادی از چسبنده‌های مورد پژوهش مقایسه می‌نماید. نمودارهای خستگی نشان دهنده آن است که برای هر کدام از چسبنده‌ها، عمر خستگی به‌دست آمده از مخلوط یک، بزرگتر از مخلوط ۲ بوده است. اختلاف نتایج دو نوع دانه‌بندی با افزایش کرنش اولیه، افزایش یافت. عمر خستگی در روش خمش تیرچه و کرنش کنترل شده در درجه اول، تحت تأثیر سفتی مخلوط و مقدار قیر موثر است (منان و همکاران، ۲۰۱۵). افزودن مصالح RAP به مخلوط آسفالتی در دانه‌بندی گروه ۲، از دو طریق منجر به تغییر رفتار می‌شود. اول آنکه قیر موجود در RAP به دلیل پیرشدگی به مراتب سفت‌تر از قیر تازه است. حتی

در ترکیبی که ۵۰ درصد آن را مصالح RAP تشکیل می‌دهند، سفتی و شکنندگی مخلوط نسبت به مخلوط حاوی مصالح سنگی، بیشتر است. تأثیر دوم از تفاوت مقدار قیر در دو مخلوط نشأت می‌گیرد. مقدار قیر مفید موجود در مخلوط شماره ۲ به دلیل کمتر بودن درصد قیر بهینه، کمتر از مخلوط شماره یک بوده که این مورد نیز منجر به کاهش بیشتر عمر خستگی در نمونه‌های این گروه نسبت به گروه یک می‌شود.

در روش کرنش ثابت، در شرایطی که مخلوط سفتی بالاتری دارد، مقدار تنش اولیه برای دستیابی به کرنش مورد نظر بالاتر بوده، که منجر به افزایش نرخ خرابی تجمعی به ازای هر سیکل بارگذاری می‌شود. بنابراین از دیدگاه مکانیکی نیز مخلوط سفت‌تر در این روش، زودتر از مخلوط نرم‌تر دچار گسیختگی خستگی می‌شود (رن و همکاران، ۲۰۲۲).



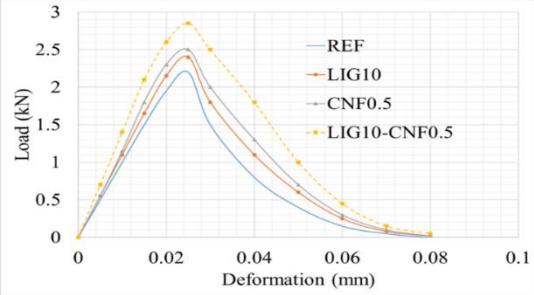
شکل ۲۹. مقایسه عمر خستگی (Nf50) دانه‌بندی گروه یک و گروه دو

اگرچه شاخص Nf50 به دلیل سادگی و کاربرد گسترده، رایج‌ترین معیار تعیین عمر خستگی محسوب می‌شود، اما این شاخص صرفاً بر افت سختی استوار بوده و تغییرات ویسکوالاستیک و انرژی تلف‌شده را در نظر نمی‌گیرد. همچنین با توجه به اینکه هر یک از شاخص‌های Nf50، Nfphase، NfDER و NfSDR جنبه متفاوتی از رفتار خستگی را ارزیابی می‌کنند، در این پژوهش هیچیک از آن‌ها به‌تنهایی به‌عنوان معیار نهایی انتخاب نشد. به‌منظور دستیابی به ارزیابی جامع، نتایج هر چهار شاخص به‌صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفت و جمع‌بندی نهایی بر اساس روند مشترک مشاهده‌شده میان آن‌ها انجام شد. همچنین، برای جلوگیری از سوگیری ناشی از اتکا به یک تعریف خاص از عمر خستگی، در تحلیل نهایی و رتبه‌بندی نمونه‌ها، هر چهار معیار با وزن یکسان (و در رتبه‌بندی کلی با وزن متوسط معادل نصف سایر شاخص‌ها) لحاظ شدند. به همین دلیل، در رتبه‌بندی نهایی عملکرد نمونه‌ها، چهار شاخص خستگی به‌صورت همزمان وارد تحلیل چندشاخصه شدند و میانگین رتبه آن‌ها به‌عنوان شاخص نهایی عملکرد خستگی در نظر گرفته شد.

۵-۵. مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین

برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی طراحی شده، آزمایش خمش نیم‌دایره (SCB) در دمای ۱۰- درجه سلسیوس انجام شد. شکل ۳۳، نمونه‌ای از نمودارهای نیرو-تغییرشکل را در مود I شکست برای تعدادی از مخلوط‌ها و برای دانه‌بندی گروه یک نشان می‌دهد. مساحت زیرمنحنی نیرو-تغییرشکل یک معیار مهم در ارزیابی مقاومت شکست ماده به شمار می‌رود. این مساحت که به کار شکست (Wf) معروف است، ظرفیت جذب انرژی کل ماده در طول فرآیند شکست به شمار می‌رود. مطابق شکل ۳۰، منحنی به دو بخش قبل و بعد از نقطه پیک تقسیم می‌شود که هر دو مساحت، بر مقاومت شکست تأثیرگذار هستند. مساحت قبل از نقطه ماکزیمم، معرف میزان انرژی جذب شده در مراحل اولیه گسترش ترک و تغییرشکل‌های الاستیک-ویسکوالاستیک نمونه است. مصالحی که سفتی بالاتری دارند، مساحت بیشتری قبل از نقطه پیک ایجاد می‌کنند که معمولاً خیلی سریع بعد از نقطه اوج افت می‌کنند. در مقابل، مساحت بعد از نقطه نیروی ماکزیمم، بیانگر انرژی جذب شده در دوره پیشرفت ترک و مقاومت پس از وقوع خرابی است.

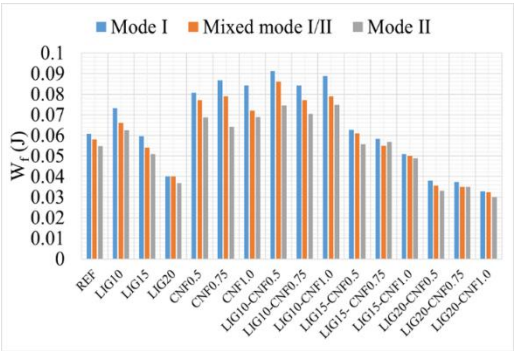
این ناحیه در تعریف چقرمگی[1] ماده مورد استفاده قرار می‌گیرد که در نقطه مقابل شکنندگی قرار دارد. مساحت بعد از نقطه پیک، شامل بخش اصلی Wf در مصالحی است که چقرمگی مناسبی دارند. مطابق شکل ۳۰، میزان تغییرشکل ماکزیمم چهار گروه از نمونه‌های مورد مقایسه، اختلاف چندانی با هم ندارد، ولی کامپوزیت LIG10-CNF0.5 بهترین عملکرد را از دیدگاه قابلیت جذب تنش، هم قبل از نقطه پیک و هم بعد از آن داشته است. همچنین، این منحنی‌ها به خوبی نقش CNF را در بهبود مقاومت شکست در دمای پایین در مقایسه با پودر لیگنین اثبات می‌نمایند.



شکل ۳۰. منحنی‌های نیرو-تغییرشکل برای تعدادی از نمونه‌ها در مود I و دانه‌بندی شماره یک

شکل ۳۱، مقادیر کار شکست را در مودهای مختلف شکست برای مخلوط‌های گروه یک مقایسه می‌نماید. مطابق شکل، در اکثر موارد مقدار کار شکست به‌دست آمده در مود یک، بالاتر از مود دو بوده و در مود ترکیبی نیز مقداری متوسط برای Wf به‌دست آمد. در مود یک یا مود بازشدگی، گسترش ترک مستلزم صرف انرژی بالا برای ایجاد کشش در چسبنده و خارج نمودن سنگدانه از موقعیت پایدار خود است. در حالی که در مود دو، که گسیختگی در آن از نوع برشی است، سر خوردن صفحات ترک روی هم با سهولت بیشتر و مستهلک نمودن کمتر انرژی صورت می‌پذیرد.

نتایج شکل ۳۱، نشان‌دهنده برتری CNF در افزایش انعطاف‌پذیری و مقاومت مخلوط در برابر گسترش ترک در دمای پایین، نسبت به پودر لیگنین است. از دیدگاه انرژی شکست، درصد بهینه لیگنین برابر با ۱۰ درصد وزنی قیر (کمترین مقدار لیگنین) بود. سایر مقادیر لیگنین باعث افت قابل توجه Wf شده به طوری که برای ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی، مقادیر کار شکست در نمونه‌های حاوی لیگنین حتی کمتر از مخلوط REF بود. در مقابل CNF یک عملکرد مناسب در بهبود رفتار دمای پایین داشته و در تمامی مقادیر کار شکست را افزایش داد. البته با مقایسه نتایج به‌دست آمده در مقادیر مختلف، استفاده از ۰/۷۵ درصد وزنی CNF می‌تواند اقتصادی‌تر از یک درصد باشد. در نمونه‌های کامپوزیتی نیز بالاترین مقاومت شکست در مخلوط‌های اصلاح شده با ۱۰ درصد لیگنین مشاهده گردید و مقادیر Wf در این نمونه‌ها تفاوت معناداری با یکدیگر نداشته است. با افزایش مقدار لیگنین به ۱۵ و ۲۰ درصد، یک رفتار متغیر در مقاومت شکست قابل مشاهده بوده و به غیر از دو مخلوط LIG15-CNF0.5 و LIG15-CNF0.75، سایر مخلوط‌ها، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به نمونه REF از خود بروز دادند.

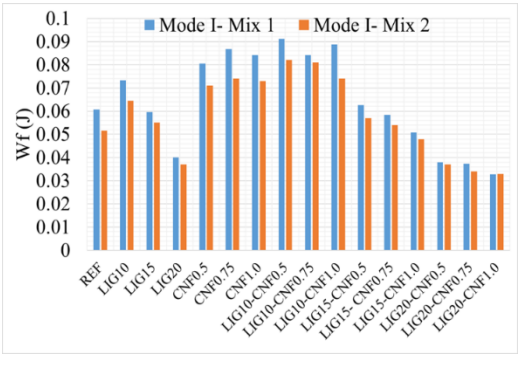


شکل ۳۱. مقایسه کار شکست در مودهای مختلف برای مخلوط‌های گروه یک

1- Toughness

شکل ۳۲، مقادیر Wf را در نمونه‌های طراحی شده با مخلوط شماره یک و دو مقایسه می‌نماید. با جایگزینی ۵۰ درصد وزنی مصالح بکر با مصالح RAP، شکنندگی مخلوط به میزان قابل توجهی افزایش یافته و این مسأله انعطاف‌پذیری مخلوط را در دماهای پایین به طور مضاعف کاهش می‌دهد. مطابق شکل ۳۰ از نظر روند کلی، رفتار مخلوط‌های مختلف حاوی افزودنی‌های زیستی، در هر دو نوع دانه‌بندی، تا حد زیادی مشابه بوده است. ولی در مخلوط شماره ۲ مقادیر کار شکست نسبت به مخلوط شماره یک کاهش یافته‌اند. کمترین اختلاف در مقادیر Wf در نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ۲۰ درصد لیگنین مشاهده شد. در این نمونه‌ها، حتی مخلوط‌های حاوی مصالح بکر نیز مقاومت شکست ضعیفی از خود نشان دادند.

بیشترین اختلاف در عملکرد نیز در نمونه LIG10-CNF1.0 مشاهده شد که در آن مقدار کار شکست مخلوط شماره یک، حدود ۱۷ درصد بیشتر از مخلوط شماره دو بود. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، مصالح RAP تغییری در روند مقاومت شکست مخلوط آسفالتی ایجاد نکردند. صرفاً به دلیل وجود قیر فرسوده و درصد کمتر قیر بهینه، مقادیر انرژی شکست را کاهش دادند.



شکل ۳۲. مقایسه کار شکست در مود I بین نمونه‌های دانه‌بندی گروه یک و گروه دو

به‌طور مشخص، نمونه‌های LIG10-CNF0.50 و LIG10-CNF0.75 که در تحلیل Mapping و HC ساختار یکنواخت‌تری نشان دادند، از بالاترین مقادیر Gf و FI نیز برخوردار بودند؛ در حالی که نمونه‌های دارای ۲۰ درصد لیگنین، هم‌زمان کاهش HC و افت شاخص‌های شکست را نشان دادند.

۵-۶. آنالیز آماری و تفسیر

با توجه به تنوع ترکیبات مورد مطالعه، تجزیه و تحلیل دقیق‌تری برای ارزیابی اثر هر افزودنی و ترکیبات آن‌ها و همچنین ایجاد یک معیار کمی برای پیوند خواص رفتاری چسبانندها در مقیاس ریزساختاری با خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از روش رگرسیون پیرسون در نرم افزار SPSS[1] انجام شد. در این روش، طبق رابطه (۱۴) بین دو متغیر ضریب همبستگی محاسبه می‌شود.

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \qquad (۱۴)$$

در این معادله، n تعداد نمونه‌ها، xi و yi نتایج به‌دست آمده برای هر متغیر در شرایط آزمون داده شده، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ مقادیر میانگین نتایج آزمایش به‌دست آمده یا ویژگی خاص برای یک شرایط معین است.

جدول‌های ۱۲ و ۱۳، به ترتیب مقادیر ضریب r_{xy} را برای هر جفت از متغیرهای مقایسه شده در مخلوط‌های یک و دو ارائه می‌دهند. مقدار مطلق r_{xy} بین صفر و یک متغیر است. هرچه این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد، همبستگی بین دو متغیر قوی‌تر است. ضریب مثبت نشان‌دهنده همبستگی مستقیم است، در حالی که ضریب منفی نشان‌دهنده رابطه معکوس بین متغیرها است. این ضرایب همبستگی، برای تمام آنالیزها نسبت به ترکیب

[1] Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)

REF انجام شده‌اند. بدین صورت که در حالت کلی، علامت مثبت نشان‌دهنده افزایش ویژگی مورد نظر با افزودن مواد زیست‌پایه نسبت به ترکیب REF و علامت منفی، نشان‌دهنده کاهش می‌باشد. اما این تغییرات صرفاً برای اعدادی که در کنار آنها ستاره زده شده است، در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بوده‌اند. در سایر موارد، نمی‌توان از نظر آماری تغییرات حاصله را با اهمیت تلقی نمود.

طبق جدول، همبستگی بین ضریب HC و مقدار هر افزودنی، منفی بود. به عبارت دیگر، بر اساس مقدار r_{xy} در سطح اطمینان ۹۵٪، با افزایش درصد افزودنی‌های زیستی، کیفیت توزیع آن‌ها در داخل چسبنده قیری کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار لیگنین، حفظ توزیع مناسب آن در ساختار چسبنده قیری چالش برانگیزتر خواهد بود. در مقادیر بالاتر، تمایل ذرات لیگنین به تجمع افزایش می‌یابد. در این شرایط، برهمکنش ذرات لیگنین با یکدیگر بیشتر از برهمکنش چسبنده قیری با لیگنین است. این امر می‌تواند منجر به توزیع نامنظم و در موارد شدید، جدایی فاز شود که بر پایداری و عملکرد مخلوط تأثیر می‌گذارد. تحقیقات قبلی اغلب درصد بهینه لیگنین را در محدوده ۸ تا ۱۵ درصد تعیین کرده‌اند و برای مقادیر بالاتر، تجمع یا خوشه‌ای شدن ذرات لیگنین به عنوان پدیده غالب گزارش شده است (بابالغیث و همکاران، ۲۰۲۰). این پدیده برای CNF در سطوح بالاتر از ۰/۵ تا ۱/۰ درصد وزنی چسبنده قیری مشاهده شده است (سانتاگاتا و همکاران، ۲۰۱۳). در حالی که در سطوح کمتر از ۰/۵ تا ۱/۰ درصد، CNF با ایجاد یک ساختار تقویت‌کننده، چسبنده قیری را تقویت می‌کند. در سطوح بالاتر، تجمع ذرات CNF به شدت بر عملکرد تقویت‌کننده آن تأثیر می‌گذارد و منجر به کاهش کیفیت چسبنده می‌شود.

جدول ۱۲. نتایج آنالیز همبستگی پیرسن مخلوط یک

متغیر	HC	ITS	TSR	Creep	N_{i50}	N_{fphase}	N_{IDER}	N_{ISDR}	W_f
لیگنین (٪)	-۰/۹۲۴*	۰/۸۶۷*	۰/۶۷۵	۰/۸۶۷*	-۰/۸۸۹*	-۰/۹۳۴*	-۰/۹۱۱*	-۰/۸۷۷*	-۰/۴۲۸
CNF (٪)	-۰/۹۴۸*	۰/۶۳۴	۰/۱۲۹	۰/۰۶۴	۰/۹۱۱*	۰/۹۵۵*	۰/۹۴۴*	۰/۹۰۵*	۰/۸۶۷*
لیگنین+CNF (٪)	-۰/۹۶۶*	۰/۳۲۱	۰/۱۰۳	۰/۸۸۴*	۰/۶۳۴	۰/۴۳۹	۰/۵۴۰	۰/۶۹۵	-۰/۶۷۴

* همبستگی با سطح اطمینان ۹۵ ٪ معنادار است.

جدول ۱۳. نتایج آنالیز همبستگی پیرسون مخلوط دو

متغیر	HC	ITS	TSR	Creep	N_{i50}	N_{fphase}	N_{IDER}	N_{ISDR}	W_f
لیگنین (٪)	-۰/۹۲۴*	۰/۸۹۳*	۰/۷۹۸	۰/۹۰۵*	-۰/۷۹۹	-۰/۹۰۵*	-۰/۸۶۷*	-۰/۸۱۵	-۰/۶۱۱
CNF (٪)	-۰/۹۴۸*	۰/۸۱۱	۰/۲۴۹	۰/۲۴۹	۰/۸۶۵*	۰/۹۳۴*	۰/۸۸۷*	۰/۸۶۷*	۰/۸۴۵*
لیگنین+CNF (٪)	-۰/۹۶۶*	۰/۴۱۵	۰/۴۱۹	۰/۷۹۸	۰/۴۲۹	۰/۲۱۴	۰/۶۷	۰/۲۴۵	-۰/۷۱۵

* همبستگی با سطح اطمینان ۹۵ ٪ معنادار است.

به طور کلی، هر دو نوع افزودنی زیستی و همچنین ترکیب آنها، هم ITS و هم TSR را بهبود بخشیدند. با این حال، اثرات مفید لیگنین به تنهایی بیشتر از CNF و ترکیب لیگنین و CNF بود. اگرچه از دیدگاه آماری، تنها اثر مثبت لیگنین بر ITS در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بود. این مشاهده برای هر دو نوع مخلوط گروه یک و دو صادق بود. در واقع، لیگنین یک پلیمر طبیعی غنی از ساختارهای فنلی و آلیفاتیک است که دارای گروه‌های عاملی قطبی مانند هیدروکسیل و متوکسی است. این گروه‌ها قطبیت و چسبندگی قیر را افزایش داده و پیوند بین چسبنده قیری و سنگدانه‌ها را تقویت می‌کنند (صادقی‌فر و راگاوسکاس، ۲۰۲۵). به عبارت دیگر، لیگنین توانایی قیر را برای پوشش سطح سنگدانه‌ها افزایش می‌دهد که این امر حساسیت به جدا شدن در شرایط مرطوب را کاهش می‌دهد. سایر اثرات لیگنین از طریق توانایی آن در افزایش چسبندگی ذاتی قیر حاصل می‌شود. لیگنین یک پلیمر با پیوند عرضی است که افزودن آن به چسبنده قیری، ویسکوزیته و سفتی چسبنده قیری را افزایش می‌دهد و در نتیجه پتانسیل تجزیه آن را در شرایط مرطوب کاهش می‌دهد (یائو و همکاران، ۲۰۲۲). برخلاف لیگنین، CNF بسیار آبدوست است و

خواص قطبی متفاوتی با چسبنده قیری دارد (لاووکو و همکاران، ۲۰۰۵). اتفاقاً این ویژگی، دستیابی به پراکندگی یکنواخت در چسبنده قیری را چالش برانگیز می‌کند. در نهایت، ساختار شیمیایی لیگنین عامل اصلی برتری آن در بهبود خواص دوام در شرایط مرطوب در مقایسه با CNF است. در مورد مقاومت خزشی مخلوط‌ها، استفاده از CNF به تنهایی تأثیر قابل توجهی نداشت. با این حال، مخلوط‌های حاوی لیگنین به تنهایی و ترکیب هر دو افزودنی زیستی، مقاومت در برابر شیارشدگی را در مقایسه با نمونه مرجع به طور قابل توجهی بهبود بخشیدند. این تأثیر با مقادیر r_{xy} به ترتیب ۰/۸٦۷ و ۰/۸۸٤ در دانه‌بندی گروه یک و ۰/۹۰۵ و ۰/۷۹۸ در دانه‌بندی گروه دو که به ترتیب در جدول‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده‌اند، قابل اثبات می‌باشد. البته ضریب ۰/۷۹۸ در دامنه معناداری ۹۵ درصد قرار نگرفته ولی معناداری با سطح اطمینان ۹۰ درصد را تأمین می‌کند. اثرات لیگنین بر مقاومت خزشی مخلوط هم فیزیکی و هم شیمیایی است. این بدان معناست که از یک سو، این ماده به عنوان یک پرکننده سفت و سخت در چسبنده قیری عمل می‌کند و با افزایش سفتی آن، تمایل چسبنده قیری و مخلوط آسفالت به جریان و تغییرشکل‌های دائمی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، گروه‌های قطبی لیگنین از طریق پیوند هیدروژنی و سایر نیروهای بین مولکولی با رزین‌ها و آسفالتن‌های موجود در چسبنده قیری تعامل دارند و یک شبکه ساختار یافته در چسبنده قیری ایجاد می‌کنند (الفلاحت و همکاران، ۲۰۲٤). برخلاف لیگنین، اثرات CNF بر خواص رفتاری آسفالت به شدت فیزیکی است و حساسیت آن به توزیع مناسب در سراسر ساختار چسبنده قیری بسیار بیشتر است. اگرچه در سطوح بالا، CNF مقاومت خزش را بهبود می‌بخشد، اما در سطوح مرسوم مورد بررسی در مطالعه حاضر، این اثر اندک است. استفاده از مقادیر زیاد (یعنی بیشتر از ۱٪ وزنی چسبنده قیری) می‌تواند مشکلات متعددی ایجاد کند. مهمترین مشکل، تجمع ذرات CNF است که می‌توان با اصلاح سطح ذرات CNF با سازگارکننده‌ها و افزایش قابل توجه زمان اختلاط با چسبنده قیری، آن را کاهش داد. مورد اول هزینه‌ها را به شدت افزایش می‌دهد و مورد دوم زمان اجرا، آلاینده‌های تولید شده و انرژی مصرفی را در شرایط عملیاتی به شدت بالا می‌برد (کارناتی و همکاران، ۲۰۱۹).

اثرات لیگنین و CNF به تنهایی بر مقاومت در برابر خستگی، به ترتیب برای همه معیارهای خستگی در سطح اطمینان ۹۵٪ مثبت و منفی بود. البته برای برخی از تعاریف شامل N_{f50} و N_{fSDR} در جدول ۱۳ تأثیرگذاری لیگنین با سطح اطمینان ۹۵ درصد تأیید نشد. به هر حال، برخلاف خواص خزشی، CNF حتی برای مقادیر کمتر از یک درصد نیز اثرات قابل توجهی بر مقاومت در برابر خستگی داشت. اگرچه این نتیجه را می‌توان از شکل‌های ۲۵ الی ۲۸ نیز استنباط کرد، اما تجزیه و تحلیل آماری ثابت کرده است که نتایج، اثرات مفید CNF بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالت را در سطح اطمینان ۹۵٪ تأیید می‌کند.

برای مخلوط‌های حاوی هر دو افزودنی، تمام ضرایب r_{xy} در هر دو جدول ۱۲ و ۱۳ مثبت بودند. اگرچه این ضرایب را نمی‌توان در سطح اطمینان ۹۵٪ ارزیابی کرد، اما عملکرد نسبتاً بهتری را برای مخلوط حاوی ترکیب لیگنین و CNF در مقایسه با نمونه‌هایی که فقط لیگنین دارند، نشان دادند. این موضوع را می‌توان در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب برای معیارهای N_{f50} و N_{fDER} تأیید کرد. از آنجایی که در نمونه‌های ترکیبی، تنها استفاده از ۱۰٪ لیگنین مقاومت در برابر خستگی را در مقایسه با نمونه REF افزایش داد، ضرایب r_{xy} برای نمونه‌های ترکیبی در بازه اطمینان ۹۵٪ قرار نگرفتند.

در ارتباط با مقاومت شکست در دمای پایین، روند کلی از نظر علامت ضرایب رگرسیونی شبیه مقاومت خستگی بود. این ضرایب به معنای تأثیرات نسبتاً منفی

لیگنین و تأثیرات بسیار مفید CNF بر عملکرد شکست بودند. اگرچه براساس ضرایب رگرسیونی اکثر r_{xy}ها در محدوده تأیید با سطح اطمینان ۹۵٪ قرار نداشتند.

جدول ١٤ نوعی رده‌بندی را برای انواع مختلف چسبنده‌های قیری اصلاح‌شده در پژوهش حاضر ارائه می‌دهد. این رده‌بندی بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل ریزساختاری و آزمایش‌های عملکرد مکانیکی انجام شده روی مخلوط‌های آسفالت حاوی این قیرها صورت پذیرفته است. روش طبقه‌بندی شامل دو مرحله است: ابتدا، تعیین رتبه هر چسبنده قیری برای خواص مورد نظر خاص و سپس محاسبه میانگین این رتبه‌ها. نکته قابل توجه این است که از آنجا که چهار تعریف مختلف از خستگی در این مطالعه بررسی شد، طبق ردیف دوم، وزن معیار خستگی در میانگین کلی نصف بقیه معیارها درنظر گرفته شد تا سهم منطقی آن تضمین شود. در مقابل، به سایر خواص مهم مانند مدول خزش، TSR، ITS، HC و Wf هر کدام وزنی برابر با ۱/۰ اختصاص داده شد.

جدول ١٤. رده‌بندی چسبنده‌های قیری مختلف براساس آنالیزهای ریزساختاری و عملکرد مکانیکی

نوع چسبنده	ویژگی / ضریب										میانگین وزنی	رده‌بندی نهایی
	HC ۱/۰	ITS ۱/۰	TSR ۱/۰	مدول خزشی ۱/۰	N_{fl0} ۰/۵	N_{fphase} ۰/۵	N_{fDER} ۰/۵	N_{fSDR} ۰/۵	Wf ۱/۰			
LIG10-CNF0.50	۶	۲	۲	۹	۳	۳	۳	۳	۱		۳/۷	یک
LIG10-CNF0.75	۱۰	۱	۹	۵	۲	۲	۱	۲	۳		۴/۵	دو
CNF0.75	۵	۶	۳	۱۴	۵	۵	۵	۵	۴		۶	سه
LIG10	۲	۵	۱	۱۱	۷	۱۰	۱۰	۷	۷		۶/۱	چهار
LIG10-CNF1.0	۱۳	۸	۱۱	۷	۱	۱	۲	۱	۲		۶/۲	پنج
LIG15	۳	۴	۵	۳	۱۲	۱۳	۱۱	۱۲	۱۱		۷/۱	شش
CNF0.50	۱	۹	۴	۱۶	۹	۶	۶	۹	۶		۷/۳	هفت
CNF1.0	۷	۱۰	۸	۱۳	۴	۴	۴	۴	۵		۷/۳	هشت
LIG15-CNF0.50	۸	۳	۶	۴	۱۱	۱۱	۱۲	۱۱	۸		۷/۴	نه
LIG15-CNF0.75	۱۲	۷	۱۰	۱	۸	۹	۸	۸	۱۰		۸/۱	ده
REF	–	۱۴	۷	۱۵	۱۰	۷	۹	۱۰	۹		۹	یازده
LIG15-CNF1.0	۱۴	۱۱	۱۳	۲	۶	۸	۷	۶	۱۲		۹/۴	دوازده
LIG20	۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۶	۱۶	۱۴	۱۶	۱۳		۱۲/۱	سیزده
LIG20-CNF0.50	۹	۱۲	۱۴	۱۰	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵		۱۲/۹	چهارده

طبق جدول ١٤، چسبنده‌های اصلاح شده LIG10-CNF0.50 و LIG10-CNF0.75 دارای بهترین عملکرد کلی بودند. برعکس، چسبنده‌های حاوی ۲۰ درصد لیگنین ضعیف‌ترین عملکرد را نشان دادند و صرف نظر از محتوای CNF، حتی پایین‌تر از نمونه REF قرار گرفتند. در میان چسبنده‌های قیری دارای یک افزودنی، CNF0.75 و LIG10 مؤثرترین بودند. تحلیل انجام شده تأثیر مثبت CNF بر عمر خستگی و مقاومت شکست در دمای پایین و مزایای لیگنین برای استحکام کششی و حساسیت به رطوبت را برجسته می‌کند.

در نهایت، براساس تحلیل‌های انجام شده برای دستیابی به یک عملکرد متعادل، برای ترکیبی لیگنین و CNF حداکثر مقدار لیگنین برابر با ۱۰ درصد و مقدار CNF برابر با ۰/۵ درصد وزنی قیر پایه پیشنهاد می‌شود. در نمونه‌هایی که صرفاً با یکی از افزودنی‌ها اصلاح می‌شوند نیز حداکثر مقدار لیگنین و CNF برای حداقل دستیابی به عملکرد بهتر نسبت به قیر REF باید به ترتیب به ۱/۰ و ۱۵ درصد وزن چسبنده قیری محدود شوند.

٦. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر استفاده از دو افزودنی زیست‌پایه شامل لیگنین و نانوفیبر سلولزی (CNF) به‌صورت جداگانه و ترکیبی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم و همچنین مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد مصالح خرده‌آسفالتی (RAP) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نوع افزودنی، مقدار مصرف آن و نحوه برهم‌کنش میان دو افزودنی، نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار مکانیکی، دوام و ریزساختار مخلوط‌های آسفالتی دارند. نتایج ارزیابی رفتار دمای بالا نشان داد که لیگنین مؤثرترین افزودنی در افزایش سفتی مخلوط، بهبود مقاومت خزشی و کاهش حساسیت به شیارشدگی است. با این حال، افزایش مقدار لیگنین بیش از محدوده بهینه (حدود ۱۵ درصد) موجب کاهش همگنی ریزساختار، افزایش شکنندگی و افت بخشی از عملکرد مکانیکی گردید. در مقابل، نانوفیبر سلولزی اگرچه تأثیر کمتری بر مقاومت شیارشدگی داشت، اما نقش مؤثری در بهبود

رفتار ویسکوالاستیک، افزایش عمر خستگی و افزایش انرژی شکست مخلوط‌های آسفالتی ایفا نمود.

بررسی رفتار خستگی نشان داد که افزایش سفتی ناشی از لیگنین، در مقادیر زیاد می‌تواند موجب کاهش انعطاف‌پذیری و افت عمر خستگی شود، در حالی که حضور نانوفیبر سلولزی این اثر منفی را تا حد زیادی جبران کرده و موجب افزایش مقاومت در برابر آغاز و گسترش ترک گردید. همچنین، نتایج آزمون SCB نشان داد که افزایش کار شکست در حضور CNF بیانگر افزایش ظرفیت جذب انرژی و بهبود مقاومت ترک‌خوردگی در دماهای پایین است؛ در حالی که مقادیر زیاد لیگنین روندی معکوس ایجاد نمود.

نتایج آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی نیز نشان داد که لیگنین بیشترین تأثیر را بر افزایش چسبندگی قیر و سنگدانه، بهبود مقاومت کششی و افزایش دوام رطوبتی دارد؛ در حالی که اثر CNF در این بخش محدودتر و وابسته به یکنواختی پراکنش آن در ساختار قیر بود.

ارزیابی ریزساختاری با استفاده از تصاویر SEM، آنالیز EDS ، نقشه‌های عنصری و ضریب همگنی (HC) نشان داد که بهبود عملکرد مکانیکی تنها در شرایطی حاصل می‌شود که افزودنی‌ها به‌طور یکنواخت در ساختار چسبنده قیری توزیع شوند. افزایش بیش از حد مقدار لیگنین یا CNF، به‌ویژه در نمونه‌های ترکیبی، موجب تجمع ذرات، کاهش ضریب همگنی و ایجاد نواحی غیرهمگن گردید که این تغییرات با افت عملکرد مکانیکی و رئولوژیکی نمونه‌ها همخوانی داشت.

بررسی عملکرد مخلوط‌های حاوی ۵۰ درصد RAP نیز نشان داد که حضور قیر پیرشده موجب افزایش سفتی و بهبود مقاومت در برابر تغییرشکل‌های دائمی می‌شود، اما هم‌زمان به دلیل کاهش قیر مؤثر و افزایش سختی مخلوط، عملکرد خستگی و مقاومت شکست در دماهای پایین کاهش می‌یابد. با وجود این، روند تأثیر افزودنی‌های زیستی در مخلوط‌های حاوی RAP مشابه مخلوط‌های فاقد RAP باقی ماند و نشان داد که این افزودنی‌ها می‌توانند بخشی از اثرات نامطلوب ناشی از حضور قیر پیرشده را تعدیل نمایند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که هیچیک از افزودنی‌های لیگنین یا نانوفیبر سلولزی به‌تنهایی قادر به ایجاد عملکرد بهینه در تمامی شرایط بهره‌برداری نیستند. لیگنین عمدتاً موجب افزایش سفتی، مقاومت شیارشدگی و دوام رطوبتی می‌شود، در حالی که نانوفیبر سلولزی نقش مؤثرتری در بهبود رفتار ویسکوالاستیک، افزایش عمر خستگی و مقاومت شکست ایفا می‌کند. بنابراین، عملکرد مطلوب مخلوط‌های آسفالتی حاصل ایجاد تعادل میان این دو سازوکار عملکردی است. بر همین اساس، ترکیب حاوی حدود ۱۰ درصد لیگنین و ۰/۵ الی ۰/۷۵ درصد نانوفیبرسلولزی به‌عنوان ترکیب بهینه این پژوهش معرفی می‌شود؛ زیرا توانست مناسب‌ترین تعادل را میان مقاومت شیارشدگی، دوام، عملکرد خستگی، مقاومت شکست و ویژگی‌های ریزساختاری ایجاد نماید. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده کنترل‌شده و هم‌زمان از افزودنی‌های زیست‌پایه، در کنار به‌کارگیری مصالح بازیافتی، می‌تواند راهکاری مؤثر برای توسعه مخلوط‌های آسفالتی پایدار، با عملکرد مناسب و سازگار با اهداف توسعه پایدار باشد.

۷. تقدیر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و فدردانی خود را از تمامی پژوهشگران و متخصصانی که در پیشبرد این پژوهش یاری رسان بوده‌اند، ابراز می‌دارند. همچنین از همکاری و همراهی کلیه همکاران پژوهشی که بازخوردهای سازنده‌ای در راستای بهبود کیفیت این مطالعه ارائه نموده‌اند، تشکر می‌گردد.

۸. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان تأیید می‌کنند که این مقاله حاصل پژوهش اصیل آنها بوده و قبلاً در هیچ مجله یا کنفرانس دیگری منتشر نشده و همچنین برای بررسی همزمان به مجله دیگری ارسال نشده است.

۹. مشارکت‌های نویسندگان

؟؟؟: ایده‌پردازی و مفهوم‌سازی، اعتبارسنجی، تحلیل داده‌ها، جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، نگارش پیش-نویس اصلی مقاله.

؟؟؟؟: ایده‌پردازی و مفهوم‌سازی، اعتبارسنجی، تحلیل داده‌ها، جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، نگارش پیش-نویس اصلی مقاله، نظارت و راهنمایی کلی پژوهش.

۱۰. منابع مالی

این پژوهش هیچ بودجه مشخصی از سازمان‌های تأمین-کننده داخلی یا خارجی دریافت نکرده است.

۱۱. تعارض منافع

نویسندگان تأیید می‌کنند که هیچگونه تعارض منافع مرتبط با انتشار این مقاله ندارند.

.

۷. مراجع

Abe, A. A., Oliviero Rossi, C., & Caputo, P. (2022). "Biomaterials and their potentialities as additives in bitumen technology: A review". Molecules, 27(24): 8826. https://doi.org/10.3390/molecules27248826

Al-falahat, W., Lamothe, S., Carret, J. C., & Carter, A. (2024). "Effects of kraft lignin on the performance grade of two bitumens used for cold climate". Int. J. Pavement Res. Technol., 17(5): 1295–1308. doi:10.1007/s42947-023-00302-1

Al-Khateeb, G. G., & Ghuzlan, K. A. (2014). "The combined effect of loading frequency, temperature, and stress level on the fatigue life of asphalt paving mixtures using the IDT test configuration". Int. J. Fatigue, 59: 254-261. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.08.011I

Al-Taher, M. G., Sawan, A. M., Solyman, M. E. S. A., El-Sharkawi Attia, M. I., & Ibrahim, M. F. (2026). "Evaluating the durability of asphalt mixtures for flexible pavement using different techniques: A review". Int. J. Pavement Res. Technol., 19(3): 521-547. https://doi.org/10.1007/s42947-024-00469-1

Almeida, A., & Picado-Santos, L. (2022). "Asphalt road pavements to address climate change challenges—An Overview". Appl. Sci., 12(24): 12515.

Ameri, M., Seif, M., Abbasi, M., Molayem, M., & KhavandiKhiavi, A. (2017). "Fatigue performance evaluation of modified asphalt binder using of dissipated energy approach". Constr. Build. Mater., 136: 184–191. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.010

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2002). "Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage". Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing, 283.

Amouzadeh Omrani, M., & Hasirchian, M. (2020). "Assessing the effect of steel slag and reclaimed asphalt pavement on mechanical properties and pollution of roller compacted concrete pavement". J. Transport. Infrastruct. Eng., 6(2): 87-108. 10.22075/jtie.2020.19754.1444

Amouzadeh Omrani, M., Hassan Nezhad, A. and Shahbazi, V. (2022). "Investigating the possibility of using recycled asphalt pavement (RAP) and steel slag as a substitute for part of the materials in roller compacted concrete (RCC) pavements". J. Concrete Struct. Mater., 7(1): 5-22. doi: 10.30478/jcsm.2022.336813.1263

Amouzadeh Omrani, M., & Babagoli, R. (2023). "Evaluation of the effect of nano-calcium carbonate mechanical performance of asphalt binder and mixture". J. Transport. Res., 20(3): 467-488. 10.22034/tri.2023.175636

Antony Jose, S., Cowan, N., Davidson, M., Godina, G., Smith, I., Xin, J., & Menezes, P. L. (2025). "A comprehensive review on cellulose nanofibers, nanomaterials, and composites: manufacturing, properties, and applications". NanoMater., 15(5): 356. https://doi.org/10.3390/nano15050356

Arafat, S., Kumar, N., Wasiuddin, N. M., Owhe, E. O., & Lynam, J. G. (2019). "Sustainable lignin to enhance asphalt binder oxidative aging properties and mix properties. J. Clean. Produc., 217: 456-468. 10.1016/j.jclepro.2019.01.238

AASHTO. (2014). Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials.

American Society for Testing and Materials. (2017). "ASTM D113-17: Standard test method for ductility of bituminous materials". ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2018). "ASTM D92-18: Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester". ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2019). "ASTM D2170-19: Standard test method for kinematic viscosity of asphalts (Bitumens)". ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2020). "ASTM D4-86(2020): Standard test method for bitumen content". ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2020). "ASTM D5/D5M-20: Standard test method for penetration of bituminous materials". ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2020). "ASTM D36/D36M-14(2020): Standard test method for softening point of bitumen (Ring-and-Ball apparatus)". ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2021). "ASTM D70/D70M-21: Standard test method for density of semi-solid bituminous materials (Pycnometer method)". ASTM International.

Ataeian, P., Cheon, J., Azimi Alamdary, Y., & Tam, K. C. (2023). "Development of asphalt cements for road pavement using sustainable nanomaterials: A review". J. Vinyl Additive Technol., 29(4): 574–588. https://doi.org/10.1002/vnl.21972

Babalghaith, A. M., Koting, S., Sulong, N. H. R., Karim, M. R., & AlMashjary, B. M. (2020). “Performance evaluation of stone mastic asphalt (SMA) mixtures with palm oil clinker (POC) as fine aggregate replacement”. Constr. Build. Mater., 262: 120546. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120546

Castro, M. P. P. (2020). “Effects of cellulose nano-fiber as an additive on performance of asphalt binders and mixes. South Dakota State University.

Charhi, O. B., & Baba, K. (2024). “Influence of temperature on the viscoelastic behavior and durability of flexible pavements”. Civ. Eng. J., 10(07). http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-07-06

Chfat, A. H. Z., Yaacob, H., Kamaruddin, N. M., Al-Saffar, Z. H., & Jaya, R. P. (2024). “Performance of asphalt mixtures modified with nano-eggshell powder”. Civ. Eng. J., 10(11): 3699-3720. http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-11-016

Colbert, B., & You, Z. (2012). “The determination of mechanical performance of laboratory produced hot mix asphalt mixtures using controlled RAP and virgin aggregate size fractions”. Constr. Build. Mater., 26(1): 655-662. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.068

Desseaux, S., dos Santos, S., Geiger, T., Tingaut, P., Zimmermann, T., Partl, M. N., & Poulikakos, L. D. (2018). “Improved mechanical properties of bitumen modified with acetylated cellulose fibers”. Compos. Part B: Eng., 140: 139-144. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.010

Divandari, H., & Bashkoul, Y. (2021). “Determine the optimal amount of RAP and Micro Silica in Roller Compacted Concrete Pavement”. Road, 29(109); 155-170.

Divandari, H., Modarres, A., Hosseini Ali Abad, S. M., & Rostami Ankas, M. (2015). “Modeling of asphalt concrete rutting using indirect tensile strength test results and marshall parameters”. J. Transport. Infrastruct. Eng., 1(2): 41-54. 10.22075/jtie.2014.163

Gao, J., Wang, H., Liu, C., Ge, D., You, Z., & Yu, M. (2020). “High-temperature rheological behavior and fatigue performance of lignin modified asphalt binder”. Constr. Build. Mater., 230: 117063. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117063

Gaudenzi, E., Cardone, F., Lu, X., & Canestrari, F. (2023). “The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review”. Constr. Build. Mater., 362; 129773. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129773

Ghabchi, R., & Castro, M. P. P. (2021). “Effect of laboratory-produced cellulose nanofiber as an additive on performance of asphalt binders and mixes. Constr. Build. Mater., 286: 122922. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122922

Ghabchi, R., & Castro, M. P. P. (2024). “Development and characterization of a plant-based bio-additive for asphalt binder”.

Gontard, N., Sonesson, U., Birkved, M., Majone, M., Bolzonella, D., Celli, A., ... & Sebok, A. (2018). “A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy”. Critic. Rev. Environ. Sci. Technol., 48(6): 614-654. https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1471957

Grilli, A., Iori, L., & Porot, L. (2019). “Effect of bio-based additives on bitumen properties”. Road Mater. Pavement Design, 20(8): 1864-1879. https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1474790

Gunka, V., Astakhova, O., Hrynchuk, Y., Sidun, I., Reutskyy, V., Mirchuk, I., & Poliak, O. (2024). “A review of road bitumen modification methods. Part 1–physical modification”. Chem. Chem. Technol., 18: 295-304. https://doi.org/10.23939/chcht18.02.295

Ibrahim, M. R. (2018). “The effect of crumb rubber modification on the physical properties of porous asphalt”. Doctoral dissertation, University of Malaya, Malaysia.

Isacsson, U., & Kiggundu, B. (2005). “Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures”. Int. J. Pavement Eng., 6: 229–239. https://doi.org/10.1080/10298430500440796

Kalampokis, S., Papamoschou, M., Kalama, D. M., Pappa, C. P., Manthos, E., & Triantafyllidis, K. S. (2022). “Investigation of the characteristic properties of lignin-modified bitumen”. Civ. Eng., 3(3): 734–747. https://doi.org/10.3390/civileng3030042

Karnati, S. R., Oldham, D., Fini, E., & Zhang, L. (2019). “Surface functionalization of silica nanoparticles to enhance aging resistance of asphalt binder”. Constr. Build. Mater., 211: 1065–1072. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.257

Lachance-Tremblay, É., Vaillancourt, M., & Perraton, D. (2016). “Linear viscoelastic properties, low temperature and fatigue performances of asphalt mixture with recycled glass”.

Lawoko, M., Henriksson, G., & Gellerstedt, G. (2005). “Structural differences between the lignin−carbohydrate complexes present in wood and in chemical pulps”. Biomacromolecules, 6: 3467–3473. https://doi.org/10.1021/bm058014q

Li, S., Wang, Y., & Zhou, S. (2025). “Investigation of purified lignin as an antioxidant for sustainable bitumen”. Constr. Build. Mater., 458: 139499. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139499

Lv, J., & Zhang, X. (2021). “Prediction models of shear parameters and dynamic creep instability for asphalt mixture under different high temperatures”. Polym., 13(15): 2542. https://doi.org/10.3390/polym13152542

Mansoori, S., & Modarres, A. (2020). “Rheological and micro-structural properties of bituminous mastics containing chemical and wax warm additives”. Constr. Build. Mater., 248: 118623. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118623

Mensching, D., Rahbar-Rastegar, R., Underwood, S., & Sias, J. (2016). “Identifying indicators for fatigue cracking in hot-mix asphalt pavements using viscoelastic continuum damage principles”. Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board, 2576: 28–39. https://doi.org/10.3141/2576-04

Mohajerani, A., Hui, S. Q., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., Abdul Kadir, A., ... & Maghool, F. (2019). “Amazing types, properties, and applications of fibres in construction materials”. Mater., 12(16): 2513. https://doi.org/10.3390/ma12162513

Mohammadi, M. M., & Modarres, A. (2022). “Microstructural properties of polymer-modified bitumen emulsion-cement composites considering the production method”. J. Mater. in Civ. Eng., 34(4): 04022030. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004170

Musco, A., Tarsi, G., Tataranni, P., Salzano, E., & Sangiorgi, C. (2024). “Use of bio-based products towards more sustainable road paving binders: A state-of-the-art review”. J. Road Eng., 4(2): 151–162. https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.04.002

Nadirov, R., Ketegenov, T., Batkal, A., Kalugin, S., Teltayev, B., Caputo, P., Oliviero Rossi, C., Kamunur, K., Assylkhanov, Z., & Osserov, T. (2025). “Sustainable adhesion additive improving road bitumen properties with rapeseed oil waste”. Sustainability, 17(4): 1472. https://doi.org/10.3390/su17041472

Nazarian, P., Divandari, H., Omrani, M. A., & Ghasemnejad, H. (2025). “Optimizing the bio-based additive content considering bitumen microstructure and HMA mechanical properties”. Case Stud. Constr. Mater., e05155. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05155

Norgbey, E., Huang, J., Hirsch, V., Liu, W., Wang, M., Ripke, O., Li, Y., Takyi- Annan, G., Ewusi-Mensah, D., Wang, X., Treib, G., Rink, A., Nwankwegu, A., Opoku, P., & Nkrumah, P. (2020). “Unravelling the efficient use of waste lignin as a bitumen modifier for sustainable roads”. Constr. Build. Mater., 230: 116957. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116957

Ren, J., Xu, Y., Zhao, Z., Chen, J., Cheng, Y., Huang, J., Yang, C., & Wang, J. (2022). “Fatigue prediction of semi-flexible composite mixture based on damage evolution”. Constr. Build. Mater., 318: 126004. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126004

Ren, S., Liu, X., Zhang, Y., Lin, P., Apostolidis, P., Erkens, S., Li, M., & Xu, J. (2021). “Multi-scale characterization of lignin modified bitumen using experimental and molecular dynamics simulation methods”. Constr. Build. Mater., 287: 123058. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123058

Ren, S., Liu, X., & Erkens, S. (2023). “Insight into the critical evaluation indicators for fatigue performance recovery of rejuvenated bitumen under different rejuvenation conditions”. Int. J. Fatigue, 175: 107753. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107753

Rezazad Gohari, A., Lamothe, S., Bilodeau, J. P., Mansourian, A., & Carter, A. (2023). “Laboratory study on influence of blending conditions on chemo-thermal characteristics of lignin-modified bitumen”. Appl. Sci., 13(13): 7766. https://doi.org/10.3390/app13137766

Rohayzi, N. F., Katman, H. Y. B., Ibrahim, M. R., Norhisham, S., & Rahman, N. A. (2023). “Potential additives in natural rubber-modified bitumen: A review”. Polym., 15(8): 1951. https://doi.org/10.3390/polym15081951

Sadeghifar, H., & Ragauskas, A. J. (2025). “Lignin as a natural antioxidant: Chemistry and applications”. Macromol, 5(1): 5. https://doi.org/10.3390/macromol5010005

Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., & Chiappinelli, G. (2013). “Effects of nano-sized additives on the high-temperature properties of bituminous binders: a comparative study”. pp. 297–309. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6878-9_22

Shabani, S., Valizadeh, M., & Khavandi, A. (2024). “Evaluation of the sensitivity of the rheology characteristics of bitumen and slurry seal modified with cellulose nanofiber solution”. Constr. Build. Mater., 422: 135318. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135318

Sun, L., Gu, X., Hu, D., Zhou, Z., & Wang, G. (2023). “Anti-aging mechanism and rheological properties of lignin, quercetin, and gallic acid as antioxidants in asphalt”. Constr. Build. Mater., 369: 130560. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130560

Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2020). “The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review”. Mater., 13(18): 4052. https://doi.org/10.3390/ma13184052

Ten, E., & Vermerris, W. (2015). “Recent developments in polymers derived from industrial lignin”. J. Appl. Polym. Sci., 132(24). https://doi.org/10.1002/app.42069

Vazquez, A., Foresti, M. L., Moran, J. I., & Cyras, V. P. (2014). “Extraction and production of cellulose nanofibers”. In: Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application: Volume C: Polymer Nanocomposites of Cellulose Nanoparticles (pp. 81-118). Berlin, Heidelberg: Springer. DOI:10.1007/978-3-642-45232-1_57

Wang, C., Zhang, H., Castorena, C., Zhang, J., & Kim, Y. R. (2016). “Identifying fatigue failure in asphalt binder time sweep tests”. Constr. Build. Mater., 121: 535–546. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.020

Wang, L., Shan, M., Chang, C., & Zhou, X. (2020). “The macro-and meso-cracking characteristics of warm mix crumb rubber asphalt mastics before and after aging”. Constr. Build. Mater., 262: 120724. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120724

Wei, H., Xu, B., Li, J., Zheng, J., Liu, Y., & Lu, R. (2025). “Effect of temperature on fatigue damage evolution of asphalt mixture based on cluster analysis and acoustic emission parameters”. Eng. Fract. Mech., 317: 110954. 10.1016/j.engfracmech.2025.110954

Weigel, S., & Stephan, D. (2018). “Relationships between the chemistry and the physical properties of bitumen”. Road Mater. Pavement Design, 19(7): 1636-1650. https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1338189

Wu, J., Liu, Q., Wang, C., Wu, W., & Han, W. (2021). “Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements”. J. Clean. Produc., 283: 124663. 10.1016/j.jclepro.2020.124663

Xiang, L., Sheng, Y., Xu, D., Duan, X., Jia, H., Cui, S., & Sheng, B. (2024). “Effect of alkali-treated bamboo fibers on the properties of asphalt mixture”. Composite Interfaces, 31(6): 641-663. https://doi.org/10.1080/09276440.2023.2279401

Xu, G., Wang, H., & Zhu, H. (2017). “Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin”. Constr. Build. Mater., 151: 801-808. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.151

Xu, C., Wang, D., Zhang, S., Guo, E., Luo, H., Zhang, Z., & Yu, H. (2021). “Effect of lignin modifier on engineering performance of bituminous binder and mixture”. Polym. 13(7): 1083. https://doi.org/10.3390/polym13071083

Yao, H., Wang, Y., Liu, J., Xu, M., Ma, P., Ji, J., & You, Z. (2022). “Review on applications of lignin in pavement engineering: A recent survey”. Frontiers Mater., 8: 803524. ttps://doi.org/10.3389/fmats.2021.803524

Yao, Y., Gao, J., Yang, J., Huang, B., & Song, L. (2022). “Sustainable asphalt concrete containing RAP and coal gangue aggregate: performance, costs, and environmental impact”. J. Renew. Mater., 10(8): 2263–2285. DOI: 10.32604/jrm.2022.018911

Yue, Y., Abdelsalam, M., Luo, D., Khater, A., Musanyufu, J., & Chen, T. (2019). “Evaluation of the properties of asphalt mixes modified with diatomite and lignin fiber: A review”. Mater., 12(3): 400. https://doi.org/10.3390/ma12030400

Zhang, Y., Liu, X., Apostolidis, P., Gard, W., van de Ven, M., Erkens, S., & Jing, R. (2019). “Chemical and rheological evaluation of aged lignin-modified bitumen”. Mater., 12(24): 4176. https://doi.org/10.3390/ma12244176