

## Development of a Fatigue Life Prediction Model for Rejuvenated Recycled Asphalt Binders under Various Thermal Conditions

Ahmad Samir Shahsamandy<sup>1</sup> , Nasir Ahmad Ibrahim<sup>2</sup> 

1. PhD in Transportation Engineering, Visiting Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kateb University, Kabul, Afghanistan. (Corresponding Author)

Email: [as.shahsamandy@kateb.edu.af](mailto:as.shahsamandy@kateb.edu.af)

2. Visiting Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kateb University, Kabul, Afghanistan. Email: [nasiribrahimi530@gmail.com](mailto:nasiribrahimi530@gmail.com)

---

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received: 03/02/2026  
Received in revised form: 04/02/2026  
Accepted: 11/03/2026  
Available online: 19/03/2026

**Keywords:**  
Rejuvenated recycled asphalt binders, fatigue failure criterion, Linear Amplitude Sweep (LAS) test, strain level, temperature variation, fatigue life prediction

The Linear Amplitude Sweep (LAS) test is recognized as a valuable tool for evaluating the fatigue performance of asphalt binders. However, due to their viscoelastic behavior, fatigue life is highly temperature-dependent. Therefore, selecting an appropriate testing temperature for LAS remains a critical challenge. This study investigates the combined effects of temperature and strain at intermediate temperatures using LAS tests conducted at four different temperatures on rejuvenated recycled asphalt binders. A simplified approach is proposed to predict fatigue behavior at various temperatures using limited experimental data. The results show that LAS parameters (A and B) exhibit linear correlations with the complex modulus ( $|G^*|$ ) at the corresponding temperatures. Model parameters were calibrated using experimental data at two temperatures to predict fatigue life at other temperatures. Based on the maximum stress failure criterion and a 35% damage level recommended by AASHTO, the proposed model provides a simple and accurate framework for fatigue life prediction over a wide range of temperatures and strain levels relevant to rejuvenated recycled binders in flexible pavements.

---

**Cite this article:** Shahsamandy, A. & Ibrahim, N. (2026). Development of a Fatigue Life Prediction Model for Rejuvenated Recycled Asphalt Binders under Various Thermal Conditions, *Kateb Scientific-Research Journal of Technology and Engineering*, 1 (1), 45-63.



## توسعه مدل پیش‌بینی عمر خستگی قیرهای احیاشده باز یافتی در فرش سرک تحت شرایط حرارتی مختلف

احمد سمیر شاهسمندی<sup>۱</sup>، نصیر احمد ابراهیمی<sup>۲</sup>

۱. دکتورای انجنیری ترانسپورتیشن، استاد قراردادی دیپارتمنت انجنیری سیول، پوهنځی انجنیری، پوهنتون کاتب، کابل، افغانستان. (نویسنده مسئول) ایمیل: [as.shahsamandy@kateb.edu.af](mailto:as.shahsamandy@kateb.edu.af)

۲. استاد قراردادی دیپارتمنت انجنیری سیول، پوهنځی انجنیری، پوهنتون کاتب، کابل، افغانستان. ایمیل: [nasiribrahimi530@gmail.com](mailto:nasiribrahimi530@gmail.com)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

آزمایش نوسان دامنه خطی (LAS) به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای ارزیابی خستگی قیر آسفالت شناخته شده است. با این حال، به دلیل ویژگی‌های ویسکوالاستیک قیر، عمر خستگی آن به شدت تحت تأثیر دما قرار دارد. از رو، انتخاب دمای مناسب برای انجام آزمون LAS یکی از چالش‌های اساسی در ارزیابی دقیق عملکرد قیر می‌باشد. در این تحقیق، تأثیر ترکیبی دما و کرنش در دمای میانه بررسی شده است. آزمون‌های LAS در چهار دمای گوناگون بر روی قیرهای احیاشده باز یافتی انجام شده‌اند. روشی برای شبیه‌سازی رفتار خستگی قیرهای احیاشده باز یافتی در دماهای گوناگون با استفاده از داده‌های محدود آزمایشگاهی پیشنهاد گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که پارامترهای LAS، از جمله A و B، با مدول کمپلکس ( $|G^*|$ ) قیرهای باز یافتی احیاشده در دماهای مربوطه همبستگی خطی دارند. به‌منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، پارامترهای آن بر پایه داده‌های آزمایشگاهی در دو دما تنظیم شده‌اند تا عمر خستگی در دماهای دیگر پیش‌بینی گردد. افزون بر این، مدل جدید ارائه شده رویکردی ساده‌تر و دقیق‌تر برای پیش‌بینی عمر خستگی در دماهای گوناگون فراهم می‌سازد. این پیش‌بینی بر پایه معیار شکست تنش حداکثر و سطح آسیب ۳۵٪ استوار است که در استانداردهای آشتو پیشنهاد شده‌اند. مدل یاد شده امکان استفاده گسترده‌تر از روش LAS را در دامنه وسیع‌تری از دماها و سطوح کرنش که برای قیرهای احیاشده باز یافتی در فرش‌های جدید انعطاف‌پذیر کاربرد دارد، فراهم می‌سازد.

#### نوع مقاله:

مقاله تحقیقی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴

تاریخ ارزیابی: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸

#### واژه‌های کلیدی:

قیر احیاشده باز یافتی، معیار شکست خستگی، آزمون نوسان دامنه خطی (LAS)، سطح کرنش، تغییرات دما، پیش‌بینی عمر خستگی

استاد: شاهسمندی، احمد سمیر، و ابراهیمی، نصیر احمد (۱۴۰۴). توسعه مدل پیش‌بینی عمر خستگی قیرهای احیاشده باز یافتی در فرش سرک تحت شرایط حرارتی مختلف. *مجله علمی تحقیقی تکنالوژی و انجنیری کاتب*، ۱ (۱)، ۶۳-۴۵.



## مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از درصد بالای مصالح آسفالت بازیافتی در تولید مخلوط‌های جدید آسفالتی، تأثیرات منفی بر ویژگی‌های گوناگون از جمله مقاومت در برابر ترک خوردگی خستگی بر جای گذاشته است. تحقیق‌ها نشان داده‌اند که افزایش مقدار آسفالت بازیافتی می‌تواند به کاهش عمر خستگی در مخلوط‌های آسفالتی بینجامد [۱، ۲]. به‌طور مشابه، با افزایش درصد آسفالت بازیافتی، مقاومت خستگی کاهش می‌یابد [۳]. برای مقابله با این چالش‌ها و بهبود ویژگی‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیرهای بازیافتی، راهکارهای گوناگون بررسی شده‌اند. یکی از رویکردهای مؤثر و نویدبخش، استفاده از جوان‌سازها می‌باشد که از راه نرم کردن قیرهای کهنه و بهبود خصوصیات رئولوژیکی آن‌ها، به‌ویژه در دماهای میانه، عمل می‌کنند [۴، ۵، ۶]. این فرایند احیا، امکان استفاده از درصد بالاتر آسفالت بازیافتی را فراهم می‌سازد [۷]. به‌طور ویژه، رویکردهای نوآورانه‌ای همچون استفاده از بیوروغن‌های بازیافتی (Bio-Oil) به‌دست‌آمده از روغن‌های آشپزی مصرف‌شده و تایرهای فرسوده (Crumb Rubber) به‌عنوان جوان‌ساز و احیاکننده، همراه با قیرهای بازیافتی، جهت بهبود قابل‌ملاحظه مقاومت خستگی قیرهای کهنه معرفی گردیده‌اند [۸]. روغن ضایعاتی پخت‌وپز (WCO)، که بیشتر از تری‌گلیسریدها و چربی‌های با وزن مولکولی پایین تشکیل شده است [۹]، نقش کلیدی در فرایند جوان‌سازی قیرهای بازیافتی ایفا می‌کند. مقدار افزوده‌شده WCO یکی از عامل‌های اساسی در موفقیت این فرایند ترمیمی به شمار می‌رود. از سوی دیگر، تأثیر چشم‌گیر WCO در کاهش دماهای اختلاط و تراکم مخلوط‌های آسفالتی، پدیده‌ای است که به کاهش ویسکوزیته قیر نسبت داده می‌شود [۱۰]. همچنین، یافته‌های نتایج تحقیق‌های دیگر نشان می‌دهد که WCO می‌تواند به‌گونه هم‌زمان به‌عنوان جوان‌ساز و اصلاح‌کننده عمل کرده و ظرفیت قابل‌ملاحظه‌ای در بهبود مقاومت خستگی قیرهای آسفالتی داشته باشد [۱۱]. از سوی دیگر، پودر لاستیک (CR)، که از تایرهای فرسوده وسایل نقلیه سبک به‌دست می‌آید، به‌عنوان راهکاری مؤثر و کارآمد مطرح گردیده است. این ماده آب‌گریز، با افزایش سفتی و کارایی قیر، به‌ویژه در دماهای بالا، عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد. شواهد تحقیقی توانایی برجسته CR را در بهبود دوام و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در شرایط دماهای بالا به‌خوبی به نمایش گذاشته‌اند [۱۲]. در پایان، استفاده هم‌زمان از CR و قیر بازیافتی در فرش‌های آسفالتی به‌عنوان رویکرد پایدار و مؤثر پیشنهاد می‌گردد؛ رویکردی که نه تنها سبب بهبود خواص فیزیکی و مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود، بلکه در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز نقش ارزنده‌ای ایفا می‌کند [۱۳].

ویژگی‌های خستگی فرش‌های آسفالتی تحت تأثیر عامل‌هایی چون گونه مصالح مورد استفاده در مخلوط آسفالتی، شدت و حجم ترافیک، فناوری اجرا و شرایط اقلیمی قرار دارد. مطالعات نشان داده‌اند که خواص خستگی مخلوط‌های آسفالتی به‌صورت مستقیم با رفتار خستگی قیر مرتبط می‌باشد [۱۴]. به‌همین دلیل، ایجاد یک چارچوب دقیق برای ارزیابی عمر خستگی قیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رنومتر برشی دینامیکی (DSR) یکی از ابزارهای رایج برای بررسی رفتار خستگی قیر می‌باشد که به‌طور معمول از پارامتر  $|G^*| \sin \delta$  برای این منظور استفاده می‌گردد. با آن‌هم، این شاخص توانایی لازم برای

ارزیابی دقیق مقاومت خستگی قیر و پیش‌بینی عملکرد آن در برابر ترک‌خوردگی و درزهای فرش راه را ندارد [۱۵]. آزمایش Time Sweep به‌عنوان روشی برای مدل‌سازی آسیب در قیر تحت بارگذاری‌های مکرر پیشنهاد گردیده است، اما به‌دلیل زمان‌گیر بودن، استفاده گسترده از آن با محدودیت‌هایی مواجه است [۱۵، ۱۶]. به‌منظور کاهش زمان آزمایش و افزایش دقت در پیش‌بینی عمر خستگی، آزمایش نوسان دامنه خطی (LAS) همراه با مدل آسیب پیوسته ویسکوالاستیک ساده‌شده (S-VECD) معرفی شده است. این روش، با استفاده از آزمایش‌های نوسانی در فرکانس‌ها و دامنه‌های گوناگون (AASHTO, 2014)، قادر است عمر خستگی قیر را با دقت بالا و در مدت زمان کوتاه‌تر تخمین زند. در مدل LAS، دو ضریب A و B، همراه با کرنش اعمال‌شده به‌عنوان متغیر ورودی در محاسبه عمر خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷، ۱۰].

آزمون LAS در ابتدا با اعمال کرنش افزایشی از ۱٪ تا ۲۰٪ انجام می‌گردید، اما در مراحل بعدی برای بررسی دقیق‌تر رفتار شکست قیر، این دامنه تا ۳۰٪ گسترش یافت [۱۸]. به‌دلیل محدودیت‌های موجود در برخی دستگاه‌های DSR، روشی با افزایش پیوسته کرنش در هر دور آزمایش به‌منظور بهبود کنترل بارگذاری پیشنهاد شده است [۱۹]. این رویکرد، همراه با استفاده از مدل توانی، زمینه را برای پیش‌بینی عمر خستگی قیر در سطوح گوناگون کرنش فراهم می‌سازد و نشان‌دهنده اهمیت ویژه ویژگی‌های خستگی قیر در عملکرد واقعی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد [۲۰]. در راهنماهای استاندارد، به‌طور معمول انجام آزمایش در سطوح کرنش ۲.۵٪ و ۵.۰٪ پیشنهاد می‌شود، به‌ویژه برای قیرهای پیرشده، چرا که در این مواد کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در عمر خستگی در کرنش‌های بالا مشاهده می‌گردد [۲۱، ۲۲]. با آن‌هم، یکی از چالش‌های عمده در آزمون LAS، عدم توافق بر سر دمای مناسب آزمایش می‌باشد. در حالی که استاندارد AASHTO TP101 دمای میانه روستازی را بر پایه درجه عملکرد پیشنهاد می‌کند، اما دامنه مشخصی را برای آن تعیین نمی‌کند [۲۳]. برخی مطالعات، دماهایی میان ۱۸ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد را بررسی کرده‌اند، با این‌حال منطق انتخاب این دماها در بسیاری موارد واضح نیست.

### ۱. پیشینه تحقیق

برخی تحقیقگران پیشنهاد کرده‌اند که دمای آزمون باید بر پایه مقدار مدول کمپلکس در محدوده ویسکوالاستیک خطی ( $|G^*|_{LVE}$ ) در فرکانس ۱۰ هرتز، میان ۱۲ تا ۶۰ مگاپاسکال انتخاب گردد [۲۴]. در برابر، شماری از تحقیقگران هشدار داده‌اند که انتخاب نامناسب دما می‌تواند به ارزیابی نادرست عمر خستگی بینجامد؛ چنان‌که دماهای بالاتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد احتمال بروز روان‌شدگی پلاستیکی را افزایش داده و دماهای پایین‌تر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند سبب جداسازی قیر از صفحات موازی رتومتر گردد. در نتیجه، دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای قیرهای بدون مواد اصلاح‌کننده و ۱۵ درجه سانتی‌گراد برای قیرهای اصلاح‌شده با پلیمرهای قوی به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر ترک‌خوردگی چسبندگی توصیه شده است [۲۵].

در کنار انتخاب دمای مناسب، تعیین معیار شکست نیز نقش حیاتی در ارزیابی مقاومت خستگی قیر ایفا می‌کند. هر چند در روش LAS به‌طور معمول از حداکثر تنش برشی به‌عنوان معیار شکست استفاده

می‌شود، اما معیارهای بدیل همچون کاهش ۳۵٪ در پارامتر  $G^*|\sin\delta$ ، انرژی شبه کرنش (PSE)، نسبت انرژی تلف شده و نرخ رشد ترک نیز در مطالعات گوناگون پیشنهاد گردیده‌اند [۲۶، ۱۹، ۲۷]. در این میان، مدل S-VECD، انرژی شبه کرنش را به‌عنوان معیاری قابل اعتماد برای شکست در نظر گرفته و همبستگی قوی و پایداری میان نرخ آزادسازی میانگین انرژی شبه کرنش  $PSE(G^*R)$  و عمر خستگی ( $N_f$ ) در شرایط گوناگون دما و بارگذاری نشان داده است [۲۴، ۲۸]. مدل‌های سنتی خستگی، به‌طور عام رابطه‌ای میان کرنش یا تنش و سختی برقرار می‌کنند. در این مدل‌ها، افزودن پارامتر سختی می‌تواند دقت پیش‌بینی را، به‌ویژه در شرایط پیرشدگی، افزایش دهد؛ زیرا پیرشدگی همواره به کاهش یکنواخت در عمر خستگی نمی‌انجامد و می‌تواند سطح کرنش را در یک تنش معین تغییر دهد [۲۹، ۳۰]. در سال‌های اخیر، مدل  $G^*R-N_f$  و رویکردهای مبتنی بر مدول، نتایج امیدوارکننده‌ای در پیش‌بینی اثرهای دما و پیرشدگی ارائه کرده‌اند [۱۰]. بنابراین، توسعه مدل‌های دقیق برای پیش‌بینی عمر خستگی قیرهای احیاشده باز یافتی با استفاده از WCO و CR در مقایسه با قیرهای بدون اصلاح، در دماهای گوناگون، امری ضروری به شمار می‌رود.

مرور بر تحقیق‌های پیشین نشان می‌دهد که در درک اثرهای ترکیبی دما و کرنش در محدوده دماهای میانه، چالش‌هایی همچنان باقی است. از جهت، این تحقیق با هدف رفع این محدودیت‌ها، به ارزیابی عمر خستگی قیرهای احیاشده باز یافتی با استفاده از آزمایش LAS می‌پردازد. اهداف اساسی این تحقیق به شرح زیر است.

## ۲. اهداف اساسی این تحقیق

- ۲-۱. ارزیابی همبستگی میان پارامترهای مدل خستگی قیرهای باز یافتی احیاشده با دماهای گوناگون آزمایش LAS و بررسی ارتباط آن با مدول کمپلکس ( $G^*$ ) قیرهای احیاشده.
- ۲-۲. بررسی و تأیید قابلیت اعتماد مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی عمر خستگی قیرهای باز یافتی احیاشده در دماهای متفاوت.

## ۳. روش تحقیق و مطالعات آزمایشگاهی

### ۳-۱. مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل یک نوع قیر اساس است که به‌عنوان (VB) یاد شده است. آسفالت باز یافتی توسط یک پیمانکار محلی از یک راه تخریب شده جمع‌آوری گردیده است. مشخصات قیر اساس و قیر استخراج شده از آسفالت باز یافتی در جدول ۱ ارائه گردیده است. افزون‌براین، یک نوع پودر لاستیک (CR) با اندازه ۴۰ مش، به‌دست‌آمده از تایرهای وسایل نقلیه سبک نیز به کار رفته است که ترکیب شیمیایی CR در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین یک نوع روغن ضایعات آشپزخانه (WCO) از رستوران‌ها جمع‌آوری گردیده و به‌عنوان جوان‌ساز به کار رفته است. اجزای اصلی WCO در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های قیر اساس و قیر بازیافتی

حالت‌های پیری	آزمایش قیر	قیر اساس (VB)#۷۰	قیر بازیافتی	استاندارد
Unaged	Penetration (۰.۱ mm)	۷۴	۲۱.۷	ASTM D۵
	Softening Point (°C)	۴۸.۵	۶۱.۱	ASTM D۲۶
	Ductility (mm) at ۲۵ °C	>۱۰۰	—	ASTM D۱۱۳
	Viscosity at ۱۳۵ °C (Pa.s)	۰.۳۲۱	۱.۹۴	ASTM D۴۴۰۲
	Viscosity at ۱۶۵ °C (Pa.s)	۰.۱۰۶	۰.۴۵۵	ASTM D۴۴۰۲
	Performance grade	۷۲.۹-۲۲	۸۵.۱-۲۲	AASHTO R۲۸
	G*/sin(δ) at ۶۴ °C	۲.۶۷۲	—	ASTM D۶۶۴۸
	% non-recoverable strain at ۰.۱ Kpa (MSCR)	۹۵.۹	—	ASTM D۷۴۰۵
RTFO	G*/sin(δ) at ۶۴ °C	۵۷۷۱	—	—
	% non-recoverable strain at ۰.۱ Kpa (MSCR)	۸۸.۲	—	—
PAV	G* sin(δ) at ۲۵ °C	۴۰۱۳	—	—

جدول ۲- مشخصات پودر لاستیک (CR)

تحلیل دانه‌بندی		ویژگی‌های فیزیکی		ترکیب شیمیایی	
اندازه غربال (mm)	درصد عبور (%)	ویژگی فیزیکی	مقدار	ویژگی شیمیایی	مقدار
۱.۱۸	۹۹.۸	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	۳۷۱	Ash content (%)	۷.۵
۰.۶	۹۷	Moisture content (%)	۰.۵۴	Acetone extract (%)	۷.۲
۰.۳	۹۴.۲	Break strength (MPa)	۹.۵	Rubber hydrocarbon content (%)	۵۴
۰.۱۵	۲۰.۶	Elongation at Break (%)	۴۲۰	Carbon black content (%)	۲۹.۳
۰.۰۷۵	۵.۲	—	—	—	—

جدول ۳- خصوصیات و محتوای اسیدهای چرب روغن پخت‌وپز ضایعاتی (WCO)

ترکیب اسیدهای چرب	مقدار	ترکیب فیزیکی و شیمیایی	مقدار
Tetradecanoic acid (%)	۱.۶۶	Acid value (mg(KOH).g <sup>-1</sup> )	۰.۳
۹-Hexadecenoic acid (%)	۰.۵۸	Flashpoint (°C)	۳۰.۵
Hexadecanoic acid (%)	۱۵.۶۶	Density (g.cm <sup>-3</sup> )	۰.۹
۹-Octadecenoic acid (%)	۴۶.۳۵	—	—
Ethyl oleate (%)	۳۵.۷۵	—	—

قیر باز یافتی با استفاده از حلال تری کلرواتیلن طبق ASTM D2172/D2772M-17 استخراج گردیده و سپس توسط دستگاه تبخیرکننده چرخشی مطابق با استاندارد ASTM D5404/D5404M-21، قیر یادشده بازیابی شده است. قیرهای VB ابتدا در دمای  $5 \pm 165$  درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت حرارت داده شدند تا به حالت روان درآمده و برای تهیه مخلوط آماده شوند. سپس، مقدار ۱۵٪ CR به نسبت وزنی

قیر اساس، در دمای ۱۷۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه به قیر اساس مخلوط شد. پس از آن، ۵۰٪ قیر بازیافتی به نسبت وزنی قیر اساس در همان دما و به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه با استفاده از میکسر برش بالا به مخلوط افزوده گردید تا قیر بازیافتی احیاشده با پودر لاستیک تولید شود. برای تولید قیر بازیافتی احیاشده با WCO، نخست ۵٪ WCO به نسبت وزنی قیر RAP، در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه و با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه با قیر بازیافتی مخلوط شد. سپس قیر اساس در همان دما و با سرعت ۴۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه به مخلوط اضافه گردید. در نمونه مقایسه‌ای بدون جوان‌ساز و احیاگر، ۵۰٪ قیر بازیافتی به نسبت وزنی قیر اساس، در دمای ۱۷۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه مخلوط شد. روش‌های اختلاط برای تهیه قیرهای احیاشده بازیافتی و قیر اساس در جدول ۴ نشان داده شده‌اند.

جدول ۴- ترکیب‌های قیر بازیافتی احیاشده و اختصارات استفاده‌شده در این تحقیق

نمونه	قیر (%) RAP	جوان‌سازها	ترکیب‌های قیر RAP احیاشده
VB	—	—	قیر اساس درجه نفوذ ۷۰ (VB)
RVB	۵۰	—	VB+۵۰RAP
CRVB	۵۰	Crumb Rubber (CR) ٪۱۵	VB+۵۰RAP+۱۵CR
WRVB	۵۰	Waste Cooking Oil (WCO) ٪۵	VB+۵۰RAP+۵WCO

همه قیرهای اساس، بازیافتی احیاشده و ترکیب‌های بازیافتی با روش RTFO در دمای ۱۶۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۸۵ دقیقه برای شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه‌مدت [۳۱] و برای شبیه‌سازی پیرشدگی بلندمدت، از دستگاه PAV در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ ساعت تحت فشار هوای ۱.۲ مگاپاسکال مطابق با AASHTO R28 استفاده شد [۳۲]. آزمون LAS مطابق استاندارد AASHTO [33] TP101-14 با DSR و صفحات موازی ۸ میلی‌متری و فاصله ۲ میلی‌متری انجام شد. آزمون BBR برای بررسی عملکرد در دماهای پایین و MSCR برای مقایسه مقادیر  $J_{nr3.2}$  (kPa<sup>-1</sup>) میان قیرهای اساس و بازیافتی احیاشده انجام گردید. نتایج MSCR نشان‌دهنده تفاوت عملکرد نهایی بود، حتی با درجه عملکرد (PG) هدف یکسان در همه آن‌ها. PG قیرهای بازیافتی احیاشده، بر پایه نتایج به‌دست‌آمده از دماهای بالا و پایین محاسبه شده و برای انتخاب دمای مناسب در آزمون LAS مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۵ خلاصه‌ای از نتایج را برای ترکیب‌های گوناگون تهیه‌شده با قیر اساس ارائه می‌دهد.

جدول ۵ - تعیین دمای میانه آزمون برای قیرهای اساس و بازیافتی احیاشده بر پایه درجه عملکردی (PG)

قیر های اساس و ترکیبی	آزمون MSCR @ ۶۴°C, (Jnr۳.۲(Kpa <sup>-1</sup> ))		درجه عملکرد واقعی در دمای بالا (°C)		دمای پایین در ۱۲°C -		میان دمای عملکرد جمع ۴ (°C)	دمای آزمون(°C)
	بدون پیرشدگی	پس از RTFO	بدون پیرشدگی	پس از RTFO	m- مقدار- Value	سختی (MPa)		
VB	۱.۱۸	۱.۱۲	۷۲.۹	۷۱.۱	۰.۳۳۹	۱۶۰	۳۰	۲۰, ۲۵, ۳۰, ۳۵
RVB	۰.۱۹۹	۰.۱۴۲۲۵	۷۶.۸	۷۶.۵	۰.۳۰۱	۲۳۱.۵	۳۰	۲۰, ۲۵, ۳۰, ۳۵
CRVB	۰.۳۲۹۶	۰.۱۹۴۱۵	۸۵.۹	۸۵.۷	۰.۳۰۲	۲۱۸	۳۵	۲۵, ۳۰, ۳۵, ۴۰
WRVB	۱.۲۴۹۸	۰.۷۴۹۳	۷۵.۲	۷۶.۳	۰.۳۰۴	۱۹۳.۵	۳۰	۲۰, ۲۵, ۳۰, ۳۵

در جدول ۵، بر پایه سیستم سوپریف، دمای میانی سنتی برای قیرهای VB، RVB و WRVB برابر با ۳۰ درجه سانتی‌گراد و برای قیر CRVB برابر با ۳۵ درجه سانتی‌گراد تعیین گردیده است. روش کنونی آزمون LAS پیشنهاد می‌کند که آزمایش‌ها در دمای میانی تعیین شده بر پایه PG قیر انجام شوند. با این حال، چنین رویکردی ممکن است دقت پیش‌بینی عمر خستگی قیرهای احیاشده بازبافتی را محدود سازد. به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، آزمایش‌های LAS برای هرگونه قیر در یک دمای بالاتر و دو دمای پایین‌تر بر پایه میانگین دمای PG به علاوه ۴ درجه سانتی‌گراد با دو تکرار انجام گرفته است.

### ۳-۲. آزمون دامنه خطی نوسانی (LAS)

همه قیرهای احیاشده بازبافتی و نمونه‌های کنترلی مطابق روش AASHTO TP 101 در دماهای تعیین شده در جدول ۵ با آزمون LAS بررسی شدند. نمونه‌ها طبق [34] AASHTO T315 و با صفحه موازی ۸ میلی‌متری و فاصله ۲ میلی‌متری آماده‌سازی شدند. نخست خصوصیات رئولوژیکی با آزمون فرکانس تعیین شد، سپس بارگذاری نوسانی با افزایش خطی دامنه کرنش (از ۱٪ تا ۳۰٪) در فرکانس ثابت ۱۰ هرتز برای تحلیل خستگی انجام شد. معیار خرابی، کاهش ۳۵٪ در مقدار  $|G^*| \sin \delta$  طبق (AASHTO TP 101-12) یا رسیدن به تنش حد اکثر طبق (AASHTO TP 101-14) بود. عمر خستگی ( $N_f$ ) با رابطه (۱) و پارامترهای A و B برای هرگونه ترکیب قیر به صورت جداگانه تعیین گردید و  $\gamma_{max}$  معرف بیشترین سطح کرنش می‌باشد. برای هر ترکیب قیر حداقل دو تکرار انجام شد تا میانگین مقادیر A و B جهت ارزیابی مدل به دست آید.

$$N_f = A(\gamma_{max})^{-B} \quad (1)$$

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi I_d \gamma_0^2 (|G^*| \sin \delta_{i-1} - |G^*| \sin \delta_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2)$$

$$|G^*| \sin \delta = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (3)$$

$$\log(C_0 - |G^*| \sin \delta) = \log(C_1) + C_2 \log D \quad (4)$$

$$D_f = (0.35) \left( \frac{C_0}{C_1} \right) \left( \frac{1}{C_2} \right) \quad (5)$$

$$A_{35} = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi I_d C_1 C_2)^\alpha} \quad (6)$$

$$B = 2\alpha \quad (7)$$

بر پایه (AASHTO TP101-14)، میزان آسیب در نمونه با استفاده از معادلات زیر می‌باشد:

$$D(t) \cong \sum_{i=1}^N [\pi \gamma_0^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (۸)$$

$$C(t) = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (۹)$$

$$D_f = \left( \frac{C_0 - C_{\text{Peak Stress}}}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (۱۰)$$

$$A = \frac{f \cdot (D_f)^k}{k \cdot (\pi C_1 C_2)^\alpha} \quad (۱۱)$$

روش انرژی شبه کرنش (PSE) به منظور مقایسه مدل PSE S-VECD با روش S-VECD استفاده شده در استاندارد AASHTO TP101-14، جمع بندی های مربوطه از معادلات (۱۲) تا (۱۶) ارائه گردیده است.

$$S(t) \cong \sum_{i=1}^N \left[ \frac{DMR}{2} (\gamma_p^R)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (۱۲)$$

$$\gamma_p^R = \frac{1}{G_R} \cdot (\gamma_0 \cdot |G^*|_{LVE}) \quad (۱۳)$$

$$DMR = \frac{|G^*|_{\text{fingerprint}}}{|G^*|_{LVE}} \quad (۱۴)$$

$$A = \frac{f \cdot (S_f)^k \cdot 2^\alpha}{k \cdot (C_1 C_2)^\alpha} \quad (۱۵)$$

$$N_f = A \left( \frac{1}{G_R} \cdot (\gamma_{max} \cdot |G^*|_{LVE}) \right)^{-B} \quad (۱۶)$$

معیار خرابی در هردو روش، کاهش در سختی شبه یا سختی اولیه در لحظه تنش برشی بود. در این تحقیق،  $\alpha$  برابر با  $1+1/m$  و نیز  $\alpha$  برابر با  $1/m$  (بر اساس شیب منحنی ویسکوالاستیک خطی  $(|G^*|_{LVE})$ ) و  $k$  با رابطه  $k = 1 + (1 - C_2)\alpha$  تعریف شد.

### ۳-۳. مدل توسعه یافته پیش بینی عمر خستگی برای قیرهای بازیافتی احیاء شده با در نظر گرفتن تأثیر دما

به منظور توسعه یک مدل پیش بینی عمر خستگی مستقل از دما برای قیر بازیافتی احیاء شده، از این یک مدل اصلاح شده مبتنی بر مدول کمپلکس استفاده گردید که حدود ۴۰ سال پیش برای مخلوط های آسفالتی پیشنهاد شده بود. این مدل، رابطه ای میان عمر خستگی و مدول ایجاد می کند و به گونه ای طراحی شده است که از این تأثیرهای پیرشدگی و دما مستقل باشد. این روش پیش تر نیز توسط نویسندگان در مقاله های علمی گذشته مورد استفاده قرار گرفته و پیشنهاد شده است [۳۶، ۳۵].

بر پایه این رویکرد، یک مدل جدید معرفی شده که دقت پیش بینی عمر خستگی قیرهای احیاء شده بازیافتی را در دماهای گوناگون بهبود می بخشد. این مدل در رابطه (۱۷) نشان داده شده است:

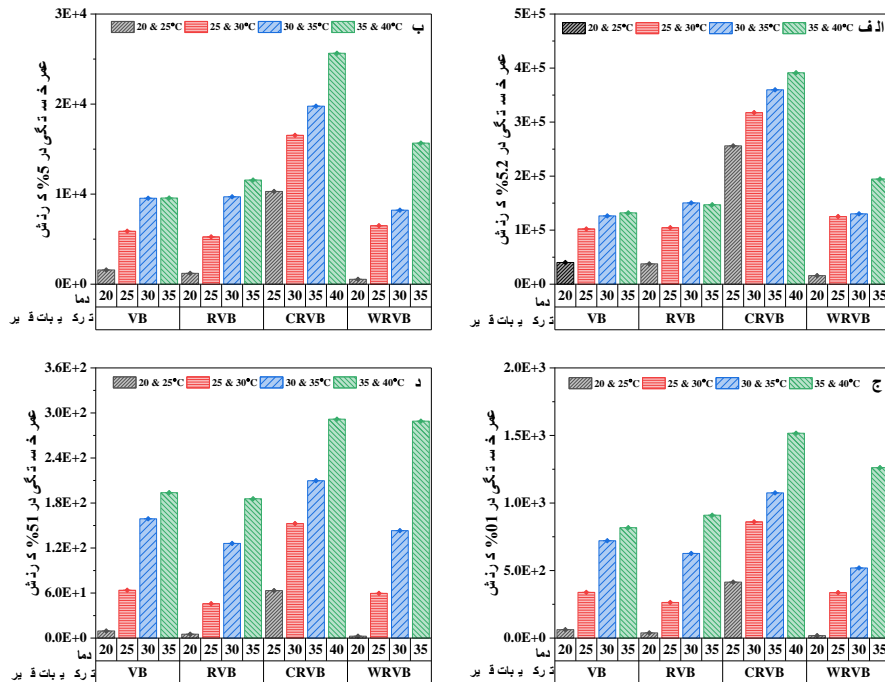
$$N_{f_{Rej.RAP}} = A_{Rej.RAP} \gamma_{Rej.RAP}^B |G^*|_{LVE}^C \quad (۱۷)$$

در این رابطه، ضرایب  $A_{\{Rej.RAP\}}$ ،  $B_{\{Rej.RAP\}}$  و  $C$  پارامترهای انطباقی هستند که به دما وابسته نبوده و تنها متغیر موجود، مدول کمپلکس  $(|G^*|_{LVE})$  می باشد، که در صورت تعیین آن در هر دما، می توان عمر خستگی قیرهای بازیافتی احیاء شده را با استفاده از نتایج آزمون LAS در دو دمای مرجع پیش بینی کرد.

## ۴. بحث و بررسی نتایج

## ۴\_۱. تحلیل مقایسه‌ای عمر خستگی در سطوح گوناگون تنش و دماهای متعدد

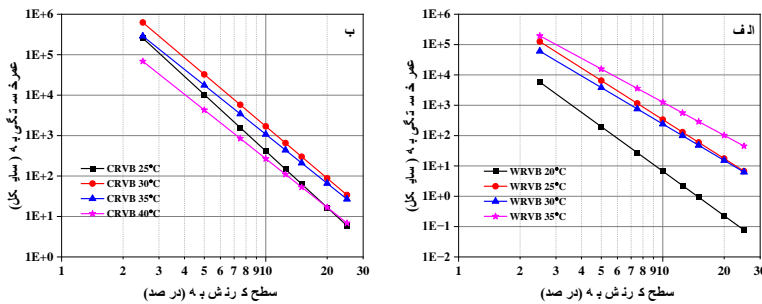
در این بخش، نتایج آزمون LAS برای چهار نوع قیر اساس و قیرهای باز یافتی احیاشده در چهار دما مقایسه گردیده است. شکل ۱ تغییرات عمر خستگی در سطوح کرنش ۲.۵٪، ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ را نشان می‌دهد. در کرنش ۲.۵٪ (شکل ۱-الف)، عمر خستگی به‌طور کلی با افزایش دما افزایش یافت، به‌ویژه پس از ۳۰ درجه سانتی‌گراد. در کرنش ۵٪ (شکل ۱-ب)، عمر خستگی اغلب با افزایش دما کاهش یافته، اما در سطوح کرنش بالاتر (شکل‌های ۱-ج و ۱-د)، دوباره با افزایش دما افزایش یافته است. این روند شاید به دلیل نرم‌تر شدن قیرها در دماهای بالاتر است، که به افزایش مقاومت در برابر ایجاد ترک‌های خستگی می‌انجامد.



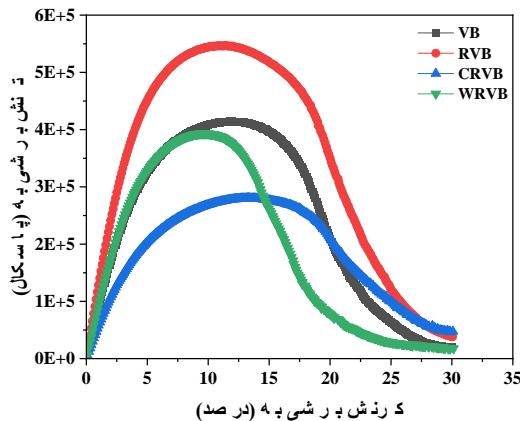
شکل ۱. عمر خستگی در سطوح گوناگون کرنش در دماهای متفاوت با استفاده از مدل S-VECD : (الف) سطح

کرنش ۲.۵٪؛ (ب) سطح کرنش ۵٪؛ (ج) سطح کرنش ۱۰٪؛ (د) سطح کرنش ۱۵٪

شکل ۲ تغییرات عمر خستگی را با افزایش دمای آزمون LAS برای دو نوع قیر باز یافتی احیاشده، یعنی CRVB و WRVB نشان می‌دهد. نمودارها در مقیاس لگاریتمی، تغییرات قابل توجهی را در شیب خطوط عمر خستگی و همچنین چرخش منحنی در جهت مخالف عقربه‌های ساعت به دلیل افزایش دما نمایش می‌دهند. تفاوت‌های مقادیر  $N_f$  در سطوح کرنش بالا نسبت به سطوح کرنش پایین، بیشتر و محسوس‌تر بود. این نتایج، بر اهمیت انجام آزمون LAS در سطوح کرنش بالا برای ارزیابی دقیق‌تر عمر خستگی قیرهای احیاشده باز یافتی تأکید دارد.



شکل ۲- عمر خستگی در دماهای گوناگون با سطوح کرنش متفاوت: (الف) WRVB؛ (ب) CRVB  
 شکل ۳ منحنی‌های تنش-کرنش برشی حاصل از آزمون LAS را برای قیرهای اساس و بازیافتی احیاشده نشان می‌دهد. این منحنی‌ها وابستگی به کرنش، نقاط شکست چسبندگی و آغاز آسیب در قیرها تحت بارگذاری برشی را به خوبی برجسته می‌سازند. اوج‌های تیزتر در منحنی‌ها نشان‌دهنده وابستگی بیشتر به کرنش هستند، در حالی که اوج‌های پهن‌تر یا گسترده‌تر وابستگی کمتری را نشان می‌دهند. کاهش تنش برشی پس از رسیدن به اوج، نشان‌دهنده آغاز آسیب به ساختار قیر است، و مقدار کرنش در این نقطه به‌عنوان کرنش شکست در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، افزودن CR باعث کاهش تنش اوج در قیر اساس گردید، اما در عین حال، کرنش شکست را افزایش داد؛ این پدیده نشان می‌دهد که قیرهای نرم‌تر مقاومت کمتری دارند، اما ظرفیت تغییر شکل بیشتری از خود نشان می‌دهند.

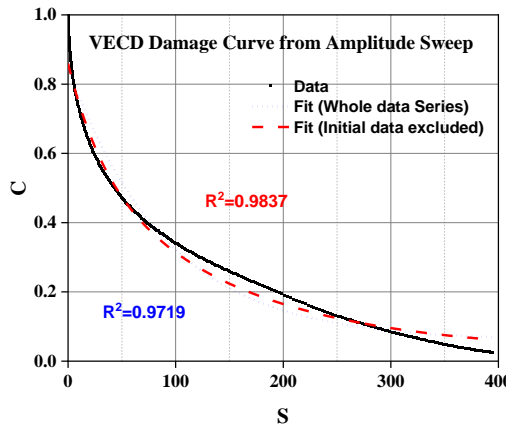


شکل ۳- منحنی‌های تنش-کرنش برشی از این آزمایش LAS در قیرهای اساس و بازیافتی احیاشده

#### ۴\_۲. تأثیر دما بر پارامترهای آسیب

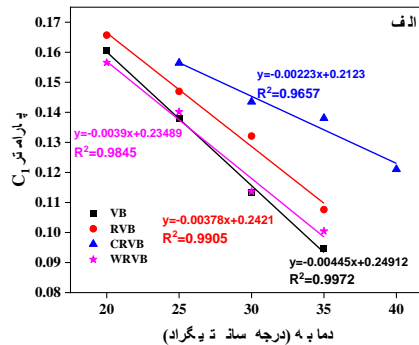
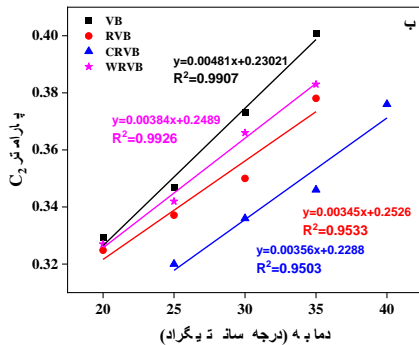
برای بررسی تأثیر دما بر پارامترهای خستگی  $C_1$ ،  $C_2$ ، A و B، تحلیل همبستگی در دماهای گوناگون آزمون LAS برای قیرهای اساس و بازیافتی احیاشده انجام گردید. این تحلیل میزان حساسیت پارامترهای

آسیب به تغییرات دما را ارزیابی نمود. مقادیر  $C_1$  و  $C_2$  از منحنی‌های آسیب در دماهای منتخب با استفاده از عامل‌های تغییر دما-زمان پیش‌بینی شده‌اند. با این حال، انتقال منحنی‌های آسیب در شرایط غیرخطی فرایندی پیچیده بوده و نیاز به تحلیل دقیق‌تری دارد. شکل ۴ نمونه‌ای از منحنی‌های آسیب C-S برای قیر CRVB را نشان می‌دهد.

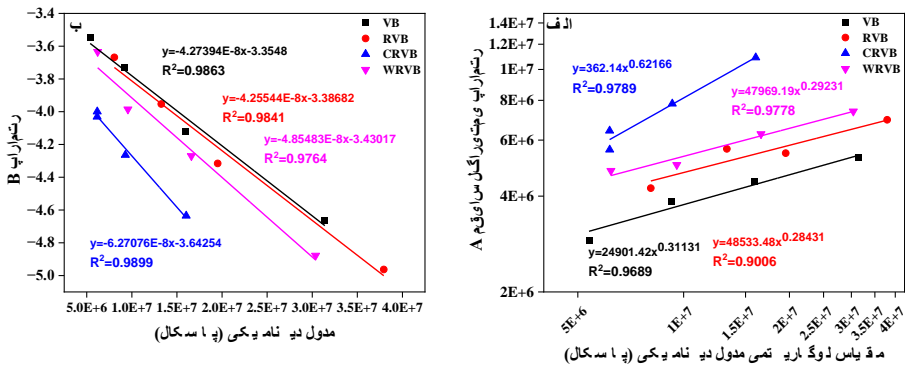


شکل ۴ - منحنی آسیب قیر باز یافتی احیاشده CRVB

کمتر از ۴.۵٪ از این داده‌های نخستین خارج از منحنی C-S قرار گرفته و تطابق خوبی با منحنی نشان دادند، که بیانگر دقت بالای مدل است. شکل ۵ نیز همبستگی میان پارامترهای  $C_1$  و  $C_2$  با دماهای گوناگون آزمون LAS را برای همه قیرهای اساس و باز یافتی احیاشده نشان می‌دهد. رابطه خطی میان  $C_1$  و  $C_2$  با دما مشاهده شد که مقادیر بالای  $R^2$  را ارائه می‌دهد و تعامل قوی میان این پارامترها را تأیید می‌کند. در مدل Pseudo-Strain، برای برازش پارامترهای  $C_1$  و  $C_2$  در منحنی C-S از تحلیل رگرسیون خطی استفاده گردید و پارامترهای مدل خستگی A و B از منحنی آسیب پیش‌بینی شده به دست آمد. این همبستگی نشان می‌دهد که A نیز به دما وابسته است. از آنجا که مدول کمپلکس |G| به دما نیز وابسته است و ویژگی‌های مواد را تحت تأثیر قرار می‌دهد، ارتباط میان A و |G| می‌تواند به مدلی دقیق‌تر برای پیش‌بینی عمر خستگی منجر شود. این رویکرد با مدل تجربی سنتی خستگی که بر تأثیرهای دما و پیری تأکید دارد، همسو می‌باشد [۳۶، ۳۷، ۳۸].



شکل ۵ - همبستگی میان پارامترهای  $C_1$  و  $C_2$  با دما برای قیرهای بازیافتی احیاشده: (الف)  $C_1$ ؛ (ب)  $C_2$  همبستگی میان پارامترهای  $A$  و  $B$  با  $|G|$  به منظور ارزیابی دقت مدل بررسی شد. آزمون LAS در فرکانس ثابت ۱۰ هرتز انجام شده و  $|G|$  از بخش فرکانسی به دست آمد. شکل ۶ رابطه  $A$  و  $B$  با  $|G|$  را برای قیر اساس و قیرهای بازیافتی احیاشده نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که  $A$  با  $|G|$  یک رابطه خطی دارد، در حالی که  $B$  با  $|G|$  رابطه خطی دارد. با افزایش مقدار  $|G|$ ، مقدار  $A$  افزایش یافته و خطوط خستگی به سمت بالا جابجا می‌شوند. مقدار  $B$  کاهش یافته و خطوط خستگی خلاف جهت عقربه ساعت می‌چرخند. این الگوها اساس را برای درک بهتر رفتار خستگی قیر فراهم می‌سازند.



شکل ۶ - همبستگی میان پارامترهای  $A$  و  $B$  با  $|G^*|$  در دماهای گوناگون برای قیرهای احیاشده بازیافتی ضریب تعیین ( $R^2$ ) میان پارامترهای  $A$  و  $B$  با  $|G|$  در قیرهای بازیافتی احیاشده، در بیشتر موارد بیشتر از ۰.۹۶۸۹ به دست آمده، به جز نمونه RVB که حدود ۰.۹۰۰۶ بوده است. این نتایج بیانگر همبستگی قوی میان پارامترهای مدل خستگی و  $|G|$  می‌باشد. با توجه به این روابط ساده و قوی، می‌توان با استفاده از  $|G^*|$ ، مدلی مستقل از دما برای پیش‌بینی عمر خستگی قیرهای بازیافتی احیاشده توسعه داد.

### ۴-۳. توسعه و بهبود دقت مدل پیش‌بینی عمر خستگی در دماهای گوناگون

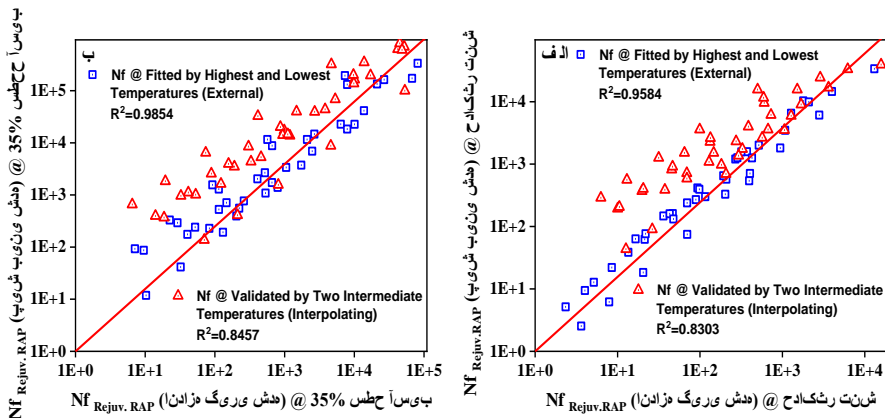
پارامترهای مدل عمر خستگی شامل  $\{A_{[Rej.RAP]}\}$ ،  $\{B_{[Rej.RAP]}\}$  و  $C$  برای قیرهای اساس و بازیافتی احیاشده از این نتایج آزمون LAS در دو دمای حدی استخراج گردید. این پارامترها همراه با  $|G^*|$  در دماهای میانه برای پیش‌بینی عمر خستگی استفاده شده‌اند. مقایسه  $\{Nf_{[Rej.RAP]}\}$  پیش‌بینی شده با نتایج واقعی، دقت مدل را تأیید کرده است. در این تحلیل، دو معیار برای تعیین نقطه شکست استفاده شد: (۱) نقطه حداکثر تنش و (۲) کاهش ۳۵٪ در منحنی آسیب. مدل پیشنهادی با استفاده از پارامترهای  $A$  و  $B$  در سطوح تغییر شکل از ۲.۵٪ تا ۱۵٪، و پارامتر ثابت  $C$  که بر پایه مطالعات پیشین برابر با (۱-) تعیین گردید، طبق جدول ۶ توسعه یافته است. نتایج نشان‌دهنده آن است که این مدل دقت بالایی را برای همه انواع قیرها و در همه سطوح تغییر شکل ارائه می‌دهد، اگرچه هنگام استفاده از معیار حداکثر تنش، کاهش جزئی در مقادیر  $R^2$  مشاهده شده است. به طور کلی، استفاده از مقدار ثابت  $C = -1.0$  برای بهبود پیش‌بینی عمر خستگی قیرهای احیاشده بازیافتی در دماهای گوناگون توصیه می‌شود.

جدول ۶ - خلاصه‌ای از مقادیر  $A_{[Rej.RAP]}$ ،  $B_{[Rej.RAP]}$ ،  $C$  و  $R^2$  برای هر قیر باز یافتی احیاشده در سطوح گوناگون کرنش برای عمر خستگی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده بر پایه (AASHTO TP101-12)

قیرها	معیار شکست تنش حد اکثر				معیار شکست بر مبنای ۳۵٪ آسیب			
	$A_{Rej.RAP}$	$B_{Rej.RAP}$	$C$	$R^2$	$A_{Rej.RAP}$	$B_{Rej.RAP}$	$C$	$R^2$
VB	$3.85E+06$	$-3.2275$	-1	0.9999	$1.61E+09$	$-5.2275$	-1	1.0000
RVB	$4.24E+06$	$-3.6681$	-1	1.0000	$2.75E+09$	$-5.9533$	-1	0.9999
CRVB	$6.42E+06$	$-4.0311$	-1	0.9995	$8.03E+09$	$-6.0306$	-1	1.0000
WRVB	$5.02E+06$	$-3.9851$	-1	0.9998	$1.17E+09$	$-5.9851$	-1	0.9999

& 14)

در شکل ۷، همبستگی میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده  $Nf_{[Rej.RAP]}$  برای قیرهای اساس و باز یافتی احیاشده در دماهای گوناگون با دو معیار شکست نشان داده شده است. نقاط داده مربوط به پایین‌ترین و بالاترین دماها با مربع‌های آبی، و نتایج حاصل از دماهای میانه با مثلث‌های سرخ نمایش یافته‌اند. مدل پیشنهادی برای هر دو معیار شکست دقت بالایی دارد. اما معیار کاهش ۳۵٪ آسیب برآزش بهتری نسبت به معیار تنش حداکثر دارد که از مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ ) نیز مشخص است.



شکل ۷ - مقایسه همبستگی میان عمر خستگی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده در دماهای گوناگون بر پایه دو معیار شکست برای قیرهای اساس و باز یافتی احیاشده: (الف) حداکثر تنش؛ (ب) سطح آسیب ۳۵٪ پارامترهای مدل جدید پیش‌بینی عمر خستگی قیرهای باز یافتی احیاشده مستقل از دما می‌باشند. این مدل با استفاده از داده‌های  $|G|$  (در فرکانس ۱۰ هرتز) از نتایج آزمایش LAS، عمر خستگی را در دماها و سطوح کرنش گوناگون پیش‌بینی می‌کند. پیشنهاد می‌شود آزمایش LAS در دو دمای متفاوت انجام شود تا پارامترهای  $A_{Rej.RAP}$ ،  $B_{Rej.RAP}$  و  $C$  از طریق رگرسیون تعیین گردند. با توجه به این که  $|G^*|$  مستقل از کرنش است، مقادیر  $Nf_{Rej.RAP}$  را می‌توان در سطوح کرنش مختلف با استفاده از  $|G^*|$  در محدوده ویسکوالاستیک خطی (LVE) محاسبه کرد.

### ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر S-VECD و انرژی شبه‌کرنش (PSE) برای تحلیل داده‌های آزمون LAS قیرهای احیاشدهٔ بازیافتی در دماهای گوناگون اعتبارسنجی شد. با استفاده از منحنی شدت آسیب در مدل PSE-VECD، پارامترهای وابسته به دما محاسبه و مدل پیشنهادی عمر خستگی قیرهای بازیافتی احیاشده در دماهای گوناگون پیش‌بینی گردید. مهم‌ترین یافته‌ها عبارت‌اند از:

۱. همبستگی خطی بین پارامترهای C1 و C2 با دما در منحنی آسیب و همچنین پارامترهای مدل خستگی A و B با مدول کمپلکس ( $|G^*|$ ) نشان‌دهندهٔ تأثیر قابل توجهی دما و  $|G^*|$  بر عمر خستگی (Nf) قیرهای احیاشده بازیافتی است.

۲. بر پایهٔ مدل پیشنهادی با استفاده از  $|G^*|$  و مقدار ثابت برای پارامتر  $C = -1$ ، رویکرد عملی و قابل قبولی برای پیش‌بینی عمر خستگی قیرهای اساس و بازیافتی احیاشده در دماهای میانی ارائه شده است و این مقدار ثابت بدون نیاز به فرایند برازش نیز نتایج مناسبی دارد.

۳. تحلیل نتایج حاصل از دو معیار شکست نشان داده است که معیار شکست با کاهش ۳۵٪ آسیب، نسبت به معیار حداکثر تنش، پیش‌بینی دقیق‌تری از عمر خستگی قیرهای بازیافتی احیاشده در دماهای گوناگون دارد.

با توجه به محدودیت داده‌ها در بررسی تأثیر شرایط پیرشدگی بر عمر خستگی قیرهای بازیافتی احیاشده، انجام تحقیق‌های بیشتر با در نظر گرفتن معیار شکست در حداکثر تنش توصیه می‌شود.

## منابع و مراجعها

1. Kim, S., Sholar, G. A., Byron, T., & Kim, J. (2009). Performance of Polymer-Modified Asphalt Mixture with Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Transportation Research Board*, 109-114.
2. Xiao, F. (2006). Development of Fatigue Predictive Models of Rubberized Asphalt Concrete (RAC) Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures.
3. Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J. S., Austerman, A., & Booshehrian, A. (2012). Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13, 37-41.
4. Li, J. C., Li, H. B., Jiao, Y. Y., Liu, Y. Q., Xia, X., & Yu, C. (2014). Analysis for oblique wave propagation across filled joints based on thin-layer interface model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 102, 39-46.
5. Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulidakos, L., & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 71, 538-550.
6. Nabizadeh, H., Haghshenas, H. F., Kim, Y., Thiago, F., & Aragão, S. (2017). Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures. *Construction and Building Materials*, 152, 65-73.
7. Moghaddam, T. B., & Baaj, H. (2016). The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction and Building Materials*, 114, 805-816.
8. Porot, L., Broere, D., Wistuba, M., & Grönniger, J. (2017). Asphalt and binder evaluation of asphalt mix with 70% reclaimed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 18(4), 1-15.
9. CBN, I.-I. (1977). The Nomenclature of Lipids. *Lipids*, 21, 11-21.
10. Chen, H., & Bahia, H. U. (2021). Modelling effects of aging on asphalt binder fatigue using complex modulus and the LAS test. *International Journal of Fatigue*, 146, 106150.
11. Maharaj, R., Ramjattan-harry, V., & Mohamed, N. (2015). Rutting and Fatigue Cracking Resistance of Waste Cooking Oil Modified Trinidad Asphaltic Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
12. Hassan, N. A., Abdulhussein, A., Almusawi, A., & Zul, M. (2019). Engineering properties of crumb rubber modified dense-graded asphalt mixtures using dry process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 527.
13. Xiao, F., Amirkhanian, S. N., Shen, J., & Putman, B. (2009). Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1028-1034.

14. Botella, R., & Miró, R. (2012). Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 36, 906-912.
15. Bahia, H. U., Zhai, H., & Zeng, M. (2001). Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 70, 442-470.
16. Cao, W., & Wang, C. (2019). Fatigue performance characterization and prediction of asphalt binders using the linear amplitude sweep based viscoelastic continuum damage approach. *International Journal of Fatigue*, 119, 112-125.
17. Zeng, Z. A., Underwood, B. S., & Castorena, C. (2020). Low-temperature performance grade characterisation of asphalt binder using the dynamic shear rheometer. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(1), 1-13.
18. Hintz, C., Velasquez, R., Johnson, C., & Bahia, H. (2011). Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification. *Transportation Research Record*, 2207, 99-106.
19. Hintz, C., & Bahia, H. (2013). Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue in the dynamic shear rheometer. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), 37-41.
20. Mannan, U. A., Islam, R., & Tarefder, R. A. (2015). Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies. *International Journal of Fatigue*, 78, 72-80.
21. Xu, G., Wang, H., & Zhu, H. (2017). Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin. *Construction and Building Materials*, 151, 801-808.
22. Nazari, H., Naderi, K., & Moghadas, F. (2018). Improving aging resistance and fatigue performance of asphalt binders using inorganic nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 170, 591-602.
23. Meneses, A., et al. (2020). Asphalt Binder Linear Amplitude Sweep Test Contribution Related to the  $\alpha$ -Value Estimation. *Road Materials and Pavement Design*, 21(3), 1-16.
24. Safaei, F., & Castorena, C. (2016). Temperature Effects of Linear Amplitude Sweep Testing and Analysis. *Transportation Research Record*, 2574, 92-100.
25. Kuchiishi, A. K., Carvalho, J. P. B., Bessa, I. S., Vasconcelos, K. L., & Liedt, L. (2019). Effect of temperature on the fatigue behavior of asphalt binder. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 29(83), 30-40.
26. Anderson, D. A., Le Hir, Y. M., Marasteanu, M. O., Planche, J., Martin, D., & Gauthier, G. (2001). Evaluation of Fatigue Criteria for Asphalt Binders. *Transportation Research Record*, 1766, 48-56.
27. Wang, C., et al. (2015). Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading. *Road Materials and Pavement Design*, 16(3), 1-20.

28. Wang, C., et al. (2017). Application of Time-Temperature Superposition Principle on Fatigue Failure Analysis of Asphalt Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(1), 1-9.
29. Raad, L., Saboundjian, S., & Minassian, G. (2001). Field Aging Effects on Fatigue of Asphalt Concrete and Asphalt-Rubber Concrete. *Transportation Research Record*, 1767, 126-134.
30. Rasouli, A., Kavussi, A., Jalili, M., & Hossein, A. (2018). Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime. *Construction and Building Materials*, 164, 655-662.
31. AASHTO T240. (2015). Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test). AASHTO.
32. AASHTO R28. (2015). Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). AASHTO.
33. AASHTO TP 101. (2014). Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. AASHTO.
34. AASHTO T315. (2015). Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). AASHTO.
35. Shahsamandy, A. S., Alae, M., Zhang, Z., Xu, L., & Xiao, F. (2024). Enhancing accuracy of predictive fatigue life model in rejuvenated RAP binders through LAS test and complex modulus test at multiple temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 448, 141654.
36. Shahsamandy, A. S., Alae, M., Badughai, A., & Xiao, F. (2024). Modeling Influence of Aging and Rejuvenation Mechanisms on the Recycled Asphalt Pavement (RAP) Binder Fatigue Life through the Linear Amplitude Sweep Test. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 45, 16577-16591.
37. Babadopulos, L. F. D. A. L., et al. (2016). Aging-Effect Incorporation into the Fatigue-Damage Modeling of Asphalt Mixtures Using the S-VECD Model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 1-11.