Available in: http://jips.ippi.ac.ir

Iranian Journal of Polymer Science and Technology
Vol. 24, No. 6, 467-479
February - March 2012
ISSN: 1016-3255

Polymer-Modified Bitumen Production Based on Performance Grade for Application in Different Zones of Iran

Mehdi Shahabi[1], Fereydon Moghadas Nejad*[2], and Sholeh Kazemifard[3]

1. Road and Transportation Ministry, P.O. Box: 7514654317, Boushehr, Iran

2. Department of Civil and Environment Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran

3. Faculty of Science, Islamic Azad University, Shahre-Rey Branch, P.O. Box: 18155-144 , Tehran, Iran

Received 24 August 2011, accepted 31 January 2012

ABSTRACT

Due to performance grade (PG) zonation of different parts in Iran and poor properties of 60/70 penetration grade bitumens for pavement applications, suitable polymer modified bitumen was produced. To fulfill this purpose, different PMBs samples were produced using 60/70 penetration grade bitumen and various percentages of VB (20 and 25%), with different percentages of SBS Calprene C501 (4, 4.5, 5 and 5.5%), in a high shear homogenizer in 1 h mixing time at 160°C temperature. To determine the performance grade, aging effect, low temperature performance and rheological properties such as evaluation of rutting and fatigue factors some SHRPs measurements (DSR, RV, RTFOT, PAV and BBR) were conducted. The results showed that the sample with 5.5% SBS with 20 and 25% VB, at high temperatures presented good properties such as: the best performance grade (76°C), the highest resistance and elastic behavior in comparison with the other samples. These samples were subjected to rutting and fatigue tests for both aged bitumen in RTFOT and unaged bitumen. The results indicated that adding SBS to bitumen could not improve the performance at low temperatures, compared to 60/70 grade bitumen, but it did improve the properties of polymer-modified bitumen at similar low temperature (-18°C). So, samples with 4, 4.5 and 5% SBS with 20 and 25% VB, are suitable to be applied in provinces which 60/70 grade bitumens are not suitable. In some provinces such as Khoozestan, with a PG of 76, the compositions with 5.5% SBS with 20 and 25% VB, are found to be suitable.

Key Words:
Styrene-butadiene-styrene,
Vacumm bottom residue,
modified bitumen,
performance grade,
SHRP tests

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: moghadas@aut.ac.ir

قابل دسترس در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

تولید قیرهای اصلاح شده پلیمری براساس درجه کارایی برای کاربرد در مناطق مختلف ایران

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و چهارم، شماره ۶،
صفحه ۴۷۹-۴۶۷، ۱۳۹۰
ISSN: 1016-3255

مهدی شهابی*[۱]، فریدون مقدس نژاد[۲]، شعله کاظمی فرد[۳]

۱ـ بوشهر، وزارت راه و شهرسازی، اداره کل حمل و نقل، صندوق پستی ۷۵۱٤٦٥٤۳۱۷
۲ـ تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، صندوق پستی ٤٤۱۳-۱۵۸۷۵
۳ـ تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرری، صندوق پستی ۱٤٤-۱۸۱۵۵

دریافت: ۹۰/٦/۲، پذیرش: ۹۰/۱۱/۱۱

چکیده

در این مطالعه، با توجه به پهنه‌بندی درجه کارایی مناطق مختلف کشور و ضعف کارایی قیر ٦۰/۷۰ برای استفاده در روسازی‌ها، قیر پلیمری تولید شده است. در این راستا، نمونه‌های مختلف از قیر اصلاح شده پلیمری به وسیله قیر پایه با درجه نفوذ ٦۰/۷۰، درصدهای متفاوت VB (۲۰ و ۲۵ درصد)، به همراه درصدهای مختلف پلیمر SBS Calprene C501 (٤، ٤/۵، ۵ و ۵/۵ درصد)، در همگن‌ساز با برش زیاد به مدت h ۱ در دمای °C ۱٦۰ تولید شدند. به منظور تعیین درجه کارایی، آثار پیرشدگی، عملکرد دمای پایین، خواص ریولوژیکی مانند بررسی پارامترهای شیارشدگی و خستگی روی نمونه‌های ساخته شده، آزمون‌های شارپ از قبیل BBR، PAV، RTFOT، RV و DSR انجام شد. نتایج نشان می‌دهد، نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS به همراه ۲۰ و ۲۵ درصد VB در دماهای بالا بهترین درجه کارایی (۷٦ درجه) و بیشترین مقاومت و رفتار کشسانی را در میان نمونه‌های ساخته شده دارند. هم‌چنین نمونه‌های مزبور شرایط پارامتر شیارشدگی و خستگی را برای هر دو ترکیب قیر پیرشده در RTFOT و قیر پیرنشده برآورده می‌سازند. در دماهای پایین اگر چه افزایش SBS به قیر باعث افزایش دمای کاربری قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر ٦۰/۷۰ نمی‌شود، اما در همان دما (°C ۱۸-) خواص قیرهای اصلاح شده را به مراتب بهبود می‌بخشد. بنابراین، درصدهای ٤، ٤/۵ و ۵ درصد SBS به همراه ۲۰ و ۲۵ درصد VB برای مناطقی قابل استفاده هستند که قیر ٦۰/۷۰ جوابگوی نیاز روسازی آنها نیست. در استان خوزستان که در این پهنه‌بندی دارای درجه کارایی ۷٦ در دمای بالاست، قیرهای ساخته شده با ترکیب ۵/۵ درصد SBS به همراه ۲۰ و ۲۵ درصد VB مناسب‌اند.

واژه‌های کلیدی

استیرن ـ بوتادی‌ان ـ استیرن،
پسماند برج تقطیر در خلاء،
قیر اصلاح شده،
درجه کارایی،
آزمون‌های شارپ

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
moghadas@aut.ac.ir

مقدمه

امروزه، افزایش عوامل ترافیکی از قبیل بارهای سنگین‌تر، حجم ترافیک بیشتر، فشار بیشتر ناشی از چرخ‌ها به اضافه شرایط محیطی و آب و هوایی سبب شده خرابی‌هایی نظیر شیارشدگی در دمای بالا، ترک‌های انقباضی در دمای پایین، خستگی در دمای متوسط، ساییدگی، روزدگی و پیرشدگی که سبب کاهش کیفیت و عملکرد روسازی‌ها می‌شود، بروز پیدا کند [۹-۱].

بر همین اساس در آمریکا طرحی به نام شارپ (strategic highway research program, SHRP) تعریف شد که هدف اصلی آن توسعه روش‌های جدید بر مبنای کارایی و عملکرد خواص قیر در راه‌سازی بود و به نام سامانه درجه کارایی (performance grade, PG) نام‌گذاری شد. این سامانه بر دو روش آزمایشی یکی تشخیص قیر در محدوده دمایی بالا و دیگری در محدوده دمایی پایین استوار بود. این قیر، PG H-L نامیده می‌شود که H محدوده دمایی بالا و L محدوده دمایی پایین است [۱۰]. بر اساس پژوهش‌های شارپ ۵۰ درصد از خرابی‌های اشاره شده مربوط به آثار قیر است [۱۱].

به منظور دست‌یابی به خواص مکانیکی بهتر، دوام بیشتر و اصلاح خواص ریولوژیکی قیرهای پایه و نیز برای غلبه بر خرابی‌ها و به تأخیر انداختن آنها، افزودنی‌های پلیمری زیادی توسط پژوهشگران استفاده شده است که کاربرد آنها به اوایل دهه ۷۰ میلادی برمی‌گردد [۱۵-۸،۱۲-۱]. اما فقط تعداد اندکی از پلیمرها با مقادیر تقریبا کمی در حدود ۲ تا ۸ درصد وزنی هستند که از نظر کارایی و قیمت رضایت بخش‌اند. در میان این پلیمرها SBS یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین نوع پلیمر است که از سوی پژوهشگران برای اصلاح خواص قیر استفاده شده است [۱،۱۶،۱۷].

یافته‌های پژوهش خدایی و همکاران با عنوان ارزیابی تغییر شکل دایمی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح نشده و اصلاح شده با SBS با استفاده از آزمایش خزش دینامیکی نشان داد، ۵ درصد پلیمر SBS بهترین اثر را بر بهبود مقاومت تغییر شکل دایمی مخلوط‌های آسفالتی نسبت به ٤ و ٦ درصد پلیمر SBS نشان می‌دهد [۱۵].

Sengoz و همکاران خواص و ریزساختار قیرهای اصلاح شده پلیمری با SBS و EVA را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که خواص مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی تخلیه شده از قیرهای اصلاح شده پلیمری با SBS، با افزایش درصد پلیمر افزایش می‌یابد [٤]. Yildrim در مقاله‌ای با عنوان قیرهای اصلاح شده پلیمری اثر پلیمرهای SBS، SBR و EVA را بررسی کرد. یافته‌های وی نشان می‌دهد، SBS به علت سازگاری و مقاومت کششی بهتر تحت کرنش، در حال جای‌گزین شدن به جای پلیمر SBR است. هم‌چنین اشاره می‌کند، SBS کشسانی قیر را افزایش می‌دهد و قیرهای اصلاح شده با SBS می‌توانند بازیافت شوند. در دماهای پایین، قیرهای اصلاح شده با SBS در مقایسه با قیرهای پایه و نیز قیرهای اصلاح شده‌ای که از لحاظ شیمیایی با پلیمرها واکنش نشان می‌دهند، کارایی بهتری دارند [۱۸]. Navarro و همکاران اصلاح قیر با پلیمرهای واکنش‌پذیر از قبیل MDI-PEG و واکنش‌ناپذیر نظیر EVA، SBS و LDPE را مطالعه کردند. نتایج نشان می‌دهد، پلیمرهای واکنش‌ناپذیر اساسا در دماهای سرویس‌دهی بالا، خواص ریولوژیکی قیر را بهبود می‌بخشند. نمونه قیرهای اصلاح شده با پلیمرهای گرمانرم در دمای پایین به مقدار قابل توجهی مدول گرانروکشسانی خطی را افزایش می‌دهند [۱۹].

Fernandes و همکاران خواص ریولوژیکی قیرهای اصلاح شده پلیمری را ارزیابی کردند. آنها در این پژوهش، از قیر پایه با درجه نفوذ ۵۰/۷۰، ۳/۵ درصد SBS خطی، ۲ درصد روغن آروماتیک، ۲ و ٤ درصد شیل نفتی (oil shale) استفاده و خواص ریولوژیکی نمونه‌های ساخته شده را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، روغن‌های آروماتیکی و شیل‌های نفتی آثار مشابهی بر پایداری ذخیره‌سازی و رفتار کشسانی قیرهای اصلاح شده دارند. آنها بر اساس استاندارد Super pave ملاحظه کردند، مقدار $G^*/\sin(\delta)$ برای نمونه‌های اصلاح شده با ۳/۵ درصد SBS و ۲ درصد روغن شیل نفتی می‌تواند در دماهای بیش از ۷۰°C استفاده شوند [۲۰]. زیاری و همکاران، اثر۲ تا ۵ درصد SBS را بر خواص و درجه کارایی قیر بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد، قیر تولیدی از لحاظ کارایی و بهبود خواص دارای کارایی رضایت‌بخشی است [۲۱].

با وجود کاربردهای بسیار زیاد قیر از قبیل مواردی که چسبندگی و نفوذناپذیری مورد نیاز است، این ماده خواص فیزیکی ـ مکانیکی کاملا" رضایت بخشی ندارد و ضعف‌های عمده‌ای دارد، از قبیل:

۱- امکان جاری شدن قیر، قیرزدگی، تغییر شکل دایمی و شیارشدگی در دمای بالا،

۲- امکان بروز ترک در مخلوط آسفالتی در اثر تنش‌های گرمایی در دماهای پایین و بارگذاری‌های طولانی مدت و

۳- ترد و شکننده‌شدن، امکان ایجاد ترک‌های مکانیکی در دماهای پایین و بارگذاری‌های کوتاه مدت [۲۲].

با توجه به این که عمده قیر مصرفی در ساخت روسازی‌ها در ایران قیر ٦۰/۷۰ است، تنوع شرایط آب و هوایی، ضعف کارایی قیر ٦۰/۷۰ و متناسب نبودن آن برای استفاده در تمام مناطق کشور این ضرورت را ایجاب می‌کند که با توجه به رده‌بندی‌های موجود، قیرهایی ساخته شوند که بتوانند درجه‌های کارایی مد نظر در مناطق

جدول۱- مشخصات قیر ۶۰/۷۰ و VB پالایشگاه تهران استفاده شده در این پژوهش.

نوع قیر	درجه نفوذ (°C)	دمای نرمی (°C)	کشش‌پذیری (cm)
۶۰/۷۰	٦٤/٧	٤٩/٤	>۱۰۰
VB	١٦٧/٥	٤٠/٦	٨٧/٩

مختلف را پوشش داده و گسیختگی‌های موجود در روسازی‌ها را نیز کاهش دهند یا باعث تأخیر در شکل‌گیری آنها شوند. بدین منظور در پژوهش حاضر، با استفاده از قیر ۶۰/۷۰، پلیمر SBS و پسماندهای برج تقطیر در خلاء (VB) و نیز بر اساس آزمون‌های شارپ، برای استفاده در روسازی‌ها نمونه‌های قیر پلیمری تهیه شده است.

تجربی

مواد و دستگاه‌ها

از قیر ۶۰/۷۰ پالایشگاه تهران (شرکت نفت پاسارگاد) به همراه پسماند برج تقطیر در خلاء (VB) به عنوان قیر پایه با مشخصات ارایه شده در جدول ۱ و نیز استیرن ـ بوتادی‌ان ـ استیرن (SBS) برای ساخت ترکیب درصدهای مختلف استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی پلیمر SBS در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. قیر ۶۰/۷۰ و VB به کار برده شده دارای درصد اجزای زیر بودند:

قیر ۶۰/۷۰: ۱۰/۲٦٪ آسفالتن، ۳۵/٤۳٪ رزین، ۳۸/٤۸٪ آروماتیک و ۱۵/۸۳٪ مواد سیرشده.

VB: ۳٪ آسفالتن، ۳۲٪ رزین، ٤۰٪ آروماتیک و ۲۵٪ مواد سیرشده.

روش‌ها

آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های تولید شده در این پژوهش در جدول ٤ آمده‌اند. به منظور اختلاط قیر ۶۰/۷۰، قیر VB و درصدهای مختلف پلیمر SBS، از همگن‌ساز با سرعت برش زیاد استفاده شده است. ابتدا قیر ۶۰/۷۰ و قیر VB به مدت ۵ min در دمای ۱٦۰°C و سرعت ۵۵۰۰ rpm با هم مخلوط شدند. سپس، به مدت ۱۰ min درصدهای مختلف SBS به مخلوط قیر ۶۰/۷۰ و VB اضافه و اختلاط مواد به مدت ٦۰ min در همگن‌ساز انجام شد.

از هم‌زن مکانیکی با سرعت ۳۰۰ rpm برای اختلاط بهتر پلیمر و قیر بهره گرفته شده است. پس از اتمام عملیات اختلاط، مخلوط قیر اصلاح شده در ظرف‌های ویژه تخلیه می‌شود و آزمون‌های شارپ روی هر نمونه انجام می‌شود. در جدول ۵ استانداردهای آزمون‌ها و مشخصات هر یک از دستگاه‌ها آمده است.

جدول۲- مشخصات SBS استفاده شده در این پژوهش.

پلیمر	نوع	کشور سازنده	ساختار مولکولی	درصد استیرن	درصد بوتادی‌ان
SBS	CALPRENE 501	اسپانیا	خطی	۳۱	٦۹

جدول۳- خواص فیزیکی و شیمیایی SBS.

خواص	روش آزمایش	مقدار
گرانروی در محلول تولوئن ۲۵ % (Pa.s)	MA04-3-064	۵
گرانروی در محلول تولوئن ۲۵ % 5.23% cst	MA 04-3-003	۱۳
مقدار مواد فرار (٪)	ASTM D 5668	۰/٤
Hunterlab Color	ASTM D 1925-70	۲
مقدار استیرن (٪)	ASTM D 5775	۳۱
سختی (shore A)	ASTM D 2240	۷٦
انحلال‌پذیری در تولوئن 325 mesh, (%)	MA 04-3- 018	<۰/۱
مقدار خاکستر (٪)	ASTM D 5669	<۰/۳۵

جدول٤- ترکیب نمونه‌های استفاده شده در این پژوهش.

نمونه*	ترکیب نمونه		
	VB (%)	SBS (%)	قیر(%)
۲	۲۰	٤	۷٦
۳	۲۰	٤/۵	۷۵/۵
٤	۲۰	۵	۷۵
۵	۲۰	۵/۵	۷٤/۵
٦	۲۵	٤	۷۱
۷	۲۵	٤	۷۱
۸	۲۵	۵	۷۰
۹	۲۵	۵/۵	٦۹/۵

* نمونه ۱، قیر ۶۰/۷۰ است.

جدول۵- آزمون‌ها، استانداردها و مشخصات دستگاه‌های استفاده شده در این پژوهش.

آزمون	شماره استاندارد	مشخصات دستگاه*
RTFOT	AASHTO T240	Petrotest مدل PNR12
PAV	AASHTO-R28	Petrotest مدل RKA5
RV	AASHTO T316 و ASTM D4402	Petrotest مدل DDA3
DSR	AASHTOT315	Petrotest مدل DDA3
BBR	AASHTO T313	Petrotest

* تمام دستگاه‌ها ساخت کشور آلمان بودند.

آزمون‌های انجام شده روی نمونه‌ها در ادامه به اختصار شرح داده شده‌اند.

روش‌های پیرسازی استاندارد

پیرسازی قیرهای اصلاح شده پلیمری با استفاده از آزمون فیلم نازک چرخشی (rolling thin film oven testing) بر اساس استاندارد ASTM D1754 و آزمون ظرف پیرسازی فشاری (pressure aging vessel, PAV) بر اساس استاندارد ASTM D6521 انجام شده است. آزمون فیلم نازک چرخشی، پیرسازی کوتاه مدت قیر را در جریان اختلاط با سنگ‌دانه‌ها و در دوره تولید آسفالت شبیه‌سازی می‌کند، در حالی که آزمون پیرسازی فشاری، پیرسازی بلندمدت قیر را در مدت زمان سرویس‌دهی نشان می‌دهد [۲۳].

گرانروی‌سنجی چرخشی

آزمون گرانروی‌سنجی چرخشی در شرایط استاندارد ASTM D4402 روی تمام نمونه‌های ساخته شده، انجام شد. بر اساس این استاندارد گرانروی قیرها برای دمای ۱۳۵°C به منظور اختلاط، حداکثر ۳ Pa.s و برای عملیات تراکم حداکثر ۶ Pa.s در نظر گرفته می‌شود [۲۶]. آزمون گرانروی‌سنجی چرخشی (AASHTOT 316)، برای بررسی تغییرات گرانروی در دماهای بالا به عنوان تابعی از زمان‌های مختلف برهم‌کنش، دماهای برهم‌کنش و درصدهای SBS، استفاده شده است. آزمون برای هر نمونه سه مرتبه تکرار و در نهایت متوسط آنها اندازه‌گیری و گزارش شد [۲۴].

ریومتری برش دینامیکی

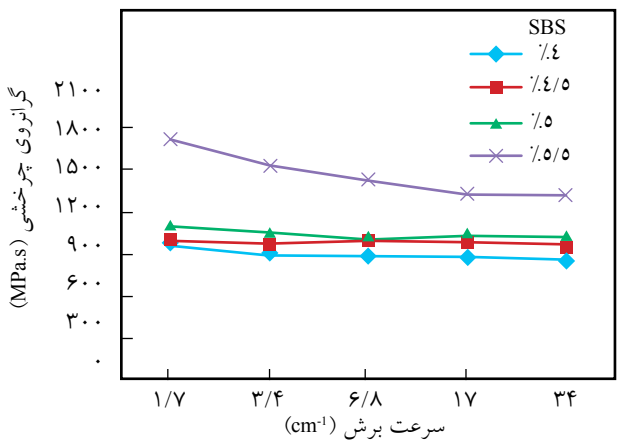
ریومتر برش دینامیکی (dynamic shear rheometer, DSR) خواص ریولوژیکی قیر را در دماهای متوسط تا بالا اندازه‌گیری و برای مشخص کردن رفتار کشسانی و گرانروی قیرها از مدول‌های برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) استفاده می‌کند. G^* مقاومت کل ماده در برابر تغییر شکل است که به دما و بسامد بارگذاری بستگی دارد. δ نیز نشان‌دهنده مقادیر نسبی تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر است. آزمایش برای قیر اصلی و قیرهایی که به وسیله دستگاه RTFOT پیر می‌شوند، با صفحه‌ای به قطر ۵ mm و فاصله ۱۰۰۰ µm و قیرهایی که به وسیله دستگاه PAV پیر می‌شوند، با صفحه‌ای به قطر ۸ mm و فاصله ۲۰۰۰ µm انجام می‌شود. اثر خرابی شیارشدگی به کمک هر دو پارامتر اشاره شده بررسی می‌شود که به طور عمومی در دماهای بالا اتفاق می‌افتد [۲۵]. تمام آزمایش DSR با بسامد ۱۰ rad/s انجام می‌شود که تقریبا برابر ۱/۵۹ سیکل در ثانیه است.

آزمون ریومتری تیر خمشی

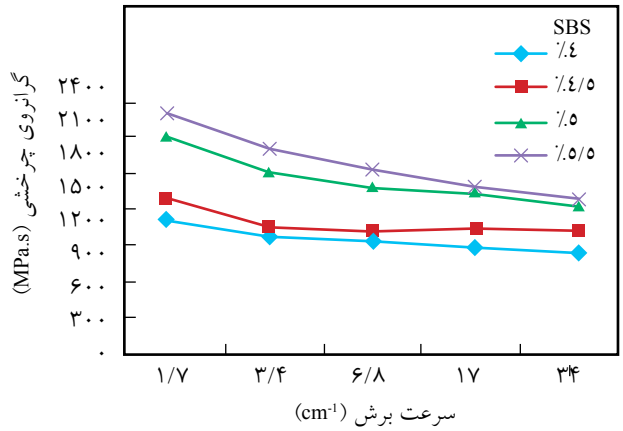
آزمون ریومتری تیر خمشی (bending beam rheometer, BBR) برای تعیین کارایی دمای پایین قیرهایی استفاده می‌شود که در PAV پیر می‌شوند. این آزمایش طبق استاندارد AASHTO T313 انجام می‌شود. پارامترهایی که برای تحلیل نتایج ارزیابی می‌شوند، شامل سفتی خزشی، S(t)، که حداکثر مقدار آن ۳۰۰ MPa و مقدار m (m value)، شیب نمودار سختی بر حسب زمان، که حداقل ۰/۳۰۰ است و با نرم‌افزار BBR معین می‌شود [۲۶].

نتایج و بحث

هدف از انجام آزمون‌های شارپ روی نمونه‌های ساخته شده، تعیین



شکل ۱ـ نمودار گرانروی چرخشی برحسب سرعت برش برای درصدهای مختلف SBS با ۲۰ درصد VB.



شکل ٢ـ نمودار گرانروی چرخشی برحسب سرعت برش برای درصدهای مختلف SBS با ٢٥ درصد VB.

درجه کارایی (PG) قیرهای اصلاح شده پلیمری با SBS برای مناطق مختلف ایران و نیز بررسی خواص ریولوژیکی آنها بوده است.

بررسی گرانروی چرخشی نمونه‌ها

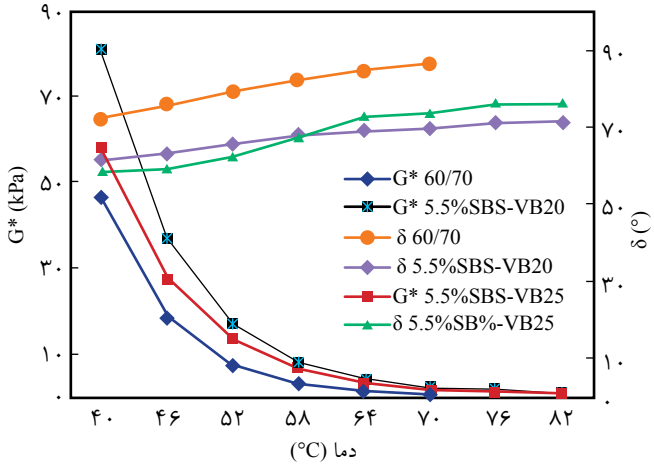
برای درک بهتر گرانروی قیرها نمودار گرانروی بر حسب سرعت برش ١/٧، ٣/٤، ٦/٨، ١٧ و ٣٤ rpm برای نمونه‌های ٤، ٤/٥، ٥ و ٥/٥ درصد SBS با ٢٠ و ٢٥ درصد VB به طور مجزا رسم شده است. همان طور که در شکل‌های ١ و ٢ مشخص شده است، در سرعت‌های برش ثابت با افزایش درصد SBS، گرانروی چرخشی افزایش می‌یابد. اما این افزایش در نمونه‌های حاوی ٢٥ درصد VB نسبت به نمونه با ٢٠ درصد VB بیشتر است. در مقادیر کم SBS (٤ و

جدول ٦- درجه کارایی قیر ٦٠/٧٠ و قیرهای پلیمری ساخته شده.

△ SBS4+VB20,25 ○ SBS4.5+VB20,25 □ SBS5+VB20,25 ◇ SBS5.5+VB20,25		دمای کاربری بالا					
		٥٢	٥٨	٦٤	٧٠	٧٦	٨٢
دمای کاربری پایین	-٦	-	-	-	-	-	-
	-١٢	-	-	-	-	-	-
	-١٨	-	٦٠/٧٠	△○□	◇	-	-
	-٢٤	-	-	-	-	-	-
	-٣٠	-	-	-	-	-	-

جدول٧- نتایج آزمایش PG روی نمونه‌های اصلی و پیرشده با استفاده از آزمون DSR.

دما (°C)	درصد VB	G*/Sinδ ≥١ kPa				G*/Sinδ ≥٢/٢ kPa				G*/Sinδ برای قیر ٦٠/٧٠	
		درصد SBS (بدون پیرسازی)				درصد SBS (پس از پیرسازی کوتاه مدت)				١ kPa ≤	٢/٢ kPa ≤
		٤	٤/٥	٥	٥/٥	٤	٤/٥	٥	٥/٥		
٤٦	٢٠	٢٤/٦	٣٢/٢	٤٠/٢	٤١/٤	٥٣/٦	٦٠/٣	٦٨/٧	٧١/٦	١٩/١	٤٢/٣
	٢٥	٣٣/٢	٢٦/٧	٢٩/٣	٣٥/٥	٥١/٥	٤٥/٨	٥١/٩	٦٤/٣		
٥٢	٢٠	١١/١	١٤/١	١٧/٥	١٨/٧	٢٤/٥	٢٨/٤	٣٢/٥	٣٤/٣	٧/٣٦	١٦/٤
	٢٥	١٤/٤	١١/٩	١٣/٢	١٦/٦	٢٣/٥	٢١/٤	٢٤/٣	٣٠/٧		
٥٨	٢٠	٥/٠٧	٦/٢١	٧/٤٧	٨/٥٧	١١/٣	١٣/٥	١٥/٤	١٦/٢	٢/٨٩	٦/٤٣
	٢٥	٦/٢٨	٥/٥	٥/٩١	٧/٩٤	١٠/٦	١٠/١	١١/٥	١٤/٨		
٦٤	٢٠	٢/٣٧	٢/٨١	٣/٢٤	٤/١٢	٥/١٩	٦/٣٥	٧/٣	٧/٦٣	١/٢	٢/٦٢
	٢٥	٢/٨٦	٢/٦٧	٢/٦٨	٣/٧٣	٤/٧٨	٤/٨٣	٥/٤٦	٧/١٥		
٧٠	٢٠	١/١٧	١/٣٥	١/٤٩	٢/١٤	٢/٤٢	٣/٠٨	٣/٥٣	٣/٧	٠/٥٣٩	١/١٣
	٢٥	١/٤١	١/٤١	١/٢٩	١/٨٢	٢/٢١	٢/٤٢	٢/٧	٣/٥٧		
٧٦	٢٠	٠/٦٤٢	٠/٧٠١	٠/٧٤٤	١/٤٨٥	١/١٧	١/٥٧	١/٧٧	٢/٤٨٣	-	-
	٢٥	٠/٧٥٣	٠/٨١	٠/٦٦٥	١/٢٨١	١/٠٦	١/٢٨	١/٤٢	٢/٣٣١		
٨٢	٢٠	-	-	-	٠/٨٤٣	-	-	-	١/٨٩	-	-
	٢٥	-	-	-	٠/٨٨٢	-	-	-	-		

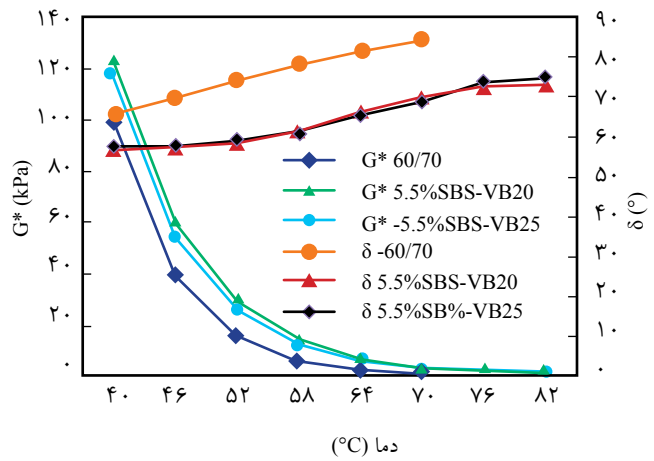


شکل ۳ـ نمودار ریولوژیکی نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB با بسامد ۱۰ rad/s.

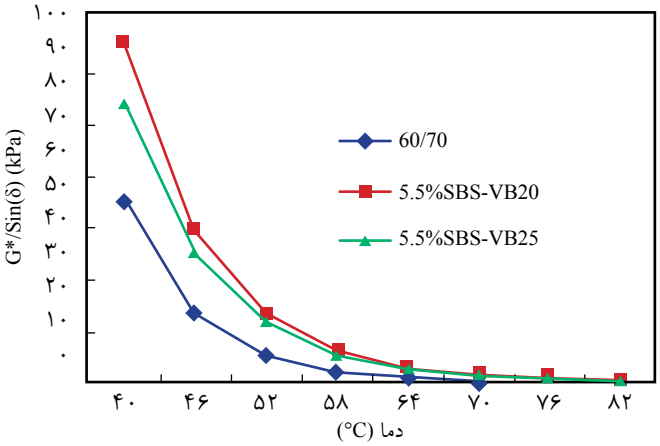
٤/۵ درصد) برای هر دو ترکیب ۲۰ و ۲۵ درصد VB، گرانروی تقریبا یکسان است، اما در غلظت‌های بیشتر SBS (۵ و ۵/۵ درصد)، اختلاف زیاد در گرانروی مشاهده می‌شود. شاید دلیل این تغییر را بتوان به برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی در میان مولکول‌های SBS یا برهم‌کنش بین مؤلفه‌های قیر و SBS از قبیل تورم یا حل شدن مربوط دانست.

بررسی ریومتری برش دینامیکی

نتایج ریومتری برش دینامیکی نشان می‌دهد، نمونه‌های ساخته شده با ٤، ٤/۵ و ۵ درصد SBS یک درجه و نمونه با ۵/۵ درصد SBS دو درجه کارایی را افزایش می‌دهند (جدول ٦). این افزایش در درجه کارایی برای هر دو ترکیب ۲۰ و ۲۵ درصد VB ظاهر شده



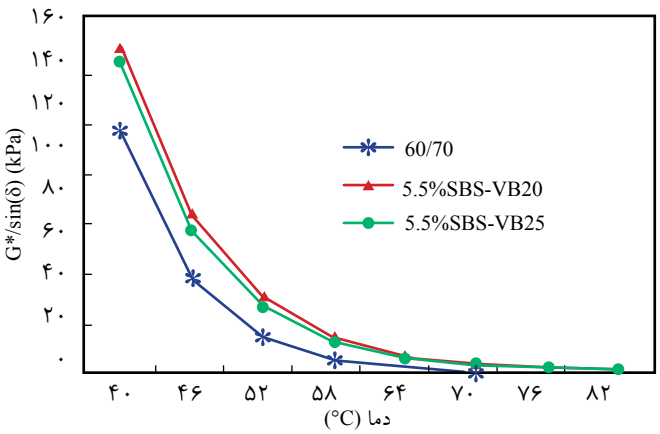
شکل ٤ـ نمودار اثر پیرسازی کوتاه‌مدت نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB با بسامد ۱۰ rad/s.



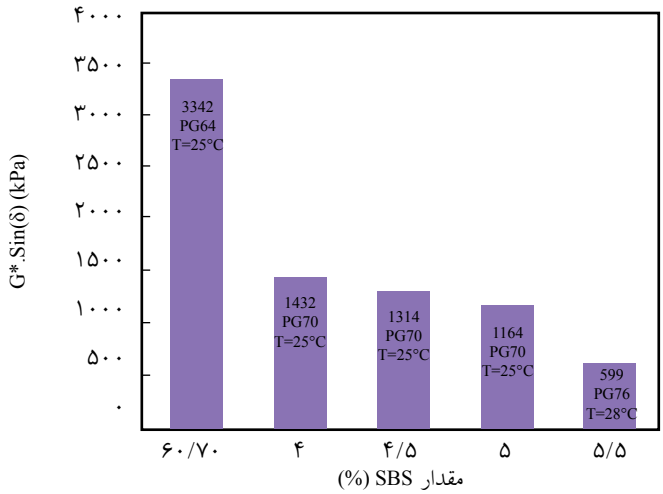
شکل ۵ـ نمودار شیارشدگی در برابر تغییرات دما برای نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB با بسامد ۱۰ rad/s.

است. نتایج آزمایش ریومتری برش دینامیکی برای قیرهای پیرشده در RTFOT و قیر پیرنشده در جدول ۷ آمده است. Fernandes نیز در پژوهش خود به افزایش دمای کارایی قیرهای اصلاح شده پلیمری برای استفاده در دماهای بیش از ۷۰°C اشاره کرده است [۲۰].

در تحلیل دینامیکی ـ مکانیکی، پارامتر G^*، مقاومت کل ماده در برابر تغییر شکل است، در حالی که خواص گرانروکشسانی نمونه‌ها به وسیله δ مشخص می‌شود. پارامترهای ریولوژیکی قیر تابع دما و بسامد است که ممکن است، این خواص به طور چشمگیری با افزودن پلیمرها اصلاح شوند. در نمونه‌ها با ٤، ٤/۵، ۵ و ۵/۵ درصد SBS و ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی VB، با افزایش دما، مقدار G^* کاهش یافته و با افزایش درصد پلیمر این مقدار افزایش می‌یابد. از میان نمونه‌های گفته شده، نمونه‌های SBS/VB ۵/۵:۲۰ و SBS/VB ۵/۵:۲۵ نسبت به قیر پایه و سایر نمونه‌های ساخته شده کارآمدترند و در برابر تغییر



شکل ٦ـ نمودار شیارشدگی در برابر تغییرات دما برای قیرهای پیرشده با ۵/۵ درصد SBS و با ۲۰ و ۲۵ درصد VB با بسامد ۱۰ rad/s.



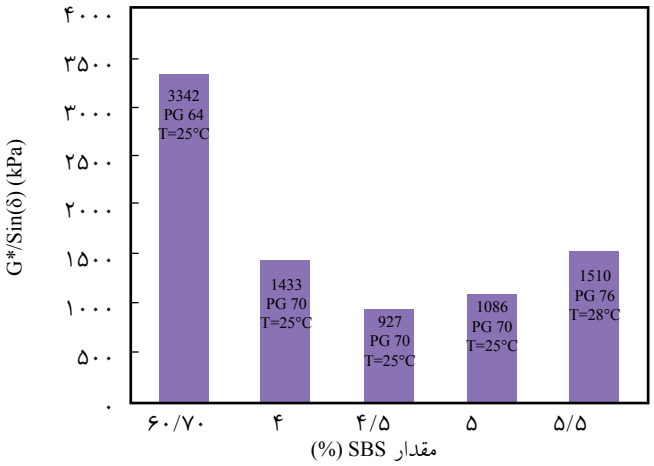
شکل ۷ـ نتایج آزمون DSR برای قیرهای پیرشده در PAV برای نمونه‌ها با ۲۰ درصد VB.

شکل‌ها مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. از طرفی، تغییرات زاویه فاز (رفتار کشسانی یا گرانرو) با افزایش دما افزایش می‌یابد که مقدار آن برای نمونه‌های حاوی SBS نسبت به قیر پایه کمتر است. دلیل این رفتار را می‌توان به تشکیل شبکه پلیمری بهینه در این ترکیبات نسبت داد. اما، با مقایسه نمونه‌های ۲۰ و ۲۵ درصد VB با نسبت یکسان SBS (۵/۵ درصد) مشاهده می‌شود، G^* ترکیب ۲۰ درصد VB بیشتر از ۲۵ درصد VB است و زاویه فاز نمونه SBS/VB ۵/۵:۲۰ نسبت به زاویه فاز نمونه SBS/VB ۵/۵:۲۵ در دماهای بیش از ۵۸°C کمتر است. هر دو پارامتر نشان‌دهنده بهبود نسبی نمونه SBS/VB ۵/۵:۲۰ در دماهای بالا نسبت به نمونه SBS/VB ۵/۵:۲۵ است.

به منظور درک بهتر خواص ریولوژیکی نمونه‌های ساخته شده، نمودارهای G^* بر حسب تغییرات دما و زاویه فاز با بسامد ۱۰ rad/s برای نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB در شکل ۳ نشان داده است.

نتایج آثار پیرسازی کوتاه مدت (RTFOT) روی پارامترهای G^* و δ نشان می‌دهد، مقدار G^* برای نمونه‌های ۲۰ و ۲۵ درصد VB که در RTFOT پیرشده‌اند، نسبت به قیرهای اصلی (پیرنشده) بیشتر است. با مقایسه نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB در فرایند پیرسازی این نتیجه حاصل می‌شود که نمونه SBS/VB ۵/۵:۲۰ در مقایسه با نمونه SBS/VB ۵/۵:۲۵ بیشتر تحت تاثیر پارامتر پیرسازی قرار می‌گیرد. زاویه فاز نیز افزایش می‌یابد که این افزایش نسبت به قیر پایه برای ترکیب درصدهای مختلف کمتر است.

با توجه به این که پیرسازی موجب سختی قیر، از هم پاشیدگی پلیمر و در نتیجه موجب تغییر در خواص ریولوژیکی قیرهای اصلاح

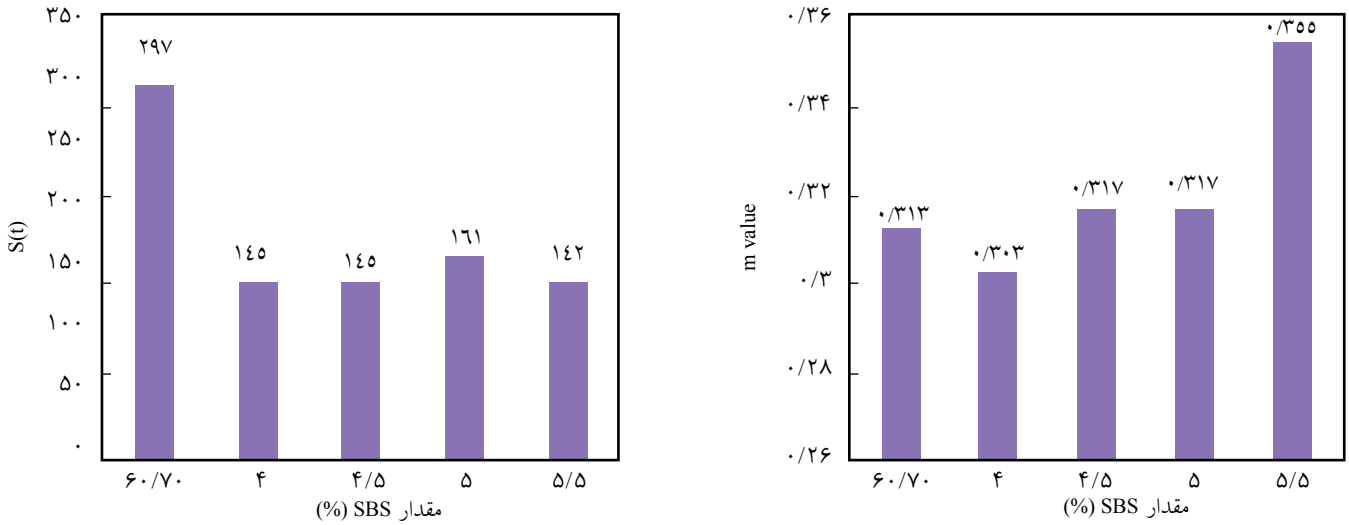


شکل ۸ ـ نتایج آزمون DSR برای قیرهای پیرشده در PAV برای ترکیبات ۲۵ درصد VB.

شده می‌شود، با این حال خاصیت کشسانی تقریبا حفظ می‌شود. بنابراین اثر پیرشدگی در خاصیت کشسانی قیرهای پلیمری کم است. شکل ٤ نمودار اثر پیرشدگی کوتاه مدت روی نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB را در بسامد ۱۰ rad/s نشان می‌دهد.

عامل شیارشدگی DSR یعنی G*/Sin(δ)، سفتی در دمای بالا یا مقاومت در برابر شیارشدگی نمونه‌های قیر را بیان می‌کند. با افزایش دما مقدار پارامتر مزبور در هر دوگروه از نمونه‌های حاوی ٤، ٤/٥، ٥ و ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی VB کاهش یافته و با مقایسه بیشینه ترکیبات با یک‌دیگر این نتیجه حاصل می‌شود که نمونه SBS/VB ۵/۵:۲۰ کارآمدتر است و در برابر شیارشدگی بهتر عمل می‌کند.

افزودن پلیمر به قیر به طور چشمگیری مقدار G*/Sin(δ) را افزایش می‌دهد که منجر به افزایش کارایی دمای بالای محمل تولیدی می‌شود. اگر چه سازگارکننده‌ها مقدار G*/Sin(δ) را به علت اثر مواد نرم‌کننده کاهش می‌دهند. اما با این حال، این مقادیر به قدری زیاد است که نمونه‌های اصلاح شده می‌توانند در محدوده دمایی گسترده‌تری در مقایسه با قیر پایه استفاده شوند. شکل ۵ اثر پارامتر شیارشدگی را روی نمونه‌های پیرنشده با ۵/۵ درصد SBS نشان می‌دهد. آثار پیرسازی کوتاه مدت (RTFOT) روی پارامتر G*/Sin(δ) برای نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB را می‌توان در شکل ٦ مشاهده کرد. در همین راستا نتایج Zora و همکاران نشان می‌دهد، قیرهای اصلاح شده با SBS قابلیت بهبود خواص گرانروکشسانی مخلوط‌های آسفالتی را در دماهای بالا دارند و به طور چشمگیر شیارشدگی را در زیر بارهای تکرارشونده کاهش می‌دهند [۲۷].



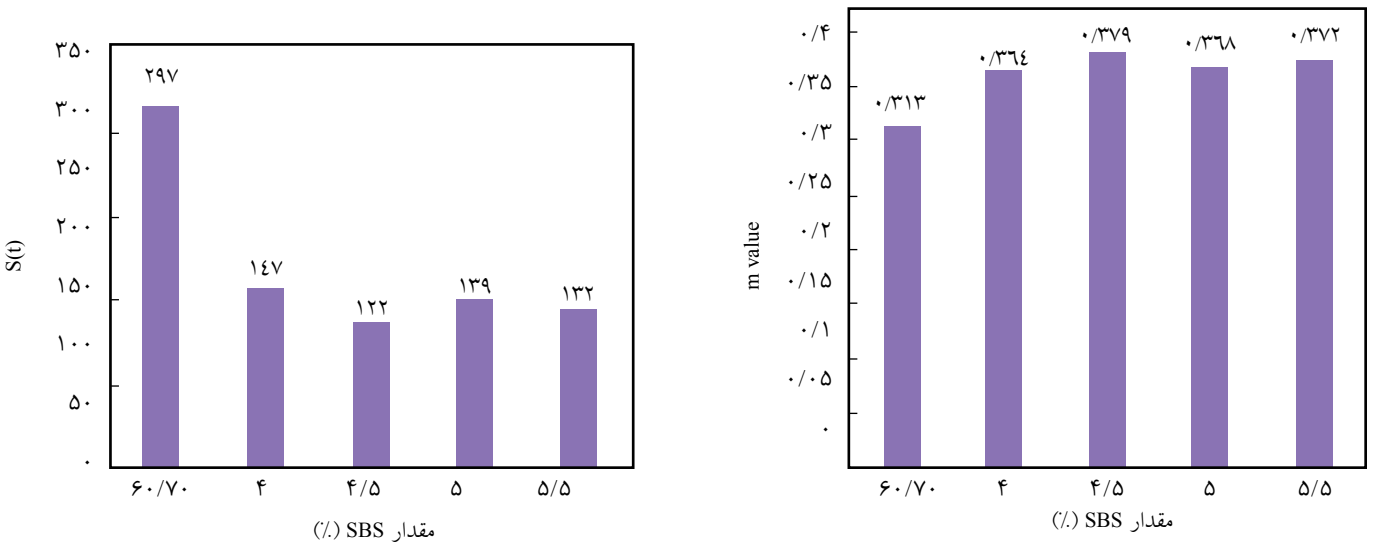
(الف) (ب)

شکل ۹ـ نتایج آزمون BBR برای ترکیبات ۲۰ درصد VB: (الف) مقدار m و (ب) سفتی خزشی.

پارامتر خستگی

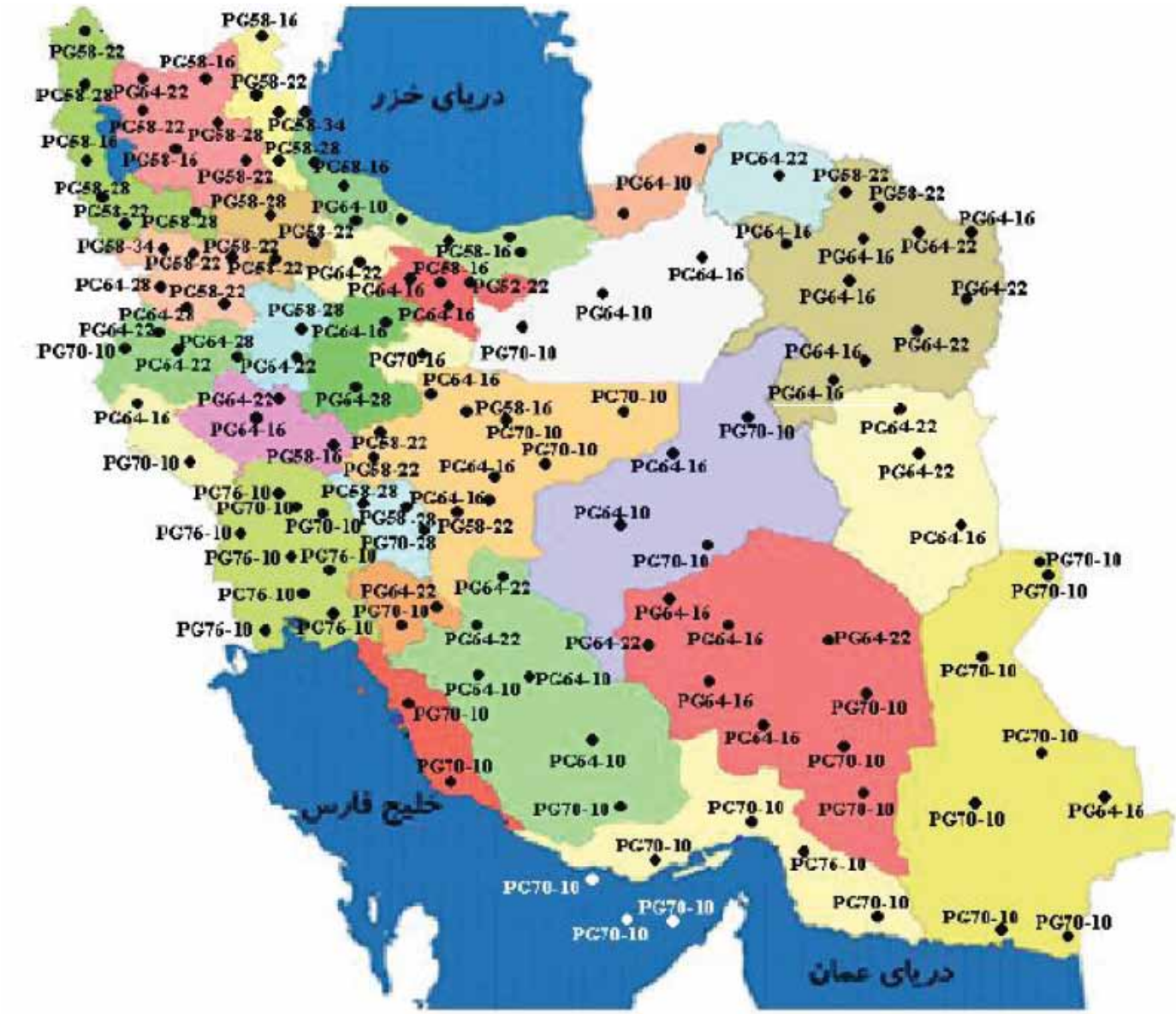
به منظور بررسی اثر پیرسازی طولانی‌مدت (PAV) برای تعیین درجه کارایی نمونه‌ها در دماهای متوسط، طبق استاندارد AASHTO T315 آزمون DSR انجام شد. پژوهشگران شارپ برای تعیین دمای متوسط قیرها پارامتری را به نام $G^*.Sin(\delta)\leq 5000$ kPa تعریف کرده‌اند. این پارامتر اثر خرابی خستگی را بررسی می‌کند که به طور عمومی از خرابی‌های مهم روسازی در دماهای متوسط است. نتایج آزمون‌های انجام شده روی نمونه‌ها در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود، قیر پایه با درجه کارایی ٦٤ در دمای ۲۵°C شرایط پارامتر خستگی را برآورده می‌کند، اما نسبت به درجه کارایی سایر نمونه‌های قیر کمترین PG را دارد. نمونه‌های ٤، ٤/٥ و ٥ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB، دارای درجه کارایی ۷۰ است. اما پارامتر خستگی برای ترکیبات مزبور در این درجه کارایی، متفاوت است. در نمونه ٤ درصد SBS به همراه ۲۰ و ۲۵ درصد VB، همان طور که در شکل‌های ۷ و ۸ مشخص شده است، پارامتر خستگی یکسان است که نشان‌دهنده مقاومت یکسان این نمونه‌ها در برابر خرابی‌های ناشی از خستگی در دمای ۲۵°C است. اما، در نمونه ٤/٥



(الف) (ب)

شکل ۱۰ـ نتایج آزمون BBR برای نمونه‌ها با ۲۵ درصد VB: (الف) مقدار m و (ب) سفتی خزشی.



شکل ۱۱ـ نقشه پهنه‌بندی درجه کارایی قیرها در ایران [۲۹].

درصد SBS به همراه ۲۰ و ۲۵ درصد VB، مشاهده می‌شود که نمونه ٤/٥ درصد SBS با ۲۰ درصد VB در دمای ۲۵°C در برابر ترک‌های خستگی نسبت به نمونه مشابه (٤ درصد SBS و ۲۵ درصد VB) عملکرد بهتری نشان می‌دهد. چرا که مقدار G*.Sin(δ) کم است و این موضوع سبب مقاومت بیشتر در برابر خستگی قیر می‌شود. برای نمونه‌های ۵ درصد نیز همین تحلیل به کار برده می‌شود. نمونه‌های ٥/٥ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB نیز درجه کارایی ٧٦ دارند. پارامتر خستگی در ترکیب ۲۵ درصد VB با ٥/٥ درصد SBS به مراتب بسیار کمتر از ترکیب مشابه خود است که نشان‌دهنده بهترین عملکرد در برابر ترک‌های ناشی از خستگی در میان نمونه‌های ساخته شده است. هر چند که همه نمونه‌ها در درجه کارایی خود پارامتر خستگی را برآورده می‌سازند، اما به هر حال این امر نشان‌دهنده اثر SBS در بهبود این نوع خرابی‌ها نسبت به قیر پایه است. Airey نیز در یافته‌های خود به اثر SBS در بهبود خرابی خستگی اشاره و نتایج آن را رضایت بخش ارزیابی کرده است [۱۲].

ریومتری تیر خمشی

آزمون ریومتری تیر خمشی در دماهای ٦-، ۱۲-، ۱۸- و ۲٤°C- روی نمونه‌ها انجام شد. در دمای ۲٤°C- نمونه‌ها، هر دو یا یکی از پارامترهای مورد نظر در این آزمایش m value و S (t) را برآورده نمی‌کنند. بنابراین، دمای ۲٤°C- برای جلوگیری از ترک خوردگی در دمای پایین مناسب نیست. بنابراین از میان دماهای بررسی شده، دمای

۱۸°C- پایین‌ترین دمای است که نسبت به سایر دماها پارامترهای سفتی خزشی S (t) و مقدار m (m value) نمونه‌های مورد آزمایش را برآورد می‌کند.

در نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد VB با افزایش SBS مقدار m افزایش یافته و در ترکیب ٤ درصد SBS در همان درصد VB، کمترین مقدار m را نشان می‌دهد. دلیل این پدیده غالب بودن فاز VB نسبت به کمترین مقدار SBS است. اما در سفتی خزشی S(t) روند منطقی وجود ندارد. پس هرچه مقدار m از ۰/۳ بیشتر باشد و مقدار سفتی خزشی از MPa ۳۰۰ کمتر باشد، قیر مورد نظر کارایی بهتری در دمای پایین نشان می‌دهد و از ترک خوردگی جلوگیری می‌کند. بیشترین مقدار m به این علت خواسته می‌شود که وقتی دما کاهش می‌یابد، روسازی شروع به انقباض می‌کند و قیر به عنوان ماده‌ای که سفتی کمتری دارد، نسبت به این عمل پاسخ می‌دهد. این کاهش در سفتی منجر به تنش‌های کششی کوچک‌تر در قیر می‌شود و احتمال کمتری برای ترک‌خوردگی دمای پایین به وجود می‌آورد. بنابراین، از بین نمونه‌ها با ۲۰ درصد VB، نمونه ۵/۵ درصد SBS بهترین کارآیی را نسبت به سایر نمونه‌ها و قیر پایه دارد. اما در ترکیبات حاوی ۲۵ درصد VB، در مقدار m و مقدار سفتی رابطه‌ای منطقی با افزایش درصد پلیمر مشاهده نمی‌شود که در این نمونه‌ها، ترکیب ٤/۵ درصد SBS بیشترین مقدار m و کمترین مقدار S(t) را دارد و عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد. اما، با مقایسه نمونه‌ها ۲۰ و ۲۵ درصد VB در دمای پایین ۱۸°C- به نظر می‌رسد، نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد VB نسبت به ۲۰ درصد VB و قیر پایه کارایی بهتری داشته باشد. برای درک بهتر مقادیر به دست آمده در این آزمون، نمودار میله‌ای برای هر دو پارامتر این آزمون در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

در پژوهشی که توسط LU و همکاران درباره اثر افزودن SBS انجام شده بود [۲۸]، مشاهده شد که SBS خواص دمای پایین را بهبود می‌بخشد. تفاوت بین یافته‌های این پژوهش با یافته‌های LU را احتمالاً می‌توان به تفاوت رفتارهای پیرسازی در این دو مطالعه مربوط دانست. در این آزمایش یافته‌ها مؤید این امر است که نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد VB نسبت به ترکیبات حاوی ۲۰ درصد VB کارایی بهتری دارند و استفاده از آنها در دماهای پایین مفیدتر است. شکل ۱۱ نقشه پهنه‌بندی درجه کارایی قیرها در مناطق مختلف کشور ایران است که با همکاری شرکت نفت پاسارگاد و پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران تهیه شده [۲۹] و بیانگر این مطلب است که قیر ۶۰/۷۰ که عمده قیر تولید داخل کشور است، برای استفاده در همه مناطق آب و هوایی ایران مناسب نیست. ترکیب ٤ درصد SBS نسبت به نمونه‌های ٤/۵ و ۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB که هر سه آنها یک درجه کارایی را افزایش می‌دهند (PG ٦٤ را به PG ۷۰ ارتقا می‌دهند) از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌ترند و برای استفاده در روسازی استان‌های فارس، بوشهر، هرمزگان، کرمان، زاهدان، یزد، قم، سمنان، ایلام، تنب‌بزرگ، تنب‌کوچک، جزیره کیش، بعضی از مناطق استان اصفهان و کرمانشاه، یاسوج و شهرکرد مفیدند. نمونه‌های حاوی ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB که سبب افزایش دو درجه کارایی می‌شوند، پاسخ‌گوی نیاز استان خوزستان برای استفاده در روسازی‌های آن به سبب افزایش دماست که می‌تواند از بروز خرابی‌ها در این استان جلوگیری کند.

نتیجه‌گیری

نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد، نمونه‌های ٤، ٤/۵ و ۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB، یک درجه و نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB دو درجه کارایی را در دمای بالا افزایش می‌دهند. نتایج آزمون DSR در تعیین درجه کارایی نمونه‌ها مؤید این مطلب است که نمونه‌های ۵/۵ درصد SBS با ۲۰ و ۲۵ درصد VB بیشترین درجه کارایی را دارند (PG ۷٦). هر دو نمونه اشاره شده با توجه به درجه کارایی شرایط پارامتر شیارشدگی و خستگی را که از خرابی‌های مهم روسازی به شمار می‌روند، برآورده ساخته و عملکرد خوبی نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهند. نتایج آزمون DSR برای تغییرات دمایی (٤۰ تا ۸۲°C) حاکی از این است که نمونه‌های حاوی ۲۰ و ۲۵ درصد VB با ۵/۵ درصد SBS رفتار کشسانی بهتر و مقاومت بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها نشان می‌دهند. بنابراین، افزودن SBS به قیر باعث بهبود خواص ریولوژیکی قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر پایه می‌شود. نتایج آزمون BBR در تعیین کارایی دمای پایین نمونه‌ها نشان دهنده این موضوع است که اگر چه افزایش SBS به قیر باعث افزایش دمای کارایی قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر ۶۰/۷۰ در دمای پایین نمی‌شوند. اما در همان دمای پایینی که قرار می‌گیرند، خواص قیرها را به مراتب بهبود می‌بخشند. علت این موضوع را می‌توان در آثار پیرسازی طولانی مدت در ساختار شبکه‌ای قیرهای اصلاح شده توضیح داد، چرا که پیرسازی باعث می‌شود، به ساختار شبکه قیر ـ پلیمر آسیب‌های وارد شود و سبب تغییر در مؤلفه‌های قیر و اصلاح کننده SBS شود. به طوری که کارایی SBS به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

قدرانی

از مدیریت محترم مرکز تحقیقات شرکت نفت پاسارگاد تهران جناب آقای دکتر سیدحسن فیروزی‌فر و همکاران گرامی ایشان که در انجام این پژوهش نهایت همکاری را داشتند، قدرانی می‌شود.

مراجع

1. Polacco G., Kriz P., Filippi S., Stastna J., Biondi D., and Zanzotto L., Rheological of Asphalt/SBS/Clay Blends, *Eur. Polym. J.,* **44**, 3512-3521, 2008.
2. Mouillet V., Lamontagne J., Durrieu F., Planche J.P., and Lapalu L., Infrared Microscopy Investigation of Oxidation and Phase Evolution in Bitumen Modified with Polymers, *Fuel*, **87**, 1270-1280, 2008.
3. Lu X., Isacsson U., and Ekbad J., Infuence of Polymer Modification on Low Temperature Behaviour of Bituminous Binders and Mixtures, *Mater. Struct*., **36**, 652-656, 2003.
4. Sengoz B. and Isikyakar G., Evaluation of the Properties and Microstructure of SBS and EVA Polymer Modified Bitumen, *Construct. Build. Mater*., **22**, 1897-1905, 2008.
5. Chen J., Liao M., and Lin C., Determination of Polymer Content in Modified Bitumen, *Mater. Struct*., **36**, 594-598, 2003.
6. Sengoz B., Topal A., and Isikyakar G., Morphology and Image Analysis of Polymer Modified Bitumens, *Construct. Build. Mater*., **23**, 1986-1992, 2009.
7. Chen J.C., Liao M.C., and Tsai H.H., Evaluation and Optimization of the Engineering Properties of Polymer-Modified Asphalt, *Practical Failure Analysis*, **2**, 75-83, 2002.
8. Larsen D., Alessandrini J., Bosch A., and Cortizo M.S., Micro-Structural and Rheological Characteristics of SBS-Asphalt Blends during their Manufacturing, *Construct. Build. Mater*., **23**, 2769-2774, 2009.
9. Sengoz B. and Isikyakar G., Analysis of Styrene–Butadiene-Styrene Polymer Modified Bitumen Using Fluorescent Microscopy and Conventional Test Methods, *J. Hazard. Mater*., **150**, 424-432, 2008.
10. Lesueur D., The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification, *Adv. Colloid Interface Sci*., **145**, 42-82, 2009.
11. Radziszewski P., Modified Asphalt Mixture Resistance to Permanent Deformations, *J. Civil Eng. Manag*., **4**, 307-315, 2007.
12. Airey G.D., Styrene Butadiene Styrene Polymer Modification of Road Bitumen's, *J. Mater. Sci.*, **39**, 951-959, 2004.
13. Dasilva L.S. and Madalena M., Study of Rheological Properties of Pure and Polymer-Modified Brazilian Asphalt Binders, *J. Mater. Sci*., **39**, 539-546, 2004.
14. Alonso S., Torres L.M., Zitzumbo R., and Avalos F., *Rheology of Asphalt and Styrene-Butadine Blends*, Springer Science, 2010.
15. Khodaii A., and Mehrara A., Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and SBS Modified Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test, *Construct. Build. Mater*., **23**, 2586-2592, 2009.
16. Shenoy A., Developing Unified Rheological Curves for Polymer Modified Asphalt-Part I. Theoretical Analysis, *Mater. Struct*., **33**, 425-429, 2000.
17. Polacco G., Berlincioni S., Biondi D., Stastna J., and Zanzotto L., Asphalt Modification with Different Polyethylene-based Polymers, *Eur. Polym. J.,* **41**, 2831-2844, 2005.
18. Yildirim Y., Polymer Modified Asphalt Binders, *Construct. Build. Mater*., **21**, 66-72, 2005.
19. Navarro F.J., Partal P., Garcia M., Alfonso M.J. Boza M., Gallegos C., Bordado J., and Diogo A.C., Bitumen Modification with Reactive and Non-Reactiv(Virgin and Recycled) Polymers: A Comparative Analysis, *J. Indust. Eng. Chem*., **15**, 458-464, 2009.
20. Fernandes M., Forte M., and Leite L., Rheological Evaluation of Polymer-Modified Asphalt Binders, *Mater. Res*., **11**, 381-386, 2008.
21. Ziyari H., Abtahi M., and Goli A., The Effect of Styrene Butadiene Styrene Polymer on the Bitumen Performance Grading and Properties, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian),* **21**, 201-208, 1387.
22. Fakhri M., Polymer Usage in Improvement of Asphalt Mixers and Bitumen Properties, Road and Transportation Ministry, Iran, 1385.
23. Zhang F., Yu J., and Wu S., Effect of Ageing on Rheological Properties of Storage-Stable SBS/Sulfur-Modified Asphalts, *J. Hazard. Mater*., **182**, 507–517, 2010.
24. Kyu-Dong J., Soon-Jae L., Serji N.A., and Kwang W., Interac-

tion Effects of Crumb Rubber Modified Asphalt Binders, *Construct. Build. Mater.*, **24**, 824–831, 2010.

25. Asphalt Institute, *Asphalt Binder Testing*, 2nd ed., Super Pave Series, No.1 (MS-25), 2008.
26. Asphalt Institute, *Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing*, 3rd ed., Super Pave Series, No.1 (SP-1), 2003.
27. Zora V., Chaminda W., Stastna J., and Ludo Z., Creep Characteristics of Asphalt Modified By Radial Styrene – Butadiene – Styrene Copolymer, *Construct. Buildi. Mater.*, **21**, 567-577, 2007.
28. Lu X., Isacsson U., and Ekblad J., Low–Temperature Properties of Styrene–Butadiene-Styrene Polymer Modified Bitumens, *Construct. Buildi. Mater.*, **8**, 405-414, 1998.
29. Oil Company of Pasargad, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Performance Grading of Various Provinces of Country, Tehran, 1388.