

# یادداشت پژوهشی

## ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد پلیمری با بکارگیری قیر لاستیکی

امیر کاووسی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
حسن تقوی زواره، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
مهدی آذرنیا، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۱۷ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۳۰

### چکیده

همه ساله بسیاری از راه‌های آسفالتی کشور در اثر ضعف لایه‌های روسازی‌های آسفالتی و فشارهای ترافیکی دچار آسیب یا خرابی زودرس می‌شوند. از خرابی‌هایی که بسیار گسترده است، خرابی‌های ناشی از حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. با توجه به نقش مثبت گوگرد پلیمری در افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی، در این پژوهش نقش افزودنی گوگاس که نمونه‌ای از افزودنی گوگرد پلیمری است، بر پدیده عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با جایگزینی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد قیر با این افزودنی به بررسی چگونگی مقاومت آسفالت‌های حاوی گوگاس در برابر رطوبت و عریان‌شدگی پرداخته شده است. با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO-T283) مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در شرایط اشباع و خشک به دست آمده و با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان دادند که استفاده از این افزودنی به خودی خود، باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر عریان‌شدگی نشده و برای این هدف لازم است اقدامی صورت گیرد که در این تحقیق از قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک استفاده شد. در این راستا پس از بررسی نتایج آزمایش‌های متداول ترکیبات قیر و پودر لاستیک، مقدار بهینه ۲۰ درصد برای تهیه مخلوط تعیین گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که استفاده از قیر لاستیکی باعث بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد پلیمری (گوگاس) در برابر عریان‌شدگی به میزان حدود ۱۵ درصد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی داغ، گوگرد پلیمری، پودر لاستیک، حساسیت رطوبتی، مقاومت کششی غیرمستقیم

## ۱. مقدمه

استفاده از گوگرد<sup>۱</sup> به منظور بهبود کیفیت آسفالت از سال‌ها قبل (سال ۱۹۷۰ میلادی به بعد) توسط شرکت‌های بزرگ نفتی همچون شرکت شل شناخته شده بود [Timm et.al. 2011]. مشکل بزرگ مصرف گوگرد، متصاعد شدن گاز سولفید هیدروژن (H<sub>2</sub>S) است که این گاز می‌تواند در چند دقیقه سبب مرگ انسان شود [Weber, 2003]. ایده برطرف سازی این مشکل مبنای مطالعات و تحقیقات گسترده در زمینه ایجاد تغییر وضعیت گوگرد و تبدیل آن به مواد ترکیب شده از گوگرد با افزودنی‌های خاص گردید، به طوری که این افزودنی‌ها در شرایط تهیه مخلوط آسفالت و حمل و پخش آن عاری از هرگونه بخارهای مضر باشند.

محصول گوگرد پلیمری به عنوان افزودنی اصلاح‌کننده آسفالت کاربرد داشته و می‌تواند به نسبت های توصیه شده در ترکیب آسفالت جایگزین قیر شود. تاثیر مستقیم این افزودنی‌ها در آسفالت، بالا بردن مقاومت آسفالت، افزایش سختی مخلوط، کاهش شیارشدگی، صرفه جویی در مصرف قیر و انرژی، کاهش هزینه‌ها است [Strickland et.al. 2008]. محصول گوگاس<sup>۲</sup> یک اصلاح‌کننده پایه گوگردی بوده که از ترکیب گوگرد با افزودنی‌های پلیمری به دست می‌آید.

گوگرد پلیمری علاوه بر کاهش میزان قیر خالص موردنیاز برای یک مخلوط آسفالتی مفروض، می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای ویژگی‌های عملکردی مخلوط را تغییر دهد. بارزترین تاثیر افزودن گوگرد پلیمری به یک مخلوط آسفالتی افزایش در سختی مخلوط است. افزایش در سختی این مخلوط‌ها، افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل‌های دائمی را نیز به دنبال دارد. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که افزایش در مقدار درصد گوگرد پلیمری به همان نسبت مقاومت مارشال مخلوط‌ها را افزایش می‌دهد [Strickland et.al. 2008]. مطالعات نشان داده که افزودن گوگرد پلیمری هم مقاومت کششی مرطوب و هم مقاومت خشک آسفالت را کاهش

می‌دهد که مقاومت مرطوب نسبت به مقاومت خشک بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرد. گوگرد مدول برجهندگی Mr مخلوط را افزایش می‌دهد. بر مبنای آزمایش خستگی به صورت تنش کنترل شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، گوگرد عمر خستگی را تا حدودی کاهش داده است [Stuart, 1990]. مطالعات صورت گرفته همچنین نشان داد که گوگرد پلیمری باعث کاهش پارامتر TSR<sup>۳</sup> در حدود ۱۰ درصد می‌گردد. نتایج آزمایش مسیر چرخ که برای ارزیابی حساسیت رطوبتی و شیارشدگی است، نیز بیانگر این موضوع است. استریکلند و همکاران یک کاهش پنج درصدی در عمرخستگی را نسبت به مخلوط آسفالتی معمولی گزارش داده‌اند. اما این مقدار کاهش به قدری نبود که برای اهداف روسازی مضر باشد [Strickland et.al. 2008]. در سالهای اخیر تلاشهای گسترده‌ای برای بهبود خواص مکانیکی مخلوطهای آسفالتی و کاهش میزان عریان شدگی آنها انجام شده است. برای کاهش این خرابی از افزودنی‌هایی نظیر آهک هیدراته، سیمان، آمین‌ها و مواد پلیمری استفاده شده است. با توجه به مشکلات زیست محیطی انباشت گوگرد و لاستیک‌های ضایعاتی و هزینه کم تولید گوگرد و پودر لاستیک، استفاده از این دو ماده به عنوان مواد افزودنی بهبود دهنده خواص قیر و مخلوط آسفالتی مورد توجه محققین قرار گرفته است. نتایج گزارش‌ها نشان‌دهنده بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط آسفالتی است. استفاده از پودر لاستیک به عنوان اصلاح‌کننده در مخلوط‌های آسفالتی از سال ۱۸۴۰ با معرفی لاستیک خام آغاز گردید. هدف از ترکیب پودر لاستیک با قیرهای خالص، اصلاح رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی و کاهش آلودگی زیست محیطی بود [Hicks, 2002]. در دهه ۱۹۶۰ در سوئد استفاده از پودر لاستیک به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی جهت مقابله با خرابی‌های آسفالت در شرایط آب و هوای سرد آغاز گردید که به روش خشک معروف است. همزمان، در آمریکا روشی ابداع شد که در آن قیر و پودر لاستیک ابتدا به مدت ۴۵ تا ۶۰ دقیقه در

## ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد پلیمری با بکارگیری قیر لاستیکی

دمای بالا ترکیب می‌شوند که به "روش تر" معروف است [Presti, 2013]. نتایج تحقیقات صورت گرفته در دهه‌های اخیر بیانگر بهبود خرابی‌های ترک‌خوردگی، خستگی، شیارشدگی، افزایش ویسکوزیته و افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی است [Lee et.al. 2008]. ژائو و همکاران در بررسی نقش توام پودرلاستیک و آسفالت بازیافتی در حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نشان دادند که استفاده از پودرلاستیک، کاهش خرابی ناشی از رطوبت را به همراه دارد [Xiao and Amirkhanian, 2007]. در پژوهشی که در سال ۲۰۰۹ انجام گرفت، بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی SBS و EVA گزارش گردید [Gorkem and Sengoz, 2009].

### ۲. حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی

حساسیت رطوبتی<sup>۱</sup> آسفالت یا به عبارت دیگر ایجاد خرابی عریان‌شدگی در آسفالت، کاهش چسبندگی بین بخش چسباننده (ترکیب قیر و فیلر) و سطح سنگدانه‌ها است. کاهش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی، تکرار بارهای ترافیکی و نفوذ رطوبت به درون لایه رویه در زمان بهره‌برداری همگی می‌توانند منجر به کاهش مقاومت و چسبندگی مخلوط آسفالتی شوند [Epps et.al. 2000]. پدیده عریان‌شدگی در آسفالت هنگامی رخ می‌دهد که چسبندگی بین مصالح سنگی و قیر ضعیف شده و یا از بین برود. عموماً خرابی‌های ناشی از رطوبت تحت اثر شش مکانیزم انفصال<sup>۱۱</sup>، جابجایی<sup>۱۲</sup>، امولسیون شدن قیر<sup>۱۳</sup>، فشار منفذی<sup>۱۴</sup>، گسیختگی لایه‌های نازک قیر<sup>۱۵</sup> و آب‌شستگی<sup>۱۶</sup>

است [Xiao and Amirkhanian, 2007].

عامل اصلی پدیده عریان‌شدگی ضعف زهکشی و حضور مکرر آب در مخلوط آسفالتی است که به همین دلیل به این پدیده خرابی ناشی از رطوبت یا حساسیت رطوبتی نیز اطلاق می‌شود. براساس مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که اثرات مخرب رطوبت، منجر به کاهش مدول آسفالت، افزایش شیارشدگی و نیز افزایش خرابی‌های ناشی از خستگی می‌شود [Mehrra and Khoadii, 2013]. در راستای بهبود این خرابی، می‌توان از افزودنی‌هایی که باعث افزایش ویسکوزیته و چسبندگی بیشتر قیر به مصالح سنگی می‌شوند استفاده نمود. از جمله این افزودنی‌ها می‌توان به پودرلاستیک اشاره کرد که پس از ترکیب با قیر، زنجیره پیوسته مولکول‌های هیدروکربنی، تشکیل پیوند عرضی و ۳ گانه می‌دهد که موجب افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی می‌شود [Yildirim, 2007].

### ۳. مواد و آزمایش‌ها

#### ۳-۱ مصالح سنگی

سنگدانه‌های استفاده شده برای ساخت آسفالت از یک معدن تولید آسفالت گرم در استان یزد انتخاب شدند. خصوصیات مصالح و نتیجه آزمایش XRF آنها به طور خلاصه در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. نتایج XRF مصالح، حاکی از آن است که درصد سیلیس مصالح نسبتاً ناچیز بوده و بالعکس درصد CaO آن زیاد است (۴۵/۱۳٪). به این دلیل شاید بتوان این مصالح را در رده مصالح آهکی دسته‌بندی نمود. برای انجام این تحقیق از دانه‌بندی شماره ۴ دانه بندی‌های

جدول ۱. نتایج آزمایش XRF فیلر مصالح سنگی مورد استفاده

| عناصر | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO   | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Sr    | SO <sub>3</sub> | در اثر حرارت | درصد افت وزنی |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------|-------------------|-------------------------------|-------|-----------------|--------------|---------------|
| (٪)   | ۷/۰۴۳            | ۱/۷۵۷                          | ۰/۵۸۷                          | ۴۵/۱۳ | ۰/۶۴۹ | ۰/۲۷۷            | ۱/۹۸۴             | ۰/۱۲۷                         | ۰/۰۳۳ | ۰/۳۹۸           |              | ۴۴            |

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

| شرح          | سایش به روش<br>لس آنجلس<br>(درصد) | افت وزنی ناشی از<br>سولفات سدیم (درصد) | درصد شکستگی | ارزش ماسه ای<br>(درصد) | وزن مخصوص حقیقی<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------------|-----------------------------------|----------------------------------------|-------------|------------------------|-----------------------------------------|
| روش آزمایش   | ASTM C131                         | ASTM C88                               | ASTM D 5821 | ASTM D2419             | ASTM C127                               |
| نتایج آزمایش | ۲۰                                | ۸                                      | ۱۰۰         | ۷۰                     | ۲/۴۶                                    |

جدول ۳. دانه بندی منتخب مصالح سنگی مطابق نشریه ۲۳۴

| اندازه الک                | ۱۹ میلی متر | ۱۲/۵ میلی متر | شماره ۴ | شماره ۸ | شماره ۵۰ | شماره ۲۰۰ |
|---------------------------|-------------|---------------|---------|---------|----------|-----------|
| محدوده درصد عبوری مجاز    | ۱۰۰         | ۹۰-۱۰۰        | ۴۴-۷۴   | ۲۸-۵۸   | ۵-۲۱     | ۲-۱۰      |
| درصد وزنی عبوری از هر الک | ۱۰۰         | ۹۵            | ۵۹      | ۴۳/۵    | ۱۱/۵     | ۶         |

پیوسته آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (نشریه ۲۳۴) استفاده شده است. در جدول ۳ دانه بندی و محدوده مربوط به دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه ریزی، نشان داده شده است.

### ۲-۳ پودر لاستیک

پودر لاستیک استفاده شده در این تحقیق از کارخانه یزد تایر تهیه گردیده است. پودر لاستیک مورد نظر از تایرهای ضایعاتی خودرو سواری و خودرو سنگین بوده و از فرآیند خرد کردن در دمای محیط تولید شده است. آنچه در بحث فنی و کیفی پودر لاستیک حائز اهمیت است میزان براده آهن و میزان رطوبت موجود در آن است که مطابق استانداردهای فنی گزارش شده توسط مراکز تحقیقاتی قیر و آسفالت مقدار براده آهن و رطوبت آن باید به ترتیب کمتر از ۱/۰ درصد و ۷۵/۰ درصد وزنی باشد. در جدول ۴ دانه بندی پودر لاستیک مورد استفاده نشان داده شده است. از آنجا که بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه استفاده

از پودر لاستیک در کشور آمریکا صورت گرفته است، چندین دانه بندی توسط موسسات تحقیقاتی ایالت های آمریکا داده شده است. با توجه به محدود بودن دانه بندی های عرضه شده توسط شرکت های تولید کننده پودر لاستیک در داخل کشور سعی گردیده معیار کلی استفاده از دانه بندی پودر لاستیک (کوچکتر از ۶/۰ میلیمتر) رعایت گردد.

### ۳-۳ قیر

قیر مورد استفاده، قیر ۶۰ ۷۰- پالایشگاه اصفهان بود که مشخصات اصلی آن مطابق جدول ۵ است.

### ۴-۳ قیر اصلاح شده با پودر لاستیک

قیر لاستیکی استفاده شده در این تحقیق به روش تر تهیه گردیده که به صورت ترکیبی از قیر، پودر لاستیک، روغن های روان کننده و مواد افزودنی خاص است که باید در دما و زمان کافی باهم واکنش دهند. جهت تهیه قیر لاستیکی از دستگاه

جدول ۴. دانه بندی پودر لاستیک مورد استفاده در این پژوهش

| اندازه الک                | شماره ۲۰ | شماره ۴۰ | شماره ۵۰ | شماره ۱۰۰ | شماره ۲۰۰ |
|---------------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| درصد وزنی عبوری از هر الک | ۱۰۰      | ۹۰       | ۷۴/۵     | ۲۳/۱      | ۲         |

# ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد پلیمری با بکارگیری قیر لاستیکی

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های قیر خالص مورد استفاده

| شرح          | درجه نفوذ<br>(۰/۱۰ میلی‌متر) | نقطه نرمی قیر<br>(درجه سانتی‌گراد) | قابلیت کشسانی در ۲۵<br>درجه سانتی‌گراد<br>(سانتی‌متر) | وزن مخصوص قیر<br>(گرم بر سانتی‌متر<br>مکعب) |
|--------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| روش آزمایش   | ASTM D5                      | ASTM D36                           | ASTM D113                                             | ASTM D3289                                  |
| نتایج آزمایش | ۶۴/۵                         | ۴۹                                 | +۱۰۰                                                  | ۱/۰۱۸                                       |

برای این منظور ۲۱ نمونه با درصدهای مختلف قیر (۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۵/۶ درصد) تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. میزان قیر بهینه برای مصالح سنگی براساس مندرجات نشریه شماره ۱۰۱ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور و پیشنهادات نشریه MS-2 انستیتو آسفالت، با توجه به درصد قیر نظیر فضای خالی ۴/۵ درصد برابر ۴/۳ درصد تعیین شد. برای سنجش مقایسه‌ای نتایج نمونه‌های آزمون کشش غیرمستقیم، درصد قیر یکسان ۴/۳ درصد برای ساخت تمامی نمونه‌ها در نظر گرفته شد. سپس با توجه به رابطه‌ی ۱، درصد قیر گوگردپلیمری مورد نیاز برای ساخت نمونه‌های آسفالت گوگردپلیمری و آسفالت گوگردپلیمری-لاستیکی به‌دست آمد. در این رابطه فرض بر این است که با جایگزین شدن بخشی از قیر با گوگردپلیمری پارامترهای حجمی مخلوط تغییر نکند [Kandhal, 1982 and Strick-land et al. 2008].

مخلوط‌کن برشی سریع ساخته‌شده در مرکز تحقیقات روسازی دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. قیر و پودر لاستیک به مدت ۶۰ دقیقه، در سرعت چرخشی rpm ۵۰۰۰ و شرایط کنترل دمایی ۱۷۵ درجه سانتیگراد در دستگاه مخلوط‌کن با هم ترکیب شدند. دلیل بالا بودن زمان واکنش، سطح ویژه زیاد و شکل نامنظم پودر لاستیک است. نتایج آزمایش‌ها برای قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک در جدول ۶ نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک دارای درجه نفوذ کمتر، نقطه نرمی بیشتر و وزن مخصوص بیشتری نسبت به قیر خالص است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها صورت گرفته روی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک جدول ۶، قیر اصلاح‌شده با ۲۰٪ پودر لاستیک به عنوان ترکیب بهینه قیر و پودر لاستیک در نظر گرفته شد.

## ۴. طرح اختلاط

برای تعیین درصد قیر بهینه مخلوط‌ها، نمونه‌های مارشال مطابق روش استاندارد "ASTM D1559" ساخته شدند.

$$P_{SA} = \frac{10000A.R}{10000R - 100P_S(R-1) + A.P_S(R-1)} \quad (۱)$$

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک

| نوع آزمایش            | درجه نفوذ (۰/۱۰ میلی‌متر) | نقطه نرمی قیر (درجه سانتی‌گراد) | قابلیت کشسانی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی‌متر) | وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتی‌متر مکعب) |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|
| نمونه                 |                           |                                 |                                                 |                                       |
| قیر + ۱۴٪ پودر لاستیک | ۶۲                        | ۵۶                              | ۱۶/۳                                            | ۱/۰۸                                  |
| قیر + ۱۶٪ پودر لاستیک | ۵۸/۷                      | ۵۹                              | ۱۴/۵                                            | ۱/۱                                   |
| قیر + ۱۸٪ پودر لاستیک | ۵۳/۵                      | ۶۳                              | ۱۲٫۴                                            | ۱/۱۳                                  |
| قیر + ۲۰٪ پودر لاستیک | ۴۶                        | ۶۷                              | ۱۱                                              | ۱/۱۸                                  |

در این رابطه:

$PSA = \text{درصد قیرمکمل گوگردی}$ ،  $A = \text{درصد قیربهنه}$ ،  $R = \text{نسبت}$

$\text{وزن مخصوص گوگردپلیمری به قیر}$ ،  $S = \text{درصد وزنی گوگردپلیمری}$

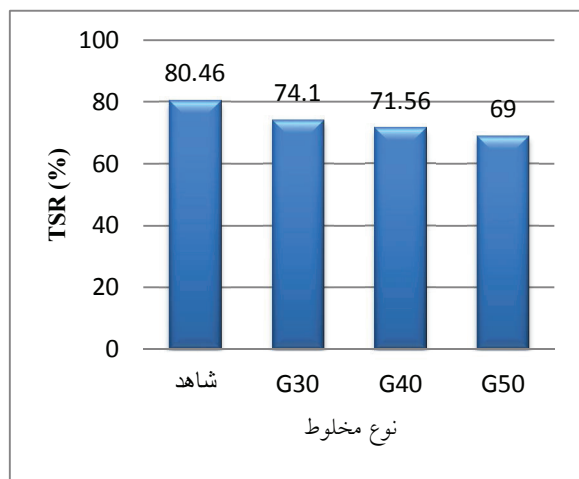
در ماده چسباننده (قیر و گوگرد).

## ۵. نتایج آزمایش‌ها

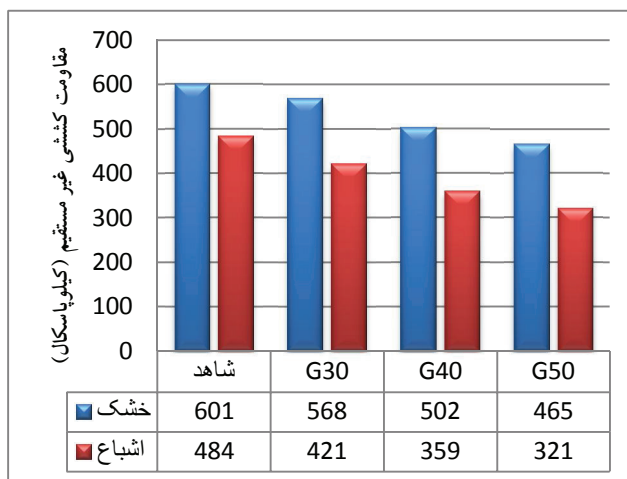
در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر افزودنی گوگاس و قیر لاستیکی بر عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی از گوگاس در مقادیر ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزن حجمی قیر و ۲۰ درصد پودرلاستیک استفاده شد. اگرچه افزودن گوگاس به مخلوط

آسفالتی با روشهای گوناگونی امکان‌پذیر است، در این تحقیق از روش اختلاط خشک برای افزودن گوگاس استفاده شد.

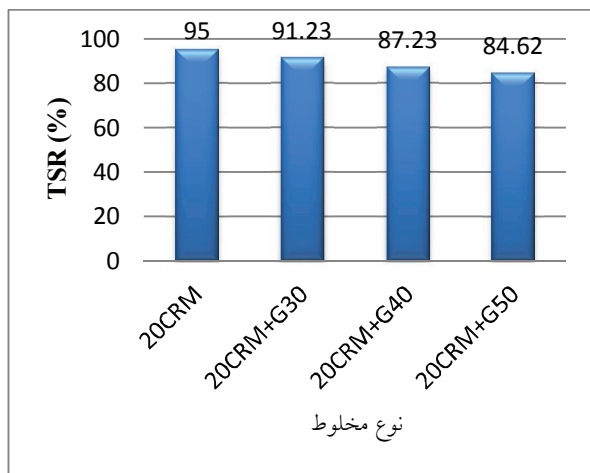
با توجه به نتایج آزمایش مارشال و پس از دستیابی به درصد قیر بهینه، ۶ نمونه مخلوط آسفالت شاهد و ۱۸ نمونه مخلوط آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف گوگردپلیمری بر اساس استاندارد AASHTO T283 تهیه شدند. از حاصل تقسیم مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک، نسبت TSR به دست می‌آید که شاخصی مؤثر برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد.



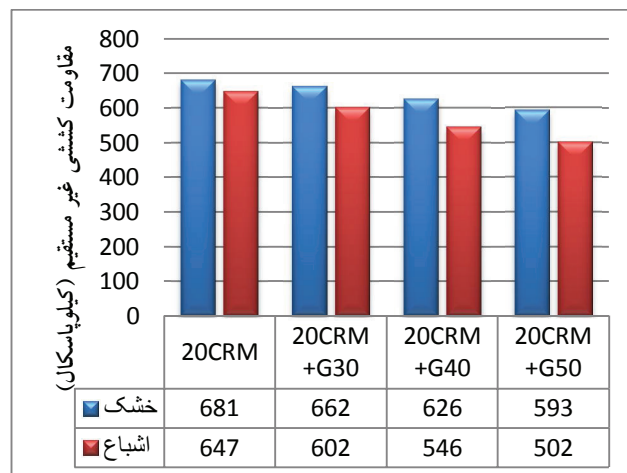
شکل ۲. نتایج TSR مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف گوگاس



شکل ۱. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصد‌های مختلف گوگاس



شکل ۴. نتایج TSR مخلوط آسفالتی گوگاسی با قیر لاستیکی



شکل ۳. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم روی مخلوط آسفالتی گوگاسی با قیر لاستیکی

## ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی حاوی گوگرد پلیمری با بکارگیری قیر لاستیکی

خشک بیشتر تحت تاثیر قرار گرفته یا به عبارتی نرخ کاهش مقاومت در حالت مرطوب به مراتب بیشتر از حالت خشک است که موجب افزایش حساسیت رطوبتی و کاهش پارامتر TSR نسبت به نمونه شاهد می‌گردد.

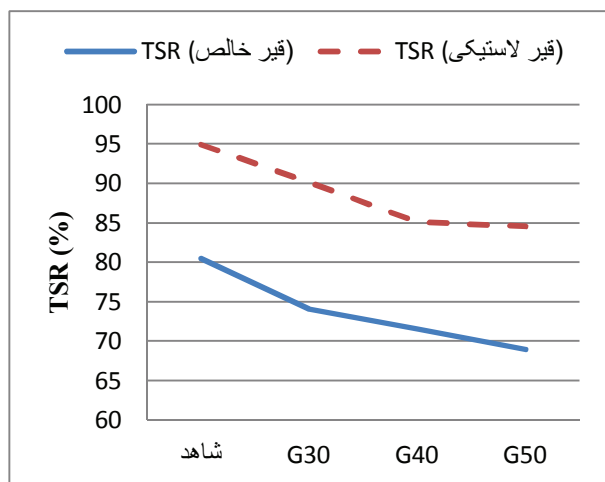
مقدار پارامتر TSR برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد گوگاس کاهشی به ترتیب در حدود ۶، ۹ و ۱۱ درصد را نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد (بدون گوگاس) نتیجه می‌دهد. این امر به این مفهوم است که شاید نتوان از این محصول به تنهایی برای اصلاح مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرد. علت کاهش، درصدی از قیر است که با گوگاس جایگزین شده و در مخلوط حل نشده و به صورت کریستال باقی می‌ماند که مانع از چسبندگی خوب قیر به مصالح می‌شود و در نتیجه در برابر نفوذ آب و شرایط اشباع در دمای میانی محیط (که آزمایش کشش غیر مستقیم نیز در آن دما انجام می‌گردد) و در دمای پایین محیط به صورت کاملاً جامد شده و نقش چسبندگی و ویسکوز خود را از دست می‌دهد. بکارگیری قیرلاستیکی اختلاف مقاومت کششی نمونه‌های حاوی گوگرد پلیمری را در شرایط خشک و اشباع کاهش می‌دهد که اثر این امر در افزایش پارامتر TSR نسبت به نمونه‌های ساخته شده با قیر خالص دیده می‌شود. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم برای نمونه شاهد و نمونه‌های

نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

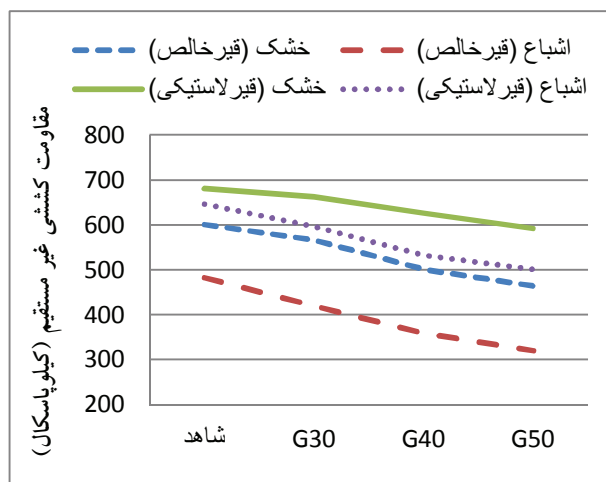
در ادامه جهت بهبود حساسیت رطوبتی نمونه‌های ساخته شده از قیر لاستیکی به عنوان جایگزین قیر خالص مخلوط استفاده شد و ۶ نمونه مخلوط شاهد و ۱۸ نمونه مخلوط آسفالتی گوگردپلیمری حاوی پودرلاستیک تهیه گردید. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم برای شرایط خشک و اشباع نمونه‌های اصلاح شده با پودرلاستیک در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

### ۶. تحلیل نتایج

با توجه به نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده دیده می‌شود که افزودن گوگردپلیمری (گوگاس) مقاومت کششی مخلوط را در شرایط خشک و اشباع در نمونه‌های ساخته شده با قیر و قیر لاستیکی کاهش می‌دهد، به طوری که نمونه قیرلاستیکی دارای بیشترین مقاومت کششی است. مقاومت کششی برای مصالح منتخب با ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد گوگاس به ترتیب کاهشی در حدود ۵، ۱۶ و ۲۲ درصد در شرایط خشک و کاهشی در حدود ۱۲، ۲۵ و ۳۳ درصدی در شرایط اشباع نسبت به نمونه شاهد در قیر خالص داشت. شکل ۵ نشان می‌دهد که مقاومت مرطوب نسبت به مقاومت



شکل ۴. نتایج TSR انواع مختلف مخلوط آسفالتی



شکل ۵. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم روی انواع مختلف مخلوط آسفالتی

گوگاسی ساخته شده با قیر اصلاح شده با پودر لاستیک نشان می دهد که افزودن پودر لاستیک حساسیت رطوبتی را کاهش می دهد.

مقدار پارامتر TSR به ترتیب برای نمونه شاهد، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد گوگاس، افزایش حدود ۱۶، ۱۷، ۱۶، ۱۵ درصدی را نسبت به حالت استفاده از قیر خالص نشان می دهد. نقش مثبت قیر لاستیکی را می توان در بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی قیر دانست. در طی واکنش قیر و پودر لاستیک، بخشی از مواد روغنی قیر توسط پودر لاستیک جذب شده و باعث افزایش ویسکوزیته و چسبندگی قیر می گردد. ژل تشکیل شده از پودر لاستیک و قیر، موجب قرارگیری غشای سخت و چسباننده اطراف مصالح سنگی شده که موجب مقاومت بیشتر مخلوط در برابر حضور مکرر آب می گردد. شکل ۶ نشان می دهد که مخلوط های ساخته شده از قیر خالص حاوی گوگاس معیار حساسیت رطوبتی آیین نامه ( $TSR \leq 75\%$ ) را تامین نمی کند. با جایگزینی قیر خالص با قیر لاستیکی تمامی نمونه های ساخته شده با گوگاس در محدوده مشخصه آیین نامه قرار گرفتند.

## ۷. ملاحظات اقتصادی

مزایای بالقوه اقتصادی کاربرد گوگاس در مخلوط آسفالتی عبارت است از ۱- ذخیره و صرفه جویی در مصالح و ۲- ارتقا و بهبود قابل ملاحظه ویژگی های مخلوط های روسازی و متعاقباً عملکرد بهتر روسازی. با استفاده از گوگاس به طور متوسط در حدود ۲۰ درصد، در مصرف قیر صرفه جویی می شود. علاوه بر قیر مصرفی ممکن است در سنگدانه ها نیز صرفه جویی وجود داشته باشد، زیرا مخلوط های گوگرد پلیمری به سنگدانه های معمولی اجازه می دهند تا با مصالح ارزان و کم قیمت جایگزین شوند. استفاده از مخلوط های گوگرد پلیمری با توجه به برآورد ویژگی های بهتر و بالاتر نسبت به مخلوط های آسفالت معمولی می تواند مزایای اقتصادی قابل ملاحظه داشته باشد. ارزیابی ملاحظات اقتصادی استفاده از گوگرد پلیمری علاوه بر موارد

مذکور ذخیره انرژی را نیز شامل می شود. افزودن گوگرد پلیمری باعث کاهش گرانی قیر شده و بنابراین این مخلوط ها می توانند در دماهای پایین تر تهیه، مخلوط و متراکم شوند که در نتیجه کاهش حدود ۳۰ درصدی مصرف سوخت را موجب می شود. از آنجا که افزودنی پودر لاستیک نیز جایگزین قیر می شود امکان ذخیره قیر و حتی صادرات آن فراهم می گردد. از سوی دیگر این افزودنی قیمتی کمتر از قیر دارد در بحث تهیه قیر لاستیکی، از آنجایی که پودر لاستیک به روش تر در مخلوط استفاده شده است، در پایلوت آزمایشگاهی با توجه به هزینه استفاده از مخلوط کن برشی و هزینه انرژی به صرفه نخواهد بود، اما در شرایط استفاده در پروژه، این هزینه برگشت پذیر بوده و موجب صرفه جویی اقتصادی می شود. بنابراین علاوه بر بهبود پارامترهای مکانیکی و مهندسی قیر و مخلوط آسفالتی می توان صرفه اقتصادی این دو افزودنی را به دلیل کمتر بودن قیمت این دو افزودنی نسبت به قیر، و کاهش مصرف قیر را هم مد نظر قرارداد.

## ۸. نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا نقش درصد های مختلف گوگاس روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی شاهد توسط آزمایش کشش غیرمستقیم بررسی گردید. در ادامه با افزودن پودر لاستیک و اصلاح قیر خالص به بررسی نقش قیر اصلاح شده در حساسیت رطوبتی پرداخته شد که نتایج زیر حاصل گردید:

- افزودن گوگرد به مخلوط آسفالتی منجر به کاهش مقاومت کششی آسفالت می شود.
- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داد که افزودن گوگاس به مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر خالص موجب افزایش حساسیت رطوبتی می گردد و تمامی نمونه ها دارای TSR کمتر از ۷۵ درصد هستند.
- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان می دهد که افزودن گوگاس کاهش مقاومت کششی را هم در حالت خشک و هم اشباع به همراه دارد.

sign", Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.

- Gorkem, C. and Sengoz, B. (2009) "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime", Construction and Building Materials, 23, pp. 2227-2236.

- Hicks, R. G. (2002) "Asphalt rubber design and construction guidelines", California Integrated Waste Management Board, Vol. 1. Design guidelines.

- Kandhal, P. (1982) "Evaluation of sulfur extended asphalt binders in bituminous paving mixtures", Journal of the Association of Asphalt Pavement Technology, 51, pp. 189-222.

- Lee, S., Akisetty, K. and Amirkhanian, N. (2008) "The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements", Journal of Construction and Building Material, 22, pp. 1368-1375.

- Mehrara, A. and Khodaii, A. (2013) "A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete", Construction and Building Materials, 38, pp. 423-442.

- Presti, D. (2013) "Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review", Construction and Building Materials, 49, pp. 863-881.

- Strickland, D., Colange, J., Martin, M. and Deme, I. (2008) "Performance properties of sulfur Extended Asphalt Mixtures with Modified Sulfur Pellets". ISAP.

- Stuart, K. (1990) "Performance evaluation of sulfur-extended asphalt pavements - Laboratory evaluation", FHWA-RD-90-110.

- Timm, D. H., Robbins, M. M., Willis, J. R., Tran, N. and Taylor, A. J. (2011) "Evaluation of mixture performance and structural capacity of pavements using shell Thiopave: Phase II - Construction, laboratory evaluation, and full-scale testing of Thiopave test sections - one year report", Report 11-03, National Center for Asphalt Technology, Auburn University,

- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم برای نمونه‌ی شاهد و نمونه‌های گوگاسی اصلاح شده با قیرلاستیکی نشان می‌دهد که افزودن پودرلاستیک موجب کاهش حساسیت رطوبتی می‌شود. - مقایسه نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می‌دهد که افزودن پودر لاستیک باعث کاهش اختلاف مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع می‌شود.

- تمامی نمونه‌های ساخته شده با قیرلاستیکی دارای TSR بالای ۷۵ درصد هستند.

نتایج ذکر شده در بالا نشان می‌دهد که استفاده از گوگاس موجب افزایش حساسیت رطوبتی می‌شود. بنابراین توصیه می‌شود که در مناطقی که مشکل عریان شدگی مصالح وجود دارد، از مواد ضدعریان‌شدگی نظیر پودرلاستیک استفاده شود.

## ۹. پی‌نوشتها

1. Sulfur
2. Googas
3. Stripping
4. Tensile Strength Ratio
5. Crumb rubber
6. Charles Goodyear
7. Thomas Hancock
8. Vulcanization
9. Mc Donald
10. Moisture susceptibility
11. Detachment
11. Displacement,
12. Emulsification
13. Pour water pressure
14. Bitumen-aggregate interfacial
15. Hydraulic scoring

## ۱۰. مراجع

- AASHTO T-283(2007) "Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage", USA: American Association of State Highway and Transportation Officials

- Epps, J. A., Sebaaly, J. P., Maher, M. R. and McCann, M. B. (2000) "Compatibility of a test for moisture-induced damage with Superpave volumetric mix de-

- Weber, H. (2003) "Sulphur- asphalt and its global aspects", Sulphur Institute, 19th Sulphur Phosphate Symposium,.
- Xiao, F. and Amirkhanian, S. (2007) "Laboratory investigation of moisture damage in rubberized asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement", International Journal of Pavement Engineering, 21, pp. 958-964.
- Yildirim ,Y. (2007) "Polymer modified asphalt binders", Construction and Building Materials, 21,pp.66-72.

