مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۱۲۹-۱۳۵، (یادداشت فنّی)

Research Note

بررسی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با استفاده از آزمایش نیم‌دیسک تحت بار خمشی

حمید بهبهانی (استاد)
محمدرضا محمدعلیها (استادیار)
سمیه آقاجانی شهربور* (دانشجوی کارشناسی ارشد)
حسن آسایش زارچی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

ترک‌های ناشی از دمای پایین، اصلی‌ترین خرابی روسازی‌های آسفالتی در فصل زمستان است. یکی از روش‌های مناسب و متداول برای بهبود خصوصیات عملکردی روسازی‌های آسفالتی، به ویژه در شرایط سرویس‌دهی دمای بالا، به‌کار بردن اصلاح‌کننده‌ها و افزودنی‌هاست. با این حال در مناطق با آب و هوای سرد، که معمولاً روسازی‌جاده‌ها دماهای زیر صفر را تجربه می‌کنند، مکانیسم شکست لایه‌های آسفالتی عمدتاً به دلیل شکست ترد کشسان و رشد ترک‌های آغازشده در درون روسازی اتفاق می‌افتد. از آنجایی که هدف اصلی این مطالعه بررسی اثر افزودنی‌های مختلف شامل: اسید پلی‌فسفریک (PPA)، استایرن ـ بوتادین ـ استایرن (SBS)[1]، آنتی استریپینگ، پودر لاستیک و ساسوبیت در دمای پایین در مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی تحت مود I بوده است، یک سری از نمونه‌های آسفالتی با درصدهای مختلفی از افزودنی‌های ذکرشده ساخته شدند و سپس نمونه‌های آزمایشگاهی در دمای معین زیر صفر درجه‌ی سانتی‌گراد ($-15^\circ C$)، تحت بارگذاری مونوتنیک متقارن با استفاده از فیکسچر خمش سه‌نقطه‌یی قرار گرفتند.

behbahani@iust.ac.ir
mrm_aliha@iust.ac.ir
s_aghajani@civileng.iust.ac.ir
asayesh@civileng.iust.ac.ir

واژگان کلیدی: چقرمگی شکست، SCB، افزودنی، مود I.

۱. مقدمه

تجربیات به‌دست‌آمده از عملکرد روسازی راه‌ها در سال‌های اخیر نشان داده است که این روسازی‌ها پس از مدتی دچار خرابی‌هایی مانند: ترک‌خوردگی، شیارافتادگی در مسیر عبور چرخ‌ها، قیرزدگی، نشست و برخی خرابی‌های دیگر می‌شوند. بروز این خرابی‌ها نه فقط باعث کاهش عمر مفید روسازی (عمر بهره‌برداری از روسازی) و ایمنی استفاده‌کنندگان از راه می‌شود، بلکه باعث افزایش مخارج نگهداری و بهسازی روسازی و همچنین افزایش مخارجی می‌شود که استفاده‌کنندگان از راه به علت خرابی روسازی و اثرات ناشی از آن متحمل می‌شوند. ترک‌های ناشی از دمای پایین در روسازی‌های آسفالتی از جمله پدیده‌های رایج در مناطق سردسیر (که درجه حرارت هوا گاهی به $-10^\circ C$ یا کمتر می‌رسد) است. عوامل مختلفی در بروز ترک‌های ناشی از دمای پایین مؤثر است، ولی می‌توان گفت عامل قیر، مهم‌ترین نقش را در این خصوص به خود اختصاص می‌دهد.[1]

شکل ۱، میزان اثر قیر در ایجاد ترک‌های ناشی از دمای پایین (ترک‌های حرارتی)، شیار جای چرخ و ترک‌های خستگی را نشان می‌دهد، که مطابق آن، قیر در بروز ترک‌های حرارتی (ترک‌های ناشی از دمای پایین) نسبت به سایر خرابی‌ها نقش تعیین‌کننده‌تری دارد.[2]

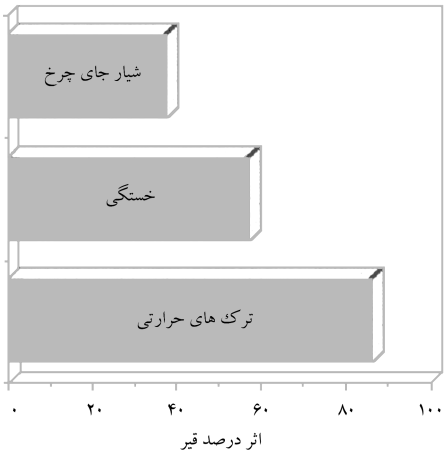
به‌کارگیری قیرهای خالص، نیازهای عملکردی ساخت راه را که به طور فزاینده‌یی در معرض بارهای سنگین، ترافیک سنگین و شرایط محیطی مختلف قرار می‌گیرد، تأمین نمی‌کند. وقتی استفاده از قیر تولیدشده، نیازهای آب و هوایی، ترافیکی و سازه‌یی روسازی را تأمین نکند، اصلاح‌کننده به عنوان یکی از جایگزین‌های قابل قبول برای بهبود خصوصیات آن به‌کار می‌رود. اصلاح‌کننده، راه حلی برای فائق‌آمدن بر خرابی‌های روسازی ناشی از نقص خصوصیات قیر است و در نتیجه عملکرد روسازی بتن آسفالتی را بهبود می‌بخشد.

افزودنی استایرن ـ بوتادین ـ استایرن، پودر لاستیک[2]، اسید پلی‌فسفریک، ساسوبیت[3] و آنتی استریپینگ[4] از جمله افزودنی‌های پرکاربرد در راه‌سازی هستند. پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌ی اصلاح قیر و مخلوط‌های آسفالتی به ویژه در شرایط سرویس‌دهی در دمای پایین انجام شده است.[2و3] با این حال در مناطق با آب و هوای سرد، که معمولاً روسازی‌جاده‌ها دماهای زیر صفر را تجربه می‌کنند، مکانیسم شکست لایه‌های آسفالتی، عمدتاً به دلیل شکست ترد کشسان و رشد ترک‌های

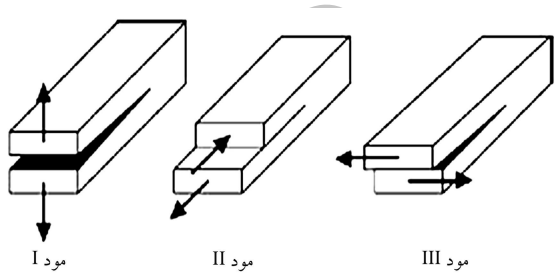
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۳/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱/۲۲، پذیرش ۱۳۹۳/۲/۱۰.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱. نقش قیر در بروز ترک‌های حرارتی، ترک‌های خستگی و شیار جای چرخ.[۲]



شکل ۲. انواع مدهای ترک‌خوردگی تحت بارگذاری‌های مختلف.[۵]

ایجادشده در درون روسازی اتفاق می‌افتد. چقرمگی شکست یکی از مهم‌ترین پارامترها برای تعیین رشد ترک و شکست مواد ترک‌دار و سازه‌هایی مثل روسازی‌های آسفالتی است. تخمین استحکام شکست و رشد ترک در لایه‌ی آسفالتی تحت شرایط بارگذاری اعمالی با استفاده از آزمایش‌های شکست روی آسفالت دارای ترک، امکان‌پذیر است. از آنجا که انجام آزمایش شکست در شرایط واقعی لایه‌ی آسفالتی ترک‌دار، پیچیده و پرهزینه است، لذا بررسی تجربی شرایط رشد ترک و بار بحرانی شکست با استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی مناسب انجام می‌شود. انتخاب این نمونه‌ها باید به‌گونه‌یی باشد که تا حد ممکن شرایط تغییرشکل‌های ایجادشده در لایه‌ی آسفالتی سطح جاده را به خوبی شبیه‌سازی کند تا با محاسبه‌ی آزمایشگاهی بار شکست این نمونه‌ها در شرایط مختلف بارگذاری، بتوان رفتار رشد ترک و مقدار مقاومت شکست در لایه‌ی آسفالتی واقعی را تخمین زد.

نحوه‌ی بازشدن ترک‌ها ناشی از اعمال بارهای وارده در حالت کلی به ۳ مد تقسیم می‌شود (شکل ۲):[۵]

۱. ۱مد بازشوندگی (کششی) (مد I): در این حالت وجوه ترک به سادگی از هم دور می‌شوند. این شکل از گسیختگی، در اثر کشش خالص ناشی از گرادیان حرارتی در عمق لایه‌ها و نیز واردشدن بار ترافیکی بر رأس ترک است.

۲. مد برشی (لغزشی) (مد II): در این حالت وجوه ترک نسبت به هم در جهت عمود بر لبه‌ی ترک می‌لغزند. این مد ناشی از بارگذاری برشی در صفحه‌ی ترک است. در این حالت ترک در اثر تنش‌های برشی حاصل از بارگذاری و عبور ترافیک ایجاد می‌شود و سپس در لایه، گسترش پیدا می‌کند.

۳. مد پارگی (مد III): این مد ناشی از نیروی برشی اعمالی در صفحه‌ی خارج از سطح ترک است.

پژوهش‌های گسترده‌یی در زمینه‌ی مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی، با استفاده از مفاهیم انرژی شکست و ضریب شدت تنش، با به‌کارگیری روش‌های عددی، مدل‌سازی و آزمایشگاهی توسط پژوهشگران انجام شده است.[۵]

دانشگاه دلف پیشگام آزمایش نیم‌دیسک (SCB)[۵] در مخلوط‌های آسفالتی گرم است. پژوهشگران بسیاری برای انجام آزمایش‌های شکست از نمونه‌های SCB استفاده کرده‌اند.[۶-۸] نمونه‌های نیم‌دیسک تحت بار خمشی با ترک لبه‌یی، به دلیل امکان تهیه‌ی ساده و آسان توسط دستگاه تراکم مارشال یا ژیراتوری[۶] و یا مغزه‌های به‌دست آمده از سطح جاده‌ها، نمونه‌های مناسب‌تری برای انجام آزمایش‌های شکست درمخلوط‌های آسفالتی هستند.

برخی پژوهشگران مطالعاتی نیز در زمینه‌ی بررسی اثر مشخصات مخلوط آسفالتی شامل: نوع قیر، دانه‌بندی و جنس مصالح سنگی، درصد فضای خالی، تغییرات دمایی و شرایط بارگذاری در مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی انجام داده‌اند.[۹] نکته‌ی مهم آنکه در مطالعات صورت‌گرفته کمتر به رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده توجه شده است. این در حالی است که استفاده از افزودنی‌ها، یکی از روش‌های مؤثر در بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالا و پایین است. با وجود این، با توجه به اثرات متفاوت افزودنی‌ها در رفتار ارتجاعی لزج قیر، بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده به خصوص در دمای پایین حائز اهمیت است. این پژوهش با هدف بررسی رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده در شرایط مختلف بارگذاری تحت مدهای کشش خالص انجام شده است.

بر این اساس از استایرن ـ بوتادین ـ استایرن، ساسوبیت، پودر لاستیک، آنتی استریپینگ، اسید پلی‌فسفریک به‌عنوان مهم‌ترین افزودنی‌های مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی گرم و نیمه‌گرم استفاده شده است. این تذکر لازم است که مجموع افزودنی‌ها به جز پودر لاستیک در پروژه‌های اجرایی روسازی کشور ایران مورد استفاده قرار گرفته است. مصالح سنگی و نوع قیر مصرفی نیز با توجه به کاربرد وسیع آن در ایران انتخاب شده است.

۲. مشخصات مصالح سنگی و قیر

در این پژوهش به منظور ساخت نمونه‌های آسفالتی از قیر خالص ۶۰/۷۰ تولیدی پالایشگاه تهران به‌عنوان قیر پایه، مصالح سنگی آهکی معدن اسب چران دماوند و دانه‌بندی شماره ۴ آیین‌نامه‌ی روسازی راه (نشریه‌ی ۲۳۴) با بزرگ‌ترین اندازه‌ی اسمی مصالح ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شده است، که دانه‌بندی آن در جدول ۱ ارائه شده است. قیر مصرفی مورد استفاده نیز قیر خالص با درجه‌ی نفوذ ۶۰/۷۰ بوده است، که نوع و خصوصیات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

۳. مشخصات افزودنی‌های مصرفی

در این پژوهش به منظور بررسی اثر اصلاح‌کننده‌های مختلف در میزان مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در مقابل ترک‌های برودتی از ۵ نوع افزودنی شامل: ۱. استایرن ـ بوتادین ـ استایرن (SBS) جدول ۳، ۲. پودرلاستیک، ۳. ساسوبیت، ۴. اسید پلی‌فسفریک (Starphos ۰۴) و ۵. آنتی استریپینگ(Stardope ۱۳۰P) استفاده شده است، که مشخصات کامل آن‌ها در ادامه توضیح داده شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. مشخصات دانه‌بندی مورد استفاده در تهیه‌ی نمونه‌های آسفالتی.

اندازه‌ی الک	درصد وزنی ردشده از هر الک	دامنه‌ی مجاز درصد وزنی رد شده از هر الک
۱۹ میلی‌متر (۳/۴ اینچ)	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵ میلی‌متر (۱/۲ اینچ)	۹۵	۹۰-۱۰۰
۹ میلی‌متر (۳/۸ اینچ)	--	—
۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)	۵۹	۴۴-۷۴
۲/۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)	۴۳	۲۸-۵۸
۱/۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)	--	—
۰/۵ میلی‌متر (شماره ۳۰)	--	—
۰/۳ میلی‌متر (شماره ۵۰)	۱۳	۵-۲۱
۰/۱۵ میلی‌متر (شماره ۱۰۰)	--	—
۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)	۶	۲-۱۰

جدول ۲. مشخصات قیر مصرفی.

خصوصیات	قیر ۶۰/۷۰	روش آزمایش
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۰۳	ASTM D-۷۰
درجه‌ی نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۶۲	ASTM D-۵
نقطه‌ی نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۴۹	ASTM D-۳۶
خاصیت انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱۰۰	ASTM D-۱۱۳
نقطه‌ی اشتعال	۳۰۸	ASTM D-۹۲
نقطه‌ی احتراق	۳۱۷	ASTM D-۷۰

جدول ۳. مشخصات SBS.

پلیمر	نوع	شرکت سازنده	ساختار مولکولی	درصد استایرن
SBS	Carl Prene ۵۰۱	dynasol	خطی	۳۱

۱.۳. استایرن ـ بوتادین ـ استایرن (SBS)

روش اختلاط به این ترتیب بود که ابتدا قیر تا دمای ۱۵۰°C گرم و بعد از آن به مدت ۱۰ دقیقه با دورکم با پلیمر SBS مخلوط شد تا اختلاط اولیه‌ی قیر و پلیمر انجام شود. سپس دمای قیر به ۱۸۰°C افزایش یافت و پلیمر SBS و قیر با استفاده از مخلوطکن با برش زیاد (۶۰۰۰ دور بر دقیقه) به مدت ۴۰ دقیقه با هم ترکیب شدند. مقدار SBS انتخاب‌شده در این پژوهش برابر ۴٪ وزنی قیر مصرفی بود.[۱۰]

۲.۳. پودر لاستیک

هنگام اختلاط پودر لاستیک با قیر، ذرات پودر لاستیک مقداری از روغن‌های سبک و آروماتیک[۷] قیر را جذب می‌کنند و تا چند برابر متورم می‌شوند، که این فرایند در عملکرد قیر تأثیر می‌گذارد و خواص آن را تغییر می‌دهد. مقدار تورم ذرات پودر لاستیک به شکل سطح ذرات و روش آسیاب‌کردن پودر لاستیک بستگی دارد. در این مطالعه از پودر لاستیک مش ۴۰ استفاده و دانه‌بندی آن در جدول ۴ ارائه شده است.

در این پژوهش از ۱۰٪ پودر لاستیک خردشده در دمای محیط استفاده شده است. قیر لاستیکی با استفاده از روش تر و با استفاده از مخلوطکن برش بالا (۶۰۰۰ دور در دقیقه) در دمای تقریبی ۱۷۵°C تهیه و به مدت ۱۲۰ دقیقه عمل اختلاط انجام شده است.[۱۱]

جدول ۴. دانه‌بندی پودر لاستیک مش ۴۰.

رد شده (٪)	مانده (٪)	اندازه‌ی الک (μm)
۱۰۰	۰	۳۰ (۶۰۰)
۹۱/۸	۸/۲	۴۰ (۴۲۵)
۵۸/۸	۳۳	۵۰ (۳۰۰)
۱۱/۳	۴۷/۵	۱۰۰ (۱۵۰)
۰	۱۱/۳	۲۰۰ (۷۵)

۳.۳. ساسوبیت

در این پژوهش از ساسوبیت گرانولی به میزان ۲/۵٪ وزن قیر استفاده شده است، که در دمای ۱۳۰°C به مدت ۱۰ دقیقه با مخلوطکن با برش پایین عمل اختلاط انجام شده است. استفاده از این افزودنی باعث افزایش نقطه‌ی نرمی و کاهش نفوذپذیری قیر اصلاح‌شده می‌شود.[۱۱]

۴.۳. اسید پلی‌فسفریک

Starphos، یک افزودنی براساس اسید پلی‌فسفریک است که به منظور اصلاح خواص شیمیایی قیر به کار می‌رود و باعث بهبود خواص رئولوژیکی[۸] قیر می‌شود. این افزودنی که توسط شرکت starasphalt ابداع شده است، نقطه‌ی نرمی قیر را افزایش و درجه‌ی نفوذ قیر را کاهش می‌دهد.[۱۱] اختلاط قیر با اسید پلی‌فسفریک، به علت مایع‌بودن آن و عدم نیاز به ذوب و شکسته‌شدن آن در حین اختلاط، مستلزم دما و زمان کمتری است. در این پژوهش مقدار ماده‌ی مصرفی برابر ۱٪ وزن قیر انتخاب و در دمای ۱۶۰°C به مدت ۶۰ دقیقه عمل اختلاط در مخلوط کن انجام شده است.[۱۱]

۵.۳. ماده‌ی ضد عریان‌شدگی

ماده‌ی ضد عریان‌شدگی (stardope ۱۳۰p)، تأمین‌کننده‌ی چسبندگی فوق‌العاده بین قیر و مصالح است، که ناشی از ایجاد پیوندهای هیدروژنی قوی است. این عمل نه فقط برروی مصالح اسیدی از قبیل: کوارتزها، گرانیت‌ها، سنگ‌های آذرین و عمده‌ی سیلیکات‌ها (به دلیل بارهای منفی سطح آن‌ها ناشی از یون است و جاذب رطوبت هستند)، بلکه بر روی مصالح با منشاء بازی (همانند: دولومیت، سنگ آهک، و غیره است که عمدتاً پایه‌ی کربنی دارند) نیز که از یون‌های با بار مثبت تشکیل شده‌اند، انجام می‌گیرد. stardope۱۳۰p با استفاده از مشتقات مواد فسفری تهیه و توسط شرکت starasphalt ابداع شده است. در این آزمایش مقدار ماده‌ی مصرفی برابر ۰/۴٪ مقدار قیر انتخاب و در دمای ۱۴۵°C با برش پایین به مدت ۳۰ دقیقه در مخلوطکن، عمل اختلاط انجام شده است.[۱۱]

۴. روش آزمایش

مراحل انجام کارهای آزمایشگاهی بدین شرح بوده است:

Archive of SID
www.SID.ir

۱.۴. ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

به منظور ایجاد شرایط یکسان در ساخت نمونه‌ها و بررسی اثر تراکم مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده در ساخت کلیه‌ی نمونه‌های مورد آزمایش از ۱٪ قیر بهینه‌ی ثابت (معادل ۴٫۸٪ وزنی مخلوط آسفالتی) که حاصل از طرح اختلاط مخلوط آسفالتی اصلاح‌نشده به روش مارشال بوده است، استفاده شده است. مقادیر ۳ و ۷ درصد فضای خالی به منظور بررسی اثر درصد فضای خالی در مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی مد نظر این پژوهش بوده است. به منظور دستیابی به این میزان فضای خالی، از دستگاه متراکم‌کننده‌ی چرخشی ژیراتوری با انرژی‌های تراکم متفاوت استفاده شده است. براساس سعی و خطای انجام‌شده، میزان فضای خالی موردنظر نمونه‌های آسفالتی، با تقریب ۱ ± ٪، در ۳۰ و ۹۰ چرخش ژیراتوری حاصل شده است.

شعاع نمونه‌ها ۱۵۰ mm و ارتفاع‌شان به طور تقریبی برابر ۱۳۰ mm به‌دست آمده است. نمونه‌های استوانه‌یی ساخته‌شده در ۳ مرحله تحت برش قرارگرفتند. در مرحله‌ی اول، نمونه‌های استوانه‌یی به دیسک‌هایی با ضخامت ۳۰ mm برش داده شدند. مرحله‌ی دوم، شامل عملیات برش تبدیل دیسک‌های دایره‌یی به نیم‌دیسک بود. جهت برش نمونه‌های آسفالتی، دستگاه برش با دیسک گردان یا اره‌ی آتشی مورد استفاده قرار گرفته است، که به دلیل برش با سطح هموار و حذف گرمای ایجادشده هنگام برش توسط پاشیدن آب مناسب است. در مرحله‌ی سوم، بعد از آماده‌شدن قطعات نیم‌دیسکی، ترک‌های لبه‌یی بر روی آن‌ها ایجاد شده است. در این مرحله بر روی قطعات نیم‌دایره‌یی با استفاده از تیغه با ضخامت کم، ترک‌هایی به طول ۲ cm ایجاد شده است. در شکل ۳ نمایی از مراحل ساخت مشاهده می‌شود.

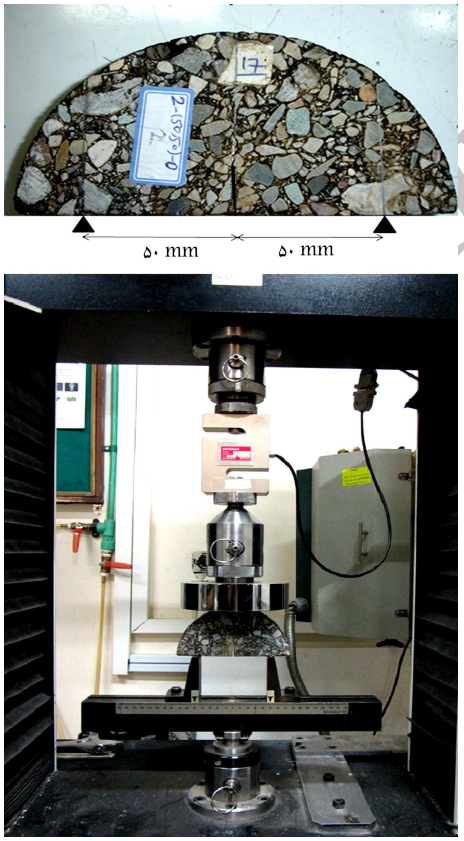
۲.۴. آزمایش چقرمگی شکست

چقرمگی شکست، یک خاصیتی مکانیکی است که میزان مقاومت در مقابل شکست ناگهانی یا سریع مواد را در حضور ترک بیان می‌کند. بنابراین روسازی‌های آسفالتی باید دارای سطحی از چقرمگی شکست باشند، که در مقابل تنش‌های وارده در دامنه‌ی دماهای مختلف، که روسازی‌های آسفالتی در معرض آن قرار می‌گیرند، مقاوم باشند. آزمایش‌ها در دمای $-۱۵^{\circ}C$ انجام شده‌اند. به منظور انجام آزمایش‌ها و به‌دست‌آوردن منحنی بار ـ جابجایی، قطعات آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه Universal با ظرفیت ۱۵ تن تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌یی قرار گرفتند. در این پژوهش، کلیه‌ی بارگذاری‌ها به‌صورت استاتیکی و با نرخ ۳ mm/min انجام شده است. شکل ۴، نحوه‌ی بارگذاری را نشان می‌دهد. پس از بارگذاری با نرخ مذکور، نتایج بار ـ جابجایی مربوط به هر قطعه توسط دستگاه ثبت شده است.

نمونه‌یی از منحنی‌بار ـ جابجایی به‌دست‌آمده در شکل ۵ مشاهده می‌شود، که رابطه‌ی خطی به‌دست‌آمده میان بار و جابجایی، نشان از خطی و تُرد بودن رفتار ماده‌ی آسفالتی در دمای $-۱۵^{\circ}C$ است. در این حالت، مقادیر چقرمگی شکست هر نمونه از بار بحرانی شکست به‌دست‌آمده قابل محاسبه است.

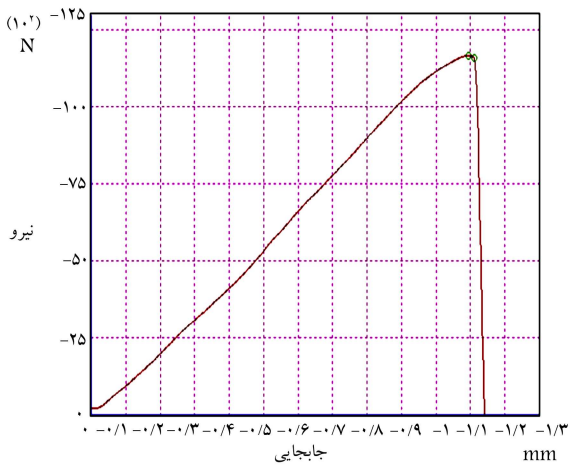
پس از تهیه‌ی نمونه‌ها به تعداد ۳ عدد برای هر آزمایش، نمونه‌ها در فریزر به دمای آزمون $-۱۵^{\circ}C$ رسیدند و تحت بارگذاری سه‌نقطه‌یی در دستگاه فشار قرار گرفتند و در این حالت بارگذاری، تکیه‌گاه‌های پایین به‌صورت متقارن نسبت به ترک، که دقیقاً در وسط لبه‌ی پایینی بود، قرارگرفتند (شکل ۶). بار شکست بحرانی نمونه‌ها ثبت و نهایتاً ضرایب شدت تنش بحرانی آن‌ها (K_{IC})، مطابق رابطه‌ی ۱، محاسبه شدند.[۱۲]

شکل ۳. نمایی از مراحل ساخت.

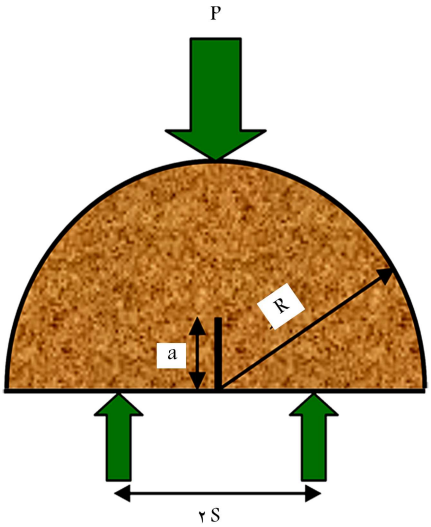


شکل ۴. نمایی از نحوه‌ی بارگذاری.

www.SID.ir



شکل ۵. منحنی بار ـ جابجایی یکی از نمونه‌های آزمون‌شده‌ی آسفالت.



شکل ۶. مشخصات هندسی نمونه.

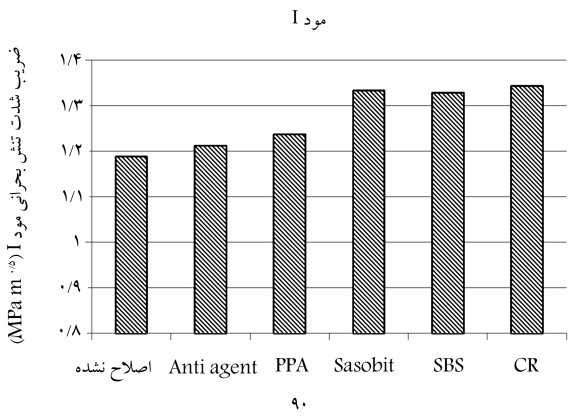
$$K_{IC} = \frac{P_{cr}}{۲Rt}\sqrt{\pi a}\,Y_I(a/R, S/R) \qquad (۱)$$

که در آن، R شعاع نمونه‌ها و مقدار آن برابر ۷۵ mm است؛ a طول ترک و برابر ۲۰ mm است؛ t ضخامت نمونه‌ها و برابر ۳۰ mm است؛ P_{cr} بار بحرانی شکست است و از نتایج آزمون‌ها مشخص می‌شود. مقدار $Y_۱$ مقدار ضریب شکل است، که به مقدار a/R و S/R بستگی دارد. در این نوع بارگذاری که در مود I انجام شده است، مقدار $Y_۱$ طبق مطالعات انجام‌شده،[۱۳] برابر ۳/۷۳۴ تعیین شده است. بدین ترتیب مقدار چقرمگی شکست برای نمونه‌های مختلف محاسبه شده است.

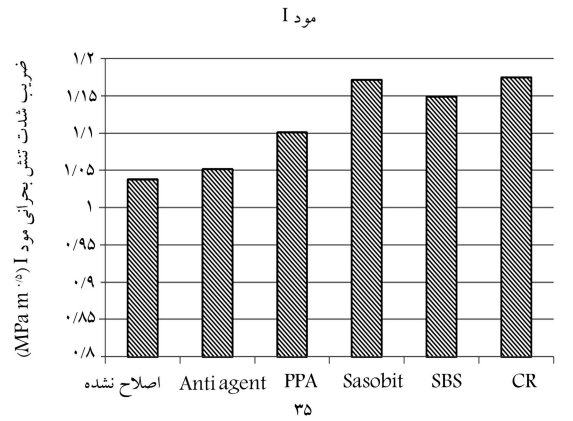
۵. نتایج و تحلیل

به منظور مقایسه‌ی مقاومت در مقابل شکست نمونه‌های آسفالتی با مشخصات مختلف، نتایج به‌صورت نمودار میله‌یی نشان داده شده‌اند. مخلوط‌های با افزودنی‌های مختلف به‌صورت نام‌گذاری‌های ذیل در نمودارها آمده‌اند، که عبارت‌اند از:

Anti agent: مخلوط آسفالتی با افزودنی آنتی‌استریپینگ، PPA: مخلوط آسفالتی با افزودنی اسید پلی‌فسفریک، CR: مخلوط آسفالتی با افزودنی پودر



شکل ۷. چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی، تحت تراکم ۳۵ دور.



شکل ۸. چقرمگی شکست نمونه‌های آسفالتی، تحت تراکم ۹۰ دور.

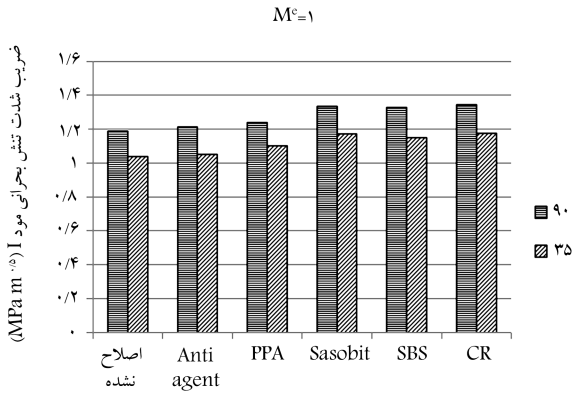
لاستیک، SBS: مخلوط آسفالتی با افزودنی استایرن ـ بوتادین ـ استایرن، Sasobit: مخلوط آسفالتی با افزودنی ساسوبیت، و اعداد ۳۵ و ۹۰ تعداد دور تراکم ژیراتوری را بیان می‌کنند.

بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌های ساخته‌شده تحت بارگذاری مود I، نتایج حاصل بیان‌گر این نکته است که مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده تحت بارکششی، بهتر از آسفالت اصلاح‌نشده عمل کرده‌اند یا به عبارتی چقرمگی شکست مخلوط‌های اصلاح‌شده، بزرگ‌تر از چقرمگی مخلوط‌های اصلاح‌نشده بوده است. از بین مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده، نمونه‌هایی که در آن‌ها پودر لاستیک استفاده شده بود، بیشترین چقرمگی شکست را نشان دادند. بعد از آن، به ترتیب مخلوط‌های آسفالتی دارای ساسوبیت و همچنین استایرن ـ بوتادین ـ استایرن، بیشترین مقاومت شکست را داشتند. نمونه‌های حاوی آنتی استریپینگ و اسید پلی‌فسفریک نیز نسبت به آسفالت اصلاح‌نشده، چقرمگی شکست بیشتری داشتند و این مقدار برای اسید پلی‌فسفریک بیشتر از آنتی استریپینگ بوده است. شکل‌های ۷ و ۸ مقدار چقرمگی شکست نمونه‌های مختلف را تحت تراکم ۹۰ و ۳۵ دور ژیراتوری نشان می‌دهد. این تذکر لازم است که این ترتیب در هر دو حالت تراکم برقرار بوده است.

مقاومت زیاد مخلوط‌های اصلاح‌شده با پودر لاستیک در برابر شکست، بیان‌گر قابلیت ذخیره‌سازی انرژی این مخلوط آسفالتی است، زیرا تورم قیر در اثر واکنش ذرات پودر لاستیک با قیر از طریق جذب اجزاء آروماتیک قیر باعث بهبود خصوصیات قیر در دمای پایین می‌شود.

SBS نیز از جمله الاستومرهای پرکاربرد در راه‌سازی است، که باعث بهبود

Archive of
www.SID.ir



شکل ۹. تأثیر مقدار تراکم در مقدار چقرمگی شکست.

خصوصیات قیر در دمای پایین می‌شود. وجود بلوک‌های بوتادین در این پلیمر به قیر خاصیت کشسان می‌دهد. مخلوط‌های اصلاح‌شده با این پلیمر، قابلیت جذب انرژی بیشتری را دارند، که می‌تواند دلیل افزایش چقرمگی شکست مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با SBS تلقی شود.

ساسوبیت و یا تمام افزودنی‌های واکسی باعث سخت‌ترشدن مخلوط‌های آسفالتی می‌شوند و در محدوده‌ی دمای عملکردی خود، مقدار بار بیشینه‌ی بیشتری نشان می‌دهند. از آنجایی که پارامتر K_C مقاومت مخلوط را در ابتدای شروع رشد ترک نشان می‌دهد و ساسوبیت نیز باعث افزایش بار بیشینه می‌شود، بنابراین مقدار چقرمگی شکست افزایش می‌یابد.

بنابراین اصلاح‌کننده‌های مذکور می‌توانند عمر روسازی را در مناطق سردسیر افزایش دهند. با توجه به افزایش قیمت قیر و یا به عبارتی مخلوط آسفالتی، با طولانی‌شدن عمر روسازی، استفاده از اصلاح‌کننده‌ها از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است و افزودنی‌هایی همچون: ساسوبیت، اسید پلی‌فسفریک و آنتی استریپینگ به دلیل اختلاط راحت‌تر با قیر و مصالح سنگی می‌توانند در پروژه‌های اجرایی مد نظر قرار گیرند.

مطابق شکل ۹، با افزایش مقدار تراکم یا به عبارتی با کاهش درصد فضای خالی مقدار مقاومت نمونه‌ها در برابر شکست افزایش یافته است که هم برای حالت اصلاح‌نشده و هم اصلاح‌شده‌ها برقرار بود. علت این امر آن است که مخلوط‌های با درصد فضای خالی کمتر، ساختاری با دانه‌بندی متراکم‌تر و همگن‌تر دارند و این مقدار هوای کم به علت توزیع مناسب در بین مصالح سنگی، مقدار تمرکز تنش را در مخلوط آسفالتی کاهش می‌دهد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر افزودنی‌های مختلف در مقاومت شکست مخلوط‌های آسفالتی بررسی و این نتایج حاصل شده است:

- مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده، مقادیر چقرمگی شکست بالایی نسبت به مخلوط‌های اصلاح‌نشده داشته‌اند.
- از بین مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده، مخلوط حاوی پودر لاستیک بیشترین مقدار و مخلوط حاوی آنتی استریپینگ کمترین مقدار را نتیجه داده است.
- با افزایش مقدار تراکم، مقدار چقرمگی شکست افزایش یافته است.

پانوشت‌ها

1. Styrene- Butadiene-Styrene(SBS)
2. crumb rubber (CR)
3. Sasobit
4. Anti-Stripping
5. semi-circular bend
6. gyratory compactor
7. Aromatic
8. Rheological

منابع (References)

1. Hass, R.C.G. and Phang, W.A. "Relationships between mix characteristics and low-temperature pavement cracking", *Association of Asphalt Paving Technologists Proc.,* **57**, pp. 290-319 (1988).
2. Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Cominsky, R.J., Hughes, C.S., Von Quintus, H. and Moulthrop, J.S. "Superior performing asphalt pavements (superpave)", National Research Council, Washington, DC (1994).
3. Sengoz, B. and Isikyakar, G. "Analysis of SBS polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods", *Journal of Hazardous Materials,* **150**(2), pp. 424-432 (2008).
4. Edwards, Y., Tasdemir, Y. and Isacsson, U. "Influence of commercial waxes and polyphosphoric acid on bitumen and asphalt concrete performance at low and medium temperatures", *Materials and Structures,* **39**(7), pp. 725-737 (2006).
5. Kim, H., Wagoner, M.P. and Buttlar, W.G. "Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single-edge notched beam test", *Materials and Structures,* **42**(5), pp. 677-689 (2009).
6. Broek, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherland (1991).
7. Li, X.J. and Marasteanu, M.O. "Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete", *Proceedings of the Society for Experimental Mechanics,* Inc., **50**(7), pp. 867-876 (2010).
8. Liu, J. "Low temperature cracking evaluation of asphalt rubber mixtures using semi-circular bending test", *Advanced Materials Research,* **243-249**, pp. 4201-4206 (2011).

Archive of SID
www.SID.ir

9. Li, X.J. and Marasteanu, M.O. "Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete", *Proceedings of the Society for Experimental Mechanics,* Inc., **50**(7), pp. 867-876 (2010).

10. Vural, K.B. and Colak, H. "Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, **25**(8), pp. 3204-3212 (2011).

11. Fazaeli, H., Amini, A.A., Moghadas Nejad, F. and Behbahani, H. "Rheological properties of bitumen modified with a combination of Fischer–Tropsch paraffin wax (Sasobit®) and other additives", EATA Conference (2013).

12. Ayatollahi, M.R. and Aliha, M.R.M. "Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading", *Computational Materials Science,* **38**(4), pp. 660-670 (2006).

13. Aliha, M.R.M,, Ayatollahi, M.R., Smith, D.J. and Pavier, M.J. "Geometry and size effects on fracture trajectory in a limestone rock under mixed mode loading", *Engineering Fracture Mechanics*, **77**(11), pp. 2200-2212 (2010).

Archive of SID

www.SID.ir