

بررسی اثر روش‌های مختلف پیرشدگی بلندمدت بر عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی

محمودرضا کی منش (مسئول مکاتبات)، دانشیار دانشگاه پیام نور، مرکز شمیرانات، دانشکده مهندسی، گروه عمران، تهران، ایران

E-mail: drkeymanesh.pnu@gmail.com

مسعود جیلانچی، دانشجوی دکتری، دانشگاه پیام نور، مرکز شمیرانات، دانشکده مهندسی، گروه عمران، تهران، ایران

علیرضا خاوندی، دانشیار، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، گروه عمران، زنجان، ایران

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳

چکیده

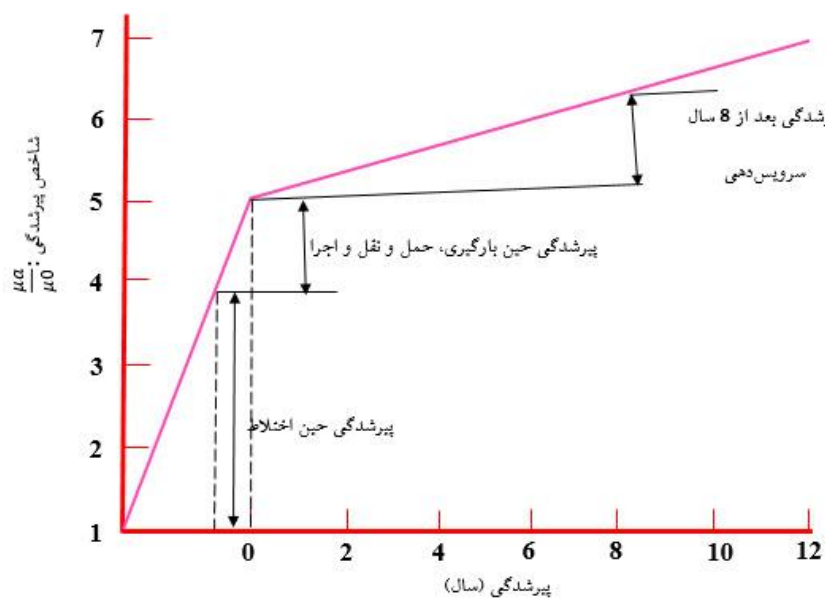
پیرشدگی قیر یکی از عوامل ایجاد و گسترش ترک و خرابی رطوبتی در روسازی‌های آسفالتی است. پیرشدگی می‌تواند در طی مراحل تولید، حمل و اجرا (پیرشدگی کوتاه مدت) و یا دوره بهره‌برداری (پیرشدگی بلند مدت) رخ داده و باعث سختی قیر شود. امروزه روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت تعریف شده است. در این تحقیق اثر پیرشدگی بلند مدت آشتو R30 (به عنوان متداول‌ترین روش استاندارد) و NCHRP 9-54 (به عنوان جدیدترین روش پیشنهادی) بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از تیر خمشی ۸ نقطه‌ای به روش کرنش ثابت در سطح کرنش‌های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و فرکانس‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ هرتز و در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد بررسی شد. نتایج نشان داد که هر دو روش پیرشدگی در سطوح کرنش و فرکانس‌های بارگذاری آزمایش شده، سختی اولیه نمونه را افزایش و عمر خستگی را کاهش دادند. همچنین با مقایسه عمر خستگی نمونه‌های آزمایش شده مشخص شد که بیشترین کاهش عمر خستگی مربوط به نمونه‌های پیر شده با روش پیرشدگی آشتو R30 بود. در نتیجه بر اساس این نتایج و قابلیت روش NCHRP 9-54 در لحاظ شرایط واقعی، روش آشتو R30 را می‌توان روش محافظه کارانه‌ای محسوب کرد.

واژه‌های کلیدی: پیرشدگی، خستگی، روش آشتو R30، NCHRP 9-54، مخلوط آسفالتی

۱. مقدمه

مرحله تولید تا مرحله بهره‌برداری آورده شده است. بر اساس زمان وقوع، پیرشدگی به دو گروه پیرشدگی بلند مدت و کوتاه مدت تقسیم می‌شود. پیرشدگی کوتاه مدت در زمان کم و دمای بالا و دمای حدود ۱۶۰ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد. پیرشدگی بلندمدت در زمان بسیار طولانی و به نوعی در زمان بهره‌برداری اتفاق می‌افتد و به موقعیت قیر در روسازی و شرایط آب و هوایی بستگی دارد (Lesueur, 2009).

پیرشدگی قیر یکی از عوامل پیدایش و یا تسریع ترک‌های خستگی و برودتی، پدیده هوازگی و نیز خرابی رطوبتی در روسازی‌های آسفالتی است. پیرشدگی می‌تواند در طی مراحل اختلاط، پخش آسفالت و نیز در طول عمر روسازی، باعث سختی و شکنندگی قیر شود. در شکل ۱ (Read&Whiteoak, 2003)، مراحل مختلف پیرشدگی از



شکل ۱. مراحل مختلف پیرشدگی از تولید تا بهره‌برداری (Read&Whiteoak, 2003)

قیر با افزایش سختی مخلوط آسفالتی و کاهش مقاومت آن در برابر ترک خوردگی تأثیر مستقیمی در عملکرد مخلوط آسفالتی دارد (Saleh et al., 2020)، مطالعات بسیار وسیع آزمایشگاهی و میدانی در این خصوص انجام شده است. شروع روش شبیه‌سازی پیرشدگی مصنوعی در قیر و مخلوط آسفالتی به دهه اول میلادی سال ۱۹۰۰ برمی‌گردد (Fernández et al., 2013). در اغلب تحقیقات به اهمیت شرایط پیرشدگی به عنوان یکی از عوامل مؤثر در پیرشدگی اشاره شده است (omranina et al, 2021). به طور کلی دو رویکرد برای بررسی تأثیر پیرشدگی بر عملکرد مخلوط آسفالتی وجود دارد. در رویکرد اول قیر با روش‌های آزمایشگاهی پیر می‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که فرآیندهای مختلفی باعث پیرشدگی می‌شوند از جمله اکسیدشدگی^۱، تبخیر^۲، پلیمریزاسیون^۳ و سخت‌شدگی فیزیکی^۴ و تراوش^۵. در این میان اکسیدشدگی را دلیل غالب و شناخته شده برای پیرشدگی می‌دانند (Petersen&Glaser2011, Song et al., 2022).

اکسیدشدگی ناشی از تماس اکسیژن هوا با قیر و واکنش شیمیایی با آن است. در این فرایند مشخصات شیمیایی قیر تغییر و به نوعی سخت‌تر و شکننده‌تر می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که درجه این سختی و شکنندگی به منشأ قیر بستگی دارد. با توجه به اینکه مواجهه با اکسیداسیون در قیر و در نتیجه پیرشدگی یک امر غیر قابل اجتناب در گذر زمان می‌باشد و از طرفی پیرشدگی

بررسی اثر روش‌های مختلف پیرشدگی بلندمدت بر عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی

که از این بین می‌توان به آزمایش‌های $TFOT^*$ ، $RTFOT$ ، $MRTFOT^*$ ، PAV^A و $SAFT^9$ برای قیر و روش‌های پیرشدگی کوتاه مدت شارپ (STOA) و بلندمدت شارپ (LTOA) اکسیداسیون فشار کم شارپ (LPO) و $NCHRP 9-52$ ، $AASHTO R30$ و $NCHRP 9-54$ و $EMPA$ ، $BBRC$ ، $RILEM TC-ATB-TG5$ و TRL برای مخلوط‌های آسفالتی اشاره کرد. در جدول ۱ مشخصات و ویژگی‌های روش‌های پیرشدگی مخلوط آسفالتی ارائه شده است.

در این رویکرد با محاسبه شاخص پیرشدگی، حساسیت پیرشدگی قیرهای مختلف بررسی می‌شود. باید توجه داشت که در این روش امکان بررسی تأثیر مصالح سنگی در پیرشدگی وجود نداشته و لذا بطور مستقیم امکان بررسی تأثیر پیرشدگی در عملکرد مخلوط آسفالتی را ندارد. در رویکرد دوم مخلوط آسفالتی با روش‌های آزمایشگاهی پیرشده و سپس مشخصات فنی آن تعیین می‌گردد (Saleh et al., 2020).

امروزه آزمایش‌ها و روش‌های متعددی برای شبیه سازی پیرشدگی قیر و مخلوط‌های آسفالتی در آزمایشگاه وجود دارند

جدول ۱. مشخصات روش‌های پیرشدگی مخلوط‌های آسفالتی

روش	پیرشدگی کوتاه مدت		پیرشدگی بلند مدت		مرجع
	دما (°C)	زمان (ساعت)	دما (°C)	زمان (روز)	
پیرشدگی SHRP کوتاه مدت (STOA) و بلندمدت (LTOA)	۱۳۵	۴	۸۵	۵	Bell et al., 1994
اکسیداسیون فشارکم شارپ LPO	-	-	۶۰/۸۵	۵ روز	SHRP A-384
AASHTO R30	۱۳۵	۴	۸۵	۵	AASHTO R30, 2002
TRL			۶۰	۴	Nicholls, 2006
BBRC (Belgian Road Research Center)	۱۳۵	۱/۵	۶۰	۱۴	Piérard and Vanelstraete, 2009
EMPA			۱۱۰-۱۲۰	۱۶ ساعت	Van den Bergh, 2011
NCHRP 09-52		۲	۸۵	۵	Newcomb et al., 2015
NCHRP 09-54		۴	۹۵	*	Kim et al., 2017

بلند مدت مخلوط آسفالتی در آزمایشگاه استفاده می‌شود. براساس روش مذکور برای پیرشدگی کوتاه مدت، مخلوط آسفالتی متراکم نشده به ضخامت بین ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر در ظروف مشخص پهن شده و به مدت ۴ ساعت در دمای 135 ± 3 °C در کوره نگهداری می‌شود. برای پیرشدگی بلند مدت، پس از انجام فرآیند پیرشدگی کوتاه مدت روی نمونه متراکم

همانگونه که در جدول یک مشاهده می‌شود، مهمترین تفاوت در این روش‌ها، دما و نیز شرایط نمونه (متراکم یا غیر متراکم) می‌باشد. از بین روش‌های ذکر شده در جدول، در دو دهه اخیر، روش AASHTO R-30 یکی از متداولترین روش‌ها برای به دست آوردن مخلوط آسفالتی پیرشده است. روش AASHTO R-30 به منظور شبیه سازی پیرشدگی کوتاه و

محدودی برای مقایسه تأثیر روش‌های پیرشدگی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است. در سال ۱۳۹۴، کاووسی و همکاران نشان دادند که پیرشدگی مخلوط آسفالتی تابع خصوصیات قیر، مصالح سنگی و چسبندگی قیر و مصالح است. و ارزیابی پیرشدگی قیر، به تنهایی نمیتواند پیش بینی دقیقی از عملکرد دراز مدت مخلوط آسفالتی ارائه دهد. آنها با استفاده از روش پیرشدگی دراز مدت مخلوط مطابق استاندارد

(AASHTO PP2) و انجام آزمایش خستگی به روش خمش چهارنقطه‌ای در حالت تنش ثابت، رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف سرباره در دو حالت پیرشده و پیرنشده را آزمایش کردند. نتایج تحقیق نشان داد که در حالت پیرنشده، مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره نوع کوره قوس الکتریک بیشترین عمرخستگی و مخلوط‌های با مصالح آهکی کمترین عمرخستگی را دارد (کاووسی و همکاران، ۱۳۹۴). در سال ۲۰۲۱ در تحقیق انجام شده بر روی مقایسه تأثیر پیرشدگی AASHTO R-30 با NCHRP 9-54 بر روی عملکرد کششی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم مشخص شد که پیرشدگی کوتاه مدت در مدت زمان ۲ ساعت در هر دو روش به یک اندازه بر مقدار عملکرد کششی مخلوط آسفالتی تأثیر دارند در حالیکه در مقایسه بین ITS نمونه های تحت پیرشدگی بلند مدت روش‌های مذکور و نمونه های برداشته از راه با عمر ۵ سال، مقدار ITS در روش AASHTOR-30 با مقدار ITS بدست آمده از محل نزدیک به هم می‌باشند ولی نمونه پیرشده در بلند مدت به روش NCHRP 09-54 تفاوت عملکردی قابل ملاحظه با نمونه برداشت شده از محل دارد (Durmaz et al., 2021).

با توجه به موارد فوق و تأثیر متفاوت روش‌های پیرشدگی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و از طرفی با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین تأثیرات پیرشدگی، کاهش قابلیت انعطاف پذیری مخلوط آسفالتی است که منجر به کاهش مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی می‌شود، در این تحقیق تأثیر روش‌های

نشده و متراکم کردن آن، نمونه متراکم شده به مدت ۵ روز در دمای $85 \pm 3^\circ \text{C}$ در کوره نگهداری می‌شود (AASHTO R30, 2002). عدم نظر گرفتن اعوجاج و گرادین اکسیداسیون در شرایط پیرشدگی بلند مدت و نیز عدم لحاظ شرایط آب و هوایی مختلف و ضخامت روسازی از مهم‌ترین ایرادات این روش بیان شده است (Kim et al., 2017).

اخیراً محققان برای توسعه روش‌های بررسی پیرشدگی و برای در نظر گرفتن شرایط واقعی محل پروژه در پیرشدگی روش NCHRP 9-54 را پیشنهاد دادند. در این روش سعی شده است تا کاستی‌های AASHTO R-30 رفع شود. در این روش برای پیرشدگی بلند مدت، مخلوط آسفالتی متراکم نشده را در اون در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود و سپس آنها را متراکم می‌کنند. مدت زمان قرارگیری در اون برای بررسی پیرشدگی مخلوط‌های متراکم نشده به شرایط آب و هوایی و عمق روسازی که با توجه به شاخص پیرشدگی آب و هوایی (CAI) تعیین می‌گردد، بستگی دارد (Kim et al., 2017). به عبارت دیگر در این روش، شرایط محل پروژه در انتخاب شرایط آزمایشگاهی در نظر گرفته می‌شود.

بررسی منابع نشان می‌دهد که تحقیقات متعددی برای بررسی انواع روش‌های پیرشدگی بر عملکرد مخلوط آسفالتی مخصوصاً خستگی انجام شده است. در سال ۱۹۶۷، vallerga نشان داد که در تنش ثابت، پیرشدگی، مقاومت خستگی را افزایش می‌دهد. در سال ۱۹۹۷ Tsai نشان داد که پیرشدگی بر سختی مخلوط آسفالتی در آزمایش کرنش ثابت تأثیر دارد (Hamzah et al., 2015). در سالهای اخیر مطالعات مختلفی در خصوص تأثیر پیرشدگی بر خستگی مخلوط آسفالتی با استفاده از انواع آزمایش‌های خستگی در حالت‌های کرنش و تنش ثابت انجام شده که نتایج همه آنها اثر پیرشدگی بر خستگی را البته با میزان متفاوت نشان می‌دهند (Sarsam, 2021). یکی از مهمترین علل تأثیر پیرشدگی بر عملکرد خستگی، تغییر سختی مخلوط آسفالتی می‌باشد. (Golchin et al., 2021). لیکن مطالعات

بررسی اثر روش‌های مختلف پیرشدگی بلندمدت بر عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی

نمونه‌های شاهد، نمونه‌های پیرشده با روش آتش R-30 و نمونه‌های ساخته شده با روش NCHRP 9-54. در ابتدا مخلوط آسفالتی تمامی نمونه‌ها از جمله نمونه‌های شاهد، با استفاده از روش پیرشدگی کوتاه‌مدت آشتو R-30 پیر شدند. یعنی مخلوط بصورت متراکم نشده و با ضخامت حدوداً ۲/۵-۵ سانتیمتر درسینی پهن و برای مدت ۴ ساعت و دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد در گرمخانه قرار داده شد.

برای پیرشدگی بلند مدت به روش آشتو R-30، (شکل ۲-الف) بعد از پیر شدگی کوتاه مدت مخلوط‌های آسفالتی، دال مستطیلی با استفاده از قالب دستگاه ویل تراک ساخته و سپس به مدت ۱۶±۱ ساعت در دمای اتاق خنک شده و سپس از قالب خارج شده و در ابعاد مورد نظر برش داده شدند نمونه‌های برش داده شده بمدت ۱۲۰ ساعت و در دمای ۸۵ درجه سانتیگراد در گرمخانه پیر شده و بعد از آن به مدت ۱۶ ساعت اجازه داده می‌شود تا خنک شود. در پیر شدگی بلند مدت به روش NCHRP 9-54 مخلوط پیرشده کوتاه مدت، به همان حالت غیرمتراکم در سینی‌هایی با ضخامت حدوداً ۲/۵-۵ سانتیمتر پهن کرده و برای مدت ۱۲۰ ساعت در دمای ۹۵ درجه سانتیگراد در گرمخانه قرار داده می‌شوند بعد از آن همانند روش قبل دال مستطیلی ساخته و سپس در ابعاد مورد نظر برش داده شدند.

پیرشدگی بلند مدت بر خستگی بررسی شده است. در این مقاله تأثیر این دو روش بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش خمش ۴ نقطه ای و در سطوح کرنش و فرکانس‌های بارگذاری مختلف که نشان‌دهنده شرایط بارگذاری متفاوت می‌باشد، بررسی شده است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مشخصات مصالح

در این تحقیق از مصالح سنگدانه‌ای دارای سیلیس معدن شهریار با مشخصات و دانه‌بندی ارائه شده در جداول ۲ و ۳ استفاده شده است. همچنین از قیر PG 64-16 (60-70) تولید شرکت نفت آکام برای تهیه مخلوط آسفالتی استفاده شده است که مشخصات آن در جدول ۴ آورده شده است. درصد قیر بهینه متناظر با در صد فضای خالی ۴ درصد برای نمونه‌های آسفالتی، بر اساس روش طرح اختلاط مارشال ASTM D1559 ۵/۸ درصد به دست آمد.

۲-۲ تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق نمونه‌های آسفالتی به شکل تیرچه مستطیلی شکل به ابعاد ۳۸۰×۶۰×۵۰ میلی‌متر با رواداری ۶ میلی‌متر و با استفاده از متراکم کننده دستگاه ویل تراک ساخته شد. البته با توجه به هدف این تحقیق، نمونه‌ها در سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند:

جدول ۲. مشخصات سنگدانه‌های استفاده شده

مقادیر	روش آزمایش	مشخصات
سنگدانه درشت		
۱۶	AASHTO- T96	(%) سایش لس آنجلس
۰/۲	AASHTO- T104	(%) سلامت با استفاده از سولفات سدیم
۱/۴	ASTM- D4791	(%) ذرات مسطح و داز
۱۰۰	ASTM- D5821	(%) شکستگی سنگدانه‌ها (دو وجه)
۲/۴۷۰	AASHTO-T85	وزن مخصوص واقعی (gr/cm ³)
۲/۶۲۹	AASHTO-T85	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm ³)
۲/۴	AASHTO-T85	(%) جذب آب
سنگدانه ریز		
Non-plastic	PI (AASHTO- T90)	حدود اتربرگ

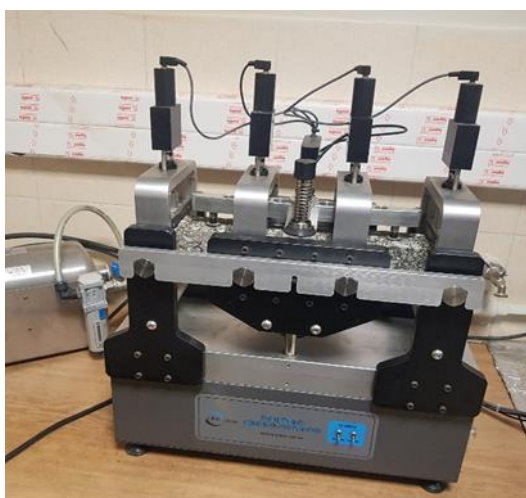
مقادیر	روش آزمایش	مشخصات
۰/۹	AASHTO- T104	(%) سلامت با استفاده از سولفات سدیم
۶۷	AASHTO-T176	ارزش ماسه‌ای
۲/۴۵۱	AASHTO-T84	وزن مخصوص واقعی (gr/cm^3)
۲/۶۳۸	AASHTO-T84	وزن مخصوص ظاهری (gr/cm^3)
۲/۹	AASHTO-T85	جذب آب (%)
فیلر		
Non-plastic	PI (AASHTO- T90)	حدود اتربرگ
۲/۶۱۹	AASHTO-T100	وزن مخصوص (gr/cm^3)

جدول ۳. دانه‌بندی مصالح سنگ‌دانه‌ای

نوع مصالح	اندازه الک (میلی متر)	۲۵	۱۹	۱۲/۵	۴/۷۵	۲/۳۷۵	۰/۳	۰/۰۷۵
سیلیسی	درصد عبوری	۱۰۰	۱۰۰	۹۵	۶۳	۳۹	۱۱	۶

جدول ۴. مشخصات فیر خالص

شرایط پیرشدگی	مشخصات	واحد	روش آزمایش ASTM	نتیجه
پیرنشده	DSR	$ G^* /\text{Sin}\delta$	D7175	۱/۱۶
	ویسکوزیته در دمای 135°C	Pa.s	D4402	۰/۳۲
پیرشده کوتاه مدت	درجه نفوذ	0.1 mm	D5	۶۸
	DSR	$ G^* /\text{Sin}\delta$	D7175	۲/۲۱
	DSR	$ G^* * \text{Sin}\delta$	D7175	۴۴۲۰
پیرشده بلند مدت	m-value	-	-	۰/۳۶
	BBR	سختی	D6648	۸۳/۳



(ب)



(الف)

شکل ۲. الف- نمونه های متراکم شده برای پیرشدگی به روش آشتو R30 ب- دستگاه آزمایش خمش چهار نقطه ای

۲-۳ روش و متغیرهای آزمایش

آزمایش خستگی چهارنقطه‌ای روشی قابل اعتماد و متداول برای تعیین عملکرد خستگی نمونه‌های آسفالتی در آزمایشگاه شناخته می‌شود (شکل ۲-ب). این آزمایش قابلیت انجام در حالت‌های کرنش و تنش ثابت دارد البته آزمایش در حالت کرنش ثابت متداولتر است. این آزمایش بر روی تیرچه‌های آسفالتی انجام شده و قابلیت اندازه‌گیری سختی و انرژی تلف شده در حین آزمایش وجود دارد. بنابراین در این آزمایش امکان تعیین عمر خستگی بر اساس معیارهای کاهش سختی و انرژی تلف شده وجود دارد.

در این تحقیق آزمایش خستگی چهار نقطه‌ای در حالت کرنش کنترل شده و با سطوح کرنش ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو کرنش با استفاده از بار سینوسی اعمال شده در فرکانس‌های ۵، ۱۰، ۱۵ هرتز و در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد.

در این تحقیق برای تعیین عمر خستگی و تحلیل نتایج از معیارهای کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰ درصد (به عنوان متداولترین معیار) و شاخص S.N که روند تغییرات سختی در حین آزمایش را نیز در تعیین عمر خستگی لحاظ می‌کند و نیز روش تحلیل انرژی تلف شده و معیار (مقدار مسطح) PV استفاده شد. تحقیقات نشان می‌دهد که بین انرژی تلف شده و عمر خستگی رابطه زیر برقرار است:

$$W_{fat} = AN_f^Z$$

که در آن

W_{fat} : انرژی تلف شده تجمعی در هنگام شکست خستگی

N_f : شاخص چرخه بار در هنگام شکست خستگی

A, Z : پارامترهای به دست آمده از مدل آزمایش

همچنین بین PV و عمر خستگی رابطه زیر توسط کارپنتر و شن ارائه شده است (Shen and Carpenter, 2005):

$$PV = cN_f^d$$

PV: مقدار متوسط نرخ تغییر انرژی تلف شده (RDEC)

c و d : پارامترهای برازش

N_f : تعداد چرخه‌های بار برای شکست خستگی.

این پارامتر نرخ تغییرات انرژی تلف شده بین چرخه‌های بارگذاری متوالی را نشان می‌دهد.

۳. نتایج و تحلیل آن‌ها

۳-۱ نتایج و تحلیل آن‌ها بر اساس عمر خستگی،

معیار سختی خمشی اولیه و سطح کرنش

نتایج آزمایش خستگی شامل سختی اولیه و عمر خستگی بر اساس ۵۰ درصد کاهش سختی و $S \times N$ برای تمامی نمونه‌ها در جدول ۵ و شکل ۳ آورده است. نتایج نشان می‌دهد که پیرشدگی با هر دو روش باعث افزایش سختی نمونه‌ها در سطح کرنش یکسان شده است. این نتیجه با توجه به تاثیر پیرشدگی بر رفتار قیر قابل انتظار بود.

مقایسه نتایج سختی اولیه در سطوح کرنش ۵۰۰ و ۱۰۰۰ نشان می‌دهد که سختی اولیه نمونه‌های پیرنشده با افزایش سطح کرنش آزمایش، کاهش یافته در حالیکه در نمونه‌های پیر شده، سختی اولیه نمونه‌ها افزایش یافته است. البته میزان این افزایش در سطح کرنش ۱۰۰۰ در مقایسه با سطح کرنش ۵۰۰ بیشتر می‌باشد. این نتایج بر حسب نسبت سختی در شکل ۴ نشان داده شده است. این روند به نوعی در شکل ۳-a نیز مشخص است، پیرشدگی بلند مدت باعث تغییر میزان تاثیر کرنش آزمایش بر مقادیر سختی اولیه شده است. بیشترین مقدار افزایش سختی اولیه مربوط به نمونه پیرشده به روش NCHRP در آزمایش با کرنش ثابت ۱۰۰۰ (حدود ۷۱ درصد) می‌باشد در حالیکه در کرنش ۵۰۰، میزان افزایش برابر با ۳۵ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر پیرشدگی به روش NCHRP بیشترین تاثیر بر مقدار سختی اولیه به ویژه در کرنش ۱۰۰۰ را دارد. بر اساس این نتایج می‌توان گفت که میزان تاثیر پیرشدگی از میزان تغییر سطح کرنش آزمایش در عملکرد اولیه (ابتدای آزمایش) نمونه‌های خستگی بیشتر است. این روند مخصوصاً در روش پیرشدگی NCHRP مشخص است که علیرغم تغییر قابل

ملاحظه سطح کرنش، میزان سختی تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. کرنش یا به عبارت دیگر تنش متناظر با کرنش‌های مختلف بر نمونه هم کمتر می‌شود. یعنی معیارهای بارگذاری (سطح کرنش به عنوان عامل بارگذاری) اثر کمتری بر سختی نمونه‌های پیر شده با روش NCHRP دارد. ملاحظه سطح کرنش، میزان سختی تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. به عبارت دیگر با توجه به نزدیک شدن نتایج سختی اولیه در دو سطح کرنش به یکدیگر در روش پیرشدگی NCHRP، می‌توان گفت که افزایش سختی به حدی است که تأثیر تغییر

جدول ۵. سختی اولیه و عمر خستگی نمونه‌ها

نوع نمونه	فرکانس	کرنش	سختی اولیه	عمر خستگی بر اساس کاهش ۵۰ درصدی	عمر خستگی بر اساس N ^S
	Hz	με	MPa	Cycles	Cycles
پیرنشده			۳۸۲۴/۶۴	۲۱۹۶۱۰	۴۴۸۴۰۰
پیرشده براساس NCHRP		۵۰۰	۵۱۷۵/۹۴	۹۳۶۵۰	۱۴۵۰۹۰
پیرشده براساس AASHTO R-30	۱۰		۴۱۰۳/۸۹	۷۱۱۵۰	۷۷۶۲۰
پیرنشده			۳۱۴۴/۵۷	۱۲۷۸۰	۲۰۷۳۰
پیرشده براساس NCHRP		۱۰۰۰	۵۴۰۴/۰۵	۵۳۳۰	۷۴۱۰
پیرشده براساس AASHTO R-30			۴۸۲۹/۳۰	۲۸۹۰	۴۴۵۰

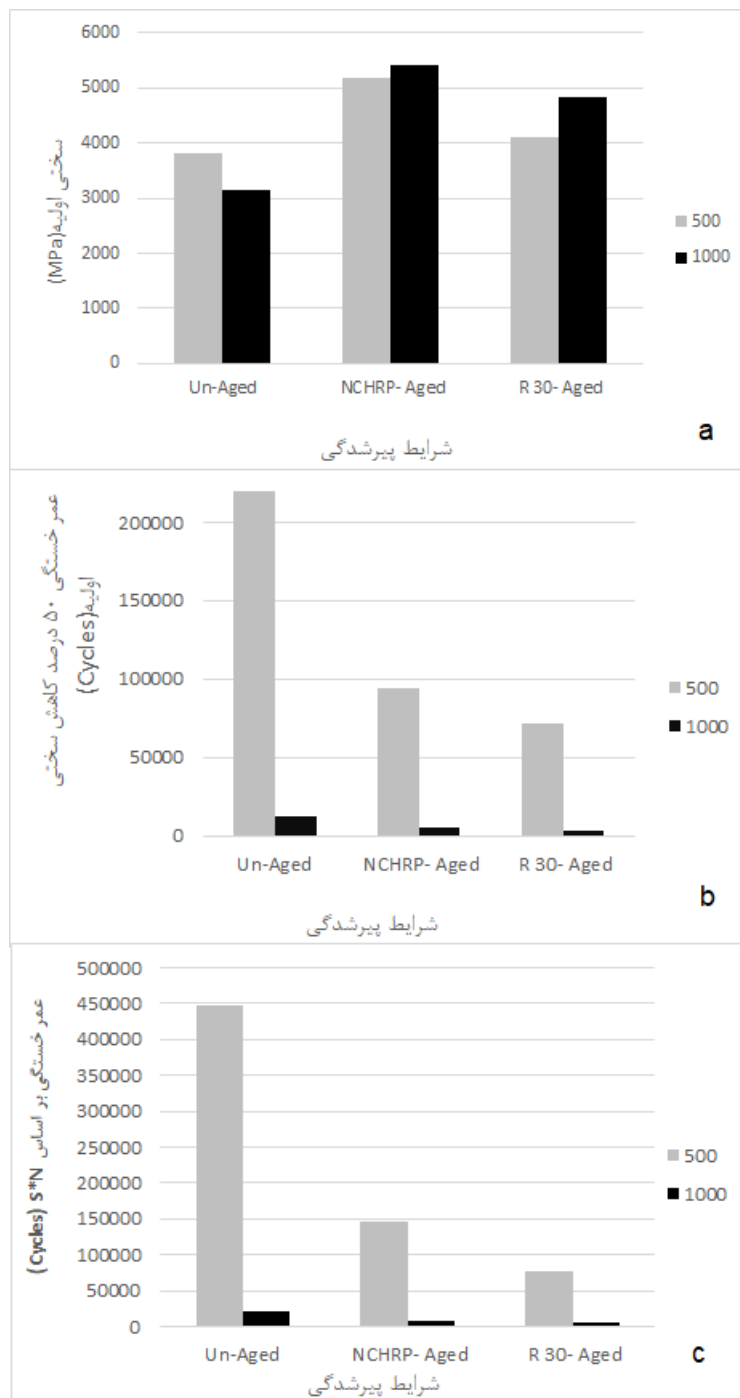
جدول ۵ و شکل‌های ۳-b و ۳-C نشان می‌دهد که عمر خستگی نمونه‌های پیر شده در مقایسه با نمونه‌های پیرنشده در هر دو روش (کاهش سختی ۵۰ درصد و S.N) کاهش پیدا می‌کند. بیشترین میزان کاهش در عمر خستگی در هر دو سطح کرنش و در هر دو روش، در نمونه‌های پیرشده به روش AASHTO R-30 مشاهده می‌شود. اگرچه تفاوت کمی عمر خستگی در آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای نشان دهنده تفاوت عمر خستگی واقعی نمونه‌ها نمی‌باشد لیکن جهت مقایسه می‌توان گفت که این میزان کاهش بین ۲۰۰ تا ۴۷۷ درصد است که مقدار بیشتر مربوط به سطح کرنش ۵۰۰ برای عمر خستگی محاسبه شده به روش S.N می‌باشد. کاهش عمر خستگی در نمونه‌های پیرشده نیز با توجه به مکانیسم‌های پیرشدگی نیز نتیجه قابل انتظاری بود لیکن روند نتایج سختی اولیه و عمر خستگی با هم متفاوت می‌باشد.

جدول ۵ و شکل‌های ۳-b و ۳-C نشان می‌دهد که عمر خستگی نمونه‌های پیر شده در مقایسه با نمونه‌های پیرنشده در هر دو روش (کاهش سختی ۵۰ درصد و S.N) کاهش پیدا می‌کند. بیشترین میزان کاهش در عمر خستگی در هر دو سطح کرنش و در هر دو روش، در نمونه‌های پیرشده به روش AASHTO R-30 مشاهده می‌شود. اگرچه تفاوت کمی عمر خستگی در آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای نشان دهنده تفاوت عمر خستگی واقعی نمونه‌ها نمی‌باشد لیکن جهت مقایسه می‌توان گفت که این میزان کاهش بین ۲۰۰ تا ۴۷۷ درصد است که مقدار بیشتر مربوط به سطح کرنش ۵۰۰ برای عمر خستگی محاسبه شده به روش S.N می‌باشد. کاهش عمر خستگی در نمونه‌های پیرشده نیز با توجه به مکانیسم‌های پیرشدگی نیز نتیجه قابل انتظاری بود لیکن روند نتایج سختی اولیه و عمر خستگی با هم متفاوت می‌باشد.

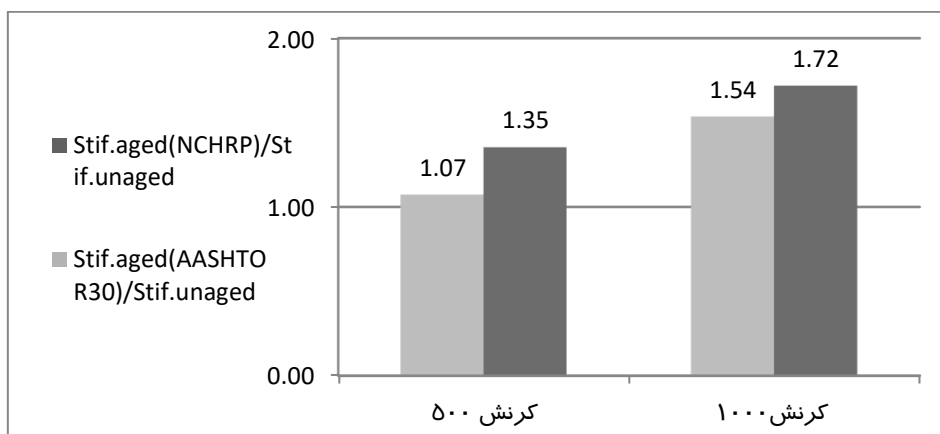
این تفاوت یعنی اختلاف تأثیر روش‌های پیرشدگی بر روند تغییرات سختی اولیه و عمر خستگی می‌تواند بیان کننده این باشد که رفتار نمونه‌ها در شرایط ابتدایی آزمایش (سختی اولیه به عنوان معیار اولیه) با رفتار نمونه در طول و انتهای بارگذاری (عمر خستگی به عنوان معیار درحین و انتهای آزمایش) متفاوت می‌باشد. این تفاوت روند در تحلیل نتایج و نیز مدلسازی آزمایش‌های خستگی بسیار مهم است.

به عبارت دیگر با توجه به این نتایج و نیز با در نظر گرفتن این نکته که در روش پدیده شناسی (Phenomenologically) که برای تعریف مدل‌های خرابی خستگی استفاده می‌کنند، از مقادیر ابتدایی (اولیه) بدست آمده از آزمایش خستگی برای ساخت مدل‌های خرابی خستگی (مانند $N_f = k_1(1/\epsilon)^{k_2}$) استفاده می‌کنند، می‌توان به این نتیجه رسید که در این روش و مدل‌های خرابی بدست آمده از این روش، حتماً باید نوع روش پیرشدگی مشخص شده باشد یا در تعریف مدل باید آزمایش‌های خستگی بر روی نمونه‌های پیرشده نیز انجام شود تا مدل از جامعیت لازم برخوردار باشد.

بررسی اثر روش‌های مختلف پیرشدگی بلندمدت بر عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی



شکل ۳. تاثیر پیرشدگی بر سختی اولیه و عمر خستگی بر اساس معیار کاهش سختی ۵۰ درصد و S^N



شکل ۴. نسبت سختی اولیه نمونه‌های پیر شده به نشده در سطوح کرنش آزمایش شده

پیرشدگی مشخص است که بیشترین تأثیر بر عملکرد خستگی مخلوط‌های آسفالتی را روش آشتو R-30 دارد. شکل‌های ۵ و ۶ این روند را نشان می‌دهد.

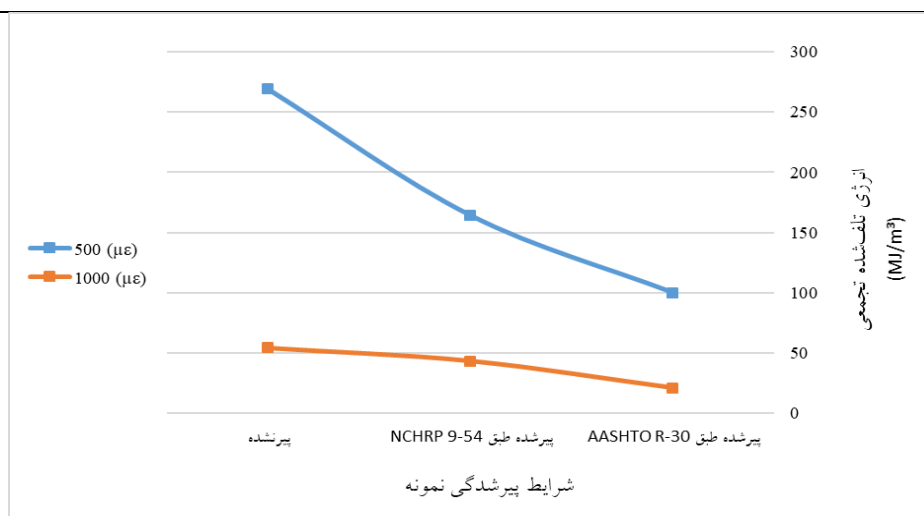
۲-۳ نتایج و تحلیل آن‌ها بر اساس معیار انرژی تلف شده

شده

نتایج بر اساس میزان انرژی تلف شده و شاخص PV در جدول ۶ آورده شده است. بر اساس نتایج حاصل از روش‌های

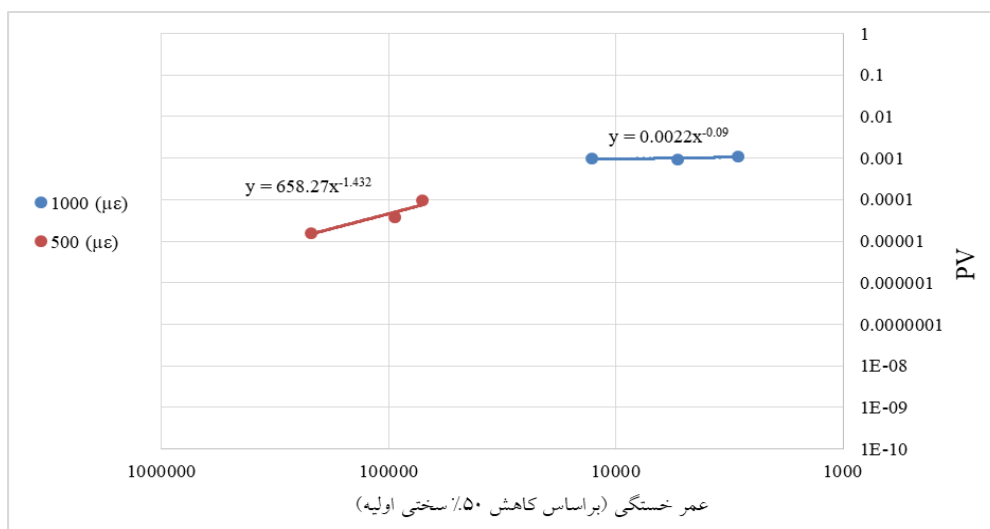
جدول ۶. میزان انرژی تلف شده و شاخص PV

PV	انرژی تلف شده تجمعی تا کاهش ۵۰٪ سختی اولیه	کرنش	فرکانس	نوع نمونه
	MJ/m ³			
۰/۰۰۰۰۱۶	۲۶۹/۳۰۸۶			پیرنشده
۰/۰۰۰۰۳۷	۱۶۴/۲۴۵۴	۵۰۰		پیرشده براساس NCHRP
۰/۰۰۰۰۹۴	۹۹/۹۵۵۴۸		۱۰	پیرشده براساس AASHTO R-30
۰/۰۰۰۰۹۵	۵۴/۲۲۶۰۶			پیرنشده
۰/۰۰۰۰۹۳	۴۳/۳۱۷۶	۱۰۰۰		پیرشده براساس NCHRP
۰/۰۰۰۱۱	۲۰/۸۰۵۰۴			پیرشده براساس AASHTO R-30



شکل ۵. میزان انرژی تلف شده

بررسی اثر روش‌های مختلف پیرشدگی بلندمدت بر عملکرد خستگی مخلوط آسفالتی



شکل ۶. نمودار PV-Nf

برخوردار نیست. نتایج نسبت سختی اولیه در حالت‌های پیرشده به پیر نشده در شکل ۸ نشان می‌دهد که نسبت سختی نمونه‌های پیرشده در فرکانس ۱۰ هرتز از سایر نمونه‌ها بیشتر بوده است. این نسبت در فرکانس‌های ۵ و ۱۵ هرتز کاهش پیدا کرده است. به عبارت دیگر علیرغم افزایش سختی اولیه نمونه‌ها بعد از پیرشدگی، در فرکانس ۵ هرتز، روش پیرشدگی آشتو R-30 بیشترین تأثیر را در افزایش سختی اولیه داشته است. در حالیکه در دو فرکانس بارگذاری دیگر، روش پیرشدگی NCHRP بیشترین تأثیر را دارد.

نتایج عمر خستگی نمونه‌ها در فرکانسهای مختلف در کرنش ۱۰۰۰، بر اساس معیارهای کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰ درصد و معیار S^*N (شکل‌های c-5 و d-5)، نشان می‌دهد که روش‌های پیرشدگی در فرکانسهای تحت آزمایش باعث کاهش عمر خستگی نمونه‌ها شدند و بیشترین تأثیر بر کاهش عمر خستگی را روش پیرشدگی به روش آشتو R-30 دارد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که روند تغییرات یکسانی در سه فرکانس وجود داشتند.

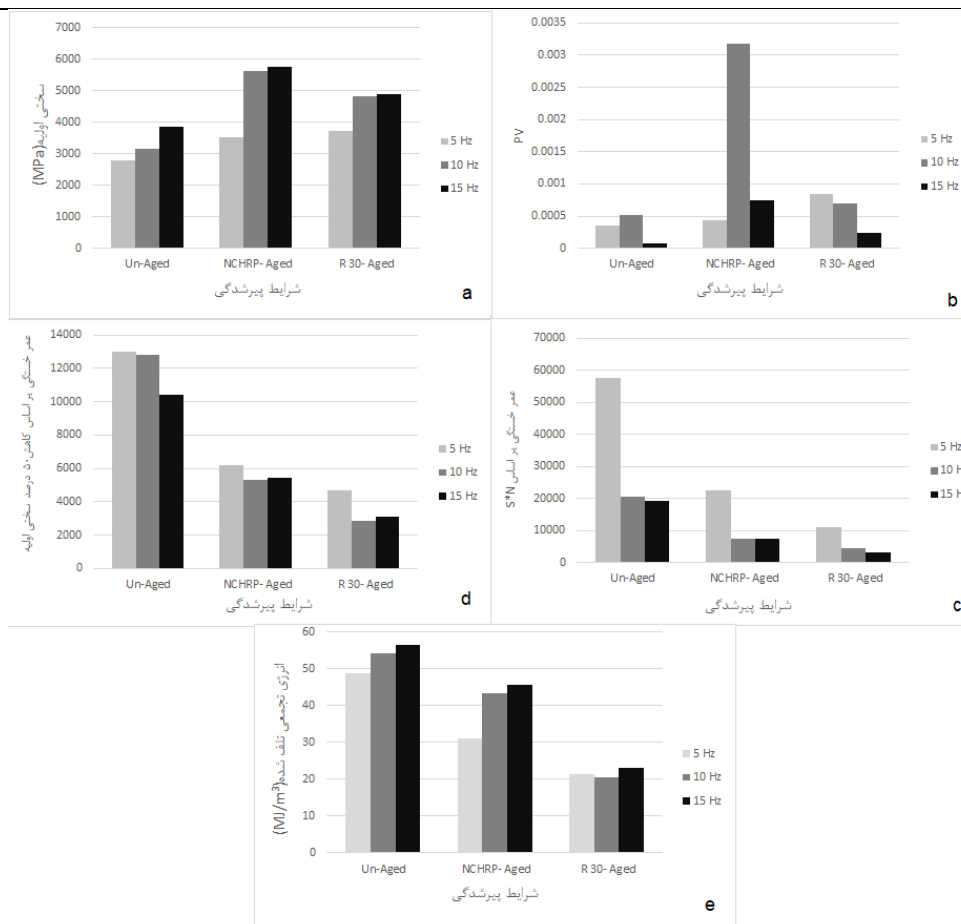
مطابق شکل ۵، میتوان گفت که روند کاهش انرژی تجمعی در نمونه‌های پیر شده در کرنش ۵۰۰ بسیار زیادتر از مقادیر متناظر در کرنش ۱۰۰۰ است. این روند بر اساس معیار PV (شکل ۶) هم مشخص است. نتایج نشان می‌دهد که در کرنش ۱۰۰۰، نتایج مربوط به نمونه‌های پیرشده به روش NCHRP این روند را نشان نمی‌دهند. این تفاوت روند بین دو سطح کرنش به نوعی در نتایج سختی اولیه هم مشاهده شد. به طور کلی با مقایسه نتایج دو روش پیر شده بر حسب انرژی تلف شده و PV می‌توان گفت که علیرغم تأثیر گذاری هر دو روش پیرشدگی بر این متغیرها، لیکن تأثیر روش پیرشدگی در کرنش بالاتر کمتر می‌شود.

۳-۳ نتایج در فرکانس‌های بارگذاری

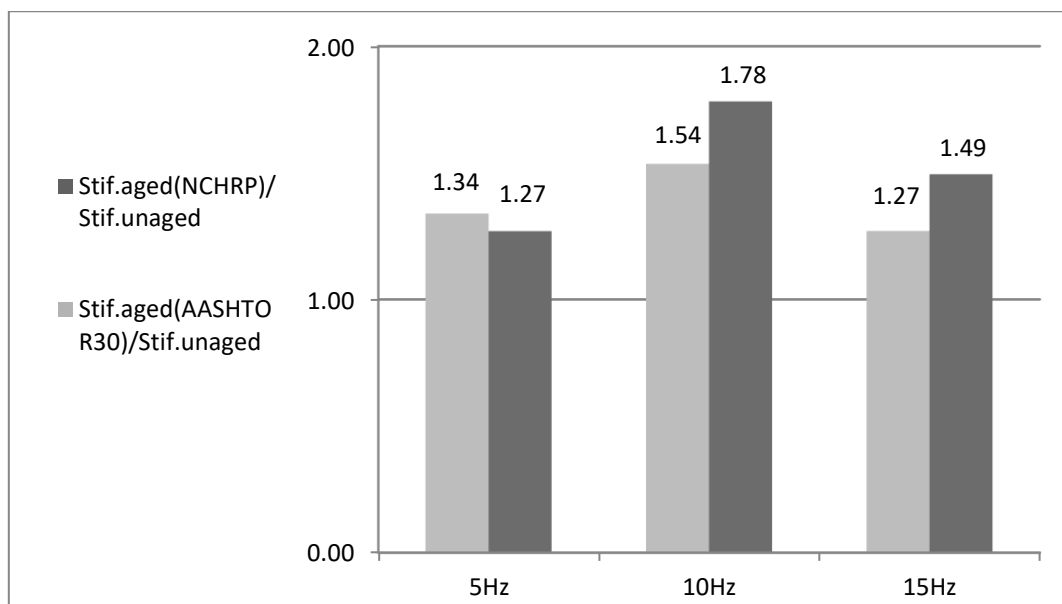
نتایج آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای بر حسب فرکانس‌های مختلف در جدول ۷ و شکل ۷ ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۷ مشخص است، با تغییر مقادیر فرکانس بارگذاری، سختی اولیه نمونه‌ها تغییر پیدا کرده است، البته این تغییر از روند نظام‌مندی

جدول ۷. نتایج آزمایش خستگی در شرایط پیرشدگی مختلف بر حسب فرکانس‌های بارگذاری

PV	انرژی تلف شده تجمعی تا کاهش ۵۰٪ سختی اولیه	عمر خستگی بر اساس S*N	عمر خستگی بر اساس کاهش ۵۰ درصدی	سختی اولیه	فرکانس	کرش	نوع نمونه
۰/۰۰۰۲۱	۴۸/۸۷۰۷	۵۷۵۴۰	۱۲۹۶۵	۲۷۷۸	۵		پیرنشده
۰/۰۰۰۵۶	۳۱/۰۲۲۴۴	۲۲۴۷۵	۶۲۱۰	۳۵۲۸			پیرشده براساس NCHRP
۰/۰۰۰۴۶	۲۱/۲۵۵۵۶	۱۱۲۱۵	۴۶۶۰	۳۷۲۰			پیرشده براساس AASHTO R-30
۰/۰۰۰۹۵	۵۴/۲۲۶۰۶	۲۰۷۳۰	۱۲۷۸۰	۳۱۴۵	۱۰	۱۰۰۰	پیرنشده
۰/۰۰۰۹۳	۴۳/۳۱۷۶	۷۴۱۰	۵۳۲۰	۵۶۰۴			پیرشده براساس NCHRP
۰/۰۰۱۱	۲۰/۶۴۰۶۶	۴۴۵۰	۲۸۶۰	۴۸۲۹			پیرشده براساس AASHTO R-30
۰/۰۰۰۳۳	۵۶/۴۰۹۵۷	۱۹۲۴۰	۱۰۴۴۰	۳۸۳۷	۱۵		پیرنشده
۰/۰۰۰۸۲	۴۵/۶۴۰۹۱	۷۴۴۰	۵۴۵۰	۵۷۳۵			پیرشده براساس NCHRP
۰/۰۰۰۵۳	۲۲/۹۸۴۵۴	۳۲۰۰	۳۱۱۰	۴۸۷۳			پیرشده براساس AASHTO R-30



شکل ۷. نتایج آزمایش خستگی ۴ نقطه‌ای برای حالت‌های مختلف پیرشدگی



شکل ۸. سختی اولیه نمونه‌های پیرشده به پیر نشده در فرکانسهای آزمایش شده

۴. نتیجه‌گیری

خستگی با تغییرات فرکانس بارگذاری در نمونه‌های پیرشده دارای روند منظمی نبود.

- بر اساس نتایج آزمایش‌های خستگی در فرکانس‌های مختلف مشاهده شد که با کاهش فرکانس بارگذاری تأثیرگذاری روش پیرشدگی AASHTO R-30 بر مقدار سختی اولیه بیشتر از روش پیرشدگی NCHRP بود. مقایسه نتایج آزمایش‌های انجام شده در سطوح کرنش و فرکانس‌های مختلف، حاکی از عدم انطباق نتایج حاصل از سختی اولیه و عمر خستگی بود. این نتایج نشان داد که در نمونه‌های پیر شده، رفتار نمونه‌ها در شرایط اولیه با رفتار نمونه در طول بارگذاری متفاوت می‌باشد. این تفاوت باید در انتخاب نوع مدل خرابی خستگی و نیز حوزه کاربرد آن مد نظر قرار گیرد. به عبارت دیگر برای جامعیت بخشیدن به مدل‌های خرابی علاوه بر دقت در انتخاب روش مدلسازی، ضرورت دارد نوع روش پیرشدگی و تأثیر آن لحاظ شود.

- در انتها تأکید می‌شود لازم است برای انتخاب یکی از دو روش برای استفاده در کارهای اجرایی، نیاز است علاوه بر

در این تحقیق، تأثیر دو روش پیرشدگی یعنی روش آشتو-R-30 به عنوان متداولترین روش و NCHRP 09-54 به عنوان یک روش پیشنهادی نوین بر عملکرد خستگی مخلوطهای آسفالتی با استفاده از آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای در کرنش‌های ثابت و فرکانسهای مختلف بارگذاری بررسی شد. بر اساس بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نتایج زیر حاصل شده است:

- هر دو روش پیرشدگی بلند مدت باعث افزایش سختی اولیه نمونه‌ها شدند لیکن روش پیرشدگی NCHRP 09-54 بیشترین تأثیر بر مقدار سختی اولیه نمونه‌های آزمایش شده را داشت.

- هر دو روش پیرشدگی بر عمر خستگی نمونه‌ها تأثیر داشتند. این تأثیر بر عکس روند سختی اولیه نمونه‌ها بود. نتایج نشان داد که روش پیرشدگی AASHTO R-30 بیشترین تأثیر کاهشی بر عمر خستگی نمونه‌های آزمایش شده را دارد.

- همانگونه که انتظار می‌رفت با افزایش فرکانس، عمر خستگی نمونه‌ها کاهش پیدا کرد لیکن روند تغییرات عمر

Periodica Polytechnica Civil Engineering, 65(2), pp. 537-545, <https://doi.org/10.3311/PPci.15480>.

– Fernández-Gómez, W.D., Rondón Quintana, H. and Reyes Lizcano, F., 2013. A review of asphalt and asphalt mixture aging: Una revisión. *Ingeniería e investigación*, 33(1), pp.5-12.

– Golchin, B., Hamzah, M.O. and Valentin, J., 2021. Effects of Combined Environmental Factors on Stiffness and Rutting Properties of Warm Mix Asphalt. *International Journal of Transportation Engineering*, 8(4), pp.363-382.

– Hamzah, M. O., Omranian, S. R., & Golchin, B., 2015, A Review on the Effects of Aging on Properties of Asphalt Binders and Mixtures. *Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 4(6).

– Hunter, R. N., Self, A., Read, J., 2015, *The Shell Bitumen Handbook*, 6th ed., ICE Publishing, London, UK.

– Kim, Y. R., Castorena C., Elwardany M., Yousefi Rad F., Underwood S., Gundha A., Gudipudi P., Farrar M. J., and Glaser R. R., 2017, Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction”, National Cooperative Highway Research Program, No. Project 9-54, National Research Council, Washington, D.C.

– Lesueur D, 2009, The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in colloid and Interface Science*, 145(1):42-82.

– Newcomb, D., A. Epps Martin, F. Yin, E. Arambula, E. Sug Park, A. Chowdhury, R. Brown, C. Rodezno, N. Tran, E. Coleri, D. Jones, J. T. Harvey, and J. M. Signore, 2015,

بررسی تاثیر روشهای ذکر شده بر سایر خرابیها از جمله شیار شدگی و ترکهای حرارتی، مطالعه میدانی نیز انجام شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Oxidation
2. Volatilization
3. Polymerization
4. Steric Hardening
5. Exudation
6. Thin Film Oven Test
7. Modified Rolling Thin Film Oven Test
8. Pressure Aging Vessel
9. Stirred Airflow Test
10. Low-pressure oxidation
11. Plateau valu

۶. مراجع

– کاووسی امیر، جلیلی قاضی زاده مرتضی و حسینی ابوالفضل، ۱۳۹۴، بررسی تاثیر پیرشدگی آزمایشگاهی دراز مدت بر رفتار خستگی مخلوطهای آسفالتی حاوی سرباره های قوس الکتریک و کوره اکسیژنی؛ مجله مهندسی حمل و نقل، سال هفتم، شماره اول.

– American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002, Standard practice for mixture conditioning of hot-mix asphalt (HMA). AASHTO R 30. AASHTO, Washington D.C., USA.

– Bell, C. A., Wieder, A. J., and Fellin, M. J., 1994, Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures: Field Validation. SHRP-A-390, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, D.C.

– Bell, C.A., and Sosnovske, D., 1994, SHRP-A-384: Aging: Binder Validation. TRB, National Research Council, Washington, D.C.

– Durmaz C., Sengoz B., Ozdemir D. K., Topal A., 2021, Investigation of Different Laboratory Aging Methods of Bituminous Mixtures,

Concrete. Journal of Building Material Science, 2(2).

– Song, S., Liang, M., Hou, F., Gao, H., Bi, Y., Zhang, H. and Guo, M., 2022. Analysis of Natural Aging Behavior of Asphalt Binder in Cold and Arid Region. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.

– Van den Bergh, W., 2011, The Effect of Aging on Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft University.

NCHRP Report 815: Short-Term Laboratory Conditioning of Asphalt Mixtures, <https://doi.org/10.17226/22077>.

– Nicholls, C., 2006, Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests. Forum of European National Highway Research Laboratories, ed. Cliff Nicholls, TRL. UK: Report on Phase 1 of the BiTVal Project, Forum of European National Highway Research Laboratories.

– Nooralhuda F. Saleh, Keshavarzi B., Yousefi Rad F., Mocelin D., Elwardany M., Castorena C., Underwood S., and Kim Y. R., 2020, Effects of aging on asphalt mixture and pavement performance. *Construction and Building Materials*, Volume 258.

– Omranian, S.R., Ghanizadeh, A.R., Golchin, B., Hamzah, M.O. and Van Den Bergh, W., 2021. Application of Conventional Mathematical and Soft Computing Models for Determining the Effects of Extended Aging on Rutting Properties of Asphalt Mixtures. *International Journal of Transportation Engineering*, 8(3), pp.247-260.

– Petersen, J. C. and R. Glaser, 2011, Asphalt Oxidation Mechanisms and the Role of Oxidation Products on Age Hardening Revisited. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 12, No. 4, pp. 795-819.

– Piérard, N., and Vanelstraete, A., 2009, Développement d'une méthode d'essai pour vieillir de manière accélérée les enrobés bitumineux en laboratoire.

– Read J., Whiteoak D., 2003, *The Shell Bitumen Handbook*, fifth ed., Thomas Telford Publishing, London, UK.

– Sarsam, S. I., 2021, Assessing the Ageing Impact on Fatigue Life of Asphalt

محمود رضا کی منش، دارای دکتری راه و ترابری از دانشگاه فرانسه و عضو هیئت علمی دانشگاه پیام نور تهران میباشد ایشان هم اکنون رئیس مرکز فنی و مهندسی تهران شمال دانشگاه پیام نور و مدیر گروه عمران هستند. زمینه های پژوهشی مورد علاقه مهندسی روسازی، مدیریت روسازی، مواد و مصالح روسازی می باشد.

مسعود جیلانچی دارای درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد از دانشگاههای صنعتی شریف و علم و صنعت ایران می باشد، زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان مواد و مصالح روسازی، مهندسی روسازی و ایمنی و ترافیک است ایشان عضو هیئت علمی دانشگاه زابل می باشند.

علیرضا خاوندی، دارای درجه کارشناسی از دانشگاه تبریز در رشته مهندسی عمران و کارشناسی ارشد و دکتری راه و ترابری از دانشگاه علم صنعت ایران می باشد. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان راه و روسازی پایدار، مهندسی روسازی، طرح ایمن راه و مدیریت نگهداری بوده و در حال حاضر هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه زنجان می باشد.