

## تأثیر الگوی بارگذاری بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی در آزمایش خمش نیم‌دایره

### مقاله علمی - پژوهشی

امین تیموری، دانشجوی دکتری، گروه راه و ترابری، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
علیرضا سرکار\*، استادیار، گروه راه و ترابری و حمل و نقل، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sarkar@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

صفحه ۳۲۶-۳۰۹

### چکیده

هدف اصلی این مطالعه ارزیابی تأثیر متغیرهایی مانند الگوی بارگذاری، سرعت و اثر متقابل محورها بر تعداد سیکل‌های بارگذاری مخلوط‌های آسفالتی و مقایسه تعداد سیکل‌های بارگذاری با استفاده از آزمون خمش نیم‌دایره در دو حالت برشی (II) و ترکیب برشی - خمشی (I/II) بوده است. سه الگوی بارگذاری متناظر با محورهای تکی، دوتایی و سه‌تایی با سطح اثر متقابل محورهای ۲۵٪ و ۷۵٪ فرض شده است. این تحقیق بر اساس زمان بارگذاری مربوط به سرعت‌های ۳۲ (۲۰۰ میلی ثانیه) و ۶۴ (۱۰۰ میلی ثانیه) کیلومتر بر ساعت مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج موارد زیر را نشان داد: نوع محور بر مقدار خرابی شیارشدگی رویه‌های آسفالتی تأثیر نسبتاً ناچیزی دارد، که بیشترین اثرات مربوط به الگوی بارگذاری دوتایی و در حدود ۲۰ درصد می‌باشد؛ روابط ریاضی می‌تواند جهت پیش بینی اثرات الگوی بارگذاری در حالت‌های مختلف موثر باشد و همبستگی زیادی بین تعداد سیکل بارگذاری در حالت آزمایش و حالت فرمول وجود دارد؛ کاهش سرعت منجر به افزایش مقدار ناچیز کرنش اولیه یا خرابی شیارشدگی در روسازی‌های آسفالتی می‌شود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر مدت زمان بارگذاری وسایل نقلیه بر روسازی‌ها در طول دوره‌های اولیه بهره برداری بیشتر می‌باشد؛ با کاهش فاصله بین محورهای وسیله نقلیه خرابی شیارشدگی بیشتر می‌شود. با مقایسه مقدار  $f_1$  در هر دو سطح می‌توان مشاهده کرد که این مقدار در سطح ۷۵٪ حدود ۲۵ درصد بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آزمایش خمش نیم‌دایره، مکانیک شکست، مقاطع ترک خورده، تعداد سیکل بارگذاری

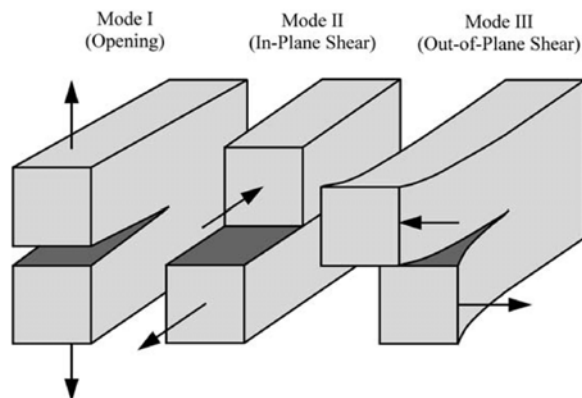
### ۱- مقدمه

خوردگی لبه و غیره. نمونه خمش نیمه دایره‌ای به صورت یکنواخت بارگذاری می‌شود تا زمانی که شکست تحت نرخ ثابت تغییر شکل در الگوی بارگذاری سه نقطه‌ای رخ دهد. بار و تغییر شکل به طور مداوم ثبت می‌شوند و برای محاسبه انرژی کرنش برای یک عمق ترک معین استفاده می‌شوند. برای محاسبه کرنش بحرانی، آزمایش در چندین عمق ترک تکرار می‌شود (ASTM D8044-16). مکانیسم ترک خوردگی خستگی را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: (۱) وقوع تنش کششی / کرنش کششی در لایه مخلوط آسفالت، و (۲) وقوع مکرر تنش / کرنش

به طور کلی، در مکانیک شکست، ترک‌های برشی در حالت II طبقه بندی می‌شوند (شکل شماره ۱). خرابی‌هایی که می‌تواند تحت تأثیر حالت II قرار گیرد عبارتند از: (۱) ترک خوردگی لبه، (۲) ترک خوردگی طولی، (۳) در روسازی ترکیبی (درزها) و غیره. هنگامی که دو یا چند حالت بارگذاری وجود دارد، برای حالت‌های تنش دو بعدی، ممکن است فرض شود که انتشار ترک تحت حالت ترکیبی حالت I (باز شدن) و حالت II (لغزش) صورت می‌گیرد. خرابی‌هایی که می‌تواند تحت تأثیر حالت ترکیبی ایجاد شوند عبارتند از: (۱) ترک‌های خستگی، (۲) ترک

خستگی می‌شوند می‌توانند به دلیل وجود لایه نسبتاً نازک یا ضعیف مخلوط آسفالت، بار یا فشار بسیار زیاد لاستیک، و یا زیرسازی، اساس و زیراساس نسبتاً ضعیف، به دلیل تراکم ناکافی رخ دهد (Mallick & El-Korchi, 2008).

کششی تحت تکرارهای ترافیکی. وقوع تنش/کرنش کششی ناشی از رفتار الاستیک سازه روسازی تحت بار ترافیکی است، در حالی که شروع و تشکیل ترک‌ها ناشی از رفتار «خستگی» لایه است. تنش/کرنش‌های کششی بالا که باعث ایجاد ترک‌های



شکل ۱. مدهای شکست (Janssen, Jan, & Russell, 2004)

شد. ۲۹ مورد از این مخلوط‌ها، الزامات سنگدانه و مشخصات حجمی برای ساخت روسازی فرودگاه را برآورده کردند؛ پنج مخلوط باقی مانده با درصد بیش از حد ماسه طبیعی (۳۰٪) به عنوان مخلوط‌های حساس به شیارشدگی بیان شدند (Rushing & Little, 2014).

یک مطالعه بر تغییرپذیری آزمون خمش نیم دایره، با در نظر گرفتن چندین فاکتور، از جمله درجه بندی مخلوط، شکل سنگدانه، فضای خالی و نوع سنگدانه (گرانیت، سنگ آهک سخت و سنگ آهک نرم) صورت گرفت. در مجموع ۱۰۰ نمونه برای هر ترکیب مخلوط تولید شد. اثر رابط با ایجاد ۵۰ مورد برای هر مخلوط با برخی از انواع دانه‌های خاص مورد مطالعه قرار گرفت. تولید سنگدانه‌ها و حفره‌های هوا در ساختار داخلی به صورت تصادفی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شروع ترک‌ها و انتشار آن‌ها از طریق نمونه به محل سنگدانه‌ها و حفره‌های هوا در نمونه مربوط می‌شود (Saadeh, Renteria, Mahmoud, & Eljairi, 2018).

تغییرات مشخصات بتن آسفالتی (مانند نوع قیر، جنس مصالح، نوع دانه بندی و درصد فضای خالی) تأثیر زیادی در رفتار ترک خوردگی آنها دارد. از آنجا که اصلی‌ترین خرابی رویه آسفالتی (ایجاد ترک‌های انعکاسی) تحت بارگذاری حالت ترکیبی کشش-برش ناشی از عبور وسائط نقلیه است. بدین منظور، علیها و همکاران (۲۰۱۵)، از آزمایش خمش نیم دایره با

نتایج همچنین نشان می‌دهد که مقدار ۰,۵ برای ضریب C تعادل خوبی را برای انتخاب دامنه داده‌های مورد استفاده برای برازش مدل پیشنهادی فراهم می‌کند.

نویسندگان بر این باورند که با این مقدار بسیار محتمل است که انتقال بین مراحل تغییر شکل ثانویه و ثالثی دقیقاً تخمین زده شود، در حالی که در عین حال از استفاده از داده‌هایی که برای اهداف تعیین تعداد جریان مربوط نیستند، یعنی داده‌های اولیه اجتناب می‌شود (Archilla, Diaz, & Carpenter, 2007). ژو و همکاران در آزمایشی رابطه بین تعداد تکرار بارگذاری و تغییر شکل دائمی (شامل سه مرحله متمایز، یعنی مراحل اولیه، ثانویه و سوم) مخلوط‌های آسفالتی را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که رفتار تغییر شکل دائمی سه مرحله‌ای یک ویژگی اساسی مواد است و برای مدل سازی جامع رفتار لایه آسفالت، لازم است مدلی ایجاد شود که به طور دقیق این رفتار را مشخص کند. بنابراین، یک مدل سه مرحله ای جدید برای توصیف هر سه مرحله پیشنهاد دادند (Zhou, Scullion, & Sun, 2004). در مقاله دیگر راشینگ و همکاران نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی را برای شناسایی یک عملکرد برای پذیرش مخلوط‌های آسفالت گرم برای ساخت روسازی‌های فرودگاهی طراحی شده برای ترافیک فشار بالای تایر ارائه کردند. آزمایش‌های عملکردی در نظر گرفته شده برای نشان دادن حساسیت شیارشدگی روی ۳۴ مخلوط آسفالتی انجام

با مشخص کردن نرخ رشد ترک، دشوارترین کار اندازه گیری طول ترک در طول آزمایش است. یک همبستگی تصویری دیجیتال برای ردیابی انتشار ترک در طول آزمایش استفاده شد، که برای ایجاد یک منحنی همبستگی با اندازه گیری های مربوط به بازشدگی دهانه ترک (CMOD) استفاده شد (Zhang, Han, Kim, Sakhaeifar, Little, Bhasin, 2018). بعدها، هانگ و همکاران (۲۰۰۵)، دو آزمایش کشش غیرمستقیم و خمش نیم دایره را در مخلوط های آسفالتی با هم مقایسه کردند. نتایج نشان داد که با توجه به تغییر شکل های دائمی تحت بارگذاری مرحله ای، برای ارزیابی خصوصیات کششی در مخلوط داغ آسفالتی، آزمایش خمش نیم دایره از آزمایش کشش غیرمستقیم مناسب تر است. در تحقیق بیان شده، مقایسه بین نتایج آزمایش خمش نیم دایره و آزمون کشش غیرمستقیم در توصیف مقاومت کششی مخلوط های آسفالت گرم ارائه گردید. آزمایش خمش نیم دایره می تواند به طور قابل توجهی تغییر شکل دائمی ناشی از بارگذاری را کاهش دهد و بنابراین آزمایش کشش غیرمستقیم مناسب تر برای ارزیابی خواص کششی مخلوط های آسفالت گرم است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که آزمون های خمش نیم دایره و کشش غیر مستقیم کاملاً قابل مقایسه و قابل تبدیل هستند (Huang, Shu, & Tang, 2005). در مطالعه ای، سون و همکاران (۲۰۱۸)، آزمایش های تجربی و شبیه سازی های ناهمگن را برای تجزیه و تحلیل خواص شکست، نیروی کششی داخلی، و انتشار ترک بتن آسفالتی در سه حالت بارگذاری شکست (شکستگی حالت I، شکست حالت II، و شکست مخلوط حالت I و II) و در چهار درجه حرارت (۱۵-، ۶-، ۰ و ۱۰ درجه سانتی گراد) انجام دادند. حالت بارگذاری شکست و دما تأثیر قابل توجهی بر خواص شکست، نیروی کششی داخلی و انتشار ترک دارد. نتایج نشان می دهد که (۱) چقرمگی شکست در شکست در حالت مخلوط I و II کمترین است، در حالی که سرعت ترک در شکست حالت I سریعترین است. (۲) مسیر ترک بتن آسفالت تحت شرایط بارگذاری برشی پیچیده تر است. (۳) روند انتشار ترک های اصلی در ۱۵- و ۶- درجه سانتی گراد مشابه است و مستقیماً از سنگدانه ها و ماستیک ها عبور می کند. (۴) اگرچه ترک اصلی در دمای ۰ درجه سانتیگراد هنوز از سنگدانه عبور می کند، اما تمایل دارد از لبه سنگدانه عبور کند و از رابط سنگدانه/ماستیک عبور کند. (۵) انحراف ترک اصلی زمانی اتفاق می افتد که مسیر

ترک لبه ای استفاده کردند. دو جنس مصالح سنگی، دو نوع دانه بندی و دو نوع قیر که معمولاً در روسازی راه های ایران استفاده می شود، در ساخت نمونه های ۷۰ و ۹۰ دور چرخش، آزمایشگاهی به کار گرفته شد. علیها و همکاران (۲۰۱۵)، بیان کردند که: (۱) افزایش درصد فضای خالی، چقرمگی شکست را کاهش می دهد؛ (۲) افزایش اندازه بزرگترین سنگدانه چقرمگی شکست را افزایش می دهد؛ (۳) مصالح سنگی سیلیکایی در برابر ترک خوردگی مقاومت کمتری نسبت به مصالح سنگی آهکی دارند؛ (۴) قیر نرم تر چقرمگی شکست بالاتری دارد (Aliha, Behbahani, Fazaeli, & Rezaifar, 2015).

چینگ مای اظهار داشت که انرژی شکست با استفاده از قیر نرم تر یا قیر بیشتر، افزایش می یابد. چینگ مای با هدف بررسی روابط بالقوه بین پارامترهای خستگی و شکستگی به دست آمده از تست های آزمایشگاهی استاندارد، مطالعه ای انجام داد. یک آزمایش تیر خمشی برای به دست آوردن دو پارامتر خستگی، که شامل یک معیار خستگی سستی بر اساس تنش یا کرنش برای یافتن تعداد چرخه های شکست و یک معیار خستگی جدید بر اساس رویکرد انرژی به نام مقدار فلاتی است، استفاده شد (Na Chiangmai, 2010).

همچنین، لی و ماراستئانو (2010)، نشان دادند که هندسه نمونه آزمایشگاهی ممکن است اثر قابل ملاحظه ای بر روی نتایج شکست داشته باشد. برای مثال آن ها گزارش کردند که اثر میزان فضای خالی بر روی مقاومت شکست نمونه های مخلوط های آسفالتی آزمایش شده با آزمایش خمش نیم دایره بسیار بیشتر از مقاومت شکستی است که با مواد مشابه با نمونه های آزمایش کشش دیسک متراکم صورت گرفته است. آزمایش تیر خمشی مستطیلی با ترک لبه ای (بارگذاری سه نقطه ای یا چهار نقطه ای) با آزمایش کشش غیرمستقیم اصلاح شد (Li & Marasteanu, 2010).

آزمون خمش نیم دایره سیکلی ضریب تغییرات کمتری نسبت به سایر آزمون های خستگی معمول نشان داد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸). مشخص کردند انتشار ترک مخلوط های آسفالتی برای بهینه سازی طراحی مخلوط و پیش بینی عملکرد ترک خوردگی روسازی های آسفالتی مفید است. در تحقیقی یک روش جدید مبتنی بر آزمون خمش نیم دایره چرخه ای برای مشخص کردن نرخ رشد ترک و ارزیابی مقاومت ترک خوردگی ناشی از خستگی مخلوط های آسفالتی صورت پذیرفت.

کمترین مقاومت در اطراف یک سنگدانه نسبتاً قوی باشد و در امتداد سطح مشترک سنگدانه/ماستیک در دمای ۱۰ درجه سانتیگراد باشد. و (۶) حداکثر نیروی کششی داخلی و تعداد تماس‌های شکست خورده به ترتیب با چقرمگی شکست ترک مطابقت دارند (Sun, Ren, & Zhang, 2018). در پروژه ای دیگر، لو و همکاران (۲۰۱۴) شکست بتن آسفالتی با حالت ترکیبی I-II با استفاده از نمونه‌های دیسک شورون نیم دایره (SCCD) بررسی کردند. شبیه سازی عددی با استفاده از FRANC2D برای تجزیه و تحلیل نتایج تجربی انجام شد. مشخص شد که زاویه شروع ترک ( $\theta$ ) تابعی از زاویه شیب ترک ( $\beta$ ) است. موقعیت شروع ترک وقتی تغییر می‌کند که  $\beta \geq 30$  درجه باشد زیرا تنش کششی و تنش برشی منجر به شروع ترک در امتداد سمت بالایی شکاف شکافی گسترش می‌یابد. بنابراین، بارگذاری شکست با افزایش شیب زاویه ترک افزایش می‌یابد (Luo, Erarslan, & Mu, 2014).

یکی دیگر از عواملی که می‌تواند که بر نتایج مربوط به آزمایشات مربوط به شکست مخلوط‌های آسفالتی اثر گذار باشد، خصوصیات بار اعمالی بر نمونه‌ها می‌باشد.

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه تحلیل ارتعاشی روسازی آسفالتی و تاثیر مشخصات بارگذاری بر خستگی و شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است و بیانگر تاثیر این پارامتر بر رفتار روسازی‌های آسفالتی می‌باشد (Fadaei & Sarkar, 2018; Khademzadeh & Sarkar, 2024; Khademzadeh & Sarkar, 2025; Mansourkhaki & Sarkar, 2015a; Mansourkhaki, Yeganeh & Sarkar, 2015b; Mansourkhaki & Sarkar, 2014; Mansourkhaki, Sarkar, & Ameri, 2015; Sarkar, 2016; Sarkar, 2017; Zarei et al 2022a; ; Zarei et al 2022b). لذا براساس مطالعات فوق اهداف این پژوهش

در ادامه تعریف و مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-هدف و دامنه تحقیق

هدف اصلی این مطالعه ارزیابی تأثیر متغیرهایی مانند الگوی بارگذاری، سرعت و اثر متقابل محورها بر تعداد سیکل‌های بارگذاری مخلوط‌های آسفالتی و مقایسه تعداد سیکل‌های بارگذاری با استفاده از روابط شناخته شده مختلف، با استفاده از آزمون خمش نیم‌دایره در دو حالت برشی (II) و ترکیب برشی-خمشی (I/II) بوده است. یکی دیگر از اهداف مهم در این تحقیق، تحلیل تعداد سیکل‌های بارگذاری تا شکست نمونه بر روی مقاطع ترک خورده است.

### ۲-۱-تعداد سیکل منجر به شکست ( $N_f$ )

مفهوم خرابی تجمعی ماینر (۱۹۴۵) به طور گسترده ای برای پیش بینی ترک خوردگی ناشی از خستگی استفاده شده است. به طور کلی توافق بر این است که تعداد مجاز تکرار بار مربوط به کرنش کششی در پایین لایه آسفالتی اتفاق می‌افتد. میزان خرابی به صورت نسبت خرابی ناشی از تعداد تکرارهای بار پیش‌بینی شده و مجاز بیان می‌شود. تفاوت عمده در روش‌های مختلف طراحی، توابع انتقال است که کرنش‌های کششی مخلوط آسفالت گرم را به تعداد مجاز تکرار بار مرتبط می‌کند. در روش‌های طراحی شل و موسسه آسفالت، تعداد مجاز تکرار بار  $N_f$  برای ایجاد ترک‌های خستگی به کرنش کششی  $\epsilon_t$  در زیر لایه آسفالتی و به مدول الاستیسیته مخلوط و همچنین ضرایب ثابتی که از آزمایش‌های خستگی در آزمایشگاه یا در محل به دست می‌آیند ( $f_1, f_2, f_3$ )، مطابق رابطه (۱) مربوط می‌شود.

$$N_f = f_1(\epsilon_t)^{-f_2}(E_1)^{-f_3} \quad (1)$$

برای مخلوط استاندارد مورد استفاده در طراحی، معادله موسسه آسفالت برای نمونه با ۲۰ درصد ترک خوردگی مطابق رابطه (۲) است.

$$N_f = 0.0796(\epsilon_t)^{-3.291}(E_1)^{-0.854} \quad (2)$$

و معادله شل مطابق رابطه (۳) می‌باشد.

$$N_f = 0.0685(\varepsilon_t)^{-5.671}(E_1)^{-2.363} \quad (3)$$

از آنجا که  $f_2$  بسیار بزرگتر از  $f_3$  است، تأثیر  $\varepsilon_t$  بر  $N_f$  بسیار بیشتر از  $E_1$  است. بنابراین، می‌توان از  $E_1$  صرف نظر کرد.

$$N_f = f_1(\varepsilon_t)^{-f_2} \quad (4)$$

منجر به شکست روسازی، توسعه داده شده است. این مدل با بارگذاری محوری مطابق رابطه (۵) توسعه یافته است (Das & Pandey, 1999).

$$N_f = 1.001 * 10^{-1}(\varepsilon_t)^{-3.565}(M_R)^{-1.4747} \quad (5)$$

حسین و وو یک معادله رگرسیونی برای همه انواع مقاطع روسازی در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در گزارش "تخمین عمر روسازی آسفالت" ارائه کردند (Hossain & Zhong, 2002).

$$\ln(N_f) = a - b\ln(\varepsilon_r) - c\ln(E_{AC}) \quad (6)$$

تفاوت معادلات (۶) و (۱) در شکل ریاضی آنهاست. معادله (۱) از تابع توان و معادله (۶) از تابع لگاریتم طبیعی استفاده می‌کند. پارک و کیم با ارزیابی داده‌های آزمون FWD مطابق با رابطه (۷) مدلی ارائه کردند (Park & Kim, 2003).

$$N_f = K(\varepsilon_t)^{-C} \quad (7)$$

(معادله ۱) متفاوت است. آنها از شاخص‌های دیگری به عنوان ورودی مدل‌های خود استفاده کردند. شکل ریاضی مدل‌های آنها نیز با مدل‌های هوانگ متفاوت است. در سال ۱۹۸۶، اسمیت از تکنیک منحنی S شکل و شاخص وضعیت روسازی برای مدلسازی عمر خدمت‌دهی باقیمانده روسازی در پایان نامه دکترای خود استفاده کرد (Smith, 1986).

$$PCI = 100 - (\rho \div (\beta \times (\ln(\alpha) - \ln(\text{age})))) \quad (8)$$

شاخص بین‌المللی ناهمواری و همچنین «سن فعلی» روسازی ارائه کردند. این مدل را می‌توان در رابطه (۹) مشاهده کرد (Al-Suleiman & Adnan, 2003).

داس و پندی مدل طراحی مکانیکی را گزارش کردند. این مدل با همبستگی داده‌های عملکردی از روسازی‌های بتن آسفالتی جاده‌های مختلف در هند با عوامل بحرانی تنش-کرنش

که در آن  $N_f$  تکرارهای استاندارد تجمعی محور برای ایجاد ۲۵٪ ترک سطحی، به دلیل خستگی در روسازی موجود است و  $M_R$  مدول برجهنگی است. این مدل شبیه مدل هوانگ است با این تفاوت که  $E_1$  با  $M_R$  جایگزین شده است. همچنین

که در آن  $N_f$  تعداد سیکل بارگذاری در روسازی است،  $E_r$  کرنش کششی افقی زیر لایه آسفالت، EAC مدول لایه آسفالت و  $a$ ،  $b$  و  $c$  ضرایب رگرسیون ثابت هستند. مبنای معادله (۶) مشابه معادله (۱) است (ورودی‌های مدل‌ها یکسان است).

که در آن  $N_f$  تعداد تکرارهای محور استاندارد برای ایجاد شکست خستگی است،  $E_t$  کرنش کششی در پایین لایه آسفالت و  $K$  و  $C$  ضرایب رگرسیون هستند. این مدل مشابه مدل جامع هوانگ است با این تفاوت که  $E_1$  از مدل حذف شده است. برخی از مدل‌های ارائه شده توسط محققین حال حاضر برای تعیین عمر خدمت‌دهی باقیمانده با مدل‌های جامع هوانگ

که در آن "age" عمر خدمت‌دهی باقیمانده روسازی است و  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\rho$  ضرایب ثابتی هستند که به شرایط منحنی و روسازی مربوط می‌شوند. ترکی و عدنان مدلی را بر اساس

$$IRI = \frac{\text{Ln}\left(\frac{IRI_{terminal}}{a}\right)}{b} - \text{Current age} \quad (9)$$

است. صالح مدلی را برای تعیین عمر خدمت دهی باقیمانده بر اساس پارامترهای انحنای سطح روسازی ( $\delta$ ) و مساحت زیر پروفیل روسازی (AUPP) ارائه کرد که در معادلات (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است (Saleh, 2016).

$$N_f = \alpha \left( \frac{1}{2.3 \times 10^{-3} \times \delta + 2 \times 10^{-5}} \right)^\beta \quad (10)$$

$$N_f = \alpha \left( \frac{1}{2.3 \times 10^{-6} \times AUPP^{0.912}} \right)^\beta \quad (11)$$

(D200) به دست می‌آید. اساس معادلات (۱۰) و (۱۱) و معادله (۷) یکسان است با این تفاوت که در معادلات (۱۰) و (۱۱) Et با نتایج تحقیق صالح جایگزین شده است.

که  $IRI_{terminal}$  شاخص بین‌المللی ناهمواری انتهایی روسازی است (mm/m یا m/km)، «سن فعلی» سن بخشی از روسازی است که از زمان ساخت اولیه یا آخرین روکش (سالانه) محاسبه شده است.  $a$  شاخص بین‌المللی ناهمواری اولیه (در جایی که سن صفر است) می‌باشد و  $b$  انحنای خط عملکرد

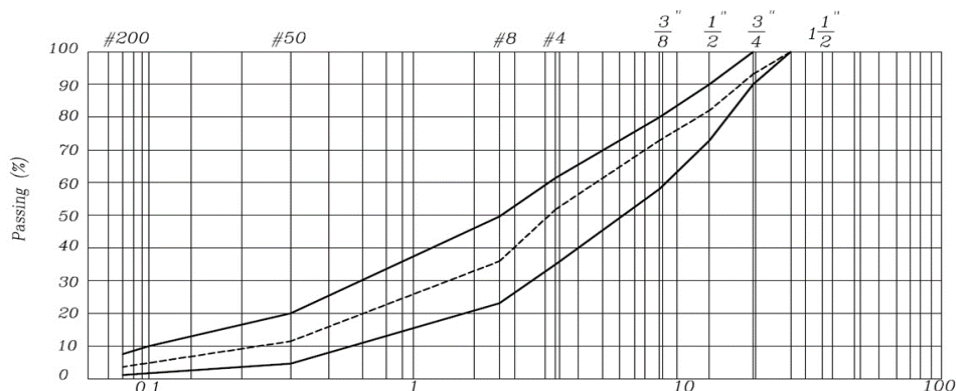
که در آن  $N_f$  تعداد تکرارهای بار محور تا شکست خستگی است. ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت مواد هستند،  $\delta$  ضریب انحنای سطح روسازی است که از تفاضل FWD (D0 -

### ۳- مشخصات مصالح مصرفی

#### ۳-۱- دانه بندی سنگدانه

تعیین گردید. ویژگی‌های قیر AC 60/70 مورد استفاده در طرح اختلاط به شرح زیر است: درجه نفوذ ( $25^\circ\text{C}$ ،  $50/7$  وزن  $100 \text{ gr}$ ،  $5 \text{ sec}$ ) =  $66$ ، نقطه نرمی =  $50/7$ ، وزن مخصوص ( $25^\circ\text{C}$ ) =  $1/017$ ، خاصیت انگمی ( $25^\circ\text{C}$ ،  $5 \text{ cm/min}$ ) =  $100+$  و نقطه اشتعال (کلیولند) =  $295$ .

منحنی دانه بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در مخلوط در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. برای تهیه مخلوط آسفالتی، یک نوع سنگدانه در نظر گرفته شد. دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر اساس استاندارد AASHTO-T27 انجام شد. در این مطالعه از قیر با درجه نفوذ  $60/70$  (AC 60/70) استفاده شد. مقدار قیر بهینه  $5/1$ ٪ (وزنی) برای مخلوط‌های مورد مطالعه



شکل ۲. دانه بندی سنگدانه مصرفی

### ۲-۳- ساخت نمونه‌ها

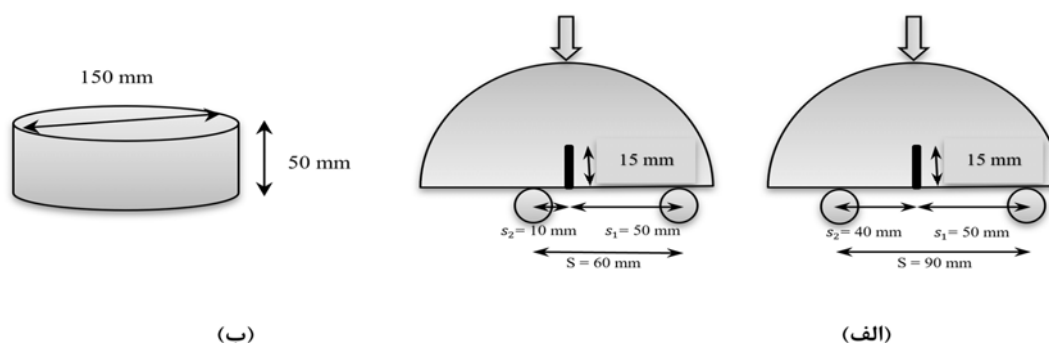
استوانه را با استفاده از دستگاه اره الماسی دوار برش دادند تا نمونه‌های دایره ای با ارتفاع تقریبی ۵۰ میلی متر بدست آید. نمونه‌های نیم دایره‌ای به ضخامت ۵۰ میلی متر تهیه گردید (شکل ۳).

بر اساس استاندارد ASTM D6925، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر با استفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری ساخته شدند. درصد فضای خالی مورد نظر ۴ درصد (حجمی) و قیر بهینه ۵٫۱ درصد (وزنی) تعیین گردید. سپس



شکل ۳. نمونه‌های بتن آسفالتی مورد استفاده در آزمایش SCB

پس از تعیین موقعیت ترک در نمونه‌های آزمایش خمش نیم دایره، یک ترک به طول ۱۵ میلی‌متر در لبه میانی نمونه توسط تیغه‌های چرخشی به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر ایجاد شد (شکل ۴).



شکل ۴. آزمایش خمش نیم دایره (الف) مودهای آزمایش، (ب) ابعاد نمونه استوانه‌ای

### ۴- روش انجام آزمایش

مکانیک شکست را در نظر می‌گیرد (ASTM D8044-16) در این آزمایش از دستگاه UTM-12 V2.01 تحت بارگذاری با تنش ثابت استفاده شد.

آزمون خمش نیم دایره در این مطالعه در دو شکل مطابق استاندارد ASTM D8044-16 انجام شد: آزمایش براساس تغییر شکل‌های عمودی و افقی این روش آزمایش، رابطه الاستو-پلاستیک/ویسکوالاستیک مخلوط آسفالت و مفهوم

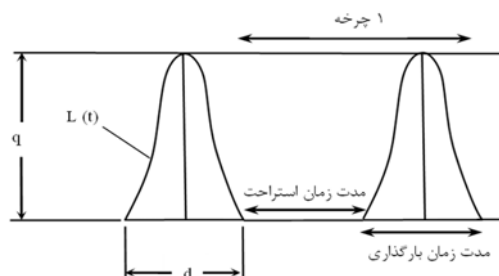
شرایط واقعی بارگذاری در سطح جاده از متغیرهای الگوی بارگذاری، سرعت و اثر متقابل محورها استفاده شده است. سه الگوی بارگذاری متناسب با محورهای تک، دوتایی و سه تایی خودروهای سنگین در نظر گرفته شد. بارگذاری چرخه‌ای بر روی نمونه‌ها شامل یک دوره بارگذاری (محورهای تک، دوتایی و سه تایی) و یک دوره استراحت بود. روش مورد استفاده در نرم افزار KENLAYER برای شبیه سازی طبقه بندی محورهای خودرو استفاده شد. در این روش برای شبیه سازی زمان بارگذاری واقعی از رابطه زیر استفاده شد (Huang Y. H., 2004).

$$L(t) = q \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d}\right) \quad (12)$$

لحاظ گردد، هنگامی که بار در فاصله قابل توجهی از یک نقطه مشخص یا  $t = \pm d/2$  قرار دارد، بار در آن نقطه صفر است (شکل ۵).

همچنین آزمایش تحت حالت ترکیبی خمش - برش (I/II) و حالت برش خالص (II) مورد بررسی قرار گرفت. برای هر نمونه دو تکرار مورد آزمایش قرار گرفت و بهترین نتیجه گزارش شد و از بارگذاری چرخه ای با شکل موج نیمه سینوسی استفاده شد. برای اندازه گیری تغییر شکل های افقی، سنسور بازشدگی دهانه ترک (LVDTs) به دو طرف نمونه‌ها متصل شدند. آزمایش با اعمال بارگذاری یکنواخت و مکرر بر روی نمونه‌هایی که تکیه گاه آن‌ها بر روی دو میله (S1 و S2) بود، در حالت I/II (یعنی  $s1=50$  میلی‌متر،  $s2=40$  میلی‌متر) و حالت II (یعنی  $s1=50$  میلی‌متر،  $s2=10$  میلی‌متر) انجام شد (شکل ۱). در این مقاله برای شبیه سازی

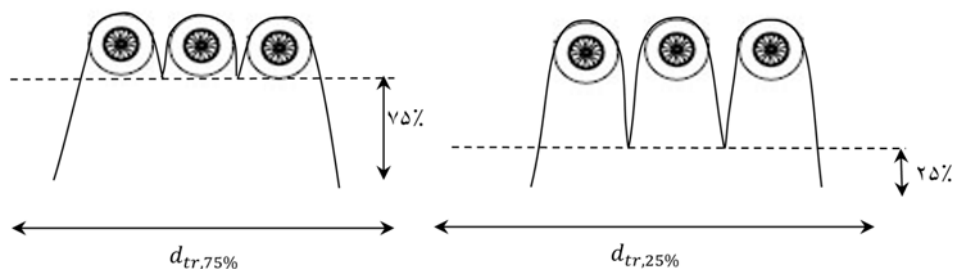
که  $d$  مدت زمان بارگذاری می‌باشد (مدت زمان بارگذاری = سرعت خودرو/  $2*6a$ ). مدت زمان بار به سرعت خودرو ( $s$ ) و شعاع تماس لاستیک با سطح روسازی ( $a$ ) بستگی دارد،  $q$  شدت بار است (زمانی که بار مستقیماً از نقطه اعمال بار



شکل ۵. الگوی بارگذاری مورد استفاده در آزمایش

و ۲۰۰ میلی‌ثانیه تعیین گردید. با این فرض که طبقه‌بندی محورهای مرکب از چندین محور تک تشکیل شده است، یک چرخه بارگذاری را می‌توان برای محورهای دوتایی و سه تایی نیز محاسبه کرد. برای شکل بارگذاری دوتایی و سه تایی، از دو سطح اثر متقابل محورها (متناظر با فاصله محوری یا ضخامت لایه) استفاده شد (شکل ۶).

هرچه فاصله بین محورها در کامیون‌های با محور مرکب زیاد شود، در منحنی بارگذاری نیمه سینوسی نقطه شروع تکرار بارگذاری تا محدوده بیشتری پایین می‌آید. اثر متقابل محورها در محورهای دوتایی و سه تایی ۷۵٪ و ۲۵٪ موج بارگذاری نیمه سینوسی در نظر گرفته شد و بر اساس سرعت‌های ۳۲ و ۶۴ کیلومتر بر ساعت، زمان متناظر بارگذاری ۱۰۰ میلی‌ثانیه

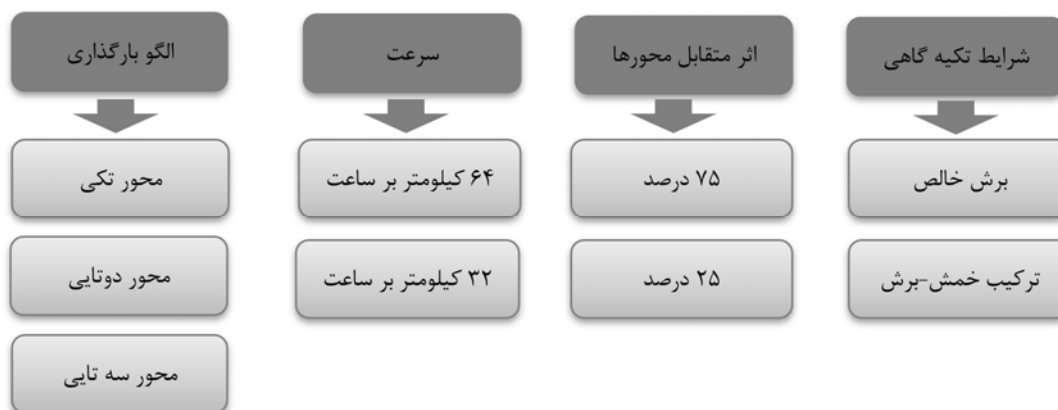


شکل ۶. الگوی بارگذاری و اثر متقابل محورها در محور سه تایی

منفرد با یک سیکل بارگذاری ۱۰۰ میلی‌ثانیه (متناظر با سرعت ۶۴ کیلومتر بر ساعت) و ۲۰۰ میلی‌ثانیه (متناظر با سرعت ۳۲ کیلومتر بر ساعت)، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Huang Y. H., 2004).

$$d_{\text{محور منفرد}} = \frac{2 * 6a}{s}$$

(شکل ۷)، در حالت ترکیبی خمش-برش (حالت I/II) و حالت برش خالص (II) انجام شد. بنابراین در این تحقیق از ۳ الگوی بارگذاری، ۲ سرعت، ۲ سطح اثر متقابل محورها و ۲ شرایط تکیه گاهی مختلف استفاده شد. لازم به توضیح است که تمامی این آزمایشات در دو تکرار نیز انجام شده است. تعداد متغیرها به شرح زیر است.



شکل ۷. متغیرهای مورد بررسی در آزمایش

طراحی در یک سیستم مدیریت روسازی کلی از گذشته تاکنون مورد بحث است. در بحث ترافیک و بارگذاری مهم‌ترین متغیرها شامل بار محوری، تعداد تکرار بارگذاری و باربرداری، مساحت تماس تایر و سرعت خودرو می‌باشد. بخش‌های زیر نتایج

رفتار ویسکوالاستیک قیر وابسته به زمان بارگذاری و زمان بارگذاری نیز تابعی از سرعت عبور خودروها می‌باشد. لذا در این تحقیق نیز سرعت‌های عبوری به عنوان یکی از متغیرهای تاثیر گذار مورد بررسی قرار گرفت. سرعت جابجایی یک محور

(۱۳)

مدت زمان بارگذاری ( $d$ ) به سرعت خودرو ( $s$ ) و شعاع تماس لاستیک ( $a$ ) بستگی دارد. یک فرض منطقی است که بار در فاصله  $6a$  عملاً هیچ تاثیری ندارد. در این مطالعه با فرض مقادیر اینچ  $a=6$  و  $d=0.1$  ثانیه؛  $s=64$  کیلومتر بر ساعت، و  $d=0.2$  ثانیه؛  $s=32$  کیلومتر بر ساعت الگوهای بارگذاری تعیین گردید. آزمون تحت شرایط مختلف تکیه‌گاهی

### نتایج آزمون و تجزیه و تحلیل داده‌ها

عوامل مهمی مانند ترافیک و بارگذاری، عوامل محیطی، مصالح مورد استفاده در روسازی و معیارهای خرابی و شکست طراحی روسازی‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. عواملی که در هر دسته باید در نظر گرفته شوند و همچنین چگونگی تناسب فرآیند

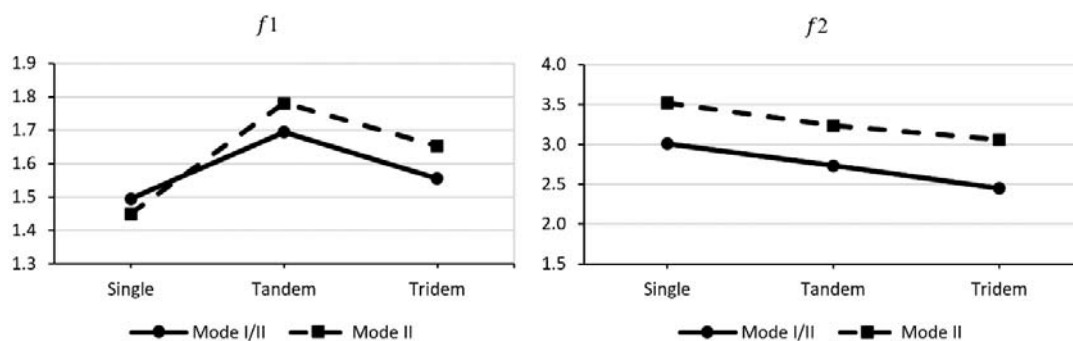
بارگذاری، سرعت و اثر متقابل محورها بود. به منظور دقت بالا در نتایج برای هر نوع شرایط آزمایش، در مجموع از دو تکرار در هر سناریو استفاده شد. همچنین کرنش‌ها بر حسب میلی متر و با نصب یک کرنش سنج بر روی نمونه با توجه به دستورالعمل‌های استاندارد ASTM D8044-16 از آزمایش خمش نیم دایره استخراج گردید که ملاک محاسبه تعداد سیکل بارگذاری قرار گرفته است.

به دست آمده از هر شرایط آزمایش را شرح می‌دهد که سعی شده است برخی از متغیرهای مهم در بحث طراحی روسازی راه مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج آزمایش خمش نیم دایره برای همه مخلوط‌های انجام شده در دو حالت برش خالص (II) و حالت ترکیبی خمش - برش (I/II) ارائه شده است. تجزیه و تحلیل برای ارزیابی اثر شرایط مختلف آزمایشگاهی بر تعداد سیکل بارگذاری ( $N_f$ ) انجام شد. شرایط آزمایش شامل الگوی

#### تاثیر الگوی بارگذاری بر تعداد سیکل بارگذاری

راهداری مورد اهمیت قرار گیرد. در رابطه با ضریب  $f_2$  می‌توان بیان کرد که تاثیر الگوی بارگذاری بر این ضریب که متناظر با خرابی خستگی در نمونه‌های ترک‌خورده است (متناظر با شیب منحنی کرنش - زمان) و با بررسی روند آن در سه الگوی بارگذاری می‌توان دریافت که اثرات نوع محور بر میزان  $f_2$  قابل چشم پوشی است و همچنین این ضریب به تغییر مود انجام آزمایش نیز وابسته نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوهای بارگذاری متناظر با انواع محورهای مرکب به خصوص در دوره‌های اولیه عمر روسازی باید مدنظر قرار گیرد و تغییر تعداد محورها بر انواع خرابی روسازی مانند خستگی و شیارشدگی تاثیر گذار می‌باشد.

افزایش تعداد محورها کرنش‌های کششی و فشاری بحرانی روسازی زیر انواع محورها (منفرد و مرکب) را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نمودارهای ضرایب رگرسیونی  $f_1$  و  $f_2$  در دو حالت مود ترکیبی و مود برش خالص نشان می‌دهند که نوع محور بر مقدار خرابی شیارشدگی رویه‌های آسفالتی که متناظر با ضرایب رگرسیونی  $f_1$  می‌باشند. تاثیر نسبتاً ناچیزی دارد (شکل ۸)، که بیشترین اثرات مربوط به الگوی بارگذاری دوتایی و در حدود ۲۰ درصد می‌باشد، که می‌توان نتیجه گرفت که محورهای مرکب دوتایی تاثیرات مخرب‌تری نسبت به خودروهای با محورهای سه تایی دارند. همچنین این موضوع باید در بحث تعمیر و نگهداری کوتاه مدت توسط اداره‌های



شکل ۸. اثر الگوی بارگذاری بر پارامترهای رابطه خرابی

کرد. این روابط برای مودهای بارگذاری به جهت دقت بیشتر و نزدیک بودن به شرایط واقعی به صورت مجزا توسعه داده شده است.

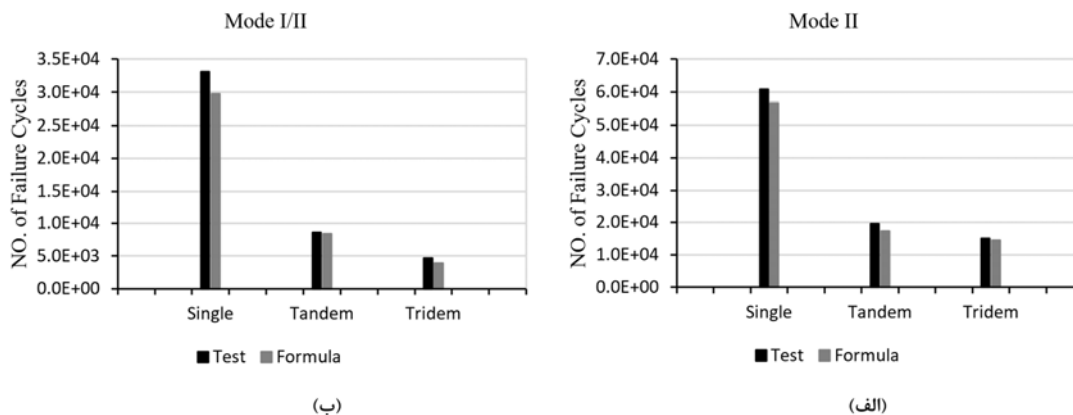
برای محاسبه تعداد سیکل بارگذاری تا شکست برای پیش بینی قبل از انجام آزمایش و زمانی که داده‌های آزمایشگاهی و محلی در دسترس نیست می‌توان از رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ استفاده

$$N_{f_{I/II}} = 1.5813(\epsilon_t)^{-2.7288} \quad (14)$$

$$N_{f_{II}} = 1.6277(\epsilon_t)^{-3.2721} \quad (15)$$

بارگذاری محاسبه شده براساس آزمایش و از روابط ارائه شده وجود دارد که بیانگر صحت معادلات ارائه شده قبلی می باشد (شکل ۹). اما این نتیجه نمی تواند به منزله کفایت کامل این روابط در پیش بینی خرابی ها باشد و بهتر است که روابط دیگری پیشنهاد گردد.

در شکل ۸ تعداد سیکل بارگذاری تا شکست براساس نتایج آزمایش و رابطه های پیشنهادی ترسیم گردیده است. با مشاهده به نمودارها می توان بیان کرد که این روابط ریاضی می توانند جهت پیش بینی اثرات الگوی بارگذاری در حالت های مختلف مورد استفاده قرار گیرند و همبستگی مناسبی بین تعداد سیکل

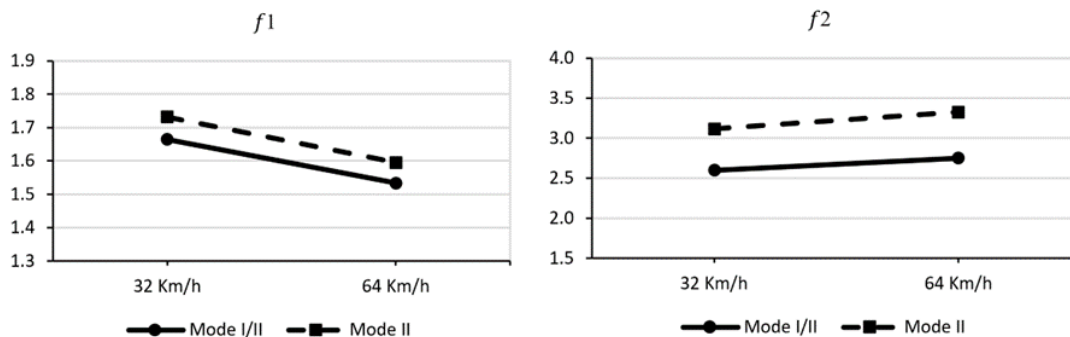


شکل ۹. مقایسه اثر الگوی بارگذاری بر تعداد سیکل منجر به شکست در آزمایش و پیش بینی شده از رابطه خرابی؛ (الف) حالت برش خالص (II)، (ب) حالت ترکیبی (I/II)

### تأثیر سرعت بر تعداد سیکل بارگذاری

برای دو آزمایش یکسان می باشد. کاهش سرعت که برابر با افزایش مدت زمان بارگذاری می باشد منجر به افزایش مقدار ناچیز کرنش اولیه یا خرابی شیارشدگی در روسازی های آسفالتی می شود (شکل ۱۰). این تغییر سرعت در مورد خرابی های بلند مدت در روسازی نیز بی تأثیر است، بنابراین می توان بیان نمود که تأثیر مدت زمان بارگذاری و وسایل نقلیه بر روسازی ها در طول دوره های اولیه بهره برداری بیشتر می باشد ولی قابل چشم پوشی است.

یکی دیگر از عوامل مرتبط با ترافیک، سرعت وسایل نقلیه در حال حرکت است. در تئوری رفتار ویسکوالاستیک مواد، می توان از مدت زمان بارگذاری متناسب با سرعت بار عبوری استفاده نمود. چنانچه در ارزیابی ها تئوری رفتار الاستیک مواد مد نظر باشد، مدول ارتجاعی هر جز روسازی باید به درستی و متناسب با سرعت عبور خودرو تعیین گردد. به طور کلی، هر چه سرعت بیشتر باشد، مدول بزرگتر و کرنش های موجود در روسازی کمتر می شود. با بررسی نمودار  $f_1$  و  $f_2$  می توان نتیجه گرفت که سرعت تأثیر چندانی بر این ضرایب نداشته و این روند



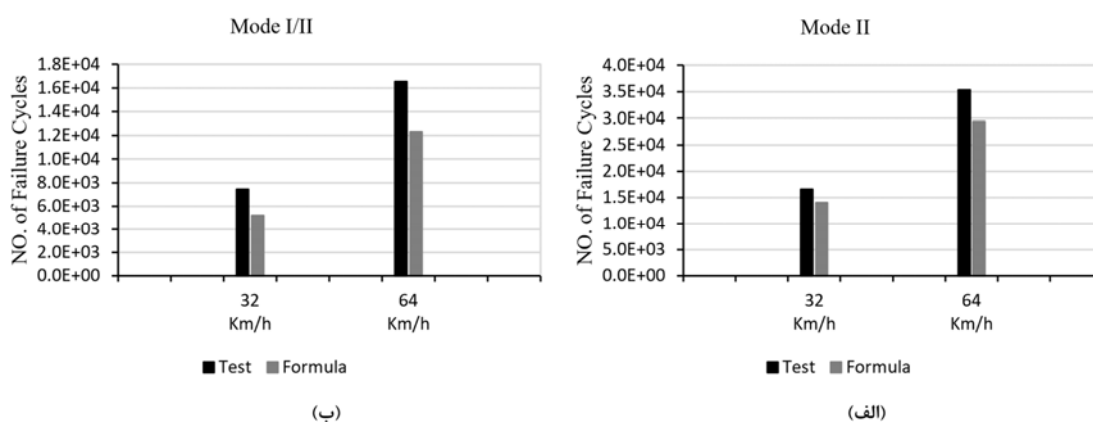
شکل ۱۰. اثر سرعت بر پارامترهای رابطه خرابی

یا مدت زمان بارگذاری در این تحقیق قابل استناد باشند و اختلاف زیادی در میزان تعداد سیکل بارگذاری در حالت آزمایش و فرمول به چشم می‌خورد (شکل ۱۱). این مسئله برای هر دو مود بارگذاری صادق است.

رابطه‌های زیر برای محاسبه تعداد سیکل بارگذاری تا شکست برای زمانی که تغییرات سرعت مد نظر است پیشنهاد گردیده است که به تفکیک مود بارگذاری در زیر آورده شده است. با مشاهده به شکل ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که روابط ریاضی (۱۶) و (۱۷) نمی‌توانند جهت پیش بینی اثرات متغییر سرعت

$$N_{f_{I/II}} = 1.5984(\varepsilon_t)^{-2.6730} \quad (16)$$

$$N_{f_{II}} = 1.6633(\varepsilon_t)^{-3.2221} \quad (17)$$

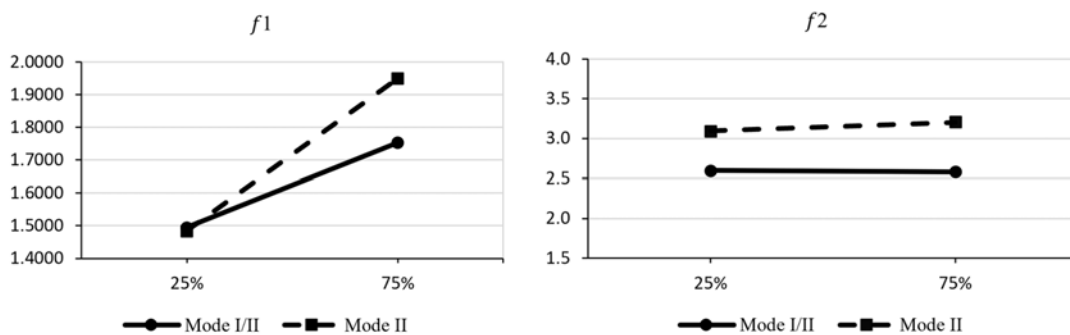


شکل ۱۱. مقایسه اثر سرعت بر تعداد سیکل منجر به شکست در آزمایش و پیش بینی شده از رابطه خرابی (الف) حالت برش خالص (II) (ب) حالت ترکیبی (I/II)

#### تأثیر اثر متقابل محورها بر تعداد سیکل بارگذاری

مشاهده می‌گردد، مقدار  $f_1$  در سطح ۲۵٪ برای هر دو حالت بارگذاری در آزمایش خمش نیم دایره منجر به نتایج یکسانی می‌شود که بیان کننده بی اثر بودن الگوی بارگذاری بر این ضریب می‌باشد (شکل ۱۲). بنابراین می‌توان چنین بیان نمود که کاهش فواصل محورها تا حدودی باعث ایجاد خرابی بیشتر می‌شود و می‌توان با افزایش فواصل محورها تا حدودی از خرابی روسازی‌ها جلوگیری کرد. با مقایسه مقدار  $f_1$  در هر دو سطح می‌توان مشاهده کرد که این مقدار در سطح ۷۵٪ حدود ۲۵ درصد بیشتر می‌شود.

اثر متقابل محورها می‌توانند بیان کننده و متناظر با فاصله محورها و همچنین ضخامت رویه آسفالتی باشد. به نحوی که تأثیر این عامل بر ضرایب رگرسیونی در حالت  $f_2$  ناچیز است ولی در مورد  $f_1$  و با مراجعه به شکل ۱۲ می‌شود نتیجه گرفت که با کاهش فاصله بین محوره‌های وسیله نقلیه خرابی شیارشدگی بیشتر می‌شود. این به جهت اثر حرکت خزشی خودروهای نقلیه سنگین می‌باشد که پتانسیل شیارشدگی را به شدت افزایش می‌دهد. این نتایج می‌تواند ملاک ارزیابی کارخانه‌های تولید خودرو سنگین و طراحان روسازی در طراحی فاصله محور خودروها و طرح ضخامت روسازی‌ها قرار گیرد. همچنین



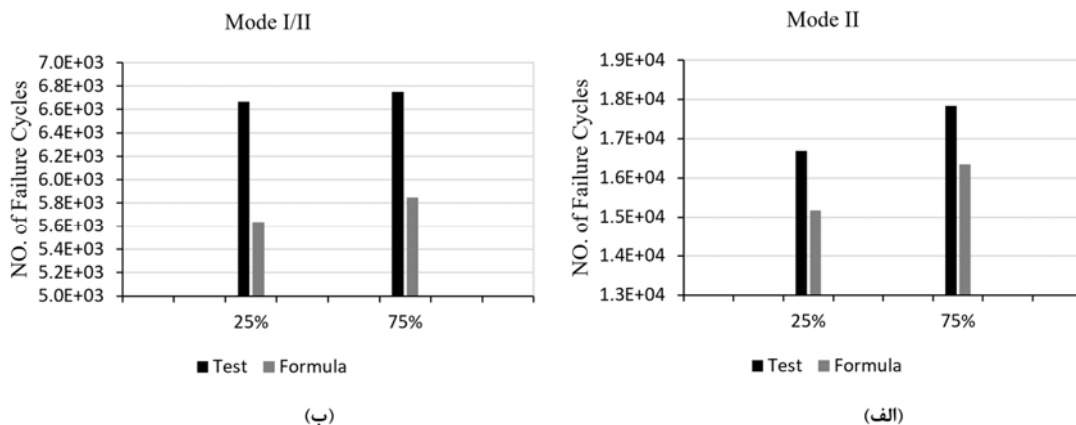
شکل ۱۲. تاثیر اثر متقابل محورها در سطح همپوشانی ۲۵٪ و ۷۵٪ بر پارامترهای رابطه خرابی

آمده از فرمول و آزمایش دیده می شود که به ما این اجازه را نمی دهد تا برای پیش بینی تعداد سیکل بارگذاری تا شکست در این تحقیق از روابط فوق استفاده کنیم و می توان بیان کرد که فرمول های ارائه شده قبلی مستلزم تغییر است (شکل ۱۳).

رابطه های (۱۸) و (۱۹) برای محاسبه تعداد سیکل بارگذاری تا شکست برای حالتی که تاثیر اثر متقابل محورها مورد بررسی قرار می گیرد، می تواند مورد استفاده قرار بگیرد. همانند بخش قبلی در این بخش نیز اختلاف زیاد در نتایج بدست

$$N_{f_{I/II}} = 1.6242(\varepsilon_t)^{-2.5894} \quad (18)$$

$$N_{f_{II}} = 1.7165(\varepsilon_t)^{-3.1471} \quad (19)$$



شکل ۱۳. مقایسه اثر متقابل محورها بر تعداد سیکل منجر به شکست در آزمایش و پیش بینی شده از رابطه خرابی

(الف) حالت برش خالص (II) (ب) حالت ترکیبی (I/II)

### تجزیه و تحلیل آماری به روش واریانس

*Significant* ارایه شده در جداول ANOVA مشاهده می گردد که متغیر مستقل اثر متقابل محورها بر مقادیر متغیر وابسته  $f_1$  حاصل از نتایج آزمون خمش نیم دایره تاثیر معناداری دارد. از آنجایی که مقدار معنی داری پارامتر اثر متقابل محورها کمتر از ۰,۰۵ است، اثرات آن با اطمینان ۹۵ درصد معنی دار است.

داده های آماری با استفاده از روش تحلیل واریانس برای ارزیابی تاثیر سه عامل الگوی بارگذاری، سرعت و اثر متقابل محورها بر نتایج آزمون، تحلیل گردید. آزمون ANOVA تفاوت آماری معنی داری را بین مخلوطها در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان می دهد. جدول ۱ و ۲ نتایج تحلیل واریانس را برای عوامل مختلف آزمون نشان می دهد. با توجه به مقادیر

جدول ۱. آزمون ANOVA با در نظر گرفتن اثرات الگوی بارگذاری، سرعت و اثر متقابل محورها به عنوان متغیر مستقل بر متغیر وابسته  $f_1$

Source	Sum of squares	$d_f$	Mean square	F	Significant
Corrected Model	1.102 <sup>a</sup>	9	.122	3.665	.028
Intercept	49.260	1	49.260	1475.074	.000
Loding Pattern	.072	1	.072	2.151	.173
Speed	.049	1	.049	1.468	.253
Interaction level	.520	1	.520	15.582	.003
Error	.334	10	.033		
Total	54.629	20			
Corrected Total	1.435	19			

a. R Squared = .767 (Adjusted R Squared = .558)

جدول ۲. آزمون ANOVA با در نظر گرفتن اثرات الگوی بارگذاری، سرعت و اثر متقابل محورها به عنوان متغیر مستقل بر متغیر وابسته  $f_2$

Source	Sum of squares	$d_f$	Mean square	F	Significant
Corrected Model	1.032E-6 <sup>a</sup>	9	1.147E-7	.731	.676
Intercept	4.678E-6	1	4.678E-6	29.822	.000
Loding Pattern	8.656E-8	1	8.656E-8	.552	.475
Speed	1.301E-7	1	1.301E-7	.829	.384
level Interaction	6.778E-8	1	6.778E-8	.432	.526
Error	1.569E-6	10	1.569E-7		
Total	8.395E-6	20			
Corrected Total	2.601E-6	19			

b. R Squared = .397 (Adjusted R Squared = -.146)

## ۵- نتیجه گیری

مختلف موثر باشد و همبستگی زیادی بین تعداد سیکل بارگذاری در حالت آزمایش و حالت فرمول وجود دارد.

- پارامتر سرعت تاثیر چندانی بر این ضرایب نداشته و این روند برای هر دو مود آزمایش یکسان می باشد. کاهش سرعت که برابر با افزایش مدت زمان بارگذاری است. منجر به افزایش مقدار ناچیز کرنش اولیه یا خرابی شیارشدگی در روسازی های آسفالتی می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تاثیر مدت زمان بارگذاری وسایل نقلیه بر روسازی های آسفالتی در طول دوره های اولیه بهره برداری بیشتر می باشد.

- روابط ریاضی نمی تواند جهت پیش بینی اثرات متغیر سرعت یا مدت زمان بارگذاری قابل استناد باشد و اختلاف زیادی در میزان تعداد سیکل بارگذاری در حالت آزمایش و فرمول مشاهده می شود.

- اثر متقابل محورها می تواند بیان کننده فاصله محورها و همچنین ضخامت رویه آسفالتی باشد. به نحوی که تاثیر این عامل بر ضرایب رگرسیونی در حالت  $f_2$  ناچیز است ولی در مورد  $f_1$

به طور خلاصه، براساس تجزیه و تحلیل داده های آزمایش، موارد زیر نتیجه گیری شده است.

- محور بر مقدار خرابی شیارشدگی رویه های آسفالتی که متناظر با ضرایب رگرسیونی  $f_1$  می باشد تاثیر نسبتاً ناچیزی دارد، که بیشترین اثرات مربوط به الگوی بارگذاری دوتایی و در حدود ۲۰ درصد می باشد.

- در رابطه با ضریب  $f_2$  می توان بیان کرد که تاثیر الگوی بارگذاری بر این ضریب که متناظر با خرابی خستگی در نمونه های ترک خورده است می توان دریافت که اثرات نوع محور بر میزان پارامتر  $f_2$  قابل چشم پوشی است و همچنین این ضریب به تغییر مود انجام آزمایش وابسته نیست. پس می توان نتیجه گرفت که اثر الگوی بارگذاری در دوره های کوتاه مدت عمر روسازی تاثیرگذار است.

- با مشاهده به نمودارها می توان بیان کرد که این روابط ریاضی می تواند جهت پیش بینی اثرات الگوی بارگذاری در حالت های

در هر دو سطح می‌توان مشاهده کرد که این مقدار در سطح ۷۵٪ حدود ۲۵ درصد بیشتر می‌شود.

می‌شود نتیجه گرفت که با کاهش فاصله بین محورهای وسیله نقلیه خرابی شیارشدگی بیشتر می‌شود. با مقایسه مقدار  $f_1$

## ۶- مراجع

- Li, X. J., & Marasteanu, M. O. (2010). Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. *Experimental Mechanics*, 50, 867-876.
- Luo, L., Erarslan, N., & Mu, Z. (2014). Mixed-Mode Fracturing of Concrete—Numerical and Experimental Study using SCCD Specimens. *In Recent Advances in Material, Analysis, Monitoring, and Evaluation in Foundation and Bridge Engineering*, 25-37.
- Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2008). *Pavement Engineering: Principles and Practice*. CRC Press.
- Mansourkhaki, A., Yeganeh, S., & Sarkar, A. (2014). Numerical comparison of pavement distress due to moving load under dual-wheel tandem and tridem axles. *International Journal of Transportation Engineering*, 2(1), 31-46.
- Mansourkhaki, A., & Sarkar, A. (2015a). Fatigue performance of asphalt mixture under actual loading patterns at different pulse durations. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(4), 867-877.
- Mansourkhaki, A., & Sarkar, A. (2015b). Plastic deformation of asphalt mixture under waveform loading. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*.
- Mansourkhaki, A., Sarkar, A., & Ameri, M. (2015). Impact of different loading patterns with short duration on the permanent strain of asphalt mixture. *Journal of Testing and Evaluation*, 43(4), 853-866.
- Na Chiangmai, C. (2010). Fatigue-fracture relation on asphalt concrete mixtures. PhD diss., University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Park, H. M., & Kim, Y. R. (2003). Prediction of remaining life of asphalt pavement with falling-weight deflectometer multiloading-level deflections. *Transportation Research Record*, 1860(1), 48-56.
- Rushing, J. F., & Little, D. N. (2014). Static creep and repeated load as rutting performance tests for airport HMA mix design. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(9), 04014055.
- Saadeh, S., Renteria, D., Mahmoud, E., & Eljairi, O. (2018). Numerical evaluation of semicircular bending test variability. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6), 04018085.
- Saleh, M. (2016). A mechanistic empirical approach for the evaluation of the structural capacity and remaining service life of flexible pavements at the network level. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(8), 749-758.
- A. Standard 8044-16. (2016). Standard Test Method for Evaluation of Asphalt Mixture Cracking Resistance using the Semi-Circular Bend Test (SCB) at Intermediate Temperatures., *Book of Standards*, Vol. 4, (n.d.).
- Aliha, M. M., Behbahani, H., Fazaali, H., & Rezaifar, M. H. (2015). Experimental study on model fracture toughness of different asphalt mixtures. *Scientia Iranica*, 22(1), 120-130.
- Al-Suleiman, T. I., & Adnan, M. S. (2003). Prediction of pavement remaining service life using roughness data—Case study in Dubai. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(2), 121-129.
- Archilla, A. R., Diaz, L. G., & Carpenter, S. H. (2007). Proposed method to determine the flow number in bituminous mixtures from repeated axial load tests. *Journal of Transportation Engineering*, 133(11), 610-617.
- Das, A., & Pandey, B. B. (1999). Mechanistic-empirical design of bituminous roads: an Indian perspective. *Journal of Transportation Engineering*, 125(5), 463-471.
- Fadaei, M. and Sarkar, A. (2018). Notched Asphalt Mixture Behavior under Waveform Loading Using Semi-Circular Bending Test (SCB). *Journal of Transportation Research*, 15(1), 149-159.
- Hossain, M., & Zhong, W. (2002). Estimation of asphalt pavement life. (No. K-TRAN: KSU-97-6).
- Huang, B., Shu, X., & Tang, Y. (2005). Comparison of semi-circular bending and indirect tensile strength tests for HMA mixtures. *In Advances in Pavement Engineering*, 1-12.
- Huang, Y. H. (2004). Pavement analysis and design. In Y. H. Huang, *Pavement Analysis and Design Upper Saddle River*: NJ: Pearson Prentice Hall. Vol. 2, 401-409.
- Janssen, M., Jan, Z., & Russell, W. (2004). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. CRC Press.
- Khademzadeh, M., & Sarkar, A. (2024). Laboratory vibration testing and analysis of hot mix asphalt mixture under different loading patterns. *Construction and Building Materials*, 417, 135224.
- Khademzadeh, M., & Sarkar, A. (2025). Lab-based dynamic spectrum investigation of asphalt mixtures under various loading conditions using fast Fourier transform. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1).  
doi.org/10.1080/10298436.2025.2498079

running on asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 358, 129398-129399.

-Zarei, Z., Mir Mohammad Sadeghi, S. J. and Sarkar, A. (2022). Investigation in to the Effect of Trench Depth on Reducing Vibrations Caused by the Passage of Heavy Vehicles. *Journal of Transportation Research*, 19(3), 1-12.

**doi: 10.22034/tri.2021.313907.2976**

-Zhang, J., Sakhaeifar, M., Little, D. N., Bhasin, A., & Kim, Y. R. (2018). Characterization of crack growth rate of sulfur-extended asphalt mixtures using cyclic semicircular bending test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12), 04018311.

-Zhou, F., Scullion, T., & Sun, L. (2004). Verification and modeling of three-stage permanent deformation behavior of asphalt mixes. *Journal of Transportation Engineering*, 130(4), 486-494.

-Sarkar, A. (2016). Numerical comparison of flexible pavement dynamic response under different axles. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(5), 377-387.

-Sarkar, A. (2017). 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.

-Smith, R. E. (1986). Structuring A Microcomputer Based Pavement Management System For Local Agencies (*Public Works, Infrastructure Management*). University of Illinois at Urbana-Champaign.

-Sun, L., Ren, J., & Zhang, S. (2018). Fracture characteristics of asphalt concrete in mixed-loading mode at low-temperature based on discrete-element method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(12), 04018321.

-Zarei, Z., J. Sadeghi, and A. Sarkar, (2022). Evaluation of heavy-vehicle-induced vibrations

# The Effect of Loading Pattern on the Behavior of Asphalt Mixtures in Semi Circular Bending Test

*Amin Teymori, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Alireza Sarkar, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*E-mail: sarkar@srbiau.ac.ir*

Received: January 2025- Accepted: April 2025

## ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the effect of variables such as loading pattern, speed and axle interaction on the number of loading cycles of asphalt mixtures and to compare the number of loading cycles using the semi-circular bending test in two shear (II) and shear-flexural combination (I/II) modes. Three loading patterns corresponding to single, double and triple axles with axle interaction levels of 25% and 75% were assumed. This study was analyzed based on loading times corresponding to speeds of 32 (200 ms) and 64 (100 ms) km/h. The results showed the following: the type of axle has a relatively small effect on the amount of rutting damage of asphalt pavements, with the largest effects related to the double loading pattern and about 20%; mathematical relationships can be effective in predicting the effects of the loading pattern in different modes and there is a high correlation between the number of loading cycles in the experimental mode and the formula mode; Decreasing speed leads to a slight increase in the initial strain or rutting failure in asphalt pavements, so it can be concluded that the effect of vehicle loading duration on pavements is greater during the initial periods of operation; rutting failure increases with decreasing vehicle wheelbase. Comparing the value of  $f_1$  at both levels, it can be seen that this value increases by about 25% at the 75% level.

**Keywords:** Semi-Circular Bending Test, Fracture Mechanics, Cracked Sections, Number of Loading Cycles