

بررسی تاثیر دما بر مقاومت شکست نمونه‌های آسفالتی

مقاله پژوهشی

منصور فخری*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
سید علی سیادت، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: fakhri@kntu.ac.ir

دریافت: ۹۸/۱۱/۰۵ - پذیرش: ۹۹/۰۳/۱۰

صفحه ۲۲۱-۲۳۱

چکیده

ترک خوردگی بتن آسفالتی در مناطق سردسیر جزو مهم‌ترین خرابی‌های رویه‌های آسفالتی است. علاوه بر سرما در برخی مناطق شاهد بارندگی نیز می‌باشیم که تاثیر توأم این دو عامل باعث یخ زدگی آسفالت شده و در این صورت خرابی آسفالت شدتی مضاعف به خود می‌گیرد. در این مقاله به بررسی مقاومت شکست نمونه‌های آسفالت گرم اشباع شده تحت تاثیر سیکل های ذوب و یخ بندان پرداخته خواهد شد. برای این منظور تعدادی نمونه آسفالتی که دارای مصالح، دانه بندی و شرایط ساخت مشابهی هستند را به صورت SCB ساخته. سپس آنها را اشباع کرده و تحت دماهای متفاوت (۵- و ۱۵- درجه سانتی گراد) و تعداد سیکل های متفاوت (۱، ۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱) قرار داده و تاثیر این پارامترها را بر فاکتور شدت تنش بحرانی، درع مود شکست (مود کششی - مود برشی و دو مود ترکیب) مورد مطالعه قرار می‌دهیم. نتایج حاصل از این پژوهش نشانگر آن است که با افزایش تعداد سیکل های ذوب و یخ بندان، چقرمگی شکست افت قابل توجهی خواهد داشت. به این گونه که تا سیکل هفتم کاهش چقرمگی شکست، شدت قابل ملاحظه ای خواهد داشت و پس سیکل هفتم، شدت آن کاهش می‌یابد. نتیجه دیگری که از این پژوهش حاصل شد این است که با کاهش دما تا ۱۵- درجه سانتی گراد، چقرمگی شکست افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بتن آسفالتی اشباع شده، ترک حرارتی، چقرمگی شکست، سیکل ذوب و یخ‌بندان، مود خالص و مود ترکیبی

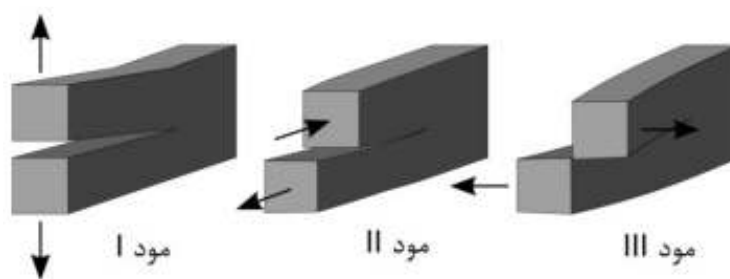
۱-مقدمه

برف در روزهای بعد، شاهد چنین اختلاف دمایی خواهیم بود. حال هرچه این اختلاف دمایی بیشتر باشد و سیکل‌های دمایی بیشتری به آسفالت اعمال شود، خرابی آسفالت هم بیشتر خواهد بود. این خرابی‌ها باعث کاهش عمر مفید رویه شده و هزینه‌های زیادی را به سازمان‌های راهداری تحمیل می‌کند. داشتن شناخت مناسب نسبت به مکانیزم شکست رویه‌های آسفالتی، می‌تواند به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری منجر شود. مواد ترد رفتاری الاستیک از خود نشان می‌دهند که در این مواد می‌توان برای پیش بینی شروع ترک از مدل مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) استفاده کرد. بتن آسفالتی نیز در دمای سرد رفتاری الاستیک از خود نشان می‌دهد. در روش LEFM، فاکتور شدت تنش بحرانی به عنوان یک پارامتر اساسی در بررسی شکست در نوک ترک مطرح است که

ایجاد و گسترش ترک همواره تحت اثر دو عامل تنش‌های حرارتی و بارگذاری ترافیکی صورت می‌گیرد و بر این اساس می‌توان ترک خوردگی را به ۳ دسته کلی تقسیم کرد: الف) ترکهای حرارتی، ب) ترکهای خستگی و ج) ترکهای انعکاسی. (Braham, Buttlar and Ni, 2010) از جمله تنش‌های حرارتی می‌توان به اختلاف دمایی شب و روز اشاره کرد که باعث ایجاد انبساط و انقباض در آسفالت می‌شود. این پدیده در مناطق کویری و در فصل تابستان که اختلاف دمایی شب و روز ممکن است به بیش از پنجاه درجه سانتی گراد برسد، قابل مشاهده است. در مناطق سردسیر یکی از مهم‌ترین علل زوال رویه‌های آسفالتی، ترک خوردگی در دمای پایین است. بدین صورت که در مناطق کوهستانی در اثر ریزش برف و باران و یخ‌زدگی جاده‌ها در طول شب و ذوب شدن

ترک دار نسبت به هم دور می شوند. ب) مود II بارگذاری (مود برشی): در این حالت وجوه ترک نسبت به هم در جهت عبور بر لبه ی ترک می لغزند. این مد ناشی از بارگذاری برشی در صفحه ترک است. ج) مود III بارگذاری (مود پارگی): این مد ناشی از نیروی برشی اعمالی در صفحه خارج از سطح ترک است.

بسیاری از محققین با استفاده از این پارامتر به بررسی آسفالت گرم در دماهای پایین پرداخته‌اند. این در حالی است محققین در مواد ویسکو الاستیک، از روش‌های دیگری نظیر مدل ناحیه چسبناک (CZM) استفاده می‌کنند. به طور کلی ترک در اجسام مختلف، براساس نوع بارگذاری به شکل سه مود مختلف، تغییر فرم می‌دهند. این مودها عبارتند از: الف) مود I بارگذاری (مود بازشونده): در این مود سطوح ترک در قطعه



شکل ۱. انواع مودهای بارگذاری

ترک خوردگی مخلوط‌های آسفالتی بررسی کرد. علیها و همکاران (Aliha, Behbahani, Fazaeli and Rezaifar 2014) کلیه مشخصات مخلوط‌های آسفالتی شامل نوع مصالح، نوع قیر، نوع دانه بندی و درصد فضاهای خالی را مورد بررسی قرار دادند. در تعدادی از پژوهش‌ها نیز محققین به مقایسه مشخصات مخلوط‌های آسفالتی در دماهای مختلف پرداخته‌اند. (Kim and El Hussein 1997) - (Kim, Kweon, Doh and Park 2003) - (Ayatollahi and Pirmohammad 2013) (Pirmohammad and Ayatollahi 2014) نقطه ضعف این پژوهش‌ها در نظر نگرفتن شرایط متنوع آب و هوایی است. زیرا برای داشتن دید واقع گرایانه نسبت به وضعیت مخلوط‌های آسفالتی، نیاز هست تا نمونه‌ها را در معرض شرایط محیطی قرار داد. بعضی از محققین نظیر پیرمحمد و همکاران (Pirmohammad and Kiani 2016) - (Pirmohammad and Kiani 2016) مخلوط‌های آسفالتی را در معرض تغییرات دمایی سیکلیک قرار داده‌اند. البته تحقیقاتی هم انجام شده است که در آن شاهد اعمال شرایط محیطی در برخی دیگر از مواد مثل بتن پلیمری

در بسیاری از تحقیقات انجام شده در سال‌های قبل شاهد آن هستیم که محققین تنها به بررسی خرابی‌های ناشی از مود یک پرداخته‌اند و به بررسی تاثیر مودهای ترکیبی و مود دو نپرداخته‌اند. اما تحقیقات فخری و همکاران (Fakhri, Farokhi and Kheiry 2009) و عامری و همکاران (Ameri, Mansourian, Khavas, Aliha and Ayatollahi 2011)، نشان داد که در رویه‌های آسفالتی در اثر عبور چرخ وسایل نقلیه، حالت‌های مختلفی از مودهای بارگذاری شامل مود خالص کششی، مود خالص برشی و مودهای ترکیبی را تجربه می‌کنند. اولین بار مجیدزاده در سال ۱۹۷۶ با استفاده از روش مکانیک شکست به بررسی رشد ترک در مخلوط‌های آسفالتی پرداخت. (Majidzadeh, Buranarom and Karakouzian 1976) پس از مجیدزاده محققین بسیاری وارد این حوزه شدند و با اعمال تغییرات در مشخصات مخلوط‌های آسفالتی و یا تغییر در شرایط اعمالی به نمونه‌های آسفالتی، به بررسی رشد ترک در این نمونه‌ها با استفاده از روش مکانیک شکست پرداختند. لی و ماراستینو (Li and Marasteanu 2010) تاثیر سنگدانه‌های متفاوت و درصد‌های فضای خالی مختلف را بر مقاومت

ترکیبی، با ثابت نگه داشتن ترک عمودی در میانه نمونه، از جابه جایی تکیه گاه استفاده شده است. در نمونه‌های SCB برای محاسبه فاکتور شدت تنش بحرانی در مودهای یک و دو در شروع فرایند شکست ($K_{I\text{f}}$, $K_{II\text{f}}$)، می‌توان از روابط زیر استفاده کرد.

$$K_{I} = \frac{P}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_{I}(a/R, S1/R, S2/R) \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P}{2Rt} \sqrt{\pi a} Y_{II}(a/R, S1/R, S2/R) \quad (2)$$

در این روابط :

P نیروی اعمالی به نمونه،

R شعاع نمونه،

t ضخامت نمونه،

a طول ترک،

S1 و S2 فاصله تکیه گاه‌ها از مرکز نمونه

و Y_1 و Y_2 فاکتور هندسی نمونه‌ها (که وابسته به a ، R ، $S1$ و $S2$ است). در این پژوهش، قطر نمونه‌ها را ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفتیم. آیت‌اللهی و همکاران (Aliha, Shokrieh and Ayatollahi, 2011) هم مقادیر Y_1 و Y_2 را با استفاده از آنالیز اجزاء محدود و به کمک روش انتگرال ژبرای مدهای مختلف محاسبه کردند. با استفاده از پارامتر M^e می‌توانیم سهم مشارکت هر یک از مودهای یک یا دو را مشخص کنیم. مقدار M^e در مود یک (مود کششی خالص) برابر یک و در مود دو (مود برشی خالص) برابر صفر در مودهای ترکیبی هم مقادیر بین صفر تا یک خواهد داشت.

$$M^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{K_{I}}{K_{II}} \right) \quad (3)$$

در این پژوهش از M^e مود بارگذاری استفاده شده است. مود کششی خالص با $M^e=1$ ، مود برشی خالص با $M^e=0$ و مود ترکیبی یکی با سهم کشش بیشتر $M^e=0.8$ و دیگری با سهم برش بیشتر $M^e=0.38$.

در نهایت مقدار ضریب شدت تنش موثر (K_{eff}) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{K_{I}^2 + K_{II}^2} \quad (4)$$

نیز هستیم (Shokrieh, Heidari-Raran Shokouri, Heidari-Rarani, and Kashizadeh 2011) - (Aliha, Shokrieh and Ayatollahi 2014). در این پژوهش ابتدا نمونه‌های SCB را اشباع کرده سپس سیکل‌های دمایی را به آنها اعمال نموده و با استفاده از روش خمش سه نقطه ای نمونه‌ها شکسته می‌شوند. در نهایت با استفاده از معیار شدت تنش بحرانی به ارزیابی وضعیت مخلوط‌های آسفالتی پرداخته می‌شود.

۲- مصالح و روش انجام آزمایش

۲-۱- قیر و دانه بندی

مخلوط آسفالتی از سه جزء سنگدانه، قیر و فضای خالی تشکیل می‌شود. در این پژوهش از قیر ۶۰/۷۰ با PG 64-22 متعلق به پالایشگاه نفت تهران استفاده شده است. سنگدانه مصرفی هم از نوع آهکی با بیشینه سایش لسلانجلس ۲۰/۲ می‌باشد که این مصالح از معدن اسب چران دماوند تهیه شده است. برای ساخت مخلوط آسفالتی از حد وسط دانه بندی شماره ۴ مطابق با آیین نامه شماره ۲۳۴ ایران استفاده شده است. با استفاده از روش مارشال درصد قیر بهینه ۵/۵ درصد و درصد فضای خالی ۴ درصد محاسبه گردید. جزئیات بیشتر در مورد درصد فضای خالی در آیین نامه -AASHTO T 269 (2011) قابل مشاهده است.

۲-۲- مشخصات هندسی نمونه های آزمایشی

در گذشته نمونه‌های متنوعی توسط محققین برای بررسی چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است که هر کدام از این نمونه‌ها دارای مزایا و معایبی هستند. اما نمونه‌های SCB به خاطر سهولت ساخت به روش ژیراتوری و یا مغزه گیری مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در نمونه‌های SCB برای تولید مد خالص یک، مد خالص دو و یا مدهای ترکیبی سه روش وجود دارد. روش اول جابه جا کردن ترک عمودی میانی است. روش دوم تغییر زاویه ترک میانی است. روش سوم هم جابه جایی تکیه گاه هاست. در این پژوهش برای بررسی چقرمگی شکست مخلوط آسفالتی از نمونه های SCB استفاده شده و برای تولید مدهای خالص و

جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در ضرایب شدت تنش

مود	مود خالص یک	مود ترکیبی یک و دو	مود ترکیبی یک و دو	مود خالص دو
(S1, S2)	(۵۰ و ۵۰)	(۵۰ و ۲۲)	(۵۰ و ۱۵)	(۹ و ۵۰)
Me	۱	۰/۸	۰/۳۸	۰
Y I	۳/۷۳۴	۱/۷۶۶	۰/۸۰۲	۰
Y II	۰	۰/۵۷۸	۱/۱۷۹	۱/۷۷۲

۲-۳ ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از تراکم ژیراتوری به دست می‌آیند، علت استفاده از این روش این است که در این روش امکان کنترل درصد فضای خالی، وزن مخصوص، ارتفاع نمونه و سایر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد به گونه‌ای که نمونه‌هایی که با استفاده از این روش تهیه شده اند دارای خواص مکانیکی نسبتاً یکنواخت می‌باشند. پس از تهیه مصالح سنگی و قیر، مطابق دانه بندی و مقدار قیر بهینه، مصالح سنگی را به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه سانتی گراد در داخل آن قرار داده تا رطوبت مصالح از آن گرفته شود. در زمان آماده سازی مصالح سنگی برای اختلاط با قیر، باید دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد را دارا باشد. در این دما امکان پوشش مناسب مصالح توسط قیر وجود دارد و سپس مصالح سنگی و قیر با هم مخلوط می‌شوند. قالب نمونه‌ها یک قالب استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر باشد که در خود حجمی از مصالح به وزن حدود ۵ کیلوگرم را جا می‌دهد. این قالب باید قبل از استفاده به مدت ۱۵ دقیقه در آن گرم شده و سپس به خوبی روغن کاری شود. سپس مخلوط بتن آسفالتی را به آرامی درون قالب ریخته و قالب در دستگاه متراکم کننده ژیراتوری قرار داده می‌شود. پس از انجام تراکم، نمونه‌های استوانه‌ای حاصل می‌شود که ارتفاع حدود ۱۳ سانتی‌متر دارند. سپس نوبت به برش و ایجاد ترک بر نمونه‌ها می‌باشد. به منظور برش یکنواخت نمونه‌های استوانه‌ای شکل و ثابت نگه داشتن آن در زیر دستگاه برش از یک میله‌ی فلزی به عنوان فیکسچر استفاده می‌شود. حال توسط دستگاه برش که دارای تیغه‌ای به ضخامت سه میلی‌متر می‌باشد شروع به برش نمونه‌ها می‌کنیم. به منظور داشتن نمونه‌های دیسکی شکل یکنواخت بهتر است ابتدا ۱ سانتی‌متر از بالا و پایین نمونه استوانه‌ای برش داده شود. سپس نمونه آسفالتی به ضخامت ۳

سانتی‌متر را برش می‌دهیم. در نهایت با تغییر تیغه دستگاه برش و قرار دادن تیغه‌ای به ضخامت ۲ میلی‌متر، نمونه‌های دیسک شکل را از وسط نصف کرده تا نمونه‌های SCB حاصل گردد. از هر نمونه آسفالتی ساخته شده به روش تراکم ژیراتوری، ۳ نمونه دیسک شکل با ضخامت ۳ سانتی‌متر و ۶ نمونه نیم دیسک SCB حاصل می‌شود. ترک قائم بر روی نمونه‌های نیم دیسک به طول ۲ سانتی‌متر با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر ایجاد شده است. لازم به ذکر است که در کلیه مراحل به دلیل ایجاد سطح هموار و حذف گرمای ایجاد شده که سبب تغییر خواص آسفالت می‌شود، استفاده از آب هنگام برش ضروری می‌باشد.

۲-۴- اعمال سیکل ذوب و یخ بندان

برای اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان روش خاصی پیشنهاد نشده است و محققین از روش‌هایی مختلفی استفاده کرده‌اند. روشی که در این پژوهش استفاده شده است به این شکل است که ابتدا نمونه‌ها را به مدت ۱۵ دقیقه با استفاده از پمپ خلاء اشباع کرده سپس به مدت ۱۲ ساعت در حمام آب با دمای ۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده. پس از پایان این مدت، نمونه‌ها را از حمام آب خارج کرده و با استفاده از سلفون بسته بندی کرده تا از حالت اشباع خارج نشوند و به مدت ۱۲ ساعت داخل چمبر با دمای ۵- درجه سانتی‌گراد قرار می‌دهیم. پس از طی این ۱۲ ساعت، یک سیکل انجماد به نمونه‌ها اعمال شده است. با تکرار این فرایند انجماد و ذوب، به تعداد سیکل دلخواه خواهیم رسید که در پایان سیکل‌های اول، سوم، پنجم، هفتم، نهم و یازدهم نمونه‌ها در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد شکسته می‌شوند. برای حالت پایه، نمونه‌های SCB بدون اینکه اشباع شده باشند، به مدت ۱۲ ساعت در چمبر با دمای ۵- درجه قرار می‌گیرند تا کلیه

بخش‌های داخلی نمونه‌ها به این دما برسد. پس از طی این مدت نمونه‌ها در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد شکسته می‌شوند. همین عملیات را علاوه بر دمای ۵- درجه سانتی‌گراد، در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد هم انجام می‌شود تا بتوان علاوه بر تاثیر تعداد سیکل، تاثیر دما را هم بر چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی، بدست آورد.

۲-۵- شکست نمونه‌ها

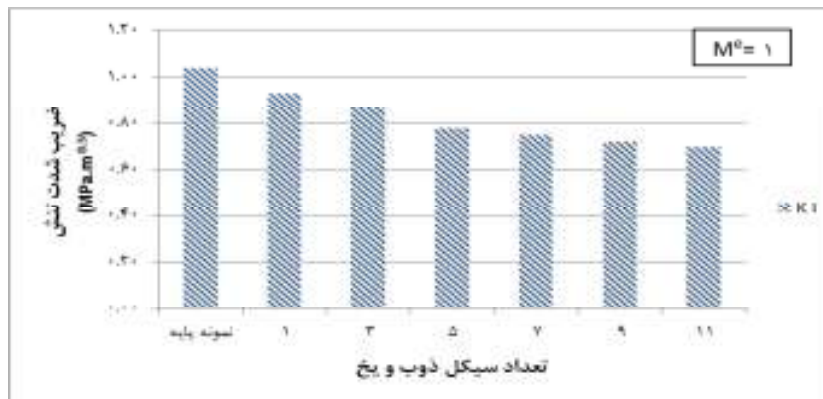
برای شکست نمونه‌ها از دستگاه سنتام با ظرفیت ۲۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. این دستگاه به کامپیوتر متصل است و پس از شروع بارگذاری نمودار بار-جابجایی ثبت می‌گردد. نرخ بارگذاری به صورت ثابت ۳ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. در نهایت نرم افزار مقدار بار بحرانی را ثبت کرده و همین روال برای تک تک نمونه‌ها ادامه می‌یابد. به دلیل شرایط دمایی زیر صفر نمودارهای شکست آسفالت به صورت خطی در خواهد آمد که نشان دهنده شکست الاستیک آسفالت می‌باشد.

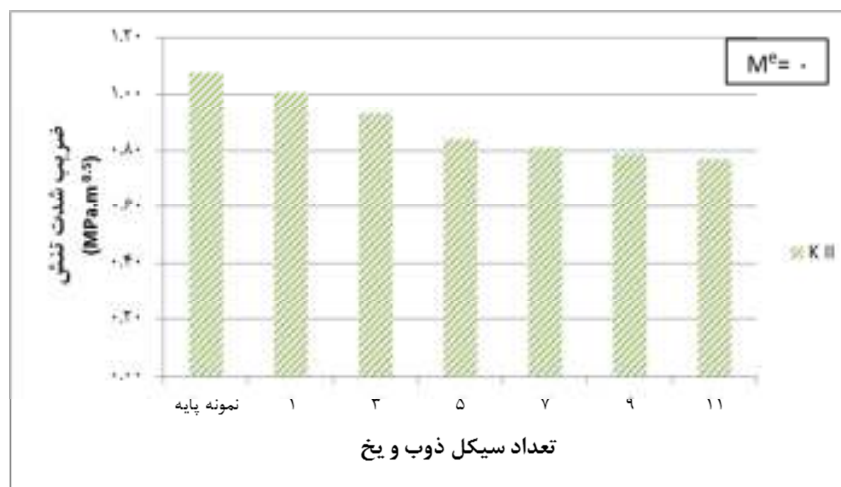
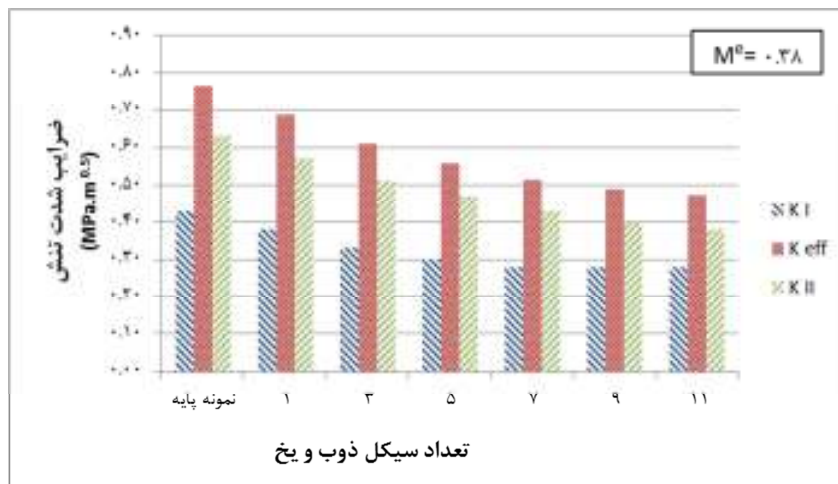
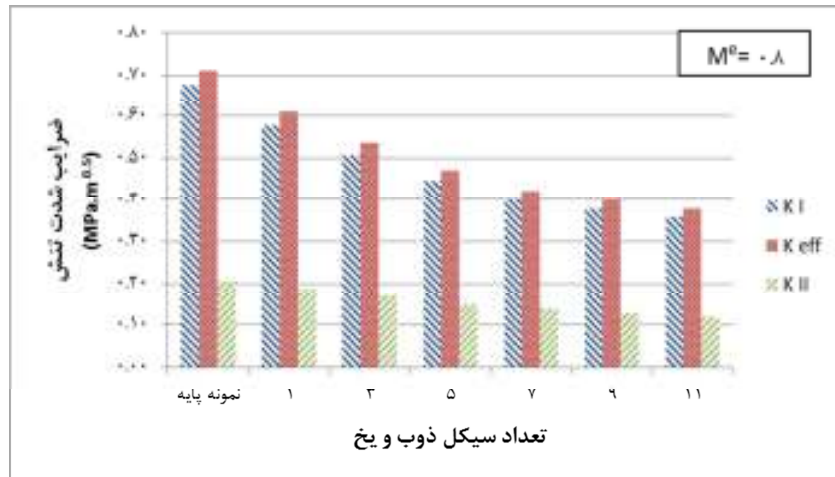
۳- نتایج و تحلیل آن‌ها

۳-۱- مقایسه ضرایب شدت تنش (KI ، KII و K_{eff}) نسبت به تعداد سیکل‌های انجماد در مودهای بارگذاری مختلف

شکل ۲ نشان دهنده تغییرات ضرایب شدت تنش در مقابل تعداد سیکل در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همانطور که در شکل‌ها نشان داده شده است، با افزایش Me ، مقدار KI

افزایش و مقدار KII کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش Me ، نمونه به مود کششی نزدیک شده و مقاومت نمونه در برابر کشش افزایش می‌یابد. نکته دیگری که در مورد این شکل‌ها قابل ذکر است، آن است که با افزایش تعداد سیکل، کلیه ضرایب شدت تنش کاهش یافته‌اند. به گونه‌ای که تحت سیکل‌های ابتدایی، نمونه‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار ضریب شدت تنش موثر K_{eff} خواهند داشت، اما تحت سیکل هفتم به بعد شدت این کاهش، کم‌تر می‌شود. در سیکل هفتم، شاهد کاهش حدود ۲۵ تا ۴۰ درصدی در ضریب شدت تنش موثر در مودهای مختلف هستیم. علت این موضوع را می‌توان در انجماد و ذوب ذرات آبی دانست که در داخل فضای خالی نمونه‌ها قرار دارند. آب در اثر انجماد افزایش حجم پیدا می‌کند، ولی به علت آن که در فضای خالی موجود در نمونه‌های آسفالتی قرار گرفته‌اند و به علت اشباع بودن نمونه‌ها، امکان افزایش حجم وجود ندارد. در نتیجه باعث بوجود آمدن تنش و ایجاد میکرو ترک‌هایی در نمونه آسفالتی می‌شوند. با تکرار شدن سیکل‌هایی ذوب و یخبندان، این اعمال تنش بر نمونه‌ها تکرار می‌شود و در نهایت سبب کاهش مقاومت نمونه در برابر شکست می‌شود. از طرفی در حین ذوب شدن نمونه، ذرات آب یخ زده در نمونه به حرکت در آمده و بین قیر و سنگدانه‌ها قرار می‌گیرند و باعث کاهش چسبندگی قیر و سنگدانه می‌شوند. نکته قابل توجه دیگر در این شکل‌ها آن است که با افزایش تعداد سیکل، شدت کاهش ضرایب کندتر می‌شود.





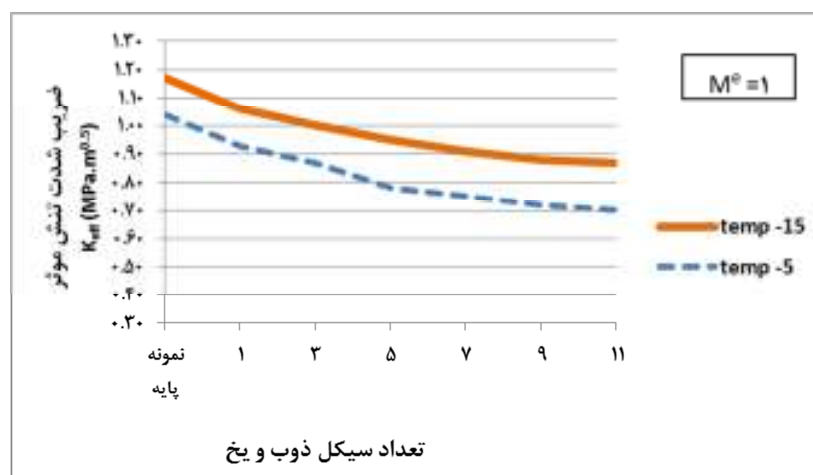
شکل ۲. ضرایب چقرمگی شکست در دمای ۵- درجه سانتی گراد در موادهای مختلف

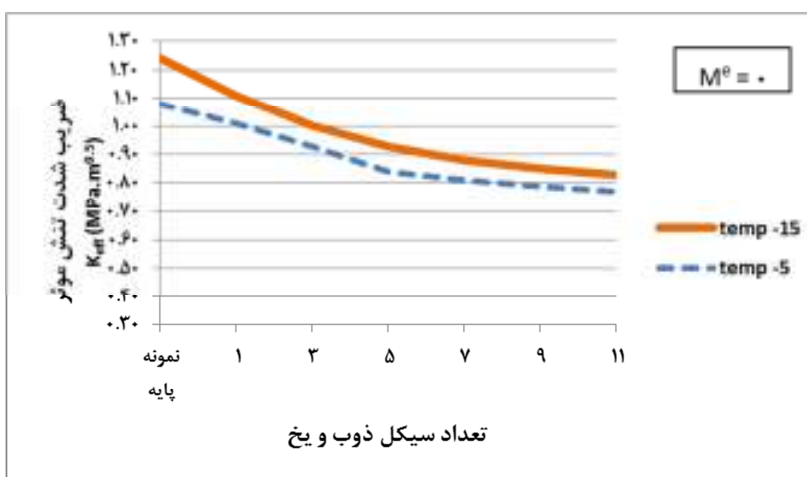
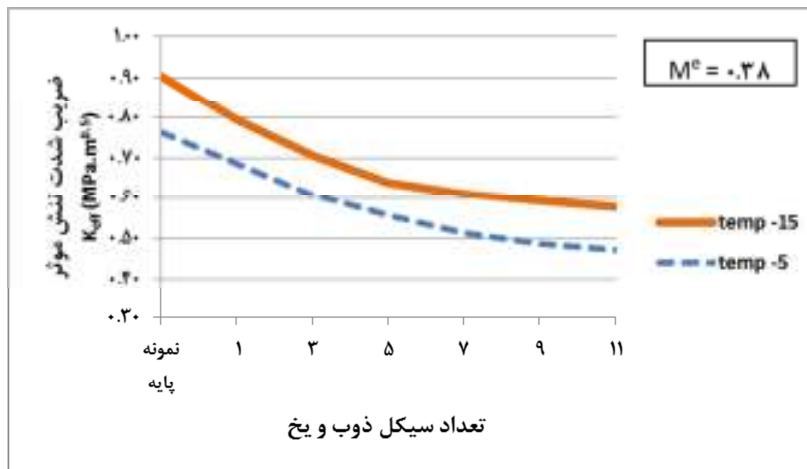
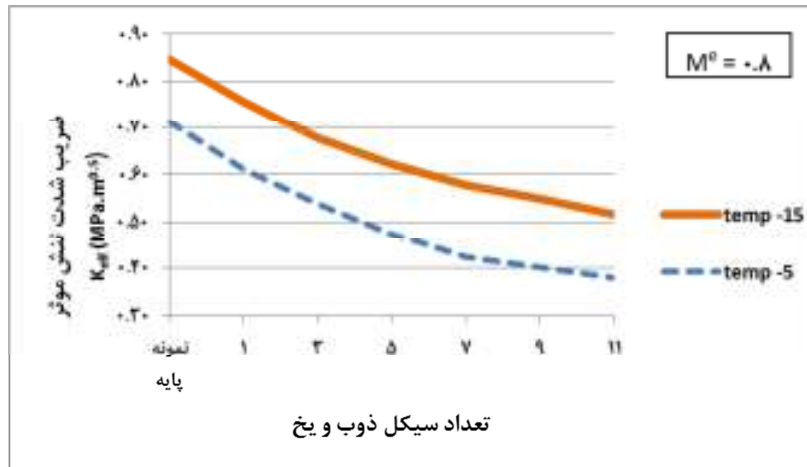
آن‌ها، اختلاف دمایی است. همانطور که در شکل‌ها نشان داده شده است، نمونه‌های قرار گرفته در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های قرار گرفته در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد، دارای ضرایب شدت تنش بالاتری هستند. به طوری که منحنی بالایی بیانگر ضرایب شدت تنش در دمای ۱۵- و منحنی پایینی ضرایب شدت تنش در دمای ۵- را نشان می‌دهد. در بخش‌های قبل هم به این نکته اشاره شده بود. علت این موضوع را می‌توان در خصوصیات ویسکوالاستیک قیر دانست. قیر از نظر فیزیکی در دماهای بالا حالتی ویسکوز داشته و هرچه دمای آن پایین‌تر باشد، الاستیک‌تر خواهد بود. زمانی که قیر در دماهای منفی قرار می‌گیرد، منقبض شده و سختی آن افزایش می‌یابد. در اثر این افزایش سختی، مخلوط آسفالتی در مقابل شکست مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. اما این افزایش سختی تا دمای ۱۵- ادامه خواهد داشت. تحقیقات انجام شده در این زمینه حاکی از آن است که در دماهای پایین‌تر از ۱۵- درجه سانتی‌گراد، میزان انقباض قیر نسبت به سنگدانه‌ها بیشتر بوده و این خود باعث بوجود آمدن میکرو ترک‌هایی در قیر می‌شود و در نتیجه ضرایب شدت تنش نمونه‌های آسفالتی کاهش می‌یابند.

تغییرات ضرایب شدت تنش در تعداد سیکل‌های مختلف در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد هم مشابه با دمای ۵- درجه سانتی‌گراد است. در این حالت هم با افزایش تعداد سیکل، ضرایب شدت تنش کاهش می‌یابند و در ضمن شدت این تغییرات در سیکل‌های انتهایی کاهش می‌یابد. بدین صورت که تحت سیکل‌های ابتدایی، نمونه‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار ضریب شدت تنش موثر K_{eff} خواهند داشت، اما تحت سیکل هفتم به بعد شدت این کاهش، کم‌تر می‌شود در سیکل هفتم، شاهد کاهش حدود ۲۰ تا ۳۰ درصدی در ضریب شدت تنش موثر در مدهای مختلف نسبت به حالت پایه هستیم. با این تفاوت که در این دما مقادیر ضرایب شدت تنش نسبت به نمونه‌های مشابه در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد بیشتر می‌باشد که علت این موضوع در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد.

۲-۳ مقایسه تغییرات K_{eff} نسبت به تعداد سیکل انجاماد در دو دمای ۵- و ۱۵- درجه سانتی‌گراد در مدهای مختلف بارگذاری

شکل ۳ بیانگر نمونه‌هایی هستند که تحت شرایط بارگذاری و تعداد سیکل انجاماد و ذوب یکسان قرار دارند. تنها تفاوت



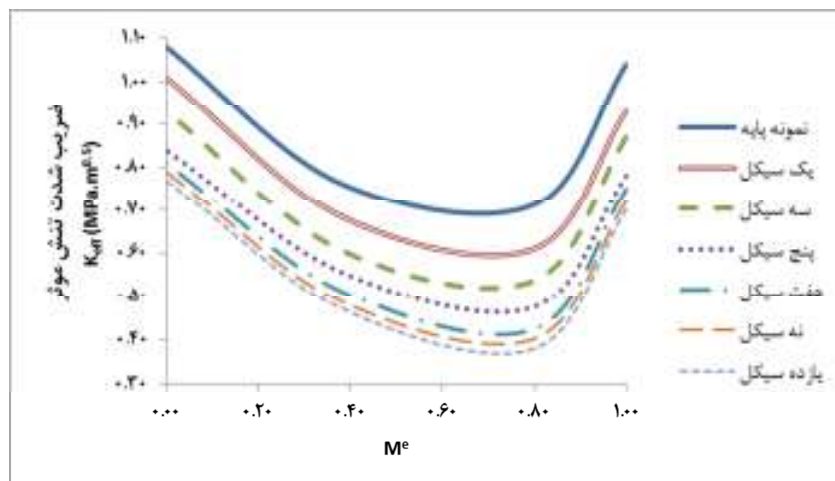


شکل ۳. مقایسه ضریب شدت تنش موثر دو دمای ۵- و ۱۵- در مودهای مختلف بارگذاری

۳-۳- مقایسه ضرایب شدت تنش موثر (Keff) نسبت به M^e در سیکل‌های مختلف

شکل ۴ نشان‌دهنده تغییرات ضرایب شدت تنش موثر نمونه‌های آسفالتی در مودهای مختلف در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همانطور که قابل مشاهده است، مقدار Keff در مودهای ترکیبی کمتر از مودهای خالص می‌باشد که این نکته مبین آن است که نمونه‌های آسفالتی در مودهای ترکیبی ضعیف‌تر عمل کرده و زودتر می‌شکنند. همچنین مقدار

Keff ابتدا کاهش یافته و در اکثر نمونه‌ها به کمترین حد خود در مود ترکیبی با سهم کشش بیشتر می‌رسد و سپس افزایش می‌یابد. موضوع مهم دیگری که در شکل‌ها به خوبی قابل مشاهده است، شدت کاهش Keff در سیکل‌های انجماد و ذوب است. به گونه‌ای که تحت سیکل‌های ابتدایی، نمونه‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار ضریب شدت تنش موثر Keff خواهند داشت، اما تحت سیکل هفتم به بعد شدت این کاهش، کم‌تر می‌شود.



شکل ۴. تغییرات ضرایب شدت تنش موثر نمونه‌های آسفالتی در مودهای مختلف در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش اخیر، به بررسی مشخصات مکانیکی آسفالت تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان پرداخته شد. مشخصات نمونه‌ها شامل جنس مصالح، دانه بندی، نوع قیر و درصد هوا ثابت در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها با استفاده از پمپ خلا اشباع شدند و پس از ۱۲ ساعت ماندن در حمام آب در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد، به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد در چمبر قرار داده شدند تا بدین شکل یک سیکل یخبندان را طی کند. نمونه‌هایی که یک سیکل یخبندان برایشان در نظر گرفته شده بود، در همین دمای ۵- درجه سانتی‌گراد شکسته شدند. بقیه نمونه‌ها هم تعداد ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱ سیکل را تجربه کردند و پس از آن در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد شکسته شدند. نمونه پایه تحت یک سیکل یخبندان و بدون اشباع شدگی، شکسته شد. ۴ مود بارگذاری شامل مد کششی خالص، مد برشی خالص و ۲ مد ترکیبی به نسبت‌های متفاوت کشش و برش مورد آزمایش قرار گرفتند. نرخ بارگذاری به صورت ثابت ۳ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در نهایت مشاهده گردید پس از اعمال ۷ سیکل، سرعت کاهش ضریب

رفتار نمونه‌های آسفالتی در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد هم تقریباً مانند حالت قبل است. یعنی ضرایب شدت تنش با افزایش M^e ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد و هم چنین با افزایش تعداد سیکل انجماد و ذوب، کلیه ضرایب شدت تنش کاهش می‌یابد.

تحت سیکل‌های ابتدایی، نمونه‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای در مقدار ضریب شدت تنش موثر Keff خواهند داشت، اما تحت سیکل هفتم به بعد شدت این کاهش، کم‌تر می‌شود.

تفاوتی که نمونه‌ها در دمای ۱۵- و ۵- با یکدیگر دارند آن است که نمونه‌های شکسته شده در دمای ۱۵- درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های مشابه شکسته شده در دمای ۵- درجه سانتی‌گراد، دارای ضرایب شدت تنش بیشتری هستند. علت این موضوع در قسمت قبل توضیح داده شده است.

- Kim K and El Hussein M., (1997), "Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures", *Construction and building Materials* 11(7-8), pp.403-411.

- Kim K. Kweon S. Doh Y. and Park T., (2003), *Fracture toughness of polymer-modified asphalt concrete at low temperatures*, *Canadian Journal of Civil Engineering* 30(2), pp.406-413.

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

-Majidzadeh K. Buranarom C. and Karakouzian M., (1976), "Application of Fracture Mechanics for Improved Design of Bituminous Concrete Volume 1. Plan of Research, state of The Art, And Mathematical Investigations".

-Pirmohammad S. and Ayatollahi M.,(2014), "Fracture resistance of asphalt concrete under different loading modes and temperature conditions", *Construction and building materials* 53, pp.235-242.

-Pirmohammad S. and Kiani A., (2016), "Effect of temperature variations on fracture resistance of HMA mixtures under different loading modes", *Materials and Structures* 49(9), pp.3773-3784.

-Pirmohammad S. and Kiani A., (2016), "Impact of temperature cycling on fracture resistance of asphalt concretes", *Computers and Concrete* 17(4) pp.541-551.

-Shokrieh M. Heidari-Rarani M. Shakouri M. and Kashizadeh E., (2011), "Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete", *Construction and Building Materials* 25(8), pp.3540-3549.

-T. AASHTO, 269-11, (2011), "Standard method of test for percent air voids in compacted dense and open asphalt mixtures", *American Association of State and Highway Transportation Officials*.

شدت تنش موثر کمتر شد و در این سیکل شاهد کاهش حدود ۲۵ تا ۴۰ درصدی در ضریب شدت تنش موثر در مدهای مختلف نسبت به حالا پایه هستیم. در دمای ۱۵- درجه سانتی گراد نیز شاهد همین روند هستیم و در سیکل ۷ شاهد کاهش حدود ۲۰ تا ۳۰ درصدی در ضریب شدت تنش موثر در مدهای مختلف نسبت به حالا پایه هستیم.

۵- مراجع

-Aliha M, Behbahani H, Fazaali H and Rezaifar (2014), *Study of characteristic specification on mixed mode fracture toughness of asphalt mixtures*, *Construction and Building Materials* 54, pp.623-635.

- Ameri M, Mansourian A. Khavas M. Aliha M and Ayatollahi M., (2011), "Cracked asphalt pavement under traffic loading-A 3D finite element analysis", *Engineering Fracture Mechanics* 78(8), pp.1817-1826.

-Ayatollahi M and Pirmohammad S., (2013), "Temperature effects on brittle fracture in cracked asphalt concretes", *Structural Engineering and Mechanics* 45(1) pp.19-32.

-Ayatollahi M. Aliha M and Saghafi H., (2011), "An improved semi-circular bend specimen for investigating mixed mode brittle fracture", *Engineering Fracture Mechanics* 78(1) pp.110-123.

-Braham A. Buttlar W. and Ni F., (2010), "Laboratory Mixed-Mode Cracking of Asphalt Concrete Using the Single-Edge Notch Beam", *Road Materials and Pavement Design* 11(4) pp.947-968.

-Fakhri M, Farokhi M and Kheiry P (2009), *Modeling of top-down cracking (TDC) propagation in asphalt concrete pavements using fracture mechanics theory*, *Adv Test Charact Bituminous Mater II*, pp.681-692.

- Heidari-Rarani M. Aliha M. Shokrieh M and Ayatollahi M., (2014), "Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings - An experimental study", *Construction and Building Materials* 64(Supplement C), pp.308-315.

Effect of Temperature on Failure Resistance of Asphalt Concrete Mixrute

Mansour Fakhri, Associate Professor, Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
Seyed Ali Siyadati, Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

E-mail: fakhri@kntu.ac.ir

Received: January 2020-Accepted: July 2020

ABSTRACT

Asphalt concrete cracking in cold regions is one of the most critical damages of asphalt surfaces. In addition to the cold in some regions, we also see rain that the combined effect of these two factors causes frozen asphalt. In this case, asphalt damages will drastically increase. In this paper, the fracture resistance in saturated hot mix asphalt samples under the influence of freeze and thaw cycles will be studied. For this purpose, a few asphaltic samples that have similar materials, aggregation and construction conditions were made as SCB, then they were saturated. Then different temperatures (-5 and -15°C) and cycles (1, 3, 5, 7, 9, 11) were applied to them. The effect of these parameters on the critical stress intensity factor was studied in 4 fracture moods: tensile mood,(tensile mode, shear mode and two mix modes). The result of this study shows that by increasing the number of freeze and thaw cycles, the fracture toughness will be reduced significantly. As it is, until the seventh cycle, the decrease of the fracture toughness will be increased significantly, and after the seventh cycle, its severity will be decreased. The other result of this study is that with a temperature drop of -15 ° C, the fracture toughness will be increased.

Keywords: Saturated Asphalt Concrete, Thermal Cracking, Fracture Toughness, Freeze and Thaw Cycles, Pure Mode and Mix Mode