

رفتار مخلوط آسفالتی ترک خورده تحت بارگذاری موجی شکل با استفاده از آزمایش خمش نیم دایره (SCB)

محمدفدایی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
علیرضا سرکار*، استادیار، گروه راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sarkar@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۰

صفحه ۱۴۹-۱۵۹

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی رفتار مقاطع آسفالتی ترک خورده با استفاده از مقاطع آزمون خمش نیم دایره می باشد. بدین منظور جهت انطباق شرایط آزمایش با شرایط واقعی، از بارگذاری نیم سینوسی تکرارشونده دارای دو مدت بارگذاری متفاوت و دوره استراحت با نسبت یک در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتی گراد استفاده گردید. نمونه های آسفالتی مورد استفاده در این آزمایش در دو دانه بندی متفاوت با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۲/۵ و ۲۵ میلیمتر می باشند. جهت انجام بررسی ها میزان تغییر مکان قائم و بازشدگی ترک در هر سیکل بارگذاری ثبت و در دو مرحله بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در هر دو مرحله بارگذاری، تاثیر حداکثر قطر سنگدانه ها بر تغییر مکان قائم و بازشدگی ترک وابسته به مدت زمان بارگذاری (سرعت بار عبوری) می باشد. در مدت بارگذاری کوتاه تر و مرحله اول بارگذاری، مخلوط با سنگدانه به قطر کوچکتر و در مرحله دوم بارگذاری مخلوط با قطر سنگدانه بزرگتر مقاومت بهتری از خود در برابر تغییر مکان قائم نمایش دادند. همچنین در هر دو مرحله بارگذاری، گسترش ترک سریع تر از تغییر مکان قائم می باشد که می تواند بیانگر رشد سریعتر ترک خوردگی خستگی نسبت به شیارشدهگی در مقاطع ترک خورده باشد.

واژه های کلیدی: آزمایش خمش نیم دایره، بارگذاری موجی شکل، مقاطع ترک خورده، مکانیک شکست

۱- مقدمه

برابر ترک خوردگی انجام داد (G Nsengiyumva, You, & Kim, 2016).

از بین چندین روش و آزمون شکست مخلوط آسفالتی، آزمون خمش نیم دایره (SCB) به دلیل کارایی، قابل تکرار بودن، امکان ایجاد مدهای مختلف شکست و روش های عملی برای مشخص کردن رفتار و شکست بتن آسفالتی توجه جامعه روسازی آسفالتی را به خود معطوف نموده است (Aliha, Fazaeli, Aghajani, & Nejad, 2015; Mansourian, Razmi, & Razavi, 2016; Pirmohammad & Ayatollahi, 2014; Saadeh, Hakimelahi, & Harvey, 2014). نتایج آزمون خمش

روسازی های آسفالتی در طول دوره بهره برداری خود، در معرض انواع مختلفی از خرابی ها مانند ترک های خستگی، شیارشدهگی و ترک های حرارتی قرار می گیرند (Allamy, H. Wang, Zhang, Li, You, & Diab, 2016; J. Wang, Molenaar, van de Ven, & Wu, 2016). عموماً دلیل عمده ی این خرابی ها تکرار بارگذاری ناشی از عبور و مرور وسایل نقلیه می باشد. برای کاهش ترک های خستگی، شناخت چگونگی شروع و گسترش ترک در مخلوط آسفالتی ضروری می باشد تا بتوان با شناخت پارامترهای مؤثر شکست، بهترین طراحی را در

دیجیتالی (DIC) که به یک نمایش گر متصل می باشد، رفتار شکست در رأس شکاف و با استفاده از روش های اجزاء محدود مواد ویسکوالاستیک و مدل Cohesive Zone شبیه سازی شد. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود نتایج تجربی به صورت موفق آمیزی با استفاده از مدل های عددی شبیه سازی شده است (Aragão & Kim, 2012). با توجه به اینکه در اکثر مطالعات انجام شده از بارگذاری های یکنواخت با نرخ ثابت برای بررسی پارامترهای مکانیک شکست استفاده شده است، و در محدود مطالعاتی که از بارگذاری تکرارشونده استفاده شده است صرفاً از بارگذاری نیم سینوسی با فرکانس ثابت جهت بررسی گسیختگی و رشد ترک استفاده شده است (Ahmed, Van Rooijen & De Bondt, 2008). این مطالعه قصد دارد رفتار مقاطع آسفالتی ترک خورده را تحت شرایط واقعی با استفاده از آزمایش خمش نیم دایره بررسی نماید.

۳- روش تحقیق و آماده سازی نمونه

۳-۱- دانه بندی سنگدانه ها

برای آماده سازی نمونه و بررسی تاثیرات دانه بندی بر مکانیک شکست مخلوط آسفالتی از دو نوع مخلوط آسفالتی با دانه بندی جدول ۱ و مشخصات زیر استفاده شد.

۱- مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی آهکی و حداکثر اندازه اسمی سنگ دانه (NMAS) $12/5^A$ میلیمتر مطابق با دانه بندی شماره ۵ جدول ۹-۱ نشریه ۲۳۴ (آیین نامه روسازی آسفالتی ایران) و با درصد قیر بهینه ۴/۹.

۲- مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی آهکی و حداکثر اندازه اسمی سنگ دانه (NMAS) ۲۵ میلیمتر مطابق با دانه بندی شماره ۳ جدول ۹-۱ نشریه ۲۳۴ (آیین نامه روسازی آسفالتی ایران) و با درصد قیر بهینه ۴/۱.

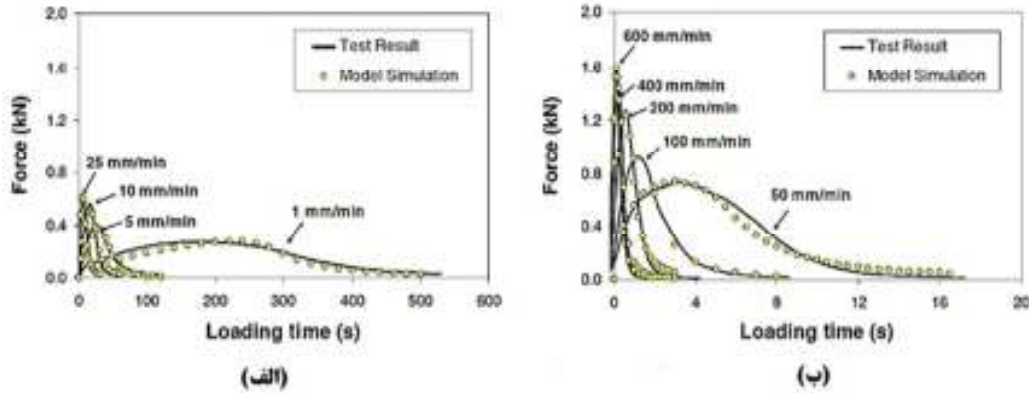
۳-۲- مشخصات قیر مصرفی

آزمایش های رایج بر روی نمونه قیر خالص مصرفی انجام پذیرفت که نتایج آنها در جدول ۲ ارایه گردیده است.

نیم دایره حاکی از تأثیرگذاری متغیرهایی مانند نرخ بارگذاری، ضخامت نمونه و دمای انجام آزمایش در آزمون می باشد (Li Pérez-Jiménez, Botella, & Marasteanu, 2010; Moon, & Marasteanu, 2013). با این حال انتخاب این متغیرها به طور کامل مشخصات شکست مخلوط آسفالتی ترک خورده را نشان نمی دهد و عواملی چون نوع ترافیک عبوری، سرعت وسایل نقلیه عبوری و دانه بندی نمونه متناسب با شرایط واقعی که می تواند نتایج مطالعات را تحت تاثیر قرار دهد، در نظر گرفته نشده است (Mansourkhaki Sarkar, 2016 & Sarkar, 2015). به همین دلیل این مطالعه تحقیقی سعی دارد تا با استفاده از بارگذاری های نزدیک به شرایط واقعی در سرعت های متفاوت و دانه بندی های مختلف، مکانیک شکست و خستگی مخلوط آسفالتی را با استفاده از آزمون SCB بررسی نماید.

۲- پیشینه تحقیق

اولین بار روش های مبتنی بر آزمون SCB در سال ۱۹۴۸ مورد استفاده قرار گرفت. دلیل استفاده از این آزمون اجرای مشکل و پرهزینه دیگر آزمون های موجود براساس مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) مصالح سنگی بود (Chong & Kuruppu, 1984). در مطالعه ای با بررسی مقاومت مخلوط های آسفالتی سوپریو با درصد های مختلف قیر و بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه (NMAS) با استفاده از آزمون SCB مشخص شد که آزمون SCB تقریباً به همه متغیرهای انتخابی حساس می باشد و مخلوط های سوپریو با قطر سنگدانه بزرگتر به دلیل تماس سنگدانه - سنگدانه بیشتر، مقاومت بیشتری نشان می دهند (Wu, Mohammad, Wang, & Mull, 2005). مطالعه ای با بررسی پتانسیل گسترش ترک مخلوط آسفالتی با درصد قیر ۴/۴ درصد و ۵/۴ درصد با استفاده از آزمون SCB نتایج نشان داد که مخلوط با درصد قیر بیشتر به مقدار زیادی مقاومت بیشتری را در برابر گسترش ترک نشان می دهد (Biligiri, Said, & Hakim, 2012). مطالعات تجربی و عددی برای مشخص کردن حالت I شکست روسازی های آسفالتی تحت نرخ بارگذاری های مختلف در دمای متوسط انجام شده است. با استفاده از دوربین های با سرعت بالا و یک ارتباط دهنده عکس



شکل ۱. تاثیر نرخ بارگذاری (Aragão & Kim, 2012)

جدول ۱. دانه‌بندی استفاده شده برای هر دو مخلوط

دانه‌بندی مخلوط با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۱۲/۵ میلیمتر				دانه‌بندی مخلوط با حداکثر اندازه اسمی سنگدانه ۲۵ میلیمتر			
دانه‌بندی استفاده شده در طرح	حد وسط حدود مشخصات	حدود مشخصات دانه‌بندی ۵ جدول ۹-۱ نشریه ۲۳۴	اندازه الک	دانه‌بندی استفاده شده در طرح	حد وسط حدود مشخصات	حدود مشخصات دانه‌بندی ۳ جدول ۹-۱ نشریه ۲۳۴	اندازه الک
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱/۲ اینچ	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱ اینچ
۹۵	۹۵	۹۰-۱۰۰	۳/۸ اینچ	۹۵	۹۵	۹۰-۱۰۰	۳/۴ اینچ
۷۰	۷۰	۵۵-۸۵	شماره ۴	۶۸	۶۸	۵۶-۸۰	۳/۸ اینچ
۴۱	۵۰	۳۲-۶۷	شماره ۸	۵۰	۵۰	۳۵-۶۵	شماره ۴
۱۲	۱۵	۷-۲۳	شماره ۵۰	۳۱	۳۶	۲۳-۴۹	شماره ۸
۵/۵	۶	۲-۱۰	شماره ۲۰۰	۱۰	۱۲	۵-۱۹	شماره ۵۰
				۴/۵	۵	۲-۸	شماره ۲۰۰

جدول ۲. مشخصات قیر مصرفی

حدود مشخصات قیر ۶۰/۷۰		نتیجه آزمایش	روش استاندارد	آزمایش
حداقل	حداکثر			
		۱/۰۱۶	ASTM D70	وزن مخصوص قیر در ۲۵ °C
۶۰	۷۰	۶۵	ASTM D5	درجه نفوذ قیر (۰/۱ میلیمتر) در ۲۵ °C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه
۲۳۲		۳۰۶	ASTM D92	نقطه اشتعال قیر، ظرف روباز کیولند (درجه سانتیگراد)
۱۰۰		۱۰۰ <	ASTM D113	کشش پذیری قیر (سانتیمتر) در ۲۵ °C، ۵ سانتیمتر بر دقیقه
۴۹	۵۶	۵۰/۸	ASTM D36	نقطه نرمی قیر (درجه سانتیگراد) در آب مقطر

۳-۳- آماده سازی نمونه

محدوده دمای تراکم ۱۴۲-۱۳۸ درجه سانتیگراد و دمای اختلاط مخلوط آسفالتی ۱۵۴-۱۴۸ درجه سانتیگراد مشخص گردید. پس از ترکیب مصالح سنگی و قیر با استفاد از دستگاه تراکم ژیراتوری نمونه های استوانه ای با قطر ۱۵۰ سانتی متر و ارتفاع ۷۵ سانتی متر ساخته شد. به منظور دستیابی به نمونه های با تراکم یکنواخت ابتدا از قسمت بالا و پایین نمونه های استوانه ای به مقدار ۱۲/۵ میلیمتر برش داده می شود تا نمونه های استوانه ای با ارتفاع ۵۰ میلیمتر و قطر ۱۵۰ میلیمتر به دست آید. برای تهیه نمونه نیم دایره، هر نمونه استوانه ای را در راستای قطر نمونه به دو قسمت مساوی تقسیم می شود. سپس با استفاده از واتر جت شکافی به طول 15 ± 0.5 میلیمتر و عرض ۱/۵ میلیمتر در راستای محور تقارن و از قسمت سطح نمونه نیم دایره ایجاد می شود (شکل ۲).

۳-۴- شکل بارگذاری

به منظور انطباق بارگذاری مورد استفاده در پروژه با شرایط واقعی از روش مورد استفاده در نرم افزار KENLAYER که براساس معادله ۱ می باشد، جهت

شبیه سازی یک دوره بارگذاری نیم سینوسی استفاده گردید (Y. H. Huang, 1993):

$$L(t) = q \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d}\right) \quad (1)$$

در این معادله $L(t)$ تابع بار، q بار حداکثر، t زمان و d زمان اعمال بار یا مدت زمان بارگذاری است. مطابق با معادله ۲، زمان اعمال بارگذاری (d)، به سرعت (s) و شعاع سطح تماس چرخ (a) بستگی دارد.

$$d = \frac{12a}{s} \quad (2)$$

بارگذاری استفاده شده از نوع نیم سینوسی متناظر با دو سرعت ۶۴ و ۳۲ کیلومتر بر ساعت (۴۰ و ۲۰ مایل بر ساعت) و شعاع سطح تماس ۱۵/۲۴ سانتیمتر (۶ اینچ) است که با توجه به مقادیر سرعت، شعاع سطح تماس و معادله ۲، مدت زمان بارگذاری برای سرعت های ۶۴ و ۲۰ کیلومتر بر ساعت به ترتیب برابر با ۰/۱ ثانیه (۱۰۰ میلی ثانیه) و ۰/۲ ثانیه (۲۰۰ میلی ثانیه) و دوره استراحت برابر با مدت بارگذاری است. جدول ۳ موج بارگذاری و مشخصات آن را نمایش می دهد.



شکل ۲. نمونه های نیم دایره آماده شده

جدول ۳. مشخصات بارگذاری استفاده شده

شکل بارگذاری	سرعت (Km/hr)	مدت بارگذاری، (ms)d	دوره استراحت، (ms)r
	متوسط ۶۴	۱۰۰	۱۰۰
	کم ۳۲	۲۰۰	۲۰۰

۳-۵-۲- آزمایش خمش نیم دایره با بارگذاری تکرار شونده (Cyclic Loading)

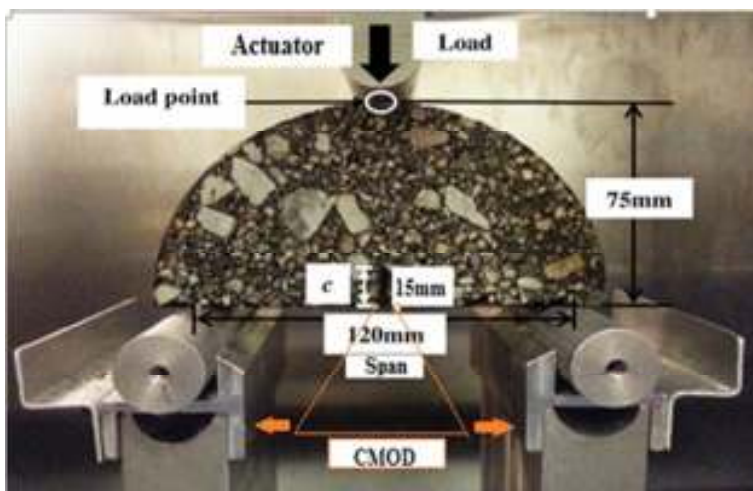
نمونه‌هایی که به مدت زمان حداقل ۴ ساعت در دمای انجام آزمایش (۲۰°C) قرار داده شده‌اند، تحت بارگذاری‌های تعریف شده قرار می‌گیرند. در تنظیمات هر بارگذاری، مقدار بار حداکثر و حداقل، مدت بارگذاری و زمان استراحت در دستگاه UTM لحاظ می‌شود. مقدار بار حداکثر در همه بارگذاری‌ها برابر با ۱/۰۲ کیلو نیوتون (۶۰ درصد بار حداکثر در بارگذاری یکنواخت) و مقدار بار حداقل نیز به منظور برقراری تماس پیوسته و جدا نشدن صفحه بارگذاری از نمونه برابر مقدار ناچیز ۰/۰۳ کیلو نیوتون و دمای انجام آزمایش ۲۰ درجه سانتیگراد است. در طول آزمایش‌زمان کل انجام آزمایش، مقدار بار و تنش در هر لحظه، تغییر مکان عمودی نمونه و میزان باز شدگی ترک (CMOD) ثبت گردید. از هر حالت بارگذاری ۳ نمونه تحت آزمایش قرار گرفت.

۳-۵-۱- روش انجام آزمایش خمش نیم دایره

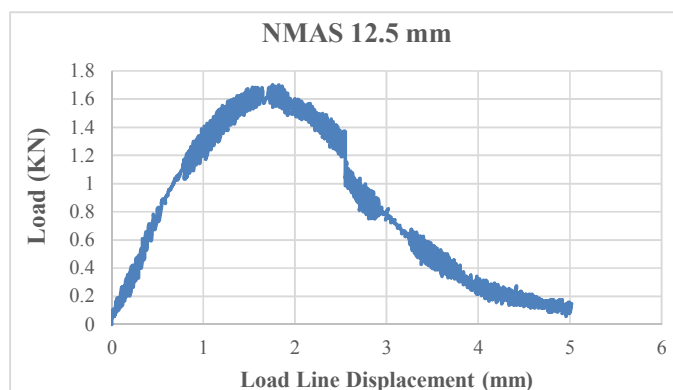
برای انجام این آزمایش از دستگاه Universal Testing Machine IPC 14 (UTM IPC14) استفاده شده است. به منظور ایجاد حالت I شکست، نمونه نیم‌دایره از قسمت مسطح خود مطابق شکل ۳ بر روی دو تکیه گاه غلطکی و به فاصله مرکز به مرکز ۱۲۰ میلی‌متر قرار می‌گیرد.

۳-۵-۱-۱- آزمایش خمش نیم دایره با بارگذاری یکنواخت (Monotonic Loading)

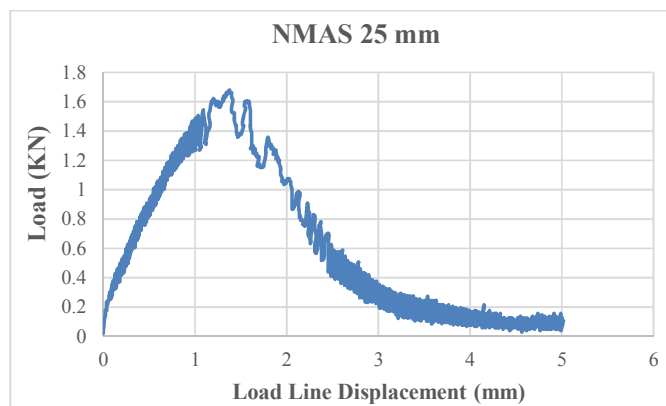
به منظور جلوگیری از شکست زود هنگام نمونه‌ها تحت بارگذاری سیکلی لازم است ابتدا با استفاده از بارگذاری یکنواخت، بار حداکثر در نمودار نیرو-جابجایی برای هر دو دانه‌بندی به دست آورده شود و سپس درصدی از آن (۶۰ درصد) به عنوان بار حداکثر در بارگذاری سیکلی استفاده شود. برای دستیابی به این هدف ابتدا از هر دانه‌بندی سه نمونه در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد تحت بار یکنواخت با نرخ ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه (۰/۰۰۸۳ میلی‌متر بر ثانیه) قرار گرفت و با ثبت مقدار بار و تغییر مکان صفحه بارگذاری در هر لحظه، نمودار بار-جابجایی عمودی ترسیم گردید (شکل ۴ و ۵) (Cooper Jr, Cooper III, Mohammad, & Elseifi, Mohammad, Ying, & Elseifi, 2016; Wu et al., 2005). همانطور که مشاهده می‌شود برای هر دو دانه‌بندی مقدار بار حداکثر در نمودار بار-جابجایی تقریباً یکسان و برابر ۱/۷ کیلو نیوتون است.



شکل ۳. نحوه قرارگیری نمونه برای آزمایش خمش نیم دایره (Gabriel Nsengiyumva, You, Kim, & Beran, 2016)



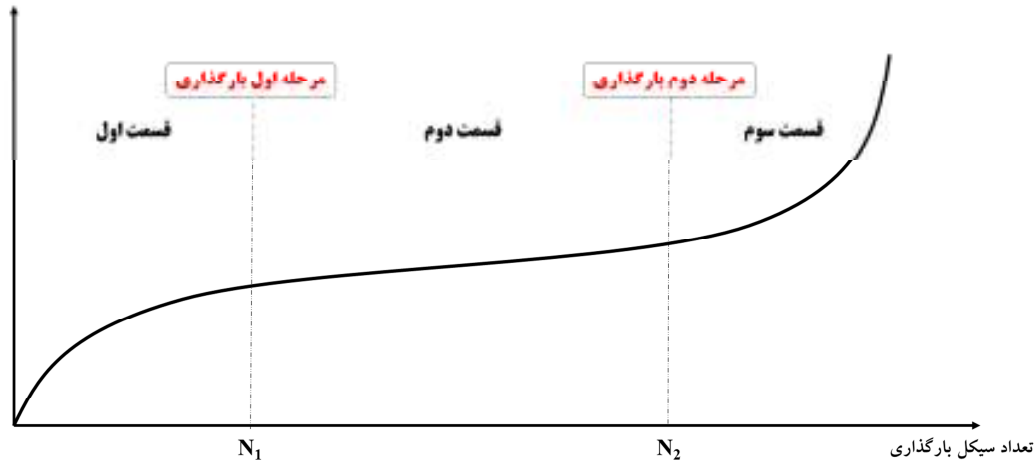
شکل ۴. نمودار نیرو جابجایی نمونه‌های با NMAS 12.5mm



شکل ۵. نمودار نیرو جابجایی نمونه‌های با NMAS 25mm

قسمت دوم نرخ رشد تقریبا ثابت و خطی است. در ابتدای قسمت سوم (مرحله دوم بارگذاری) نرخ رشد مجددا با افزایش سیکل عبوری با شدت بیشتری افزایش می‌یابد تا اینکه نمونه کاملا گسیخته شود. همانطور که در شکل ۶ مشخص شده است در این مطالعه مرحله اول بارگذاری، متناظر با پایان قسمت اول نمودار، با N_1 و مرحله دوم بارگذاری، متناظر با پایان قسمت دوم نمودار، با N_2 نمایش داده شده است. پسوند v مربوط به تغییر مکان عمودی و پسوند h مربوط به باز شدگی ترک است.

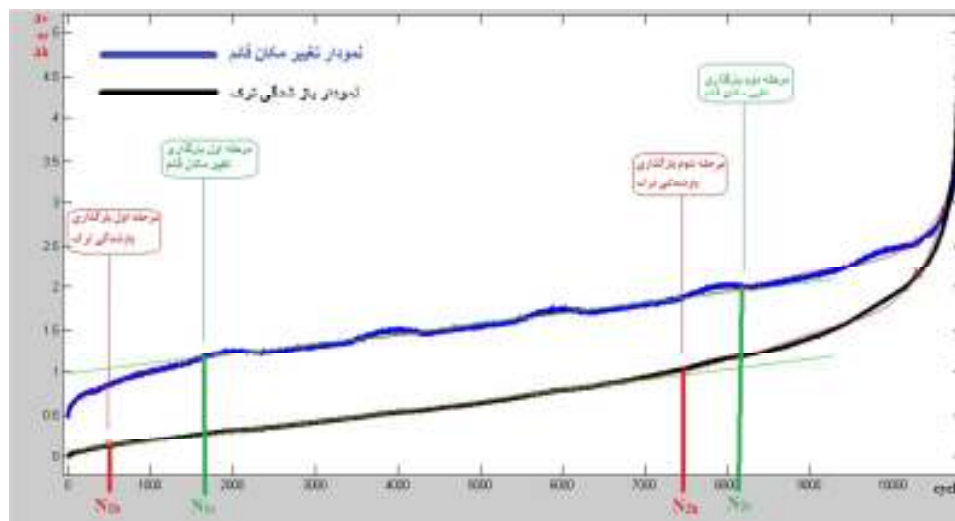
تغییر مکان عمودی
یا
باز شدگی ترک



شکل ۶. نمودار سه قسمتی تغییر مکان در مقابل سیکل بارگذاری

۳-۶- نمودار تغییر مکان قائم و باز شدگی ترک در مقابل تعداد سیکل بار گذاری

شکل ۶ خروجی آزمایش خمش نیم دایره به صورت نمودار سه قسمتی تغییر مکان در مقابل تعداد سیکل عبوری نمایش می‌دهد. نمودار سه قسمتی تغییر مکان در مقابل تعداد سیکل عبوری نمایش می‌دهد (Witczak, Kaloush, Pellinen, El-Basyouny, & Von Quintus, 2002). در قسمت اول نرخ رشد تغییر مکان یا باز شدگی ترک با افزایش تعداد سیکل عبوری افزایش می‌یابد تا اینکه به نرخ ثابتی برسد (مرحله اول بارگذاری). پس از آن در



شکل ۷. خروجی آزمایش مربوط به نمودار تغییر مکان قائم و باز شدگی ترک در مقابل سیکل عبوری

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- نتایج مربوط به مرحله اول بارگذاری

کاهش می‌یابد یعنی نمودار با تعداد سیکل کمتری به مرحله دوم بارگذاری می‌رسد. در هر دو پارامتر رفتار هر دو دانه‌بندی مشابه است و در مدت بارگذاری کوتاهتر (سرعت بیشتر)، مخلوط با سنگدانه قطر اسمی بزرگتر در مقابل شیارشدگی و ترک‌خوردگی مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد اما در مدت بارگذاری طولانی (سرعت کمتر)، هر دو دانه‌بندی در تغییر N_2 به صورت مشابه عمل می‌کنند. همچنین با مقایسه مقدار N_{2h} و N_{2v} در هر دو دانه‌بندی همانند N_{1h} و N_{1v} به این نکته می‌توان رسید که N_{2h} با تعداد سیکل کمتری به مرحله دوم بارگذاری می‌رسد، که نشان دهنده این است که در مقطع ترک خورده، گسترش ترک برشی سریع تر از شیارشدگی رخ می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

۱- علی‌رغم اینکه تحت بارگذاری یکنواخت، دانه‌بندی تأثیری بر مقاومت مخلوط آسفالتی ترک خورده ندارد، اما در بارگذاری تکرار شونده دانه‌بندی بر مقاومت مخلوط آسفالتی تأثیر گذار می‌باشد.

۲- افزایش مدت بارگذاری (کاهش سرعت)، مقاومت شیار شدگی و ترک خوردگی را کاهش می‌دهد.

۳- در مرحله اول بارگذاری، تغییر مکان قائم به سرعت و دانه‌بندی وابسته است اما گسترش ترک تنها به سرعت وابسته بوده و دانه‌بندی تأثیری نداشته است.

۴- در مرحله دوم بارگذاری مربوط به تغییر مکان قائم (N_{2v}) و بازشدگی ترک (N_{2h})، در سرعت بالا، دانه‌بندی با حداکثر قطر اسمی بزرگتر مقاومت بهتری از خود نشان داد اما در سرعت پایین هر دو دانه‌بندی مقاومت یکسانی را نمایش دادند.

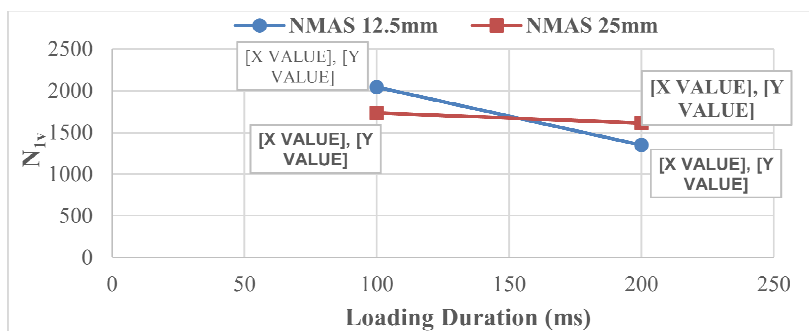
۵- در مقاطع ترک‌خورده مخلوط آسفالتی در هر دو مرحله بارگذاری، روند گسترش ترک سریع تر از شیارشدگی می‌باشد.

۶- تأثیرات حداکثر قطر اسمی سنگدانه‌ها بر روند ترک خوردگی و شیارشدگی مقاطع ترک خورده تابعی از سرعت بار عبوری می‌باشد.

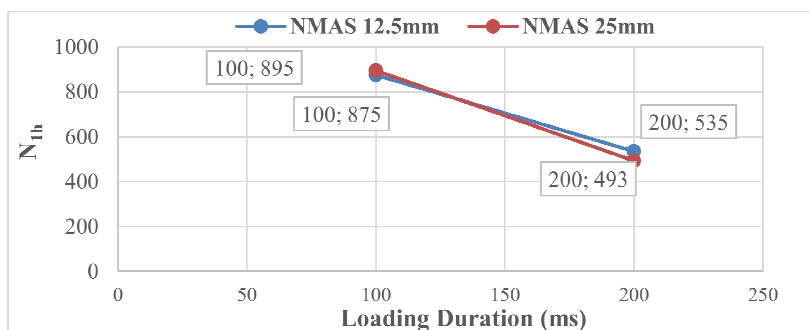
شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب مرحله اول بارگذاری (N_1) برای تغییر مکان قائم و بازشدگی ترک برای هر دو دانه‌بندی را نمایش می‌دهند. این مرحله از بارگذاری مربوط به تورم اولیه نمونه‌های متراکم شده بعد از ساخت و ترک ناشی از انفصال پیوند قیر و سنگدانه در مقطع ترک خورده می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو دانه‌بندی با افزایش مدت بارگذاری (کاهش سرعت)، N_{1h} و N_{1v} کاهش می‌یابد یعنی نمودار با تعداد سیکل کمتری به مرحله اول بارگذاری می‌رسد. همچنین با مقایسه مقدار N_{1h} و N_{1v} در هر دو دانه‌بندی به این نکته می‌توان رسید که نمودار مربوط به بازشدگی ترک با تعداد سیکل کمتری نسبت به نمودار تغییر مکان عمودی به مرحله اول بارگذاری می‌رسد که نشان دهنده این است که در مقطع ترک خورده، گسترش ترک سریع تر از تغییر مکان عمودی (شیارشدگی) اتفاق می‌افتد. شکل ۸ نشان می‌دهد که روند تغییرات N_{1v} در مقابل مدت بارگذاری تابعی از دانه‌بندی است. در مدت بارگذاری ۱۵۰ میلی ثانیه (سرعت ۴۸ کیلومتر بر ساعت) هر دو دانه‌بندی اثر گذاری یکسانی داشته‌اند و این در حالی است که در مدت بارگذاری کوتاه تر (سرعت بیشتر)، مخلوط ترک‌خورده با سنگدانه‌های به قطر اسمی کوچکتر، مقاومت بهتری از خود در برابر تغییر مکان قائم (شیار شدگی) نمایش می‌دهد. اما در مدت بارگذاری طولانی‌تر (سرعت کمتر) مخلوط ترک خورده با سنگدانه‌های به قطر اسمی بزرگتر، مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهد و این در حالیست که با مشاهده روند تغییرات N_{1h} (شکل ۹) می‌توان دریافت که در مدت بارگذاری طولانی و کوتاه، دانه‌بندی تأثیری بر گسترش ترک در مقطع ترک خورده نداشته است.

۴-۲- نتایج مربوط به مرحله دوم بارگذاری

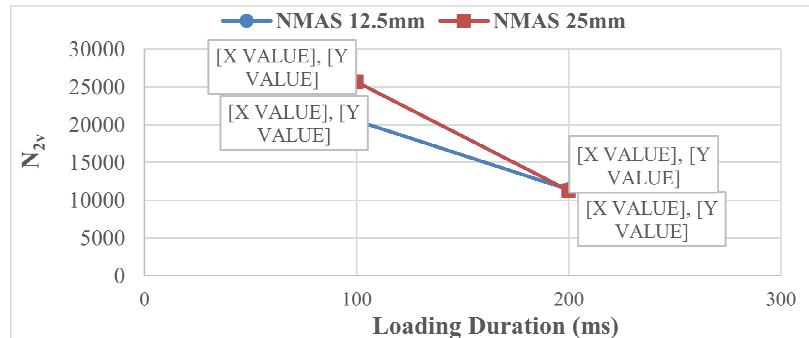
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب مرحله دوم بارگذاری (N_2) برای تغییر مکان قائم و بازشدگی ترک برای هر دو دانه‌بندی را نمایش می‌دهند. این مرحله از بارگذاری مربوط به شیار شدگی ناشی از مکانیسم برشی و افزایش نرخ رشد ترک می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در هر دو دانه‌بندی با افزایش مدت بارگذاری (کاهش سرعت)، N_{2h} و N_{2v}



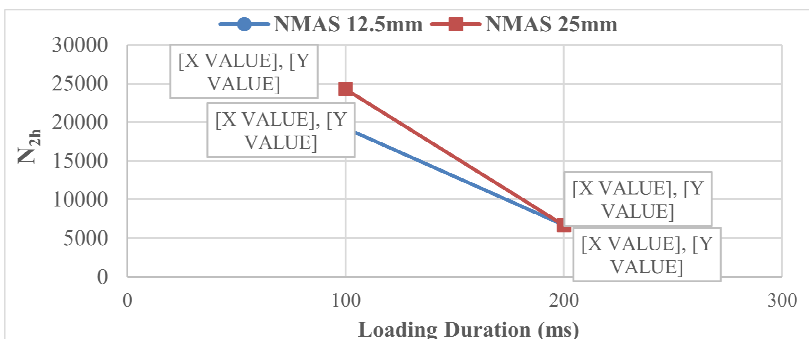
شکل ۸. نمودار N_{1v} درمقابل مدت بارگذاری



شکل ۹. نمودار N_{1h} درمقابل مدت بارگذاری



شکل ۱۰. نمودار N_{2v} درمقابل مدت بارگذاری



شکل ۱۱. نمودار N_{2h} درمقابل مدت بارگذاری

Transportation Research Board(2576), pp.83-90 .

-Elseifi, M. A., Mohammad, L. N., Ying, H., & Cooper III, S. (2012), "Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using the semi-circular bending test at intermediate temperatures". Road Materials and Pavement Design, 13(sup1), pp.124-139 .

-Li, X.-J., & Marasteanu, M. (2010), "Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete". Experimental mechanics, 50(7), pp.867-876 .

-Mansourian, A., Razmi, A., & Razavi, M. (2016). Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers. Construction and Building Materials, 117, pp.37-46.

-Mansourkhaki, A., & Sarkar, A. (2015), Plastic deformation of asphalt mixture under waveform loading. Paper presented at the Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport.

-Nsengiyumva, G., You, T., & Kim, Y.-R. (2016), "Experimental-Statistical Investigation of Testing Variables of a Semicircular Bending (SCB) Fracture Test Repeatability for Bituminous Mixtures". Journal of Testing and Evaluation, 45(5).

-Nsengiyumva, G., You, T., Kim, Y.-R., & Beran, M. (2016), "Investigation of Testing Variables of Semicircular Bending Test for Asphalt Concrete Mixtures: Experimental-Statistical Approach". Paper presented at the Transportation Research Board 95th Annual Meeting.

-Pérez-Jiménez, F., Botella, R., Moon, K.-H., & Marasteanu, M. (2013), "Effect of load application rate and temperature on the fracture energy of asphalt mixtures". Fénix and semi-circular bending tests. Construction and Building Materials, 48, pp.1067-1071 .

-Pirmohammad, S., & Ayatollahi, M. (2014), Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature

۶- پی نوشتها

1. Fatigue- cracking
2. Rutting
3. Thermal- cracking
4. Semi Circular Bending
5. Linear- Elastic Fracture Mechanics
6. Digital Image Correlation
7. Reclaimed Asphalt Pavement
8. Nominal Maximum Aggregate Size

۷- مراجع

-Ahmed, A. (2015), "Evaluation of cracking potential of Superpave mixtures with high reclaimed asphalt pavement content". Kansas State University (Thesis) .

-Aliha, M., Fazaeli, H., Aghajani, S., & Nejad, F. M. (2015), "Effect of temperature and air void on mixed mode fracture toughness of modified asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 95, pp.545-555.

-Allamy, A. K. J. (2016), "Fatigue Behavior of Modified Asphalt Concrete Pavement". Journal of Engineering, 22(2), pp.1-10 .

-Aragão, F., & Kim, Y.-R. (2012), "Mode I fracture characterization of bituminous paving mixtures at intermediate service temperatures". Experimental mechanics, 52(9), pp.1423-1434 .

-Biligiri, K. P., Said, S., & Hakim, H. (2012), "Asphalt Mixtures Crack Propagation Assessment using Semi-Circular Bending Tests". International Journal of Pavement Research and Technology, 5(4), 209-217 .

-Chong, K., & Kuruppu, M. (1984), "New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials". International Journal of Fracture, 26(2), R59-R62 .

-Cooper Jr, S. B., Cooper III, S. B., Mohammad, L. N., & Elseifi, M. A. (2016), "Development of a Predictive Model Based on an Artificial Neural Network for the Semicircular Bend Test". Transportation Research Record: Journal of the

Archive of SID

- Wang, H., Zhang, C., Li, L., You, Z., & Diab, A. (2016), "Characterization of low temperature crack resistance of crumb rubber modified asphalt mixtures using semi-circular bending tests". *Journal of Testing and Evaluation*, 44(2), pp.847-855 .
- Wang, J., Molenaar, A., van de Ven, M., & Wu, S. (2016), "Characterization of Permanent Deformation of a Dense Asphalt Mixture". Paper presented at the Transportation Research Board 95th Annual Meeting.
- Witczak, M., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M., & Von Quintus, H. (2002), nchrp report 465 simple performance test for superpave mix design. national cooperative highway research program report .
- Wu, Z., Mohammad, L. N., Wang, L., & Mull, M. A. (2005), "Fracture resistance characterization of superpave mixtures using the semi-circular bending test". *Journal of ASTM International*, 2(3), pp.1-15.
- conditions. *Construction and Building Materials*, 53, pp.235-242 .
- Saadeh, S., Hakimelahi, H., & Harvey, J. (2014), "Correlation of Semi-circular Bending and Beam Fatigue Fracture Properties of Asphalt Concrete Using Non-Contact Camera and Crosshead Movement". Paper presented at the T&DI Congress 2014: Planes, Trains, and Automobiles.
- Sarkar, A. (2016), "Combined Effect of Loading Pattern, Pulse Duration, and Stress Level on the Cyclic Creep Test of Asphalt Mixture". *Journal of materials in civil engineering*, 29(1), 04016185 .
- Van Rooijen, R., & De Bondt, A. (2008), "Crack propagation performance evaluation of asphaltic mixes using a new procedure based on cyclic semi-circular bending tests". *Pavement cracking: mechanisms, modeling, detection, testing, and case histories*, pp.437-446 .

