# مطالعه‌ی تأثیر توأمان مواد افزودنی پلیمر و زایکوترم در اصلاح خواص قیر و مقاومت مارشال بتن آسفالتی مصالح سیلیسی

**پیام احترامیان***کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران دانشگاه علوم تحقیقات فارس، مشاور معاون عمرانی و مسئول حراست حوزه معاونت فنی و عمرانی شهرداری شیراز

**امیدرضا بهادری‌نژاد**دانشجوی دکتری عمران دانشگاه بوعلی سینا، کارشناس‌ارشد معاونت فنی و عمرانی شهرداری شیراز

## چکیده

امروزه قیرهای اصلاح‌شده جایگاه مهمی در پروژه‌های عمرانی به‌دست آورده‌اند. پلیمرها به‌منزله‌ی مهم‌ترین خانواده‌ی اصلاح‌کننده‌ی قیر، برای بهبود عملکرد و افزایش کارایی مخلوط نهایی به قیر اضافه می‌شوند. افزودن پلیمر به قیرها، آثار مثبتی روی خواص و عملکرد آن‌ها در دمایزیاد و کم و مقاومت در برابر شیارشدگی و ترک‌های گرمایی دارد. پلیمرها حساسیت گرمایی قیر را کاهش‌می‌دهند، به‌ویژه در دمایزیاد که قیر جاری می‌شود؛ همچنین این مواد مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر خستگی افزایشداده، چسبندگی قیر را نیز بیشتر می‌کنند. دراین مقاله سعی شده است به بررسی دو نوع مواد افزودنی زایکوترم و پلیمر و برخی عملکردها و خصوصیات ویژه‌ی آسفالت‌های تولیدشده ازاین نوع قیرها پرداخته شود. در نهایت مشاهده گردید که پلیمر نسبت‌به زایکوترم عملکرد بهتری را از لحاظ مقاوت مارشال و جلوگیری از روآمدن ترک‌های آسفالتی و بروز ترک‌های انعکاسی از خود نشان داده است.

**واژه‌های کلیدی:** مصالح سیلیسی، زایکوترم،مقاومت مارشال، عریان‌شدگی.

---

* نویسنده مسئول p-ehteramian@gmail.com

## ۱. مقدمه

توجه به ایمنی و راحتی جاده‌ها، از مهم‌ترین اصول راهسازی مدرن است؛ مثلاً سطح جاده باید طوری باشد که اصطکاک لازم را ایجاد کند تا از لیزخوردن اتومبیل‌ها جلوگیری نماید، همچنین صدای ناهنجار ایجاد نکند. علاوه‌بر داشتن سطحی هموار، از جمع‌شدن آب روی جاده جلوگیری شود. طراحان و مهندسان در تلاش برای یافتن روش‌ها و مواد مناسبی برای اصلاح آسفالت هستند. از جمله مهم‌ترین موادی که تاکنون برای این منظور به‌کار رفته و نتایج بسیار رضایت‌بخشی به همراه داشته است، پلیمرها می‌باشند. قیر به‌منزلهٔ چسبنده‌ای ایده‌آل برای ساخت آسفالت به‌کار می‌رود. این ماده در دمای بالا مایعمی‌شود و می‌تواند با سنگدانه‌ها مخلوط شود، آن‌ها را به هم بچسباند و آسفالت تشکیل دهد. در دمای معمول، قیر به‌صورت یک ماده ویسکوالاستیک عمل می‌کند؛ به‌علاوه چسبندگی خوبی داشته، در برابر نفوذ آب مقاوم است. با این همه، برخی از مشکلات راه‌ها نظیر خردشدن آسفالت بر اثر خستگی، ایجاد شیار بر روی آسفالت بر اثر افزایش بار محوری، روان‌شدن آسفالت در اثر گرما و کنده‌شدن و خردشدن سنگدانه‌ها، مربوط به قیر مصرفی می‌باشند؛ بنابراین شیمیدان‌هابرای بهبود خواص قیرتلاش زیادی کرده‌اند. (Yousefi et al. 1998; Yousefi, 1999).

یکی از راه‌های اصلاح یک ماده، اضافه‌کردن مواد دیگر به آن است. به دلیل یکسان‌بودن منشأ پلیمرها و قیر که از نفت خام می‌باشند، پلیمرها از اولین مواد اصلاح‌کننده‌ای بودند که برای افزودن به قیر پیشنهاد شدند. با استفاده از فرایندهای شیمیایی می‌توان پلیمرهای جدید با خواص مطلوب تهیه کرد (تنوع). پلیمرها موادی پایدار و بازیافت‌شدنی هستند (توجیه اقتصادی). اواسط دهه‌ی ۷۰ میلادی یک شرکت نفتی توانست با اضافه‌کردن $EVA_3$، به قیری با انعطاف‌پذیری بهتر دست یابد. کمی بعد با کشف $SBS_4$ها شیمیدان‌ها توانستند خواص قیر را باز هم بهبود بخشند. اولین آزمایش موفقیت‌آمیزPMBها در اواخر دهه‌ی ۷۰ میلادی در جاده‌های انگلستان انجام شد. هدف از این پژوهش، بررسی و

مطالعه‌یتأثیرزایکوترم و پلیمر در اصلاح خواص قیر و بهبود خواص آسفالت می‌باشد (Zakar, 1971; Speight, 1980; Nicholls, 1998; Yousefi and Yousefi, 2007).

## ۲. بهبود خواص قیر با اضافه‌کردن پلیمر

قیر خوب قیری است که حساسیت حرارتی آن کم بوده، چسبندگی مناسب داشته باشد و در دمایکم شکننده نشود. مواد پلیمری حساسیت حرارتی قیر را کاهش می‌دهند، مخصوصاً در دمایزیاد که قیر جاری می‌شود؛یعنی دمای نرم‌شدن[1] را افزایش می‌دهند تا قیر دیرتر روان شود(Brown, 1990; Yousefi, 2002). این مواد همچنین مقاومت در برابر خستگی را زیاد می‌کنند؛ یرا باعث می‌شوند قیر در دمای پایین هم، همچنان انعطاف‌پذیری خود را حفظ کند و نیز چسبندگی قیر را به میزان زیاد افزایش می‌دهند. یک چسبنده‌ی ایدئال باید در دمای معمولی، رفتاری ثابت داشته باشد؛ سپس در دمای اختلاط به ماده‌ای ویسکوز تبدیل شود. قیر در طبیعت رفتار ایده‌آلی نشان نمی‌دهد و در برابر تغییرات دما دچار تغییرات پیوسته می‌شود(Yousefi, 2004).

استفاده از پلیمر بهبود شایانی در رفتار ویسکوالاستیک قیر پدید می‌آورد. این مواد خاصیت الاستیکی قیر را در دماهای بیشتر حفظ می‌کنند. باید توجه داشت لازمه‌ی تغییرات ذکرشده، پدیدآمدن یک شبکه‌ی پلیمری در داخل قیر می‌باشد؛ یعنی تا زمانی‌که این شبکه به وجود نیامدهاست، بهبودی در خاصیت قیر مشاهده نمی‌شود(Walter, 1993).

## ۳.مواردی از کاربرد آسفالت پلیمری

**۱-۳.** با افزایش ترافیک و بار محوری ناشی از آن، مشاهده می‌شود که سطح بسیاری از جاده‌ها، مخصوصاً در هوای گرم، شیارشیار و ناهموار می‌شود. قبلاً برای جبران این نقیصه از آسفالت سفت‌تر استفاده می‌شد که این باعث شکنندگی آسفالت (مخصوصا در هوای سرد) می‌شد. ولی اکنون با استفاده از PMB می‌توان از نرم‌شدن

1. Softening Point.

آسفالت در دمایبیشتر و در نتیجه از ایجاد شیار بر روی آن و همچنین از شکنندگی آسفالت در دمای پایین جلوگیری کرد.پیشگیری از شکنندگی نتیجه‌ی حفظ الاستیسیتهPMBها در دمای‌کمتراست (Gonzalez et al, 2004; Navarro et al, 2007).

**۲-۳.** ازبین‌بردن آب‌های سطحی در روزهای بارانی، ایمنی جاده‌ها را افزایش می‌دهد. آسفالت زهکشی یا متخلخل، آسفالتی است دارای دانه‌بندی منقطع و درشت. آب از بین این دانه‌ها رد می‌شود و به کانال‌های آبی انتقال می‌یابد. این نوع آسفالت چند مشکل عمده دارد: سنگدانه‌های آن به علت درشتی خیلی زود کنده می‌شوند؛ بر اثر فشارهای ترافیکی ممکن است روی آسفالت شیار ایجاد شود (به علت فضای خالی بین سنگدانه‌ها)، آب نیز سنگدانه‌ها را کنده، با خود می‌برد(Garcia-Morales, 2007).

## ٤. ارزیابی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با استفاده از پلیمر رشته‌ای

با توجه به این که قیر از نظر کمی سهم کمتری نسبت‌به مصالح سنگی در مخلوط‌های آسفالتی دارد، شاید چنین تصور شود که نقش قیر در رفتار و دوام و عملکرد لایه‌های روسازی آسفالتی چندان بااهمیت و قابل‌ملاحظه نیست؛اما حقیقت این است که قیر و خواص فیزیکی و شیمیایی آن تأثیر عمده‌ای در عملکرد مطلوب و دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی دارد. برای عملکرد مناسب و پایداری روسازی آسفالتی، قیر مصرفی باید ضمن داشتن دوام، رفتار و عملکرد مناسبی نیز در محدوده‌ی دماهایزیاد وکم و میانی داشته باشد. امروزه علاوه‌بر قیر و مصالح سنگی، از مواد افزودنی یا اصلاح‌کننده‌های قیر نیز استفاده می‌شود. این ترکیبات که طیف وسیعی را در بر می‌گیرند، به‌منظور اصلاح و بهبود برخی از خواص قیر و در نتیجه مخلوط‌های آسفالتی، به شرح زیر کاربرد دارند (Yousefi et al, 2000; Barral et al, 2003; Polaczek et al, 1999; Yousefi, 2003):

- جلوگیری از عریان‌شدگی سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی؛
- جلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی و انقباضی؛

- کاهش پدیده‌های تغییرشکل و قیرزدگی رویه‌های آسفالتی؛
- جلوگیری از روآمدن ترک‌های آسفالتی و بروز ترک‌های انعکاسی؛
- کاهش پدیده‌ی سخت‌شدن و پیرشدگی قیر؛
- افزایش مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی.

برای اینکه یک افزودنی، مؤثر-کاربردی و اقتصادی باشد، باید بتواند شرایط زیر را فراهم سازد:

- به‌آسانی در دسترس بوده، مقرون‌به‌صرفه نیز باشد؛
- در دماهای اختلاط مخلوط آسفالتی تخریب نگردد؛
- به‌راحتی و با کمترین هزینه با قیر مخلوط گردد؛
- در دماهای زیاد روسازی، مقاومت در برابر روانی را افزایش دهد؛ بدون اینکه قیر را در دمای اختلاط و پخش خیلی ویسکوز کرده یا خیلی سفت کند و بدون اینکه در دماهای پایین روسازی آن را شکننده کند؛
- مشخصات اولیه‌ی قیر را در طول زمان ذخیره‌سازی و اجرا و سرویس‌دهی حفظ کند؛
- از نظر فیزیکی و شیمیایی در طول زمان انبارش و اجرا و سرویس‌دهی پایدار باشد؛
- در دماهای معمول اجرای مخلوط آسفالتی، به کندروانی مدنظر برسد و قابل‌تزریق و پمپ‌شدن باشد.

یک مطالعه‌ی تحقیقاتی با استفاده از قیر پالایشگاه تهران و مصالح سنگی معادن اطراف این شهر در محل شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی توسط شرکت لارین گام انجام شد. این آزمایش به‌منظور ارزیابی تأثیر استفاده از پلیمر الاستوپلاستومر رشته‌ای در عملکرد و دوام مخلوط‌های آسفالتی گرم به انجام رسید و ویژگی‌های عملکردی مخلوط‌های آسفالت گرم معمولی و آسفالت گرم اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای با انجام آزمایش‌های عملکردی از جمله آزمایش خستگی تیرچه خمشی چهارنقطه‌ای و مدول برجهندگی و شیارافتادگی چرخ بارگذاری

ویلتراکهامبورگ ارزیابی گردید؛ همچنین رفتار و ویژگی‌های رئولوژی قیرهای خالص و اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای با انجام آزمایش‌های عملکردی و تعیین درجه‌بندی عملکردی قیر ارزیابیشد.

طرح اختلاط مخلوط آسفالتی لایه توپکا ۱۹- ۰ میلیمتر با محدوده‌ی مشخصات دانه‌بندی شماره‌ی ٤ مندرج در نشریه‌ی شماره‌ی ۲۳٤، آیین‌نامه‌ی روسازی آسفالتی راه‌های ایران، با تعیین مقدار قیر بهینه به میزان ٦/۱ انجام شد. شایان ذکر است،برای تهیه و آماده‌سازی قیر اصلاح‌شده، ابتدا قیر تا رسیدن به دمای ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد گرم شد و همزمان با افزودن تدریجی افزودنی به مقدار ۲۰ درصد وزنی قیر فرایند هم‌زدن با سرعت کم آغاز گردید؛ سپس با استفاده از همزن برش بالا و سرعت چرخش ۳۰۰۰ دور دقیقه، عمل اختلاط به مدت ۱۵ دقیقه به انجام رسید.

آزمایش‌های عملکردی قیر شامل آزمایش‌های پیرشدگی RTFOT و PAV و آزمایش‌های رئومتری DSR و BBR و RV بر روی قیرهای خالص و اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای انجام شد و این قیرها با درجه عملکردی، به‌ترتیب، PG٦٤-۲۲ و ۲۸- PG٧٦ طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان دادند که اصلاح قیر با پلیمر رشته‌ای باعث افزایش و ارتقای مشخصات آن در محدوده‌ی دماهایزیاد و کم خدمت‌دهی روسازی می‌شود؛ به نحوی که درجه عملکردی دمایزیاد قیر به اندازه‌ی دو رده و درجه عملکردی دمایکم آن به اندازه‌ییک رده ارتقاء می‌یابد. این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که قیر اصلاح‌شده می‌تواند در برابر خرابی‌های شیارافتادگی و ترک حرارتی و ترک خستگی، مقاومت و عمر بیشتری نسبت‌به قیر خالص تأمین کند.

آزمایش خزش دینامیکی نمونه‌های آسفالتی معمولی و اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای در دمای ٤۵ درجه سانتی‌گراد براساس استاندارد AASHTO T324 انجام شد. مطابق استاندارد، مدت‌زمان آزمایش ۳٦۰۰ ثانیه بود و در این مدت ۱۸۰۰ سیکل بارگذاری اعمال شد که در هر سیکل، مدت اعمال بار با مقدار ۱۰۰ کیلوپاسکال برابر یک ثانیه است. نتایج آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهند که آسفالت اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای، در برابر تغییرشکل‌های دائمی مقاومت

بیشتریدارد؛ به نحوی که در پایان بارگذاری، کرنش نمونه آسفالت اصلاح‌شده ۱/۵ برابر کمتر از مقدار آن برای آسفالت گرم معمولی ساخته‌شده با قیر خالص است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مخلوط آسفالت اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای، در معرض خرابی شیارافتادگی، در دماهایزیاد سرویس‌دهی دوام و عمر بیشتری نسبت‌به مخلوط آسفالتی معمولی دارد.

**جدول ۱: نتایج آزمایش خزش دینامیکی پس از ۱۸۰۰ سیکل بارگذاری**

| نوع مخلوط آسفالتی | کرنش تجمعی نهایی (درصد) |
|---|---|
| مخلوط آسفالتی معمولی | ۱/۱۵٦ |
| مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پلیمر رشته‌ای | ۰/۷٤۹ |

آزمایش خستگی تیرچه خمشی چهارنقطه‌ای نمونه‌های آسفالتی معمولی و اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای مطابق روش استاندارد AASHTO T321 انجام پذیرفت. نتایج آزمایش نمونه‌های مذکور در دمای ۲۰ درجه‌ی سانتیگراد و کرنش‌های ۲۵۰ و ٤۰۰ میکرو در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که تعداد سیکل بارگذاری عمر خستگی نمونه‌های اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای در کرنش‌های بارگذاری ۲۵۰ و ٤۰۰ میکرو، به‌ترتیب، ۲/۹ و ۱/۹ برابر بیشتر از مخلوط آسفالت گرم معمولی حاوی قیر خالص است. این نتایج نشان می‌دهند که رفتار و عملکرد خستگی مخلوط اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای، در مقایسه با مخلوط شاهد ساخته‌شده با قیر خالص، بهبود چشمگیری دارد؛ بنابراین اصلاح‌کردن مخلوط آسفالتی گرم با پلیمر رشته‌ای، مقاومت کششی مخلوط و مقاومت آن را در برابر ترک‌های ناشی از خستگی (ترک‌خوردگی پوست‌سوسماری) افزایش می‌دهد.

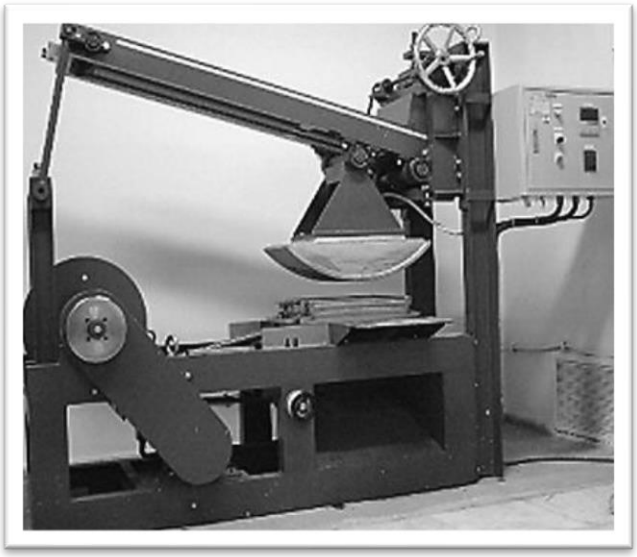
**جدول۲: نتایج آزمایش خزش دینامیکی پس از ۱۸۰۰ سیکل بارگذاری**

| نوع مخلوط آسفالتی | میکرو کرنش | تعداد سیکل نهایی |
|---|---|---|
| مخلوط آسفالتی معمولی | ۲۵۰ | ۲۳٤۷٦۷۰ |
| | ٤۰۰ | ٦۱۳۲۰ |
| مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پلیمر رشته‌ای | ۲۵۰ | ٦۷۹۸۵۰۰ |
| | ٤۰۰ | ۱۱٤۱٦۰ |

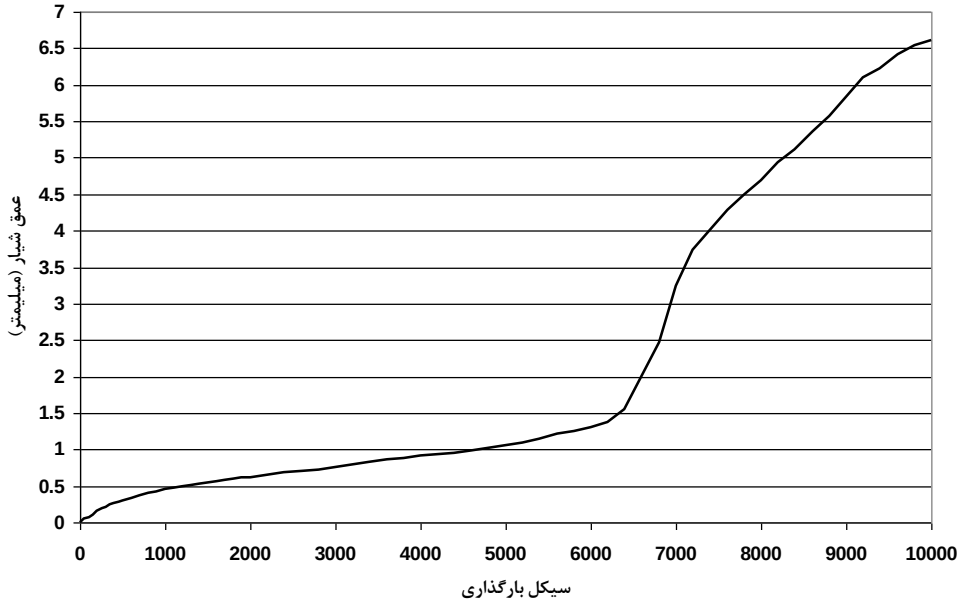
آزمایش شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی گرم معمولی و اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای به وسیله‌ی دستگاه شیارافتادگی ویلتراک هامبورگ که در شکل ۱ نشان داده شده است، مطابق استاندارد AASHTO T324 انجام شد. در این دستگاه، چرخ بارگذاری با بار ثابت بر روی سطح نمونه، به‌صورت رفت‌وبرگشتی حرکت می‌کند و نمونه در شرایط خشک یا غرقاب آزمایش می‌شود. نمونه‌ی استفاده‌شده در این دستگاه، ابعاد ۵ و۳۰ و۳۰ سانتیمتریدارد. چرخ بارگذاری دستگاه، ۲۰ سانتیمتر قطر و ۵ سانتیمتر عرض دارد. نمونه‌ها به‌وسیله‌ی دستگاه تراکم غلتکی متراکم شدند که در آن از روش مالشی برای تراکم استفاده می‌شود و در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه‌های دال آسفالتی در شرایط غوطه‌ور در آب ۵۰ درجه‌ی سانتیگراد، بار چرخ ۷۰۵ نیوتن و سرعت حرکت رفت‌وبرگشتی ۵۰ عبور در دقیقه، تحت ۲۰۰۰۰ عبور چرخ بارگذاری (۱۰۰۰۰ رفت‌وبرگشت) قرار گرفتند. مقدار عمق شیار در سیکل‌های مختلف برای مخلوط‌های آسفالتی گرم معمولی و اصلاح‌شده با پلیمر رشته‌ای در شکل‌های ۳ و ٤ ارائه شده است. مقدار عمق شیار نمونه‌های مخلوط آسفالتی معمولی و اصلاح‌شده پس از ۲۰۰۰۰ عبور چرخ بارگذاری، به‌ترتیب برابر ٦/٦۲ و ۰/۱۳ میلیمتر بوده است؛ همچنین مخلوط آسفالتی گرم شاهد ساخته‌شده با قیر خالص، در مسیر حرکت چرخ بارگذاری تحت تأثیر آب دچار خرابی عریان‌شدگیشد و شیارافتادگی آن با شدت بیشتری ادامه یافت. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که اصلاح‌کردن قیر با استفاده از پلیمر الاستوپلاستومر رشته‌ای، باعث افزایش مقاومت آسفالت گرم در برابر تغییر شکل‌های دائمی و شیارافتادگی جی چرخ در روسازی می‌شود. به‌علاوه با توجه به اینکه مخلوط آسفالتی گرم معمولی دچار خرابی عریان‌شدگی گردید، اتفاقی که

برایمخلوط اصلاح‌شده روی نداد، اصلاح قیر با پلیمر رشته‌ای، دوام رطوبتی مخلوط آسفالتی و مقاومت آن را در برابر عریان‌شدگی و همچنین خرابی‌های شن‌زدگی و ترک خستگی افزایش می‌دهد.

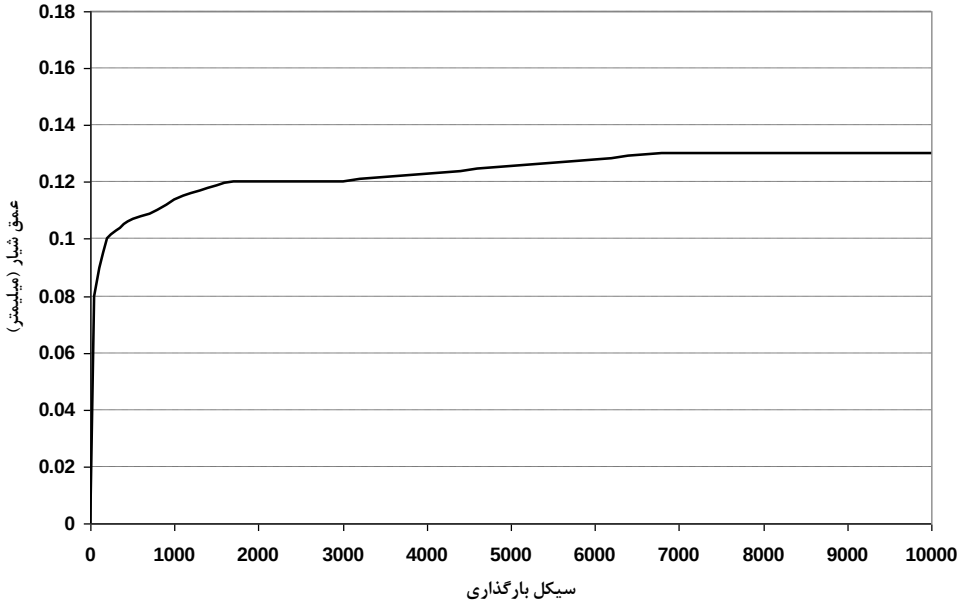
**شکل ۱: دستگاه شیارافتادگی ویلتراک هامبورگ**



**شکل ۲: دستگاه تراکم غلتکی**




**شکل ۳: نمودار عمق شیارافتادگی مخلوط آسفالتی معمولی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری**




**شکل ٤: نمودار عمق شیارافتادگی مخلوط آسفالتی پلیمری در مقابل تعداد سیکل بارگذاری**

نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که اصلاح قیر با استفاده از پلیمر الاستوپلاستومر رشته‌ای و تولید مخلوط آسفالتی با استفاده از این نوع پلیمر، دوام مخلوط آسفالتی گرم را افزایشمی‌دهد و بروز خرابی‌های رایج رویه‌ی راه‌ها، از جمله ترک‌خوردگی پوست‌سوسماری ناشیاز خستگی، شیارافتادگی و خرابی‌های عریان‌شدگی را به تأخیر می‌اندازد.

## ۵. ارزیابی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با استفاده از زایکوترم

زایکوترم از جمله موادی است که بهبوددهنده‌ی پوشش قیر روی مصالح آسفالتی و ضد عریان‌شدگی و بهبوددهنده‌ی تراکم‌پذیری مخلوط آسفالتی می‌باشد وباعث تولید آسفالت‌هایی سیاه‌تر می‌شود و محصولی با فناوری نانو است. این محصول به نحو توجه‌برانگیزی موجب بهبود پوشش قیر روی مصالح سنگی شده، تراکم یکنواخت و بهتر را تضمینمی‌کند و باعث رفع کامل عریان‌شدگی مصالح سنگی از قیر می‌شود. در نتیجه‌ی دستیابی به روسازی، آسفالتی بادوام در طول عمر کاری آن فراهم می‌کند (Yousefi and Ramazani, 2005; Yousefi, 2008).میزان مصرف زایکوترم برای قیرهای اصلاح‌نشده به مقدار ۰/۱ درصد نسبت‌به وزن قیراست.

### مزایای زایکوترم

۱. امکان تولید آسفالت تا دمای ۱۲۰ درجه‌ی سانتیگراد، در نتیجه کاهش مصرف سوخت به میزان ۲۰ تا ۲۵ درصد؛

۲. پخش‌شدن بهتر و مصرف قیر کمتر (٤ تا ٤/٥ درصد کاهش مصرف قیر در مخلوط آسفالتی)؛

۳. رفع کامل مشکل عریان‌شدگی مصالح سنگی از قیر، افزایش مقاومت در برابر آزمایش جوشیدن به مدت ٦ ساعت با باقی‌ماندن ۹۵ درصد پوشش قیری؛

٤. پوشش کامل فیلرهای زیر ۱۰۰ میکرون با قیر، در نتیجه تولید آسفالت سیاه‌تر با ظاهر بهتر؛

۵. کاهش دمای تراکم در محل تا ۹۰ درجه‌ی سانتیگراد و دستیابی به تراکم

یکنواخت با تعداد دفعات عبور مساوی و امکان حمل آسفالت به مسافت‌های طولانی‌تر؛

٦. بهبود مقاومت کششی (TSR) به میزان ۸۰ تا ۹۰ درصد؛

۷. روانی و اختلاط‌پذیری قیر سخت‌شده در آسفالت‌های بازیافتی (RAP/RAS) به‌منظور کاهش و حذف شن‌زدگی؛

۸. امکان اجرا و پهن‌کردن آسفالت در دمای زیر صفر درجه‌ی سانتیگراد و شرایط محیطی سرد (۵- درجه‌ی سانتیگراد).

۹. کاهش چسبندگی مخلوط آسفالتی به چرخ کامیون‌ها و غلتک‌ها تا دمای ۹۰ درجه‌ی سانتیگراد؛

۱۰. پایداری بیش از ۱۵ روز پس از افزودن به قیر، در نهایت مناسب برای اختلاط با قیر در ترمینال مبدأ و ذخیره‌سازی.

همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، باتوجه به آنکه مصالح از نوع سیلیسی است و جذب قیر آن بسیار کم می‌باشد، استفاده از مواد افزودنی زایکوترم باعث می‌شود که با ایجاد غشایی چسبنده در اطراف مصالح، از عریان‌شدگی و قیرزدگی سطوح بتن آسفالتی جلوگیریشود؛ ولی باتوجه به هزینه‌ی زیاد زایکوترم و مزیت پلیمر در تمام موارد، همانطور که در نتایج مشخص است، پلیمر از لحاظ مقاومت بهترین عملکرد را، حتی نسبت‌به قیر اصلاح‌شده با پلیمر و زایکوترم دارد و علت آن عملکرد زایکوترم به‌منزله‌ی جداساز بین مصالح و پلیمر می‌باشد که به کاهش عملکرد همه‌جانبه پلیمر با مصالحمنجر می‌شود.

**جدول ۳: نتایج آزمایشگاهی مشخصات فنی استاندارد آسفالت با قیر اصلاح‌شده با پلیمر و زایکوترم**

| مشخصات | محدوده‌ی استاندارد | قیر اصلاح نشده | قیر اصلاح شده با پلیمر | قیر اصلاح شده با زایکوترم | قیر اصلاح شده با پلیمر و زایکوترم |
|---|---|---|---|---|---|
| مقاومت مخلوط آسفالتی(استحکام) | >۸۰۰ | ۹۲۱ | ۱۲۲۳ | ۱۰۵۰ | ۹۳۷ |
| نرمی (mm) | ۲-۳/۵ | ۳/۱۸ | ۳/۲۳ | ۲/۵۸ | ۲/٦٤ |
| درصد فضای خالی پرشده با قیر | ٦۵-۷۵ | ٦۹ | ۷۲ | ۷۳ | ٦۹ |
| درصد فضای خالی نمونه مارشال | ۳-۵ | ۵/۹ | ٤/۷٦ | ٤/۸۱ | ۵/۵۷ |

## ٦.نتیجه‌گیری

مجموعه‌نتایج گرفته‌شده از این پژوهش به شرح زیراست:

- نتایج منتهی به استفاده پلیمر:

۱. مقاومت مخلوط آسفالتی (استحکام) در نتیجه‌ی استفاده از پلیمر نسبت‌به زایکوترم و همچنین زایکوترم- پلیمر؛

۲. جلوگیری از عریان‌شدگی سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی؛

۳. جلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی و انقباضی؛

٤. کاهش پدیده‌های تغییرشکل و قیرزدگی رویه‌های آسفالتی؛

۵. جلوگیری از روآمدن ترک‌های آسفالتی و بروز ترک‌های انعکاسی؛

٦. کاهش پدیده‌ی سخت‌شدن و پیرشدگی قیر.

نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که اصلاح قیر با استفاده از پلیمر الاستوپلاستومر رشته‌ای و تولید مخلوط آسفالتی با استفاده از این نوع پلیمر، دوام مخلوط آسفالتی گرم را افزایشمی‌دهد و بروز خرابی‌های رایج رویه‌ی راه‌ها را، از جمله

ترک‌خوردگی پوست‌سوسماری ناشیاز خستگی و شیارافتادگی و خرابی‌های عریان-شدگی، به تأخیر می‌اندازد.

– نتایج منتهی به استفاده اززایکوترم:

۱. از مجموعه مزایای زایکوترم، رفع کامل مشکل عریان‌شدگی مصالح سنگی از قیر و افزایش مقاومت در برابر آزمایش جوشیدن به مدت ٦ ساعت با باقی ماندن ۹۵درصد پوشش قیری است؛

۲. پوشش کامل فیلرهای زیر ۱۰۰ میکرون با قیر، در نتیجه تولید آسفالت سیاه‌تر با ظاهر بهتر؛

۳. کاهش دمای تراکم در محل، تا ۹۰ درجه‌ی سانتیگراد و دستیابی به تراکم یکنواخت با تعداد دفعات عبور مساوی و امکان حمل آسفالت به مسافت‌های طولانی‌تر؛

٤. امکان اجرا و پهن‌کردن آسفالت در دمای زیر صفر درجه‌ی سانتیگراد و شرایط محیطی سرد (۵– درجه‌ی سانتیگراد)؛

۵. کاهش چسبندگی مخلوط آسفالتی به چرخ کامیون‌ها و غلتک‌ها تا دمای ۹۰ درجه‌ی سانتیگراد.

در مجموع استفاده از مواد افزودنی زایکوترم، باعث می‌شود که با ایجاد غشایی چسبنده در اطراف مصالح، از عریان‌شدگی و قیرزدگی سطوح بتن آسفالتی جلوگیری گردد؛ ولی باتوجه به هزینه‌یزیاد زایکوترم و مزیت پلیمر در تمام موارد، همانطور که در نتایج مشخص است، پلیمر از لحاظ مقاومت بهترین عملکرد را حتی نسبت‌به قیر اصلاح‌شده با پلیمر و زایکوترم دارد و علت آن عملکرد زایکوترم به‌منزله‌ی جداساز بین مصالح و پلیمر می‌باشد که به کاهش عملکرد همه‌جانبه‌ی پلیمر با مصالح منجر می‌شود.

## منابع


1. Barral, M.; Santamaria, A.; Peria, J.J. & Munoz M.E. (2003). Ternary Gels of a Polymer Blend and a Recycled Oil: Their Use as Bitumen Modifiers, *Macromol. Mater. Eng*., 288, 951-956.
2. Brown,S. (1990). *The Shell Bitumen Handbook Surry*, Shell Bitumen.
3. Garcia-Morales, M.; Partal, P.; Navarro, F.J.; Martinez-Boza, F.J. and Gallegos C. (2007*).* Processing, Rheology and Storage Stability of Recycled EVA/LDPE Modified Bitumen.*Polym. Eng. Sci.*, 47,181-191.
4. Gonzalez, O.; Munoz, M.E.; Santamaria, A.; Garcia-Morales, M.; Navarro, F.J. & Partal, P. (2004). Rheology and Stability of Bitumen/EVA Blends, Eur, Polym, J., 40, 2365-2372.
5. Navarro, F.J.; Partal, P.; Martinez-Boza, F.J.&Gallegos, C. (2007). Influence of Processing Conditions on the Rheological Behavior of Crumb Tire Rubber-modified Bitumen, *J. Appl, Polym, Sci*.,104, 1683-1691.
6. Nicholls, J.C. (1998). *Asphalt Surfacings*, E&FN Spon, New York.
7. Polaczek, J.; Zielinski, J.; Machowska, Z. & Wielgosz, Z. (1999). Thermal Conversion of Plastics Waste in Secondary Petroleumderived Bitumens,*Polym. Adv. Technol.*, 10, 567-569.
8. Speight, J.G. (1980). *The Chemistry and Technology of Petroleum*, New York, Marcel-Dekker.
9. Walter, H.F. (1993). *Use of Waste Materials in Hot-mix Asphalt, Philadelphia*, ASTM Technical Publication (STP 1193).
10. Yousefi, A. (2008). Polymer-Modified Bitumen from Vacuum Bottom and PE, SBR and NMP Wastes, MSc Thesis, Department of Chemical Engineering, Islamic Azad University, Tehran South Campus.
11. Yousefi, A.A. & Ramazani, N. (2005). Polymeric Asphalt, Proceedings of the 2nd Iranian Bitumen and Asphalt Conference, Tehran University, 76, December.
12. Yousefi. A.A. & Yousefi, A. (2007). *Modification of Bitumen*

*Using Petrochemical Westes*, Report of Project No, 31713103, Iran Polymer and Petrochemical Institute.

13. Yousefi, A.A.; Ait-Kadi, A.& Roy, C. (1998). Effect of Elastomeric and Plastomeric Tougheners on Different Properties of Recycled Polyethylene, *Adv, Polym, Technol,* 17, 127-143.
14. Yousefi, A.A.; Ait-Kadi, A. & Roy, C. (2000). Effect of Used-tirederived Pyrolytic Oil Residue on the Properties of Polymermodified Asphalts, *Fuel*, 79, 975-986.
15. Yousefi, A.A. (2003). Polyethylene Dispersion in Bitumen: The Effects of Polymer Structural Parameters, *J. Appl, Polym, Sci.*, 90, 3183-3190.
16. Yousefi, A.A. (1999). Preparation and Rheological Behavior of Polymer-ModifiedAsphalt, PhD Dissertation, Laval University, Quebec.
17. Yousefi, A.A. (2002). Rubber-modified Bitumens, Iran, *Polym. J.*, 11, 303-309.
18. Yousefi, A.A. (2004). Rubber-polyethylene Modified Bitumens, *Iran, Polym. J.*, 13, 101-112.
19. Zakar, P. (1971). *Asphalt*, Chemical Publishing, New York.