

**مدل سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره کوره قوس الکتریک با استفاده از مفهوم انرژی\***مرتضی جلیلی قاضی‌زاده<sup>(۱)</sup> امیر کاوسی<sup>(۲)</sup> علی اصغر صادقی<sup>(۳)</sup> حمید فرهاد<sup>(۴)</sup>

**چکیده** در این پژوهش به بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره کوره قوس الکتریک پرداخته شده است. پس از ارزیابی خصوصیات سرباره فولادی، پنج سری مخلوط آسفالتی با درصد‌های وزنی مختلف سرباره (جایگزین بخش درشت‌دانه مصالح آهکی) تهیه شد. با استفاده از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای، رفتار خستگی مخلوط‌ها در حالت کرنش کنترل شده ارزیابی شد. سپس با استفاده از عمرخستگی‌های به دست آمده، مدل‌های پیش‌بینی عمرخستگی توسعه داده شد. همچنین مدل خستگی بر اساس نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی و بر پایه‌ی مفهوم انرژی شکست ارائه گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از سرباره، منجر به بهبود رفتار خستگی مخلوط آسفالتی می‌شود. همچنین مدل‌های توسعه داده شده دقت خوبی در پیش‌بینی عمرخستگی دارد. مدل به دست آمده از نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهنگی نیز نشان داد که می‌توان از پارامتر انرژی شکست برای تعیین عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره استفاده نمود.

**واژه‌های کلیدی** مخلوط آسفالتی، سرباره کوره قوس الکتریک، مدل خستگی، انرژی شکست.

### Development of Fatigue Predictive Models for Asphalt Concrete Mixes Containing Electric Arc Furnace Steel Slag Based on Fracture Energy Concept

M. Jalili Qazizadeh A. Kavussi A. Sadeghi H. Farhad

**Abstract** This research was conducted in order to evaluate fatigue resistance properties of asphalt mixtures containing Electric Arc Furnace (EAF) steel slag. After evaluating properties of EAF steel slag, five sets of mixtures were prepared in laboratory. Each set consisted of a combination of a control limestone aggregate mixed with a specific amount of EAF steel slag. Four points bending beam fatigue testing was performed on all mixtures (at strain controlled mode). Based on fatigue lives, fatigue predicting models were developed. Moreover, a fatigue prediction model which was obtained from indirect tensile test, resilient modulus and was based on fracture energy was developed. The results showed that the inclusion of EAF in mixtures improved fatigue life of mixtures considerably. Very good correlations were observed between responses and fatigue life of mixtures. In addition, models based on fracture energy ( $DE_f/DE_{ITD}$ ) predicted fatigue life of mixtures containing EAF materials reasonably well.

**Key Words** Asphalt mixture, EAF slag, Fatigue model, Fracture energy.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۵/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان.

(۲) استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

(۳) استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری.

(۴) نویسنده مسئول، مربی، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربت‌حیدریه.

Email: h.farhad@torbath.ac.ir

## مقدمه

پیش‌بینی دقیق عمرخستگی مخلوط آسفالتی به دلیل پیچیدگی پدیده خستگی تحت شرایط مختلف بارگذاری، محیطی و مصالح، بسیار مشکل است. در دهه‌های گذشته، مطالعات زیادی در خصوص مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس نتایج آزمایشگاهی و میدانی انجام شده است. با این وجود، پژوهش‌های کمی در خصوص مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره صورت گرفته است؛ بنابراین، یکی از اهداف این پژوهش، توسعه مدل خستگی مخلوط آسفالتی حاوی سرباره کوره قوس الکتریک است. از طرف دیگر، از آنجایی که انجام آزمایش خستگی بسیار زمان‌بر و پرهزینه است، در این تحقیق سعی شده است مدلی بر پایه انرژی شکست با استفاده از نتایج آزمایش‌های کشش غیرمستقیم و مدول برجهنگی، ارائه گردد.

## پیشینه تحقیق

با وجود این که مطالعات پیشین به نقش مؤثر سرباره فولاد در بهبود مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های ماندگار اشاره دارد؛ اما تحقیقات کمی در خصوص رفتار خستگی این مخلوط‌ها انجام شده است که نتایج این مطالعات کم نیز بعضاً ضدونقیض است.

نتایج مطالعه‌ای که در زمینه جایگزینی ریزدانه مخلوط با سرباره انجام شده است؛ نشان داد که سختی و خصوصیات کششی مخلوط حاوی سرباره نسبت به مخلوط شاهد افزایش می‌یابد [8]. همچنین تحقیقات آنها نشان داد که ترکیبی از درشت‌دانه سرباره‌ای و مصالح درشت‌دانه آهکی منتج به عمرخستگی بیشتر مخلوط آسفالتی خواهد شد. در پژوهشی دیگر، با جایگزینی مقادیر مختلف سرباره (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) به جای درشت‌دانه آهکی در مخلوط، به این نتیجه دست یافتند که جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانه با سرباره می‌تواند منجر به

سرباره فولادی یکی از محصولات فرعی صنایع فولاد است که می‌توان به‌عنوان مصالح سنگی در لایه‌های روسازی مورد استفاده قرار گیرد. سرباره کوره اکسیژنی (BOF) و سرباره کوره قوس الکتریک (EAF) دو نوع متداول از سرباره است که در لایه‌های آسفالتی استفاده می‌شود [1-3]. سالانه بیش از ۳ میلیون تن سرباره فولاد در ایران تولید می‌شود که بیش از ۵۰٪ آن را سرباره کوره قوس الکتریک تشکیل می‌دهد. برخی از مزایای سرباره نسبت به مصالح سنگی متداول در روسازی، عبارت است از: مقاومت بیشتر در برابر سایش، شکستگی بیشتر و بافت زبرتر که منجر به برتری نسبی این مصالح شده است. با این وجود یکی از معایب استفاده از سرباره در لایه‌های روسازی، پتانسیل افزایش حجم آن به دلیل وجود عناصر آزاد منیزیم و آهک است [4].

ترک‌خوردگی خستگی یکی از خرابی‌های مهم در روسازی‌های آسفالتی است. حداکثر کرنش افقی در زیر لایه آسفالتی به‌عنوان معیار کنترل‌کننده ترک خستگی در روسازی آسفالتی به کار می‌رود. پس از عبور هر بار از روی سطح روسازی، تنش فشاری افقی در نیمه بالایی لایه آسفالتی و تنش کششی افقی در نیمه پایینی لایه آسفالتی ایجاد می‌شود. پس از تکرار بارگذاری، کرنش حاصل از این تنش‌ها سرانجام منجر به ترک‌خوردگی خستگی در روسازی خواهد شد [5].

عملکرد مخلوط آسفالتی تابع خصوصیات مصالح سنگی نظیر شکل، بافت سطحی، دانه‌بندی، مدول و خصوصیات قیر نظیر نرمی، درجه نفوذ، کندروانی، چسبندگی، سختی و ... است. همچنین، اندرکنش میان قیر و مصالح سنگی در مخلوط تأثیر بسزایی در خصوصیات مخلوط آسفالتی خواهد داشت [6]. عملکرد خستگی نیز به شدت تحت تأثیر نوع مصالح سنگی تغییر می‌کند [7].

دست آمد، سپس ۴۵ تیرچه جهت آزمایش خستگی به روش تیرچه خمشی و ۱۵ نمونه استوانه‌ای با ابعاد نمونه-های مارشال جهت آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهندگی، تهیه شد. سپس آزمایش خستگی در حالت کرنش کنترل شده در سه سطح کرنش (۸۰۰، ۷۰۰ و ۵۰۰) و آزمایش کشش غیرمستقیم در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، انجام و با استفاده از روش‌های آماری، تحلیل و با یکدیگر مقایسه گردید. سپس از این نتایج برای مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره استفاده گردید.

### مواد و مصالح مصرفی

در این پژوهش از یک نوع سنگ‌دانه آهکی، یک نوع سرباره فولادی EAF (تولید کارخانه فولاد مبارکه اصفهان) و از قیر ۶۰-۷۰ به‌منظور ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده شده است. همچنین در تمامی مخلوط‌ها از پودر سنگ آهک به‌عنوان فیلر استفاده گردید. دانه‌بندی مصالح سنگی منطبق بر منحنی دانه‌بندی شماره ۴ (با حداکثر اندازه‌ی اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر) آیین‌نامه‌ی روسازی آسفالتی راه‌های ایران انتخاب شد [۱۴]. به‌منظور امکان قیاس مخلوط‌ها با یکدیگر، مصالح سنگی به‌گونه‌ای انتخاب گردید که منحنی دانه‌بندی هر سه نوع مخلوط دقیقاً بر یکدیگر منطبق باشد. مشخصات مصالح سنگی آهکی، سرباره و قیر مصرفی در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است.

همچنین به‌منظور تعیین عناصر و ترکیبات شیمیایی مصالح سنگی آهکی و سرباره‌ای آزمایش XRF انجام شد که نتایج در جدول (۳) ارائه شده است.

بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی گردد [9]. هرچند دلایل منطقی در خصوص این تغییرات، ارائه نشده است. مطالعاتی دیگر در ایتالیا در خصوص امکان استفاده از دو نوع سرباره کوره قوس الکتریک نشان داد که در سطح تنشی مشخص، با افزایش سختی، مقادیر تغییر شکل، کاهش و در نتیجه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی افزایش می‌یابد و عمرخستگی مخلوط در قیاس با نمونه‌های شاهد افزایش می‌یابد [10,11].

خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی حاوی سرباره و مصالح دورریز در تحقیقی دیگر مورد بررسی قرار گرفت [12]. در این مطالعه، سه نوع مصالح سنگی شامل سرباره، داسیت و بتن بازیافتی مورد استفاده قرار گرفت و یافته‌های آنها نشان داد که عمرخستگی مخلوط‌های حاوی سرباره به‌طور قابل توجهی بیشتر از مخلوط آسفالتی متداول است [12].

در پژوهشی دیگر [13] با مقایسه عمرخستگی مخلوط آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف سرباره کوره قوس الکتریک توسط آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در حالت تنش کنترل شده و در دو وضعیت پیرشده و پیرنشده، نشان دادند که با افزودن سرباره عمرخستگی مخلوط آسفالتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و همچنین حساسیت نسب به پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره قوس الکتریک در قیاس با مخلوط آهکی، کمتر است.

### روش تحقیق

در این تحقیق به‌منظور بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های حاوی سرباره، بخش درشت‌دانه مصالح سنگی آهکی به ترتیب با ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد (وزنی) سرباره نوع EAF جایگزین گردید. با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال بر اساس استاندارد ASTM D-6927 درصد قیر بهینه و سایر مشخصات فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌ها به

جدول ۱ مشخصات مصالح سنگی آهکی و سرباره ای

سرباره کوره قوس الکتریک (EAF)	مصالح آهکی			استاندارد	مشخصه
	درشت دانه	فیلر	ریزدانه		
۳/۰۵۵			۲/۶۵۶	ASTM C-127	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
			۲/۵۸۲	ASTM C-128	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
		۲/۷۶۸		ASTM D-854	وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )
۱/۸۵		۱/۹۰	۱/۶۰		درصد جذب آب
۱۳/۴			۲۰/۴	ASTM C-131	سایش لس آنجلس (%)
۹۸			۸۰	ASTM D-5821	شکستگی در دو وجه (%)

جدول ۲ مشخصات قیر مورد استفاده

نتیجه	استاندارد آشتو	نام آزمایش
۱/۰۱۳	T-228	وزن مخصوص قیر
۶۳/۷	T-49	درجه نفوذ (سانتی گراد)
۵۱/۷	T-53	نقطه نرمی (سانتی گراد)
۶۸۸	T-201	کندروانی کینماتیکی در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد (mm <sup>2</sup> /s)
>۱۰۰	T-51	شکل پذیری (سانتی متر)
۲۸۹	T-48	نقطه اشتعال (سانتی گراد)

جدول ۳ نتایج تحلیل XRF مصالح سنگی

درصد اکسید												مصالح آهکی
V	MnO	Na <sub>2</sub> O	Sr	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
---	---	---	۰/۰۲۴	۰/۰۵۶	---	۰/۱۷۵	۵/۷۰۱	۴۵/۷۸۶	۰/۳۷۶	۰/۶۷	۵/۵۶۵	مصالح آهکی
۰/۶۸۷	۲/۳۲۳	۰/۳۳۷	۰/۰۳۴	۱/۵۰۲	۲/۱۱۱	۰/۲۴۸	۵/۰۱۳	۳۸/۸۶۷	۲۵/۷۵۱	۴/۰۷۳	۱۷/۴۶۷	EAF

مصالح سنگی با قیر، بدین ترتیب که با کاهش این نسبت چسبندگی بهتر صورت می گیرد که در هر دو نوع مصالح این نسبت بالاست.

به منظور بررسی سطح، سایز حفرات و ساختار کریستالی سنگدانه های سرباره فولاد و مقایسه ی آنها با سنگدانه های آهکی، از میکروسکوپ الکترونی SEM استفاده شد. در این نوع میکروسکوپ، الکترون به سطح نمونه تابیده شده و سپس منعکس می گردد و توسط شناساگرها جمع آوری و تبدیل به فوتون نوری می گردد تا تصویر مرئی ایجاد شود؛ به عبارت دیگر، این نوع

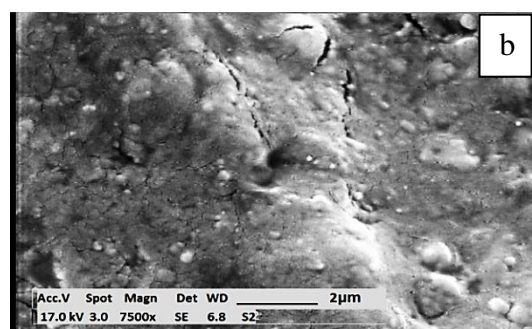
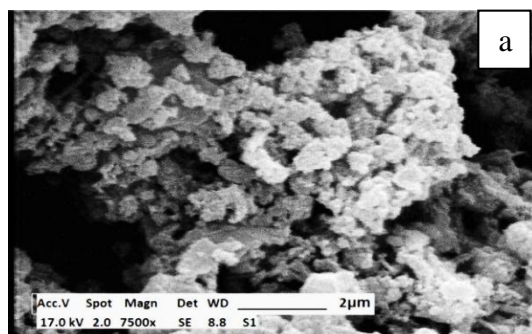
همان گونه که نتایج جدول (۳) نشان می دهد، مهم ترین فازها و ترکیبات تشکیل دهنده مصالح سنگی آهکی، همان طور که از نامش پیداست، اکسید کلسیم است و در مورد سرباره فولاد کوره قوس الکتریک عبارت اند از: اکسید کلسیم (کلسیت)، اکسید آهن، کوارتز، مگنتیت و اکسید آلومینیم. حضور اکسید آهن و آلومینوم به همراه دیگر عناصر فلزی در ترکیبات سرباره دلیل اصلی مقاومت زیاد مصالح سرباره ای در برابر سایش است. نسبت SiO<sub>2</sub>/CaO نشانه ای از خصوصیت بازی مصالح سنگی است و تضمینی برای چسبندگی مناسب

مقایسه با سنگ دانه های آهکی است که منجر به پیوستگی بهتری با قیر خواهد شد.

### طرح اختلاط

نمونه های آزمایش مارشال بر اساس استاندارد ASTM D-6926 ساخته شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از منحنی دما- کندروانی قیر، دمای اختلاط و تراکم تعیین گردید. نمونه ها پس از اختلاط در دمای ۱۴۵ درجه سانتی گراد، با ۷۵ ضربه ی مارشال به هر دو طرف نمونه های ۱۰۲ میلی متری به منظور در نظر گرفتن شرایط ترافیکی سنگین، در دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد متراکم گردید. در این آزمایش در مجموع ۹۰ نمونه با درصد های مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ درصد درشت دانه) سرباره نوع EAF که جایگزین بخش درشت دانه مصالح آهکی شده بود، بر حسب درصد های مختلف قیر تهیه گردید. برای نام گذاری نمونه های حاوی سرباره از حرف E و برای نمونه های حاوی مصالح آهکی از حرف L استفاده شده است. همچنین درصد جایگزینی سرباره به جای درشت دانه مخلوط پس از خط تیره نشان داده شده است. پس از ساخت، وزن مخصوص واقعی نمونه های متراکم شده، اندازه گیری شد. استقامت و روانی نمونه ها بر اساس استاندارد ASTM D-6927 با استفاده از دستگاه آزمایش مارشال اندازه گیری گردید که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است.

میکروسکوپ فقط از ساختار سطحی تصویر می دهد. تصاویر گرفته شده با این روش، در شکل (۱) برای مصالح سنگی آهکی و سرباره نوع EAF نشان داده شده است.



شکل ۱ مقایسه بافت سطحی سنگ دانه ها با استفاده از تصاویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی (a: EAF، b: سنگ دانه آهکی)

در این آزمایش از سنگ دانه هایی با اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی متر استفاده شد. بر اساس این تصاویر سرباره های فولاد دارای سطح و بافت زبرتر و درشت تر در

جدول ۴ خلاصه نتایج طرح اختلاط مارشال

VFA	VMA	درصد قیر جذب شده (P <sub>ba</sub> )	درصد جذب آب	وزن مخصوص توده ای (G <sub>mb</sub> )	استقامت مارشال (kN)	درصد قیر بهینه	نوع نمونه
۷۰	۱۵/۲	۰/۳۸	۰/۳۶	۲/۴۳	۱۱/۷	۴/۷	E-25
۷۴	۱۶/۴	۰/۵۸	۰/۱۳	۲/۴۹	۱۳/۱	۴/۹	E-50
۷۵	۱۶/۱	۰/۸۴	۰/۲۵	۲/۵۴	۱۳/۷	۵/۰	E-75
۷۵	۱۷/۰	۰/۹۹	۰/۲۶	۲/۵۷	۱۴/۰	۵/۲	E-100
۷۰	۱۴/۶	۰/۲۶	۰/۵۳	۲/۳۷	۱۰/۸	۴/۶	L

نبوده و بعد از هر سیکل بارگذاری، مقداری تغییر شکل ماندگار خواهد داشت [17]. باین وجود اگر مقدار بار در قیاس با مقاومت مصالح کم باشد و به دفعات تکرار شود، تغییر شکل‌ها، تقریباً برگشت پذیر بوده و با بار وارده متناسب خواهد بود. تحت این شرایط، مصالح روسازی را می‌توان به‌عنوان مصالح الاستیک در نظر گرفت [18]. برای انجام آزمایش مدول برجهنگی، به ازای هر ترکیبی از مصالح سنگی و سرباره‌ای، حداقل سه نمونه در دو وضعیت (با تغییر ۹۰ درجه‌ای نمونه) و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مطابق روش استاندارد ASTM D 4123، مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش نمونه تحت بار نیمه سینوسی با فرکانس ۱ Hz و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه بارگذاری گردید. با استفاده از رابطه (۱) می‌توان ضریب برجهنگی را به دست آورد:

$$M_r = \frac{P(u+0.27)}{t\delta_h} \quad (1)$$

در این رابطه، P حداکثر بار دینامیکی (N)، U ضریب پواسون (۰/۳۵)، t ضخامت نمونه (mm) و  $\delta_h$  مجموع تغییر شکل‌های برگشت پذیر افقی است. برای انجام این آزمایش از دستگاه UTM-14P استفاده شد. قبل از انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت حداقل ۶ ساعت در دمای ۲۰ درجه قرار داده شد. در مجموع ۱۵ نمونه برای این آزمایش ساخته شد.

### آزمایش کشش غیرمستقیم (تعیین دانسیته انرژی شکست)

جهت تعیین رفتار کششی مخلوط آسفالتی که می‌تواند به مقاومت روسازی در برابر ترک خوردگی مرتبط شود، از آزمایش کشش غیرمستقیم استفاده می‌شود [19]. در این آزمایش، نمونه استوانه‌ای به‌صورت خوابیده بین فک‌های بارگذاری دستگاه بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد (این بارگذاری فشاری سبب ایجاد تنش نسبتاً یکنواختی در صفحه‌ی قائم خواهد شد که معمولاً گسیختگی هم در

نتایج آزمایش مارشال برای هر ۵ سری مخلوط نشان می‌دهد که کمترین و بیشترین درصد قیر بهینه به ترتیب مربوط به مخلوط حاوی مصالح آهکی و مخلوط با ۱۰۰٪ درشت‌دانه سرباره‌ای است. افزایش درصد قیر این مخلوط‌ها می‌تواند به دلیل خلل و فرج موجود در سنگ‌دانه‌های سرباره‌ای باشد. با افزایش نسبت مصالح سرباره‌ای، استقامت مارشال نمونه‌های آسفالتی افزایش یافته است. البته با افزودن تا ۲۵ درصد سرباره به مخلوط آسفالتی، افزایش استقامت مارشال، چندان قابل ملاحظه نبوده ولی با جایگزین کردن مقادیر بیشتر (حداقل ۵۰ درصد مصالح آهکی با مصالح سرباره‌ای) به دلیل درگیری و قفل و بست مؤثر سنگ‌دانه‌ها، این پارامتر به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد به‌گونه‌ای که با جایگزین شدن کل بخش درشت‌دانه مصالح سنگی آهکی با مصالح سرباره‌ای، استقامت مارشال مخلوط آسفالتی حدود ۴۰ درصد افزایش پیدا کرده است. استقامت مخلوط آسفالتی به دو عامل اصطکاک داخلی و چسبندگی بستگی دارد [۱۵]. اصطکاک بین دانه‌های مصالح سنگی در درجه اول بستگی به زبری سطح دانه‌ها و قفل و بست و جنس آن‌ها و در درجه دوم بستگی به دانه‌بندی و حداکثر قطر دانه‌ها دارد. مقدار قیر مصرفی نیز بر اصطکاک بین دانه‌های سنگی اثر می‌گذارد به‌این ترتیب که با اضافه شدن مقدار قیر، ضخامت قیر در محل اتصال دانه‌ها افزایش یافته و موجب کم شدن اصطکاک می‌گردد. زبری سطح دانه‌ها موجب می‌شود که استقامت مخلوط آسفالتی با افزایش مقدار قیر، کمتر کاهش یابد. بنابراین هرچه سطح دانه‌ها زبرتر باشد، تقلیل استقامت آسفالت با افزایش مقدار قیر به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر خواهد بود [۱۶].

### کارهای آزمایشگاهی

#### آزمایش مدول برجهنگی

مدول برجهنگی مخلوط آسفالتی یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی به روش تئوری لایه‌ای است. اکثر مصالح مورد استفاده در لایه‌های روسازی الاستیک کامل

کرنش که از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی مخلوط آسفالتی به دست آمده، نشان داده شده است.

دانسیتۀ انرژی شکست ( $FE_{IDT}$ )، حاصل مجموع دانسیته انرژی کرنش الاستیک ( $EE_{IDT}$ ) (Elastic Strain Energy Density) و دانسیته انرژی کرنش خزشی تلف شده کل ( $DE_{IDT}$ ) (Dissipated Creep Strain Energy) است. مفهوم دانسیته انرژی کرنش خزشی تلف شده ( $DE_{IDT}$ ) اولین بار توسط دو محقق ارائه گردید [22,23]. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است  $FE_{IDT}$  سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا لحظه گسیختگی است. در حالی که  $EE_{IDT}$  مساحت قسمتی از زیر منحنی تنش-کرنش است که توسط کرنش در لحظه گسیختگی ( $\epsilon_f$ )، ضریب برجهنگی ( $M_f$ ) و مقاومت کششی غیرمستقیم ( $\sigma_{IDT}$ ) شکل می‌گیرد. در واقع  $DE_{IDT}$  تفاوت بین  $FE_{IDT}$  و  $EE_{IDT}$  است [21]. محاسبه  $DE_{IDT}$  وابسته به نتایج ضریب برجهنگی و مقاومت کششی غیرمستقیم خواهد بود که از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$DCSE_{IDT} = FE - EE \quad (4)$$

در تحقیقی [21] نشان دادند که  $DE_{IDT}$  با عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی همبستگی بسیار زیادی دارد. بدین ترتیب که به‌ازای سطح کرنشی مشخص، مخلوطی که  $DE_{IDT}$  بزرگ‌تری دارد، عملکرد خستگی بهتری نیز خواهد داشت. همچنین این محققین بیان داشتند که  $DE_{IDT}$ ، یکی از خواص مهندسی منحصر به فرد مخلوط است که با مقاومت شکست مخلوط در ارتباط است [21].

امتداد همین صفحه اتفاق می‌افتد [20]. سپس نمونه تحت بار قرار گرفته و بار با نرخ تغییر شکل ثابت  $50 \text{ mm/min}$  به آن اعمال می‌گردد و بارگذاری تا زمان گسیختگی نمونه ادامه می‌یابد. این آزمایش در دمای  $20^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد انجام و جهت تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها از رابطه (۲) استفاده شد:

$$S_t = \frac{2P}{\pi \cdot t \cdot D} \quad (2)$$

که در آن:

$D$ : قطر نمونه (m);  $t$ : ضخامت نمونه (m);  $P$ : حداکثر بار (kN) و  $S_t$ : مقاومت کششی (kPa) است.

با توجه به این که آزمایش تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از دستگاه UTM-14P انجام شد، بنابراین امکان ثبت تنش و کرنش در هر لحظه فراهم بود. لذا با استفاده از این مطلب امکان ترسیم منحنی تنش و کرنش و محاسبه چقرمگی (Toughness) نمونه‌ها وجود داشت.

طبق تعریف، سطح زیر نمودار تنش-کرنش تا لحظه گسیختگی (حداکثر تنش کششی) معرف چقرمگی مخلوط است که نشان‌دهنده انرژی لازم جهت گسیختگی نمونه است و از رابطه (۳) به دست می‌آید:

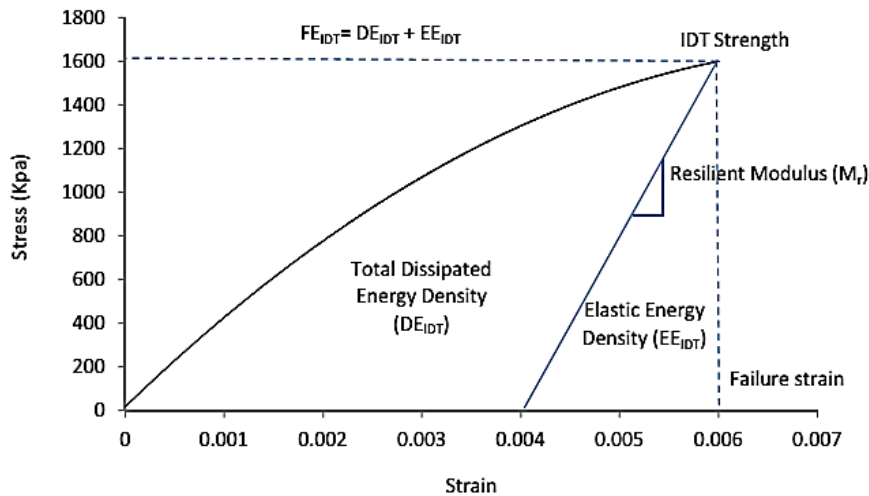
$$FE = \int_0^{\epsilon_f} s(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

که در آن:

$FE$ : انرژی تا لحظه شکست (چقرمگی) و  $\epsilon_f$ : کرنش در لحظه گسیختگی است.

به این سطح همچنین، دانسیته انرژی شکست (Fracture Energy Density) می‌گویند. دانسیته انرژی شکست که به‌عنوان سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا نقطه حداکثر منحنی، تعریف می‌شود، انرژی پتانسیل لازم برای ایجاد ترک است. از این مفهوم می‌توان برای بررسی عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمود، زیرا با استفاده از این مفهوم می‌توان وضعیت تنش و کرنش را توسط یک پارامتر تا لحظه شروع ترک‌خوردگی در نظر گرفت [21]. در شکل (۳) نمونه‌ای از منحنی تنش-

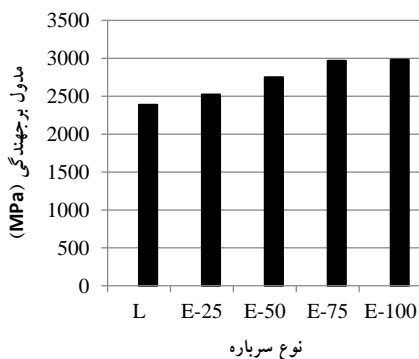




شکل ۳ نمونه‌ای از منحنی تنش- کرنش در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

### نتایج آزمایش‌ها و تحلیل نتایج نتایج آزمایش مدول برجهندگی

در شکل (۴) نتایج آزمایش مدول برجهندگی مخلوط‌ها با درصد‌های مختلف سرباره نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن سرباره منجر به افزایش ضریب برجهندگی نسبت به نمونه شاهد (نمونه حاوی مصالح آهکی) شده است. افزایش ضریب برجهندگی می‌تواند به دلیل شکستگی بیشتر سرباره و در نتیجه قفل و بست بیشتر مصالح سنگی باشد.



شکل ۴ میانگین ضریب برجهندگی نمونه‌ها در دمای ۲۰ °C

### آزمایش خستگی

در این تحقیق برای انجام آزمایش خستگی از روش تیرچه خمش چهار نقطه‌ای مطابق روش استاندارد AASHTO T321-07 استفاده شد. تیرچه‌های این آزمایش با ابعاد ۳۸۰×۶۳×۵۰ میلی‌متر تهیه شد. سپس آزمایش خستگی در حالت کرنش کنترل شده و در سطوح کرنش ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ میکرو کرنش و تحت فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گردید. در هر سطح کرنش سه تیرچه مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین از بارگذاری سینوسی به دلیل تطابق بهتر با واقعیت [24] استفاده شد. دلیل انتخاب این سطوح کرنش قرارگیری عمرخستگی در محدوده ۱۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰۰ (که توصیه اکثر استانداردهاست) است تا بتوان در مدل‌سازی استفاده نمود.

قبل از انجام آزمایش خستگی، درصد فضای خالی نمونه‌ها تعیین گردید تا تطابق آن‌ها با حدود پیشنهادی استاندارد کنترل شود. برای انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت حداقل ۶ ساعت در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد.



مقادیر میانگین دانسیته انرژی تلف‌شده کل نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد که با افزودن سرباره، دانسیته انرژی تلف‌شده کل مخلوط افزایش می‌یابد. مقادیر بیشتر دانسیته انرژی تلف‌شده کل معیاری است که نشان‌دهنده مقاومت در برابر ترک‌های خستگی است. بدین مفهوم که با افزایش این پارامتر مقاومت در برابر ترک‌های خستگی افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر عمرخستگی مخلوط، افزایش خواهد یافت؛ بنابراین با افزودن هر دو نوع سرباره به مخلوط و در نتیجه افزایش دانسیته انرژی تلف‌شده بیشتر، می‌توان انتظار داشت که این مخلوط‌ها عمرخستگی بیشتری نسبت به نمونه شاهد خواهد داشت. مقادیر دانسیته انرژی تلف‌شده کل به‌دست‌آمده از این آزمایش با نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق ژری و همکارانش [25] مطابقت دارد. در تحقیق مذکور نشان دادند که مخلوط‌های حاوی سرباره دانسیته انرژی تلف‌شده کل بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی مصالح بازالتی دارد.

به‌طورکلی همان‌طور که نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می‌دهد با افزودن سرباره به مخلوط، حداکثر مقاومت کششی غیرمستقیم، چقرمگی و دانسیته انرژی تلف‌شده کل مخلوط نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. این مطلب می‌تواند ناشی از شکستگی بیشتر مصالح سرباره‌ای و در نتیجه قفل و بست بهتر مصالح سنگی و همچنین پیوند قوی‌تر قیر و مصالح سرباره‌ای باشد. چسبندگی مصالح سنگی و قیر نقش مهمی در گسیختگی و شکست مخلوط آسفالتی ایفا می‌کند. مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی تابعی از چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی و همچنین چسبندگی قیر است؛ بنابراین با افزایش چسبندگی میان قیر و مصالح سنگی، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی افزایش خواهد یافت [26]. انرژی شکست بیشتر نمونه‌های حاوی سرباره در قیاس با نمونه شاهد نیز نشان‌دهنده

به‌منظور بررسی معنی‌داری نتایج آزمایشگاهی از تحلیل‌های آماری استفاده گردید. هدف از انجام تحلیل‌های آماری، بررسی این موضوع است که تغییر در پارامترهای آزمایش‌ها ناشی از خطاهای آزمایشگاهی است و یا به دلیل حضور سرباره است. بدین منظور تحلیل‌های آماری ANOVA در سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی پارامترهای آزمایش انجام گردید. نتایج زمانی معنی‌دار خواهد بود که مقدار P value کمتر از ۰/۰۵ باشد. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، تفاوت میان مقادیر ضریب برجهندگی نمونه‌های حاوی ۵۰٪ یا بیشتر سرباره‌ها با نمونه شاهد، معنی‌دار است بدین مفهوم که تفاوت در مقادیر ضریب برجهندگی ناشی از افزودن سرباره است.

### نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم و تعیین دانسیته انرژی شکست

در جدول (۵) نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌ها، شامل: حداکثر مقاومت کششی، سطح زیر نمودار تنش- کرنش تا لحظه گسیختگی و دانسیته انرژی کرنش خزشی تلف‌شده کل نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره ارائه شده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش درصد سرباره در مخلوط، حداکثر مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بدین ترتیب که حداکثر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های E-100 نسبت به نمونه شاهد حدود ۲۰٪ افزایش یافته است. یافته‌های این آزمایش با نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق آسی و همکاران [9]، مطابقت خوبی دارد با این تفاوت که در تحقیق مذکور، بیشترین مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به نمونه با ۲۵٪ سرباره بوده و توجیه منطقی در این خصوص نیز ارائه نشده است. همچنین با افزودن سرباره به مخلوط آسفالتی، سطح زیر منحنی تنش-کرنش (چقرمگی) نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش میزان چقرمگی برای نمونه E-100 به حدود ۳۰٪ می‌رسد.

نیروی لازم بیشتر برای ایجاد خرابی در این نوع مخلوط- هاست و نشان می دهد که افزودن مخلوط های حاوی سرباره سبب افزایش آستانه ی تحمل مخلوط قبل از ترک خوردگی شده و به بیان دیگر نیروی بیشتری برای ترک خوردگی آن لازم است.

به منظور بررسی تأثیر افزودن درصد های مختلف سرباره بر نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، از تحلیل های آماری به روش تحلیل واریانس استفاده شد. تحلیل واریانس تعیین می نماید که آیا میانگین یک نمونه یا چند نمونه با نمونه های دیگر در سطح اهمیت در نظر گرفته شده، متفاوت است یا خیر. با این وجود این روش تحلیل نشان نمی دهد که تفاوت معنادار آماری، مربوط به میانگین کدام نمونه یا نمونه ها است؛ بنابراین از آزمون- هایی نظیر توکی به همراه تحلیل واریانس به منظور تعیین این که میانگین کدام نمونه ها از نظر آماری متفاوت است، استفاده می شود. در آزمون توکی، همه میانگین ها برای هر یک از حالات بر حسب دامنه مرتب می شود. گروهی که کمترین میانگین را دارد، رتبه یک را می گیرد. تفاوت- های جفتی بین میانگین ها که از بزرگترین میانگین و مقایسه آن با کوچکترین میانگین آغاز می شود، در هر

گروه فهرست شده و به خطای استاندارد تقسیم می شود. این مقدار با یک مقدار بحرانی دامنه استاندارد شده مقایسه می شود. اگر این مقدار از مقدار بحرانی بیشتر باشد، آنگاه نتیجه گرفته می شود که ظهور در آن گروه، از لحاظ آماری متفاوت است. برای انجام تحلیل آماری از آزمون ANOVA در سطح اطمینان ۹۵٪ بر روی نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم استفاده شد. به این ترتیب که از این آزمون برای سنجش تأثیر تغییر درصد های مختلف سرباره بر پارامترهای این آزمایش استفاده گردید. در جدول (۶) نتایج به دست آمده از تحلیل واریانس برای نتایج آزمایش های مقاومت کششی غیرمستقیم ارائه شده است.

نتایج تحلیل های آماری نشان داد که تفاوت معنی- داری بین مقادیر حداکثر مقاومت کششی نمونه های حاوی سرباره و نمونه شاهد (به جزء نمونه E-25) وجود دارد. همچنین این موضوع برای مقادیر چقرمگی (سطح زیر منحنی تنش- کرنش تا لحظه گسیختگی) نمونه های حاوی ۷۵٪ یا بیشتر سرباره با نمونه شاهد وجود دارد. دانسیته انرژی تلف شده کل نمونه ها (به جزء نمونه E-25) نیز با نمونه شاهد تفاوت معنی داری دارد.

جدول ۵ خلاصه آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

E-100	E-75	E-50	E-25	L	نوع مخلوط
۷۵۶	۷۵۰	۷۳۲	۶۹۳	۶۲۵	حداکثر تنش کششی (kPa)
۵۴۶	۵۲۴	۵۰۵	۴۴۰	۴۲۴	سطح زیر منحنی تا لحظه گسیختگی (kPa)
۴۳۷	۴۰۶	۳۸۸	۳۳۴	۳۲۲	دانسیته انرژی کرنش خزشی تلف شده کل (kPa) (DE <sub>IDT</sub> )

جدول ۶ تحلیل واریانس نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه ها

نوع نمونه	مجموع مربعات (ss)	درجه آزادی (df)	F	P	آزمون توکی
حداکثر مقاومت کششی	۸۰۴۵۹	۱۰	۳/۵۰	۰/۰۰۲	به جزء نمونه E-25
چقرمگی	۱۰۲۹۷۹	۱۰	۱۰/۷۸	۰/۰۰۰	به جزء نمونه های E-25 و E-50
دانسیته انرژی تلف شده کل	۱۰۴۴۲۹	۱۰	۱۲/۶۶	۰/۰۰۰	به جزء نمونه E-25

### نتایج آزمایش خستگی

همان طور که مشاهده می شود با افزایش درصد سرباره عمر خستگی نمونه ها بر اساس روش کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه، افزایش می یابد. بدین ترتیب که عمر خستگی نمونه ها به طور میانگین در سطوح ریز کرنش ۸۰۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ به ترتیب حدود ۳، ۲ و ۲/۵ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. همچنین به طور مشابه، عمر خستگی در سطوح کرنش مختلف بر اساس معیار R & B، با افزایش درصد سرباره، افزایش می یابد. بدین ترتیب که با افزودن سرباره به مخلوط، عمر خستگی نمونه ها به طور میانگین در سطوح ریز کرنش ۸۰۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ به ترتیب حدود ۳، ۲/۵ و ۲/۸ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. این افزایش عمر خستگی می تواند به دلیل چسبندگی بهتر مصالح سرباره - ای با قیر باشد که منجر به تقویت چسبندگی در محل تماس قیر و مصالح سنگی و در نتیجه جلوگیری از تغییر شکل و گسترش ترک خوردگی خواهد شد. همچنین همان طور که نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان داد با افزودن سرباره، چقرمگی مخلوط نیز نسبت به نمونه شاهد افزایش می یابد که این مطلب نیز می تواند منجر به مقاومت بیشتر نمونه آسفالتی قبل از ترک خوردگی و در نتیجه افزایش عمر خستگی مخلوط شود.

جدول ۹ تحلیل واریانس نتایج عمر خستگی بر اساس معیار ۵۰٪ کاهش سختی خمشی اولیه در حالت پیرنشده

عمر خستگی	سطح تنش (kPa) یا کرنش (μs)	P	آزمون توکی
روش الف	۸۰۰	۰/۰۰۰	
	۷۰۰	۰/۰۰۹	به جزء E-25
	۵۰۰	۰/۰۰۰	
روش ب	۸۰۰	۰/۰۰۰	
	۷۰۰	۰/۰۰۲	به جزء E-25
	۵۰۰	۰/۰۰۰	

در این پژوهش، جهت بررسی عمر خستگی مخلوط های آسفالتی، از دو روش به شرح ذیل استفاده شده است:

- با استفاده از رویکرد متداول پیشنهادی استانداردهای آزمایش خستگی، مبنی بر کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه.
  - روش (R&B) Rowe and Bouldin [27]. در این روش با ترسیم نسبت سختی در برابر تعداد سیکل های بارگذاری، عمر خستگی را می توان به ازای تعداد سیکلی که حداکثر مقدار نسبت سختی را نتیجه می دهد تعیین نمود.
- نتایج عمر خستگی نمونه ها در سطوح کرنش مختلف بر اساس روش (۱) و (۲) به ترتیب در جداول (۷) و (۸) ارائه شده است.

جدول ۷ نتایج عمر خستگی نمونه ها در سطوح کرنش مختلف بر اساس هر روش (۱)

نوع نمونه	سطح کرنش		
	۵۰۰	۷۰۰	۸۰۰
L	۱۲۷۵۰۰	۳۱۲۹۰	۹۲۴۰
E-25	۲۷۹۳۵۳	۳۱۰۴۷	۱۷۱۲۳
E-50	۳۰۰۴۴۳	۵۰۷۴۰	۳۱۵۸۳
E-75	۲۹۲۰۸۳	۶۶۶۱۳	۳۰۳۵۳
E-100	۴۳۹۵۰۰	۶۶۸۳۰	۴۱۸۷۵

جدول ۸ نتایج عمر خستگی نمونه ها در سطوح کرنش مختلف بر اساس هر روش (۲)

نوع نمونه	بر اساس روش Rowe and Bouldin		
	سطح کرنش		
	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
L	۱۶۶۹۳	۱۶۶۹۳	۱۶۶۹۳
E-25	۲۶۸۴۰	۲۶۸۴۰	۲۶۸۴۰
E-50	۶۸۱۸۳	۶۸۱۸۳	۶۸۱۸۳
E-75	۷۰۵۰۷	۷۰۵۰۷	۷۰۵۰۷
E-100	۷۱۱۴۰	۷۱۱۴۰	۷۱۱۴۰

به منظور انجام مدل‌سازی از رگرسیون خطی استفاده شد. لازم به ذکر است که به منظور مدل‌سازی، عمرخستگی به دست‌آمده بر اساس دو معیار اشاره شده (معیار کاهش ۵۰ درصدی سختی خمشی اولیه و معیار R & B) مورد استفاده قرار گرفت؛ که نتایج آن در جدول (۱۰) ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول (۱۰) ملاحظه می‌شود، ضریب همبستگی خوبی برای تمام مدل‌های توسعه داده شده بر اساس معیار کاهش ۵۰٪ سختی خمشی اولیه در حالت کرنش ثابت به دست‌آمده است که نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن مدل‌های برازش داده شده به این داده‌ها است. همچنین به‌غیر از نمونه E-25، شیب تمام خطوط تقریباً یکسان بوده و روند کاهش عمرخستگی با افزایش سطح کرنش مشابه است. با دقت در نتایج به دست‌آمده از مدل‌سازی عمرخستگی نمونه‌ها (بر اساس معیار R&B)، مشاهده می‌شود که ضریب همبستگی بسیار خوبی برای تمام مدل‌های توسعه داده شده وجود دارد که نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن مدل‌های برازش داده شده به این داده‌ها است. همچنین به‌طور مشابه به‌جز نمونه E-25 شیب تمام خطوط تقریباً یکسان بوده و روند کاهش عمرخستگی با افزایش سطح کرنش برای نمونه‌های مختلف تقریباً مشابه است.

اکثر مدل‌های خستگی موجود برای تعیین ضرایب مدل نیازمند انجام آزمایش‌هایی با تعداد سیکل‌های بارگذاری بسیار زیادی است که این امر سبب شده که ارزیابی عملکرد خستگی در مراحل طرح اختلاط، کمتر مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین توسعه‌ی مدل‌هایی که نیاز چندانی به آزمایش‌های طولانی نداشته باشد بسیار مفید خواهد بود. لذا در این بخش ابتدا به معرفی مدل خستگی ارائه شده توسط لی و همکاران [21] در سال ۲۰۱۲ خواهیم پرداخت. سپس مدل ارائه شده در این مقاله که تا حدودی مشابه مدل آن‌ها است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول (۹) تحلیل‌های آماری نتایج عمرخستگی‌های به دست‌آمده بر اساس هر دو معیار را، نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سطوح کرنش ۵۰۰ و ۸۰۰ میکرو کرنش اختلاف معنی‌داری بین عمرخستگی نمونه‌های مختلف با نمونه شاهد مشاهده می‌شود اما در سطح کرنش ۷۰۰ اختلاف معنی‌داری برای نمونه‌های E-25 مشاهده نمی‌شود.

### مدل‌سازی رفتاری خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره

مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی همواره به خاطر فراهم آوردن درکی بهتر از رفتار خستگی و همچنین امکان پیش‌بینی آن، مورد توجه محققین بوده است. مدل‌سازی رفتار خستگی علاوه بر آن‌که دید عمیق‌تری نسبت به نتایج به دست‌آمده و تفسیر آن‌ها فراهم می‌سازد، در صورتی که مدل ارائه شده دقت و اطمینان مناسبی داشته و دربرگیرنده آثار متغیرهای مهم و ضروری مخلوط بر عمرخستگی باشد، می‌تواند نیاز به انجام آزمایش‌های طولانی و پرهزینه خستگی را در مرحله طراحی کاهش دهد. همچنین می‌توان عملکرد مخلوط در شرایط واقعی را تخمین زد [28]. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی عمرخستگی توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است که پرکاربردترین آن‌ها مدل مانیس‌میت (Monismith) مطابق رابطه (۵) است که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است:

$$N_f = a(1/\epsilon \text{ or } 1/\sigma)^b \quad (5)$$

که به صورت رگرسیون خطی لگاریتم طبیعی به شکل  $\ln(N_f) = \ln(a) + b \ln(1/\epsilon)$  به داده‌های عمرخستگی - سطح کرنش یا تنش هر یک از مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره برازش داده شد. در این مدل  $\epsilon$  مقدار سطح کرنش،  $\sigma$  مقدار سطح تنش،  $N_f$  عمرخستگی مخلوط به‌ازای کرنش یا تنش مورد نظر،  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت مدل است.

جدول ۱۰ مدل‌های برازش شده بر اساس هر دو روش

R <sup>2</sup>	$a\left(\frac{1}{\epsilon_{R\&B}}\right)^c$	R <sup>2</sup>	$a\left(\frac{1}{\epsilon_{50\%}}\right)^c$	نوع مخلوط
0.953	$1.67E21(\epsilon)^{-5.780}$	0.9686	$3.55E22(\epsilon)^{-6.329}$	E-25
0.9332	$1.00E18(\epsilon)^{-4.566}$	0.9194	$1.00E20(\epsilon)^{-5.376}$	E-50
0.9644	$2.39E18(\epsilon)^{-4.673}$	0.9513	$1.71E21(\epsilon)^{-5.780}$	E-75
0.9592	$7.67E18(\epsilon)^{-4.854}$	0.8973	$2.71E21(\epsilon)^{-5.814}$	E-100
0.8462	$1.34E20(\epsilon)^{-5.464}$	0.8832	$5.99E20(\epsilon)^{-5.780}$	L

نسبت به محاسبه‌ی ضرایب مدل اقدام و یا مستقیماً از مدل توسعه داده شده آن‌ها استفاده نمود.

در این مقاله و با توجه به توضیحات فوق از مدل مذکور برای مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌ها استفاده شد. بدین منظور با استفاده از رگرسیون غیرخطی ضرایب مدل و ضریب همبستگی آن تعیین شد. نتایج این تحلیل نشان داد که ضریب همبستگی به دست آمده از مدل مذکور بسیار پایین بوده و از دقت لازم برای پیش‌بینی عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره برخوردار نیست. لذا مدل‌های مختلف دیگری مورد ارزیابی قرار گرفت و نهایتاً مدل ذیل (رابطه ۷) پیشنهاد گردید:

$$N_f = e^{a\left(\frac{DE_f}{DE_{IDT}}\right)+b} \quad (7)$$

سپس با انجام رگرسیون غیرخطی ضرایب مدل پیشنهادی به‌ازای درصدهای مختلف سرباره مطابق جدول (۱۱) به دست آمد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل پیشنهادی با ضرایب همبستگی قابل قبول می‌تواند به‌عنوان مدلی مناسب و ساده برای پیش‌بینی عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره کوره قوس الکتریک مورد استفاده قرارگیرد.

لی و همکارانش [21] در تحقیق خود به‌منظور در نظر گرفتن آثار تنش‌ها و کرنش‌ها بر رفتار خستگی مخلوط، از انرژی تلف‌شده اولیه در آزمایش خستگی استفاده کردند. انرژی تلف‌شده به‌ازای تعداد سیکل بارگذاری مشخص در آزمایش خستگی، معرف انرژی مصرفی جهت ایجاد صدمه در مخلوط است. انرژی تلف‌شده تابعی از تنش، کرنش و زاویه فاز مصالح است که ممکن است عامل محرک ایجاد خرابی در مخلوط باشد؛ بنابراین آن‌ها نشان دادند که نسبت انرژی تلف‌شده به دانسیته انرژی تلف‌شده کل  $(DE_f/DE_{IDT})$ ، می‌تواند معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی باشد. در تحقیق مذکور بعد از ارزیابی مدل‌های مختلف به رابطه‌ی نهایی (۶) رسیدند:

$$N_f = \frac{1}{a+b\left(\frac{DE_f}{DE_{IDT}}\right)^c} \quad (6)$$

و با مقایسه‌ی این مدل با سایر مدل‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل مذکور با دقت قابل قبولی قادر به پیش‌بینی عمرخستگی مخلوط‌های آسفالتی خواهد بود و برای به دست آوردن ضرایب مدل نیاز به انجام آزمایش‌های طولانی خستگی نیست و تنها با انجام آزمایش خستگی در تعداد سیکل‌های بسیار کم و به‌دست آوردن انرژی تلف‌شده اولیه و با در اختیار داشتن نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم و مدول برجهنگی (مدول دینامیک)، می‌توان

جدول ۱۱ مدل پیشنهادی برای نمونه‌های حاوی سرباره EAF و در حالت کرنش کنترل‌شده

$e^{a\left(\frac{DE_f}{DE_{IDT}}\right)+b}$				نوع مخلوط	
بر اساس روش R&B		بر اساس معیار کاهش سختی			
R <sup>2</sup>	N <sub>R&amp;B</sub>	R <sup>2</sup>	N <sub>50</sub>	ضرایب	
0.997	-5.006E4	0.984	-4.471E4	a	E-25
	15.450		15.590	b	
0.961	-6.237E4	0.981	-6.241E4	a	E-50
	15.531		16.024	b	
0.721	-2.076E5	0.656	-3.584E4	a	E-75
	20.937		14.376	b	
0.915	-5.989E4	0.826	-5.160E4	a	E-100
	15.263		15.130	b	
0.909	-1.069E5	0.831	-3.171E4	a	L
	16.771		13.665	B	

و مصالح سرباره‌ای باشد.

۳. همچنین نتایج این تحقیق حاکی از انرژی شکست بیشتر نمونه‌های حاوی سرباره در قیاس با نمونه شاهد بود که نشان‌دهنده نیروی لازم بیشتر برای ایجاد خرابی در این نوع مخلوط‌هاست و نشان می‌دهد که افزودن سرباره به مخلوط آسفالتی سبب افزایش آستانه‌ی تحمل مخلوط قبل از ترک‌خوردگی شده و به‌بیان‌دیگر نیروی بیشتری برای ترک‌خوردگی آن لازم است.

۴. نتایج آزمایش خستگی نشان داد که با افزودن سرباره به مخلوط، عمرخستگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این افزایش عمر خستگی می‌تواند به دلیل چسبندگی بهتر مصالح سرباره‌ای با قیر باشد که منجر به تقویت چسبندگی در محل تماس قیر و مصالح سنگی و در نتیجه جلوگیری از تغییر شکل و گسترش ترک‌خوردگی خواهد شد.

۵. نتایج مدل‌سازی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره کوره قوس الکتریک با استفاده از مدل مانیسیمیت نشان داد که مدل‌های برازش داده شده با

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌منظور بررسی رفتار خستگی مخلوط آسفالتی حاوی سرباره کوره قوس الکتریک، درصد‌های مختلفی از سرباره جایگزین قسمت درشت‌دانه مصالح سنگی آهکی گردید. سپس با استفاده از روش طرح مارشال، درصد قیر بهینه برای هر ترکیب تعیین و آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهنگی و خستگی انجام شد که نتایج این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

۱. با افزایش درصد سرباره در مخلوط آسفالتی، مدول برجهنگی آن به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. افزایش ضریب برجهنگی می‌تواند به دلیل شکستگی بیشتر سرباره و در نتیجه قفل و بست بیشتر مصالح سنگی باشد.
۲. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داد که استفاده از سرباره منتج به افزایش معنی‌دار مقاومت کششی مخلوط آسفالتی خواهد شد. این مطلب می‌تواند ناشی از شکستگی بیشتر مصالح سرباره‌ای و در نتیجه قفل و بست بهتر مصالح سنگی و همچنین پیوند قوی‌تر قیر

حاوی سرباره کوره قوس الکتریک مورد استفاده قرار گیرد.

۷. با توجه به این که در این پژوهش تنها از یک نوع قیر و یک نوع دانه بندی استفاده شده است، پیشنهاد می شود در تحقیقات آتی با استفاده از دانه بندی ها و قیرهای مختلف، مدل ارائه شده توسعه داده شود.

دقت بسیار خوبی قابلیت پیش بینی عمرخستگی را خواهد داشت.

۶. نتایج مدل سازی خستگی با استفاده از مفهوم دانسیته انرژی شکست نشان داد که این مدل با دقت قابل قبولی قادر است رفتار خستگی مخلوط را پیش بینی کند و بنابراین می تواند به عنوان مدلی مناسب و ساده برای پیش بینی عمرخستگی مخلوط های آسفالتی

## مراجع

1. Shaopeng, W., Yongjie, X. and Qunshan Y., "Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures", *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 2580-5, (2007).
2. Yongjie, X., Shaopeng, W., Haobo, H. and Jin, Z., "Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 138, pp. 261-8, (2006).
3. Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Čosić, M., Merle, V., Mioč, B. and Sofilić, U., "EAF steel slag application possibilities in croatian asphalt mixture production" *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 19, (2010).
4. Waligora, J., Bulteel, D., Degrugilliers, P. and Damidot, D., "Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical technique approach", *Materials Characterization*, Vol. 61, pp. 39 - 48, (2010).
5. Kavussi, A. and Modarres, A., "Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1920-7, (2010).
6. You, Z. and Buttlar, W., "Discrete Element Modeling to Predict the Modulus of Asphalt Concrete Mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Special Issue: Micromechanical Characterization And Constitutive Modeling of Asphalt Mixes, pp. 140-6, (2004).
7. Bazin, P. and Saunier, J.B., "Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes", *Second International Conference on The Structural Design of Asphalt Pavements Proceeding*, Ann Arbor, Michigan, (1967).
8. Bagamapadde, U. and Wahhab, S.A., "Optimization of Steel Slag Aggregate for Bituminous Mixes in Saudi Arab", *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 5-30, (1998).
9. Asi, I.M., Qasrawi, H.Y. and Shalabi, F.I., "Use of Steel Slag Aggregate in Asphalt Concrete Mixes", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34 (8), pp. 902-11, (2007).
10. Pasetto, M. and Baldo, N., "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 181, pp. 938-48, (2010).



11. Pasetto, M. and Baldo N., "Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 3458–68, (2011).
12. Arabani, M., and Azarhoosh A.R., "The Effect of Recycled Concrete Aggregate and Steel Slag on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 1–7, (2012).
13. Kavussi, A. and Jalili Qazizadeh, M., "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging", *Construction and Building Materials*, Vol. 72, pp. 158–166, (2014).
۱۴. نشریه شماره ۲۳۴، "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور، ویرایش اول، (۱۳۹۰).
۱۵. مقدم نیری، محمدرضا، جلیلی قاضی‌زاده، مرتضی و محمدزاده مقدم، ابوالفضل؛ "کاربرد سرباره فولاد در پروژه‌های راه‌سازی"، اولین سمینار فرآوری و کاربردهای سرباره قوس الکتریک، پژوهشکده فولاد دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۴-۱۲۷، (۱۳۸۶).
۱۶. توسلی، حمید، "طرح و کنترل بتن آسفالتی گرم"، چاپ اول، انتشارات قلم، (۱۳۷۲).
17. Kavussi, A. and Modarres, A., "A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2252-2259, (2010).
18. Huang, Y.H., "Pavement Analysis and Design", Prentice Hall, New Jersey, (2004).
19. Anagnos, J.N. and Kennedy T.W., "Practical Method of Conducting The Indirect Tensile Test", Center of Highway Research, University of Texas at Austin, Research Report 98-10, Austin, Texas, (1972).
20. Aksoy, A., Samlioglu, K., Tayfur, S., Ozen, H. "Effect of Various Additives on Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp 11-18, (2005).
21. Li, Q., Jong Lee, H. and Kim, T.W., "A simple fatigue performance model of asphalt mixtures based on fracture energy", *Construction and Building Materials*, Vol. 27, pp. 605-11, (2012).
22. Roque, R., Birgisson, B., Sangpetngam, B. and Zhang, Z.W., "Hot mix asphalt fracture mechanics: a fundamental crack growth law for asphalt mixtures", *Journal Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 71, pp. 816–27, (2002).
23. Birgisson, B., Montepara, A., Romeo, E., Roque, R., Roncella, R. and Tebaldi, G., "Determination of fundamental tensile failure limits of mixtures", *Journal Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 76, pp.303–44, (2007).
24. Mamlouk, M., Souliman, M., and Zeiada, W., "Optimum Testing Conditions to Measure HMA Fatigue and Healing Using Flexural Bending Test", TRB annual meeting, (2012).
25. Xie, J., Chen, J., Shaopeng, W., Lin, J. and Wei, W., "Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag", *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 796–803, (2013).
26. Khodary, M., "Evaluation of Fatigue Resistance for Modified Asphalt Concrete Mixtures Based on

- Dissipated Energy Concept", PhD thesis, Technische Universität Darmstad, (2010).
27. Rowe, G.M. and Bouldin, M.G., "Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures", Proceedings of 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona, Spain, (2000).
28. Tayebali, A., Rowe, A., G.M. and Sousa, J.B., "Fatigue Response of Asphalt Aggregate Mixtures", *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 61, pp. 333-360, (1994).

