

## پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت حاوی الیاف پلی‌اتیلن بازیافتی براساس پارامترهای انرژی تلف شده در دما و فرکانس متغیر

زهره دهقان، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران  
 امیر مدرس\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، مازندران، ایران  
 \*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: coma.modarres@nit.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۳/۰۱ - پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۵

صفحه ۹۳-۱۱۰

### چکیده

در این تحقیق امکان پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت مسلح‌شده با الیاف پلی‌اتیلن بازیافتی (PET) با استفاده از پارامترهای انرژی تلف شده بررسی شد. آزمایش‌های خستگی با استفاده از خمش چهارنقطه‌ای در سه دمای ۵-، ۱۰- و ۲۰ درجه سانتیگراد و دو فرکانس ۲ و ۱۰ هرتز بر روی نمونه‌های مسلح‌شده انجام شد. قطر متوسط الیاف برابر با ۳۰ میکرومتر و طول الیاف برابر با ۱ و ۲ سانتیمتر بود. همچنین درصد الیاف برابر با ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ درصد نسبت به وزن قیر انتخاب گردید. نتایج حاکی از افزایش شیب نمودارهای خستگی با افزایش دما بود. در یک فرکانس ثابت عمر خستگی نمونه‌های مسلح‌شده بیشتر از نمونه شاهد بوده و تاثیرات مفید الیاف در دماهای بالاتر و در سطوح کرنش پایین محسوس‌تر بود. در مدل‌های خستگی اولیه از انرژی تلف شده اولیه یا تجمعی استفاده می‌شد. در مدل‌های جدیدتر از مفهوم نسبت انرژی تلف شده پارامتر محدودده ثابت (PV) تعریف گردید. در این تحقیق تعریف جدیدی برای محاسبه پارامتر PV براساس مفهوم میاتگین متحرک ارائه گردید (PV2). در نهایت با تحلیل‌های انجام شده مدل‌های خستگی ارائه شده براساس هر دو پارامتر PV1 و PV2 یک رابطه توانی بوده که مستقل نوع مخلوط، دما و فرکانس آزمایش بوده‌اند. همچنین در تعریف جدید ارائه شده (PV2) با دقتی مشابه یا حتی بالاتر از تعریف قبلی (PV1) امکان پیش‌بینی عمر خستگی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: مدل خستگی، آسفالت مسلح‌شده، الیاف PET، انرژی تلف شده، عدد ثابت (PV)

### ۱- مقدمه

استفاده از مدل‌های پیش‌بینی خرابی‌ها در روسازی‌های آسفالتی دارای کاربردهای بسیاری در طراحی و نگهداری آنها می‌باشند. این مدل‌ها در روش‌های طراحی مکانیستیک از خروجی‌های مدل‌های سازه‌ای جهت پیش‌بینی و برآورد تعداد بارگذاری‌های مجاز برای وقوع خرابی موردنظر استفاده می‌نمایند (Abojaradeh 2003, Carpenter et al. 2003). در مقایسه با مدل‌های سازه‌ای مدل‌های پیش‌بینی کمتر ارتقاء یافته‌اند. تنوع مصالح، استفاده از مواد و افزودنی‌های نوین و متغیر بودن شرایط عملکردی از مهم‌ترین عوامل محدودیت کاربرد و ارتقاء مدل‌های پیش‌بینی می‌باشند (Khodary 2010). از بین مدل‌های پیش‌بینی، توابع ارائه شده برای تخمین عمر خستگی جزء

مهم‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های ریاضی بوده‌است. این مدل‌ها در سه گروه اصلی قابل دسته‌بندی می‌باشند. گروه اول شامل مدل‌های ارائه شده برپایه عکس‌العمل روسازی شامل مقدار تنش یا کرنش می‌باشند. در این مدل‌ها عمر خستگی براساس تابعی از کرنش یا تنش کششی و سفتی آسفالت تخمین زده می‌شود. (Abojaradeh 2003, Khodary 2010). مدل خستگی انستیتو آسفالت، شل، دانشگاه کالیفرنیا و مدل اشتو در راهنمای ۲۰۰۲ از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین نوع مدل‌های خستگی برپایه تنش-کرنش یا پدیده‌شناسی می‌باشند Abojaradeh (2003, Yuan et al. 2013). گروه دوم از مدل‌ها شامل مدل‌های ارائه شده برپایه انرژی تلف شده می‌باشند. در این

مدل‌ها عمر خستگی به مقدار انرژی تلف شده اولیه یا انرژی تلف شده کل مرتبط می‌شود. گروه سوم شامل مدل‌های مکانیک شکست می‌باشند. روش‌های مکانیک شکست و انرژی تلف شده اساساً از روش پدیده‌شناسی پیچیده‌ترند اما ممکن است در بازه گسترده‌تری از بارگذاری و شرایط محیطی کارا بوده و ارزیابی بهتری از عمر خستگی یک روسازی جدید و یا عمر باقیمانده روسازی قدیمی بدهد. شاید اشکال مهم روش‌های مبتنی بر انرژی تلف شده و مکانیک شکست پیچیدگی پارامترها و روش انجام آزمایش‌های مرتبط با آنها باشد که تا حدی جنبه کاربردی آنها را محدود نموده است (Boudabbous et al. 2013, Shen et al. 2006, Shen and Carpenter 2007). تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه کاربرد روش انرژی تلف شده بر ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. در این رابطه پارامترها و تعاریف مختلفی ارائه شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در برخی از مدل‌ها از انرژی تلف شده اولیه استفاده شده است. معمولاً در آزمایش خستگی ۵۰ سیکل اولیه به عنوان پیش‌بارگذاری در نظر گرفته می‌شود. مقدار انرژی تلف شده در پنجاهمین سیکل بارگذاری به عنوان انرژی تلف شده اولیه شناخته می‌شود (Ghuzlan 2001, Shen et al. 2006). براساس مطالعات انجام شده این پارامتر به عنوان نشانه مناسبی از عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی برای مخلوط‌های مشابه می‌باشد. شارپ در گزارش خود رابطه‌ای بین انرژی تلف شده اولیه و عمر خستگی ارائه نموده است. یکی از اشکالات انرژی تلف شده اولیه آن است که برای تمامی مقادیر بارگذاری به خصوص در سطح کرنش‌های پایین مناسب نیست. براساس مطالعات انجام شده همبستگی مناسبی بین انرژی تلف شده اولیه و عمر خستگی در کرنش‌های متوسط وجود دارد که قابل تعمیم به کرنش‌های پایین نیست. همچنین این پارامتر برای بررسی رفتار خوداصلاحی آسفالت مناسب نمی‌باشد (Ghuzlan 2001, Shen et al. 2006). پارامتر دیگری که در روش انرژی تلف شده مورد استفاده قرار گرفته است، انرژی تلف شده کل یا تجمعی می‌باشد. انرژی تلف شده کل جمع مقادیر انرژی تلف شده مشاهده شده در طول آزمایش خستگی می‌باشد. برخی از محققین ارتباط بسیار مناسبی بین انرژی تلف شده تجمعی و تعداد سیکل‌های منجر به گسیختگی یافته‌اند. از مزایای این پارامتر عدم تاثیرپذیری آن به روش بارگذاری (تنش ثابت یا

کرنش ثابت)، مقدار فرکانس بارگذاری، دما و وجود دوره‌های بدون بار می‌باشد. اگرچه این پارامتر به شدت تابع نوع مخلوط مورد مطالعه بوده و روابط به دست آمده برای یک نوع مخلوط قابل تعمیم به مخلوط‌های آسفالتی دیگر نمی‌باشد (Shen et al. 2006, Shen and Carpenter 2007). در روش‌های ارتقا یافته از مفهوم نسبت انرژی تلف شده به عنوان پارامتری برای پیش‌بینی عمر خستگی استفاده شده است. براساس این مفهوم تمام انرژی تلف شده در هر سیکل یا دوره زمانی مشخص نشانه پیشرفت خرابی در آن سیکل یا دوره نمی‌باشد. مثلاً در یک سیکل بارگذاری مقدار انرژی تلف شده به دلیل کار مکانیکی یا دیگر تاثیرات محیطی تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. بنابراین اگر تغییرات انرژی تلف شده ناگهانی باشد این مساله می‌تواند به عنوان پیشرفت خرابی توصیف گردد. تئوری نسبت انرژی تلف شده بعدها توسط کارپنتر و همکارانش ارتقاء یافته است. براساس نتایج به دست آمده از مطالعات آنها یک رابطه اساسی بین نسبت انرژی تلف شده و عمر خستگی وجود داشته که مستقل از مقدار بار، نوع بارگذاری و نوع مخلوط بوده است. در مطالعات بعد پارامتر نسبت تغییرات انرژی تلف شده (RDEC)<sup>۱</sup> و محدودده ثابت (PS)<sup>۲</sup> معرفی گردید (Shen and Carpenter 2007, Yuan et al. 2013). محققین بسیاری بر روی مفاهیم جدید انرژی تلف شده در مخلوط‌های آسفالتی مطالعه نموده و در اکثر موارد به مستقل بودن پارامترهای فوق از روش آزمایش، شرایط آزمایش و نوع مخلوط اشاره شده است. در یکی از تحقیقات انجام شده از روش خمش چهارنقطه‌ای برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالت گرم استفاده گردید. در تحقیق فوق از هر دو روش تنش و کرنش کنترل شده و معیار RDEC برای تعریف خرابی استفاده گردید. در نهایت معیاری برای خرابی خستگی ارائه گردید که در آن خرابی ماده با افزایش قابل توجه RDEC همراه بوده است. همچنین در گزارش ارائه شده مستقل بودن مدل خستگی ارائه شده برپایه RDEC از روش انجام آزمایش خستگی مورد تایید قرار گرفت (Yuan et al. 2013). در تحقیق دیگر روش نوین انرژی تلف شده به مخلوط‌های آسفالت نیمه گرم تعمیم داده شد و نتایج به دست آمده با مخلوط‌های آسفالت گرم متداول مقایسه شد. براساس نتایج ارائه شده ارتباط بین پارامتر محدودده ثابت (PV)<sup>۳</sup> و عمر خستگی در این مخلوط‌ها معنادار بوده و به طور مشابهی مستقل از نوع مخلوط و روش

آزمایش بود (Modarres and Aloogar 2015). علاوه بر مخلوط‌های آسفالتی، حتی برخی از محققین به امکان استفاده توام از این پارامترها در مخلوط‌های بتن سیمانی نیز اشاره نموده‌اند (Daniel and Bisirri 2005). با توجه به بررسی‌های فوق تحقیق حاضر به امکان ارائه یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی عمر خستگی آسفالت حاوی الیاف پلی‌اتیلن بازیافتی (PET)<sup>۴</sup> با استفاده از پارامترهای کرنش اولیه و PV می‌پردازد. اگرچه تاثیر مفید استفاده از الیاف بر عمر خستگی آسفالت در مطالعات متعددی بررسی شده (Abtahi et al. 2010, Abtahi et al. 2011, Guo et al. 2015, Herráiz et al. 2016, Mahrez and Karim 2010) اما تاکنون مطالعات بسیار کمی در زمینه استفاده از مواد بازیافتی در تولید الیاف برای تسلیح مخلوط‌های آسفالتی انجام شده‌است. جهت پیش‌بینی عمر خستگی در این تحقیق آزمایش خمش چهارنقطه‌ای بر روی نمونه‌های آسفالتی حاوی الیاف پلی‌اتیلن بازیافتی در سه سطح کرنش و دمای مختلف انجام و پارامتر PV در شرایط مختلف محاسبه گردید. هدف اصلی تحقیق ارائه مدل ریاضی برای پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط آسفالتی حاوی الیاف در دما و سطح کرنش متفاوت با استفاده از پارامتر PV می‌باشد.

## ۲- تعریف پارامترها

در روش خمش چهارنقطه‌ای بارگذاری با فرکانس مشخصی بر روی نمونه تیرچه اعمال شده و پارامترهای مختلفی در طول آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. اگر مقدار بار اعمالی در هر سیکل برابر با P در نظر گرفته شود، مقادیر کرنش و تنش کششی در سیکل i ام با استفاده از روابط (۱) و (۲) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\sigma_i = 0.357 \frac{P}{bh^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4a^2} \quad (2)$$

که در این روابط:

$\sigma_i$ : تنش کششی حداکثر، پاسکال

$\varepsilon_i$ : کرنش کششی حداکثر، میکروکرنش

P: مقدار بار اعمالی، نیوتن

b: عرض متوسط نمونه، متر

h: ارتفاع متوسط نمونه، متر

$\delta$ : حداکثر خیز تیر در مرکز تیر، متر

a: فاصله بین گیره‌های داخلی قاب بارگذاری که برابر با ۰/۱۱۹ متر است.

L: فاصله بیرونی گیره‌های خارجی که برابر با ۰/۳۵۶ متر است.

در هر سیکل بارگذاری یک اختلاف فاز زمانی بین مقدار تنش و عکس‌العمل یا کرنش وجود دارد. هرچه رفتار ماده ویسکوزتر باشد این اختلاف فاز بزرگتر خواهد بود. این اختلاف فاز یا زاویه فازی با استفاده از رابطه (۳) قابل محاسبه خواهد بود.

$$\varphi = 360fs \quad (3)$$

که در آن:

$\phi$ : زاویه فازی، درجه

f: فرکانس بارگذاری، هرتز

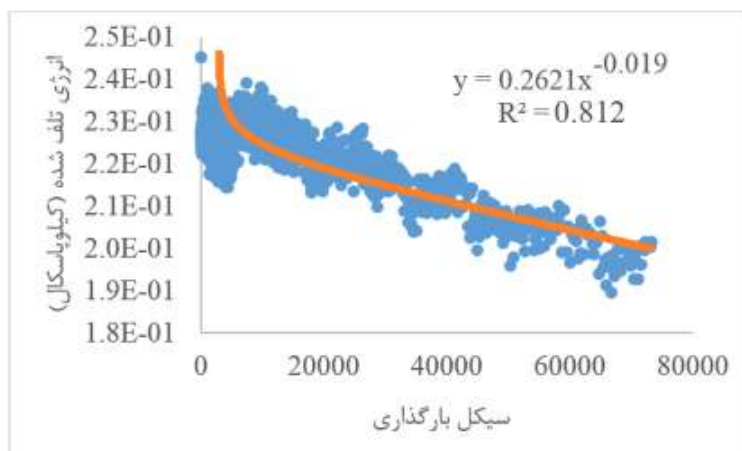
s: تاخیر زمانی بین مقدار بار و تغییرشکل حداکثر برحسب ثانیه که توسط نرم‌افزار آزمایش ثبت می‌شود.

با استفاده از زاویه فازی می‌توان مقدار انرژی تلف شده در هر سیکل را با استفاده از رابطه (۴) محاسبه نمود.

$$DE_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \varphi \quad (4)$$

پارامترهای  $\sigma_i$ ،  $\varepsilon_i$  و  $\phi$  به ترتیب از روابط (۱)، (۲) و (۳) به دست می‌آیند. همچنین پارامتر DE مقدار انرژی تلف شده برحسب کیلوپاسکال می‌باشد. یک روش متداول در محاسبه RDEC فرض ارتباط توانی بین انرژی تلف شده و سیکل‌های بارگذاری می‌باشد (Shen and Carpenter, 2007). نمونه‌ای از این ارتباط در شکل ۱ نشان داده شده‌است. همانطورکه در شکل مشاهده می‌گردد ضریب  $R^2$  برابر با ۰/۸۱۲ به دست آمده که با توجه به ماهیت پارامترها و نوع آزمایش قابل قبول می‌باشد. در روش متداول برای محاسبه RDEC در یک سیکل مشخص از ضریب توانی به دست آمده از تابع ریاضی استفاده می‌شود.

مطابق شکل ۱ ضریب توانی برابر با ۰/۰۱۹- می‌باشد. براساس تعریف پارامتر RDEC در سیکل n1 با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌گردد.



شکل ۱. تغییرات انرژی تلف شده در مقابل سیکل‌های بارگذاری

$$RDEC_{n1} = \frac{DE_{n1} - DE_{n2}}{DE_{n1} \times (n2 - n1)} \quad (5)$$

در این رابطه:

$RDEC_{n1}$ : مقدار متوسط نسبت تغییرات انرژی تلف شده در سیکل  $n1$  در مقایسه با سیکل  $n2$  می‌باشد.  
 $n1$  و  $n2$ : سیکل‌های بارگذاری  $n1$  و  $n2$  که معمولاً فاصله بین آنها ۱۰ و اغلب ۱۰۰ سیکل می‌باشد (یا  $n2 - n1 = 100$ ). بدیهی است هرچه این فاصله کمتر انتخاب شود دقت محاسبات بیشتر خواهد بود. در صورتی که تغییرات انرژی تلف شده قابل توجه باشد بهتر است برای افزایش دقت محاسبات این فاصله را ۱۰ سیکل انتخاب نمود. همچنین گاهی مقدار تغییرات انرژی تلف شده آنقدر ناچیز است که در طی ۱۰۰ سیکل قابل تشخیص نمی‌باشد. در این صورت فاصله سیکل‌ها ۱۰۰۰ یا حتی ۱۰۰۰۰ انتخاب می‌گردد.  
 $DE_{n1}$  و  $DE_{n2}$ : مقدار انرژی تلف شده به ترتیب در سیکل‌های  $n1$  و  $n2$

اگر مطابق شکل ۱ معادله رگرسیونی بین انرژی تلف شده و سیکل‌های بارگذاری یک معادله توانی در نظر گرفته شود، صورت کلی این معادله در رابطه (۶) قابل ارائه خواهد بود.

$$DE_x = AX^k \quad (6)$$

که در آن پارامترهای  $A$  و  $k$  ضرایب معادله رگرسیونی می‌باشند.

بنابراین معادلات رابطه (۷) برای دو سیکل مختلف مقدار انرژی تلف شده را خواهند داد.

$$DE_{n1} = An1^k \quad (7)$$

$$DE_{n2} = An2^k$$

$$n2 - n1 = 10 \text{ یا } 100$$

با قرار دادن معادله (۷) در معادله (۵) و انجام محاسبات با فرض فاصله ۱۰ سیکل بین  $n1$  و  $n2$ :

$$RDEC_{n1} = \frac{An1^k - An2^k}{An1^k \times (n2 - n1)} = \frac{n1^k - n2^k}{n1^k \times 10} = \frac{1 - (\frac{n2}{n1})^k}{10} = \frac{1 - (\frac{n1 + 10}{n1})^k}{10} = \frac{1 - (1 + \frac{10}{n1})^k}{10}$$

بنابراین میانگین RDEC در طی ۱۰ سیکل در سیکل  $n1$  از معادله (۸) قابل محاسبه خواهد بود.

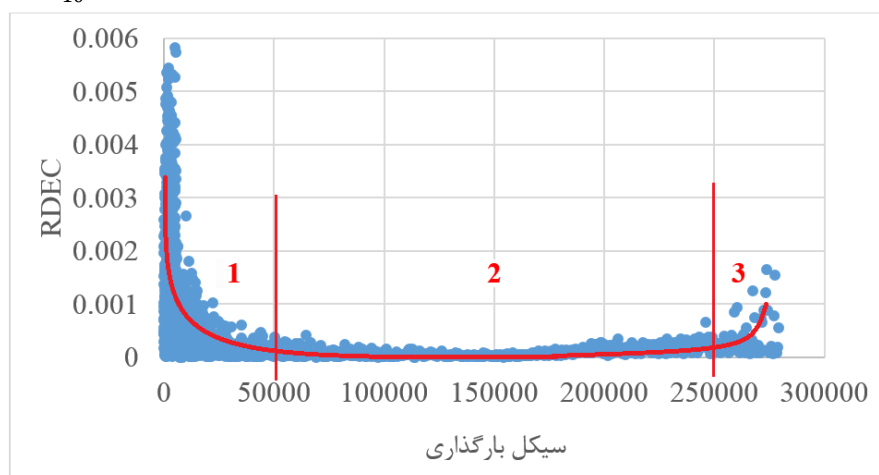
$$RDEC_{n1} = \frac{1 - (1 + \frac{10}{n1})^k}{10} \quad (8)$$

نمودار تغییرات RDEC در سیکل‌های مختلف بارگذاری در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل این نمودار شامل سه مرحله می‌باشد. در مرحله اول که شامل سیکل‌های اولیه بارگذاری می‌باشد، کاهش قابل توجهی در مقدار RDEC رخ می‌دهد. در مرحله دوم روند تغییرات پایدار شده و به صورت ثابتی ادامه می‌یابد. این مرحله تا نزدیکی وقوع ترک

خستگی ادامه یافته و در انتهای این مرحله مقدار RDEC با نرخ قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در روش متداول پارامتر PV در مرحله دوم نمودار RDEC تعریف می‌گردد. در بسیاری از تحقیقات انجام شده معیار کاهش سفتی نمونه به میزان ۵۰٪ مقدار اولیه آن به عنوان معیاری برای تعیین عمر خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد (EN 12697-24, )

(2012). طبق تعریف مقدار RDEC در سیکلی که در آن سفتی ۵۰٪ به دست می‌آید به عنوان PV در نظر گرفته می‌شود. این مقدار معمولاً در انتهای مرحله دوم نمودار به دست می‌آید (Shen and Carpenter 2007). در تحقیق حاضر این تعریف به عنوان تعریف اولیه در نظر گرفته شده

$$PV1 = \frac{1 - \left(1 + \frac{10}{Nf50}\right)^k}{10}$$



شکل ۲. تغییرات RDEC با سیکل‌های بارگذاری در آزمایش خمش چهارنقطه‌ای

اگرچه محققان بسیاری سعی در یافتن ارتباط بین PV1 و عمر خستگی نموده‌اند (Shen and Carpenter 2007, Yuan et al. 2013) اما این تعریف دارای چند ایراد اساسی است که جنبه کاربردی آن را تضعیف می‌نماید. یکی از این نقص‌ها لزوم انجام آزمایش خستگی تا رسیدن به سفتی ۵۰٪ می‌باشد. هدف اصلی در ارائه تعریف سفتی ۵۰٪ برای عمر خستگی کاهش زمان آزمایش خستگی بوده‌است. در بسیاری از موارد به خصوص در کرنش‌های متوسط و کم، تعداد سیکل‌های مورد نیاز بسیار زیاد بوده و همچنان زمان انجام آزمایش تا رسیدن به سفتی ۵۰٪ طولانی خواهد بود. ایراد دوم مرتبط با پراکندگی نتایج می‌باشد که با توجه به ماهیت آزمایش خستگی این پراکندگی طبیعی می‌باشد. پراکندگی نتایج در شکل ۲ نیز قابل مشاهده می‌باشد. مطابق شکل در مرحله دوم نمودار بسیاری از نقاط پایین‌تر یا بالاتر از منحنی برازش داده شده قرار دارند. در نتیجه، این پراکندگی ممکن است به برآورد مقداری از PV1 منجر گردد که به مراتب از مقدار واقعی کمتر یا بیشتر باشد. ایراد سوم این تعریف فرض رابطه توانی بین سیکل‌های بارگذاری

و با PV1 نشان داده می‌شود. براساس تعریف ارائه شده اگر در رابطه (۸) به جای n1 تعداد سیکل‌های بارگذاری که منجر به کاهش سفتی به میزان ۵۰ درصد مقدار اولیه می‌شوند قرار گیرد (یعنی n1=Nf50) پارامتر PV1 با استفاده از رابطه (۹) قابل محاسبه خواهد بود.

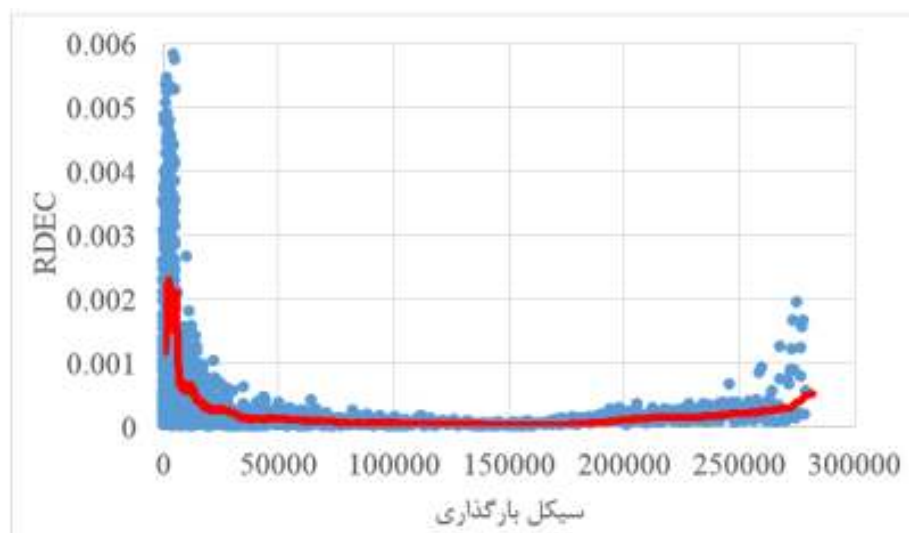
(۹)

و انرژی تلف شده (شکل ۱) می‌باشد که در بسیاری از آزمایش‌ها صادق نبوده و منجر به همبستگی ضعیفی بین این دو پارامتر می‌گردد. بنابراین در این تحقیق از تعریف دیگری علاوه بر تعریف متداول برای پارامتر PV استفاده می‌گردد که با PV2 نشان داده می‌شود.

در این تعریف از مفهوم میانگین متحرک استفاده می‌شود. در شکل ۳ میانگین متحرک داده‌های RDEC از ابتدای آزمایش محاسبه شده‌است. این میانگین متحرک شامل میانگین ۵۰ نقطه پی در پی می‌باشد. در حالت کلی نمودارهای به دست آمده در شکل‌های ۲ و ۳ بسیار شبیه بوده و مرحله دوم نمودار یا محدوده ثابت در شکل ۳ نیز قابل مشاهده است. در تعریف دوم از ضریب تغییرات (CV) برای تعیین مقدار PV2 استفاده می‌شود. در این روش لازم است مقدار قابل قبول CV برای نرم‌افزار آزمایش خستگی تعیین گردد. به عبارت دیگر مقدار PV2 در نقطه‌ای از مرحله دوم نمودار تعیین می‌گردد که مقدار CV از معیار در نظر گرفته شده در نرم‌افزار کمتر یا با آن برابر باشد. بنابراین در اولین نقطه‌ای که در مرحله دوم نمودار این

مقدار از CV به دست آمده می‌توان آزمایش را قطع و پارامتر PV2 را ثبت نمود. بنابراین اگر یک رابطه ریاضی بین PV و عمر خستگی در دست باشد با استفاده از آن عمر خستگی نمونه قابل پیش‌بینی خواهد بود. مزیت روش دوم نسبت به تعریف اول در کاهش قابل توجه تعداد سیکل‌های

بارگذاری و صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌باشد. یکی دیگر از مزیت‌های روش دوم عدم نیاز به فرض رابطه توانی بین سیکل‌های بارگذاری و انرژی تلف شده است که در بسیاری از موارد منجر به افزایش خطا در برآورد PV می‌گردد.



شکل ۳. تغییرات RDEC در سیکل‌های مختلف بارگذاری براساس میانگین متحرک ۵۰ نقطه پی در پی

### ۳- مطالعات آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از قیر خالص ۶۰/۷۰ ساخته شدند. این نوع قیر از پالایشگاه تهران تهیه شده و براساس آزمایش‌های انجام شده تمامی معیارها را برآورده نمود. مصالح‌سنگی از دپوی مصالح فرآوری شده یک کارخانه آسفالت در حال بهره‌برداری تهیه شد. برای ساخت آسفالت از دانه‌بندی پیوسته استاندارد با اندازه ۱۹-۰ میلی‌متر استفاده شد. بر روی این مصالح آزمایش‌های کنترل کیفیت براساس روش‌های استاندارد انجام شده و جهت اطمینان از کیفیت مناسب با حداقل ملزومات تعیین شده مقایسه گردید. الیاف PET از ضایعات بطری‌های پلاستیکی تهیه شده و براساس آزمایش‌های انجام شده دارای نقطه ذوب ۲۹۰ درجه سانتیگراد و وزن‌مخصوص ۱/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بودند. مقاومت کششی و کرنش شکست آنها به ترتیب برابر با ۹۱۰ مگاپاسکال و ۲۰ درصد می‌باشند. همچنین مدول یانگ الیاف مورد تحقیق برابر با ۱۰/۲ گیگاپاسکال بوده است. قطر متوسط الیاف برابر با ۳۰ میکرومتر و طول الیاف برابر با ۱ و ۲ سانتی‌متر بوده است.

همچنین درصد الیاف مورد استفاده برابر با ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲/۰ درصد نسبت به وزن قیر انتخاب گردید. به منظور تعیین درصد قیر بهینه از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های طرح اختلاط درصد قیر بهینه برابر با ۵/۳ درصد به دست آمد. پس از تعیین درصد قیر بهینه نمونه‌های اصلی که شامل نمونه‌های تیری شکل برای آزمایش خمش چهارنقطه‌ای بود ساخته شدند. جهت ساخت نمونه‌های آزمایش خمش چهارنقطه‌ای ابتدا مصالح مورد استفاده در ساخت آسفالت مخلوط شدند. به منظور جلوگیری از تجمع الیاف و گلوله شدن آنها ابتدا الیاف به صورت خشک به سنگدانه‌ها اضافه شده و پس از اطمینان از توزیع مناسب الیاف قیر اضافه گردید. پس از افزودن قیر مخلوط آسفالتی به مدت ۱۰ دقیقه در میکسر مخلوط گردید. سپس نمونه‌های دالی شکل مخلوط شاهد و نمونه‌های حاوی الیاف با استفاده از دستگاه متراکم کننده غلنتکی متراکم شدند. دمای مخلوط در زمان تراکم نمونه‌ها با توجه به مقدار ویسکوزیته قیر  $140 \pm 3$  درجه سانتیگراد و

تعداد سیکل‌های رفت و برگشت متراکم کننده برای هر نمونه برابر با ۵۰ مرتبه بود. براساس بررسی‌های انجام فضای خالی مخلوط‌های آماده شده در این روش برابر با  $4 \pm 0.2$  درصد که حد متوسط برای آسفالت رویه است، به دست آمد. پس از اتمام تراکم نمونه‌های دالی شکل و خارج نمودن آنها از قالب تراکم، نمونه‌ها با استفاده از اهر برقی برش داده شده و تیرچه‌های آسفالتی به ابعاد  $5 \times 10 \times 30$  سانتیمتر آماده شدند. آزمایش خستگی با استفاده از دستگاه UTM-14<sup>۱</sup> و مطابق استاندارد EN 12697-24 انجام شد (EN 12697-24, 2004). این دستگاه شامل محفظه کنترل دما بوده و آزمایش خستگی در سه دمای -۵، ۱۰ و ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد. نمونه‌ها حداقل به مدت ۵ ساعت قبل از شروع آزمایش در محفظه دستگاه قرار داده شدند تا به دمای موردنظر برسند. محفظه دستگاه دارای یک نمونه مرجع بوده که از طریق آن دمای هسته و پوسته نمونه در هر لحظه قابل اندازه‌گیری بود. همچنین از طریق یک حرارت‌سنج دمای محفظه در مدت زمان قرارگیری نمونه درون محفظه و در طول آزمایش اندازه‌گیری می‌شد. دستگاه به یک سیستم جانبی مجهز بود که دمای محفظه، پوسته و هسته نمونه را در هر لحظه ثبت می‌نمود. همچنین در طول دوره بارگذاری نیز امکان کنترل این سه دما وجود داشت. در این تحقیق از بارگذاری نیم‌سینوسی با دو فرکانس ۲ و ۱۰ هرتز استفاده شده و آزمایش به روش کرنش ثابت انجام شد. هر سیکل بارگذاری در فرکانس ۱۰ هرتز شامل  $0.05/0.05$  ثانیه بارگذاری و  $0.05/0.05$  ثانیه دوره استراحت بوده است. همچنین در فرکانس ۲ هرتز هر سیکل بارگذاری شامل  $0.05/0.05$  ثانیه بارگذاری و  $0.45/0.45$  ثانیه دوره استراحت بود. روش بارگذاری کرنش ثابت بوده و مقدار کرنش‌های اولیه برابر با ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میکروکرنش در سیکل ۵۱۲۰ به مقدار ۵۰٪ سفتی اولیه برابر با ۲۷۶۷ رسیده است. بنابراین مطابق تعریف اول مقدار PVI برابر با  $0.0003258$  بوده و همانطور که در شکل ۴-الف نشان داده شده است بالاتر از مقدار میانگین قرار گرفته است. در حالیکه براساس تعریف دوم مقدار PV2 در سیکل ۱۹۵۱ به دست آمده که میانگین متحرک آن با ضریب تغییرات  $0.137$  برابر

$$PV1 = 2.5911Nf^{-1.318}$$

بود. عمر خستگی در این تحقیق برابر با تعداد سیکل‌های بارگذاری در نظر گرفته شده که منجر به کاهش سفتی اولیه به ۵۰ درصد مقدار آن شده است.

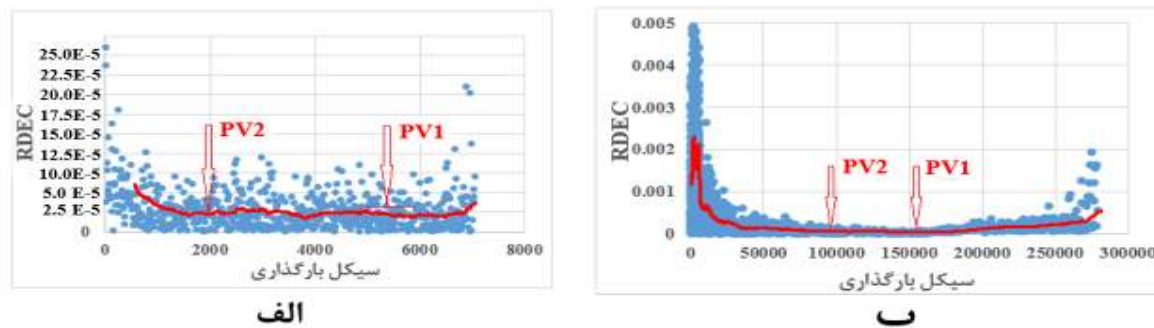
#### ۴- نتایج و تفسیر

شکل ۴ نمودار تغییرات RDEC را برای دو نمونه مسلح شده با الیاف ۱ سانتیمتری که در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد آزمایش شده‌اند نشان می‌دهد. شکل الف مربوط به کرنش اولیه ۷۰۰ و شکل ب مربوط به کرنش اولیه ۳۰۰ میکروکرنش می‌باشد. مطابق شکل در هر دو نمونه برای دستیابی به مقدار PVI تعداد سیکل‌های بیشتری مورد نیاز می‌باشد. در حالیکه در تعریف دوم که بر مبنای میانگین متحرک ارائه شده است مقدار PV2 در بخش ابتدایی محدوده ثابت به دست آمده است. لازم به ذکر است که در این تحقیق مقدار CV قابل قبول برابر با ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین در صورتی که در تمامی نقاط محدوده ثابت مقدار CV بزرگتر از ۱۵ درصد باشد نقطه‌ای به عنوان PV2 در نظر گرفته می‌شود که کمترین مقدار CV را به دست بدهد. علاوه بر کاهش تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای رسیدن به مقدار PV در تعریف دوم، به دلیل استفاده از میانگین نتایج که در این تحقیق شامل ۵۰ نقطه بوده است احتمال وقوع خطا در اثر پراکندگی بالای نتایج کاهش خواهد یافت. به عنوان مثال همانطور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌گردد پراکندگی نسبتاً زیادی حتی در مرحله میانی نمودار RDEC (محدوده ثابت) وجود خواهد داشت. مقدار سفتی اولیه نمونه مورد آزمایش ۵۵۳۴ مگاپاسکال بوده و نمونه

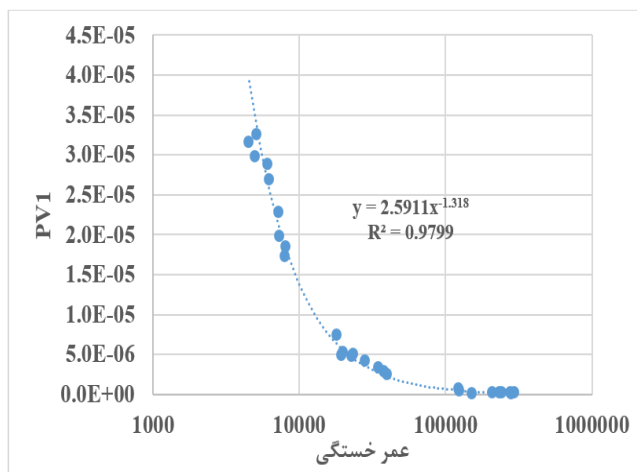
با  $0.000254$  می‌باشد. در شکل ۵ ارتباط بین عمر خستگی و PVI در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز نشان داده شده است. با توجه به این شکل مطابق رابطه (۱۰) با استفاده از تابع توانی به خوبی می‌توان عمر خستگی را با استفاده از پارامتر PVI تخمین زد.

$$(10)$$

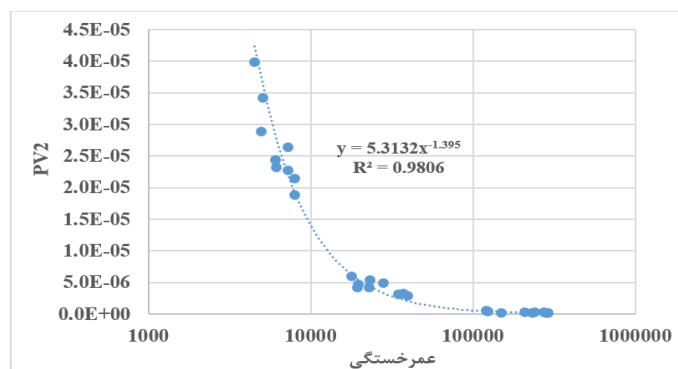
در رابطه (۱۰)، NF عمر خستگی نمونه بر مبنای معیار  $0.50$ ٪ سفتی اولیه می‌باشد.



شکل ۴. نمودار تغییرات RDEC با تعداد سیکل‌های بارگذاری براساس میانگین متحرک در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (الف) نمونه با ۰/۵ درصد الیاف ۱ سانتیمتری در کرنش اولیه ۳۰۰ میکروکرنش (ب) نمونه با ۰/۵ درصد الیاف ۱ سانتیمتری در کرنش اولیه ۷۰۰ میکروکرنش



شکل ۵. ارتباط بین عمر خستگی و PV1 در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز

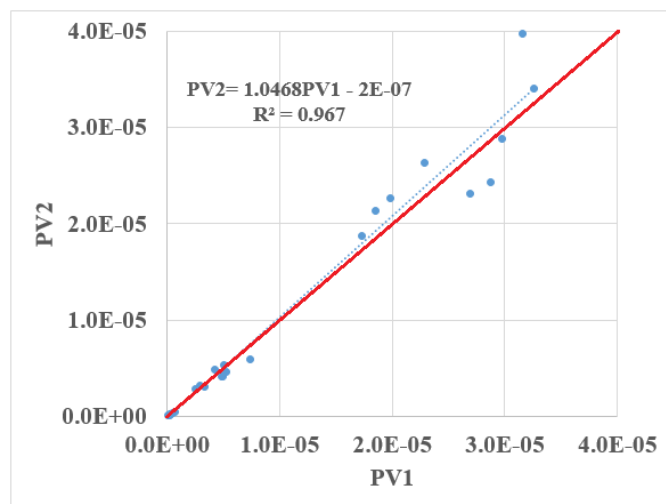


شکل ۶. ارتباط بین عمر خستگی و PV2 در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز

در شکل ۶ ارتباط بین عمر خستگی و PV2 در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز نشان داده شده است. مطابق این شکل مشابه با شکل ۵ یک رابطه توانی بین عمر خستگی و PV2 وجود دارد. همچنین مقدار  $R^2=0.9806$  حاکی از همبستگی قوی بین این دو پارامتر است. شکل ۷ ارتباط بین پارامترهای PV1 و PV2 را در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس ۱۰ هرتز نشان می‌دهد.

با توجه به شکل توزیع نقاط در اطراف خط ۴۵ درجه مناسب بوده است. با توجه به شکل در مقادیر کرنش‌های بالاتر که منجر به مقدار بزرگتری برای PV شده‌اند در اغلب موارد PV2 بزرگتر از PV1 است ولی در کرنش‌های پایین‌تر توزیع نقاط در اطراف خط ۴۵ درجه تقریباً یکسان است.

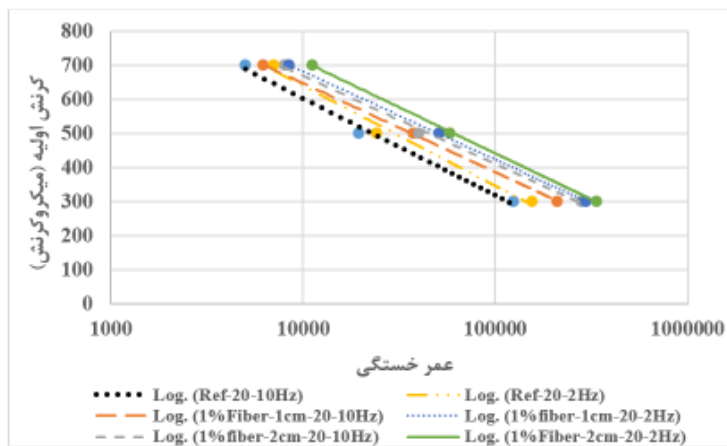




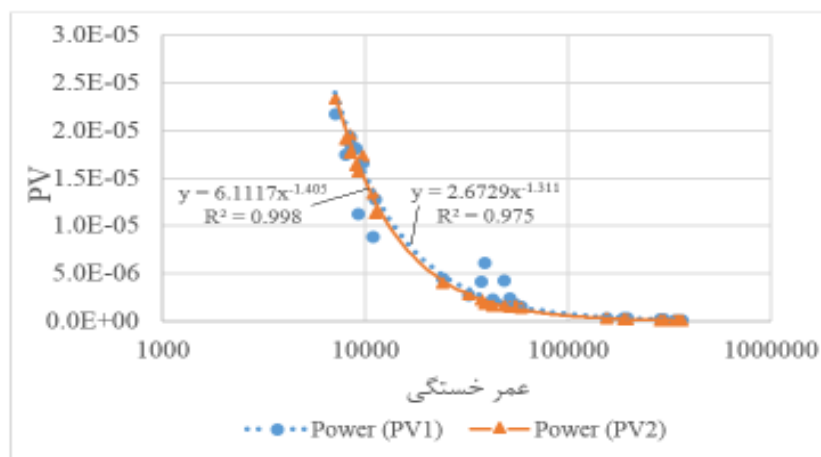
شکل ۷. ارتباط بین PV1 و PV2 در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس ۱۰ هرتز

تأثیر فرکانس بارگذاری بر عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده با الیاف یک و دو سانتیمتری در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق شکل برای هر دو فرکانس مورد مقایسه نمونه‌های مسلح شده عمر خستگی بالاتری نسبت به نمونه‌های مرجع داشته‌اند. البته در کرنش‌های بالا نمونه مسلح شده با یک درصد الیاف یک سانتیمتری که در فرکانس ۱۰ هرتز بارگذاری شده است عمر خستگی مشابه یا اندکی کمتر از نمونه مرجع که در فرکانس ۲ هرتز بارگذاری شده داشته است. براساس گزارش‌های ارائه شده فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز برای شبیه‌سازی سرعت میدانی ۶۰ مایل بر ساعت و فرکانس ۲ هرتز برای سرعت میدانی حدود ۱۵

مایل بر ساعت مناسب است (Kim 2009, Thiago et al. 2008). با توجه به نمودارهای خستگی ارائه شده در شکل ۸ برای هر سه ترکیب مورد مقایسه با کاهش فرکانس بارگذاری از ۱۰ به ۲ هرتز عمر خستگی افزایش یافته است. این مساله ناشی از خاصیت خوداصلاحی آسفالت و امکان بازیابی بخشی از سطح ترک‌خورده در فرکانس ۲ هرتز به دلیل زمان استراحت بالاتر می‌باشد. این مساله با نتایج مطالعات میدانی که حاکی کاهش مقدار و شدت ترک‌های خستگی در سرعت‌های پایین می‌باشد مطابقت دارد (Carpenter et al. 2003, Kim 2009).



شکل ۸. تأثیر فرکانس بارگذاری بر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف PET



شکل ۹. ارتباط بین عمر خستگی و PV برای نمونه‌های مسلح شده با الیاف در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس بارگذاری ۲ هرتز

شکل ۹ ارتباط بین عمر خستگی و پارامترهای PV1 و PV2 را نشان می‌دهد. رابطه توانی با دقت بسیار بالایی این دو پارامتر را مرتبط می‌نماید. مطابق شکل مقادیر عمر خستگی تخمین زده شده از دو پارامتر بسیار نزدیک بوده و در محدوده کرنش‌های مورد بررسی مقدار به دست آمده از تعریف دوم (PV2) اندکی کمتر از تعریف اول (PV1) می‌باشد. مقایسه بین تعاریف اول و دوم حاکی از آن است که استفاده از پارامتر PV2 در مدل پیش‌بینی عمر خستگی باعث کاهش دقت پیش‌بینی نخواهد شد.

$$\varepsilon = -123.6 \ln(Nf) + 1741.6$$

(۱۱)

براساس رابطه (۱۱) شیب نمودار خستگی برابر با ۱۲۳/۶- بوده است. در مقابل برای همین نمونه و در دمای ۵-

$$\varepsilon = -91.2 \ln(Nf) + 1413.6$$

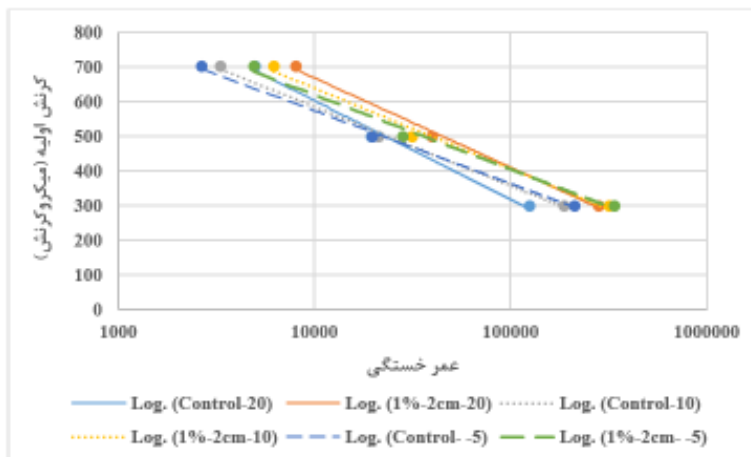
(۱۲)

بنابراین شیب نمودار خستگی برای این نمونه برابر با ۹۱/۲- بوده که قدرمطلق آن کمتر از مقدار به دست آمده در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد بوده است. به طور مشابه برای سایر نمونه‌ها نیز شیب نمودار خستگی با کاهش دمای آزمایش کاهش یافته است. به عنوان مثال برای نمونه حاوی یک درصد الیاف دو سانتیمتری شیب نمودار خستگی در دمای ۲۰ و ۵- درجه سانتیگراد به ترتیب برابر با ۱۱۲/۲- و ۹۳/۲- بوده است. بنابراین برخلاف شکل ۸ قانون خستگی برای یک نمونه ثابت در دماهای متفاوت یکسان نبوده است.

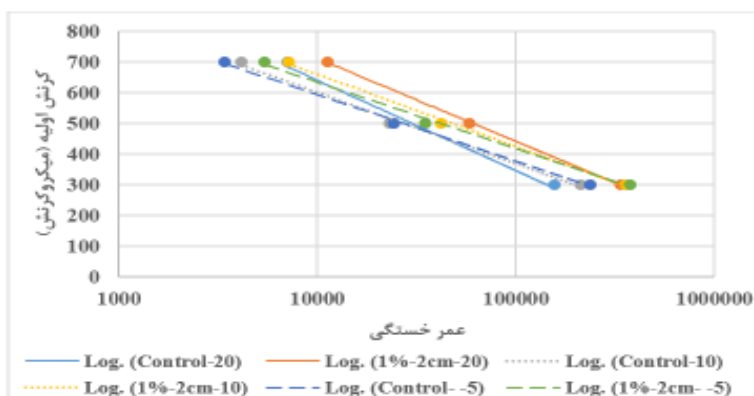
در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تاثیر دما بر عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده و کترلی به ترتیب در فرکانس‌های ۱۰ و ۲ هرتز نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰ با کاهش دمای آزمایش شیب نمودارهای خستگی کاهش یافته است. در نتیجه تاثیر الیاف مسلح‌کننده در کرنش‌های مختلف یکسان نمی‌باشد. به عنوان مثال ارتباط بین عمر خستگی (Nf) و کرنش اولیه (ε) برای نمونه کنترل در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد مطابق رابطه (۱۱) می‌باشد:

درجه سانتیگراد ارتباط بین ε و Nf به صورت رابطه (۱۲) بوده است.

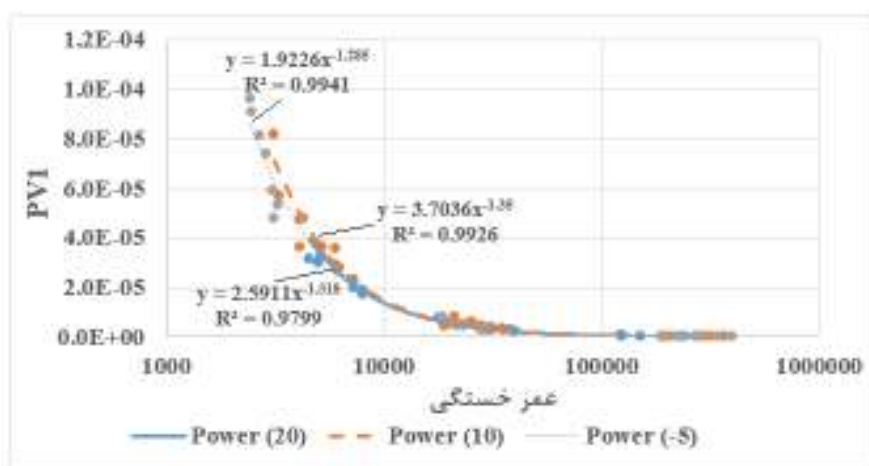
مطابق شکل ۸ تغییر فرکانس چنین تاثیری بر نمودارهای خستگی ندارد. با توجه به نتیجه اخیر مقایسه عمر خستگی نمونه‌ها و به خصوص بررسی تاثیر الیاف بر آنها در شرایط دمایی متغیر باید براساس مقدار کرنش اولیه انجام شده و نتیجه به دست آمده در یک سطح کرنش قابل تعمیم به مقادیر دیگر نخواهد بود. نتایج به دست آمده در شکل ۱۱ که مربوط به نمونه‌های آزمایش شده در فرکانس دو هرتز می‌باشد نیز تا حد زیادی مشابه شکل ۱۰ بود و نشان دهنده کاهش شیب نمودار با کاهش دمای آزمایش بوده است.



شکل ۱۰. تاثیر دما بر عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده در فرکانس ۱۰ هرتز



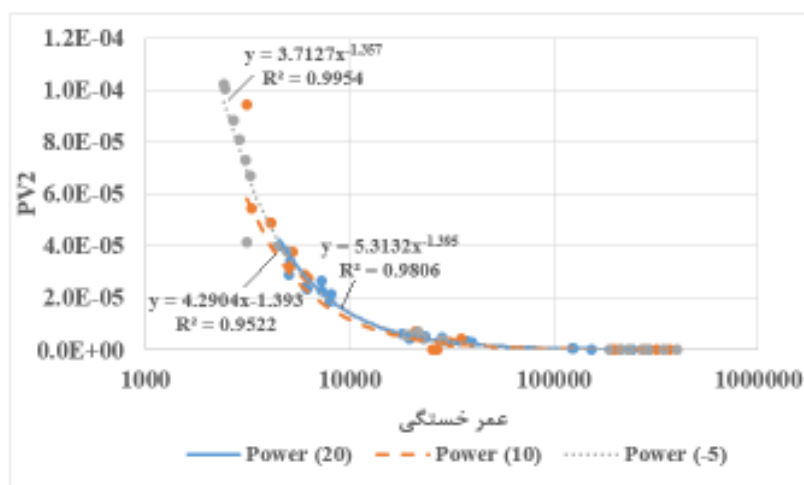
شکل ۱۱. تاثیر دما بر عمر خستگی نمونه‌های مسلح شده در فرکانس ۲ هرتز



شکل ۱۲. ارتباط بین عمر خستگی و PVI برای نمونه‌های مسلح شده در دماهای مختلف در فرکانس ۱۰ هرتز

شکل ۱۲ ارتباط بین عمر خستگی و پارامتر PVI را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. برخلاف شکل‌های ۱۰ و ۱۱ که حاکی از تفاوت در روند تغییرات عمر خستگی در دماهای مختلف می‌باشند نمودارهای به دست آمده در شکل ۱۲ بسیار نزدیک به یکدیگر بوده و روند یکسانی را نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان ارتباط بین پارامتر PVI و عمر

خستگی را یک رابطه ثابت و مستقل از دما در نظر گرفت. شکل ۱۳ توابع توانی برازش داده شده بین عمر خستگی و پارامتر PV2 را نشان می‌دهد. مشابه شکل ۱۲ ارتباط بین این دو پارامتر مستقل از دمای آزمایش می‌باشد. بنابراین همانند PV1 پارامتر PV2 را می‌توان با ضریب اطمینان بالایی جهت پیش‌بینی عمر خستگی استفاده نمود.



شکل ۱۳. ارتباط بین عمر خستگی و PV2 در دماهای مختلف در فرکانس ۱۰ هرتز

نتایج فوق حاکی از آن است که هر دو پارامتر PVI و PV2 مستقل از شرایط آزمایش از جمله سطح کرنش، دما و فرکانس بارگذاری می‌توانند در پیش‌بینی عمر خستگی مورد توجه قرار گیرند. با توجه به اینکه در مدل‌های خستگی که برپایه تنش یا کرنش ارائه می‌شوند پارامترهای سفتی اولیه و تنش یا کرنش اولیه به عنوان متغیرهای مستقل مورد استفاده قرار می‌گیرند در این تحقیق آنالیز واریانس جهت بررسی معناداری ارتباط این متغیرها و عمر خستگی در مقایسه با پارامترهای PV1 و PV2 انجام شد. این آنالیز با استفاده از

نرم‌افزار آماری SPSS برای شرایط مختلف مورد آزمایش انجام شد. جدول ۱ نتایج آنالیز واریانس را برای نمونه‌های مورد آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس ۱۰ هرتز نشان می‌دهد. در این تحلیل برای معناداری ارتباط بین متغیر وابسته (Nf) و متغیر مورد نظر مقدار p باید کوچکتر از ۰,۰۵ باشد. با توجه به مقادیر به دست آمده از آنالیز واریانس ارتباط بین تمامی متغیرها و Nf در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بوده است.

جدول ۱. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای نمونه‌های مورد آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس ۱۰ هرتز

(متغیر وابسته: عمر خستگی (Nf))

متغیر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	p	معناداری *
کرنش اولیه (E)	$1,45 \times 10^{12}$	۲	$7,25 \times 10^{11}$	۵,۰۷	۰,۰۱۵	
سفتی اولیه	$9,27 \times 10^{12}$	۲۶	$3,57 \times 10^{11}$	۲,۵۰	۰,۰۱۸	
انرژی تلف شده اولیه	$16,39 \times 10^{12}$	۲۶	$6,30 \times 10^{11}$	۴,۴۱	۰,۰۰۸	

	۰,۰۰۲	۷,۶۲	$1,09 \times 10^{12}$	۲۶	$28,42 \times 10^{12}$	PV1
	۰,۰۰۲	۸,۱۱	$1,16 \times 10^{12}$	۲۶	$30,19 \times 10^{12}$	PV2
-	-	-	$1,43 \times 10^{11}$	۱۰۷	$15,27 \times 10^{12}$	خطا
-	-	-	$4,74 \times 10^{12}$	۲۱۳	$100,99 \times 10^{12}$	کل
معناداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد						

در جدول ۲ نتایج آنالیز واریانس برای تمامی نتایج آزمایش خستگی در سه دمای ۵-، ۱۰ و ۲۰ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود ارتباط بین پارامترهای کرنش اولیه و سفتی اولیه با عمر خستگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار نبوده است. این نتیجه را می توان به متغیر بودن شیب نمودارهای خستگی مطابق شکل های ۱۰ و ۱۱ مرتبط

دانست. به دلیل متغیر بودن شیب امکان ارائه یک مدل خستگی بر پایه کرنش اولیه که تمامی کرنش ها را پوشش دهد وجود نخواهد داشت. با توجه به جدول ۴ ارتباط بین سه پارامتر PV1، PV2 و انرژی تلف شده اولیه با عمر خستگی (Nf) معنادار بوده و این سه پارامتر به ترتیب دارای بالاترین اهمیت می باشند.

جدول ۲. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای نمونه های مورد آزمایش در سه دمای ۵-، ۱۰ و ۲۰ درجه سانتیگراد و فرکانس ۱۰ هرتز (متغیر وابسته: عمر خستگی (Nf))

متغیر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	p	معناداری *
کرنش اولیه (E)	$0,45 \times 10^{12}$	۲	$2,25 \times 10^{11}$	۱,۶۰	۰,۳۶۸	-
سفتی اولیه	$29,40 \times 10^{12}$	۸۰	$3,68 \times 10^{11}$	۲,۶۱	۰,۰۹۱	-
انرژی تلف شده اولیه	$36,74 \times 10^{12}$	۸۰	$4,59 \times 10^{11}$	۳,۲۵	۰,۰۴۹	-
PV1	$83,88 \times 10^{12}$	۸۰	$1,05 \times 10^{12}$	۷,۴۵	۰,۰۰۶	-
PV2	$95,19 \times 10^{12}$	۸۰	$1,19 \times 10^{12}$	۸,۴۴	۰,۰۰۴	-
خطا	$45,71 \times 10^{12}$	۳۲۳	$1,41 \times 10^{11}$	-	-	-
کل	$291,27 \times 10^{12}$	۶۴۵	$4,52 \times 10^{11}$	-	-	-
معناداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد						

در آخرین آنالیز، تمامی داده های به دست آمده از آزمایش های خستگی در هر سه دما و دو فرکانس مورد آزمایش در نظر گرفته شدند. جدول ۳ نتایج به دست آمده از این تحلیل را نشان می دهد. با در نظرگیری توزیع F ارتباط بین سه پارامتر کرنش اولیه، سفتی اولیه و انرژی تلف شده با عمر خستگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار نمی باشد. با توجه به مقدار p دو پارامتر PV1 و PV2 دارای اهمیت بوده و ارتباط این دو پارامتر با عمر خستگی در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار می باشد.

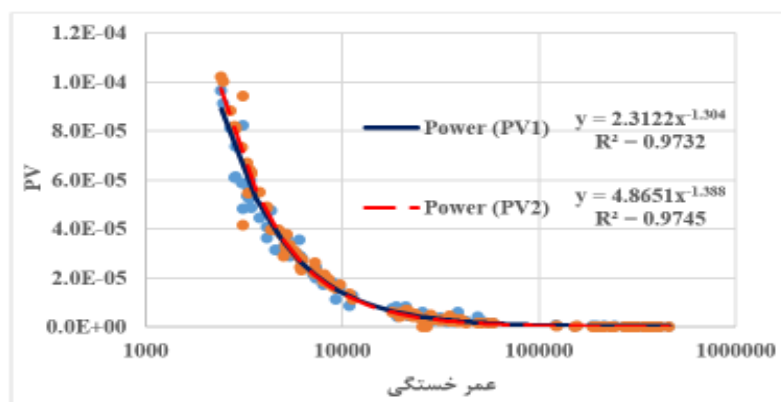
بنابراین از پارامتر PV می توان با ضریب اطمینان بالایی در دل های پیش بینی عمر خستگی استفاده نمود. همچنین تحلیل های انجام شده نشان می دهند که تعریف جدید ارائه شده برای محاسبه این پارامتر (PV2) دارای دقتی مشابه یا حتی بالاتر از تعریف اول (PV2) می باشد. شکل ۱۴ ارتباط بین عمر خستگی و پارامترهای PV1 و PV2 را برای تمامی داده های آزمایشگاهی موجود نشان می دهد. با توجه به شکل ارتباط بین عمر خستگی و PV برای هر دو تعریف یکتا بوده و مستقل از نوع مخلوط و شرایط آزمایش می باشد. بنابراین از هر کدام از پارامترهای PV1 و PV2 می توان در پیش بینی عمر خستگی مخلوط های مسلح شده با الیاف PET استفاده نمود.

جدول ۲. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای نمونه‌های مورد آزمایش در سه دمای ۵-، ۱۰- و ۲۰- درجه سانتیگراد و فرکانس ۱۰ هرتز

(متغیر وابسته: عمر خستگی (Nf))

متغیر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	p	معناداری *
کرتش اولیه (E)	$0,21 \times 10^{12}$	۲	$1,05 \times 10^{11}$	۱,۰۷	۰,۷۴۵	-
سفتی اولیه	$24,22 \times 10^{12}$	۱۶۱	$1,50 \times 10^{11}$	۱,۵۳	۰,۲۳۷	-
انرژی تلف شده اولیه	$33,37 \times 10^{12}$	۱۶۱	$2,07 \times 10^{11}$	۲,۱۱	۰,۱۰۷	-
PV1	$96,23 \times 10^{12}$	۱۶۱	$5,97 \times 10^{11}$	۶,۰۹	۰,۰۴۱	-
PV2	$102,22 \times 10^{12}$	۱۶۱	$6,35 \times 10^{11}$	۶,۴۸	۰,۰۳۶	-
خطا	$63,22 \times 10^{12}$	۶۴۷	$0,98 \times 10^{11}$	-	-	-
کل	$319,47 \times 10^{12}$	۱۲۹۳	$2,47 \times 10^{11}$	-	-	-

معناداری در سطح اطمینان ۹۵ درصد



شکل ۱۴. ارتباط بین عمر خستگی و پارامترهای PV1 و PV2 برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش

با توجه به شکل ۱۴ رابطه توانی با همبستگی بالایی می‌تواند عمر خستگی را با استفاده از پارامتر PV پیش‌بینی نماید. این روابط توانی در معادلات (۱۳) و (۱۴) ارائه شده‌اند.

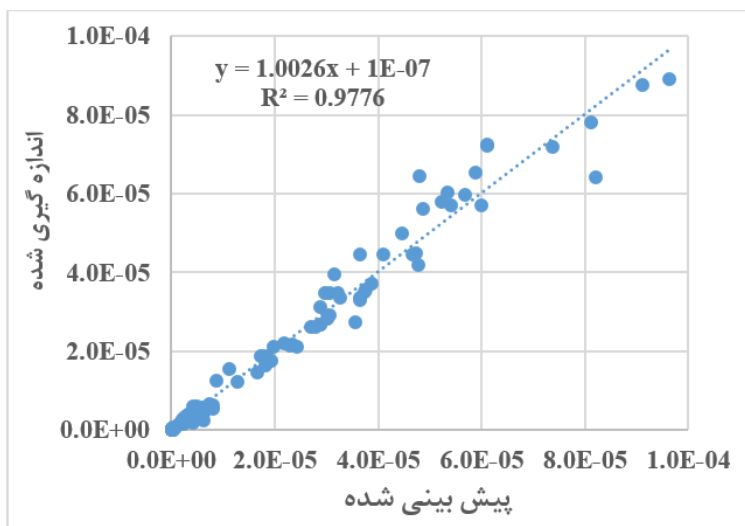
(۱۳)

$$PV1 = 2.3122Nf^{-1.304}, R^2 = 0.9732$$

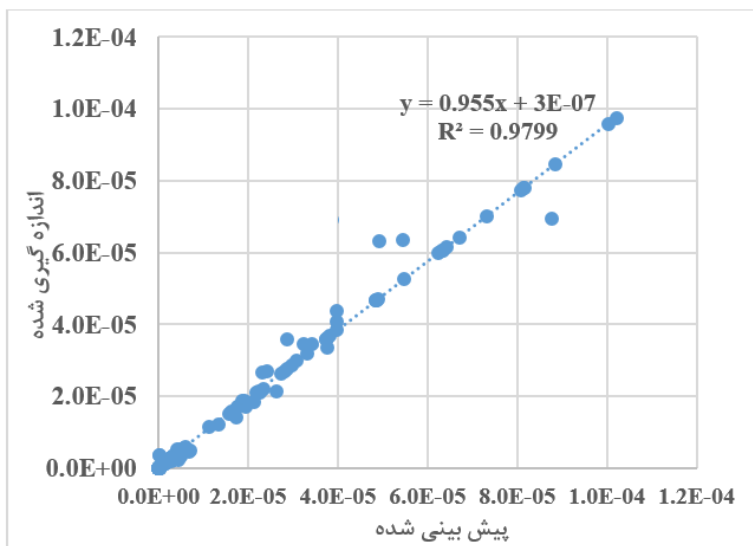
(۱۴)

$$PV2 = 4.8651Nf^{-1.388}, R^2 = 0.9745$$

شکل‌های ۱۵ و ۱۶ میزان پراکندگی نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و مقادیر به دست آمده از مدل‌های نهایی به دست آمده را به ترتیب برای روابط (۱۳) و (۱۴) حول خط ۴۵ درجه نشان می‌دهند. مطابق این شکل‌ها نقاط توزیع مناسبی در اطراف خط ۴۵ درجه داشته و مقادیر پیش‌بینی شده از مدل‌ها بسیار به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک می‌باشند.



شکل ۱۵. مقایسه مقادیر PV1 به دست آمده از رابطه (۱۳) و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش خستگی



شکل ۱۶. مقایسه مقادیر PV2 به دست آمده از رابطه (۱۴) و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش خستگی

براساس نتایج به دست آمده و تحلیل‌های انجام شده می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری نمود که پارامتر PV مطابق نتایج به دست آمده در مطالعات گذشته می‌تواند با دقت بالایی عمر خستگی مخلوط‌های مسلح شده با الیاف PET را پیش‌بینی نماید. تعریف جدید ارائه شده در این تحقیق (PV2) دارای این مزیت است که زمان انجام آزمایش خستگی را می‌تواند کاهش دهد. در تعریف قبلی (PV1) لازم است آزمایش خستگی تا رسیدن به حداقل ۵۰ درصد سفتی اولیه ادامه یابد در حالیکه در تعریف جدید در هر نقطه‌ای از محدود ثبات که ضریب تغییرات به دست آمده از

میانگین متحرک کمتر از مقدار تعیین شده به دست آمد آزمایش را قطع نمود و عمر خستگی را با استفاده از مدل‌های ارائه شده پیش‌بینی نمود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر امکان ارائه مدل پیش‌بینی عمر خستگی برای مخلوط‌های مسلح‌شده با الیاف پلی اتیلن بازیافتی (PET) براساس پارامترهای انرژی تلف شده مورد ارزیابی

قرار گرفت. در مدل‌های اولیه ارائه شده در تحقیقات گذشته از پارامترهایی مانند انرژی تلف شده اولیه و انرژی تلف شده تجمعی جهت پیش‌بینی عمر خستگی استفاده می‌شد. در مدل‌های پیشرفته‌تر از مفهوم نسبت انرژی تلف شده (RDEC) پارامتر PV محاسبه شد. این پارامتر منجر به ارائه مدل‌های دقیق‌تری برای پیش‌بینی عمر خستگی براساس مفهوم انرژی تلف شده گردید. در تحقیق حاضر تعریف جدیدی برای پارامتر PV ارائه شده و این پارامتر در مقایسه با تعریف قبلی (PV1) به صورت (PV2) معرفی گردید. بررسی‌ها در سه دمای مختلف شامل ۲۰، ۱۰ و ۵- درجه سانتیگراد و دو فرکانس ۱۰ و ۲ هرتز انجام گردید. با انجام آنالیز واریانس معناداری ارتباط بین پارامتر PV2 و عمر خستگی یک بار برای هر کدام از شرایط مورد آزمایش و بار دیگر برای تمامی داده‌های آزمایشگاهی بررسی گردید. بررسی‌های انجام شده نشان داد که ارتباط معناداری بین پارامتر PV2 و عمر خستگی وجود داشته و این پارامتر نیز به خوبی می‌تواند عمر خستگی را مشابه تعریف اولیه (PV1) پیش‌بینی نماید.

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Ratio of Dissipated Energy Change
2. Plateau Stage
3. Plateau Value
4. Polyethylene Terephthalate
5. Coefficient of Variation
6. Universal Testing Machine

#### ۷- مراجع

-Abojaradeh, M., (2003), "Predictive Fatigue Models for Arizona Asphalt Concrete Mixtures", PhD Thesis, Arizona State University, USA.

-Abtahi, S.M., Ghorban Ebrahimi, M., Kunt, M.M. (2011), "Production of polypropylene

reinforced asphalt concrete mixtures based on dry procedure and superpave gyratory compactor", Iranian Polymer Journal, Vol.20, No.10, pp.813-823.

-Abtahi, S.M., Sheikhzadeh, M., Hejazi, S.M. (2010), "Fiber-reinforced asphalt concrete- A review", Construction and Building Materials, Vol.24, pp.871-877.

- Boudabbous, M., Millien, A., Petit, C., Neji, J., (2013), "Energy approach for the fatigue of thermoviscoelastic materials: Application to asphalt materials in pavement surface layers", International Journal of Fatigue, 47, pp.308-318.

-Carpenter, S.H., Khalid, A., Ghuzlan, k., Shen, S. (2003), "A Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavement", Journal of Transportation Research Record (TRR), No. 1832, pp.131-138.

-Daniel, J.S., Bisirri, W.M. (2005), "Characterizing Fatigue in Pavement Materials Using a Dissipated Energy Parameter", Proceedings of the Geo-Frontiers Congress, Austin, Texas.

- EN 12697-24: (2012), "Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Resistance to fatigue", European Committee for Standardization.

-Ghuzlan, K., (2001), "Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures based upon dissipated energy concepts", Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA.

-Guo, Q., Li, L., Cheng, Y., Jiao, Y., Xu, C. (2015), "Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture", Materials and Design, Vol.66, Part A, pp.51-59.

-Khodary, M.H.F., (2010), "Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixtures based on dissipated energy concept", PhD Thesis, Department of Civil Engineering and Geodesy, Technische Universität Darmstadt.

-Kim, Y.R. (2009), "Modelling of asphalt concrete. American Society of Civil Engineers", the Mc Graw Hill Companies, USA.



- Mahrez, A., Karim, M.R. (2010), "Fatigue characteristics of stone mastic asphalt mix reinforced with fiber glass", *Int J Phys Sci*, Vol.5, No.12, pp.1840-7.
- Modarres, A., Aloogar, A. (2015), "Comparison between the fatigue response of hot and warm mix asphalts based on the dissipated energy approach", *International Journal of Pavement Engineering*, DOI:10.1080/10298436.2015.1053481.
- Shen, S., Airey, G.D., Carpenter, S.H., Huang, H. A., (2006), "Dissipated energy approach to fatigue evaluation", *Road Materials and Pavement Design*, 7(1), pp.85-92.
- Shen, S., Carpenter, S.H., (2007), "Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing", Technical report of research supported by the Federal Aviation Association", University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois, USA.
- Thiago, F., Kim, Y.R., Lee, J. (2008), "Research on fatigue of asphalt mixtures and pavements in Nebraska", Report No P579, University of Nebraska Lincoln, Nebraska, USA.
- Yuan, M.M., Zhang, X.N., Chen, W.Q., Zhang, SX. (2013), "Ratio of dissipated energy change -based failure criteria of asphalt mixtures", *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 6(14): pp.2514-2519.