

# ارزیابی خستگی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس پارامترهای انرژی

محمود عامری (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

علیرضا خاوندی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی، دانشگاه زنجان

ترک‌های ناشی از خستگی یکی از رایج‌ترین خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی هستند. پژوهشگران روش‌های مختلفی برای ارزیابی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه کرده‌اند. در آزمایش کرنش ثابت، کاهش سختی به میزان ۵۰٪ (معیار قراردادی) به منزله‌ی معیار شکست آسفالت تعریف شده است. در این نوشتار معیارهای مبتنی بر مفهوم انرژی تلف شده شامل «نسبت انرژی»، «نسبت کاهش انرژی» و «نسبت تغییر انرژی تلف شده» با معیار کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰٪ با استفاده از آزمایش تیر خمشی چهارنقطه‌یی و بارگذاری نیمه‌سینوسی مقایسه شده‌اند. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهند که عمر خستگی مبتنی بر معیار «نسبت تغییر انرژی تلف شده» ضمن اینکه بیشترین اختلاف را با عمر خستگی بر اساس معیار کاهش سختی به میزان ۵۰٪ دارد، انطباق بیشتری نیز با ضابطه‌ی شکست تعریف شده برای آن دارد. درحالی‌که عمر خستگی مبتنی بر سایر معیارها با ضابطه‌ی شکست تعریف شده برای آن‌ها متناظر نیست. با توجه به این نتایج، در این نوشتار درصد کاهش سختی معادل با نقطه‌ی «شکست واقعی» به منزله‌ی معیار جدید برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی پیشنهاد شده است.

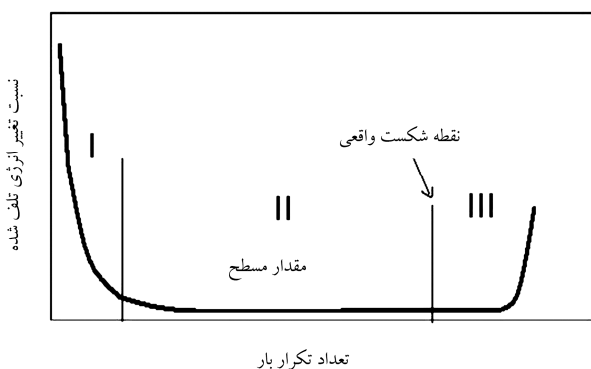
واژگان کلیدی: ترک‌های خستگی، عمر خستگی، تیر خمشی، کاهش سختی، انرژی تلف شده.

## مقدمه

معیار شکست، یکی از مهم‌ترین موضوعات در بررسی رفتار مخلوط‌های آسفالتی در برابر خستگی است. معیار شکست در آزمایش‌های خستگی به روش تنش ثابت و کرنش ثابت با هم متفاوت است. در روش تنش ثابت، به‌وجود آمدن ترک در نمونه به‌منزله‌ی معیار شکست و اتمام آزمایش تعریف شده است. در صورتی‌که به دلیل ثابت ماندن کرنش در طول آزمایش و کاهش یافتن تنش، تعریف نقطه‌ی گسیختگی (شکست) دشوار است. معیاری که برای آزمایش‌های کرنش ثابت در سطح وسیعی به‌کار برده می‌شود، عبارت از تعداد تکرار بار متناظر با کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰٪ است که برخی پژوهشگران ارائه کرده‌اند.<sup>[۱]</sup> همچنین این معیار به‌عنوان استاندارد موقت TP8-94 و استاندارد T321 منتشر شده است.<sup>[۲]</sup> این معیار، علی‌رغم سهولت و گسترده‌ی استفاده، معیاری قراردادی است و نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که در تعداد تکرار بار متناظر با کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰٪، هیچ‌گونه ترکی در نمونه‌ی آسفالتی مشاهده نمی‌شود و این معیار نمی‌تواند نشان‌دهنده‌ی وقوع ترک در نمونه‌ی آسفالتی و شکست آن باشد. بنابراین برخی از پژوهشگران از روش تحلیل براساس انرژی تلف شده استفاده کرده‌اند تا بتوانند عمر خستگی در

مخلوط‌های آسفالتی را تعیین کنند.<sup>[۵]</sup> ماهیت نظری و قابلیت بررسی چگونگی ایجاد خستگی در مخلوط‌های آسفالتی در حین بارگذاری، از مزایای روش انرژی تلف شده محسوب می‌شود.<sup>[۶]</sup> با گسترش استفاده از این روش، معیارهای مختلفی مانند «نسبت انرژی»،<sup>[۱]</sup> «نسبت کاهش انرژی»<sup>[۲]</sup> و «نسبت تغییر انرژی تلف شده» (RDEC)<sup>[۳]</sup> برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه شده‌اند. لیکن ارزیابی عمر خستگی برای یک نمونه‌ی آسفالتی معین با استفاده از این معیارها منجر به نتیجه‌ی یکسان به‌ویژه در حالت کرنش ثابت نمی‌شود.

در این نوشتار با توجه به ایراد وارده به معیار کاهش سختی به میزان ۵۰٪ و نیز یکسان نبودن نتایج برای معیارهای مختلف که همگی آن‌ها مبتنی بر روش انرژی تلف شده هستند، سعی شده است تا با بررسی معیارهای انرژی تلف شده، معیاری انتخاب و معرفی شود که متناظر با تعریف نقطه‌ی شکست (بروز ترک) در لحظه‌ی وقوع ترک باشد، در ضمن با نتایج حاصل از روش انرژی تلف شده برای ارزیابی عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی انطباق داشته باشد. برای این منظور با استفاده از آزمایش تیر خمشی به روش بارگذاری چهار نقطه‌یی، عمر خستگی حاصل از به‌کارگیری معیارهای روش انرژی تلف شده با عمر خستگی حاصل از معیار کاهش سختی به میزان ۵۰٪ که معیاری رایج برای انجام این آزمایش به روش کرنش ثابت



شکل ۱. روند تغییرات نسبت انرژی تلف شده نسبت به تعداد تکرار. [۱۱]

و قسمت دوم بیانگر آن است که درصد ثابتی از انرژی منجر به ایجاد ترک می‌شود. مقدار DEC R در این قسمت را «مقدار مسطح»<sup>۴</sup> می‌نامند. در قسمت سوم، مقدار DEC R افزایش می‌یابد. این حالت نشان می‌دهد که نمونه به حالت ناپایدار رسیده است و قادر به تحمل بارگذاری بیشتری نخواهد بود. محل اتصال قسمت دوم به قسمت سوم را نقطه‌ی «شکست واقعی»<sup>۵</sup> نمونه تعریف کرده‌اند. با توجه به این تعریف می‌توان گفت که معیار DEC R از نظر تئوری نشان‌دهنده‌ی بروز ترک در نمونه‌ی آسفالتی است.

در سال ۲۰۰۴ محققان با در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی، عمر خستگی آن‌ها را بررسی و تحلیل کرده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که معیار «نسبت تغییر انرژی تلف شده» ضمن اینکه مبانی علمی و نظری دارد، عمر خستگی آسفالت را بهتر از معیار کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰٪ توصیف می‌کند. [۱۲]

### تجربه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش به دو روش تهیه شد: الف) نمونه برداری از محل، ب) تهیه نمونه در آزمایشگاه. برای تهیه نمونه‌های میدانی، قبل از بخش قشر آسفالتی، صفحه‌ی فلزی بر روی روسازی موجود قرار داده شد و پس از تراکم قشر آسفالتی و گذشت ۲۴ ساعت از زمان تراکم، صفحه‌ی فلزی به همراه دال آسفالتی روی آن با برش اطراف صفحه از سطح جدا شد. در آزمایشگاه، از دال آسفالتی با استفاده از دستگاه برش نمونه‌هایی به ابعاد  $5 \times 6 \times 38.5$  سانتی‌متر تهیه شد. برای تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی، یک دال آسفالتی به ضخامت ۵ سانتی‌متر و ابعاد  $30 \times 40$  سانتی‌متر با استفاده از غلطک مالشی تهیه و سپس با همان ابعاد نمونه‌های میدانی برش شدند و از هر دال متراکم شده، ۴ نمونه‌ی آزمایشگاهی تهیه شد.

در نمونه‌های میدانی از قیر ۸۵-۱۰۰ پالایشگاه تبریز و در نمونه‌های آزمایشگاهی از دو نوع قیر ۶۰-۷۰ پالایشگاه تهران و ۸۵-۱۰۰ اصفهان استفاده شد. مصالح تمامی نمونه‌ها از جنس آهک دولومیتی بودند که دانه‌بندی آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

درصد قیر بهینه برای طرح مخلوط‌های آسفالتی منطبق بر روش مارشال (ASTM D1559) بود. نمونه‌های آزمایشگاهی در درصد قیر بهینه و همچنین نیم درصد بیشتر از درصد قیر بهینه تهیه شدند. در جدول ۲ مشخصات نمونه‌های آسفالتی آورده شده است.

است، مقایسه و سپس درصد کاهش سختی متناظر با عمر خستگی به دست آمده از معیارهای انرژی تلف شده تعیین شده است. به این ترتیب امکان تعیین درصد کاهش سختی متناظر با نقطه‌ی شکست در نمونه‌های آزمایشی میسر شده است.

### معیارهای انرژی تلف شده برای تعیین عمر خستگی

معیارهای مختلفی برای تعیین عمر خستگی با استفاده از روش انرژی تلف شده ارائه شده است. پژوهشگران نشان دادند که بین انرژی تلف شده‌ی تجمعی و عمر خستگی رابطه‌ی منطقی وجود دارد. در مطالعات SHRP نیز از انرژی تلف شده‌ی تجمعی برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. [۷] با گسترش استفاده از روش انرژی تلف شده برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی، پژوهشگران متعددی تلاش کردند تا شاخص‌های لازم را به منزله‌ی معیار برای سنجش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ارائه کنند. [۸، ۹] لذا از مفهوم «نسبت انرژی» برای تعریف گسیختگی ناشی از خستگی استفاده کردند. در این روش، «نسبت انرژی» برای کرنش ثابت برابر است با حاصل ضرب انرژی تلف شده در سیکل اول بارگذاری ( $W_1$ ) در تعداد کل سیکل بارگذاری ( $N$ ) تقسیم بر انرژی تلف شده در سیکل  $N$ ام بارگذاری ( $W_N$ ) که در رابطه‌ی ۱ ارائه شده است:

$$W_N = \frac{N \cdot W_1}{W_N} \quad (1)$$

و این نتیجه به دست آمد که زمان شروع ترک در نمونه‌ی متناظر با نقطه‌ی تغییر شیب منحنی نسبت انرژی بر حسب تعداد تکرار بار است. ایراد وارد به این روش، احتمال وجود خطا در تعیین نقطه‌ی تغییر شیب منحنی است که بستگی به دقت پژوهشگر در بررسی و تحلیل نتایج آزمایش دارد.

همچنین با استفاده از مفهوم «نسبت کاهش انرژی»، معیار جدیدی برای تعیین تعداد تکرار بار در زمان شروع ترک ارائه شد که در آن «نسبت کاهش انرژی» در روش کرنش ثابت به صورت رابطه‌ی ۲ یعنی تعداد سیکل بارگذاری  $N$ ام تقسیم بر مدول کشسانی در سیکل  $N$ ام تعریف شد. [۹، ۱۰]

$$R_N = \frac{N}{E_N} \quad (2)$$

که در آن،  $R_N$  برابر با نسبت کاهش انرژی است. براساس این معیار، تغییر در شیب منحنی «نسبت کاهش انرژی» بر حسب تعداد تکرار بار، معادل با شروع ترک است. این مفهوم به این معنی است که باید تعداد تکرار بار در کاهش سختی به میزان ۵۰٪ (گسیختگی نمونه) بیشتر از تعداد تکرار بار در نقطه‌ی تغییر شیب منحنی «نسبت کاهش انرژی» بر حسب تعداد تکرار بار (شروع ترک) باشد. برخی پژوهشگران نشان دادند که عمر خستگی حاصل از مفهوم «نسبت کاهش انرژی» با عمر خستگی حاصل از کاهش سختی به میزان ۵۰٪، از این روند تبعیت نمی‌کند. [۶] در این روش نیز احتمال بروز خطا در تعیین نقطه‌ی تغییر شیب منحنی وجود دارد.

برخی دیگر نیز، پارامتری را با عنوان «نسبت تغییر انرژی تلف شده (RDEC)» بر اساس رابطه‌ی ۳ تعریف کردند: [۱۰]

$$RDEC = [DE_a - DE_b] / (DE_a^*(a - b)) \quad (3)$$

در رابطه‌ی ۳  $DE_a$  انرژی تلف شده در سیکل  $a$ ؛  $DE_b$  انرژی تلف شده در سیکل  $b$  است. شکل ۱ روند تغییرات پارامتر DEC R را در طول زمان آزمایش نشان می‌دهد. این منحنی شامل سه قسمت است: قسمت اول نشان‌دهنده‌ی کاهش نسبت انرژی

جدول ۱. دانه بندی نمونه های آزمایش.

اندازه ی الک (میلی متر)	درصد عبوری		
	دانه بندی ۱	دانه بندی ۲	دانه بندی ۳ (نمونه ی میدانی)
۲۵	۱۰۰	-	-
۱۹	۹۵	۱۰۰	۱۰۰
۱۲٫۵	-	۹۵	۹۸
۹٫۵۲۵	۶۳	-	-
۴٫۷۵	۴۳	۶۰	۵۷
۲٫۳۷۵	۳۱	۴۳	۴۵
۰٫۳	۹	۱۳	۱۳
۰٫۰۷۵	۴	۷	۶

جدول ۲. مشخصات مخلوط آسفالتی.

نام نمونه	نوع دانه بندی	نوع قیر	درصد قیر	درصد فضای خالی
۱	۱	۶۰-۷۰	۴٫۳	۵٫۱
۲	۱	۶۰-۷۰	۴٫۸	۴
۳	۱	۸۵-۱۰۰	۳٫۹	۶٫۱
۴	۱	۸۵-۱۰۰	۴٫۴	۴٫۶
۵	۲	۶۰-۷۰	۴٫۷	۵٫۱
۶	۲	۶۰-۷۰	۵٫۲	۴٫۶
۷	۲	۸۵-۱۰۰	۴٫۳	۶
۸	۲	۸۵-۱۰۰	۴٫۸	۴٫۴
۹	۳	۸۵-۱۰۰	۵٫۲	۴٫۷

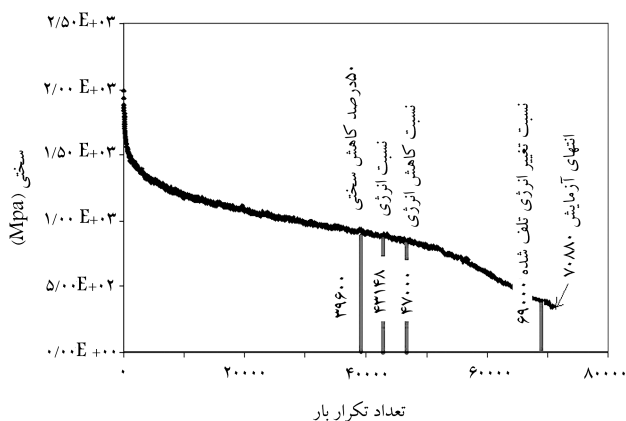
## نتایج

نتایج آزمایش ها و عمر خستگی نمونه های آزمایش شده بر اساس روش های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. در ستون اول، نوع نمونه ها، در ستون دوم سختی اولیه ی نمونه ها و در ستون سوم، عمر خستگی حاصل از معیار کاهش سختی به میزان ۵۰٪ ارائه شده است. در سایر ستون ها، عمر خستگی حاصل از معیارهای انرژی تلف شده آورده شده است. البته برای هر معیار، میزان کاهش سختی متناظر با عمر خستگی حاصل از این معیارها در ستون مجاور عمر خستگی آورده شده است.

در این نوشتار، نحوه ی تعیین عمر خستگی بر اساس معیارهای مورد بررسی برای نمونه ی شماره ی ۲ در شکل های ۲ تا ۵ نشان داده شده اند. شکل ۲، منحنی کاهش سختی و عمر خستگی (تعداد تکرار بار) حاصل از روش های مورد بررسی را نشان می دهد. این منحنی مستقیماً از نتایج آزمایش تیر خمشی به دست آمده است. همان گونه که در این شکل ملاحظه می شود، عمر خستگی برای نمونه ی شماره ی ۲ بر مبنای معیار کاهش سختی به میزان ۵۰٪، برابر با ۳۹۶۰۰ است. شکل ۳، منحنی نسبت تغییر انرژی تلف شده - تعداد تکرار بار را برای نمونه ی شماره ی ۲ نشان می دهد. با استفاده از مقدار انرژی تلف شده حاصل از آزمایش و رابطه ی ۳، مقدار نسبت انرژی تلف شده محاسبه شده است. این منحنی دقیقاً منطبق با منحنی

## روش آزمایش

برای انجام آزمایش خستگی از دستگاه خمش چهار نقطه یی استفاده شد. تمامی آزمایش ها مطابق با استاندارد AASHTO TP-۸-۹۴ در دمای ۲۰ درجه با بارگذاری نیمه سینوسی و در سطح کرنش ۱۰۰۰ میکرون انجام شدند.<sup>[۱۰]</sup> برای آزمایش های انجام شده، اتمام آزمایش به دلیل توقف دستگاه به صورت خودکار (به دلیل ایجاد ترک در نمونه) یا رسیدن به تعداد یک میلیون مرتبه بارگذاری بود که در تمامی آزمایش ها قبل از رسیدن به این تعداد بارگذاری، دستگاه متوقف شد.



شکل ۲. منحنی کاهش سختی برحسب تعداد تکرار برای نمونه ی شماره ۲.

جدول ۳. عمر خستگی بر اساس روش های مختلف.

نوع نمونه	سختی اولیه (Mpa)	عمر خستگی (کاهش ۵۰٪ سختی)	روش نسبت کاهش انرژی		روش نسبت تغییر انرژی تلف شده	
			کاهش سختی (%)	عمر خستگی	کاهش سختی (%)	عمر خستگی
۱	۲۲۷۲	۱۲۹۰۰	۵۴	۳۱۰۰۰	۵۹	۵۱۸۰۰
۲	۱۸۳۸	۳۹۶۰۰	۵۴	۴۷۰۰۰	۷۸	۶۹۰۰۰
۳	۱۶۶۸	۱۲۵۰۰	۶۴	۶۲۰۱۴	۶۵	۶۸۰۰۰
۴	۱۹۸۹	۱۴۵۸۰	۶۵	۸۴۰۰۰	۶۷	۱۰۵۴۰۰
۵	۲۵۸۳	۵۱۳۶۷	۵۵	۵۷۵۰۰	۶۱	۶۱۵۰۰
۶	۱۸۸۵	۹۲۱۰۰	۳۶	۷۳۴۴۰	۶۸	۱۱۴۰۰۰
۷	۲۱۴۳	۲۴۲۰۰	۵۴	۳۶۸۵۱	۵۸	۶۱۰۰۰
۸	۲۰۸۹	۹۸۳۷۰	۵۳	۱۴۷۸۰۰	۵۹	۱۷۵۰۰۰
۹	۹۲۸	۱۴۸۷۵	۶۶	۵۵۸۰۰	۶۷	۵۶۰۰۰
میانگین		۴۰۰۵۵	۵۶	۶۶۱۵۶	۶۵	۸۴۶۳۳

سختی متناظر با عمر خشکی حاصل از این روش‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

### تحلیل نتایج

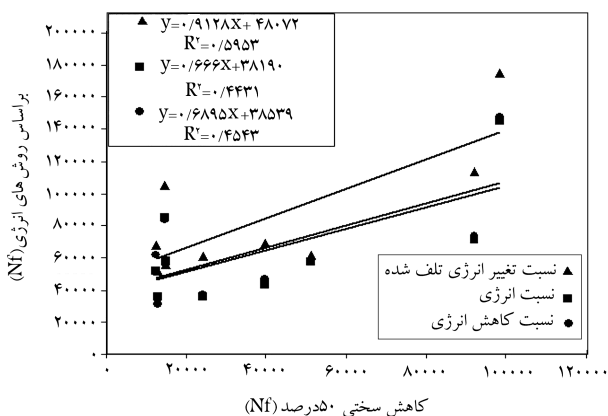
همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در روش کاهش سختی به میزان ۵٪، عمر خشکی به‌طور متوسط ۴۴۰۰۰ مرتبه بارگذاری کمتر از عمر خشکی مبتنی بر پارامتر نسبت تغییر انرژی تلف شده، ۲۴۰۰۰ مرتبه بارگذاری کمتر از عمر خشکی مبتنی بر پارامتر نسبت انرژی و ۲۶۰۰۰ مرتبه بارگذاری کمتر از عمر خشکی مبتنی بر پارامتر نسبت کاهش انرژی است.

در تمامی نمونه‌ها به غیر از نمونه‌ی شماره ۶، عمر خشکی‌یی که بر اساس معیار کاهش سختی به میزان ۵٪ به دست آمده است، از عمر خشکی به دست آمده از سایر روش‌ها کمتر است. عمر خشکی تعیین شده بر اساس پارامتر نسبت تغییر انرژی تلف شده از عمر خشکی سایر روش‌ها (به غیر از نمونه‌ی شماره ۹) بیشتر است. درصد کاهش سختی آورده شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که در سه روش مبتنی بر مفهوم انرژی، عمر خشکی حاصل از این روش‌ها، دارای کاهش سختی بیشتر از ۵٪ هستند. البته به غیر از نمونه‌ی شماره ۶ که عمر خشکی آن بر اساس روش نسبت انرژی، معادل با کاهش سختی به میزان ۳۵٪ و با روش نسبت کاهش انرژی برابر با ۳۶٪ کاهش سختی است.

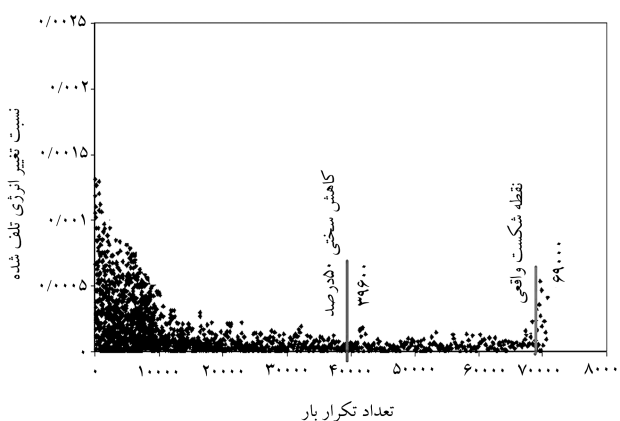
شکل ۶، رابطه‌ی بین عمر خشکی بر اساس کاهش سختی به میزان ۵٪ را با معیارهای مختلف انرژی نشان می‌دهد. علی‌رغم اینکه عمر خشکی به روش نسبت تغییر انرژی تلف شده، بیشترین اختلاف را با عمر خشکی بر مبنای کاهش سختی به میزان ۵٪ دارد، لیکن روند تغییرات آن‌ها نسبت به دو روش دیگر، بیشترین تطابق را دارد و نسبت به دو معیار دیگر دارای ضریب همبستگی بیشتری هستند.

شکل ۷، رابطه‌ی بین عمر خشکی بر اساس نسبت تغییر انرژی تلف شده با نسبت انرژی و نسبت کاهش انرژی را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که بین این روش‌ها، تطابق نسبی خوبی وجود دارد. شکل ۸، نشان می‌دهد که دو معیار نسبت انرژی و نسبت کاهش انرژی بر یکدیگر منطبق هستند که با توجه به مفاهیم این دو روش، این رفتار کاملاً قابل پیش‌بینی بود.

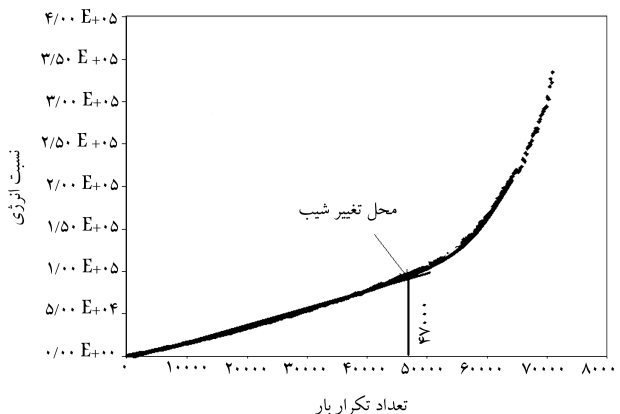
جدول ۴، میانگین درصد کاهش سختی به روش‌های مختلف را نشان می‌دهد. در روش مبتنی بر پارامتر نسبت تغییر انرژی تلف شده، عمر خشکی به‌طور متوسط برابر



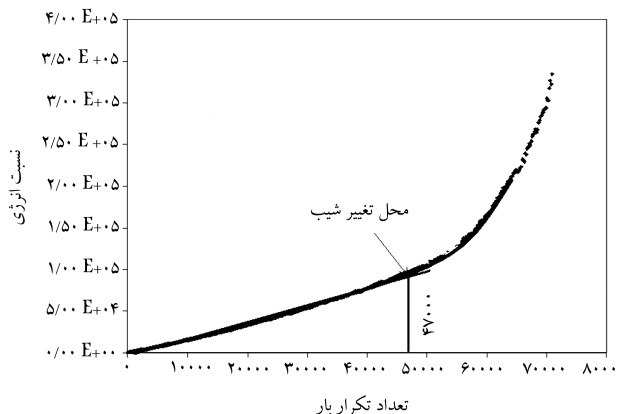
شکل ۶. رابطه‌ی بین عمر خشکی بر اساس کاهش ۵۰ درصدی سختی و نسبت تغییر انرژی تلف شده، نسبت کاهش انرژی و نسبت انرژی.



شکل ۳. منحنی نسبت تغییر انرژی تلف شده بر حسب تعداد تکرار برای نمونه‌ی شماره ۲.



شکل ۴. منحنی نسبت کاهش انرژی بر حسب تعداد تکرار برای نمونه‌ی شماره ۲.



شکل ۵. منحنی نسبت انرژی بر حسب تعداد تکرار برای نمونه‌ی شماره ۲.

ارائه شده در شکل ۱ است. عمر خشکی با استفاده از معیار نسبت تغییر انرژی تلف شده برای نمونه‌ی ۲ برابر با ۶۹۹۰۰ است. میزان کاهش سختی متناظر با این عمر خشکی برابر با ۷۸٪ است که در جدول ۳ آورده شده است. مقدار سختی و میزان کاهش آن نسبت به سختی اولیه با استفاده از شکل ۲ تعیین شده است. در شکل‌های ۴ و ۵، منحنی‌های «نسبت کاهش انرژی» و «نسبت انرژی» بر حسب تعداد تکرار بار و نحوه‌ی تعیین عمر خشکی آورده شده است. مقادیر «نسبت انرژی» و «نسبت کاهش انرژی» با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شده است. میزان

با این مفروضات باید عمر خستگی در نقطه‌ی شکست واقعی و کاهش ۵٪ سختی تقریباً برابر و عمر خستگی بر مبنای معیارهای نسبت انرژی و نسبت کاهش انرژی کمتر از آن‌ها باشد. درحالی‌که این فرض فقط در نتایج آزمایش نمونه‌ی شماره‌ی ۶ صدق می‌کند و در سایر نمونه‌ها، عمر خستگی بر مبنای معیارهای نسبت انرژی و نسبت کاهش انرژی از عمر خستگی بر مبنای کاهش سختی به میزان ۵٪ بیشتر است. همچنین عمر خستگی بر مبنای نسبت تغییر انرژی تلف شده، بیشترین اختلاف را با عمر خستگی بر مبنای کاهش سختی به میزان ۵٪ در مقایسه با سایر معیارهای تعریف شده، دارد. این اختلاف‌ها، نشان می‌دهد که معیار کاهش سختی اولیه به میزان ۵٪، از منظر رویکرد انرژی، معیار مناسبی برای نشان دادن گسیختگی واقعی نیست.

از طرفی همان‌گونه که در شکل ۲ برای نمونه‌ی شماره ۲ مشاهده می‌شود، عمر خستگی در نقطه‌ی «شکست واقعی»، نسبت به سایر روش‌ها با تعداد تکرار بار در هنگام توقف خودکار دستگاه، که نشان‌دهنده‌ی وجود آمدن ترک و گسیختگی در نمونه است، تفاوت کمتری دارد. این موضوع برای تمامی نمونه‌ها صادق است. بنابراین می‌توان گفت که تعداد تکرار بار به دست آمده از پارامتر «نسبت تغییر انرژی تلف شده» به واقعیت (به وجود آمدن ترک) نزدیک است. همچنین این پارامتر برخلاف معیار کاهش سختی که معیاری قراردادی است، بر پایه‌ی مفهوم انرژی تلف شده تعریف شده است و دارای منطق مناسب‌تری نسبت به مفهوم قراردادی کاهش سختی به میزان ۵٪ است. این معیار می‌تواند مبنای جدیدی در بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی در انجام آزمایش به روش کرنش ثابت باشد.

نتایج حاصل نشان می‌دهد که نقطه‌ی شکست به طور متوسط در نمونه‌های آزمایش شده، معادل با ۶۵٪ کاهش سختی است. در نتیجه کاهش سختی به میزان ۶۵٪ می‌تواند به منزله‌ی معیار جدیدی برای تعیین عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شود.

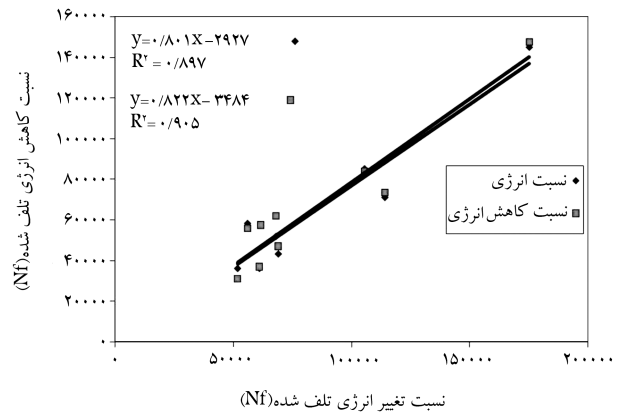
برای اطمینان از این فرض (کاهش سختی به میزان ۶۵٪)، از آزمون معنی دار  $t$  فیشر بر روی اختلاف میانگین‌ها استفاده شد. فرض صفر و فرض خلاف نیز به ترتیب زیر تعریف شدند:

فرض صفر: میانگین برابر ۶۵ است.  $H_0$   
 فرض خلاف: میانگین برابر ۶۵ نیست.  $H_1$

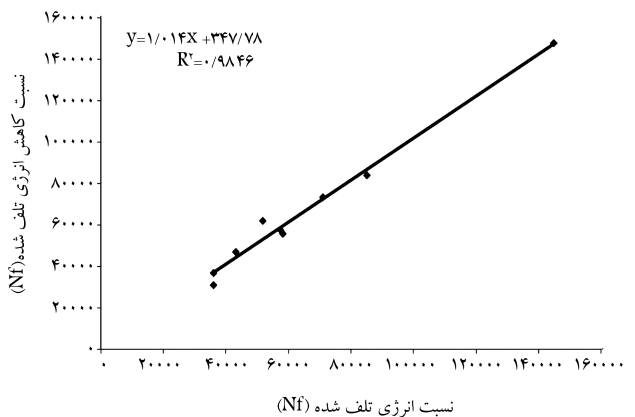
با سطح معنی‌داری  $\alpha = 0.05$ ، سطح اطمینان برابر ۹۵٪ در نظر گرفته شد. در صورتی‌که  $t$  فیشر محاسبه شده از  $t$  بحرانی (به دست آمده از جدول آماری مربوطه) در سطح معنی‌داری ۰٫۰۵، کمتر باشد، آنگاه فرض صفر قابل قبول خواهد بود. نتایج محاسبات در جدول ۵ آورده شده است. نتایج مندرج در این جدول نشان می‌دهد که فرض صفر قابل قبول است. به عبارت دیگر مقدار میانگین پارامتر تحت بررسی در سطح اطمینان مورد نظر (۹۵٪) برابر با کمیت مندرج در جدول (یعنی عدد ۶۵) است. این آزمون آماری نشان می‌دهد که می‌توان عمر خستگی بر مبنای کاهش سختی به میزان ۶۵٪ را برابر با نقطه‌ی شکست واقعی در نظر گرفت.

جدول ۵. نتایج آزمون  $t$  فیشر.

سطح معنی‌دار ( $\alpha$ )	متوسط $\bar{x}$	واریانس ( $s^2$ )	$t$ محاسبه شده	$t$ بحرانی	نتیجه
۰٫۰۵	۶۴٫۶۶	۳۵٫۷۷	۰٫۱۶۷	۲٫۳۰۶	قابل قبول



شکل ۷. رابطه‌ی بین عمر خستگی بر اساس نسبت تغییر انرژی تلف شده، نسبت انرژی و نسبت کاهش انرژی.



شکل ۸. رابطه‌ی بین عمر خستگی بر اساس نسبت انرژی و نسبت کاهش انرژی.

جدول ۴. میانگین کاهش سختی بر اساس روش‌های مختلف.

معیار	میانگین کاهش سختی	انحراف از معیار
نسبت انرژی	۵۶	۶٫۳۵
نسبت کاهش انرژی	۵۶	۱۰٫۲۲
نسبت تغییر انرژی تلف شده	۶۵	۹٫۱۲

۶۵٪ و در دو روش دیگر برابر با ۵۶٪ کاهش سختی است. اگرچه ممکن است چنین به نظر برسد که این اختلاف ۶ الی ۱۵ درصدی در کاهش سختی با کاهش سختی به میزان ۵٪ به دلیل پراکندگی نتایج آزمایش‌های خستگی و دامنه‌ی وسیع ضرایب تبدیل نتایج آزمایشگاهی به میدانی، اهمیت چندانی ندارد (یعنی معیار کاهش سختی به میزان ۵٪ قابل قبول است)، لیکن با مراجعه به فرضیات به کار رفته در تعریف معیارهای شکست، ملاحظه می‌شود که مقادیر عمرهای خستگی به دست آمده با این مفروضات در تضاد هستند. عمر خستگی معادل با سختی کاهش یافته به میزان ۵٪، به صورت قراردادی به عنوان نقطه‌ی شکست برای نمونه‌ی آسفالتی تعریف شده است، یعنی نمونه قادر به تحمل بار نیست. این تعریف از نظر تئوری با تعریف نقطه‌ی شکست واقعی (روش مبتنی بر نسبت تغییر انرژی تلف شده) مطابقت دارد. درحالی‌که در دو معیار دیگر (نسبت انرژی و نسبت کاهش انرژی)، فرض بر این است که تعداد تکرار بار منطبق با نقطه‌ی تغییر شیب منحنی‌های مذکور، زمان شروع ترک خوردگی در نمونه‌ی آسفالتی است.

## نتیجه‌گیری

در این نوشتار، عمر خستگی براساس معیارهای مبتنی بر انرژی تلف‌شده و کاهش سختی به میزان ۵۰٪ با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل عبارتند از:

۱. عمر خستگی حاصل از این روش‌ها با یکدیگر متفاوت است. عمر خستگی حاصل از معیار «نسبت تغییر انرژی تلف‌شده» (RDEC) از سایر روش‌ها بیشتر است. عمر خستگی حاصل از این روش به تعداد تکرار بار در هنگام توقف خودکار دستگاه (به دلیل ایجاد ترک) نزدیک‌تر است؛
۲. تطابق عمر خستگی با درصد کاهش سختی نشان می‌دهد که مقدار کاهش سختی در روش‌های انرژی تلف‌شده به‌ویژه در روش «نسبت تغییر انرژی تلف‌شده» از ۵۰٪ بیشتر است. این نتیجه نشان می‌دهد که از منظر روش انرژی

تلف‌شده، معیار کاهش سختی به میزان ۵۰٪ نمی‌تواند نشان‌دهنده‌ی بروز ترک در نمونه و شکست مخلوط‌های آسفالتی باشد؛

۳. در این نوشتار، درصد کاهش سختی معادل با نقطه‌ی شکست واقعی به‌عنوان معیار کاهش سختی جدید پیشنهاد شده است. بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش مقدار آن برابر با کاهش سختی اولیه به میزان ۶۵٪ است.

## تقدیر و تشکر

بدین وسیله از آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری که در تهیه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام قسمتی از آزمایش‌ها همکاری و مساعدت کردند و نیز اداری کل راه و ترابری استان آذربایجان شرقی که در تهیه‌ی نمونه‌های میدانی همکاری کردند، تقدیر و تشکر می‌شود.

## پانویس

1. energy ratio
2. reduced energy ratio
3. rate of dissipated energy change
4. plateau value
5. true failure

## منابع

1. Pronk, A.C. and Hopman, P.C. "Energy dissipation: The leading factor of fatigue", Highway Research: Sharing the Benefits, *Proceedings of the conference, the United States strategic highway research program*, London, pp.255-267 (1990).
2. Tayebali, A.A.; Row, G.M. and Sousa, J.B. "Fatigue response of asphalt aggregate mixture", *Journal of The Association of Paving Technologists*, **44**, pp. 1-37 (1975).
3. AASHTO TP8-94 "Method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending", *AASHTO Provisional Standards*, (May 2002).
4. AASHTO T321 "Method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending", *AASHTO Standards*, (Jan 2007).
5. Al-Khateeb, G. and Shenoy, A. "A distinctive fatigue failure criterion", *Journal of the association of asphalt paving technologists*, **46**, pp. 585-621 (2004).
6. Shen, S. and Carpenter, S.H. "Development of an asphalt fatigue model based on energy principles", *Journal of the association of asphalt paving technologists(AAPT)*, **76**, pp. 525-574 (2007).
7. SHRP "A-404, fatigue response of asphalt-aggregate mixes", Strategic highway research program, *National research council*, (1994).
8. Hopman, P.C.; Kunst, P.A.J.C. and Pronk, A.C., "A renewed interpretation method for fatigue measurements, verification of miner's rule", *4<sup>th</sup> Eorobitume symposium in Madrid*, **1**, pp. 557-561 (October 1989).
9. Rowe, G.M. "Performance of asphalt mixtures in the trapezoidal fatigue test", *Journal of the association of asphalt paving technologists*, **62**, pp. 344-384 (1993).
10. Carpenter, S.H. and Shen,S. "A dissipated energy approach to study HMA healing in fatigue", *In Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, (1970), TRB, National Research Council, Washington D. C., pp. 178-185 (2006).
11. Carpenter, S.H.; Ghuzlan, K.A. and Shen, Shihui "Fatigue endurance limit for highway and airport pavement". *Transportation Research Record (TRR): Journal of the Transportation Research Board*, (1832), TRB, National Research Council, Washington D.C., pp.131-138 (2003).
12. Daniel, J.S.; Bissiri, W. and Kim, Y.R., "Fatigue evaluation of asphalt mixtures using dissipated energy and viscoelastic continuum damage approaches", *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **46**, pp.557-583 (2004).