

# بررسی خصوصیات عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید

مقاله علمی \_ پژوهشی

رضوان باباگلی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران  
امیرحسین حسین پورعسگر، دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rezvan\_babagoli@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵

صفحه ۲۹۱-۳۰۰

## چکیده

تغییر رفتار رئولوژیکی و مکانیکی قیر خالص یکی از مهم ترین دلایل مصرف افزودنی های اصلاح کننده خواص قیر است. پلی فسفریک اسید در مقایسه با سایر افزودنی ها در صنعت راهسازی، افزودنی جدیدی می باشد. این افزودنی به منظور بهبود خواص رئولوژیکی قیر مانند شیارشدگی، خستگی و ترک خوردگی دمای پایین مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله به بررسی اثرات رئولوژیکی پلی فسفریک اسید بر قیرها و مخلوط های آسفالتی پرداخته شده است. آزمایش های گوناگونی در زمینه اصلاح قیر و مخلوط آسفالتی با پلیمر پلی فسفریک اسید صورت گرفته است. نتایج نشان داد، افزودن PPA میتواند عملکرد دمای بالا را بهبود بخشد و حساسیت دمایی قیرهای اصلاح شده را کاهش دهد. اما تاثیر جزئی بر عملکرد دمای پایین دارد. با توجه به نتایج قیرهای اصلاح شده با پلی فسفریک اسید مقاومت خستگی بهتری در مقابل قیرهای اصلاح شده با SBS دارند. اصلاح قیر با PPA، منجر به افزایش درجه نرمی، کاهش درجه نفوذ و نیز کاهش حساسیت دمایی می شود. ترکیب PPA/SBR به دلیل بیشترین استحکام و همچنین کوچکترین عمق شیار، بهترین مقاومت شیارشدگی را در مخلوط آسفالتی دارد.

واژه های کلیدی: آسفالت، پلی فسفریک اسید، رئولوژیکی، شیارشدگی، قیر اصلاح شده

## ۱- مقدمه

خصوصیات، سالیان درازی مورد استفاده قرار گرفته است که برخی از این خصوصیات عبارتند از: نفوذ ناپذیری در برابر آب و رطوبت، قابلیت کشش زیاد، خاصیت پلاستیکی و ترموپلاستیکی، عایق بودن مقابل الکتریسیته، خاصیت چسبندگی، مقاومت در برابر اسیدها، بازها و نمکها، انحلال در حلال های نفتی. قیر به حالت طبیعی یا معدنی و نفتی موجود می باشد. بیشترین قیر مصرفی در راهسازی از روش تقطیر نفت خام بدست می آید، ولی در برخی از کشورها از قیر طبیعی استفاده می شود. قیر در

قیر دارای ساختمان شیمیایی نسبتاً پیچیده ای است و همچنین حاوی طیف وسیعی از هیدروکربن های اشباع، غیر اشباع، حلقوی، غیر حلقوی، قطبی و غیر قطبی با جرم های مولکولی متفاوت است. ساختار اتمی قیر که به روش تجزیه شعله و یا سایر روش ها بدست آمده، حاکی از آن است که ۹۰ درصد قیر را اتم های کربن و هیدروژن تشکیل داده است و همچنین اکثر قیرها دارای نیتروژن و گوگرد و اکسیژن به نسبت های مختلف ولی کم می باشند. قیر ماده ای است پایدار که به علت دارا بودن برخی از

۴- عدم امکان استفاده در برخی از مخلوط‌های آسفالتی نظیر آسفالت متخلخل و یا ماستیک آسفالت  
 ۵- عدم امکان استفاده در روکش‌های نازک که دارای کیفیت و دوام کافی نمی‌باشد.

محدودیت‌های قیر معمولی باعث گردید که در زمینه‌ی اصلاح رفتار قیر و در نتیجه اصلاح عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، گام‌هایی برداشته شود. در دهه‌های اخیر در این زمینه روش‌های مختلفی و طیف گسترده‌ای از مواد اصلاح کننده و افزودنی به منظور بهبود خواص و رفتار قیر و در نتیجه بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، مورد بررسی و استفاده قرار گرفته که میزان و نوع تاثیرات این مواد در تغییرات رفتاری آسفالت، کاملاً متفاوت بوده است. امروزه علاوه بر قیر و مصالح سنگی تشکیل دهنده‌ی مخلوط‌های آسفالتی، از مواد دیگری به نام افزودنی‌ها یا اصلاح کننده‌های قیر استفاده می‌شود. این ترکیبات که طیف وسیعی از مواد معدنی، آلی، طبیعی و صنعتی را در برمی‌گیرد، به منظور اصلاح برخی از خواص قیر و در نتیجه، مخلوط‌های آسفالتی به شرح موارد زیر کاربرد دارند:

جلوگیری از عریان شدن سنگدانه‌های مخلوط‌های آسفالتی - جلوگیری از ایجاد ترک‌های حرارتی و انقباضی در رویه‌های آسفالت - کاهش پدیده‌های تغییرشکل و قیرزدگی رویه‌های آسفالتی - تاخیر و جلوگیری از روآمدن ترک‌های آسفالتی - کاهش پدیده‌ی سخت شدن و پیرشدن قیر - افزایش تاب خستگی آسفالت به طور کلی افزودنی‌های مصرفی باید با قیرهای خالص یا قیرابه‌های انتخاب شده در هر پروژه سازگاری داشته و قیر اصلاح شده نیز، قبل از مصرف مورد آزمایش قرار گیرد تا مطابقت آن با مشخصات ارزیابی شود. (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، نشریه ۲۳۴). اکنون یک رنج وسیع از آسفالت‌های اختصاصی بوسیله قیرهای پلیمری اصلاح شده، ساخته شده است و یک رنج وسیع از قیرهای اصلاح شده برای آسفالت‌های معمولی استفاده می‌شود که همه‌ی اینها باعث افزایش کارایی آسفالت در هنگام سرویس میشود. طراحی خوب، مراحل ساخت و تعمیر و نگهداری به موقع از جاده‌ها، نه تنها مقاومت در برابر شرایط مختلف را افزایش می‌دهد، بلکه باعث افزایش ایمنی نیز می‌شود. به هر حال قسمت‌هایی از جاده در مقایسه با سایر نقاط، فشار بیشتری را تحمل می‌کنند. بنابراین این

راهسازی دو وظیفه بر عهده دارد: یکی اتصال آسفالت رویه به بستر زیرین و دیگری چسباندگی بین مصالح مورد استفاده در تولید آسفالت. اساساً نمی‌توان قیر را یک چسباننده‌ی ایده آل محسوب کرد، ولی با رعایت نکات فنی در حین کار می‌توان به هدف نزدیک شد. با توجه به اینکه در تهیه‌ی مخلوط آسفالتی، سهم قیر حدود ۷-۴ درصد می‌باشد، این تصور بوجود می‌آید که قیر نقش بخصوصی در رفتار و دوام و ثبات لایه‌های آسفالتی ندارد، اما حقیقت این است که قیر، نقش اساسی در رفتارهای مخلوط آسفالتی و خواص فیزیکی و شیمیایی مخلوط ایفا می‌کند و سبب دوام و پایداری مخلوط می‌شود. مرغوبیت قیر در همان زمان‌های اولیه تهیه مخلوط‌های آسفالتی، شروع به کاستن می‌نماید؛ زیرا قیر در تهیه مخلوط درکارخانه باید گرم گردد و عملیات اختلاط انجام گردد و پس از آن تحت تاثیر عوامل جوی سرما، گرما، بارندگی قرار می‌گیرد و نیز تحت اثر بارگذاری‌های متوالی، این کاهش مرغوبیت ادامه پیدا می‌کند؛ اما نمیتوان به طور کامل، مانع از ایجاد تغییرات و آسیب پذیری‌های قیر شویم. همچنین می‌توان با پژوهش بیشتر باعث ایجاد تاخیر و کاهش روند پیشرفت آن گردیم. با این تفاسیر که مربوط به نقش قیر میباشد درمی‌یابیم که با بررسی و ایجاد تغییرات در قیر، می‌توانیم کمک زیادی به افزایش توانایی‌های روسازی راه‌های کشور داشته باشیم که سبب بهبود مخلوط آسفالتی می‌گردد. کم بودن خاصیت الاستیسیته، محدود بودن دامنه سرویس دهی از نظر گرما، خواص مقاومت تنشی، چسبندگی و... از ضعف‌های قیر می‌باشد. کاهش ضخامت لایه‌های آسفالتی باعث گردیده، قیرهای معمولی تولید پالایشگاه‌ها، محدودیت‌های قابلیت خود را در بیشتر زمینه‌ها نشان دهد.

به طور کل، محدودیت‌های خواص قیرهای معمولی موجود را به شرح زیر می‌توان عنوان کرد:

- ۱- در دمای بالا و بارگذاری طولانی مدت، امکان جاری شدن قیر و قیرزدگی و تغییرشکل دائم و شیارشدگی وجود دارد.
- ۲- در دماهای پایین و بارگذاری طولانی مدت، تحت اثر تنش‌های حرارتی امکان بروز ترک در مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد.
- ۳- در دماهای پایین و بارگذاری کوتاه مدت، قیر شکننده شده و امکان ایجاد ترک‌های مکانیکی بوجود می‌آید.

فرسایشی عالی دارد)، استایرن-بوتادین-استایرن (SBS) (ماده‌ای لاستیکی و به شدت سخت برای صنایعی که نیاز به دوام بالایی دارند)، اتیلن-وینیل-استات (EVA)، پودر لاستیک Rubber (CRM) Powder، فیبر بازالت (مقاومت و دوام خوب)، پلی فسفریک اسید (PPA). لذا در این تحقیق به بررسی تاثیر استفاده از پلی فسفریک اسید (PPA) بر خصوصیات عملکردی قیر و مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شده است.

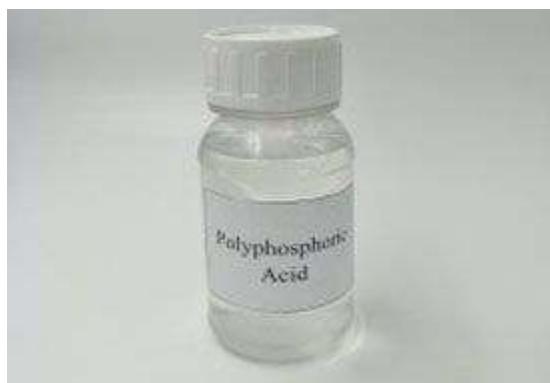
نقاط نیاز به تعمیر و نگهداری دارند و با وجود حجم بالای ترافیک بر روی جاده‌ها، تعمیر مناطق آسیب دیده کار دشواری خواهد بود؛ مخصوصاً در پل‌ها. به همین دلیل از قیرهای پلیمری اصلاح شده در تهیه ی آسفالت استفاده شده تا مقاومت آسفالت را افزایش داده و نیاز به تعمیرات، کاهش یابد. از جمله قیرهای متعارفی که جهت اصلاح خصوصیات قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به استایرن-بوتادین-رابر (SBR) (مقاومت

## ۲- معرفی و کاربرد پلی فسفریک اسید

### ۲-۱- معرفی پلی فسفریک اسید

$P_2O_5$  بستگی دارد. کاربرد اصلی PPA تولید کودهای مایع با کیفیت بالاست؛ اما همچنین بستری از سنتزهای متعدد شیمیایی است. PPA در درجات مختلفی موجود است که نام‌گذاری آنها می‌تواند گیج کننده باشد، زیرا درصد آن اغلب از ۱۰۰ درصد فراتر می‌رود. این اثر، محاسبه‌ی غلظت  $H_3PO_4$  بر پایه محتوای  $P_2O_5$  در این پلیمر معدنی است. برای اصلاح آسفالت از غلظت ۱۱۰،۱۰۵ و ۱۱۴ درصد  $H_3PO_4$  استفاده شده است. PPA عمدتاً در چین و ایالات متحده آمریکا تولید می‌شود. PPA به دست آمده دارای پارامترهای کیفیت بسیار خوبی است که آن را برای بسیاری از کاربردها مناسب می‌کند.

پلی فسفریک اسید، یک محصول پلیمری از آب زدایی حرارتی و تراکم پلیمری اسید ارتوفسفریک ( $H_2PO_4$ ) است. علاوه بر اشکال ارتوفسفریک، حاوی مخلوطی از فرم‌های پلیمری است که محتوای آن با افزایش غلظت اسید افزایش می‌یابد. PPAهای موجود در بازار مخلوطی از پلی اسیدهای خطی با فرمول عمومی  $H_{n+2}P_nO_{3n+1}$  است که  $n \geq 2$  می‌باشد. این اسیدها، یا از آب‌زدایی  $H_3PO_4$  در دماهای بالا یا با حرارت دادن  $P_2O_5$  پراکنده در  $H_3PO_4$  تولید می‌شوند. در روش دوم زنجیره‌های بلندتری بدست می‌آید. اسید پلی فسفریک بسیار هیدروسکوپی است و به راحتی در هوای مرطوب هیدرولیز می‌شود. ویسکوزیته و شکل فیزیکی آن در دمای اتاق، به محتوای



شکل ۱. نمونه پلیمر پلی فسفریک اسید

## ۲-۲- پلی فسفریک اسید به عنوان اصلاح کننده

اولین امتیاز استفاده از پلی فسفریک اسید در اصلاح آسفالت، در سال ۱۹۷۳ منتشر شد. افزودن PPA به قیر، منجر به افزایش نقطه گرم شدن بدون تاثیر (یا گاهی اوقات کاهش اندک) در شکستگی در دمای پایین می‌شود. زیرا PPA، آسفالت را اکسید نمی‌کند. این منجر به بهبود حداکثر دمای سرویس (یا محدوده‌ی دمای مفید) می‌شود. با این حال کاهش خواص در دمای پایین نیز مشاهده شده است که به نظر می‌رسد بستگی به ترکیب آسفالت بیس/پایه دارد. ویژگی‌های قیر اصلاح شده: افزایش ویسکوزیته بدون اکسیداسیون، بهبود نقطه نرمی، نفوذ کمتر در دمای اتاق، بهبود سختی مشخصات روسازی: کاهش شیارشدگی، افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی حرارتی و خستگی، افزایش مقاومت در برابر رطوبت، افزایش دوام به دلیل چسبندگی بهتر بایندر به سنگدانه پروسه‌ی تسهیل یافته: سهولت پمپاژ، کاربرد در دماهای پایین‌تر، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از عملیات آسفالت علاوه بر پلیمرها: مصرف پلیمر کمتر، امکان پردازش در دمای پایین‌تر، اثر هم‌افزایی هر دو افزودنی، کاهش هزینه‌ها از دهه ۱۹۹۰، تحقیقاتی در زمینه استفاده از PPA در ارتباط با پلیمرها برای بهبود کیفیت قیرهای جاده‌ای انجام شده است. مزیت اصلی این ترکیب خاص، اثر هم‌افزایی و تقویت احتمالی هر دو اثر اصلاح کننده بر روی آسفالت است. برای کشسانی بایندر، مقاومت در برابر ترک حرارتی و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی مشاهده شده است. علاوه بر این PPA چسبندگی را بهبود می‌بخشد و ممکن است که نیاز به عوامل ضد استریپینگ را از بین ببرد. علاوه بر این پایداری قیر در طول نگهداری طولانی مدت در دمای‌های بالا افزایش می‌یابد. هزینه کلی استفاده از قیرهای اصلاح شده با استفاده از اصلاح کننده‌ی کمتر، حذف احتمالی آنتی استریپ‌ها و صرفه جویی در انرژی ناشی از کاهش دمای عملیاتی، کاهش می‌یابد. افزودن PPA ممکن است زمان واکنش با برخی از پلیمرها را کاهش دهد. اثر پلی فسفریک اسید بر روی آسفالت اصلاح شده با لاستیک خرد شده، از سال ۲۰۰۳، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج خوبی داشت. قیر حاوی ۵-۸ درصد صمغ و ۰.۵-۱ درصد PPA، دارای ویژگی‌های مشابه آسفالت اصلاح شده با پلی فسفریک اسید و پلیمر است.

## ۳- تاثیر افزودنی پلی فسفریک اسید بر خصوصیات

### قیرها و مخلوط آسفالت

#### ۳-۱- خصوصیات قیر

#### ۳-۱-۱- ویسکوزیته قیر

تحقیقات نشان می‌دهد، مقادیر ویسکوزیته با افزایش دمای آزمایش بدون توجه به نوع پلیمر و منبع قیر کاهش می‌یابد. در یکی از تحقیقات، تست ویسکوزیته چرخشی (RV) برای آسفالت شاهد، آسفالت WMA و چهار آسفالت WMA-PPA با محتوای PPA مختلف (به ترتیب ۰.۵، ۱.۰، ۱.۵، ۲.۰ درصد وزن آسفالت شاهد) در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد و ۱۷۵ درجه سانتیگراد طبق مشخصات سوپریو صورت گرفت. مقادیر ویسکوزیته همه قیرهای آسفالت با افزایش دمای آزمایش کاهش می‌یابد. علاوه بر این، آسفالت تمیز مقدار ویسکوزیته کمی بالاتر از قیر WMA دارد و می‌توان مشاهده کرد که افزودن PPA به آسفالت‌های WMA افزایش ویسکوزیته را در دماهای مختلف آزمایش نشان می‌دهد، که نشانه روشنی از اثرات اصلاحی PPA بر عملکرد قیرهای WMA در دمای بالا است. با این حال، مقدار بالاتر ویسکوزیته آسفالت، نیاز به دمای اختلاط و خواباندن بالاتری دارد که آلوده کننده و اتلاف کننده است. به طور کلی، مقدار ویسکوزیته بالاتر باعث افزایش دمای اختلاط و تراکم می‌شود و ممکن است مصرف انرژی را افزایش دهد. (Jun Liu, et al, 2014) نتایج حاصل از مطالعات بر روی ویژگی‌های ویسکوزیته و رفتار جریان در دماها و نرخ‌های برشی مختلف نشان می‌دهد که دوز PPA، بر دما و نرخ برش ویسکوزیته آسفالت تأثیر می‌گذارند، اما میزان تأثیر متفاوت است. در عین حال، اثر یک عامل بر ویسکوزیته توسط دو عامل دیگر محدود می‌شود. (Xiuming Jiang, et al, 2019)

#### ۳-۱-۲- خصوصیات دمای بالای قیر

شیارشدگی، ضریب  $G^*/\sin\delta$  کمتر از ۱.۰ کیلو پاسکال، اغلب برای تعیین درجه عملکرد یک قیر آسفالتی استفاده می‌شود. در یکی از تحقیقات که شامل دو قیر پایه آسفالتی بوده که مربوط

(رئولوژیکی) و خاصیت شیمیایی (محتوای کربونیل) برای قیرهای آسفالت اصلاح نشده با توجه به پیری اکسیداتیو طولانی مدت وجود دارد. با این حال، افزودن PPA به آسفالت، رابطه خطی بین خواص فیزیکی و شیمیایی قیرهای آسفالت را با توجه به پیری طولانی مدت آنها مختل می‌کند. (Huang et al., 2008) در سال ۲۰۱۷، عملکرد آزمایشگاهی و مکانیزم اصلاح آسفالت اصلاح شده با ppa و sasobit مورد بررسی قرار گرفت. آسفالت پایه با ۳ درصد ساسوبیت برای تولید آسفالت گرم مخلوط (WMA) مخلوط شد و سپس با چهار درصد مختلف PPA (۰,۵، ۱,۰، ۱,۵ و ۲,۰ درصد) بر حسب جرم آسفالت پایه اصلاح شد. نتیجه‌گیری می‌شود که خواص رئولوژیکی آسفالت پس از افزودن Sasobit و PPA افزایش یافته است. نفوذ آسفالت کاهش یافت و نقطه نرمی افزایش یافت که ثابت کرد مقاومت تغییر شکل افزایش یافته و پایداری در دمای بالا بهبود یافته است. هنگامی که محتوای PPA کمتر از ۱,۰ درصد بود، شکل پذیری به سطح قابل قبولی کاهش یافت. مقاومت در برابر تغییر شکل دمای بالا و مقاومت در برابر پیری برای آسفالت تحت شرایط مختلف پیری افزایش یافت. (Ge, Dangdong et al. 2017). نتایج آزمون DSR در تحقیقات نشان داد که مقاومت شیارشدگی با اصلاح PPA افزایش میابد. قیر آسفالت اصلاح شده SBS از همان درجه نسبت به قیر اصلاح شده با PPA، نسبت به شیار شدن مقاوم‌تر است. هنگامی که برای کوتاه‌مدت پیر می‌شوند، قیرها با PPA کمتر از مقدار بهینه، مقاومت شیارشدگی تقریباً مشابهی را نشان می‌دهند. (Hossain, Z., Alam, S. and Baumgardner, 2018). نتایج مطالعات بر روی قیرهای حاوی پلیمر PPA و SBS مشخص می‌کند که به طور کلی، واکنش شیمیایی با PPA به طور چشمگیری توانایی ضد شیار شدن آسفالت اصلاح شده SBR را افزایش می‌دهد و سطح واکنش ارتباط نزدیکی با میزان آسفالتین قیر پایه دارد. (Liang, P., et al, 2017)

به منطقه جنوب شرقی آمریکا بوده است، با انجام تست (DSR) این نتیجه حاصل شده است که برای قیرها و پلیمرهای آزمایش شده، کاهش ۱ درصد در پلیمرها را می‌توان با استفاده از ۰,۵ درصد PPA در ماتریس جبران کرد. در همین حال، تمام قیرهای اصلاح شده از قیر پایه A دمای شیارشدگی بالاتر در مقایسه با قیر پایه B در این مطالعه داشتند. نتایج این مطالعه نشان داد که اثرات پلیمرهای جایگزین و PPA بر مقادیر  $G^*/\sin \delta$  عمدتاً بر اساس منبع قیر پایه است. (Xiao F, et al, 2014)

افزودن PPA به قیر WMA مقادیر بالاتری از  $G^*/\sin \delta$  را در مقایسه با قیر WMA تولید می‌کند و قیر WMA-PPA (با ۲,۰ درصد PPA) بالاترین مقدار  $G^*/\sin \delta$  را دارد و به دنبال آن قیر WMA-PPA (با ۱,۵ درصد PPA) قرار دارد. می‌توان نتیجه گرفت که افزودن PPA به بهبود مقاومت شیارشدگی قیرهای WMA در دمای عملکرد بالا کمک می‌کند. (Liu, Jun, et al, 2016)

مقدار  $G^*/\sin \delta$  بیشتر معمولاً به معنای مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی بهتر در دمای بالا است. اگر یک قیر مقدار  $G^*/\sin \delta$  بیشتری دارد به این معنی است که قیر اصلاح شده مقاومت در برابر پیری کوتاه مدت بهتری دارد. بنابراین، به این نتیجه رسیدیم که اثرات پلیمرها/اسید جایگزین بر روی مقادیر  $G^*/\sin \delta$  قیرهای آزمایش شده عمدتاً به منبع قیر پایه بستگی دارد. در همین حال، به نظر می‌رسد که قیرهای اصلاح شده با PPA به طور کلی مقدار  $G^*/\sin \delta$  کمی بالاتر دارند، صرف نظر از منبع قیر پایه. (Liu, X., Li, Tingyu and Zang, H., 2018) بر اساس نتایج تحقیقاتی که هوانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۸ انجام دادند، به نظر می‌رسد که آسفالت‌های اصلاح شده با PPA باید (الف) مقاومت اولیه روسازی در برابر شیار شدن را با افزایش سختی اولیه افزایش دهند و (ب) عمر مفید روسازی را با بهبود خواص جریان در دمای پایین افزایش دهند. این خواص بهبود یافته باید هم منجر به کاهش ترک خوردگی ناشی از خستگی و هم کاهش ترک خوردگی در دمای پایین شود. به نظر می‌رسد که رابطه‌ای بین خواص فیزیکی

سختی به تدریج کاهش می‌یابد و با افزایش زمان بارگذاری به یک مقدار پایدار تمایل پیدا می‌کند. اما مشاهده می‌شود که مدول سختی آسفالت اصلاح شده پلیمری به وضوح از آسفالت پایه در همان دما و در همان زمان آزمایش کوچکتر است و قدر مطلق مدول سختی با نوع پلیمر و PPA متفاوت است. پس از جایگزینی ۱،۰ درصد پلیمر با ۰،۵ درصد PPA، اختلاف سختی تمام آسفالت‌های اصلاح شده کمتر می‌شود، اما مقدار *m-value* در دمای پایین بدتر است. (Liu, X., Li, Tingyu and Zang, H., 2018) اثرات PPA بر خواص شکست حالت ترد با آزمایش کشش فشرده انجام شده در ۱۰ درجه سانتی گراد بالاتر از دمای محدود BBR مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج بدست آمده، بدیهی به نظر می‌رسد که افزودن PPA رفتار شکستگی در دمای پایین را به میزان قابل توجهی تغییر نمی‌دهد. (Kodrat, I., Sohn, D and Hesp, A.M., 2007)

### ۳-۱-۴- بررسی مقاومت خستگی

طبق نتایج تحقیقات صورت گرفته، قیرهای با سن PAV هیچ نگرانی در مورد مقاومت در برابر خستگی قیرهای آسفالت اصلاح شده با PPA نشان ندادند. قیرهای اصلاح شده با PPA در این مطالعه مقادیر DSR متوسط بهتری را نسبت به قیرهای اصلاح شده با SBS نشان دادند که نشان دهنده عملکرد خستگی بهتر است. (Hossain, Z., Alam, S. and Baumgardner, G., 2018) نتایج حاصل شده از آزمایش LAS بر روی قیر PG 58-22 در دمای میانی ۲۵ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد، عملکرد خستگی قیر اصلاح نشده به طور قابل توجهی با افزایش محتوای PPA افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده عمر خستگی بسیار بهتر در سطوح اصلاح بالا است. تأثیر اصلاح PPA بر بهبود عمر خستگی قیر اصلاح نشده PG 58-22 بیشتر برای روسازی‌های آسفالتی ضخیم است تا روسازی‌های نازک. با این حال، تحقیقات بیشتری برای تکمیل یافته‌ها و ارتباط نتایج با خواص مقاومت در برابر خستگی

سفتی خزش  $S(t)$  و *m-value* دو پارامتر مهم در تست BBR هستند که نشان‌دهنده پاسخ تنش حرارتی و پراکندگی تنش حرارتی به طور غیرمستقیم در دمای پایین هستند. در تحقیقاتی که در سال ۲۰۱۶ بر روی قیرهای حاوی پلی فسفریک اسید صورت گرفت، طبق تست BBR، سختی خزشی و سرعت خزشی قیرها در زمان بارگذاری نمونه ۶۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل شده این بود که، خواص رئولوژیکی قیر WMA در دمای پایین از نظر سفتی خزش مختل می‌شود، زیرا افزودن PPA باعث افزایش سفتی خزشی می‌شود که انعطاف پذیری آسفالت را ضعیف می‌کند. به طور مشابه، کاهش *m-value* معرفی شده توسط PPA، توانایی آسفالت را برای پراکندگی تنش انباشته ضعیف می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که افزودن PPA باعث بدتر شدن خواص رئولوژیکی قیر WMA در دمای پایین می‌شود. (Liu, Jun, et al., 2016) تحقیقات در این زمینه نشان داد که با انجام تست BBR، افزودن PPA کمی سفتی خزش را قبل از پیرشدگی کاهش می‌دهد. در حالی که سفتی خزش قیرهای اصلاح شده با PPA پس از پیرشدگی (دراز مدت و کوتاه مدت) در مقایسه با قیرهای بدون PPA افزایش می‌یابد. تست نفوذ اصلاح شده نشان داد که سرعت خزش قیر در زمانی که تماس‌های تورفتگی اتفاق افتاد، از نقطه پایین‌تری شروع شد و رابطه آن با تنش تماسی از طریق اصلاح عملکرد نورتون به خوبی برازش داشت. علاوه بر این، تغییر سرعت خزش در دمای میانی پس از افزودن PPA کندتر بود، به ویژه قیرهای پایه ای که سرعت خزش آن‌ها کاهش زیادی داشت. (Liu, Hongying, et al., 2017) در یک تحقیق در سال ۲۰۱۸ رابطه بین سختی و زمان با تجزیه و تحلیل منحنی مدول سختی قیر آسفالت با زمان مورد بررسی قرار گرفته است. هر قیر در سه دمای بی‌تفاوت (۶، ۱۲، ۱۸ درجه سلسیوس) اندازه‌گیری شد. دو نمونه از هر نوع قیر برای آزمایش انحراف، مقدار *m* و سفتی تحت یک بار ثابت در دمای ثابت در این تحقیق استفاده شد. مشاهده می‌شود که میزان سختی آسفالت اصلاح شده در مرحله بارگذاری اولیه بزرگتر است و مقدار

مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیرهای PPA مورد نیاز است. (Jafari, M and Babazadeh, A., 2016)

### ۳-۱-۵- تاثیر افزودنی بر خصوصیات فیزیکی قیر

نتایج تحقیقات بر روی قیرهای حاوی PPA نشان می‌دهد که عملکرد در دمای بالا قیرهای آسفالت اصلاح شده PPA به وضوح بهبود یافته و حساسیت دما کاهش می‌یابد، اما عملکرد در دمای پایین در مقایسه با آسفالت پایه کمی کاهش می‌یابد. طبق آزمایشات انجام شده بر روی قیر پایه با مقادیر متفاوت PPA (۶، ۰، ۱۰، ۱۰، ۵، ۲۰ درصد وزنی) نتایج حاصل شده بدین گونه می‌باشد که مقادیر نقطه نرمی قیرهای آسفالت اصلاح شده با PPA با افزایش محتوای PPA افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که محتوای PPA تأثیر معنی‌داری بر نقطه نرمی دارد. نتایج آزمون نفوذ نشان می‌دهد که PPA بر روی درجه نفوذ و PI تأثیرگذار می‌باشد. در مقایسه با آسفالت پایه بدون PPA، مقادیر نفوذ قیرهای آسفالت اصلاح شده با PPA با افزایش محتوای PPA کاهش می‌یابد، در حالی که مقادیر PI افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که PPA می‌تواند عملکرد قیرهای آسفالت اصلاح شده را در دمای بالا بهبود بخشد و حساسیت دمایی را کاهش دهد. (Cao, Liu and Mao, 2011)

### ۳-۲- خصوصیات مخلوط آسفالتی

#### ۳-۲-۱- خصوصیات دمای پایین مخلوط

بر اساس تحقیقات، با آزمایش SCB صورت گرفته بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی در دماهای صفر، ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس مشاهده شده است که در دمای صفر درجه سلسیوس، نمونه‌ها در زمان بسیار کوتاهی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها به نقطه‌ی انتهایی میزان بازشدگی در طی آزمایش رسیده‌اند. افزودن پلی فسفریک اسید در این دما باعث افزایش بازشدگی دهانه ترک شده است. افزودن ۰،۵ و ۱ درصد پلی فسفریک اسید روند رشد بازشدگی ترک را بهبود بخشیده است و همچنین سرعت بازشدگی دهانه ترک با کاهش همراه بوده است. اما برای

۱،۵ درصد پلی فسفریک اسید، بازشدگی دهانه ترک در زمان کوتاه‌تری آغاز شده است و در ابتدای آزمایش سرعت بازشدگی دهانه ترک نیز بیشتر می‌باشد. در دمای ۱۰ درجه سلسیوس، عملکرد مخلوط آسفالتی با قیر خالص و قیر اصلاح شده با پلی فسفریک اسید نزدیک به هم می‌باشد. در دماهای آزمایش ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس، افزودن ۰،۵ و ۱ درصد پلی فسفریک اسید بازشدگی دهانه ترک را بهبود بخشیده و با سرعت کمتری پیشروی ترک صورت پذیرفته است. با این حال مخلوط حاوی ۱،۵ درصد پلی فسفریک اسید رفتاری مشابه نمونه ساخته شده با قیر خالص و یا بدتر از آن داشته است. لذا، به نظر می‌رسد محدود کردن استفاده از PPA به یک درصد امری ضروری است. افزایش PPA تا ۱،۵ درصد وزنی قیر باعث افزایش میزان بازشدگی نهایی دهانه ترک و همچنین افزایش دما از دمای صفر درجه باعث افزایش میزان بازشدگی نهایی دهانه ترک می‌شود. بر اساس شاخص انرژی شکست - بازشدگی، مصرف PPA در دماهای میانی ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سلسیوس تا ۱ درصد وزنی قیر خالص موجب بهبود قابل توجه رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط آسفالتی می‌شود. بنابراین، این درصد می‌تواند به عنوان درصد قیر بهینه در نظر گرفته شود. (Hajikarimi, P., et al, 2019) مقایسه مخلوط‌ها با توجه به پارامترهای شکست SCB و DCT تایید می‌کند که مخلوط‌های اصلاح شده SBS+PA و SBS نسبت به مخلوط‌های اصلاح شده PPA و SBS+Elvaloy در برابر ترک مقاومت بهتری دارند. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که خواص شکست در دمای پایین مخلوط‌های اصلاح شده با ۰،۷ درصد PPA نسبتاً خوب است. (Zegeye, E, et al, 2012) با توجه به نتایج TSRST برای مخلوط‌های مختلف می‌توان مشاهده کرد که PPA منجر به هیچ تغییر قابل توجهی در قدرت شکست و دمای انتقال در مقایسه با مخلوط آسفالت پایه نمی‌شود، و اثر محدود PPA بر عملکرد دمای پایین را تایید می‌کند. مخلوط‌های مختلف آسفالت نمی‌توانند به طور موثر توسط دمای شکست متمایز شوند، به جز PPA. دمای شکست ۱،۰ درصد PPA به طور قابل توجهی نسبت به آسفالت پایه افزایش یافت و ثابت کرد که PPA تا حدودی بر رفتار ترک خوردگی اثر منفی دارد. اما اینکه آیا PPA تأثیر زیادی بر عملکرد قیر در دمای پایین دارد یا خیر نیاز به

از PPA به تنهایی یا PPA در ترکیب با SBR افزایش می‌یابد. SBR همچنین برای بهبود پایداری دمای بالای مخلوط تا حدی مفید است، زیرا سختی و درصد جامد قیر افزایش می‌یابد. (Hao, P., etal 2018)

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله خصوصیات رئولوژیکی قیرها و مخلوط اصلاح شده با PPA بررسی شده است و نتایج کلی زیر را در آزمایشات مختلف در برداشته است:

۱. افزودن PPA می‌تواند عملکرد دمای بالا را بهبود بخشد و حساسیت دمایی قیرهای آسفالت اصلاح شده را کاهش دهد، اما تاثیر جزئی بر عملکرد دمای پایین دارد.

۲. محتوای PPA تاثیر قابل توجهی بر نقطه‌ی نرم شدن دارد اما تاثیر قابل توجهی بر سفتی خزشی ندارد.

۳. افزایش PPA تا ۱٫۵ درصد وزنی قیر، باعث افزایش میزان بازشدگی نهایی ترک و همچنین افزایش دما از دمای صفر درجه، باعث افزایش میزان بازشدگی نهایی ترک می‌شود.

۴. مقدار PPA، دما و نرخ برش و نیز ویسکوزیته آسفالت را تحت تاثیر قرار می‌دهد، اما شدت اثر آن متفاوت است. همچنین مقادیر ویسکوزیته با افزایش دمای آزمایش بدون توجه به نوع پلیمر و منبع قیر کاهش می‌یابد.

۵. افزایش درصد استفاده از پلی فسفریک اسید موجب افزایش مقاومت شکست مخلوط آسفالتی در دمای ۱۰- درجه سلسیوس می‌شود.

۶. افزودن PPA با توجه به چقرمگی و استحکام بالاتر و مدول بالاتر، دمای شکست و درصد بازیابی، چسبندگی، الاستیسیته و توانایی ضد شیار شدگی آسفالت اصلاح شده SBR را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۷. آسفالت‌های اصلاح شده با PPA مقاومت اولیه روسازی در برابر شیار شدگی را با افزایش سختی اولیه افزایش می‌دهند.

۸. مقادیر نقطه نرمی قیرهای آسفالت اصلاح شده با PPA با افزایش محتوای PPA افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که محتوای PPA تاثیر معنی‌داری بر نقطه نرمی دارد.

۹. نتایج تست SCB می‌دهد که اوج بار، استحکام کششی، چگالی شکستگی - انرژی و تحمل کرنش شکست همگی با

مطالعه بیشتر دارد، چرا که وقتی دمای شکست برای ارزیابی تعدیل کننده‌های دیگر مانند SBS در برخی از مقالات اعمال می‌شود، نتیجه‌گیری غیرمنطقی وجود دارد. علاوه بر این، می‌توان مشاهده کرد که PPA/SBR بهترین مقاومت در برابر ترک در دمای پایین را با کمترین دمای شکست و بالاترین مقاومت شکست نشان می‌دهد. نتایج تست SCB می‌دهد که اوج بار، استحکام کششی، چگالی شکستگی - انرژی و تحمل کرنش شکست همگی با اضافه شدن ۱ درصد PPA کاهش می‌یابد، که نشان می‌دهد PPA تا حدی در دمای پایین تاثیر منفی دارد. به‌طور خلاصه، رفتار ترک خوردگی و انعطاف پذیری در دمای پایین PPA و Asphalt اصلاح شده با PPA/SBR کاملاً مخالف است. دلایل آن نه تنها شامل اثر حذف فلوکولاسیون خود PPA، بلکه واکنش شیمیایی پیچیده بین دو نوع اصلاح کننده و همچنین محتویات مختلف آنها است. (Hao, P., etal 2018)

#### ۳-۲-۳- خصوصیات دمای بالای مخلوط

طبق مطالعات انجام شده بر روی خصوصیات دمای بالای مخلوط، نتایج آزمایش شیار جای چرخ (Wheel Tracking) نشان می‌دهد که مخلوط‌های اصلاح شده توسط PPA/SBR دارای DS بالاتر و تغییر شکل کمتری در پایان آزمایش هستند. مقادیر DS مخلوط‌های PPA و PPA/SBR بیش از دو برابر مخلوط آسفالت پایه است که به اثر ژل شدن PPA نسبت داده می‌شود. خواص قیر آسفالت نقش کلیدی در عملکرد مخلوط‌ها دارد. بنابراین، به خوبی پذیرفته شده است که افزودن PPA، بخش ماده جامد و ویژگی ژل را با تغییر ثابت حل‌پذیری آسفالتین‌ها در ماتریس مالتین افزایش می‌دهد. به همین ترتیب عملکرد مخلوط بهبود یافته است. (Liang et al., 2017)

SBR همچنین تأثیر کمی مثبت در افزایش خاصیت ضد شیار شدگی دارد، اگرچه به خوبی PPA نیست. همچنین نتایج آزمایش مقاومت تغییر شکل برای هر مخلوط آزمایش شده در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد که PPA/SBR به دلیل بیشترین بار و قدرت تغییر شکل و همچنین کوچکترین عمق تغییر شکل، بهترین مقاومت شیارشدگی را دارد. بار شکست افزایش می‌یابد، تغییر شکل نفوذ کاهش می‌یابد و قدرت تغییر شکل ظاهراً برای مخلوط‌های آسفالتی هنگام اضافه کردن بخش کوچکی



asphalts”, Transportation Research Record, 2051(1), pp.1-7.

-Jaroszek, H., (2012), “Polyphosphoric acid (PPA) in road asphalts modification”, Chemik, 66(12), pp.1340-1345.

-Jiang, X., Li, P., Ding, Z., Yang, L., & Zhao, J., (2019), “Investigations on viscosity and flow behavior of polyphosphoric acid (PPA) modified asphalt at high temperatures”, Construction and Building Materials, 228, 116610.

-Liang, P., Liang, M., Fan, W., Zhang, Y., Qian, C., & Ren, S., (2017), “Improving thermo-rheological behavior and compatibility of SBR modified asphalt by addition of polyphosphoric acid (PPA)”, Construction and Building Materials, 139, pp.183-192.

-Liu, H., Chen, Z., Wang, Y., Zhang, Z., & Hao, P., (2018), “Effect of poly phosphoric acid (PPA) on creep response of base and polymer modified asphalt binders/mixtures at intermediate-low temperature”, Construction and Building Materials, 159, pp.329-337.

-Liu, J., Yan, K., You, L., Ge, D., & Wang, Z., (2016), “Laboratory performance of warm mix asphalt binder containing polyphosphoric acid”, Construction and Building Materials, 106, pp.218-227.

-Liu, X., Li, T., & Zhang, H., (2018), “Short-term aging resistance investigations of polymers and polyphosphoric acid modified asphalt binders under RTFOT aging process”, Construction and Building Materials, 191, pp.787-794.

-Masson, J. F., (2008), “Brief review of the chemistry of polyphosphoric acid (PPA) and bitumen”, Energy & Fuels, 22(4), pp.2637-2640.

-Mahdavi, M., Clouston, P. L., & Arwade, S. R., (2011), “Development of laminated bamboo lumber: review of processing, performance, and economical considerations”, Journal of materials in Civil Engineering, 23(7), pp.1036-1042.

-Xiao, F., Amirkhani, S., Wang, H., & Hao, P., (2014), “Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures”, Construction and Building Materials, 64, pp.316-323.

اضافه شدن ۱,۰ درصد PPA کاهش می‌یابند، که نشان می‌دهد PPA تا حدی در دمای پایین تاثیر منفی دارد.

۱۰. یک درصد PPA برای بهبود مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی در دمای بالا مفید می‌باشد.

## ۵- مراجع

-زیاری، ح. حاجی کریمی، پ. خیراتی کازرونی، آ. و مقدس نژاد، ف.، (۲۰۱۹)، “بررسی رفتار شکست و گسترش ترک مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلی فسفریک اسید (PPA) بر اساس آزمایش خمش دیسک نیم استوانه (SCB)”، مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۵(۴)، ص. ۳۱-۱۳.

-Baumgardner, G. L., Masson, J. F., Hardee, J. R., Menapace, A. M., & Williams, A. G., (2005), “Polyphosphoric acid modified asphalt: proposed mechanisms”, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 74, pp.283-305.

-Cao, W. D., Liu, S. T., & Mao, H. L., (2011), “Experimental study on polyphosphoric acid (PPA) modified asphalt binders”, In Advanced Materials Research, Trans Tech Publications Ltd., Vol. 152, pp.288-294.

-Darrell, F., René, M., Gerald, R., & Henry, R., (2010), “Polyphosphoric acid modification of asphalt”, Trans. Res. Rec, 2179(1), pp.49-57.

-Fee, D., Maldonado, R., Reinke, G., & Romagosa, H., (2010), “Polyphosphoric acid modification of asphalt”, Transportation Research Record, 2179(1), pp.49-57.

-Ge, D., Yan, K., You, L., & Wang, Z., (2017), “Modification mechanism of asphalt modified with Sasobit and Polyphosphoric acid (PPA)”, Construction and Building Materials, 143, pp.419-428.

-Hao, P., Zhai, R., Zhang, Z., & Cao, X., (2019), “Investigation on performance of polyphosphoric acid (PPA)/SBR compound-modified asphalt mixture at high and low temperatures”, Road Materials and Pavement Design, 20(6), pp.1376-1390.

-Huang, S. C., Turner, T. F., Miknis, F. P., & Thomas, K. P., (2008), “Long-term aging characteristics of polyphosphoric acid-modified

# Investigation of the Performance Properties of Asphalt Binder and Asphalt Mixture Modified by Polyphosphoric Acid

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.  
Amirhossein Hosseinpour Asgar, B.Sc., Student, Department of Civil Engineering,  
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

*E-mail: rezvan\_babagoli@yahoo.com*

Received: September 2022- Accepted: February 2023

## **ABSTRACT**

Changing the rheological and mechanical behavior of pure bitumen is one of the most important reasons of usage of bitumen modifiers. Polyphosphoric acid is newer additive compared to other additives used in the road construction industry. This additive is used to improve the performance behavior of bitumen and improve bitumen rheological properties such as rutting. In this article, the effect of polyphosphoric acid on performance behavior of bitumen and asphalt mixtures with similar mechanical and chemical properties, but with different chemical compositions, is discussed. Various experiments have been conducted in the field of bitumen and asphalt mixture modification with polyphosphoric acid polymer. The results showed that the addition of PPA can improve the high temperature performance and reduce the temperature sensitivity of the modified bitumen, but it has a slight effect on the low temperature performance. According to the results, bitumens modified with polyphosphoric acid have better fatigue resistance compared to bitumens modified with SBS. Modifying bitumen with PPA leads to an increase in softness, a decrease in permeability, and a decrease in temperature sensitivity. The combination of PPA/SBR has the best rutting resistance in the asphalt mixture due to the highest strength and the smallest rut depth.

**Keywords:** Asphalt, Polyphosphoric Acid, Rheology, Rutting, Modified Asphalt Binder