

## Modification of Asphalt Pavement with Polysulfide Polymer

Behzad Shirkavand Hadavand<sup>1\*</sup>, Mansour Fakhri<sup>2</sup>, and Hani Yazdi Aznaveh<sup>2</sup>

1. Department of Resin and Additives, Institute for Color Science and Technology,

P.O. Box: 16765-654, Tehran, Iran

2. Faculty of Civil Engineering, K.N.Toosi University of Technology,

P.O. Box: 15875-4416, Tehran, Iran

Received 17 April 2011, accepted 6 September 2011

### ABSTRACT

In petrochemical industry, the production of polyvinyl chloride (PVC) is accompanied by formation of heavy end wastes which consist of a mixture of di and multichloro compounds as kind of materials which are generated in ethylene dichloride (EDC) purification. A high quantity of chloro compounds found in the heavy end waste allows it to be polymerized with alkaline polysulfides to form polysulfide polymers. Thus, according to this, the environmentally hazardous heavy ends waste can now be converted into useful polysulfide polymers without any environmental problem. There are some methods for synthesizing a polysulfide polymer (PSP) from this waste. PSP with a rubbery property can be used for modification of bitumen. In this research the effects of polysulfide polymer (PSP) and the polysulfide polymer prepared by heavy end waste (wPSP) on bitumen and asphalt have been studied. Samples of 1, 3, 5% of PSP and wPSP as modifiers in bitumen have been prepared and their physical and mechanical properties are compared. Using this new modifier causes a fall in softening point (PSP=39.5%, wPSP=27.6%) and increase in penetration point (PSP=17.8% , wPSP=15.5%) and in asphalt mixture it causes decreases in rutting but has a small effect on Marshall strength of asphalt samples (PSP=4% , wPSP=11.6%).

#### Key Words:

modified bitumen,  
polysulfide polymer,  
Marshall strength,  
dynamic creep, waste

(\*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: shirkavand@icrc.ac.ir

## پوشش‌های آسفالتی اصلاح شده با پلی سولفید پلیمر

بهزاد شیرکوند هداوند<sup>۱\*</sup>، منصور فخری<sup>۲</sup>، هانی یزدی ازناوه<sup>۲</sup>

۱- تهران، پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ، گروه رزین و افزودنی‌ها، صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲- تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی عمران، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۴۴۱۶

دریافت: ۹۰/۱/۲۸، پذیرش: ۹۰/۶/۱۵

### چکیده

در صنایع پتروشیمی تولیدکننده پلی وینیل کلرید (PVC)، ضایعات سنگین که شامل ترکیبات دارای دو یا چند کلر هستند به هنگام خالص‌سازی اتیلن‌دی‌کلرید (EDC) به وجود می‌آیند. مقدار زیاد ترکیبات کلردار موجود در ضایعات سنگین امکان پلیمرشدن آن را با پلی سولفید قلیایی برای تشکیل پلی سولفید پلیمر می‌دهد. بنابراین، ضایعات خطرناک برای محیط زیست را می‌توان بدون هیچ نوع مشکل زیست‌محیطی به پلی سولفید پلیمر تبدیل کرد. روش‌هایی برای سنتز پلی سولفید پلیمر از این ضایعات وجود دارد تا بتوان این پلیمر لاستیکی را برای اصلاح قیر مورد استفاده قرار داد. در این پژوهش، اثر پلی سولفید پلیمر (PSP) و پلی سولفید پلیمر تهیه شده از ضایعات سنگین (wPSP) بر قیر و آسفالت تهیه شده از آنها بررسی و مقایسه شده است. به این منظور، نمونه‌های ۱، ۳ و ۵٪ از PSP و wPSP به عنوان اصلاح‌کننده قیر و آسفالت تهیه و خواص فیزیکی و مکانیکی آنها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان داد، استفاده از این اصلاح‌کننده جدید باعث کاهش درجه نفوذ (PSP=۳۹/۵ و wPSP=۲۷/۶) و افزایش دمای نرمی (PSP=۱۷/۸ و wPSP=۱۵/۵) در قیر و کاهش شیارشدگی در مخلوط آسفالتی می‌شود و اثر اندکی بر بهبود استحکام مارشال نمونه‌های آسفالتی (PSP=۴٪ و wPSP=۱۱/۶) دارد.

### واژه‌های کلیدی

قیر اصلاح شده،  
پلی سولفید پلیمر،  
استحکام مارشال،  
خزش دینامیکی، ضایعات

## مقدمه

راه‌ها به عنوان شبکه ارتباطی از اهمیت زیادی برخوردارند. ایجاد راه‌های آسفالتی با استفاده از فناوری‌های جدید روز، برای ایجاد جاده‌هایی با عمر طولانی می‌تواند نقش مهمی را در اقتصاد هر کشور داشته باشد. از مشکلاتی که به مرور زمان برای این روکش‌ها به وجود می‌آید، ترک خوردگی آنهاست که میلیون‌ها کیلومتر از جاده‌ها را در سرتاسر جهان در برمی‌گیرد [۱]. قیر خالص به عنوان ماده اولیه آسفالت، در شرایط مختلف آب و هوایی کارایی لازم را ندارد و باعث ایجاد این خرابی‌های زودرس در روکش‌های آسفالتی می‌شود. روکش آسفالتی مناسب باید عاری از حفره و ترک باشد و خواص مهندسی لازم و توجیه اقتصادی را داشته باشد [۲]. ترک‌های بیش از اندازه ناشی از خستگی قیر و ایجاد شیار ناشی از جای چرخ روی آسفالت که در اثر فشارهای دایمی ایجاد می‌شود [۳]، سبب شده است که برای رفع آنها در آسفالت از قیر اصلاح شده استفاده شود. رفتار مخلوط قیری و عوامل اثرگذار بر کارایی آن به طور گسترده مطالعه شده است. رفتار مخلوط‌های قیری تحت تأثیر رفت و آمد و شرایط مختلف آب و هوایی بسیار پیچیده است. برای تهیه پوشش دلخواه باید از مخلوط قیری استفاده کرد که دارای قابلیت پخش شدن مناسب و پایداری در برابر تغییر شکل و ترک خوردگی و نیز مقاومت در برابر رفت و آمد و رطوبت باشد [۴]. تهیه قیر و آسفالت پلیمری در بسیاری از کشورها برای رسیدن به برخی از انتظارات خاص روسازی جاده‌ها نظیر مقاومت در برابر شیار جای چرخ و جلوگیری از گسترش ترک‌های انعکاسی انجام می‌شود. این امر منجر به افزایش طول عمر بهره‌برداری و کاهش هزینه‌های روسازی آسفالتی می‌شود [۵].

مخلوط‌های آسفالتی گرم شامل ذرات معدنی درشت، پرکننده‌های معدنی و مقدار نسبتاً کمی پیوندهای قیری‌اند. برای کارایی بیشتر، پیوندهای قیری با مقادیر کمی از پلیمرهای مختلف اصلاح می‌شود [۶]. اصلاح قیر به کمک مواد پلیمری [۷-۹]، ضایعات حاصل از پلیمرها [۱۰-۱۲] و حتی ضایعات حاصل از صنایع مختلف [۱۳، ۱۴] انجام می‌شود که بسته به نوع پلیمر می‌تواند آثار مثبتی روی خواص عملکرد دمای بالا و پایین قیر ایجاد کند [۱۵]. باید توجه داشت با وجود تولیدات زیاد مواد پلیمری، تعداد نسبتاً کمی از آنها برای

جدول ۱- مشخصات قیر پایه.

نوع قیر	شرکت سازنده	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	درجه نفوذ	دمای نرمی (°C)	کشش پذیری (cm)
۶۰/۷۰	پالایشگاه تهران	۱/۰۱	۶۴	۵۲	<۱۰۰

اصلاح قیر مناسب‌اند [۱۶].

استفاده از ضایعات به دلیل کاهش هزینه تولید و کمک به رفع مشکل زیست‌محیطی از جمله مواردی است که در سال‌های اخیر برای اصلاح قیر مورد توجه قرار گرفته است [۱۷، ۱۸]. ضایعات می‌توانند به طور مستقیم [۱۹] یا با تغییراتی روی آنها استفاده شوند. در مورد اخیر می‌توان به ضایعات پتروشیمی اشاره کرد که با تبدیل به پلیمر می‌تواند به عنوان اصلاح کننده قیر به کار رود [۲۰].

در این پژوهش که در راستای پژوهش پیشین است [۲۰]، عملکرد اثر پلی‌سولفید پلیمر (PSP) و پلی‌سولفید پلیمر به دست آمده از ضایعات سنگین (wPSP) بخش خالص سازی اتیلن دی کلرید (EDC) صنایع پتروشیمی تولید کننده پلی‌وینیل کلرید (PVC) بر اصلاح قیر و تهیه آسفالت پلیمری بررسی و خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط آسفالتی، مطالعه و مقایسه شده است. محصولات جانبی تولید پلی‌سولفید پلیمر از ضایعات سنگین، آب و سدیم کلرید است که مشکلات زیست محیطی به همراه ندارد. بنابراین، نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌تواند با تبدیل ضایعات به محصولات بی‌خطر و کاربردی در رفع آلودگی‌های محیط زیست نیز مؤثر باشد.

## تجربی

## مواد

در این پژوهش، از قیر ۶۰/۷۰ پالایشگاه تهران به دلیل مصرف زیاد آن در مناطق مختلف کشور با مشخصات ارایه شده در **جدول ۱** استفاده شده است. پلی‌سولفید پلیمر با استفاده از مواد با خلوص صنعتی و ضایعات تقطیر شده بخش ۴۰۰ واحد خالص سازی اتیلن دی کلرید پتروشیمی بندر امام مطابق روش‌های ارایه شده تهیه شد [۲۱]. مصالح سنگی مورد استفاده برای تهیه آسفالت، از نوع مصالح آهکی شکسته شده سنگ کوهی منطقه شرق تهران بود که از بین‌های گرم کارخانه آسفالت در اندازه‌های مختلف پرکننده (ماسه ۶mm-۰، شن‌های ۲mm-۶ و ۱۹-۱۲ mm) نمونه‌گیری شد. دانه‌بندی مصالح سنگی با اندازه‌های مختلف بر اساس استاندارد AASHTO-T27 و هم‌چنین با روش شست و شو (تر) برای مصالح سنگی ریزدانه معین شد. **جدول ۲**

دانه‌بندی به کار رفته روی مصالح سنگی را نشان می‌دهد.

### دستگاه‌ها

اختلاط قیر و پلیمر با استفاده از مخلوط‌کنی با سرعت برش زیاد و سامانه Polytron 600 مجهز به هم‌زن PT-DA 3030/2 همراه با مخلوط‌کن Polymix ساخت شرکت Kinematika مجهز به هم‌زن چهارپره‌ای معمولی انجام شد. برای بررسی آزمون خزش دینامیکی از دستگاه UTM (Universal Testing Machine) استفاده شد. این دستگاه براساس پارامترهای مکانیکی و سازه‌ای با قابلیت پیش‌بینی عملکرد میدانی روسازی دارای سامانه بارگذاری با هوای فشرده است و قابلیت اعمال هر نوع بار مانند سینوسی و مستطیلی را نیز دارد. برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های دایم دستگاه UTM 19 طبق استاندارد BS-DD226 به کار گرفته شد.

### روش‌ها

#### تهیه قیر و آسفالت اصلاح شده

برای تهیه قیر پلیمری، ابتدا قیر در گرم‌خانه تا دمای  $170 \pm 5^\circ\text{C}$  گرم شد و به ظرف اختلاط انتقال یافت. سپس، دما تا  $185^\circ\text{C}$  افزایش یافت و اصلاح‌کننده پلیمری با درصدهای وزنی مختلف (۱، ۳ و ۵٪) به آن اضافه شد. عمل هم‌زدن با سرعت هم‌زن  $10000\text{ rpm}$  به مدت  $45\text{ min}$  ادامه یافت. پس از اتمام عمل اختلاط، قیر پلیمری از راه شیر تعبیه شده در انتهای ظرف اختلاط خارج شد و در ظروف نمونه‌برداری مناسب برای انجام آزمون‌های مختلف و تهیه آسفالت ریخته شد. برای انجام آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌های استوانه‌ای ساخته

جدول ۲- دانه‌بندی مصالح سنگی بین‌های گرم.

اندازه الک (mm)	شن (12-19 mm)	شن (6-12 mm)	ماسه (0-6 mm)	پرکننده
5/37 (5/1in)	—	—	—	—
25 (1in)	—	—	—	—
19	100	—	—	—
5/12	30/2	100	—	—
5/9	0/7	84/8	100	—
75/4 (شماره 4)	0	3/3	96/6	—
36/2 (شماره 8)	—	0	70/4	100
3/0 (شماره 50)	—	—	18/4	92/4
0/075 (شماره 200)	—	—	7/1	53/5

جدول ۳- مشخصات قیر پلیمری به ازای درصدهای مختلف پلی سولفید پلیمر.

درصد اصلاح کننده قیر	درجه نفوذ	دمای نرمی (°C)	شاخص نفوذپذیری	کشش پذیری (cm)	افت وزنی (%)
۰ (پایه)	۶۴	۵۲	-۰/۱	۱۲۲ > ۱۰۰	۰/۰۱۸
۱ (PSP)	۴۲/۶	۵۶/۸	-۰/۰۰۸	۱۱۲ > ۱۰۰	۰/۰۲
۳ (PSP)	۴۹/۲	۵۷/۲	۰/۴۱	۱۰۳ > ۱۰۰	۰/۰۲
۵ (PSP)	۳۸/۷	۶۱/۳	۰/۶۷	۹۰	۰/۰۲۷
۱ (wPSP)	۴۶/۳	۵۹/۲	۰/۶۸	۱۱۸ > ۱۰۰	۰/۰۲۶
۳ (wPSP)	۴۹/۸	۵۶/۸	۰/۳۶	۱۱۰ > ۱۰۰	۰/۰۲۷
۵ (wPSP)	۵۳/۵	۶۰/۱	۱/۲۲	۱۰۱ > ۱۰۰	۰/۰۲۷

پروپن، ۴،۱- دی کلرو- ۲- بوتن، ۲،۲،۱،۱- تراکلرواتان و ۴،۱- دی کلرو- ۲- بوتن در آن زیاد بود. پس از تهیه پلی سولفید پلیمر، درصدهای مختلفی از آن با قیر مخلوط و مشخصات قیر پلیمری تهیه شده بررسی شد.

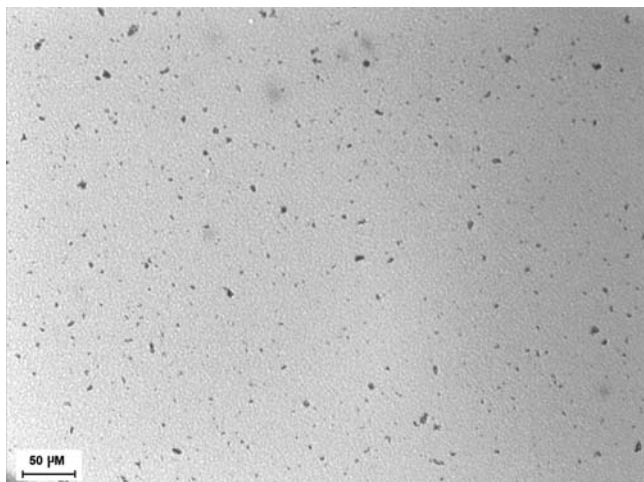
**جدول ۳** مشخصات قیر پلیمری تهیه شده از PSP و wPSP را به ازای درصدهای مختلف این پلیمرها نشان می دهد. همان طور که از نتایج این جدول مشخص است، افزودن این پلیمرها با افزایش دمای نرمی و کاهش درجه نفوذ قیر همراه است که باعث بهبود خواص قیر و در نتیجه کاهش شیاردارشدن آسفالت در دمای بالا می شود. شاخص نفوذپذیری قیر با افزایش این مواد به قیر زیاد می شود که نشان دهنده حساسیت گرمایی کم قیر به دست آمده است.

افزودن پلی سولفید پلیمر و پلی سولفید پلیمر به دست آمده از ضایعات در قابلیت کشش قیر پایه اثر قابل ملاحظه ای را ایجاد نکرد. این موضوع نشان دهنده آن است که افزودن این مواد باعث کاهش

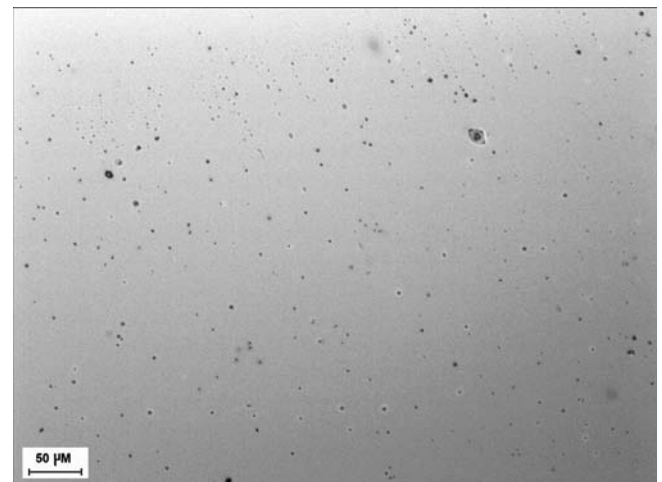
آنها تا جایی انجام شد که بارگذاری افزایش مقاومت را نشان ندهد. این عمل ادامه یافت و در نهایت عدد مربوط به استحکام فشاری و روانی نمونه ها ثبت شد. آزمون های اندازه گیری درجه نفوذ، دمای نرمی، افت وزنی، قابلیت کشش به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM D5، D36، D36، D1754 و D113 روی نمونه های تهیه شده انجام شد.

## نتایج و بحث

در ابتدا، ضایعات سنگین به کمک تقطیر از بخش جامد آنها جدا و شناسایی شدند. زیرا، درصد احتمال وجود ترکیباتی نظیر ۲،۱- دی کلرواتان، ۲،۱،۱- تری کلرواتان، ۴،۳- دی کلرو- ۱- بوتن، ۱،۱، دی کلرو پروپان، ۳،۱- دی کلرو- ۲- بوتن، ۳،۱- دی کلرو- ۲- متیل



(ب)



(الف)

شکل ۱- تصاویر میکروسکوپی آمیزه های قیری با ۵٪ پلی سولفید پلیمر و بزرگ نمایی ۱۰۰: (الف) PSP و (ب) wPSP.

جدول ۴- دانه‌بندی مخلوط آسفالتی مورد استفاده.

اندازه الک (mm)	درصد عبور
۱۹	۱۰۰
۱۲/۵	۹۵
۴/۷۵ (شماره ۴)	۵۹
۲/۳۶ (شماره ۸)	۴۳
۰/۳ (شماره ۵۰)	۱۳
۰/۰۷۵ (شماره ۲۰۰)	۶

جدول ۵- نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی مخلوط آسفالتی.

درصد اختلاط	مشخصات مصالح سنگی
۷	شن ۱۲-۱۹ mm
۳۳	شن ۶-۱۲ mm
۵۶	ماسه ۰-۶ mm
۴	پرکننده

مخلوط مصالح سنگی و نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی نشان داده شده است.

### نتایج آزمون مارشال

ابتدا با استفاده از مصالح سنگی و قیر پایه ۶۰/۷۰ درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی براساس پارامترهای مارشال مطابق **جدول ۶** به مقدار ۳ و ۵ درصد به دست آمد. سپس، با توجه به درصد قیر بهینه برای قیر پایه نمونه‌های دیگری با قیرهای پلیمری به ازای ۵ درصد پلی‌سولفید پلیمر (PSP) و ۵ درصد پلی‌سولفید پلیمر به دست آمده از ضایعات (wPSP) (که بیشترین اثر را در بهبود خواص قیر پایه حاصل کرده‌اند) با همان درصد قیر بهینه اولیه قیر پایه ساخته شد تا به ازای درصد قیر بهینه اولیه، خواص آسفالت با همان درصد قیر ولی به ازای بهترین درصد (۵٪) ترکیب قیر و دو نوع پلیمر را بتوان مقایسه کرد.

نتایج به دست آمده از آزمایش مارشال (**جدول ۷**) حاکی از آن است که افزودن پلی‌سولفید پلیمر و پلی‌سولفید پلیمر تهیه شده از ضایعات باعث افزایش فضای خالی (به علت تورم پلیمر در ترکیب با قیر) مخلوط‌های آسفالتی پلیمری نسبت به آسفالت حاوی قیر پایه شده است. اما این افزایش، باعث افزایش فضای خالی بیش از

چسبندگی قیر نمی‌شوند. درجه اشتعال قیر اصلاح شده نسبت به قیر پایه افزایش یافت یا تغییری نکرد که این امر حاکی از عدم شعله‌ور شدن آن هنگام اختلاط است. افت وزنی قیر نیز تغییر چندانی نکرد که این امر نشان‌دهنده عملکرد این مواد در جلوگیری از کاهش وزن قیر و سخت شدن تدریجی آن است.

در **شکل ۱**، نحوه توزیع ذرات پلی‌سولفید پلیمر در قیر با ۵٪ درصد وزنی و بزرگ‌نمایی ۱۰۰ نشان داده شده است. تصاویر حاکی از پخش مناسب و یکنواخت پلیمر در قیر بدون جدایی فاز پلیمری است که نشان‌دهنده سازگاری این پلیمر با قیر است.

برای تهیه مخلوط آسفالتی و ارایه طرح اختلاط از محدوده دانه‌بندی شماره ۴ (لایه رویه) مندرج در نشریه ۲۳۴ (آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران) استفاده شد. به این دلیل که اکثراً بروز انواع خرابی‌ها در رویه‌های آسفالتی اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج حاصل از دانه‌بندی مصالح سنگی تهیه شده از کارخانه آسفالت، به منظور دست‌یابی به دانه‌بندی مخلوط مصالح سنگی، با توجه به حدود مشخصات دانه‌بندی شماره ۴، نسبت‌های اختلاط مصالح سنگی معین شد. در **جدول‌های ۴ و ۵** به ترتیب نتایج دانه‌بندی

جدول ۶- پارامترهای حجمی و فیزیکی مخلوط آسفالتی به ازای درصدهای مختلف قیر.

درصد قیر	وزن مخصوص، G <sub>mb</sub>	Va <sup>۱</sup> (%)	VMA <sup>۲</sup> (%)	VFA <sup>۳</sup> (%)	استحکام مارشال (kg <sub>f</sub> )	روانی (mm)
۳/۵	۲/۲۴۸	۱۰/۸	۱۷/۲	۳۷/۰	۷۳۸	۸/۱
۴/۰	۲/۲۷۷	۹/۰	۱۶/۵	۴۵/۴	۸۷۲	۹/۰
۴/۵	۲/۲۹۸	۷/۴	۱۶/۰	۵۳/۹	۹۷۶	۹/۹
۵/۰	۲/۳۰۸	۵/۵	۱۵/۳	۶۴/۲	۱۰۸۳	۱۰/۷
۵/۵	۲/۳۳۹	۳/۵	۱۴/۶	۷۶/۰	۱۲۲۳	۱۱/۶
۶/۰	۲/۳۵۲	۲/۴	۱۴/۷	۸۳/۷	۱۱۵۷	۱۲/۰

(۱) فضای خالی مخلوط آسفالتی، (۲) فضای خالی مصالح سنگی و (۳) فضای خالی پر شده با مخلوط آسفالتی.

جدول ۷- نتایج آزمایش مارشال مخلوط‌های آسفالتی در مقدار قیر بهینه ۳ و ۵ درصد.

استحکام مارشال (kg <sub>f</sub> )	روانی (mm)	فضای خالی نمونه آسفالتی (%)	وزن مخصوص نمونه (میانگین سه نمونه)	نوع مخلوط آسفالتی
۱۰۹۰	۱۱	۴/۱	۲/۲۷۹	مخلوط رویه آسفالتی (توپکا) با قیر خالص
۱۱۵۴	۱۰/۵	۴/۵	۲/۲۷۰	مخلوط رویه آسفالتی با قیر اصلاح شده دارای ۰.۵٪ PSP
۱۱۰۴	۱۰	۴/۶	۲/۲۶۹	مخلوط رویه آسفالتی با قیر اصلاح شده دارای ۰.۵٪ wPSP

همان طور که از شکل ۲ مشخص است، با افزودن هر دو نوع پلی‌سولفید پلیمر این نسبت افزایش می‌یابد. به طوری که نسبت مارشال نمونه‌های حاوی PSP و wPSP در مقایسه با نسبت مارشال نمونه بدون افزودنی به ترتیب ۴ و ۱۱٪ افزایش نشان می‌دهد. این مطلب می‌تواند نشان‌دهنده مقاومت اولیه نمونه‌های حاوی PSP و wPSP و در نتیجه کاهش تغییر شکل‌های دائمی نمونه‌ها باشد.

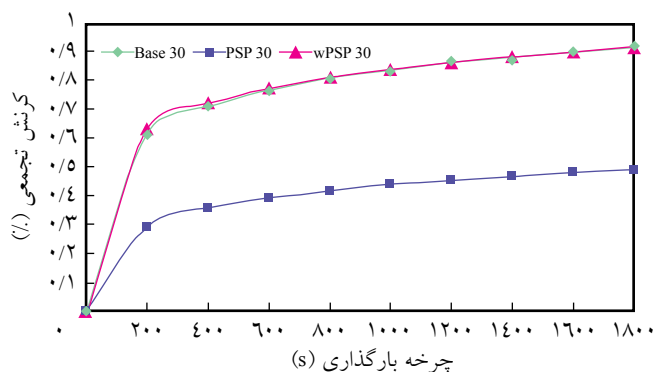
### نتایج آزمون خزش دینامیکی

مهم‌ترین هدف آزمایش خزش، مطالعه عملکرد مخلوط آسفالتی زیر بار ایستا یا پویا در برابر تغییر شکل دائمی در طول زمان است. به عبارت دیگر، به وسیله آزمایش خزش نمی‌توان عمق شیار را پیش‌بینی کرد و فقط از آن می‌توان برای تخمین پتانسیل شیارافتادگی مخلوط آسفالتی استفاده کرد. در آزمایش خزش دینامیکی برای شبیه‌سازی بهتر با شرایط بارگذاری عملی، اعمال بار به شکل تکراری است و تغییر شکل‌ها در همان جهت اعمال بار اندازه‌گیری می‌شود [۲۳]. نمودارهای مربوط به کرنش تجمعی در برابر ۱۸۰۰ چرخه بارگذاری، مربوط به دماهای مختلف برای هر سه نمونه قیر در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است.

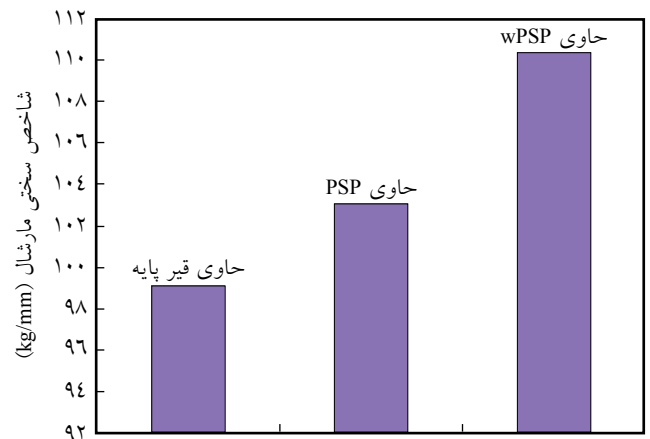
نتایج آزمایش خزش نشان می‌دهد، افزودن پلی‌سولفید پلیمر و

حد استاندارد ۳ تا ۵ درصد نمی‌شود. هم‌چنین، استحکام مارشال نمونه‌ها به مقدار اندکی افزایش یافته است، به طوری که این پارامتر برای نمونه‌های حاوی PSP و wPSP نسبت به نمونه ساخته شده با قیر پایه به ترتیب ۶ و ۲٪ افزایش داشته است. هم‌چنین نتایج این آزمایش نشان می‌دهد، با افزودن PSP و wPSP روانی نمونه‌ها به ترتیب ۵ و ۹٪ کاهش یافته است. علت این تفاوت را می‌توان به اختلاف در ساختار پلیمرها و منشا تشکیل آنها نسبت داد. اگرچه برای تولید هر دو پلیمر از مونومرهای کلردار استفاده شده است، اما برای تهیه wPSP از چند نوع مونومر کلردار (ترکیبات کلردار موجود در ضایعات سنگین تقطیر شده) استفاده شده است و پلیمرهایی از خانواده پلی‌سولفید با ساختارها و نسبت‌های متفاوت به دست آمده است و علت تفاوت مشاهده شده و کارایی بهتر wPSP می‌تواند به این دلیل باشد.

پارامتر دیگری که برای تعیین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود، نسبت مارشال است. این نسبت عبارت است از نسبت استحکام مارشال به روانی آسفالت که مقداری تجربی برای بیان مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائمی است [۲۲]. نسبت مارشال نمونه‌های آسفالتی در شکل ۲ ارایه شده است.

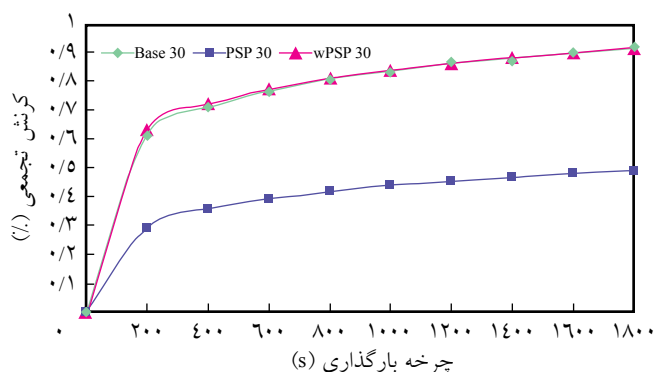


شکل ۳- نمودار روند کرنش تجمعی برای نمونه‌های قیری در دمای ۳۰°C.

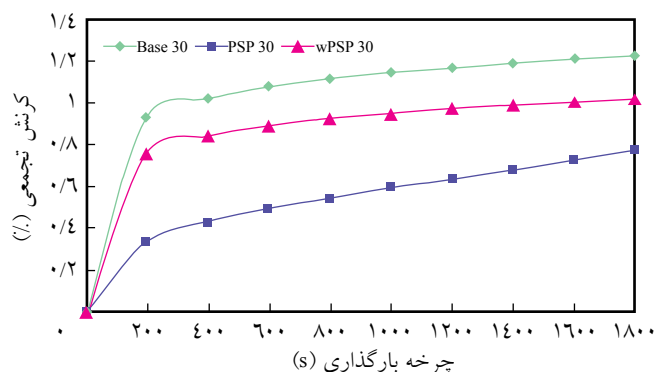


شکل ۲- نسبت مارشال نمونه‌های آسفالتی.





شکل ۵- نمودار روند کرنش تجمعی برای نمونه‌های قیری در دمای ۵۰°C.



شکل ۴- نمودار روند کرنش تجمعی برای نمونه‌های قیری در دمای ۴۰°C.

روانی مارشال-استحکام مارشال) نمونه‌های مخلوط آسفالتی پلیمری در شرایط یکسان، بیانگر استحکام نسبتاً بیشتر آسفالت پلیمری حاصل در برابر تغییر شکل‌های دایم نسبت به آسفالت حاوی قیر پایه است. هم‌چنین، نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با قیر پایه و قیرهای اصلاح شده حاکی از مقاومت زیاد مخلوط آسفالت پلیمری نسبت به آسفالت معمولی در برابر شیارجای چرخ است. با توجه به فرضیات اولیه، که این پلیمر باعث بهبود خواص قیر و مخلوط آسفالتی در دماهای بالا می‌شود، با افزایش دما مقاومت در برابر شیار جای چرخ در نمونه‌های پلیمری افزایش یافت.

با مقایسه آثار PSP و wPSP در پوشش‌های آسفالتی، عملکرد بهتر wPSP مشخص می‌شود که این امر علاوه بر صرفه اقتصادی با ایجاد کاربرد مناسبی برای wPSP، باعث جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از سوزاندن احتمالی ضایعات صنایع پتروشیمی نیز می‌شود.

## مراجع

- Kim Y.R., Park H.M., Thiago F., Aragão S., and Lutfi J.E.S., Effects of Aggregate Structure on Hot-Mix Asphalt Rutting Performance in Low Traffic Volume Local, *Construct. Build. Mater.*, **23**, 2177-2182, 2009.
- Lu X. and Redelius P., Effect of Bitumen Wax on Asphalt Mixture, *Construct. Build. Mater.*, **21**, 1961-1970, 2007.
- Lee H.J., Lee J.H., and Park H.M., Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Mixtures for Long Life Asphalt, *Construct. Build. Mater.*, **21**, 1079-1087, 2007.
- Kok B.V. and Kuloglu N., The Effects of Different Binders on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt, *Int. J. Sci. Technol.*, **2**, 41-48, 2007.
- Yildim Y., Polymer Modified Asphalt Binders, *Construct. Build. Mater.*, **21**, 66-72, 2007.
- Tayfur S., Ozen H., and Aksoy A., Investigation of Rutting Performance of Asphalt Mixtures Containing Polymer, *Construct. Build. Mater.*, **21**, 328-337, 2007.
- Sadraddini M.R., Yousefi A.A., and Kavussi A., Improving Bitumen Properties by Polymeric Materials, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **15**, 103-120, 2002.



8. Doğan M. and Bayramli E., Effect of Polymer Additives and Process Temperature on the Physical Properties of Bitumen-Based Composites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **113**, 2331–2338, 2009.
9. Pérez-Lepe A., Martínez-Boza F.J., and Gallegos C., High Temperature Stability of Different Polymer-Modified Bitumens: A Rheological Evaluation, *J. Appl. Polym. Sci.*, **103**, 1166–1174, 2007.
10. Naskar M., Chaki T.K., and Reddy K.S., Effect of Waste Plastic as Modifier on Thermal Stability and Degradation Kinetics of Bitumen/Waste Plastics Blend, *Thermochimica Acta*, **509**, 128-134, 2010.
11. Navarro F.J., Partal P., Martínez-Boza F.J., and Gallegos C., Novel Recycled Polyethylene/Ground Tire Rubber/Bitumen Blends for Use in Roofing Applications: Thermo-Mechanical Properties, *Polym. Test.*, **29**, 588-595, 2010.
12. Xiang L., Cheng J., and Que G., Microstructure and Performance of Crumb Rubber Modified Asphalt, *Construct. Build. Mater.*, **23**, 3586-3590, 2009.
13. Yousefi A.A., Polymer-Modified Bitumen from the Wastes of Petrochemical Plants, *Iran. Polym. J.*, **18**, 207-215, 2009.
14. Yousefi A., Yousefi A.A., and Arjomandi M., The Properties of Polymer-modified Asphalt Derived from Vacuum Bottom and Wastes of PE and SBR Plants, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **21**, 235-241, 2008.
15. Brule B., Brion Y., and Tanguy A., Paving Asphalt Polymer Blends: Relationship between Composition, Structure and Properties, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **57**, 41-64, 1988.
16. Lu X. and Isacson U., Modification of Road Bitumen with Thermoplastic Polymers, *Polym. Test.*, **20**, 77-86, 2001.
17. Mortazavi S.B., Rasoulzadeh Y., Yousefi A.A., and Khavanin A., Properties of Modified Bitumen Obtained from Vacuum Bottom by Adding Recycled Waste Polymers and Natural Bitumen, *Iran. Polym. J.*, **19**, 197-205, 2010.
18. Rasoulzadeh Y., Mortazavi S.B., Yousefi A.A., Khavanin1 A., and Kazemnejad Lili A., Effect of Recycled Waste Polymers, Natural Bitumen and HVS Cut on the Properties of Vacuum Bottom, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **23**, 85-95, 2010.
19. Navarro F.J., Partal P., García-Morales M., Martín-Alfonso M.J., Martínez-Boza F., Gallegos C., Bordado J.C.M., and Diogo A.C., Bitumen Modification with Reactive and Non-Reactive (Virgin and Recycled) Polymers: A Comparative, *J. Ind. Eng. Chem.*, **15**, 458-464, 2009.
20. Shirkavand Hadavand B., Bitumen Modification with Polysulfide Polymer Prepared from Heavy End Waste, *Iran. Polym. J.*, **19**, 363-373, 2010.
21. Shirkavand Hadavand B. and Khoshnevisan Z., New Method for Direct Synthesis of Liquid Polysulfide Polymer Using Heavy End Waste, The 12th European Polymer Congress (EPF'09), Graz, Austria, 12-17 July, 2009.
22. Brown E.R., Kandhal P.S., and Zhang J., Performance Testing for Hot Mix Asphalt, National Center for Asphalt Technology, NCAT, Report 01-05, 2001.
23. Asi I.M., Performance Evaluation of Superpave and Marshal Asphalt Mix Design to Suit Jordan Climatic and Traffic Condition, *Construct. Build. Mater.*, **21**, 1732-1740, 2007.