

ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر افزودنی لیگنین بر عملکرد قیر و مخلوط آسفالتی

مقاله علمی - پژوهشی

حامد خانی سانجی، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

علی محمد منتظری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

رضوان باباگلی*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

محمد مهدی خبیری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Rezvan.Babagoli1987@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲

صفحه ۵۲-۲۹

چکیده

بتن آسفالتی در دماهای معتدل در اثر بارهای تکراری دچار ترک‌های خستگی می‌شود. بطور کلی هر چه کیفیت قیر بهتر باشد، ترک خوردگی دیرتر اتفاق می‌افتد از این رو محققان برای افزایش مقاومت بتن آسفالتی و در نتیجه به تاخیر انداختن خرابی‌های از پلیمرهای زیادی استفاده کرده‌اند ولی در این پژوهش تعداد پلیمرهایی که میزان عملکرد دمای بالا را بدون تغییر در عملکرد دمای پایین قیر یا بالعکس بهبود بخشند، محدود است. در این پژوهش از ماده‌ای به نام لیگنین که به عنوان فراوان‌ترین پلیمر طبیعی دنیا بعد از سلولز است، به عنوان افزودنی قیر ۶۰/۷۰ کارخانه نفت و جی اصفهان با درصدهای وزنی ۲، ۴، ۶ و ۸ نسبت به وزن قیر استفاده شده است. لیگنین در گیاهان و چوب با پلیمریزاسیون سه منومر پروپانوئید تشکیل می‌شود. لیگنین مورد استفاده در این پژوهش از لیکور سیاه که ضایعات کارخانه خمیر و کاغذ است، استخراج شده است. خواص قیر حاوی درصدهای مختلف لیگنین با استفاده از آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه نرمی، خاصیت انکمی، کندروانی، شاخص نفوذپذیری، درجه اشتعال، میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی مادون قرمز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. پس از تعیین قیر بهینه برای درصدهای مختلف لیگنین، نمونه‌های آسفالتی با درصدهای مختلف لیگنین ساخته و در نهایت خصوصیات مکانیکی و دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی از جمله استقامت مارشال، روانی و مدول برجهندگی به همراه کشش غیرمستقیم تعیین گردید. همچنین به منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های اصلاح‌شده با لیگنین نمونه‌های آسفالتی با و بدون لیگنین ساخته شد و تحت آزمایش‌های حساسیت رطوبتی لاتمن و آب جوشان قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بود که با افزودن لیگنین به قیر، نقطه نرمی، کندروانی، شاخص نفوذپذیری، درجه اشتعال، مقاومت در برابر اکسید شدن به همراه مقاومت مارشال، مدول برجهندگی و مقاومت در برابر رطوبت نمونه‌های آسفالتی نسبت به حالت پایه افزایش یافته و درجه نفوذ، خاصیت شکل‌پذیری قیر کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: لیگنین، قیر اصلاح شده، مخلوط آسفالتی گرم، حساسیت رطوبتی

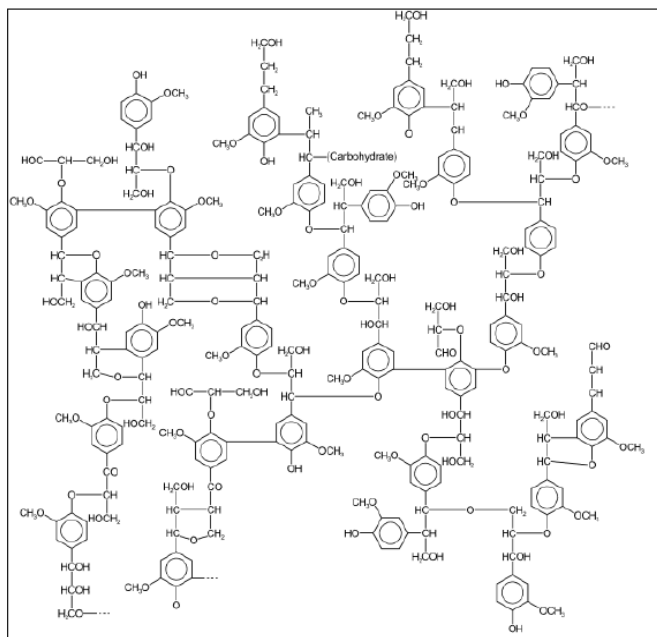
۱-مقدمه

کیفی قیر موجب شده که جهت به دست آوردن منابع اقتصادی، توجه بیشتری به قیر شود. در کشور ما در حوزه قیر و آسفالت عمده‌ترین مشکل در زمینه‌ی نظام فنی و اجرایی و تامین منابع مالی است. اکثر خرابی‌های روسازی آسفالتی یا مستقیماً ناشی

امروزه با افزایش بار ترافیک و اثرات نامطلوب جوی، انواع مختلفی از خرابی‌ها در سطح جاده‌ها اتفاق می‌افتد که بخش عمده‌ای از آن‌ها به خواص رئولوژیکی قیر و آسفالت مربوط می‌باشد، منابع محدود و هزینه‌های زیاد تولید نفت و کنترل

حاصل می‌گردد. استفاده از لیگنین به عنوان یک ماده ضایعاتی در آسفالت، در صورت دارا بودن مشخصات فنی و مکانیکی لازم می‌تواند جایگزین مصالح متداول و جزو منابع طبیعی در این زمینه محسوب گردد. مطالعات پیشین نشان دادند که لیگنین خاصیت آنتی‌اکسیدانی داشته و می‌تواند اکسید شدن قیر را تاخیر اندازد (Asukar et al, 2008). لیگنین در پساب کارخانه‌های تولید اتانول و کاغذ در مقادیر بالا وجود دارد و عمدتاً یا سوزانده می‌شوند و یا به عنوان ضایعات دور ریخته شده و باعث آلودگی محیط زیست اطراف این کارخانه‌ها می‌گردد. این در حالی است که استفاده از سدیم لیگنو سولفات (لیگنین) در مخلوط‌های آسفالتی علاوه بر بهبود خواص مکانیکی آن منجر به پاکسازی محیط زیست از این ماده شده و خواص منحصر به فرد لیگنین با سوزانده شدن بی‌ثمر از بین نمی‌رود. منابع تجدیدپذیر یکی از بزرگ‌ترین منابع در دسترس ما هستند (Biofuels, 2011). هر سال بیش از ۴۰ میلیون تن مواد گیاهی غیر خوراکی شامل: ساقه‌ها، برگ‌ها و تراشه‌های چوب از جنگل تولید می‌شود، که بیشتر آن‌ها استفاده نمی‌شود (Biofuels, 2011). اکثر ترکیبات کربنی که در حال حاضر توسط صنایع شیمیایی تولید می‌شوند، از نفت استخراج می‌شود. هزینه رو به رشد و کاهش عرضه نفت، توجه بیشتری را به راه‌های ممکن برای به دست آوردن مواد شیمیایی، سوخت‌ها و حلال‌های زیست توده مورد توجه قرار گرفته است (Tuck et al, 2011). لیگنین یک بیوپلیمر معطر ناهمگن با ساختار پیچیده، متشکل از گروه‌های فنیل پروپانوئید است که شامل پیوندهای منظم و پایدار کربن-کربن با اتصالات آریل/آلکیل (حلقه‌های فنیل) می‌باشد که ۳۰ درصد از کربن آلی موجود در زمین را تشکیل می‌دهد و در بیشتر گیاهان خشک در محدوده تقریبی ۱۵ تا ۴۰ درصد وزن خشک آن‌ها را تشکیل می‌دهد، همچنین یکی از چند منبع تجدیدپذیر شیمیایی معطر است (Ragauskas et al, 2014; SJÖSTRÖM, 1993). لیگنین‌ها پلیمرهای پیچیده و نامنظم در دیواره سلول‌های گیاهی هستند که از سه تک هسته تشکیل شده‌اند. لیگنین برای اولین بار توسط کندول در سال ۱۸۱۹ میلادی معرفی گردید و اسم آن از کلمه لاتین لیگنیوم گرفته شده است که به معنی چوب می‌باشد. عامل اصلی ایجاد رنگ قهوه‌ای در ساختار چوب، لیگنین است (Albergo et al, 2013). شماتیکی از ساختار مولکولی لیگنین در شکل ۱ نشان داده شده است.

از رطوبت است یا توسط آن تشدید می‌شود. یکی از خرابی‌هایی که مستقیماً از رطوبت ناشی می‌شود "عریان‌شدگی مصالح" نام دارد. در این خرابی غشای نازک قیر از پیرامون مصالح سنگی جدا می‌شود، در نتیجه سنگدانه‌ها سست شده و خرابی‌های دیگر همانند ترک و چاله ایجاد می‌گردد. در مورد علت این جداشدگی فرضیات متفاوتی مطرح شده‌است. آنچه مسلم می‌باشد، علت عمده آن، داخل شدن آب به درون خلل و فرج روسازی آسفالتی و حایل شدن آن بین سنگدانه و قیر می‌باشد، که منجر به از بین رفتن چسبندگی قیر و مصالح سنگی می‌شود. ویژگی‌های دانه‌بندی و ویژگی‌های قیر و افزودنی‌های آن، ویژگی‌های مخلوط بتن آسفالتی بر حسب نفوذپذیری، فضای خالی و ضخامت لایه قیری، مقدار و ویژگی‌های فیلر، عوامل محیطی و ترافیکی و نحوه طرح و ساخت مخلوط از مهمترین فاکتورهای موثر بر حساسیت رطوبتی می‌باشد. همچنین استفاده از افزودنی‌های اصلاح‌کننده سنگدانه و قیر، راه‌حل مناسبی برای رفع خرابی‌های آسفالت، افزایش طول عمر راه‌ها، ضرورت تعمیر و نگهداری کمتر راه‌ها بوده و صرفه‌جویی اقتصادی و حفظ سرمایه‌های کشور در کوتاه‌مدت و دراز مدت را در پی خواهد داشت (Alexander et al, 2015). اگرچه عملکرد مخلوط آسفالتی به خصوصیات مصالح به کار رفته در آن، طراحی دقیق و کیفیت ساخت وابسته است؛ اما با افزایش روزافزون حجم ترافیک و بار محوری از سوی به موازات توسعه صنعتی و شهرسازی، خرابی و گسیختگی زودرس روسازی آسفالتی را به دنبال داشته و از سوی دیگر باعث افزایش مواد زائدی و اضافی که مخرب محیط زیست بوده، شده است (Sain et al, 2015). کشورهای پیشرفته همواره در پی استفاده از تکنولوژی‌های نوین در راستای بهبود خاصیت مخلوط‌های آسفالتی هستند، با توجه به این‌که اغلب راه‌های کشور با روسازی آسفالتی ساخته می‌شود، حجم بالای ترافیک سبب به وجود آمدن انواع ترک‌ها و کاهش عمر طراحی روسازی‌ها گردیده است (Rahimi et al, 2014). از این رو در این پژوهش جهت بهبود خصوصیات فیزیکی مخلوط‌های آسفالتی از افزودنی پلیمری لیگنین استفاده شده است. با توجه به خواص شیمیایی این پلیمر طبیعی، تا حد زیادی بتوان به افزایش عمر روسازی کمک نمود (کاسمی و همکاران، ۱۳۹۰). از آنجا که لیگنین ماده‌ای طبیعی و از ضایعات صنعت کاغذسازی به دست می‌آید لذا کاهش هزینه‌های ساخت، بهبود مشخصات فنی و کاهش آلودگی زیست محیطی از جمله مزایایی است که با استفاده از این ماده



شکل ۱. شمایکی از ساختار مولکولی لیگنین

مشکل شیارشدگی حفظ شود. با مطالعه‌ی عملکرد قیر اصلاح شده با لیگنین کرافت در دمای پایین مشاهده کردند که قیر اصلاح شده با لیگنین کرافت تا ۵ درصد مشکلی در عملکرد پایین قیر ایجاد نمی‌کند ولی از ۵ تا ۲۰ درصد باعث افزایش دمای عملکردی پایین قیر می‌شود. در مطالعه‌ای که تنگیان پن انجام داد از یک پلیمر زیستی به نام لیگنین به عنوان آنتی‌اکسیدان در آسفالت استفاده کرد و در یک محیط شیمیایی و شیمیایی کوانتومی که قادر به تجزیه و تحلیل واکنش‌های شیمیایی مختلف بین گونه‌های آسفالتی و اکسیژن و همچنین تغییرات جوی است استفاده نمود. طیف سنجی اشعه‌ی ایکس (XPS) برای اثبات اعتبار مدل‌های آسفالت اصلاح نشده و اصلاح شده با لیگنین مورد استفاده قرار داد. پن نشان داد که دو مرحله‌ی پیری آسفالت را می‌توان براساس ترکیب و ساختار گونه‌های شیمیایی تولید کرد و سپس سرعت آن‌ها را تعیین نمود. آسفالت در ابتدا یک روند واکنش‌پذیری بالا با اکسیژن را نشان می‌دهد و موجب ایجاد سریع آلکان‌ها و سولفوسیدها با وزن مولکولی سبک می‌شود و این جهش تند به دنبال کاهش سرعت اکسیداسیون و سخت شدن است.

در سال ۲۰۱۷ هاوو وانگ و همکارانش خواص رئولوژیکی و عملکرد ضد پیری قیر اصلاح شده با لیگنین را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش DSR^2 نشان داد که حضور لیگنین باعث افزایش مقاومت قیر در دمای بالا می‌شود. نتایج آزمایش

در سال ۲۰۱۷ طی تحقیقی توسط باتیستا و همکاران خاصیت‌های فیزیکی و شیمیایی قیر اصلاح شده با لیگنین را مورد بررسی قرار دادند تا کاربرد در تولیدات فرعی پالپ و صنایع کاغذ و روسازی آسفالت به دست آید (Batista et al, 2018). ویسکوزیته با افزایش مقدار لیگنین برای تمام درجه حرارت‌ها افزایش می‌یابد اما عمدتاً در دمای ۱۳۵ درجه‌ی سانتی‌گراد ارزیابی می‌شود. نتایج نشان داد با افزایش لیگنین تا ۶ درصد درجه نفوذ کاهش می‌یابد و نقطه نرمی با تغییر کمی کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که لیگنین سبب افزایش $G^*/\sin\delta$ می‌شود. با افزایش آسفالت مقاومت بیشتری نسبت به تغییر شکل نشان می‌دهد. در سال ۲۰۱۷ وانگ و همکارانش نشان دادند که لیگنین کرافت خام دمای بالای عملکردی قیر را بهبود داده و دمای پایین عملکردی را قدری به خطر می‌اندازد. برای حل این چالش هر دو روش بیولوژی مبتنی بر آنزیم-واسطه و پردازش شیمیایی مبتنی بر اسید فسفریک برای استخراج لیگنین برای بهبود عملکرد دمای بالای قیر بدون به خطر افتادن دمای عملکردی پایین را توسعه دادند (Wang et al, 2017). لیگنین می‌تواند عملکرد قیر را تغییر دهد. مطالعه‌ای که انجام شد نشان داد که لیگنین کرافت خام در غلظت‌های متفاوت (۵ تا ۲۰ درصد) می‌تواند درجه عملکردی بالای قیر (مقاومت شیارشدگی) را بهبود بخشد طوری که قیر اصلاح شده با لیگنین در تابستان با درجه حرارت بالا بدون

انجام گرفت کاهش یافته بود و دلیل آن هم گسستگی پیوندهای بین لیگنین و HBPEA در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد است (Sivasankarapillai et al, 2007). کریستوفر و همکاران (۱۳۹۴) تاثیر لیگنین به عنوان یک همسان‌کننده در کامپوزیت اپوکسی-کنف را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مقادیر مختلف لیگنین (۱/۵، ۲، ۵ درصد وزنی) را به کامپوزیت اپوکسی-کنف اضافه کردند و تاثیرش را روی خواص مکانیکی کامپوزیت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که افزودن لیگنین به کامپوزیت اپوکسی-کنف باعث افزایش خواص مکانیکی آن در برابر به ضربه، استحکام کششی و خمشی می‌شود. با این حال استحکام کششی و خمشی و مدول آن با افزایش مقدار بیش از حد لیگنین (۵ درصد وزنی) به دلیل اختلاط ضعیف و بالا رفتن ویسکوزیته رزین، کاهش پیدا کرده بود به طوری که خواص مدول الاستیک و UTS^a در ۲/۵ درصد وزنی لیگنین مقدار بهینه را داشت. هم‌چنین با افزایش مقدار لیگنین مقاومت به ضربه آن افزایش یافته است، باری که مقدار بیشینه آن ۵ درصد وزنی مشاهده شده بود. تصاویر SEM^۹ هم که از مقطع شکست نمونه‌ها گرفته شده است نشان داد در نمونه ۲/۵ درصد وزنی سازگاری بهتری بین اپوکسی و کنف و لیگنین به وجود آمده است (Christopher et al, 2012). غفارپور و همکارانش (۱۳۸۸) کامپوزیت اپوکسی-فیبر EFB^{۱۰} که با مقادیر مختلفی لیگنین (۳۰، ۲۵، ۲۰ و ۱۵ درصد وزنی) پخت شده بود را مورد بررسی قرار دادند و آن را با کامپوزیت اپوکسی-فیبر EFB با عامل پخت ایزو فوران دی‌آمین مقایسه کردند. نتایج این بررسی نشان داد، در ۲۵ درصد وزنی لیگنین، کامپوزیت بالاترین استحکام کششی، خمشی و کرنش شکست کامپوزیت را دارد به طور مثال استحکام کششی، ۵۸ درصد بهبود نسبت به ۱۵ درصد وزنی لیگنین پیدا کرده بود، اما کامپوزیت بالاترین مدول الاستیک و مقاومت به ضربه خود را در ۳۰ درصد وزنی لیگنین دارد. با این حال خواص مکانیکی آن در مقایسه با کامپوزیتی که با ایزو فوران دی‌آمین (به عنوان سخت‌کننده) پخت شده بود پایین‌تر بود. تصاویر SEM نمونه‌ها نشان می‌دهد که در کامپوزیت اپوکسی-لیگنین، چسبندگی خوبی در سطح مشترک ماتریس و پرکننده ایجاد شده است (غفارپور، ۱۳۸۸). زارعی (۱۳۹۴) طی تحقیقی لیکور سیاه را که حاوی درصد زیادی لیگنین است خشک کرده و در درصدهای مختلف (۳، ۶، ۹ و

BBR^۳ در دمای پایین نشان داد که اضافه کردن لیگنین به قیر به عنوان اصلاح‌کننده تاثیر کمی در مقاومت ترک‌خوردگی دارد (Xu et al, 2017). شاخص‌های پیری محاسبه شده از FTIR^۴ نشان داد که اضافه کردن لیگنین می‌تواند مقاومت در برابر تشکیل گروه‌های عملکردی کربونیل در قیر پس از فرآیندهای پیری RTFOT^۵ و RV^۶ را افزایش دهد که نتیجه نهایی نشان از آن است که لیگنین به عنوان اصلاح‌کننده آنتی‌اکسیدان می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در مطالعه‌ای دیگر، ویلیانز و همکارانش (۲۰۰۷) در پژوهشی از لیگنین به عنوان آنتی‌اکسیدان در قیر استفاده کردند. آن‌ها در این راستا درصدهای متنوعی از لیگنین را (۳، ۶، ۹، ۱۲ درصد وزنی) به قیر اضافه کردند و خواص رئولوژیکی را براساس آزمایشات شارپ مورد ارزیابی قرار دادند. با افزایش مقدار لیگنین، عملکرد حرارتی قیر در دماهای بالا بهبود یافت، از دیگر نتایج این پژوهش می‌توان به افزایش ویسکوزیته، کاهش شکل‌پذیری، افزایش عمر خستگی و افزایش چسبندگی قیر نام برد. آن‌ها بیان داشتند که درصد بهینه برای اختلاط لیگنین با قیر ۶ تا ۹ درصد وزن نمونه قیری است (McCready et al, 2007). در تحقیقی سنتز و بررسی خواص پلیمری HBPEA^۷ مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق تاثیر لیگنین (۴۵، ۴۰، ۳۵، ۳۰، ۲۵ درصد وزنی) روی خواص مکانیکی پلیمر HBPEA در دو دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط) و ۳۰ درجه سانتی‌گراد (دمای نزدیک دمای Tg کوپلیمر) مورد بررسی قرار گرفت. پیوندهای هیدروژنی و کوالانسی بین گروه‌های عاملی موجود در ساختار لیگنین گروه‌های استر آلیفاتیک در HBPEA ساختار محکمی را به وجود می‌آورد. نتایج نشان داد که استحکام کششی و مدول الاستیک کوپلیمر HBPEAL (کوپلیمر شامل لیگنین و HBPEA) با افزایش درصد وزنی لیگنین افزایش می‌یابد. به طور مثال مقدار استحکام کششی و مدول الاستیک کوپلیمر HBPEA^{۷۵} (با ۲۵ درصد وزنی لیگنین) به ترتیب ۵ MPa و ۸ MPa بوده و با افزایش ۲۵ درصد وزنی لیگنین برای کوپلیمر HBPEA^{۵۰} (با ۵۰ درصد وزنی لیگنین)، مقدار استحکام کششی و مدول الاستیک آن به ترتیب ۴۵ MPa و ۵۸ MPa افزایش پیدا کرده بود. اما با این حال خواص کششی وقتی که تست در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت، نسبت به حالتی که در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد

۲- روش تحقیق

۱-۲- مواد و مصالح

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از سنگ دانه‌های آهکی می‌باشد. سنگدانه آهکی مورد استفاده از معدن چم، در نزدیکی تفت که مورد استفاده سازمان همیاری شهرداری یزد برای ساخت آسفالت می‌باشد. مشخصات فیزیکی مصالح در جدول ۱ آورده شده است.

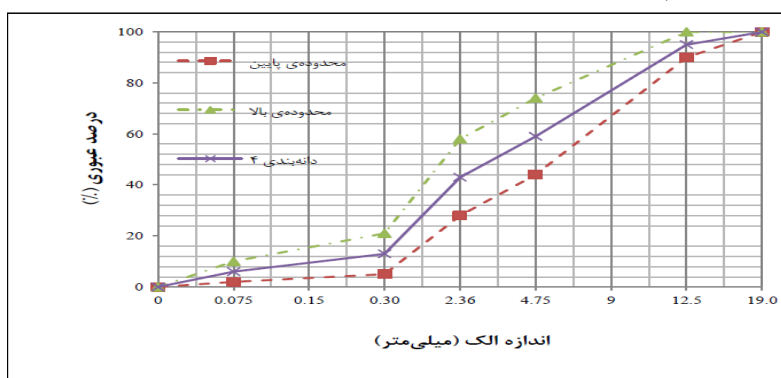
۱۲ درصد) در قیر استفاده کرده است با توجه به آزمایشات انجام گرفته بر روی قیر در این تحقیق رفتارهای قیر نشان داد که قیر سخت‌تر می‌شود و قیر اصلاح‌شده با لیکور خشک شده که حاوی درصد زیادی لیگنین است مناسب برای مناطق گرمسیر می‌باشد (زارعی، ۱۳۹۴).

جدول ۱. مشخصات فیزیکی مصالح مصرفی

ویژگی	استاندارد	نتایج مصالح
سایش لس آنجلس (%)	AASHTO-T96	۲۴
جذب رطوبت درشت دانه (%)	AASHTO-T96	۰/۶
جذب رطوبت ریز دانه (%)	AASHTO-T96	۱/۴
درصد شکستگی در دو وجه (%)	ASTM-D5821	۹۴
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (%)	AASHTO-T104	۰/۱۵
سنگدانه های پهن و دراز (%)	ASTM D4791	۹
درصد تورق	BS-812	۱۲
درصد تطویل	BS-812	۱۱
هم ارز ماسه ای	ASTM D2419	۷۶
وزن مخصوص حقیقی درشت دانه	ASTM C127	۲/۶۸۹
وزن مخصوص حقیقی ریز دانه	ASTM C127	۲/۵۹۴

آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) (شکل ۲) گردیده است (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰).

جهت انجام آزمایش‌ها و به منظور پوشش وسیعی از طیف دانه‌بندی‌های مورد استفاده در فعالیت‌های اجرایی، در این پژوهش اقدام به انتخاب دانه‌بندی پیوسته شماره ۴ مطابق



شکل ۲. حد بالا، پایین و وسط دانه بندی شماره ۴

خواص قیر مانند چسبندگی و نفوذناپذیری در مقابل آب، کاربردهای بسیار زیادی را برای قیرها رقم زده است، که استفاده از آن را در راهسازی رایج نموده است. نوع قیر به کار رفته در این پژوهش قیر خالص با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ پالایشگاه نفت اصفهان می‌باشد که مشخصات فنی آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات فنی قیر ۶۰/۷۰ کارخانه نفت اصفهان

مشخصات	مقدار تعیین شده	روش آزمایش
وزن مخصوص ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۱-۰۱/۰۶	□-۷۰
درجه نفوذ ۲۵ درجه سانتی‌گراد برحسب دهم میلی‌متر	۶۰/۷۰	□-۵
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	۴۹/۵۶	□-۳۶
شکل‌پذیری ۲۵ درجه سانتی‌گراد	حداقل ۱۰۰	□-۱۱۳
افت وزنی ناشی از حرارت (درصد وزنی بر حسب گرم)	حداکثر ۰/۰۲	□-۶
افت نفوذ بعد از حرارت (درصد)	حداکثر ۲۰	□-۵ و □-۶
نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	حداقل ۲۵۰	□-۹۲
انحلال‌پذیری در ۱۰۰ بر حسب گرم (درصد وزنی)	حداقل ۹۹/۵	□-۴

هم‌چنین به عنوان آنتی‌اکسیدان در قیر استفاده می‌شود (Pan, 2012). لیگنین مورد استفاده در این پژوهش از پساب کارخانجات کاغذسازی ایران تهیه گردیده است. پساب کارخانه کاغذ سازی ایران چوکا که به لیکور سیاه معروف است به صورت مایع بوده و حاوی مقدار زیادی لیگنین و آب است؛ لذا برای استفاده در قیر و آسفالت به عنوان افزودنی بایستی خالص‌سازی شود، که در بند بعدی روش استخراج لیگنین خالص بیان شده است. در آخر لیگنین عبور کرده از الک نمره ۵۰ را به عنوان افزودنی استفاده خواهیم کرد. مشخصات فیزیکی لیگنین در جدول ۳ آورده شده است.

افزونی مورد استفاده در قیر لیگنین می‌باشد. لیگنین، کopolymerی ناهمگن از واحدهای فینیل پروپان است که به وسیله پیوندهای اتری و کربن-کربن به یکدیگر متصل شده و از جمله ضایعات صنعت کاغذسازی است. از سوی لیگنین به الیاف سلولزی چوب و گیاهان استحکام بخشیده و از سوی دیگر چون جزو خانواده‌ی پلیمرها است، استفاده از این پلیمر طبیعی نیز خواص مکانیکی آسفالت ساخته شده هم‌چون سایر پلیمرهای مورد استفاده بهبود می‌بخشد. لیگنین به واسطه‌ی ساختار شیمیایی خود در ماتریس قیری یک شبکه سه بعدی ایجاد کرده که موجب بهبود عملکرد قیر در دمای بالا شده و

جدول ۳. مشخصات فیزیکی افزودنی لیگنین

رنگ	قهوه‌ای سوخته
دانه‌بندی	عبور کرده از الک نمره ۵۰
بو	چوب سوخته
حالت فیزیکی	جامد و پودر

شکل ۳ نمایی از لیگنین مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد.



شکل ۳. نمایی از لیگنین مصرفی در این پژوهش

۲-۲- روند مورد استفاده برای استخراج لیگنین

در این پژوهش لیکور سیاه از کارخانه خمیر و کاغذ چوکای ایران و اسید سولفوریک ۹۸ درصد وزنی از بازار تهیه شدند. سپس برای رسیدن به اسید ۲۰ درصد وزنی به آن آب مقطر اضافه شد. مقدار اسید مورد نیاز برای رساندن PH لیکور سیاه به ۱۱ در آزمایشگاه شیمی آلی دانشگاه شیمی یزد مشخص شد. بر اساس نتیجه به دست آمده و با استفاده از تناسب، به ازای ۱۰ میلی لیتر لیکور سیاه، ۲ میلی لیتر اسید سولفوریک ۲۰ درصد وزنی اضافه شد تا PH به ۱۱ برسد (Tuck et al, 2012). بعد از محاسبه درصدهای لیکور سیاه و اسید سولفوریک، فرآیند جداسازی لیگنین از لیکور سیاه انجام شد. در مرحله اول ۴۰۰ میلی لیتر لیکور سیاه داخل بشر ریخته شد و در ظرفی حاوی آب قرار گرفت سپس ظرف حاوی آب و بشر بر روی هیتر قرار داده شده و لیکور به صورت مداوم به هم زده شد تا دمای لیکور سیاه به ۸۰ درجه سانتی گراد برسد (شکل ۴)، سپس ۸۰ میلی لیتر اسید سولفوریک ۲۰ درصد وزنی به آرامی و با ایمنی کامل به لیکور سیاه داخل بشر اضافه گردید به نحوی که دانه‌های لیگنین

داخل بشر به سمت بالا حرکت کردند و ناخالصی‌های لیکور داخل ظرف ته‌نشین شدند (شکل ۳-۴). بعد از ترکیب شدن کامل لیکور و اسید ظرف بشر داخل حمام آب گرم در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد قرار داده شد تا دمای ترکیب به ۴۰ درجه سانتی گراد برسد. بعد از رسیدن مخلوط به دمای ۴۰ درجه سانتی گراد آب قهوه‌ای روشن رنگ جدا شده از لیگنین دور ریخته شد و ترکیب باقی مانده در داخل دستگاه سانتریفیوژ قرار گرفت بعد از سانتریفیوژ کردن مخلوط و گرفتن کامل ناخالصی‌ها با فیلتر واتمن شماره ۴، لیگنین حاصل شد (شکل ۴ج). برای اینکه لیگنین به دست آمده خالص‌تر باشد به لیگنین دوباره اسید سولفوریک اضافه شد تا PH آن به ۱۰/۵ برسد، سپس لیگنین اسیدی شده برای بار دوم داخل دستگاه سانتریفیوژ ریخته شد و همان روند تکرار گردید. برای خالص‌سازی لیگنین مصرفی در این پژوهش ۳ بار اضافه کردن اسید به لیگنین و شستن لیگنین اتفاق افتاد (شکل ۴د). سپس لیگنین به دست آمده از این فرآیند به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار داده تا خشک شود.

۲-۳- تهیه قیرهای حاوی لیگنین

در این پژوهش برای تمامی نمونه‌ها ابتدا لیگنین در درصدهای مختلف (۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزن قیر) به قیر اضافه شد و پس از ترکیب قیر و لیگنین مخلوط‌های آسفالتی با قیرهای مدنظر ساخته شدند. روش ترکیب قیر و لیگنین بر اساس استانداردهای ASTM-D6373 و AASHTO-M320 صورت گرفت. طبق این استانداردها، ابتدا قیر تا دمای

۱۵۵ درجه سانتی گراد گرم شده و پس از آن پودر لیگنین رد شده از الک نمره ۵۰ را به صورت تدریجی به قیر اضافه شد. مخلوط مورد نظر با میکسر برشی با دور بالا، با تعداد دور ۵۰۰۰ دور در دقیقه و دمای ثابت در مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد تا لیگنین و قیر به خوبی با یکدیگر ترکیب شوند.



(الف)

(ب)



(د)

(ج)

شکل ۴. الف) شکل گرم کردن لیکور سیاه به طور غیر مستقیم تا به دمای مورد نظر برسد. ب) اضافه کردن سولفوریک اسید به لیکور سیاه در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد. ج) نمایی از دستگاه سانتریفیوژ برای استخراج لیگنین. د) لیگنین استخراج شده از سانتریفیوژ

بزرگ‌نمایی بالاست. میکروسکوپ الکترونی روبشی نوعی میکروسکوپ الکترونی است که قابلیت عکس‌برداری از سطوح با بزرگ‌نمایی ۱۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر و قدرت تفکیکی کمتر از ۱ تا ۲۰ نانومتر (بسته به نوع نمونه) را دارد. در صورت وجود هوا در مخزن دستگاه امکان تخلیه الکتریکی وجود دارد. علاوه بر این امکان سوختن، از بین رفتن و ایجاد واکنش بر روی نمونه وجود دارد که تمام این موارد به لزوم ایجاد خلاء بالا در دستگاه اشاره دارد. جهت تشخیص مورفولوژی قیرهای تهیه‌شده در این پژوهش و اطلاع از نحوه پخش ذرات لیگنین در قیر از قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده با لیگنین عکس‌برداری SEM به عمل آمد.

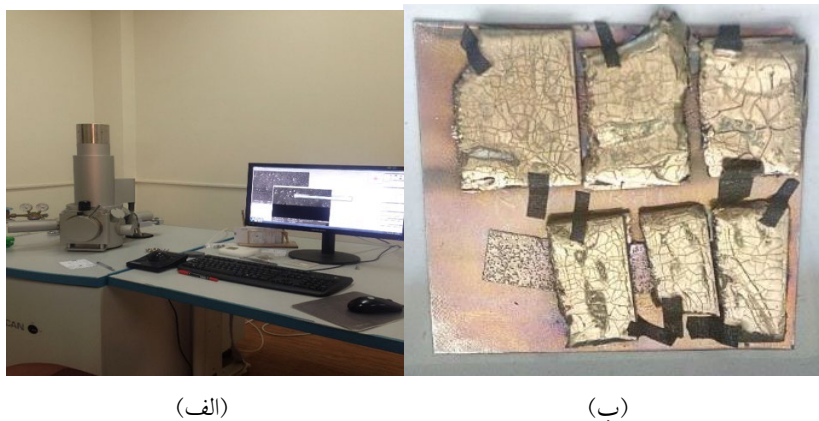
۳- روش آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش قیر

آزمایشات درجه نفوذ، درجه نرمی؛ نقطه‌ی اشتعال و شعله‌وری؛ خاصیت کشش‌پذیری و گرانش‌پذیری قیر به ترتیب طبق روش‌های مندرج در استانداردهای ASTM D5، ASTM، ASTM D88 و ASTM D113، ASTM D92، D36 به دست می‌آیند.

۳-۲- تهیه تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

یکی از روش‌های تعیین نحوه پخش ذرات افزودنی و میزان پراکندگی این ذرات در یک ترکیب مانند قیر، عکس‌برداری با



شکل ۵. الف) دستگاه SEM دانشگاه فیزیک دانشگاه یزد. ب) نمونه‌های قیری لایه نشانی شده با ذرات طلا جهت آزمون SEM

برای تعیین ساختار و اندازه‌گیری گونه‌های شیمیایی به کار می‌رود. همچنین این روش عمدتاً برای شناسایی ترکیبات آلی به کار می‌رود، زیرا طیف‌های این ترکیبات معمولاً پیچیده هستند و تعداد زیادی پیک‌های جذبی یا عبوری دارند که می‌توانند برای اهداف مقایسه‌ای به کار گرفته شوند. این دستگاه یکی از دستگاه‌های توانمند در زمینه‌های طیف‌سنجی مادون قرمز است که در ترکیبات بنیادی و کاربردی رشته‌های علوم پایه و فنی و مهندسی برای آنالیزهای کمی و کیفی و تعیین ساختمان مولکولی ترکیبات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نمونه‌های قیری جهت آزمون SEM در ظرفی آماده شده و توسط کارشناس دستگاه SEM نمونه‌برداری می‌شود. پس از آن تمامی نمونه‌ها لایه نشانی طلا می‌شود (شکل ۵). این امر برای رسانا کردن قیر جهت توانایی انتقال الکترونی به نمونه مورد نیاز است. نمونه‌های لایه نشانی شده با طلا بر روی یک صفحه‌ی رسانا گذاشته شده و سپس درون دستگاه SEM جهت عکس‌برداری قرار داده می‌شود.

۳-۳-۳- آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه

طیف‌سنجی مادون قرمز براساس جذب تابش و بررسی جهش‌های ارتعاشی مولکول‌ها و یون‌های چند اتمی صورت می‌گیرد. این روش به عنوان روشی پر قدرت و توسعه‌یافته



۳-۳-۴- آزمایش مخلوط آسفالتی

۳-۴-۱- آزمایش‌های حساسیت رطوبتی

در ادامه، این آزمایش‌ها را به‌طور خلاصه معرفی می‌گردد. نتایج حاصل از آزمایش‌های فوق برای مقایسه حساسیت رطوبتی مخلوط‌های کنترلی و اصلاح‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق استاندارد تی ۲۸۳ نمونه‌ها باید در یک ظرف پلاستیکی یا فلزی به حجم ۱ تا ۲ لیتر در آب قرار گرفته و در شرایط خلاء در فشار نسبی ۱۳ تا ۶۷ کیلوپاسکال (۱۰ تا ۲۶ اینچ جیوه)

در این پژوهش برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی ضد عریان‌شدگی، آزمایش‌های کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌های خشک و نمونه‌های تحت شرایط رطوبتی (بند ۹-۷-۶ قسمت پ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، نشریه ۲۳۴)، آزمایش مدول برجهنگی و همچنین آزمایش آب جوشان مورد استفاده قرار گرفت.

غیر مستقیم به مدت ۲ تا ۳ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قبل از آزمون نگه‌داری می‌شوند. طبق استاندارد آشتو T-۲۸۳ صفحه شکسته دستگاه آزمون کششی غیر مستقیم برای نمونه‌های ۴ اینچی باید عرض ۱۲/۷ میلی‌متر و طول صفحه شکست باید کل ضخامت نمونه را پوشش دهد. بارگذاری نمونه‌های ۴ اینچی با سرعت ۵ میلی‌متر در دقیقه انجام می‌گیرد. پس از انجام آزمون و به دست آوردن نیروی قابل تحمل از هر نمونه، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها از رابطه (۱) قابل محاسبه است. پس از تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، مقاومت کششی غیرمستقیم هر ترکیب قیر سنگ‌دانه از میانگین مقادیر مقاومت به دست آمده از هر ۳ نمونه در هر گروه در شرایط خشک و شرایط مرطوب حاصل می‌شود.

$$S_t = \frac{2000P}{\pi t D}$$

۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است، به متوسط مقاومت سه نمونه دیگر که ۳۰ تا ۴۰ دقیقه در این شرایط نگهداری شده‌است، نباید کمتر از ۰/۷۵ باشد. نمونه‌های مارشال به روش ASTM D1559، تهیه می‌شوند (Aksoy et al, 2005).

$$MSR = 100 \times \frac{MS_{Cond}}{MS_{Uncond}}$$

به مدت ۵ دقیقه قرار بگیرند. نمونه‌ها در این پژوهش در ظرف پلاستیکی ۱/۵ لیتری آب تحت فشار ۲۵ اینچ جیوه به مدت ۵ دقیقه قرار گرفتند. پس از خارج کردن نمونه‌ها از محفظه خلاء نمونه‌ها برای مدت کوتاهی (حداقل ۵ دقیقه) در آب نگه داشته می‌شوند. پس از ایجاد خلاء و اشباع‌سازی نمونه‌ها، درصد اشباع نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که درصد اشباع کمتر از ۷۰ درصد باشد نمونه‌ها مجدد در شرایط خلاء قرار گرفته و روند ذکرشده برای آن‌ها تکرار می‌شود. هرکدام از نمونه‌ها در یک پلاستیک حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب گذاشته شده و سپس در فریزر در دمای ۱۸- درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۱۶ ساعت نگهداری می‌شوند. نمونه‌ها از نایلون پلاستیکی خارج شده و در حمام آب با دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار می‌گیرند.

۳-۴-۲- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

هر دو گروه نمونه‌های ساخته شده جهت انجام آزمایش کشش (۱)

که پارامترهای این رابطه به شرح زیر تعیین می‌شوند:

S_t - مقاومت کششی غیرمستقیم برحسب کیلوپاسکال

P - حداکثر بار وارده برحسب نیوتن

D - قطر نمونه برحسب میلی‌متر

t - ارتفاع نمونه برحسب میلی‌متر

۳-۴-۳- آزمایش مقاومت مارشال و روانی

استقامت مارشال به‌طور چشمگیری با زاویه اصطکاک داخلی مصالح و ویسکوزیته قیر در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تحت تاثیر قرار می‌گیرد (Attaelmanan et al, 2011). نشریه ۱۰۱ برای ارزیابی دوام مخلوط‌های آسفالتی مقرر می‌دارد که نسبت متوسط مقاومت سه نمونه آزمایشگاهی بتن آسفالتی مارشال که ۲۴ ساعت در شرایط مستغرق در داخل آب

(۲)

MSR : نسبت مقاومت مارشال

MS_{cond} (Kg) : متوسط مقاومت مارشال برای نمونه‌های مرطوب بر حسب کیلوگرم

MS_{uncond} (Kg) : متوسط مقاومت مارشال برای نمونه‌های خشک بر حسب کیلوگرم

۳-۴-۵- آزمایش مدول برجهندگی

می‌شود تنش در آن نقطه برابر صفر خواهد بود و هنگامی که بار در بالای آن نقطه وارد می‌شود، میزان تنش به حداکثر خواهد رسید. بنابراین منطقی است که تنش وارد، به صورت سینوسی یا مثلثی در نظر گرفته شود. مطابق با استاندارد بارگذاری در مدت زمان ۰/۱ ثانیه و هر پالس ۳ ثانیه (فرکانس ۰/۳۳ هرتز) به طول می‌انجامد. بعد از ۲۰۰ پالس بارگذاری با بار ۲۰۰۰ نیوتن تعداد ۵ پالس اضافه انجام می‌شود که در آن حالت، مدول برجهندگی محاسبه می‌شود (ASTM D4123-82, 1995). با توجه به رابطه ۳ مقدار M_R محاسبه می‌شود.

$$M_R = 1000 \times P \times (v + 0.27) \times H / \Delta H$$

(۳)

مدول برجهندگی برای ارزیابی کیفیت نسبی مخلوط آسفالتی به‌عنوان داده ورودی طرح روسازی، ارزیابی و یا تحلیل روسازی به‌کار می‌آید. به‌علت اینکه مطابق با استاندارد ASTM D4123 بار اعمال‌شده و تغییرشکل ناشی از آن در نمونه مخلوط آسفالتی برای تعیین مدول برجهندگی در مقایسه با مقاومت مصالح کوچک می‌باشد، آزمایش مدول برجهندگی یک آزمایش غیرمخرب بوده و از این نمونه‌ها می‌توان برای سایر آزمایش‌ها تحت شرایط بارگذاری و دمای متفاوت استفاده نمود. نوع و مدت زمان اعمال بار در آزمایش مدول برجهندگی باید شرایط موجود در محل را شبیه سازی نماید. هنگامی که بار چرخ در فاصله‌ای دور از یک نقطه وارد

M_R : مدول برجهندگی (مگاپاسکال)

P: بار اعمالی (فشار)

ΔH : میانگین تغییر شکل برگشت‌پذیر در هر چرخه

v: ضریب پواسون

H: میانگین ارتفاع نمونه

مهم ارزیابی مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خسارت‌های ناشی از رطوبت می‌باشد.

مقادیر مدول ارتجاعی نمونه‌های تحت شرایط رطوبتی و خشک اندازه‌گیری شده و نسبت مدول برجهندگی به‌عنوان نسبت IRM_R معرفی می‌گردد. این نسبت یکی از شاخص‌های

۳-۴-۶- آزمایش آب جوشان

آب جوش حرارت داده می‌شود و هر سه دقیقه یک بار محتویات درون ظرف هم‌زده می‌شود و در انتها قیرهای روی سطح آب جدا شده تا باعث پوشش مجدد مصالح نگردد. پس از سرد شدن محتویات ظرف تا دمای اتاق، آب موجود در ظرف خالی شده و برای بررسی بیشتر، مخلوط را بر روی یک سطح سفید قرار می‌دهند. معیار خرابی با مشاهدات بصری مصالح عریان‌شده تعیین خواهد شد.

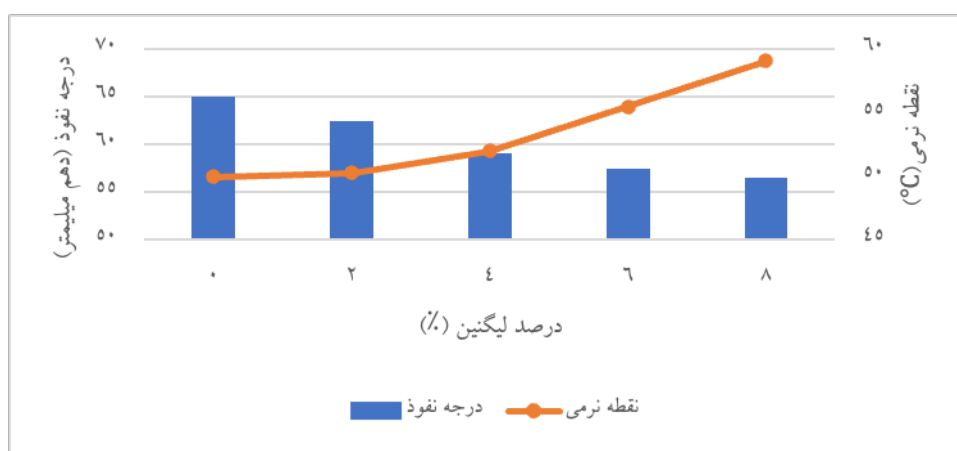
این آزمایش تحت استاندارد ASTM D3625 برای بررسی چشمی عریان‌شدگی در مخلوط قیر و سنگدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش درجات مختلف عریان‌شدگی، پس از جوشاندن مخلوط آسفالتی متراکم‌نشده به مدت ۱۰ دقیقه تعیین می‌شود. در حدود ۵۰۰ گرم آب در ظرفی ریخته شده و به آن حرارت داده می‌شود تا به نقطه جوش برسد، سپس ۱۰۰ گرم از نمونه متراکم‌نشده، حداکثر تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (بیشتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد) و برای مدت ۱۰ دقیقه درون

۴- نتیجه گیری

۴-۱- نتایج آزمایش‌های قیر اصلاح شده با لیگنین

می‌شود که همین مسئله باعث افزایش سختی قیر می‌شود این در حالی است که افزودن بیش از حد پلیمر به قیر باعث از بین رفتن نیروهای بین مولکول‌های قیر شده و ساختار اصلی قیر در هم می‌شکند و قیر در محدوده ۶۰/۷۰ عمل نمی‌کند (Stroup-gardiner, 1997).

نتایج آزمایش درجه نفوذ انجام شده (در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) روی نمونه‌های قیر حاوی افزودنی لیگنین در درصدهای مختلف در شکل ۷ گزارش شده است. همان‌طور که نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد افزودن لیگنین به قیر باعث کاهش درجه نفوذ آن می‌شود. با افزایش مقدار پلیمر لیگنین به قیر، پیوندهای قوی‌تری بین ذرات لیگنین و قیر ایجاد

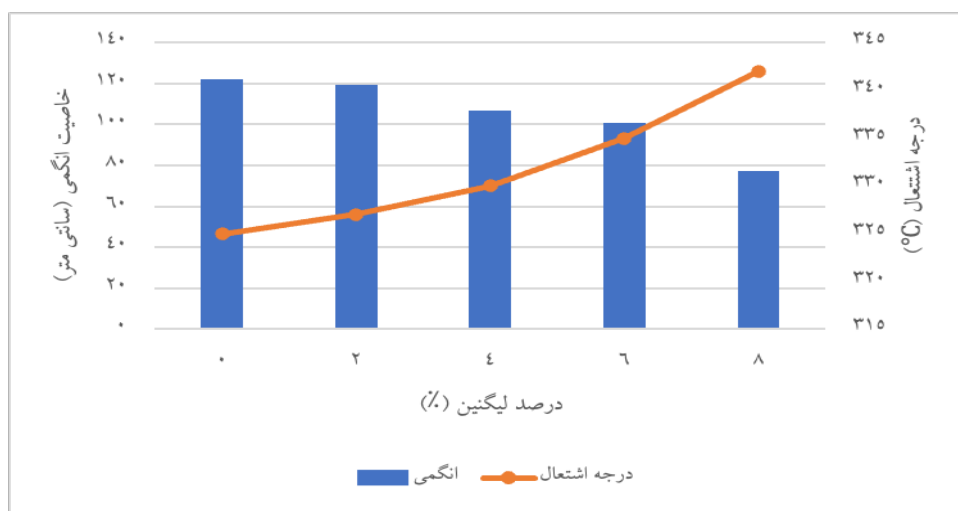


شکل ۷. گراف درجه نفوذ و نقطه نرمی برای نمونه‌های قیری با درصد مختلف لیگنین

افتی جزئی در خاصیت شکل‌پذیری داشته و ۵/۵ درصد نسبت به حالت کل تغییرات، کاهش را به همراه دارد، در قیر حاوی ۴ و ۸ درصد لیگنین افت زیادی در خاصیت انگمی نسبت به قیر پایه دیده می‌شود به گونه‌ای که با افزایش ۲ درصد لیگنین به ۴ درصد ۲۷/۸ درصد و با افزایش ۴ درصد لیگنین به ۶ درصد ۱۳/۳ درصد کاهش در عدد شکل‌پذیری اتفاق می‌افتد. زمانی که درصد لیگنین اضافه شده به ۸ درصد می‌رسد افت شدیدی معادل ۵۳/۳ درصد رخ داده و خاصیت شکل‌پذیری خود را تقریباً از دست می‌دهد. علت این امر را می‌توان این موضوع دانست که با افزودن پلیمر لیگنین و ایجاد بلوک‌های پلیمری ۳ بعدی در قیر، سختی قیر افزایش یافته و قیر ماهیت اصلی خود را از دست می‌دهد و به این ترتیب خاصیت انگمی یا شکل‌پذیری در قیر کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده از این آزمایش تا ۶ درصد لیگنین در قیر خاصیت انگمی قابل قبول است و با افزایش لیگنین در قیر به ۸ درصد خاصیت

شکل ۷ گرافی از تغییرات نقطه نرمی، برای مشاهده بهتر روند تغییرات نقطه نرمی کشیده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزایش لیگنین به قیر مقدار نقطه نرمی قیر افزایش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش لیگنین تا ۸ درصد، نقطه نرمی ۹/۱ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. روند تغییرات نقطه نرمی در درصدهای پایین لیگنین جزئی است و با قیر شاهد چندان تفاوتی ندارد. علت این امر را می‌توان به این صورت توجیه کرد که با افزایش دما ویسکوزیته قیر کاهش می‌یابد و پلیمر آزادی حرکت بیشتری پیدا می‌کند و نیروهای بین مولکولی بین پلیمر و قیر شدت بیشتری پیدا خواهد کرد که با افزایش پلیمر لیگنین این پیوندهای مولکولی افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش شکل‌پذیری روی قیر پایه حاوی درصدهای مختلف لیگنین در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، خاصیت انگمی با افزایش لیگنین کاهش می‌یابد به گونه‌ای که قیر حاوی ۲ درصد لیگنین

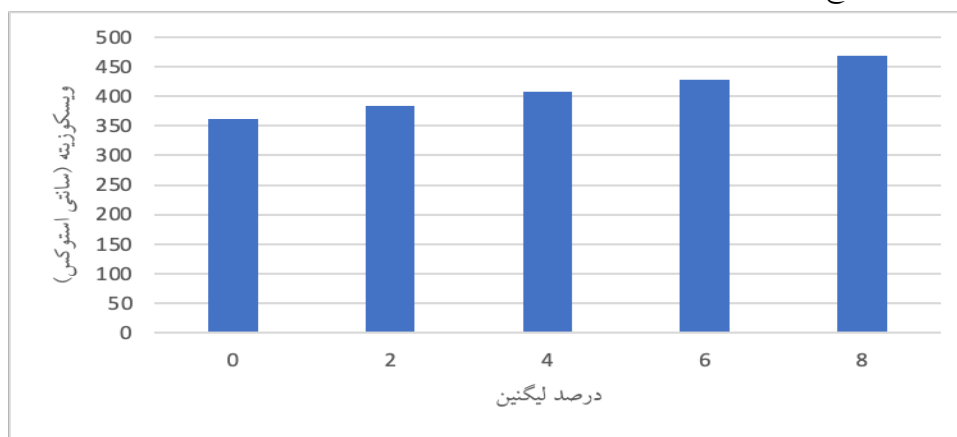
انگمی غیر قابل قبول می‌شود و دیگر شکل‌پذیری قیر از ۱۰۰ سانتی‌متر کمتر شده و کشسان بودن را از دست می‌دهد و در اینجا لیگنین موجود در قیر نقش یک ناخالصی را دارد که کشش‌پذیری را کاهش می‌دهد.



شکل ۸. تغییرات خاصیت انگمی و درجه اشتعال قیرهای حاوی درصدهای مختلف لیگنین

قیر، ویسکوزیته قیر افزایش یافته و به عبارتی روانی آن کاهش می‌یابد. این افزایش ممکن است به خاطر این باشد که ساختار مولکولی لیگنین با توجه به ماهیت آروماتیکی که دارد با ساختارهای آروماتیکی قیر برهم‌کنش‌هایی داشته باشد. از طرف دیگر گروه‌های اتری و فنولی و قطبی ساختار آن نیز باعث می‌شود که بتواند با ساختار قطبی و هترواتم‌های قیر مانند آسفالتین و رزین‌های قیر برهم‌کنش‌های قوی و حتی کوالانسی داشته باشد. به عبارت دیگر لیگنین به مانند فاکتور لینک کننده می‌تواند باعث تشکیل پیوندهای عرضی فراوان در بین ساختارهای سنگین قیر گشته و باعث انسجام و استحکام بیشتر قیر گردد. ساختار لیگنین باعث سه بعدی و شبکه‌ای‌تر شدن ساختار قیر می‌شود.

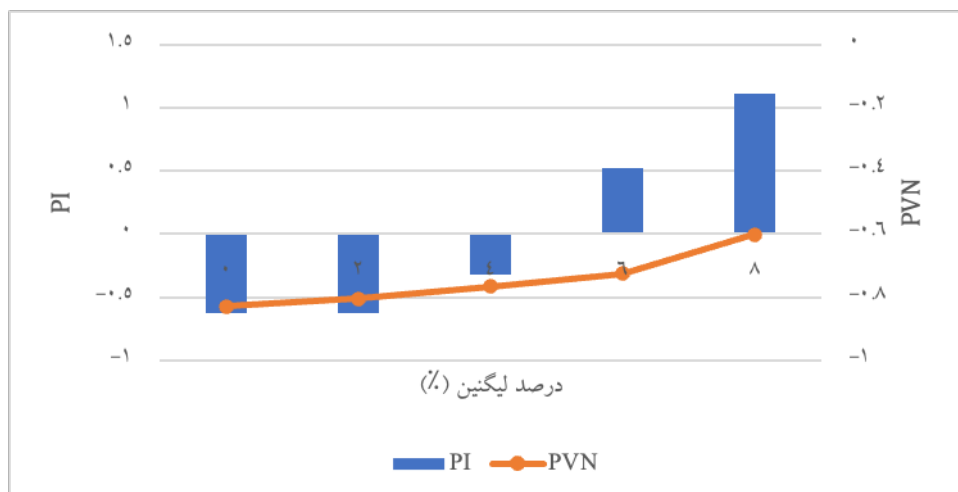
با استناد به نتایج آزمایش انجام گرفته بر روی قیر حاوی درصدهای مختلف لیگنین که در شکل ۸ نشان داده شده است، مشخص شد که با افزودن لیگنین درجه اشتعال قیر افزایش می‌یابد. درجه اشتعال قیر در ایمنی اجرایی آن برای حرارت دادن از اهمیت بالایی برخوردار است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد ایمن‌تر است چرا که قیر در دمای بالاتری شعله‌ور خواهد شد. علت این امر را می‌توان به این صورت بیان کرد به دلیل پیوند قوی‌تر بین مولکول‌ها در قیر اصلاح‌شده، مواد نفتی دیرتر تبخیر می‌شود. ویسکوزیته کینماتیک قیر پایه و قیرهای اصلاح‌شده با درصدهای مختلف لیگنین در درصدهای مختلف وزنی در دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد محاسبه شد که در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج، با افزایش درصد لیگنین در



شکل ۹. تغییرات ویسکوزیته قیر پایه و قیر حاوی درصدهای مختلف لیگنین

پارامترهای معرفی شده به +۱ نزدیک‌تر باشد حساسیت حرارتی قیر کمتر بوده و قیر در شرایط ایده‌آل‌تری است. محاسبات مربوط به PI و PVN بر اساس فرمول‌های (۳-۱) تا (۳-۵)، در شکل ۱۰ ارائه شده است.

تغییرات حاصل در غلظت قیر، که از تغییر در شرایط حرارتی آن به وجود می‌آید، حساسیت حرارتی قیر نامیده می‌شود که برای قیرهای گوناگون متفاوت است. حساسیت حرارتی قیر را می‌توان با دو پارامتر شاخص نفوذپذیری ($PI^{(۱)}$) و عدد نفوذ-پذیری ویسکوز ($PVN^{(۲)}$) بیان کرد. به طور کلی هرچه



شکل ۱۰. تاثیر لیگنین بر شاخص نفوذپذیری و شاخص عدد نفوذپذیری ویسکوز قیر

به نوعی نقش سنگدانه را در ابعاد خیلی ریزتر ایفا می‌کند و می‌توان گفت سخت‌تر شدن قیر ناشی از همین عامل است که باعث افزایش استحکام قیر می‌شود. عکس‌های گرفته‌شده نشان می‌دهند که در کلیه موارد فاز غالب قیر است، بنابراین رفتار قیر در مخلوط غالب است ولی در بسیاری از موارد به علت نزدیک بودن رنگ لیگنین با قیر، تمایز زیادی بین آن دو وجود ندارد.

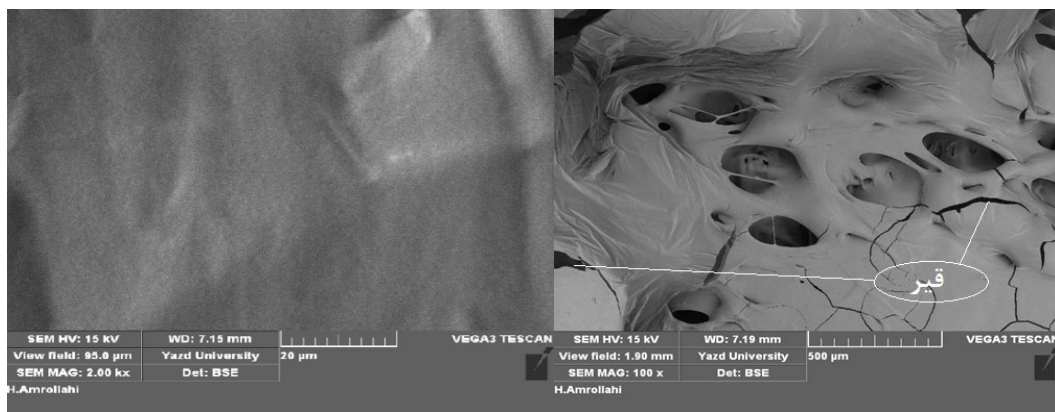
شاخص نفوذپذیری وابسته به درجه نفوذ و نقطه نرمی می‌باشد و با تغییرات درجه نفوذ و نقطه نرمی تغییر می‌کند. با توجه به شکل ۱۰ شاخص نفوذپذیری با افزایش درصد لیگنین در قیر نسبت به حالت شاهد در حال افزایش است و به +۱ نزدیک می‌شود که نشانه‌ی حساسیت کمتر قیر اصلاح‌شده است یعنی در شرایط یا مناطقی که اختلاف حرارتی زیاد است این قیر اصلاح‌شده مناسب و مطلوب می‌باشد. با توجه به شکل ۱۰، با اضافه کردن ۲ درصد لیگنین شاخص عدد نفوذپذیری ویسکوز قیر به مقدار کمی افزایش می‌یابد سپس با افزایش لیگنین به درصدهای بالاتر این شاخص به +۱ نزدیک‌تر می‌شود.

۴-۳- نتایج آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوری

از دستگاه FTIR به منظور بررسی ساختار و آنالیز شیمیایی لیگنین و قیر حاوی درصدهای مختلف لیگنین و تغییرات قیر اصلاح‌شده نسبت به حالت پایه، استفاده شد. طول موج‌های مادون قرمز از 12800 cm^{-1} تا 10 cm^{-1} است که به سه قسمت دور (۱۰ تا 400 cm^{-1})، میانه (400 تا 4000 cm^{-1}) و نزدیک (4000 تا 12800 cm^{-1}) تقسیم می‌شوند. گسترده‌ترین کاربرد طیف مادون قرمز ناحیه طیفی $4000-670\text{ cm}^{-1}$ است که در گستره مادون قرمز میانه قرار دارد. برای قیر، طول موج بین محدوده 1800 تا 600 cm^{-1} است. شکل ۱۳ طیف مادون قرمز قیر شاهد را نشان می‌دهد.

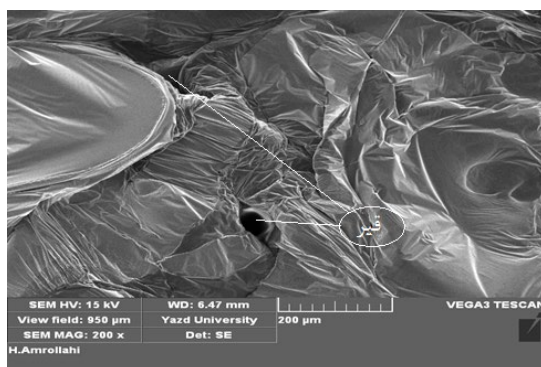
۴-۲- نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی

جهت بررسی مورفولوژی قیرهای اصلاح‌شده با لیگنین و نحوه‌ی پراکندگی اختلاط آن‌ها با قیر از عکس‌برداری SEM استفاده شده است. در این بخش عکس‌های گرفته‌شده از قیر پایه و قیر اصلاح‌شده در شکل‌های ۱۱ تا ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به عکس‌برداری انجام شده، افزودنی لیگنین دارای محفظه‌هایی ریزی می‌باشد که قیر در آن قرار می‌گیرد و



(الف)

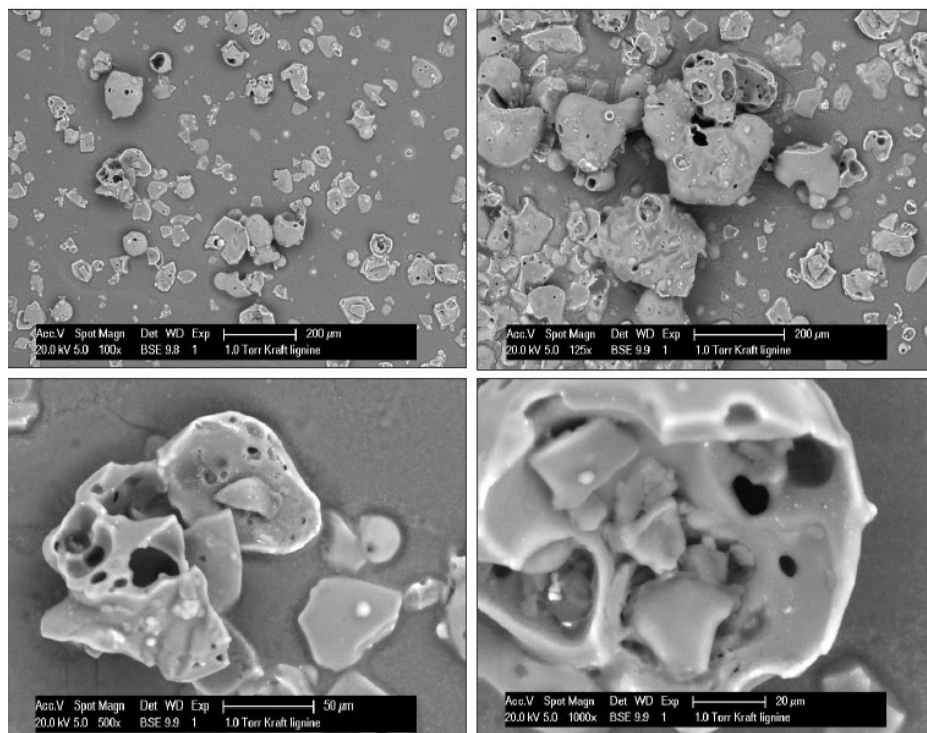
(ب)



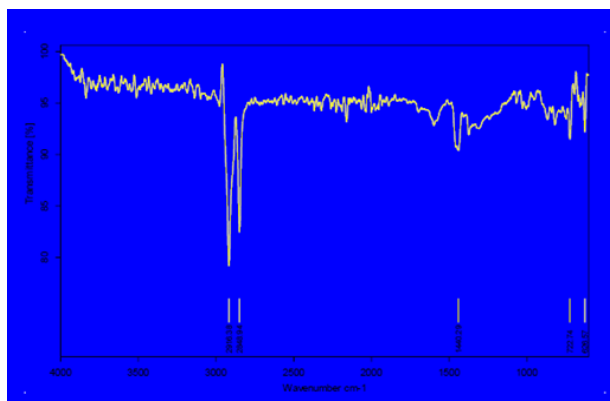
(ج)

شکل ۱۱. الف) عکس نمونه قیر شاهد (ب) عکس نمونه حاوی ۴ درصد لیگنین

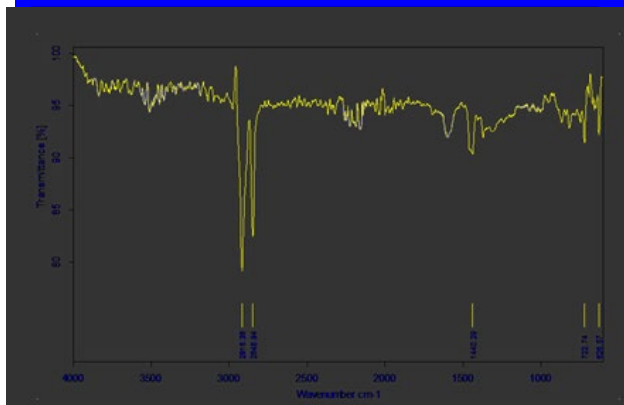
(ج) عکس نمونه قیر حاوی ۶ درصد لیگنین



شکل ۱۲. نمایی از پخش شدن لیگنین در قیر



(الف)

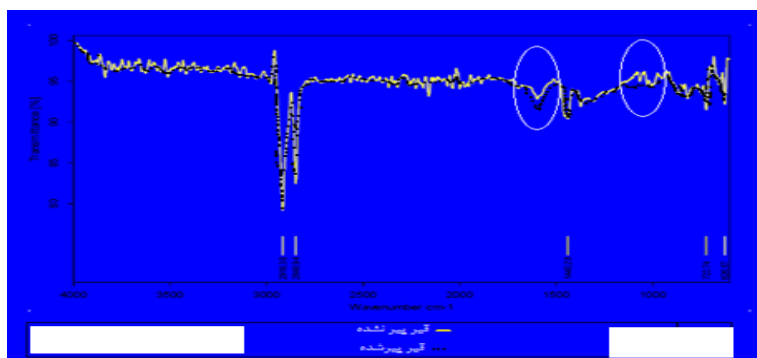


(ب)

شکل ۱۳. الف) طیف مادون قرمز قیر شاهد. ب) طیف مادون قرمز قیر شاهد پیرشده

می‌شوند. با توجه به شکل ۱۳ (ب) پیک‌های ۱۷۰۰ و ۱۰۳۰ cm^{-1} به ترتیب مربوط به $\text{C}=\text{O}$ و $\text{S}=\text{O}$ می‌باشد. برای قیر شاهد، کاهش پیک در این مناطق می‌تواند وابسته به پیری قیر باشد، یعنی هرچه پیک‌ها در این مناطق کاهش یابد پیری قیر افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ (ب) طول موج‌های داده شده در پیک‌های $\text{C}=\text{O}$ و $\text{S}=\text{O}$ به دلیل اینکه پیری در قیر ظاهر نشده، جذب طیف کمتری را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ طیف سنجی مادون قرمز برای نمونه قیر پیر شده شاهد می‌باشد که با مشاهده آن افتی در پیک‌های ۱۰۳۰ و ۱۷۰۰ اتفاق می‌افتد.

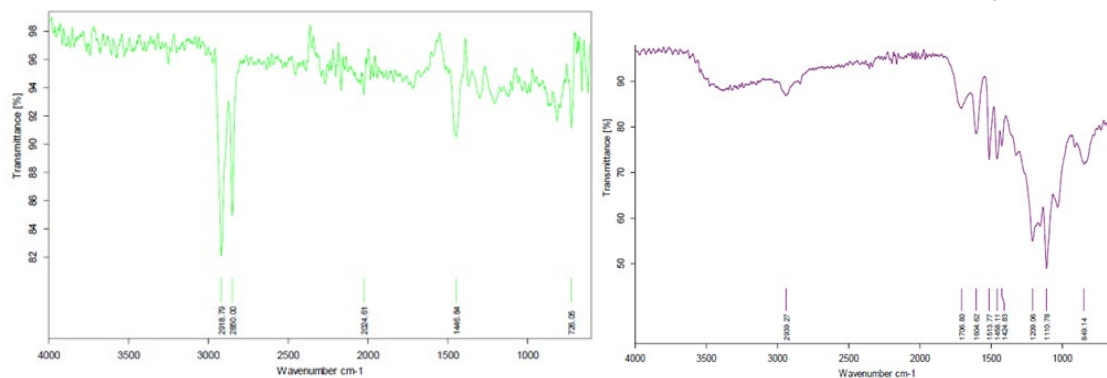
طیف مادون قرمز شکل الف ۱۳، به خصوص پیک‌هایی که در حدود ۱۷۰۰ cm^{-1} و ۱۰۳۰ cm^{-1} وجود دارند، قابل توجه هستند. زیرا آنها نشان دهنده جذب کتون‌ها ($\text{C}=\text{O}$) و سولفوسیدها ($\text{S}=\text{O}$) می‌باشند. هر دو مورد را می‌توان به عنوان شاخص‌های پیری قیر در نظر گرفت. افزایش کتون و جذب سولفوکسید نشانه‌ای از وجود پیری است. با توجه به شکل ۴-۲۸ پیک‌های کشش $\text{C}-\text{H}$ در محدوده ۳۰۰۰ تا ۲۸۵۰ cm^{-1} ، کشش $\text{C}-\text{C}$ در محدوده ۱۶۰۰ تا ۱۵۸۵ cm^{-1} و در محدوده ۱۴۷۰ تا ۱۳۵۰ cm^{-1} خمش $\text{C}-\text{H}$ ظاهر



شکل ۱۴. مقایسه طیف مادون قرمز قیر شاهد سالم و قیر شاهد پیرشده

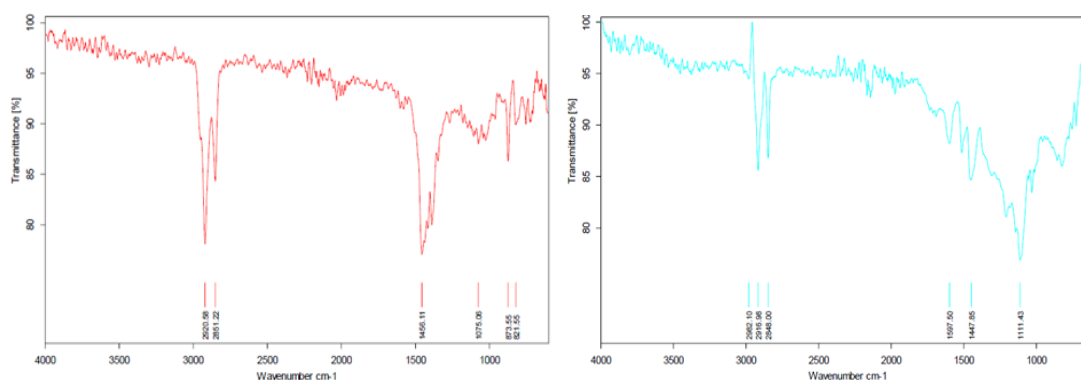
نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۵ این طیف با طیف استاندارد و معمول مربوط به لیگنین تقریباً مطابقت دارد (Gosselink, 2011).

شکل ۱۴ جهت مقایسه طیف مادون قرمز قیر شاهد پیرنشده و قیر پیرشده در یک شکل نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که پیک‌های $C=O$ و $S=O$ مربوط به قیر پیر شده کاهش یافته است. شکل ۱۵ طیف مادون قرمز لیگنین خالص را



(ب)

(الف)



(ج)

(د)

شکل ۱۵. الف) طیف لیگنین کرافت خام. ب) طیف مادون قرمز برای قیر حاوی ۴ درصد لیگنین
ج) طیف مادون قرمز برای قیر حاوی ۶ درصد لیگنین د) طیف مادون قرمز برای قیر حاوی ۸ درصد لیگنین

پیک‌های $C=O$ و $S=O$ کاهش می‌یابد. یعنی هرچه لیگنین در قیر افزایش یابد پیک‌های $C=O$ و $S=O$ کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به این صورت تفسیر کرد که با افزودن لیگنین به قیر، ابتدا لیگنین اکسید شده و اکسید شدن قیر را به تعویق می‌اندازد این بدان معناست که قیر حاوی لیگنین دیرتر پیر می‌شود.

با توجه به شکل‌های ۱۳ (الف) پیک‌های مربوط به $C=O$ و $S=O$ که وابسته به میزان پیری قیر است، کم می‌باشد. شکل ۱۵ که مربوط به طیف مادون قرمز لیگنین است پیک‌های $C=O$ و $S=O$ به طور چشم‌گیری کاهش یافته است که این اتفاق بدان معناست که اکسید شدن لیگنین سریع اتفاق می‌افتد. با توجه به شکل‌های ۱۳ (الف) و ۱۵ با افزودن لیگنین به قیر،

۴-۴- نتایج آزمایشات مخلوط اسفالتی

۴-۴-۱- نتایج مارشال

نشریه ۲۳۴ آورده شده است، حداقل مقاومت مخلوط بر حسب کیلوگرم برای ترافیک سنگین ۸۰۰ می‌باشد که با توجه به نتایج جدول ۴ همه‌ی نمونه‌ها در درصد‌های مختلف قیر حاوی درصد‌های متفاوت لیگنین مقاومتی بیش از حداقل را دارند.

نتایج به دست آمده از آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های ساخته شده (با اعمال ۷۵ ضربه به هر دو طرف نمونه) در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به مشخصات فیزیکی و مقاومتی مخلوط‌های آسفالتی گرم با روش مارشال که در

جدول ۴. مقاومت مارشال اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف لیگنین

درصد قیر	مقاومت مارشال (کیلوگرم)			میانگین مقاومت مارشال (کیلوگرم)	روانی (میلی‌متر)
قیر در حالت پایه					
۴/۵	۹۷۱	۹۳۴	۹۵۴	۹۵۳	۲/۷۵
۵	۱۰۰۵	۱۰۰۳	۹۹۶	۱۰۰۱	۲/۷۷
۵/۵	۱۰۱۳	۱۰۲۰	۹۸۲	۱۰۰۵	۳/۱۲
۶	۹۲۷	۱۰۱۴	۹۸۷	۹۷۶	۳/۱۷
قیر حاوی ۲ درصد لیگنین					
۴/۵	۱۰۰۱	۱۰۳۱	۹۵۹	۹۹۷	۲/۹۱
۵	۱۰۲۳	۱۰۰۶	۱۰۰۴	۱۰۱۱	۳/۰۱
۵/۵	۱۰۲۷	۱۰۰۱	۱۰۱۴	۱۰۱۴	۳/۲۲
۶	۱۰۰۱	۱۰۱۴	۱۰۱۴	۱۰۰۹/۶۷	۳/۴۱
قیر حاوی ۴ درصد لیگنین					
۴/۵	۹۹۶	۸۹۹	۹۷۶	۹۵۷	۳/۰۴
۵	۱۰۶۱	۱۰۰۲	۱۰۳۰	۱۰۳۱	۳/۱۳
۵/۵	۱۰۵۱	۱۰۷۷	۱۰۳۵	۱۰۵۴/۳۳	۳/۳۷
۶	۹۸۸	۱۰۰۶	۱۰۱۰	۱۰۰۱/۳۳	۳/۸۱
قیر حاوی ۶ درصد لیگنین					
۴/۵	۱۰۲۱	۱۰۲۴	۱۰۲۰	۱۰۲۱/۶۷	۳/۲۳
۵	۱۰۳۵	۱۰۴۱	۱۰۴۱	۱۰۳۹	۳/۳۱
۵/۵	۱۰۶۳	۱۱۳۷	۱۱۱۰	۱۱۰۳/۳۳	۳/۴۹
۶	۱۰۴۳	۱۰۴۷	۱۰۳۹	۱۰۴۳	۴/۶۵
قیر حاوی ۸ درصد لیگنین					
۴/۵	۹۸۶	۹۹۸	۱۰۰۹	۹۹۷/۶۷	۳/۱۶
۵	۱۰۰۷	۱۰۰۱	۱۰۱۵	۱۰۰۷/۶۷	۳/۲۶
۵/۵	۱۰۶۷	۱۰۷۶	۱۰۴۰	۱۰۶۱	۳/۳۰
۶	۹۸۰	۹۹۲	۹۹۶	۹۸۹/۳۳	۳/۶۶

افزودن لیگنین به مخلوط آسفالتی باعث افزایش مقاومت مارشال می‌شود. روند افزایش مقاومت مارشال تا ۶ درصد لیگنین صعودی بوده و با افزایش مقدار لیگنین به ۸ درصد وزنی برای درصد‌های مختلف قیر کاهش می‌یابد اما هنوز مقاومت مارشال ۸ درصد لیگنین از مخلوط شاهد بیشتر می‌باشد، عامل این اتفاق را می‌توان افزایش چسبندگی و سخت‌تر شدن قیر دانست که خاصیت انگمی قیر حاوی ۸ درصد لیگنین را نشان می‌دهد که حد قابل قبولی ندارد و کاهش مقاومت مارشال در ۸ درصد لیگنین را تایید می‌کند. با توجه به جدول ۴ در تمامی نمونه‌ها با اضافه شدن افزودنی لیگنین، روانی نسبت به مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر پایه

افزایش می‌یابد. این موضوع در نگاه اول به عنوان یک ضعف تلقی می‌شود چرا که مخلوط آسفالتی نرم‌تر شده و دچار تغییر شکل‌های بیشتری خواهد شد. اما باید توجه داشت که با افزایش روانی، مخلوط آسفالتی پیش از شکست انرژی بیشتری را جذب کرده و کرنش بیشتری را تحمل می‌کند و این موضوع یک حسن تلقی می‌شود چرا که آسفالت در شرایط سخت، عملکرد بهتری خواهد داشت. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود روانی مخلوط‌های آسفالتی تا ۶ درصد لیگنین افزایش می‌یابد سپس با اضافه کردن ۸ درصد لیگنین روانی روند کاهشی پیدا می‌کند. با توجه به جدول ۴ نشریه ۲۳۴ حداقل روانی آسفالت برای هر سه حالت ترافیک سبک،

۴-۳-۴- آزمایش حساسیت رطوبتی لاتمن اصلاح شده (۲۸۳-۰۰۰۰۰۰۰۰)

نمونه‌های آسفالتی شاهد می‌باشد که با توجه به جدول گزارش شده ۶۳۲/۱۴ کیلوپاسکال و بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌های حاوی ۶ درصد لیگنین، ۷۶۲/۶ کیلوپاسکال می‌باشد، نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با درصدهای دیگر لیگنین مقاومتی بین این اعداد دارند. با توجه به شکل ترتیب مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) از کم به زیاد، صفر درصد، ۸ درصد، ۲ درصد، ۴ درصد و ۶ درصد به دست آمده است. در مورد مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب، قیر پایه عدد ۴۸۷/۶۱ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد که در نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با لیگنین افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم را مشاهده می‌کنیم تا ۶ درصد لیگنین، سپس با افزایش درصد لیگنین به ۸ درصد در مخلوط مقاومت کششی هم کاهش می‌یابد. بیشترین کشش غیرمستقیم برای حالت مرطوب مربوط به ۶ درصد، ۶۷۳/۵۸ می‌باشد.

نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با افزودنی لیگنین بین ۰ تا ۸ درصد با سنگدانه آهکی ساخته شده و تحت آزمایش حساسیت رطوبتی لاتمن اصلاح شده با استفاده از استاندارد آشتو تی ۲۸۳ قرار گرفتند. با استفاده از اطلاعات به دست آمده از آزمون مبنی بر قطر نمونه (D) بر حسب میلی‌متر، ارتفاع نمونه (t) بر حسب میلی‌متر و بار قابل تحمل نمونه (P) بر حسب نیوتن، از رابطه (۳-۶) مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) هر نمونه محاسبه شده است. در نمودار شکل ۱۷ نتایج آزمون کشش غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با افزودنی لیگنین و سنگدانه آهکی آورده شده است. مطابق با این شکل مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی در شرایط خشک با افزودن لیگنین در حال افزایش است اما زمانی که افزودنی لیگنین به ۸ درصد رسید مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های آسفالتی کاهش پیدا کرده ولی هم‌چنان نسبت به نمونه شاهد مقاومت کششی بیشتری دارند. کمترین مقاومت کششی غیرمستقیم برای



شکل ۱۷. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی حاوی لیگنین در حالت خشک و مرطوب

است که قیر حاوی افزودنی لیگنین موجب افزایش مقاومت رطوبتی آسفالت متشکل از این نوع قیر اصلاح شده و مصالح آهکی می‌گردد. با افزودن ۲ و ۴ درصد لیگنین به مخلوط آسفالتی روند افزایش مقاومت در برابر رطوبت به صورت ملایم افزایش می‌یابد و تغییر چشم‌گیری مشاهده نمی‌شود، با اضافه کردن ۶ درصد لیگنین شاخص حساسیت رطوبتی از

شاخص TSR از نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های مرطوب به نمونه‌های خشک حاصل می‌شود. هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد مقاومت رطوبتی مخلوط آسفالتی بیشتر است. شکل ۱۷ تغییرات شاخص TSR نمونه‌های آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با لیگنین را نشان می‌دهد. مقدار این پارامتر به ازای قیر پایه ۰/۷۷ محاسبه شده است. نتایج نشان‌دهنده این

۰/۸۲۳ به ۰/۸۸۳ تغییر می‌کند و مقاومت رطوبتی مخلوط به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد سپس با اضافه کردن ۸ درصد لیگنین به مخلوط مقاومت رطوبتی در مخلوط کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده در همه‌ی درصدهای لیگنین شاخص TSR افزایش پیدا کرده است که نشان‌دهنده این است که مقاومت در برابر رطوبت افزایش پیدا کرده است.

۴-۴-۵- نتایج آزمایش آب جوشان

استاندارد ASTM D3625 روشی را ارائه کرده که می‌توان از آن برای تخمین میزان عریان‌شدگی در مخلوط متراکم نشده، تحت تاثیر آب جوش استفاده کرد. به محض اتمام زمان جوشاندن، مواد زائد حاوی قیر روی آب گرفته می‌شوند. این کار به منظور جلوگیری از اختلاط دوباره مواد زائد با سنگ‌دانه

می‌باشد. پس از هم دما شدن سنگ‌دانه‌ها با دمای محیط، آب از روی سنگ‌دانه‌ها برداشته می‌شود و مخلوط بر روی یک کاغذ سفید رنگ قرار می‌گیرد تا به صورت واضح قابل رویت باشد. معیار عریان‌شدگی نمونه‌ها، توسط مشاهده چشمی عریان‌شدگی سنگ‌دانه‌ها حاصل می‌گردد. درصد سنگ‌دانه‌هایی که هنوز دارای پوشش قیری هستند (همانند شرایط قبل آزمایش)، به طور چشم‌گیری برای تعیین سطح پوشش مخلوط آسفالتی، استفاده می‌گردد. نمونه‌های ساخته‌شده با درصدهای مختلف لیگنین و سنگ‌دانه آهکی بعد از بررسی چشمی، مشاهده گردید که نمونه ساخته شده با قیر شاهد دارای بیشترین سطح عریان‌شدگی است (شکل ۱۸). هم‌چنین با افزایش درصد لیگنین در مخلوط آسفالتی سطح عریان‌شدگی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸. نمایی از سنگ‌دانه‌های مخلوط آسفالتی حاوی لیگنین بعد از جوشیدن

۵- نتیجه‌گیری

اهداف اصلی پژوهش حاضر بررسی و تحلیل خصوصیات رئولوژی قیر اصلاح‌شده و قیر اصلاح‌نشده است که افزودنی استفاده شده در این پژوهش خصوصیات ویسکوالاستیک قیر خالص را تغییر می‌دهد. هم‌چنین بررسی خصوصیات مکانیکی و رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده می‌باشد. در این پژوهش از یک نوع افزودنی به نام لیگنین جهت تغییر خصوصیات رئولوژی قیر و عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. پس از ساخت نمونه‌های قیری و آسفالتی با درصدهای مختلف لیگنین، مجموعه آزمایش‌های قیر، استقامت مارشال، حساسیت رطوبتی، مدول برجهنگی، تصویربرداری SEM و طیف‌سنجی مادون قرمز انجام گرفت. از مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته، نتایج زیر به دست آمده است:

به کارگیری افزودنی لیگنین در قیر باعث می‌شود عملکرد قیر در دمای بالا بهبود پیدا کند. افزودن لیگنین به قیر تا ۲ درصد وزنی قیر تاثیر چندانی بر قیر ندارد اما با افزایش لیگنین تا ۶ درصد تغییرات محسوسی در خصوصیات رئولوژی قیر اتفاق می‌افتد و نفوذپذیری، نقطه نرمی و ویسکوزیته قیر به ترتیب کاهش، افزایش و افزایش پیدا می‌کند لذا می‌توان نتیجه گرفت که قیر اصلاح‌شده با لیگنین برای مناطق گرم‌سیر مناسب است.

با افزایش مقدار لیگنین به قیر، شاخص درجه نفوذ (PI) و شاخص نفوذپذیری ویسکوز (PVN) افزایش می‌یابد و به ۱+ نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر حساسیت حرارتی قیر اصلاح‌شده با لیگنین با افزایش درصد لیگنین در قیر کاهش پیدا کرده و عملکرد قیر بهتر می‌شود.

۸ درصد لیگنین به نمونه‌ها، کشش غیرمستقیم کاهش می‌یابد اما هم‌چنان کشش غیرمستقیم نمونه‌ها از نمونه شاهد بیشتر می‌باشد.

نتایج حاصل از آزمون لاتمن اصلاح‌شده و نسبت کشش غیرمستقیم، نشان‌دهنده افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با سنگ‌دانه‌های آهکی و لیگنین نسبت به نمونه‌های شاهد است که این روند افزایش مقاومت تا ۶ درصد لیگنین ادامه دارد اما با افزایش درصد لیگنین از ۶ درصد به ۸ درصد مقاومت کششی غیرمستقیم کاهش می‌یابد اما هم‌چنان نسبت به نمونه‌های شاهد مقاومت بیشتری دارد. می‌توان نتیجه گرفت که لیگنین یک اصلاح‌کننده رطوبتی برای مخلوط‌های آسفالتی است.

بیشترین مقاومت رطوبتی از نتایج آزمایش لاتمن اصلاح‌شده مربوط به مخلوط آسفالتی حاوی ۶ درصد لیگنین می‌باشد.

نتایج آزمایش آب جوشان که بر روی مخلوط‌های آسفالتی شاهد و اصلاح‌شده با لیگنین انجام شد نشان‌دهنده افزایش مقاومت در برابر عریان‌شدگی نمونه‌های آسفالتی حاوی لیگنین نسبت به نمونه‌های شاهد بود.

نتایج به دست آمده از تصویربرداری SEM نشان داد که قیر نقش فاز غالب را دارد و لیگنین موجود در قیر باعث سخت‌تر شدن قیر شده و می‌توان گفت لیگنین به مانند سنگ‌دانه در مخلوط‌های آسفالتی عمل می‌کند و افزایش استحکام قیر را به همراه دارد.

با بررسی نتایج به دست آمده از طیف سنجی مادون قرمز بر روی قیر شاهد و قیر حاوی درصد‌های مختلف لیگنین می‌توان گفت که با افزایش مقدار لیگنین به قیر به عنوان افزودنی میزان مقاومت قیر در برابر پیرشدگی افزایش می‌یابد و لیگنین را می‌توان به عنوان یک آنتی‌اکسیدان قیر معرفی کرد.

با افزودن لیگنین به قیر استقامت مارشال نمونه‌های آسفالتی افزایش می‌یابد. افزودن لیگنین به قیر تا ۶ درصد مقاومت مارشال افزایش می‌یابد و در ۶ درصد به حداکثر مقاومت مارشال می‌رسد سپس با افزودن لیگنین به ۸ درصد مقاومت مارشال روند کاهشی پیدا میکند ولی هم‌چنان مقاومت نمونه‌ها از نمونه شاهد بیشتر می‌باشد.

به طور کلی استفاده از لیگنین در مخلوط‌های آسفالتی روانی را به نسبت آسفالت پایه افزایش می‌دهد. این در حالی است که روند تغییرات روانی تا ۶ درصد لیگنین سیر صعودی دارد.

درصد فضای خالی مخلوط‌های آسفالتی با افزودن لیگنین نسبت به حالت پایه افزایش پیدا کرد که این اتفاق برای مناطق گرم‌سیر که حرارت باعث ایجاد قیرزدگی می‌شود مناسب است. به دلیل ناچیز بودن مقدار افزودنی‌ها وزن مخصوص نمونه‌های آسفالتی تغییر محسوسی ندارند. اما روند تغییرات وزن مخصوص با افزودن لیگنین تا ۶ درصد افزایش می‌یابد، سپس سیر نزولی پیدا می‌کند.

لیگنین در قیر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش مدول برجهنگی در همه دماها می‌شود که این اتفاق در دماهای بالا مناسب و در دماهای پایین یک نکته منفی محسوب می‌شود.

با توجه به این‌که لیگنین استخراج شده از لیکور سیاه، پساب زیستی کارخانه خمیر و کاغذ می‌باشد، لذا استفاده از آن علاوه بر بهبود خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی، موجب کاهش آلودگی‌های محیط زیستی و هم‌چنین ایجاد فرصتی جهت استفاده از مواد دور ریختنی می‌شود که در کشور ما به فراوانی یافت خواهد شد.

نتایج آزمون کشش غیرمستقیم بر مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با لیگنین، نشان از افزایش کشش غیرمستقیم نمونه‌ها تا ۶ درصد وزنی لیگنین می‌باشد سپس با اضافه شدن

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- X-Ray Photoelectron Spectroscopy
- 2- Dynamic Shear Rheometer
- 3- Bending Beam Rheometer
- 4- Fourier-Transform Infrared Spectroscopy
- 5- Rolling Thin-Film Oven
- 6- Rotational Viscosity
- 7- Highly Branched Poly (Ester-Amine)
- 8- Ultimate Tensile Strength
- 9- Scanning Electron Microscope
- 10- Empty Fruit Bunches
- 11- Penetration Index
- 12- Penetration Viscosity Number

۷- مراجع

- Christopher, M. P. O. Tuck, Eduardo Pérez, István T. Horváth, Roger A. Sheldon, (2012). Valorization of biomass: Deriving more value from waste. *Science* (80), Vol. 337, No. 695–699.
- McCready, N. and R. Williams (2008). Utilization of Biofuel Coproducts as Performance Enhancers in Asphalt Binder. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, Vol. 2051, 8–14.
- Pan, T., (2012). A first-principles based chemophysical environment for studying lignins as an asphalt antioxidant, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 36, 654–664.
- Rahimi, A. Ulbrich, J. J. Coon, and S. S. Stahl, (2014). Formic-acid-induced depolymerization of oxidized lignin to aromatics, *Nature*, Vol. 515, No. 7526, 249–252.
- Ragauskas, A. J. et al., (2014). Lignin valorization: Improving lignin processing in the biorefinery, *Science* (80), Vol. 344, No. 6185.
- Sain, A. , M., Suhara, P., Law, S. and Bloulooux, (1993). Interface modification and mechanical properties of natural fiber-polyolefin composite products. *Reinf. Plast. Compos.*, No., 121–130.
- SJÖSTRÖM, E. (1993). “Bark,” *Wood Chem*, 109–113.
- Sivasankarapillai, G. and A. McDonald, (2011). Synthesis and properties of lignin-highly branched poly (ester-amine) polymeric systems. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 13, No. 919–931.
- Stroup-gardiner, M., (1997). Relationships between rheological properties and morphology for polymer-modified asphalts, Ph.D, *University of Minnesota*.
- Tuck, C., E. Perez and et al, (2012). varolization of biomass: deriving more value from waste. *Science* (80), No. 695–699.
- Wang, H. and K. Derewecki (2017). rheological properties of asphalt binder partially substituted with wood lignin. *In Air Field & High Way Pavement*, 9–12.
- Xu, G., H. Wang, and H. Zhu, (2017). Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 151, 801–808.
- زارعی، علی (۱۳۹۴). بررسی تاثیر افزودن لیگنین و الباف شیشه بر عملکرد مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی گرم. پایان‌نامه، دانشگاه رازی کرمانشاه.
- کاظمی، سعید، ربیع، بهروز و یونسی، حامد (۱۳۹۰). استفاده از لیگنین کرافت به روش اختلاط حلال در ترکیب ماده مرکب آرد چوب-پلیپروپیلین نثریه شیمی و مهندسی شیمی ایران.
- نشریه ۲۳۴ (۱۳۹۰). آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران. معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور.
- Alexander, H., H. Alfredo, and B. Felipe (2015). Behavior of Gilsonite-Modified Hot Mix Asphalt by Wet and Dry Processes. *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 28, No. 2, 1–8.
- Albergo, R. , A. Ambrico, R. Balducci, O. Maccioni, S. Palazzo, and M. Trupo (2013). Produzione di bioetanolo da biomasse provenienti da siti di fitodepurazione nell' ambito del progetto FITOPROBIO. *ENEA*.
- ASTM D4123-82(1995). Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures (Withdrawn 2003).
- Asukar, S. , A. Behl, and P. J. Gundaliya (2008). The Utilization of Agriculturally Derived Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder,” *International Journal of Innovative Research in Technology*, Vol. 2, No. 12.
- Attaelmanan, M., C. P. Feng, and A. H. Ai, (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 25, No. 5, 2764–2770,.
- Aksoy, A., K. Şamlioglu, S. Tayfur, and H. Özen (2005). Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixturer. *Constr. Build. Mater*, Vol. 19, 11–18.
- Biofuels, O. (2011). A Chewy problem: The inedible parts of plants are feeding the next generation of biofuels. But extracting the energy-containing molecules is a challenging task, *Nature*.
- Batista, K. B. et al., (2018). High-temperature, low-temperature and weathering aging performance of lignin modified asphalt binders. *Ind. Crops Prod.*, Vol. 111, No. October, 107–116.

Evaluation of the Effect of Styrene Butadiene Rubber Latex on the Performance Characteristics of Semi Rigid Pavement

*Hamed Khani Sanij, Associate Professor, Department of Civil Engineering,
Yazd University, Yazd, Iran.*

*Ali Mohammad Montazeri, M.Sc., Graduate, Department of Civil Engineering,
Yazd University, Yazd, Iran.*

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science
and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

*Mohammad Mehdi Khabiri, Associate Professor, Department of Civil Engineering,
Yazd University, Yazd, Iran.*

E-mail: Rezvan.Babagoli1987@gmail.com

Received: April 2025- Accepted: November 2025

ABSTRACT

Road construction are usually done with three types of flexible, rigid, and semi rigid pavements. Despite all the advantages of these two types of flexible and rigid pavement, they have also some disadvantages. However, the new type of pavement, which is the main subject of this thesis, has been used in recent years. This pavement is known as the semi-rigid pavement (SRP), where the surface consists of semi-flexible materials that can provide some of the best features of flexible and rigid pavement. Semi-rigid pavement, generally known as a grouted macadam, includes an open-graded asphalt structure with 25 to 35 percent voids in which a cementitious slurry is used. The main purpose of this thesis is to investigate the effect of SBR latex on the performance characteristics of semi-rigid pavement. To do this, the porous asphalt design was first required. The optimum bitumen content of porous asphalt was calculated to be 3.974 %. The next step was to determine the properties of the cement slurry and to calculate the optimal W/C ratio. Sixteen types of semi-rigid pavements specimens were made in Marshall molds and cement slurry injection was performed. Then, the Marshall Stability Test, the resilient modulus and Cantabro loss were carried out. The results showed that the use of latex SBR in bitumen porous asphalt improves the properties of semi-rigid pavement. The use of SBR latex in cement slurry increased the resilient modulus both in the long time and in the short time, but reduced the amount of marshal stability and adhesion between aggregates in the short time.

Keywords: Semi-Rigid Pavement, Porous Asphalt Mixture, Cement Slurry, SBR Latex, Performance Tests