

## ارایه مدل خستگی آزمایشگاهی برای مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)

امیر مدرس\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران  
حمیدرضا حامدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران  
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amirmodarres2003@yahoo.com  
دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۲۰

### چکیده

ترک‌های خستگی یکی از مهم‌ترین خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی‌اند. از این رو، آگاهی از خصوصیات خستگی می‌تواند نقش مهمی در طراحی روسازی جاده‌ها ایفا کند. اطلاعات کافی در زمینه خصوصیات خستگی مخلوط اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET) وجود ندارد. در این تحقیق، آزمایش‌های مدول برجهندگی و خستگی در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. ضایعات PET در مقادیر ۲ تا ۱۰ درصد (نسبت به وزن قیر) با روش خشک به مخلوط اضافه شد. برنامه اصلی این تحقیق توسعه مدل خستگی مخلوط اصلاح شده با PET است. نتایج نشان داد که عمر خستگی مخلوط آسفالتی وابسته به کرنش اولیه است و با کاهش دما شیب نمودارهای خستگی کاهش می‌یابد. در کرنش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو، با افزایش مدول برجهندگی عمر خستگی کاهش می‌یابد، ولی در کرنش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو نتیجه برعکس است. در نهایت براساس نتایج آزمایشگاهی بهترین مدل خستگی طبق کرنش حد مرزی ۲۱۰ میکرو محاسبه شد. مدل خستگی نهایی وابسته به مقدار کرنش اولیه و سختی مخلوط اصلاح شده است.

واژه‌های کلیدی: PET، مدل خستگی، کرنش اولیه، مدول برجهندگی، عمر خستگی

### ۱- مقدمه

ترک خستگی یکی از انواع خرابی‌هاست که به‌طور مستقیم عمر روسازی آسفالتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور معمول اعمال بار قائم ترافیکی به لایه آسفالتی سبب ایجاد تنش‌های فشاری افقی در نیمه بالایی لایه و تنش کششی افقی در نیمه پایینی لایه می‌شود. کرنش‌هایی که در اثر این تنش‌ها به وجود می‌آیند (به‌ویژه کرنش کششی در پایین لایه)، در نهایت در اثر تکرار بار سبب شکست خستگی در آن لایه می‌شوند. ترک‌ها در پایین لایه توسعه یافته و در اثر تکرار بار به‌صورت عمودی انتشار می‌یابند (DeBeer, 1990). خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی را می‌توان با استفاده از روش‌های انرژی و مکانیک شکست ارزیابی کرد (Park, 2008;

Baghaee Moghaddam et al., 2011). در دماهای زیاد، شکست‌هایی که در اکثر مخلوط‌های آسفالتی به‌وجود می‌آید، خرابی‌ها مربوط به تغییر شکل است (مثل شیارشدگی)؛ ولی در دماهای کم و متوسط ترک‌های خستگی بیشتر اتفاق می‌افتد. اکثر استانداردهای اولیه مربوط به آزمایش خستگی، پاسخ خستگی مخلوط آسفالتی را در دماهای متوسط (مثل ۲۰ درجه سانتی‌گراد) آنالیز کرده‌اند. با این حال، اطلاعات کافی در مورد این پدیده در دماهای کم وجود ندارد. در دماهای کم مصالح بیش از حد سخت می‌شود و نتایج تحقیقات نشان داد که در کرنش‌های کم، تعداد سیکل‌های منجر به ترک‌خوردگی بسیار زیاد است و معیار خستگی، معیار تعیین‌کننده و بحرانی شناخته

خستگی در سطوح تنش کم افزایش بیشتری دارد (نسبت به مخلوط اصلاح نشده). مدل خستگی ارایه شده در این تحقیق شامل یک رابطه ریاضی بین تنش - عمر خستگی است و نتایج حاصل از مدل نشان داد که اصلاح مخلوط با الیاف پلی استر تأثیر بهتری در خصوصیات خستگی مخلوط آسفالتی نسبت به دو نوع الیاف دیگر داشته است (Qunshan et al., 2009). در تحقیق دیگر تأثیر فرکانس بارگذاری و دما در عمر خستگی مخلوط آسفالتی بررسی شد. آزمایش خستگی در دماهای ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی گراد و فرکانس‌های بارگذاری ۰٫۳، ۰٫۵، ۰٫۸ و ۱٫۰ هرتز و سطوح مختلف تنش انجام گرفت. همچنین دو مدل خستگی شامل رابطه ریاضی بین کرنش و فرکانس با عمر خستگی ارایه شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما و فرکانس بارگذاری، عمر خستگی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. بهترین مدل برازش شده از رابطه فرکانس با عمر خستگی، تابع نمایی بوده و ضریب همبستگی در هر دو دما بالا بوده است. طبق این مدل، نرخ افزایش عمر خستگی در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد نسبت به ۳۰ درجه سانتی گراد بیشتر بوده و تفاوت بین عمر خستگی در سطوح تنش پایین نسبت به سطوح تنش بالا بیشتر است. ضریب همبستگی مدل‌های برازش شده در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد بین ۰٫۹ تا ۰٫۹۲ و در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد بین ۰٫۷۸۱ تا ۰٫۹۴۶ بود (Al-khateeb and Ghuzlan, 2013).

در مطالعه دیگر خصوصیات خستگی مخلوط اصلاح شده با ضایعات پودر آهن بررسی شد. آزمایش خستگی در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد و سطوح مختلف تنش انجام گرفت. سپس، مدل خستگی با استفاده از یک رابطه ریاضی بین کرنش با عمر خستگی ارایه شد. نتایج نشان داد که با کاهش دما مقدار کرنش کاهش می‌یابد و افزایش دما اثر منفی بر خصوصیات خستگی مخلوط اصلاح شده دارد. براساس مدل ارایه شده، با افزایش کرنش عمر خستگی کاهش می‌یابد و پودر آهن تأثیر زیادی در کاهش کرنش کششی نهایی نمونه‌ها و افزایش عمر خستگی دارد (Arabani and Mirabdolazimi, 2011).

در مطالعه‌ای خصوصیات سختی و خستگی مخلوط‌های HMA و SMA در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد ارزیابی شد. سه نوع دانه بندی با بزرگترین اندازه سنگدانه ۹/۵ و ۱۲/۵ و ۱۹ میلی متر برای هر دو نوع مخلوط در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما، سختی مخلوط‌ها و عمر

نمی‌شود. بنابراین رابطه عمر خستگی و کرنش در دماهای مختلف اهمیت ویژه‌ای دارد. آزمایش خستگی با دو روش تنش ثابت و کرنش ثابت انجام می‌گیرد. ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی نتایج مختلفی را در مورد تأثیر سختی بر عمر خستگی مخلوط آسفالتی نشان می‌دهد. در روش تنش ثابت، مخلوط سخت تر عمر خستگی بیشتر و در روش کرنش ثابت عمر خستگی کمتری دارد (Tayebali et al., 1994). همچنین در شرایط مشابه، نتایج نشان داد که عمر خستگی در روش کرنش ثابت بیشتر از روش تنش ثابت است (SHRP-A-400, 1994). برخی تحقیقات نشان دادند که رابطه مستقیمی بین عمر خستگی و سختی مخلوط آسفالتی وجود دارد (Moghadas Nejad et al., 2010 ; Baghaee Moghaddam et al., 2011). ولی نمی‌توان به عنوان یک نتیجه کلی این موضوع را مورد قبول دانست. با کاهش دما سختی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد و طبق آنچه گفته شد، در محدوده کرنش‌های مختلف کاهش دما می‌تواند سبب افزایش یا کاهش عمر خستگی شود.

استفاده از مواد افزودنی مثل انواع مختلفی از پلیمرها و الیاف‌ها یک راه حل برای افزایش طول عمر خدمت‌دهی روسازی جاده‌هاست. تحقیقات قبلی نشان داد که افزودن پلیمرها و الیاف‌ها سبب افزایش چسبندگی بین سنگدانه‌ها و قیر در مخلوط می‌شود (Xu et al., 2010 ; Jahromi and Khodaii, 2008). در سال‌های اخیر استفاده از مواد ضایعاتی برای اصلاح مخلوط آسفالتی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از این مواد سبب کاهش هزینه‌ها و کاهش آلودگی زیست محیطی حاصل از این مواد می‌شود. استفاده مجدد از ضایعات به خصوص در برخی مواد مانند ظروف پلاستیکی مفید است. از جمله این مواد می‌توان به ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)<sup>۱</sup> اشاره کرد. نتایج بررسی نمودارهای عمر خستگی - کرنش اولیه نشان داد که مقدار مشخصی از کرنش وجود دارد (کرنش حد مرزی) که در مقادیر بیش از آن با افزایش دما عمر خستگی افزایش می‌یابد و در مقادیر کمتر از کرنش حد مرزی نتیجه برعکس است (Modarres, 2013).

در تحقیقی خصوصیات خستگی مخلوط اصلاح شده با سه نوع الیاف ارزیابی شد. از الیاف سلولزی، پلی استر و معدنی استفاده شد و آزمایش خستگی در سطوح تنش مختلف در دمای ۱۵ درجه سانتی گراد انجام گرفت. نتایج نشان داد که عمر

بنابر آزمایش مدول برجهندگی برابر ۰/۲ درصد (نسبت به وزن سنگدانه‌ها) بود. در مقادیر بیشتر، سختی مخلوط اصلاح شده کاهش یافت، ولی عمر خستگی مخلوط اصلاح شده روند صعودی داشت. دو مدل خستگی بر مبنای رابطه تنش و کرنش با عمر خستگی ارایه شد. نتایج نشان داد که بهترین مدل برازش شده یک تابع توانی بود که ضریب همبستگی بالایی داشت (Baghaee Moghaddam et al., 2012). اطلاعات کافی درباره خصوصیات خستگی مخلوط اصلاح شده با PET به خصوص در محدوده‌های دمایی مختلف وجود ندارد. بنابراین به دلیل احتمال وقوع ترک خستگی در دماهای کم و متوسط، بررسی رفتار خستگی مخلوط اصلاح شده با PET در این محدوده دمایی مناسب است. همچنین یافتن یک رابطه بین مدول سختی، کرنش و عمر خستگی برای این مخلوط می‌تواند مفید باشد. در این تحقیق آزمایش‌های سختی و خستگی برای مخلوط‌های اصلاح شده با PET در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. سپس با استفاده از تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS مدل خستگی مخلوط‌های اصلاح شده با PET معرفی شد.

## ۲- مواد و مطالعات آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح و افزودنی

مصالح استفاده شده در این تحقیق شامل قیر، مصالح سنگی و ضایعات PET است. نمونه‌های آسفالتی با استفاده از قیر ۷۰-۶۰ ساخته شده‌اند که مشخصات آن در جدول ۱ مشاهده می‌شود. مصالح سنگی به کاررفته دارای دانه‌بندی ۱۲/۵-۰ میلی‌متر بود که دانه‌بندی آنها در جدول ۲ ارایه شده است. ضایعات PET به‌عنوان افزودنی در این تحقیق استفاده شد. بطری‌های PET به اندازه‌های کوچک بریده شد و توسط مخلوط‌کن خرد و سپس الک شد. در جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب دانه‌بندی PET و وزن مخصوص مصالح سنگی و افزودنی مشخص است.

خستگی کاهش می‌یابد. همچنین عمر خستگی و سختی مخلوط‌های HMA بیشتر از SMA (با دانه‌بندی یکسان) است و مخلوط ریزدانه‌تر عمر خستگی بیشتری دارد. مدل خستگی ارایه شده در تحقیق یادشده شامل یک رابطه بین تنش و عمر خستگی است و مدل برازش شده برای هر دو نوع مخلوط همبستگی قوی داشته است (Moghadas Nejad et al., 2010).

عربانی و همکاران در مطالعه خود مدل خستگی مخلوط‌های اصلاح شده با ضایعات شیشه را معرفی کردند. آزمایش خستگی در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت و مدل برازش شده بر مبنای رابطه کرنش با عمر خستگی ارایه شد. نتایج نشان داد که با افزایش کرنش، عمر خستگی کاهش می‌یابد. خرده شیشه تأثیر زیادی در کاهش کرنش کششی ندارد، ولی عمر خستگی را بهبود می‌بخشد. مدل برازش شده برای مخلوط‌های اصلاح نشده و اصلاح شده همبستگی قوی داشت و براساس مدل در کرنش ۱۰۰ میکرو، عمر خستگی مخلوط حاوی خرده شیشه، ۹/۲ درصد بیشتر از عمر خستگی مخلوط اصلاح نشده بود (Arabani et al., 2012).

در یک تحقیق آزمایش خستگی با تیرچه خمشی در مخلوط آسفالتی ریزدانه و درشت‌دانه و دو نوع قیر انجام گرفت. در این تحقیق آزمایش خستگی در دماهای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت و مدل خستگی براساس رابطه کرنش با عمر خستگی معرفی شد. نتایج نشان داد که مخلوط آسفالتی ریزدانه‌تر و قیر با درجه نفوذ ۱۰۰-۸۵ عمر خستگی بیشتری نسبت به قیر با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ دارد. شیب مدل‌های برازش شده بین ۲/۰۳ تا ۴/۲۵ است و با افزایش کرنش عمر خستگی کاهش می‌یابد و با کاهش دما شیب نمودارهای خستگی کم می‌شود (Hafeez et al., 2013). در تحقیق دیگری آزمایش خستگی به‌روش تیرچه خمشی بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. مدل ارایه شده وابسته به کرنش کششی افقی و مدول الاستیسیته مخلوط آسفالتی بوده است (Ziari and khabiri, 2007).

بر مبنای نتایج به دست آمده در یک تحقیق افزودن PET سبب افزایش عمر خستگی شد، درحالی که درصد بهینه PET

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های قیر استفاده شده

مقدار	واحد	استاندارد	ویژگی
۱/۰۱۳	گرم بر سانتی متر مکعب	ASTM D70	وزن مخصوص
۶۵	دهم میلی متر	ASTM D5	درجه نفوذ
۵۰	درجه سانتی گراد	ASTM D36	نقطه نرمی
۳۱۴	درجه سانتی گراد	ASTM D92	نقطه اشتعال

جدول ۲. دانه‌بندی سنگی

اندازه الک (میلی متر)	۱۲/۵	۹/۵	۴/۷۵	۲/۳۶	۰/۳	۰/۰۷۵
محدوده درصد رد شده از الک (%)	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۵۵-۸۵	۳۲-۶۷	۷-۲۳	۲-۱۰
درصد وزنی انتخاب شده (%)	۱۰۰	۹۵	۶۹	۵۰	۱۵	۲

جدول ۳. دانه‌بندی PET

اندازه الک (میلی متر)	درصد عبوری
۱/۱۸	۱۰۰
۰/۴۲۵	۰

جدول ۴. وزن مخصوص مصالح سنگی و PET

مشخصه	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
مصالح درشت‌دانه	۲/۴۹۸
مصالح ریزدانه	۲/۴۶۷
فیلر	۲/۶۶۵
PET	۱/۰۸

## ۲-۲ - شرایط و روش‌های آزمایش

برنامه اصلی این تحقیق شامل آزمایش‌های مدول برجهنگی<sup>۲</sup> و خستگی<sup>۳</sup> بود که با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای و روش کشش غیرمستقیم انجام گرفت. مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های آسفالتی نیز مطابق روش استاندارد ASTM C496 تعیین شد و نتایج آن در محاسبه سطح تنش مورد نیاز در آزمایش‌های مدول برجهنگی و خستگی استفاده شد (ASTM C496, 2004). در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه استوانه‌ای تحت بارگذاری قطری قرار می‌گیرد و در اثر تنش کششی یکنواخت ایجاد شده در راستای عمود بر بارگذاری ترک می‌خورد. مقاومت کششی نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$ITS = \frac{2000 P_{max}}{\pi t d} \quad (1)$$

به دلیل بالا بودن نقطه ذوب ذرات PET، ترکیب آن با قیر ممکن نیست و به‌طور معمول ترکیب به‌دست آمده از روش مرطوب همگن و مطلوب نیست (Casey et al., 2008). در این تحقیق ذرات PET در مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد (نسبت به وزن قیر) با روش خشک به مخلوط آسفالتی اضافه شد. بدین منظور ابتدا ذرات PET با سنگدانه‌ها ترکیب شد و سپس قیر به آنها اضافه شد. نمونه‌های آسفالتی براساس روش مارشال ساخته شدند و برای به‌دست آوردن درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شد (ASTM D1559, 2002). درصد قیر بهینه برای نمونه‌های آسفالتی اصلاح نشده برابر ۵/۷ درصد تعیین شد و نمونه‌های اصلاح شده نیز در همین درصد قیر بهینه ساخته شدند.

مقدار تغییر شکل افقی توسط دو LDVT که در امتداد قطر نمونه‌ها نصب شده اندازه‌گیری شد. همچنین آزمایش در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد با تنش‌های بارگذاری معادل ۱۵ و ۲۰ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد با تنش‌های معادل ۲۰ و ۴۰ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم در همان دماها انجام گرفت. آزمایش خستگی نمونه‌های آسفالتی مطابق استاندارد EN12697-24 (به جز شرایط مدت زمان اعمال بار) اندازه‌گیری شد (EN12697-24, 2004). شکل بارگذاری آزمایش خستگی شبیه به آزمایش مدول برجهنگی بود. مدت زمان اعمال بار ۰/۲۵ ثانیه و مدت زمان استراحت ۱/۲۵ ثانیه بود و بارگذاری تا وقوع شکست کامل در نمونه‌ها ادامه یافت. تنش و کرنش حداکثر در مرکز نمونه‌ها با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه شد:

$$S_t = \frac{2p}{\pi t d} \quad (4)$$

$$\epsilon_0 = \left( \frac{2\Delta H}{d} \right) \left( \frac{1+3\mu}{4+\pi\mu-\pi} \right) \quad (5)$$

که در این روابط:

$P$ : حداکثر بار دینامیکی (N);  $t$ : طول نمونه (mm);  $d$ : قطر نمونه (mm);  $\epsilon_0$ : کرنش کششی در مرکز نمونه؛  $\mu$ : ضریب پواسون؛ و  $\Delta H$ : تغییر شکل افقی (mm) است که توسط دو LDVT اندازه‌گیری می‌شود.

آزمایش خستگی در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد و با تنش‌های بارگذاری معادل ۱۵ و ۲۰ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم در همان دماها انجام گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مقاومت کششی غیرمستقیم و

#### مدول برجهنگی

جدول ۵ نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم را نشان می‌دهد. با کاهش دما مقاومت کششی زیاد می‌شود، زیرا نمونه‌ها سخت‌تر شده و نیروی بیشتری برای شکست نیاز است. شکل ۱ نتایج آزمایش مدول برجهنگی را نشان می‌دهد. طبق جدول ۵ و شکل ۱، با افزایش مقادیر PET تا ۲ درصد، مقدار ITS و  $M_r$  در هر دو دما افزایش می‌یابد و پس از آن روند نتایج نزولی است. در مقادیر بیشتر، این ذرات جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها می‌شود و به دلیل کمتر بودن سختی آنها نسبت به سنگدانه‌ها سبب کاهش مقاومت و سختی می‌شوند.

که در این رابطه:

$P_{max}$ : بار نهایی اعمال شده (N);  $t$ : ارتفاع نمونه (mm);  $d$ : قطر نمونه (mm); ITS: مقاومت کششی (KPa)

آزمایش‌های مدول برجهنگی و خستگی در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد به وسیله دستگاه UTM-14 که مجهز به محفظه کنترل دما بود انجام گرفت. نمونه به مدت دست کم پنج ساعت قبل از شروع آزمایش در این محفظه قرار داده می‌شد تا به دمای مورد نظر برسد. مدول برجهنگی نمونه‌های آسفالتی مطابق استاندارد ASTM D4123 به روش کشش غیرمستقیم اندازه‌گیری شد (ASTM D4123, 2003). این روش یکی از رایج‌ترین روش‌های تعیین نمودار تنش - کرنش برای ارزیابی خصوصیات الاستیک مصالح است (Tayfur et al., 2007). اکثر مصالح مورد استفاده در روسازی راه‌ها خاصیت الاستیک ندارند و در اثر اعمال بار دچار تغییر شکل‌های ماندگار می‌شوند، اما در صورتی که بار اعمالی در مقایسه با مقاومت ماده کوچک باشد و به صورت مکرر اعمال شود، تغییر شکل ایجاد شده در هر سیکل بارگذاری تقریباً به طور کامل برگشت‌پذیر است و در این شرایط می‌توان ماده را الاستیک فرض کرد (Haug, 1993).

در این آزمایش از شکل بارگذاری نیمه‌سینوسی با فرکانس یک هرتز، شامل مدت زمان سیکل بارگذاری ۰/۱ ثانیه و مدت زمان استراحت ۰/۹ ثانیه استفاده شد. برای یک بار دینامیکی با حداکثر اندازه  $p$  که تغییر شکل‌های افقی ناشی از آن اندازه‌گیری شده‌اند، مدول برجهنگی کل با استفاده از رابطه ۲ به دست می‌آید (ASTM D4123, 2003):

$$M_r = \frac{p(\mu+0.27)}{t\delta} \quad (2)$$

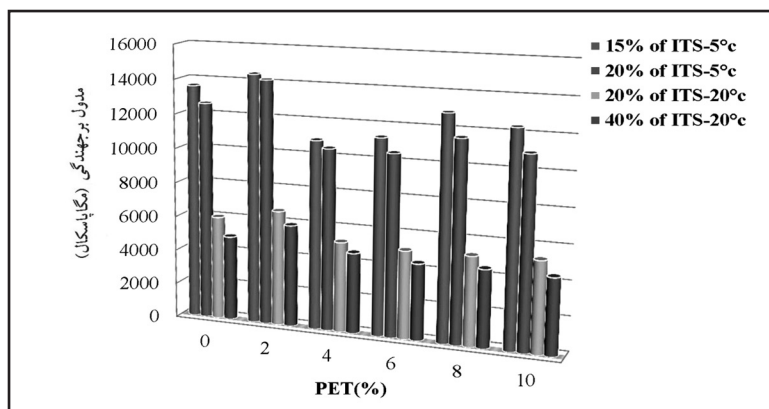
که در این رابطه:

$M_r$ : مدول برجهنگی (MPa);  $P$ : حداکثر بار دینامیکی (N);  $\mu$ : ضریب پواسون؛  $t$ : طول نمونه (mm); و  $\delta$ : تغییر شکل افقی برگشت‌پذیر کل (mm) است.

در رابطه ۲ ضریب پواسون وابسته به دمای آزمایش است و از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$\mu = 0.15 + \frac{0.35}{1+e^{(3.1849-0.04233t)}} \quad (3)$$

که در این رابطه  $t$  دما بر حسب درجه فارنهایت است (wiczak, 2002).



شکل ۱. نتایج آزمایش مدول برجهندگی در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتی گراد

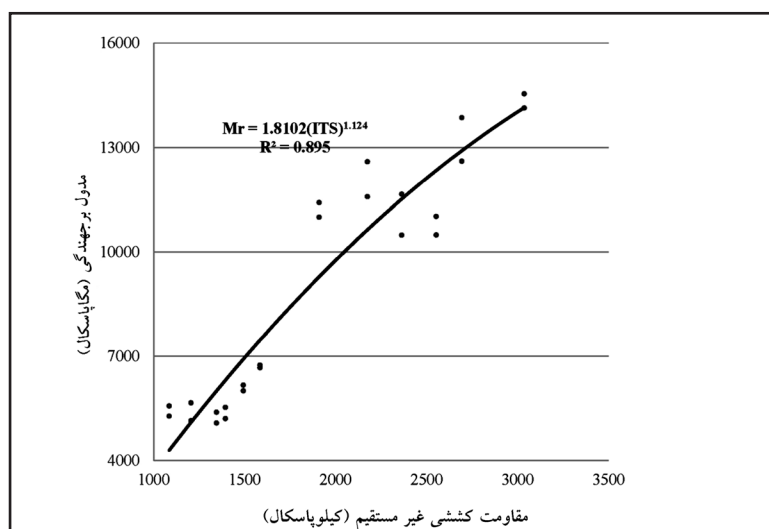
### ۳-۱-۱- رابطه مقاومت کششی با مدول برجهندگی

همان‌طور که در جدول ۵ و شکل ۱ مشاهده می‌شود، روند تغییرات ITS و  $M_r$  یکسان است. اگرچه کاهش مقاومت و سختی می‌تواند در راستای بهبود خصوصیات خستگی باشد، برای جلوگیری از کاهش بیش از حد در ضخامت قیر اطراف سنگدانه‌ها باید مقدار PET محدود شود. کاهش ضخامت قیر بر روی دوام مخلوط در برابر رطوبت نیز تأثیرات نامطلوب دارد (Ahmadinia et al., 2012). به‌منظور تعیین رابطه بین نتایج دو آزمایش در شرایط یکسان از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. مقایسه روابط مختلف توسط نرم‌افزار نشان داد که برازش توانی بین دو متغیر ITS و  $M_r$  دارای قوی‌ترین همبستگی است. این برازش در شکل ۲ نشان داده شده است و مدل به‌دست آمده در رابطه ۶ مشاهده می‌شود:

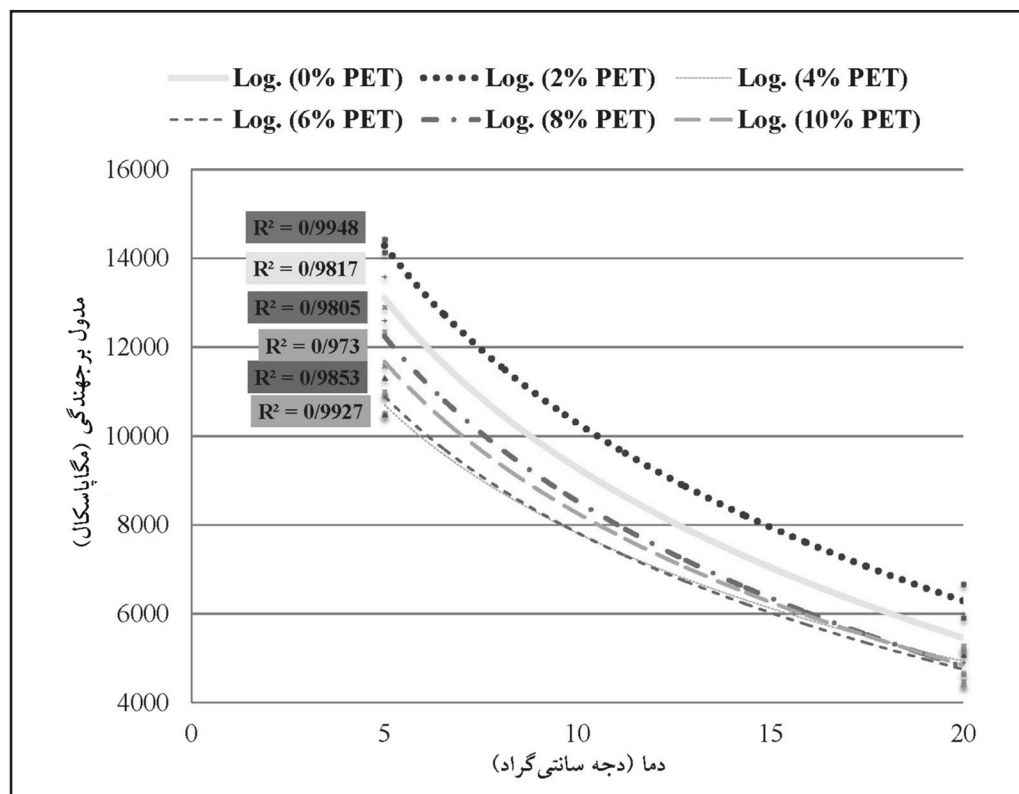
$$M_r = 1.8102(ITS)^{1.124} \quad (6)$$

### جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

مقاومت کششی (کیلو پاسکال)	دما (درجه سانتی گراد)	PET (%)
۲۶۹۳	۵	۰
۱۴۹۲	۲۰	۰
۳۰۳۶	۵	۲
۱۵۸۴	۲۰	۲
۲۵۵۲	۵	۴
۱۳۹۴	۲۰	۴
۲۳۳۶	۵	۶
۱۳۴۵	۲۰	۶
۲۱۴۷	۵	۸
۱۲۰۵	۲۰	۸
۱۹۰۹	۵	۱۰
۱۰۸۵	۲۰	۱۰



شکل ۲. رابطه مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی



شکل ۳. تأثیر دما بر مدول برجهنگی نمونه‌های آسفالتی

که در این رابطه C مقداری ثابت است.

### ۳-۱-۳- مدل تخمین مدول برجهنگی

با توجه به روابط به‌دست‌آمده برای تخمین مدول برجهنگی در دمای  $T_2$  براساس مقدار تخمین‌زده‌شده در دمای  $T_1$  با قرار دادن این مقادیر در رابطه ۸ و اضافه کردن رابطه ۶ مدل مورد نظر برای مخلوط اصلاح‌شده به‌صورت رابطه ۹ است.

$$M_T = 1.08102 \cdot (ITS)^{1.124} - 5208 (L_n T_2 - L_n T_1) \quad (9)$$

که در این رابطه:

$T_1$  و  $T_2$ : به‌ترتیب دماهای ثانویه و اولیه برحسب درجه سانتی‌گراد است.

در شکل ۴ نتایج به‌دست‌آمده از رابطه ۹ با مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده مخلوط اصلاح‌شده مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود همبستگی مناسب بین مدول برجهنگی تخمین‌زده‌شده از مدل و نتایج آزمایش وجود دارد.

### ۳-۱-۲- رابطه مدول برجهنگی با دما

شکل ۳ تأثیر دما بر مدول برجهنگی مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف PET نشان می‌دهد. طبق شکل، تغییرات مدول برجهنگی با دما را می‌توان با یک تابع لگاریتمی تخمین زد. برای مثال رابطه مدول برجهنگی با دما برای نمونه آسفالتی اصلاح‌شده با ۲ درصد PET به صورت رابطه ۷ است:

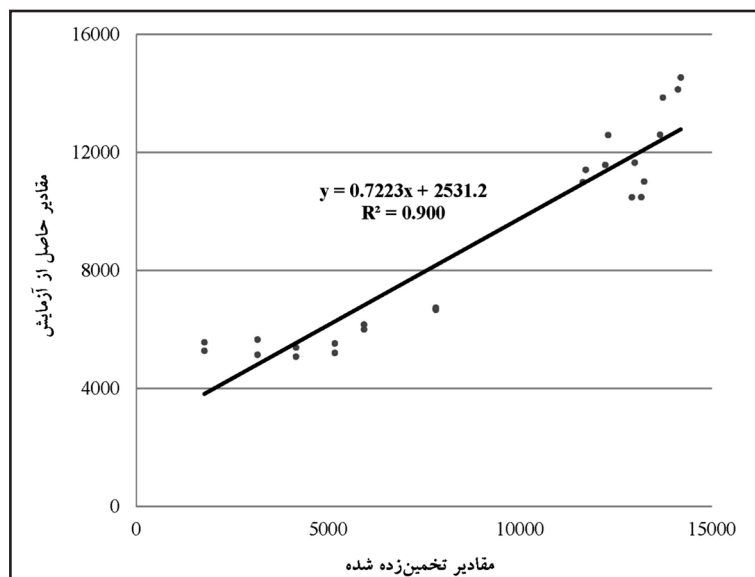
$$M_T = -5768 \ln(T) + 23569, R^2 = 0.99 \quad (7)$$

که در این رابطه:

T: دما (درجه سانتی‌گراد)

محاسبات نشان می‌دهد که شیب نمودارهای شکل ۳ تقریباً یکسان بوده و اختلاف نمودارهای برازش‌شده ناشی از مقادیر ثابت لگاریتمی است. بنابراین با چشم‌پوشی از مقادیر ثابت، متوسط ضرایب محاسبه‌شده و تابع تغییرات مدول برجهنگی با دما تعیین شد. این تابع برای مخلوط اصلاح‌شده در رابطه ۸ مشخص است.

$$M_T = -5028 \ln(T) + C \quad (8)$$

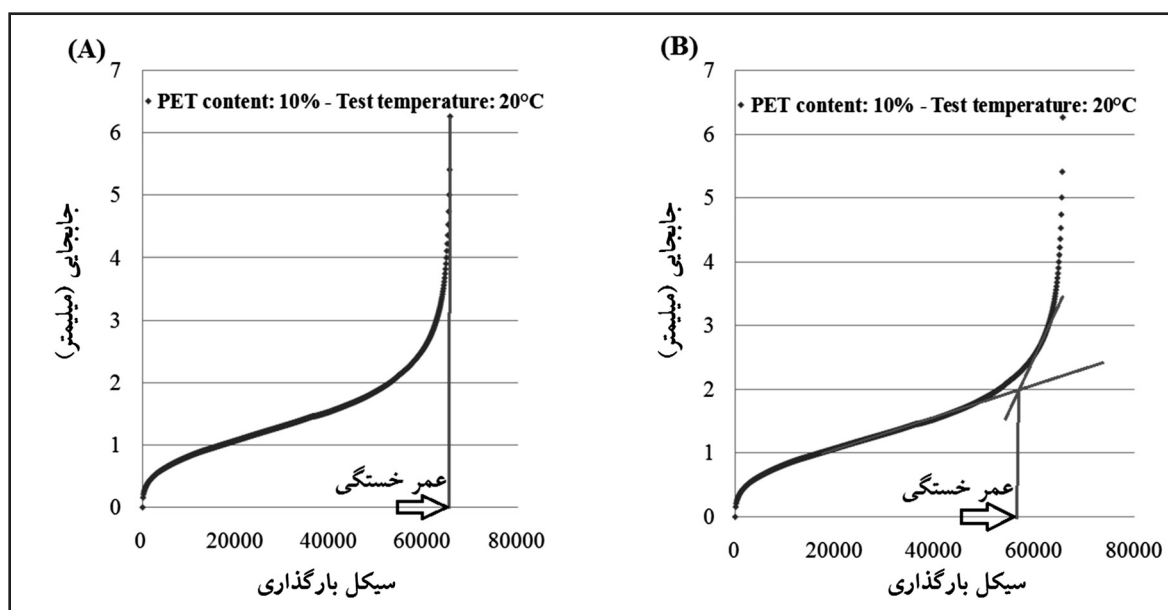


شکل ۴. مقایسه مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه ۹ و مقادیر به دست آمده از آزمایش

### ۳-۲- خستگی

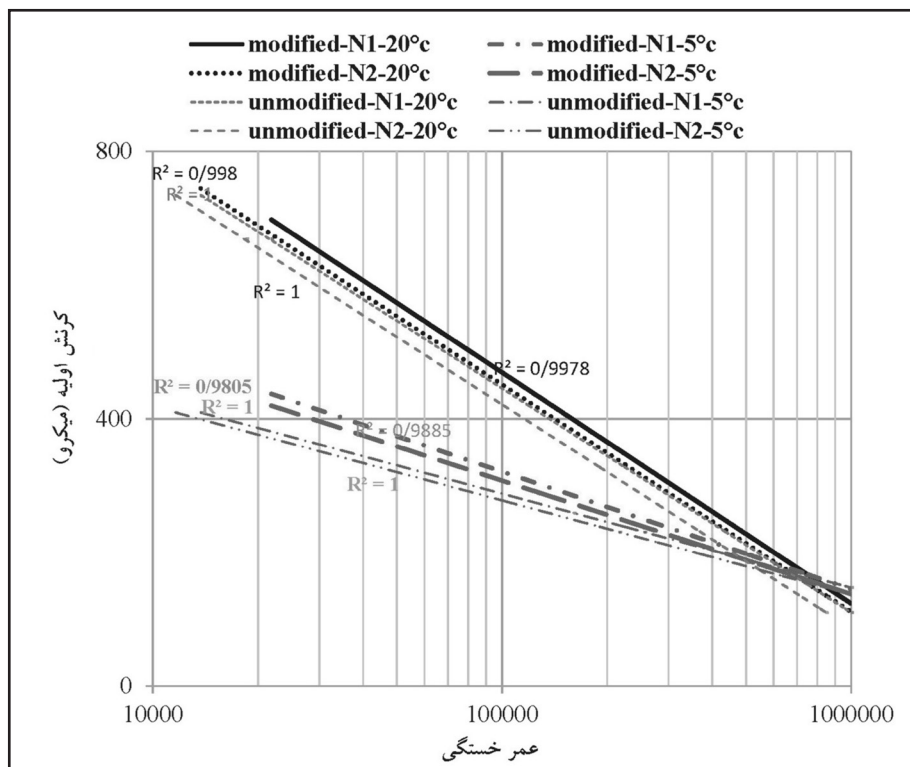
تعریف‌های مختلفی از عمر خستگی در روش خستگی با کشش غیرمستقیم وجود دارد. براساس روش استاندارد EN12697-24 عمر خستگی برابر با مجموع تعداد سیکل‌هایی است که در نتیجه آن نمونه آسفالتی می‌شکند. این تعریف از عمر خستگی ( $N_1$ ) در شکل A-۵ مشاهده می‌شود (EN12697-24, 2004). با توجه به شکل B-۵ عمر خستگی بنابر تعریف اول ( $N_2$ ) مشاهده می‌شود. بعد از این نقطه، ترک‌های ریز با هم ترکیب شده و ترک‌های بزرگ تشکیل می‌شوند و در نهایت نمونه می‌شکند (Thiago et al., 2008).

در آزمایش خستگی تغییر شکل‌های افقی اندازه‌گیری شد و نمودار تغییر شکل در برابر سیکل‌های بارگذاری رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نمودار تغییر شکل افقی به سه بخش تقسیم می‌شود. بخش اول شامل سیکل‌های اولیه بارگذاری است. در این بخش به دلیل وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک، نرخ تغییرات تغییر شکل زیاد است. در بخش دوم نرخ تغییرات ثابت می‌شود و نمودار خستگی به صورت خطی است. در این بخش ترک‌های ریز در مخلوط آسفالتی اتفاق می‌افتد. در بخش سوم ترک‌ها با هم ترکیب می‌شود و تغییر شکل به سرعت افزایش می‌یابد و نمونه دچار شکست کامل می‌شود (Thiago et al., 2008).



شکل ۵. تعریف‌های عمر خستگی در روش خستگی با کشش غیرمستقیم





شکل ۶. نمودار کرنش اولیه - خستگی

جدول ۶. اثر افزایش دما در خصوصیات مخلوط اصلاح شده با PET

خصوصیات		
عمر خستگی	شیب نمودار خستگی	مدول برجهنگی
وابسته به سطح کرنش	افزایش	کاهش

ترک‌های اولیه می‌شود. بنابراین نمونه‌های بیشتری مورد نیاز بوده و به همین دلیل همبستگی نمودارهای خستگی در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای ۵ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به شکل ۶ نقاطی متقاطع از برخورد نمودارهای خستگی به دست می‌آید که بیشتر در محدوده کرنش‌های ۱۶۰ تا ۲۱۰ میکرو قرار دارند. در کرنش‌های بیشتر از محدوده ۱۶۰ تا ۲۱۰ میکرو با افزایش دما، عمر خستگی زیاد می‌شود، ولی در کرنش‌های کمتر نتیجه برعکس است. به دلیل تأثیر دما بر مدول برجهنگی و وابستگی عمر خستگی به کرنش اولیه (در دماهای مختلف)، برای دستیابی به بهترین مدل پیش‌بینی عمر خستگی، بررسی رابطه عمر خستگی با کرنش اولیه و همچنین رابطه آن با مدول برجهنگی در سطوح مختلف کرنش ضرورت دارد. در نهایت می‌توان مدل خستگی را که وابسته به کرنش اولیه و مدول برجهنگی باشد به دست آورد.

نتایج آزمایش خستگی در دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۶ مشاهده می‌شود. در این شکل نمودارهای خستگی نسبت به کرنش اولیه برای مخلوط‌های آسفالتی مورد مطالعه ترسیم شده‌اند. با توجه به شکل در یک کرنش ثابت، عمر خستگی (N<sub>1</sub>) بیشتر از (N<sub>2</sub>) است. با افزایش کرنش اولیه عمر خستگی کاهش می‌یابد و با کاهش دما شیب نمودارهای خستگی کم می‌شود. کاهش شیب به دلیل خصوصیات مخلوط‌های اصلاح شده در دماهای کم نسبت به دماهای متوسط است. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی وابسته به مقدار کرنش اولیه است و عمر خستگی نسبت به دما در کرنش‌های کم و زیاد تفاوت دارد. در جدول ۶ اثر افزایش دما در خصوصیات مخلوط اصلاح شده با PET مشخص است. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در دمای کم، کوچک‌ترین تغییر در نمونه‌ها یا شرایط آزمایش (مثل سطح کرنش)، سبب تغییر در تعداد سیکل‌های منجر به وقوع

## ۴- مدل خستگی

برای به دست آوردن مدل خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با PET ابتدا رابطه کرنش اولیه - عمر خستگی و سپس رابطه مدول برجهندگی - عمر خستگی طبق نتایج آزمایشگاهی و بر مبنای تحلیل‌های آماری به دست آمد. مدل خستگی نهایی شامل یک تابع ریاضی که در آن عمر خستگی (متغیر وابسته) با استفاده از دو پارامتر مدول برجهندگی و کرنش اولیه (متغیر مستقل) قابل تخمین بود، به دست آمد. در ادامه مراحل دستیابی به مدل نهایی ارایه می‌شود.

### ۴-۱- رابطه کلی کرنش اولیه - عمر خستگی

طبق نتایج تحقیقات مختلف، رابطه کرنش - عمر خستگی به صورت یک تابع توانی است. با این حال، براساس شکل ۶ رابطه کلی بین کرنش اولیه و عمر خستگی (که بیشترین همبستگی را دارد) با استفاده از رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ به دست می‌آید:

$$N_f = a\varepsilon^b \quad (10)$$

$$N_f = ae^{b\varepsilon} \quad (11)$$

که در این رابطه‌ها:

$a$  و  $b$ : ضرایب ثابت؛ و  $\varepsilon$ : کرنش اولیه است.

برای مثال براساس شکل ۶ و رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ رابطه عمر خستگی مخلوط اصلاح شده (طبق تعریف  $N_f$ ) با کرنش اولیه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ ارایه شده است.

$$N_f = 2.782 \times 10^{10} \times \varepsilon^{-2.118} \quad (12)$$

$$N_f = 2.189 \times 10^6 \times e^{-0.007\varepsilon} \quad (13)$$

### ۴-۲- رابطه مدول برجهندگی - عمر خستگی

به دلیل وجود نقاط متقاطع در نمودارهای شکل ۶، تخمین رابطه بین مدول برجهندگی و عمر خستگی چندان ساده نیست و لازم است با توجه به سطح کرنش رابطه را تخمین زد. به منظور به دست آوردن رابطه کلی بین مدول برجهندگی و عمر خستگی، در کرنش‌های اولیه مختلف، نمودار عمر خستگی در برابر مدول برجهندگی رسم شد. شکل ۷ رابطه عمر خستگی و مدول برجهندگی را در کرنش‌های اولیه کمتر و بیشتر از ۲۱۰ میکرو در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۷-A و در کرنش‌های اولیه کمتر از ۲۱۰ میکرو با افزایش مدول برجهندگی عمر خستگی افزایش می‌یابد. زیرا با توجه به شکل ۶، در کرنش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو با کاهش دما، عمر خستگی و نیز مدول برجهندگی زیاد می‌شود. در کرنش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو نتیجه برعکس است؛ زیرا با کاهش دما عمر خستگی کم و مدول برجهندگی زیاد می‌شود. بنابراین براساس شکل ۷-B در کرنش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو با افزایش مدول برجهندگی عمر خستگی کم می‌شود. بین نقاط شکل ۷ تابعی که بیشترین ضریب همبستگی را داراست، برازش می‌شود. نتایج نشان داد که توابع توانی و نمایی بیشترین ضریب همبستگی را نسبت به توابع دیگر دارند. مطابق شکل ۷-A در کرنش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو تابع توانی نسبت به تابع نمایی ضریب همبستگی قوی دارد و این تابع بین نقاط برازش شده است. برای مثال در کرنش ۱۳۰ میکرو توابع برازش شده توانی و نمایی مطابق رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شوند. همان‌طور که در این روابط مشاهده می‌شود تابع توانی ضریب همبستگی بالاتری دارد. نتایج نشان داد که در کرنش‌های دیگر نیز تابع توانی بهترین برازش بین نقاط است.

$$N_f = 8.198 \times M_r^{1.3192}, R^2 = 0.854 \quad (14)$$

$$N_f = 324021 \times e^{0.0001Mr}, R^2 = 0.84 \quad (15)$$

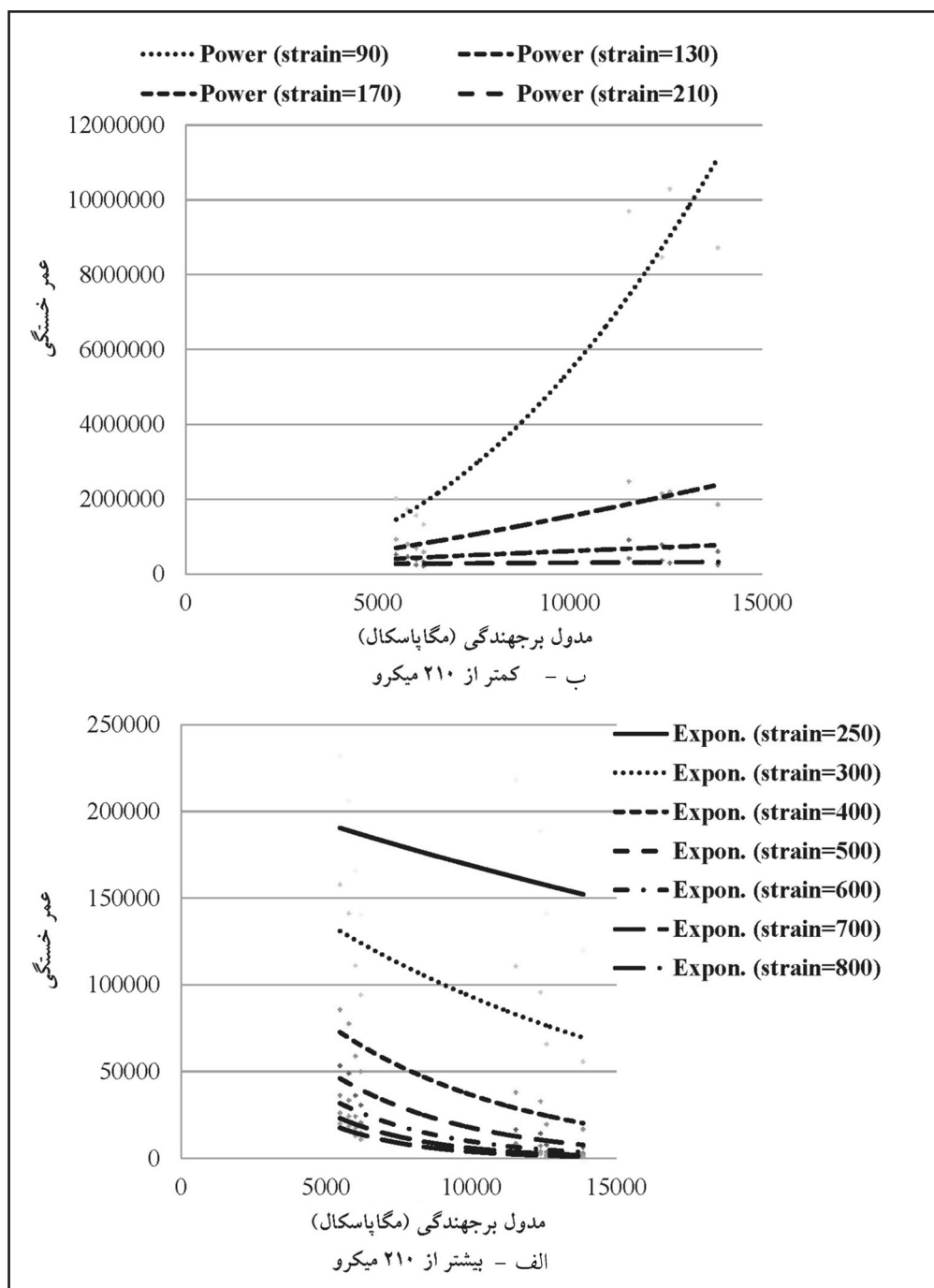
که در این روابط  $M_r$  مدول برجهندگی مخلوط اصلاح شده است.

مطابق شکل ۷-B در کرنش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو تابع نمایی نسبت به تابع توانی ضریب همبستگی بالاتری دارد و این تابع بین نقاط برازش شده است. برای مثال در کرنش ۶۰۰ میکرو توابع برازش شده توانی و نمایی مطابق رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ محاسبه می‌شوند. همان‌طور که در این روابط مشاهده می‌شود تابع نمایی ضریب همبستگی بالاتری دارد. نتایج نشان داد که در کرنش‌های دیگر نیز تابع نمایی بهترین برازش بین نقاط است.

$$N_f = 10^{13} \times M_r^{-2.299}, R^2 = 0.92 \quad (16)$$

$$N_f = 131849 \times e^{-0.0003Mr}, R^2 = 0.938 \quad (17)$$

که در این روابط  $M_r$  مدول برجهندگی مخلوط اصلاح شده است.



شکل ۷. رابطه عمر خستگی و مدول برجهنگی در دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی گراد و سطوح مختلف کرنش

مقاطع نمودارهای خستگی در محدوده کرنش‌های ۱۶۰ تا ۲۱۰ میکرو قرار دارند. کرنشی که بیشتر این نقاط را پوشش دهد (کمترین مقداری که از اکثر کرنش‌های نقاط متقاطع بیشتر باشد)، به عنوان کرنش حد مرزی تعیین شد. برای تعیین کرنش حد مرزی، کرنش‌های ۱۸۵ و ۲۱۰ میکرو انتخاب شد. سپس روابط جداگانه‌ای بین عمر خستگی و مدول برجهنگی در مقادیر کمتر و بیشتر از کرنش‌های انتخاب شده به دست آمد. شکل ۸ رابطه عمر خستگی و مدول برجهنگی را در دماهای

در محدوده کرنش‌های مختلف رابطه بین عمر خستگی و مدول برجهنگی تفاوت دارد. در کرنش‌های کمتر و بیشتر از محدوده ۱۶۰ تا ۲۱۰ میکرو، با افزایش دما عمر خستگی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. بنابراین رابطه مدول برجهنگی و عمر خستگی نیز در کرنش‌های مختلف تفاوت دارد. پس باید کرنشی را در نظر گرفت و رابطه عمر خستگی و مدول برجهنگی را در مقادیر کمتر و بیشتر از این کرنش محاسبه کرد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده شد، بیشتر نقاط

مدول برجهندگی با تابع ریاضی توانی محاسبه می‌شود، ولی در کرنش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو با تابع نمایی محاسبه می‌شود. رابطه عمر خستگی و مدول برجهندگی در کرنش‌های کمتر و بیشتر از ۲۱۰ میکرو مطابق رابطه‌های ۱۸ و ۱۹ محاسبه می‌شوند:

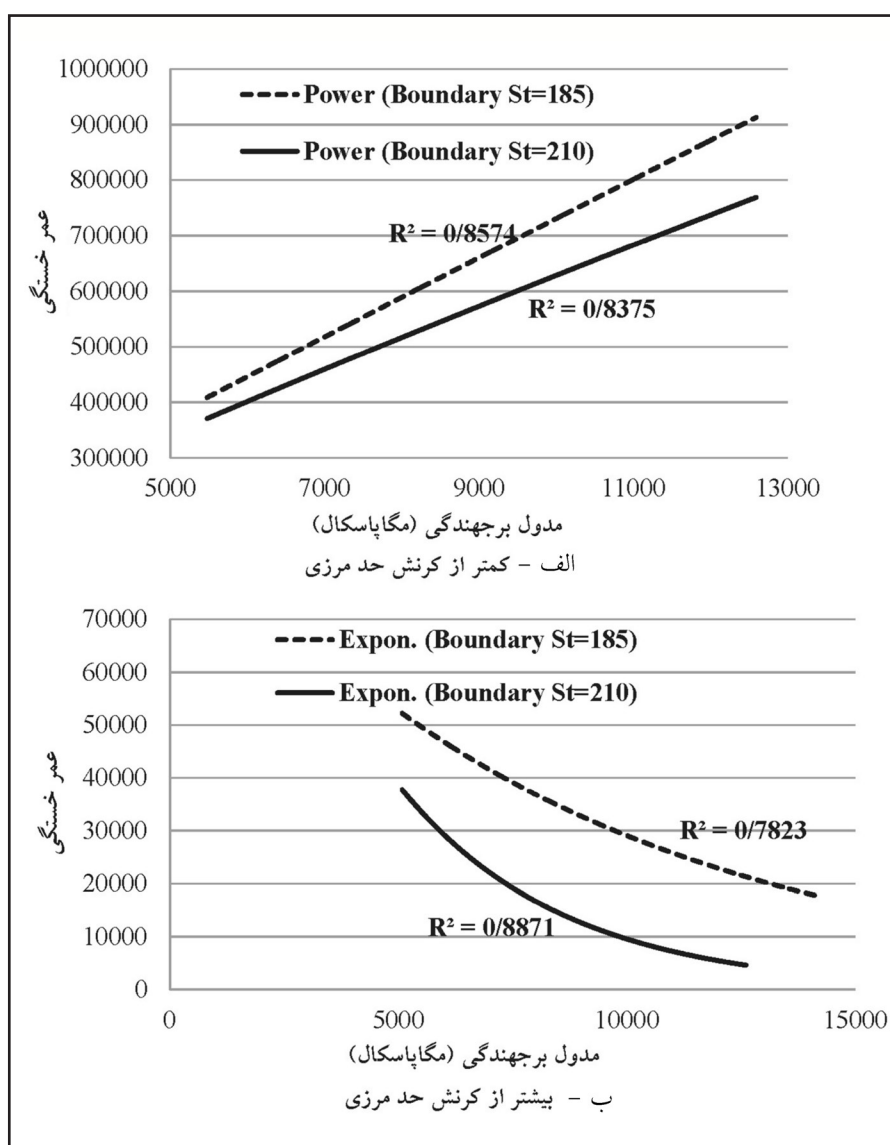
$$N_f = aM_r^b, \quad \varepsilon < 210 \text{ microstrain} \quad (18)$$

$$N_f = ae^{bM_r}, \quad \varepsilon > 210 \text{ microstrain} \quad (19)$$

که در این روابط:

a و b: ضرایب ثابت؛ و  $M_r$ : مدول برجهندگی (MPa) است.

آزمایش و کرنش حد مرزی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸-الف در مقادیر کمتر از کرنش‌های انتخاب شده (۱۸۵ و ۲۱۰ میکرو) ضریب همبستگی نتایج حاصل از نمودار کرنش ۱۸۵ میکرو بیشتر از ضریب همبستگی کرنش ۲۱۰ میکرو است، ولی اختلاف زیادی با هم ندارند، اما براساس شکل ۸-ب در کرنش‌های بالا، ضریب همبستگی نتایج حاصل از نمودار کرنش ۲۱۰ میکرو بیشتر از ضریب همبستگی کرنش ۱۸۵ میکرو است و اختلاف بیشتری با هم دارند. بنابراین با توجه به شکل ۸ و ضرایب همبستگی، کرنش اولیه ۲۱۰ میکرو به عنوان کرنش حد مرزی انتخاب می‌شود. مطابق شکل ۷ مشخص شد که در کرنش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو رابطه عمر خستگی و



شکل ۸. رابطه عمر خستگی و مدول برجهندگی در دماهای آزمایش و کرنش‌های ۱۸۵ و ۲۱۰ میکرو به عنوان کرنش حد مرزی

## ۳-۴- مدل‌های خستگی نهایی

برای به دست آوردن مدل نهایی، نتایج آزمایش‌های خستگی و مدول برجهنگی با نرم‌افزار SPSS تحلیل شد. در این تحلیل‌ها انواع مختلف مدل‌های رگرسیونی غیرخطی بررسی و مقایسه شد. مدل‌های رگرسیونی غیرخطی برای کرنش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو در رابطه‌های ۲۰ تا ۲۳ مشاهده می‌شود:

$$N_f = a\varepsilon^b \times e^{CM_r} \quad (20)$$

$$N_f = ae^{b\varepsilon + CM_r} \quad (21)$$

$$N_f = a\varepsilon^b \times M_r^c \quad (22)$$

$$N_f = ae^{b\varepsilon + M_r^c} \quad (23)$$

به‌طور مشابه برای کرنش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو مدل‌های رگرسیون غیرخطی در روابط ۲۴ تا ۲۷ مشاهده می‌شود:

$$N_f = a\varepsilon^b \times e^{CM_r} \quad (24)$$

$$N_f = ae^{b\varepsilon + CM_r} \quad (25)$$

$$N_f = a\varepsilon^b \times M_r^c \quad (26)$$

$$N_f = ae^{b\varepsilon + M_r^c} \quad (27)$$

این مدل‌ها به‌طور جداگانه برای کرنش‌های کمتر و بیشتر از ۲۱۰ میکرو تحلیل می‌شوند. مراحل کنترل هر یک از مدل‌های غیرخطی عبارت است از:

۱- به‌عنوان یک شرط اولیه باید ضریب همبستگی ( $R^2$ )

مدل‌های غیرخطی مناسب باشد؛

۲- رابطه خطی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده از مدل غیرخطی

(n) و مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش (N) باید مورد قبول

باشد و نقاط نمودار N-n باید پراکندگی مناسبی داشته

باشند؛

۳- باید شیب و مقادیر ثابت رابطه خطی N-n به‌ترتیب

نزدیک به یک و صفر باشد.

در جدول‌های ۷ و ۸ رابطه‌های ۲۰ تا ۲۷ برای کرنش‌های

کمتر و بیشتر از ۲۱۰ میکرو برای مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده

محاسبه شده‌اند.

مدل‌های غیرخطی محاسبه‌شده طبق مراحل کنترلی رتبه

بندی شدند. این مدل‌ها مطابق چهار معیار مختلف رتبه‌بندی

می‌شوند ( $R^2$  مدل غیرخطی،  $R^2$  رابطه (N-n) و شیب و مقدار

ثابت این رابطه). برای رتبه‌بندی هر معیار وزن‌دهی شده یعنی

رابطه‌ای که رتبه ۱ را کسب کرده (بین چهار مدل تحلیل‌شده)

بیشترین وزن را دارد و رابطه‌ای که رتبه ۴ را کسب کرده دارای

کمترین وزن است. در نهایت میانگین وزنی محاسبه شد و

رتبه‌بندی نهایی انجام گرفت. در جدول‌های ۹ و ۱۰، روابط ۲۰

تا ۲۷ به‌ترتیب در کرنش‌های کمتر و بیشتر از ۲۱۰ میکرو رتبه

بندی شده‌اند.

جدول ۷. روابط ۲۰ تا ۲۳ در کرنش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو

شماره	رابطه	$R^2$
۲۰	$N_f = 946321 \times \varepsilon^{-0.244} \times e^{0.0001M_r}$	0.868
۲۱	$N_f = 505806 \times e^{-0.003\varepsilon + 0.000085M_r}$	0.860
۲۲	$N_f = 120 \times \varepsilon^{-0.033} \times M_r^{0.966}$	0.890
۲۳	$N_f = 604 \times e^{-0.004\varepsilon} \times M_r^{0.856}$	0.864

جدول ۸. روابط ۲۴ تا ۲۷ در کرنش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو

شماره	رابطه	$R^2$
۲۴	$N_f = 3.716 \times 10^{15} \times \varepsilon^{-3.724} \times e^{-0.00026M_r}$	0.913
۲۵	$N_f = 807195 \times e^{-0.006\varepsilon - 0.00028M_r}$	0.905
۲۶	$N_f = 5.254 \times 10^{22} \times \varepsilon^{-3.699} \times M_r^{-2.099}$	0.877
۲۷	$N_f = 8.922 \times 10^{13} \times e^{-0.006\varepsilon} \times M_r^{-2.071}$	0.867

جدول ۹. رتبه‌بندی روابط ۲۰ تا ۲۳ در کرنش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو

رابطه		مقدار پیش‌بینی شده (n) در برابر اندازه‌گیری شده (N)		رتبه‌بندی				
شماره	R <sup>2</sup>	رابطه (N-n)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> مدل غیرخطی	R <sup>2</sup> رابطه (N-n)	شیب نمودار (N-n)	مقدار ثابت (N-n)	رتبه‌بندی نهایی
۲۰	0.868	N=0.8272(n)-22052	0.873	۲	۲	۲	۲	۲
۲۱	0.860	N=0.9579(n)+18399	0.861	۴	۴	۱	۱	۱
۲۲	0.890	N=0.769(n)-62312	0.888	۱	۱	۳	۳	۱
۲۳	0.864	N=0.7528(n)+75304	0.864	۳	۳	۴	۴	۴

جدول ۱۰. رتبه‌بندی رابطه‌های ۲۴ تا ۲۷ در کرنش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو

رابطه		مقدار پیش‌بینی شده (n) در برابر اندازه‌گیری شده (N)		رتبه‌بندی				
شماره	R <sup>2</sup>	رابطه (N-n)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> مدل غیر خطی	R <sup>2</sup> رابطه (N-n)	شیب نمودار (N-n)	مقدار ثابت (N-n)	رتبه‌بندی نهایی
۲۴	0.913	N=1.0147(n)-691	0.913	۱	۱	۲	۴	۱
۲۵	0.905	N=0.7991(n)+228	0.904	۲	۲	۴	۱	۲
۲۶	0.877	N=1.1308(n)-534	0.876	۳	۳	۱	۳	۳
۲۷	0.867	N=0.5872(n)+426	0.866	۴	۴	۳	۲	۴

شکل ۹ ارتباط بین نتایج به‌دست‌آمده از مدل و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل همبستگی خوبی بین مقادیر تخمینی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و توزیع نقاط حول خط ۴۵ درجه مناسب است. طبق مدل نهایی خستگی در کرنش‌های کم با افزایش مدول برجهدگی عمر خستگی مخلوط اصلاح‌شده به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، ولی در کرنش‌های زیاد، نتیجه برعکس است. بنابراین در روسازی با شرایط بارگذاری سنگین، افزودن ضایعات PET تأثیرات مفیدی بر خصوصیات خستگی دارد. همچنین زمانی که مقدار کرنش در روسازی آسفالتی اصلاح‌شده با PET بیشتر از ۲۱۰ میکرو باشد، باید آنالیزها در سطوح کرنش متوسط و بالا مورد توجه باشد. از این رو در شرایط بارگذاری سنگین، خرابی خستگی در دماهای کم تا متوسط بحرانی‌تر خواهد بود.

براساس جدول‌های ۹ و ۱۰، در کرنش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو، رابطه ۲۲، و به‌طور مشابه در کرنش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو، رابطه ۲۴ بهترین رتبه را در بین رابطه‌های دیگر به‌دست آورد. بنابراین مدل نهایی کالیبره‌شده مخلوط اصلاح‌شده با PET طبق نتایج آزمایشگاهی در کرنش‌های اولیه کمتر و بیشتر از ۲۱۰ میکرو مطابق رابطه‌های ۲۸ و ۲۹ محاسبه می‌شود:

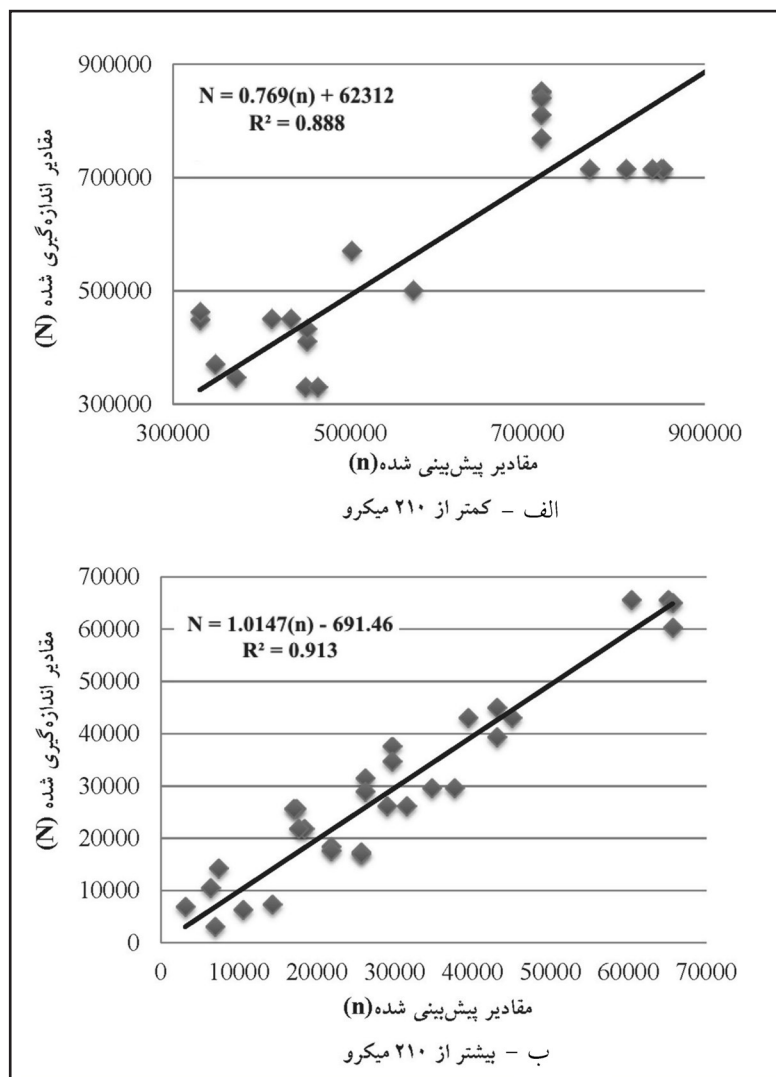
$$N_f = 120 \times \varepsilon^{-0.033} \times M_r^{0.966}, \quad (28)$$

$$N_f = 3.716 \times 10^{15} \times \varepsilon^{-3.724} \times e^{-0.00026M_r}, \quad (29)$$

$$\varepsilon > 210 \text{ microstrain}$$

که در این رابطه‌ها:

$\varepsilon$ : کرنش اولیه؛ و  $M_r$ : مدول برجهدگی مخلوط اصلاح‌شده (MPa) است.



شکل ۹. ارتباط بین مقادیر تخمینی و آزمایشگاهی

## ۵- نتیجه گیری

هدف اصلی این تحقیق توسعه مدل‌های خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با PET بود. آزمایش‌های اصلی شامل مدول برجهندگی و خستگی با روش کشش غیرمستقیم در دماهای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. مهم‌ترین نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- ۱- روند تغییرات مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی در مخلوط‌های اصلاح شده یکسان است و نتایج حاصل از مدل پیش‌بینی مدول برجهندگی نشان داد که همبستگی خوبی بین مقادیر تخمینی و مقادیر آزمایشگاهی وجود دارد؛
- ۲- شیب نمودارهای خستگی با کاهش دما کاهش می‌یابد که سبب می‌شود ارتباط عمر خستگی و سختی تابع سطح

- کرش اولیه باشد؛
- ۳- طبق نتایج حاصل از روابط کرش اولیه - عمر خستگی و مدول برجهندگی - عمر خستگی، کرش معادل ۲۱۰ میکرو، کرش حد مرزی انتخاب شد؛
- ۴- در کرش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو با افزایش دما عمر خستگی زیاد می‌شود، ولی در کرش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو نتیجه برعکس است؛
- ۵- برای کرش‌های کمتر و بیشتر از ۲۱۰ میکرو مدل‌های خستگی به‌طور جداگانه محاسبه شد. نتایج محاسبه مدل‌ها نشان داد که در کرش‌های بیشتر از ۲۱۰ میکرو با کاهش مدول برجهندگی عمر خستگی مخلوط اصلاح شده افزایش می‌یابد و در کرش‌های کمتر از ۲۱۰ میکرو

- BaghaeeMoghaddam T, RehanKarim M, MahrezA. (2011)"A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes", Scientific Research and Essays Vol. 6(4), pp. 670-682, 18 February, 2011.
- BaghaeeMoghaddam T, RehanKarim M, Symmaun T. (2012) "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles", Constr Build Mater;34:236–42.
- Casey D, McNally C, Gibney A, Gilchrist MD. (2008) "Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt", Resour, Conserv Recycl;52:1167–74.
- De Beer M. (1990) "Aspects of the design and behavior of road structures incorporating lightly cementitious layers", PhD thesis. Pretoria, South Africa: University of Pretoria.
- EN 12697-24. (2004) "Bituminous mixtures-test methods for hot mix asphalt - part 24: resistance to fatigue", European committee for standardization; July 2004.
- Hafeez I, Kamal M.A, Mirza M.W, Barkatullah, Bilal S . (2013) "Laboratory fatigue performance evaluation of different field laid asphalt mixtures", Construction and Building Materials; 44:792–97.
- Huang, Y. H. (1993) "Pavement analysis and design", New Jersey: Prentice Hall.
- Jahromi S, Khodaii A. (2008) "Carbon fiber reinforced asphalt concrete", Arab J SciEng; pp. 33:355–64.
- Modarres A. (2013) "Investigating the toughness and fatigue behavior of conventional and SBS modified asphalt mixes", Construction and Building Materials;47: pp. 218–222.
- Moghadas Nejad F, Aflaki E, Mohammadi M.A. (2010) "Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures", Construction and Building Materials;24: pp. 1158–1165.
- Park DY. (2008)"Development of fatigue cracking prediction model for flexible

نتیجه برعکس است.

## ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Polyethylene Terephthalate
2. Resilient Modulus
3. Fatigue
4. Indirect Tensile Strength

## ۷- منابع

- Ahmadiania E, Zargar M, RehanKarim M, Abdelaziz M. (2012) "Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt", Constr Build Mater;36:984–89.
- Al-Khateeb GG, Ghuzlan KA. (2013) "The combined effect of loading frequency, temperature, and stress level on the fatigue life of asphalt paving mixtures using the IDT test configuration", Int J Fatigue , <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.08.011>.
- Arabani M, Mirabdolazimi SM, Ferdowsi B. (2012) "Modeling the fatigue behaviors of glasphalt", Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering;19(3):341-45.
- Arabani M, Mirabdolazimi SM. (2011) " Experimental investigation of the fatigue behaviour of asphalt concrete mixtures containing waste iron powder", Materials Science and Engineering A 528:3866-70.
- ASTM C496. (2004) "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", ASTM Book of Standards, vol. 04.02, USA.
- ASTM D 1559. (2002) "Standard Test Method for Marshal Ttest", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, West Con- shohocken.
- ASTM D4123. (2003) "Indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures", ASTM Book of Standards, vol. 04.03, USA.



- Materials, :pp. 321–328.
- Thiago F, Kim YR, Lee J. (2008) "Research on fatigue of asphalt mixtures and pavements in Nebraska. Report No", P579, University of Nebraska Lincoln; February 25.
  - Witczak M.W, Kaloush K.T, Pellinen K and El-basyouny M. (2002) "Simple performance test for superpave mix design", NCHRP 465.
  - Xu Q, Chen H. and Prozzi, J.A. (2010) "Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects", J. Constr Build Mater. Vol. 24(10), pp 2003-2010.
  - Ziari H, Khabiri M. (2007) "Journal of Civil Engineering and Management", ISSN 1392- 3730 print/ISSN 1822-3605.
  - pavements", KSCE J Civil Eng;5(4): pp. 397–402.
  - Qunshan Ye, Shaopeng Wi, Ning Le. (2009) "Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures", International Journal of Fatigue;31: pp. 1598–1602.
  - SHRP-A-404. (1994) "Fatigue response of asphalt-aggregate mixes. Strategic highway research program", National Research Council, Washington, DC,USA.
  - Tayebali A, Rowe AGM, Sousa JB. (1994) "Fatigue response of asphalt aggregate mixtures", J Assoc Asphalt Paving Technol;61: pp. 333–60.
  - Tayfur S, Ozen H, and Aksoy A. (2007) "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers", Construction and Building