

ارائه مدل پیش بینی مدول مرکب برشی (G^*) و زاویه فازی (δ) قیر تحت اثر فرسودگی

حسین قاسم زاده طهرانی، دانشجوی دکتری راه ترابری دانشگاه تربیت مدرس
ابوالفضل حسینی (نویسنده مسئول)، دانشیار گروه راه و ترابری دانشگاه تربیت مدرس

Email: hassani@modares.ac.ir

چکیده

فرسودگی قیر یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است که آثار آن به صورت افزایش سختی و کاهش شکل‌پذیری قیر ظاهر می‌شود. فرآیند فرسودگی قیر ناشی از تغییراتی است که در نوع و اندازه مولکول‌های بسیار متنوع هیدروکربنی قیر اتفاق می‌افتد و در دو مرحله شامل فرسودگی کوتاه‌مدت و فرسودگی درازمدت قابل بررسی است. در این مقاله یک رابطه رگرسیون بر اساس داده‌های $LTPP$ ارائه شده است که قادر است مقادیر مدول مرکب برشی قیر (G^*) و زاویه فازی قیر (δ) را در طول زمان بهره‌برداری از راه، محاسبه نماید. این رابطه بر اساس اطلاعات مربوط به ده نوع قیر متفاوت تهیه شده است. با استفاده از مدل پیشنهادی، با یک‌بار آزمایش DSR روی قیر اولیه و در یک دمای مشخص، می‌توان نتایج این آزمایش را روی قیر فرسوده پس از مدت زمان دلخواه و در هر دمایی محاسبه نمود. این مدل نشان می‌دهد که بیشترین شدت فرسودگی قیر در سه سال اول اتفاق می‌افتد. همچنین سخت‌شدگی ناشی از فرسودگی در دمای کمتر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد کاملاً مشهود است اما در دمای بیش از آن تفاوت معنی‌داری بین قیر اولیه و قیر فرسوده دیده نمی‌شود. دقت این مدل برای برآورد رفتار درازمدت قیر و استفاده در مدل‌های پیش‌بینی خرابی روسازی قابل قبول است.

واژه‌های کلیدی: فرسودگی قیر، مدول مرکب برشی، زاویه فازی قیر، مدلسازی، روسازی آسفالتی.

۱. مقدمه

موج کوتاه نور آفتاب، شدت بیشتری می‌یابد. در این تحقیق درصد اکسیژن موجود در نمونه‌های حاصل از سیزده سایت مختلف در زمان ساخت، یک سال پس از ساخت و دو سال پس از ساخت اندازه‌گیری شده و معلوم گردید که افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقدار اکسیژن اتفاق افتاده است. این اندازه‌گیری‌ها از ۴۳ تا ۱۷۵ درصد افزایش در درصد اکسیژن را طی دو سال نشان می‌دهند [۲]. به طور دقیق‌تر می‌توان گفت که فرسودگی قیر به یکی از دلایل زیر اتفاق می‌افتد: اکسیداسیون، تبخیر حلال‌ها، زمان (تغییر ساختار شیمیایی)، پلیمریزاسیون ناشی از نور (نور مستقیم، نور انعکاسی) و پلیمریزاسیون ناشی از گرما [۳].

با شروع پروژه^۲ SHRP تلاش‌های زیادی صورت گرفت تا بین خصوصیات فیزیکی قیر با فرمول شیمیایی آن ارتباط برقرار شود. هرچند این تلاش‌ها به نتیجه دلخواه اولیه منجر نشد، اما نکات مبهم بسیاری را درباره ساختار قیر و عوامل مؤثر بر رفتار آن به خوبی آشکار نمود. در این زمینه ابتدا فرمول شیمیایی هر یک از مواد و اجزای تشکیل‌دهنده قیر تهیه شد که لیست بسیار متنوعی از انواع هیدروکربن‌ها را دربر می‌گرفت. حجم و تنوع این مواد به قدری است که بررسی اثرات هر یک از آنها و نیز تأثیر اندرکنش آنها بر رفتار قیر عملاً غیرممکن می‌شود. بنابراین در مرحله بعد، اجزای قیر بصورت کلی‌تری شامل آسفالتین، رزین‌ها، آروماتیک‌ها و غیره تفکیک شدند. اما آنچه در واکنش‌های شیمیایی زنجیره‌های هیدروکربنی قیر از جمله اکسیداسیون حایز اهمیت است، میزان قطبیت مولکول‌ها و میل به واکنش آنهاست. بنابراین آروماتیک‌های قطبی و غیرقطبی و رزین‌های اشباع و غیراشباع جدا شدند [۴ و ۵]. این تحقیقات همچنین نشان داد که هر نوع تغییر شیمیایی در مولکول‌های قیر یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است. به عنوان مثال، اگر یک قیر اولیه در اثر اکسیداسیون سخت شود و سپس با افزایش درصد رزین‌ها و حلال‌ها سختی آن مجدداً به مقدار اولیه کاهش یابد، در عین حال رفتار قیر جدید با قیر اولیه کاملاً متفاوت خواهد بود. این تغییر رفتار، گستره وسیعی شامل دوام، چسبندگی، حساسیت حرارتی، استحکام، و پتانسیل جذب اکسیژن (قابلیت اکسیداسیون) را شامل می‌شود [۴]. از طرف دیگر، در ادامه برنامه SHRP مشخص گردید که فرسودگی

روسازی‌های آسفالتی در معرض عوامل مخرب زیادی قرار دارند و تحت تأثیر مجموعه این عوامل عمر مفید راه کاهش می‌یابد. شناسایی این پارامترها و بررسی مکانیسم اثرگذاری آنها بر عملکرد روسازی آسفالتی می‌تواند به کند کردن روند تخریب روسازی‌ها کمک کند و بدین ترتیب عمر مفید راه‌ها را افزایش دهد. فرسودگی قیر^۱ یکی از این عواملی است که در بروز تعدادی از خرابی‌های روسازی آسفالتی نقش مهمی ایفا می‌کند.

فرسودگی قیر یک فرآیند برگشت‌ناپذیر است که آثار آن به صورت افزایش سختی و کاهش شکل‌پذیری قیر ظاهر می‌شود. فرآیند فرسودگی قیر ناشی از تغییراتی است که در نوع و اندازه مولکول‌های بسیار متنوع هیدروکربنی قیر اتفاق می‌افتد. این فرآیند را در دو مرحله می‌توان بررسی نمود که عبارتند از فرسودگی کوتاه‌مدت و فرسودگی درازمدت. فرسودگی کوتاه‌مدت به دلیل گرمای آسفالت حین ساخت و پخش آن اتفاق می‌افتد و در اثر آن مقداری از حلال‌ها و روغن‌های سبک قیر تبخیر می‌شود، در عین حال در دمای بالا اکسیداسیون تسریع شده نیز در قیر اتفاق می‌افتد. فرسودگی درازمدت که به تدریج و طی دوره بهره‌برداری از راه رخ می‌دهد ناشی از بزرگ شدن مولکول‌ها و تغییر ساختار شیمیایی قیر است که به دلیل اکسیداسیون اتفاق می‌افتد. همچنین اشعه گامای موجود در نور آفتاب فرآیند پلیمریزاسیون هیدروکربن‌ها را تشدید کرده و لذا در فرسودگی درازمدت قیر مؤثر است.

۲. پیشینه مطالعات

تاکنون مطالعات زیادی درباره بررسی مکانیسم فرسودگی قیر، مدل‌سازی فرآیند فرسودگی و عوامل مؤثر بر آن انجام شده است که بیشتر بر فرسودگی قیر متمرکز بوده‌اند. در یکی از تحقیقات اولیه که راجع به دوام قیر انجام شده است، جذب اکسیژن مهم‌ترین عامل در فرسودگی قیر محسوب شده است و نشان می‌دهد که اکسیداسیون در دمای محیط موجب طولانی شدن زنجیره‌های هیدروکربنی موجود در قیر می‌شود [۱]. تراکسلر و همکاران شرح دادند که اکسیداسیون قیر تحت تابش اشعه ماورای بنفش و امواج با طول

ارائه مدل پیش بینی مدول مرکب برشی (G^*) و زاویه فازی (δ) قیر تحت اثر فرسودگی

آزمایش های کشسانی، ویسکوزیته و DSR رابطه بین μ و G^* را تحلیل کرده اند [۱۱].

در تحقیق ملیک و براون در تعدادی از جاده های منتخب و در زمان های متفاوت مشخصات قیر با آزمایش های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و برای برآورد تغییرات پارامترهای G^* و S و δ در طول زمان (T) یک رابطه رگرسیون تجربی به فرم عمومی ($\log T + b$) پیشنهاد شده است. نتایج مشخص کرده که برای شبیه سازی فرسودگی کوتاه مدت آزمایش RTFOT و بر فرسودگی دراز مدت آزمایش PAV مناسب است [۱۲].

کی و وانگ پس از بررسی مکانیسم فرسودگی قیر، تأثیر اکسیداسیون و جذب قیر را مورد مطالعه قرار داده اند. نتایج آزمایش -ها نشان داده که رزین ها و سپس آسفالتین پتانسیل بیشتری برای جذب اکسیژن دارند و فرآیند فرسودگی را تسریع می نمایند. همچنین سرعت فرسودگی در ابتدا بیشتر بوده و با کاهش رزین ها کمتر می شود [۱۳].

۳. بررسی داده های LTPP^۱

در این تحقیق، به منظور بررسی فرسودگی و اثرات آن بر خصوصیات مکانیکی قیر داده های LTPP مورد توجه قرار گرفت. بدین ترتیب که از مطالعه مجموعه داده های LTPP اطلاعات مربوط به فرسودگی قیر استخراج شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در مجموعه داده های LTPP این اطلاعات در قسمت آزمایش های مصالح و در بخش AE^{۰۷} درج شده است.

از آنجا که آزمایش RTFO فرسودگی کوتاه مدت را شبیه سازی می کند، می توان نتایج آزمایش DSR را بر روی نمونه قیر پس از RTFOT معادل مشخصات قیر در سال اول بهره برداری در نظر گرفت. همچنین نتایج آزمایش DSR را بر روی نمونه قیر پس از RTFOT و PAV می توان معادل مشخصات قیر پس از فرسودگی دراز مدت (بطور متوسط ده سال) در نظر گرفت. با توجه به یافته های محققان مختلف و متعدد این دو فرض منطقی هستند [۴ و ۹ و ۱۰ و ۱۲].

در داده های حاصل از پروژه LTPP و در بخش آزمایش های مصالح، نتایج آزمایش DSR بر روی چند نوع قیر در جدول AE^{۰۷} قابل

قیر نقش مهمی در تغییر شکل های دائمی آسفالت، ترک های خستگی و ترک های برودتی ایفا می کند. سرعت فرسودگی به دمای محیط وابسته است و در یک دمای ثابت، سرعت فرسودگی در طول زمان کاهش می یابد. همچنین بررسی آزمایش ها نشان داد که اکسیداسیون در فشار پایین بیشترین فرسایش و کمترین تغییرات در نتایج را دارد و برای شبیه سازی فرسودگی دراز مدت مناسب است [۶].

تحقیق لین و همکاران نشان داد که تشکیل آسفالتین مهم ترین دلیل سخت شدگی آسفالت در حین فرسودگی است. داده های جمع آوری شده در این تحقیق نشان داد که درصد آسفالتین با مقدار ویسکوزیته قیر نسبت مستقیم دارد. همچنین مشخص گردید که تبخیر آروماتیک ها نسبت به اکسیداسیون تأثیر کمتری در فرسودگی قیر دارد [۷].

از طرف دیگر یانگ و همکاران فرسودگی قیر را با استفاده از آزمایش^۲ RTFOT مورد ارزیابی قرار داده و ترکیبات شیمیایی قیر را در طول زمان اندازه گیری نمودند و مشخص شد که درصد آسفالتین در حال افزایش است. رابطه (۱) نیز برای پیش بینی مقدار ویسکوزیته قیر (μ) ارائه گردید که در آن t پارامتر زمان و m شاخص فرسودگی است [۸].

$$\ln \mu = \ln b + m \cdot \ln t \quad (1)$$

شلیبی با انجام آزمایش RTFOT روی قیرهای مختلف و محاسبه G^* و δ یک رابطه رگرسیون برای آنها بصورت تابعی از دما و زمان ارائه نموده است. در روابط زیر t نشان دهنده زمان در آزمایش RTFOT بوده و T دمای آزمایش δ DSR می باشد [۹].

$$\log G^*(t, T) = a^1 + a^2 [T - (a^3 \cdot t^2 + a^4 \cdot t)] \quad (2)$$

$$\delta(t, T) = b^1 [T - (b^4 \cdot t^2 + b^5 \cdot t)]^2 + b^2 [T - (b^4 \cdot t^2 + b^5 \cdot t)] + b^3 \quad (3)$$

در مقاله آیری انواع روش های مطالعه رفتار قیر و آسفالت در هنگام فرسودگی بررسی شده است. نتایج نشان داده است که برای بررسی فرسودگی کوتاه مدت قیر آزمایش های TFOT^۳ و RTFOT^۴ و برای بررسی فرسودگی دراز مدت قیر آزمایش های PAV^۵ و RCAT^۶ مناسب است [۱۰].

روان و همکاران نیز نشان داده اند که کشسانی^۸ قیر حاصل از آسفالت فرسوده با ترک های خستگی ارتباط مستقیم دارد. سپس با انجام

رود. بنابراین مدلسازی‌ها بر مبنای داده‌های مربوط به ده نوع قیر باقی مانده انجام گرفته است.

۳-۱ تحلیل داده‌های مربوط به G^*

در ابتدای کار برای هر کد آزمایشی نحوه تغییرات G^* به صورت تابعی از دمای آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. برای تشریح روش کار، نحوه تحلیل داده‌های مربوط به کد آزمایشی $TEST-ID=30000$ بیان می‌شود. در این کد آزمایشی روابط زیر با روش رگرسیون غیرخطی بدست آمده است

- قیر اولیه ($TEST-ID=30000$)

$$G_p^* = \text{Exp}(-0.13t + 8.752) \quad (4)$$

$$G_p^*(\text{est}) = 0.981 G_p^*(\text{obs}), R^2 = 1 \quad (5)$$

- قیر پس از RTFOT

$$G_p^* = \text{Exp}(-0.135t + 9.995) \quad (6)$$

$$G_p^*(\text{est}) = G_p^*(\text{obs}) - 0.15, R^2 = 1 \quad (7)$$

- قیر پس از PAV

$$G_p^* = \text{Exp}(-0.127t + 11.788) \quad (8)$$

$$G_p^*(\text{est}) = 0.992 G_p^*(\text{obs}) + 44, R^2 = 0.991 \quad (9)$$

در روابط فوق t دما، G_p^* مدول مرکب برشی قیر اولیه، G_p^* مدول مرکب برشی قیر پس از آزمایش RTFOT و G_p^* مدول مرکب برشی قیر از آزمایش PAV میباشد. ملاحظه می‌شود که روابط بالا با دقت خوبی قادر به تخمین مقادیر G_p^* و G_r^* می‌باشند. در مورد سایر کدهای آزمایشی نیز روابط مشابهی بدست آمده‌اند که در بین آنها کوچک‌ترین ضریب همبستگی 0.974 بوده است، پس تمام روابط

مشاهده است. این آزمایش بر روی هر نمونه قیر در سه وضعیت انجام گرفته است: قیر اولیه، نمونه قیر پس از آزمایش RTFO و نمونه قیر پس از آزمایش RTFO و PAV.

در جدول AE07 نتایج آزمایش DSR بر روی 11 نوع قیر مختلف با خصوصیات بسیار متنوع و متفاوت درج شده است. برای هر نوع قیر در هر یک از سه وضعیت بالا (قیر اولیه، پس از RTFOT و پس از PAV) آزمایش DSR در دماهای مختلف انجام گرفته است. به عنوان مثال نتایج مربوط به قیر با کد آزمایشی $TEST-ID=30000$ بشرح مندرج در جدول 1 می‌باشد.

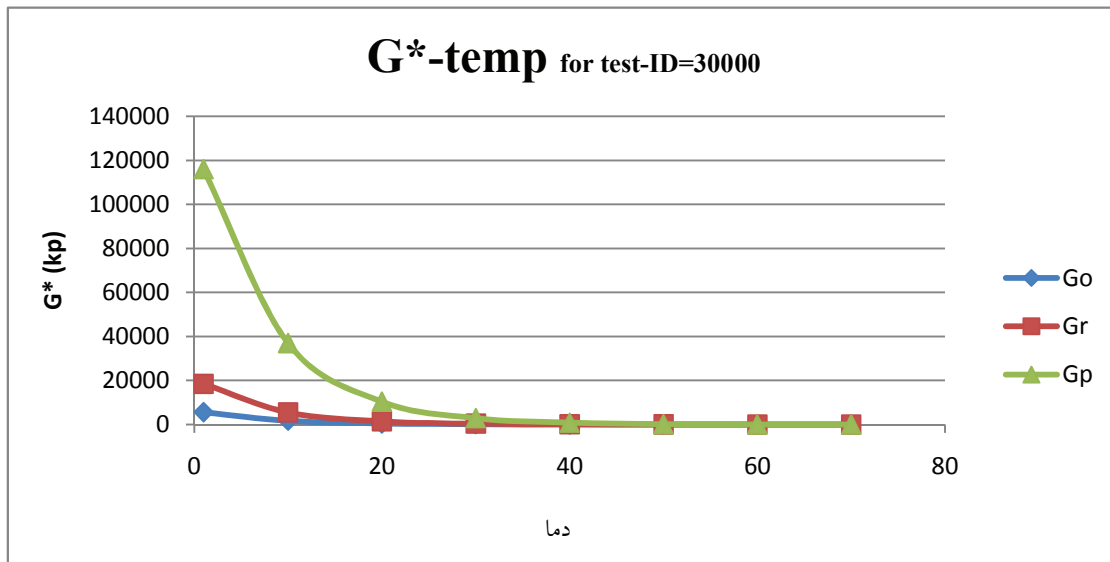
از جمله پارامترهایی که رفتار قیر و میزان سختی آن را به خوبی نشان می‌دهند می‌توان به مدول مرکب برشی (G^*) و زاویه تاخیر فازی (δ) اشاره کرد که برای مدلسازی اثر فرسودگی قیر بر روی این دو پارامتر نیز مقالات زیادی تاکنون منتشر شده‌اند [9 و 12 و 14]. در عین حال در تمام این تحقیقات تغییر رفتار هر قیر بطور جداگانه مدلسازی شده است و یک مدل جامع که قادر باشد برای پیش‌بینی رفتار چند نوع قیر به کار رود، ارائه نشده است. البته با توجه به اینکه قیرها ترکیبات متنوعی دارند و فرسودگی قیر یک فرآیند پیچیده است، تغییرات مقادیر G^* و δ به عوامل بسیار زیادی می‌تواند وابسته باشد لذا مدلسازی به منظور پیش‌بینی این مقادیر در طول زمان کار همراه با خطاهای زیادی می‌باشد. مدلی که در این تحقیق ارائه شده است با استفاده از داده‌های چندین نوع قیر مختلف ساخته شده است و در نتیجه برای انواع مختلف قیر قابل استفاده می‌باشد.

پیش از مدلسازی، داده‌های مربوط به قیر با کد آزمایشی $TEST-ID=48000$ از سایر داده‌ها جدا شد تا بعداً برای ارزیابی مدل‌ها به کار

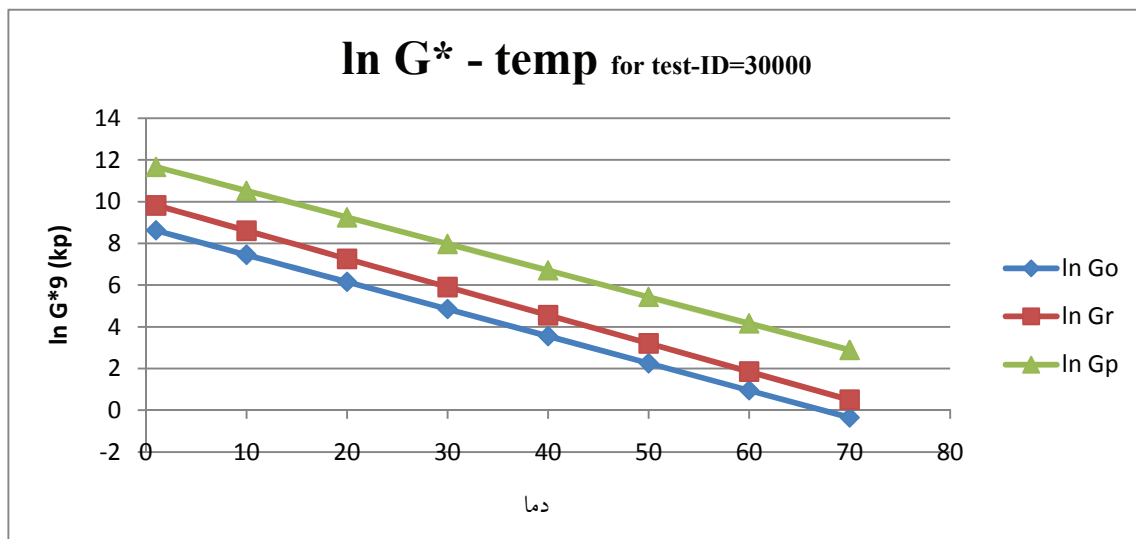
جدول 1. نتایج آزمایش DSR روی قیر با کد $TEST-ID=30000$ (مرجع: LTPP)

قیر پس از PAV			قیر پس از RTFOT			قیر اولیه		
δ_p (deg)	G_p^* (KPa)	دمای آزمایش (°C)	δ_r (deg)	G_r^* (KPa)	دمای آزمایش (°C)	δ (deg)	G^* (KPa)	دمای آزمایش (°C)
42/2	8098	22	81	8/4	58	85/5	3/3	58
45/2	5298	25	83/5	3/7	64	87	1/5	64
45/8	4414	27	85/5	1/7	70	88/2	0/7	70

ارائه مدل پیش بینی مدول مرکب برشی (G^*) و زاویه فازی (δ) قیر تحت اثر فرسودگی



شکل ۱. برآورد G^* در دماهای مختلف (قیر با کد TEST-ID=30000)



شکل ۲. برآورد G^* در دماهای مختلف (قیر با کد TEST-ID=30000)

آسفالت رادر شرایط بهره برداری به شدت افزایش می دهد. در عین حال در شکل ۲ شیب یکسان نمودارهای $\ln G^*$ -temp برای هر سه وضعیت G_p^* ، G_r^* و G_o^* قابل تامل است که نشان از ثابت ماندن حساسیت حرارتی قیر در طول زمان است. حال برای هر کد آزمایشی مقادیر G^* قیر اولیه (G_p^*)، G^* قیر در سال اول (G_r^*) و G^* قیر در سال دهم (G_o^*) در دماهای مختلف (۰ تا ۷۰) موجود است. مدل پیش بینی تغییرات G^* به صورت تابعی از G^* اولیه قیر و زمان بهره برداری، با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی بدست می آید.

با دقت بالایی قابل استفاده می باشند. با استفاده از این روابط اقدام به محاسبه سه پارامتر G_p^* ، G_r^* و G_o^* در دماهای صفر تا هفتاد درجه سانتی گراد گردید که نتایج آن در شکل های ۱ و ۲ ملاحظه می گردد. با توجه به شکل ۱ می توان گفت که مقدار G^* قیر فرسوده نسبت به قیر اولیه در دماهای پایین اختلاف بیشتری پیدا می کند. اما در دمای بیش از ۲۵ درجه سانتی گراد اختلاف معنی داری بین مقادیر G^* برای قیرهای فرسوده و قیر اولیه مشاهده نمی شود. با توجه به اینکه دمای محیط معمولاً کمتر از ۲۵ درجه سانتی گراد است، می توان چنین نتیجه گرفت که فرسودگی قیر، سختی

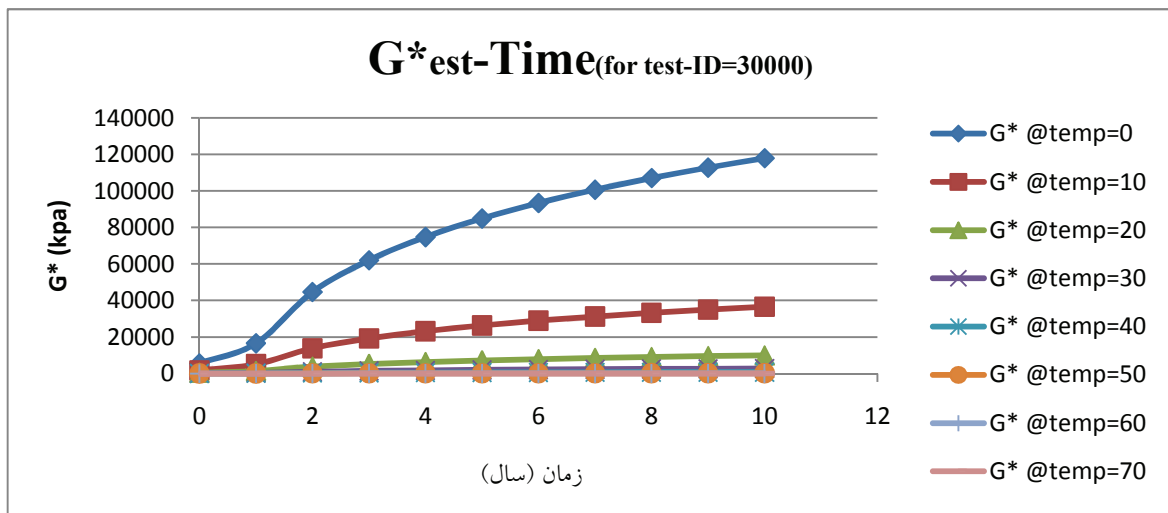
دماهای مختلف و در طول زمان بهره‌برداری از راه نشان می‌دهد که از رابطه ۱۰ بدست آمده‌اند.

در شکل ۳ در تمامی نمودارها ملاحظه می‌شود که بیشترین شیب منحنی‌ها در سال اول تا سوم اتفاق می‌افتد و بعد از آن فرآیند فرسودگی قیر به تدریج کند شده و مقدار G^* قیر پس از چهارالی شش سال به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. علت این امر ثابت ماندن درصد آسفالتین قیر به دلیل محدودیت در جذب اکسیژن (ظرفیت محدود اکسیداسیون) است. همچنین با کاهش درصد

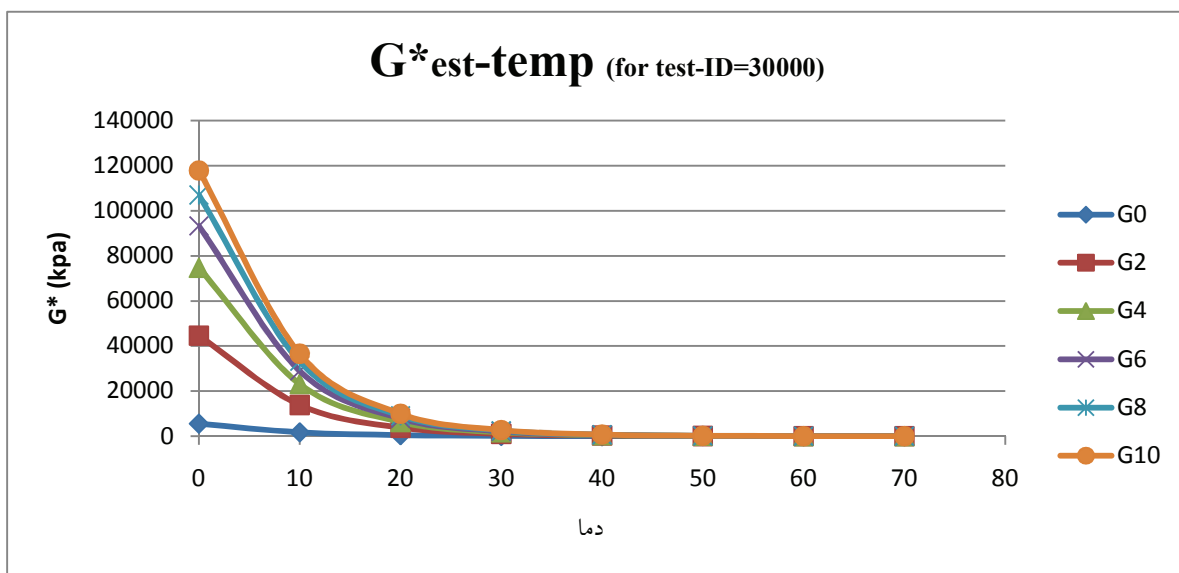
$$G_{Time}^* = G^* (70/50.7 \text{Time}^{-1} - 67/535) \quad (10)$$

$$G_{Time}^* (\text{est}) = 0.91 G_{Time}^* (\text{obs}) + 332/969, \quad R^2 = 0.898, F = 1128 \quad (11)$$

با توجه به اینکه رابطه ۱۰ از مقایسه نتایج حاصل از انواع مختلف قیر با خصوصیات و رفتار گوناگون و گاهی متفاوت بدست آمده است و دارای یک ضریب همبستگی بالا یعنی ۰/۸۹۸ بوده و ضریب F بسیار بزرگی دارد، می‌توان با اطمینان کافی از آن استفاده نمود. شکل ۳ و ۴ تغییرات G^* را برای قیر با کد آزمایشی TEST-ID=۳۰۰۰۰ در



شکل ۳. برآورد G^* در طول زمان بهره‌برداری با دماهای مختلف (قیر با کد TEST-ID=۳۰۰۰۰)



شکل ۴. برآورد G^* در دماهای مختلف با زمان بهره‌برداری متفاوت (قیر با کد TEST-ID=۳۰۰۰۰)

ارائه مدل پیش بینی مدول مرکب برشی (G^*) و زاویه فازی (δ) قیر تحت اثر فرسودگی

نشان دهد با استفاده از رابطه (۱۰) مقدار G^* آن در سال ششم برابر $42/02$ کیلو پاسکال (در همان دمای 60 درجه سانتی گراد) برآورد میگردد. با توجه به رابطه (۱۲) مقدار G^* آن در سال ششم و دمای 10 درجه سانتی گراد برابر 9115 کیلو پاسکال محاسبه می شود.

۲-۳ تحلیل داده های مربوط به δ

مشابه روشی که برای تحلیل داده های G^* در قسمت قبل معرفی شد، در ادامه کار، داده های مربوط به زاویه فازی قیر (δ) مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور رعایت اختصار از ذکر جزئیات مربوط به مراحل کار صرف نظر شده و نتایج حاصل از تحلیل داده های زاویه فازی قیر برای تمام کدهای آزمایشی در قالب مدل های زیر پیشنهاد می شود. نمودار شکل های ۵ و ۶ تغییرات زاویه فازی δ را به صورت تابعی از زمان و دما با استفاده از رابطه ۱۷ نشان می دهند.

$$\delta_{Time} = \delta_0 \cdot \text{Exp}[-\text{Time}^{-0.114} + \text{temp}^{0.149}], R^2 = 0.935 \quad (13)$$

$$\delta_p = \delta_0 \cdot \text{Exp}[1/855 (t_p^{-0.127}/t_0^{-0.127})], R^2 = 0.796 \quad (14)$$

لازم به ذکر است که پارامتر δ نشان دهنده تاخیر زمانی فاز تغییر شکل نسبت به فاز بارگذاری است و در واقع موقعیت رفتار قیر را بین دو حالت الاستیک خالص و ویسکوز خالص مشخص می نماید. بنابراین عامل زمان بارگذاری یا سرعت بارگذاری نیز در آن نقش دارد. با توجه به اینکه در آزمایش های اولیه شرایط بارگذاری ثابت بوده و زمان و

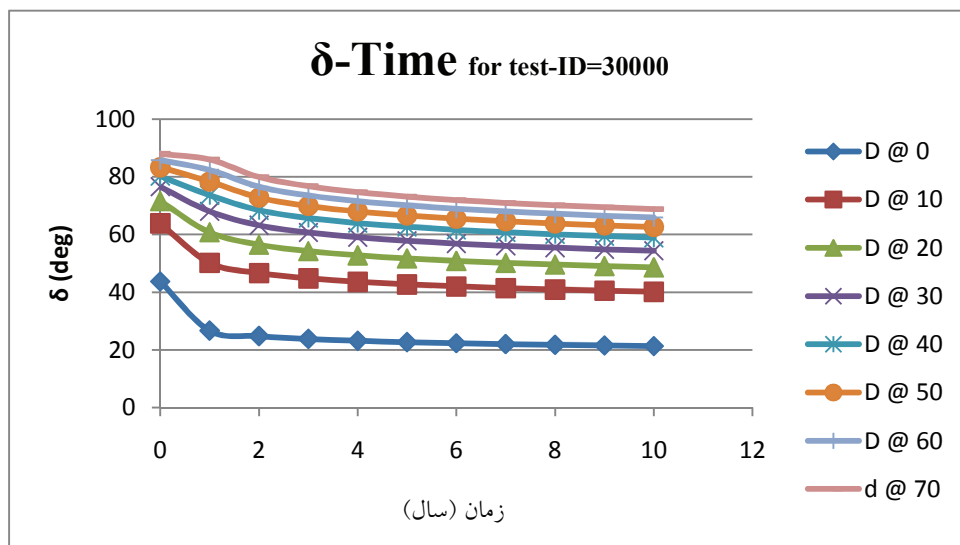
رزین ها و آروماتیک های سبک، سرعت تبخیر و یا تغییر شیمیایی در آنها نیز کند شده و تقریباً متوقف می شود. هر چند در دمای صفر درجه سانتی گراد، افزایش مقدار G^* تا مدت زمان بیشتری ادامه پیدا می کند. مقایسه منحنی های G^* در دمای سسی درجه سانتی گراد و بالاتر، هیچ گونه اختلاف مهمی را بین آنها نشان نمی دهد و می توان از تأثیر فرسودگی در دمای بالا صرف نظر کرد.

در شکل ۴ مقدار G^* قیر در ابتدا، و در سال های دوم، چهارم، ششم، هشتم و دهم ملاحظه می شود. در اینجا نیز رشد مقدار G^* تا سال ششم کاملاً مشهود است. اما منحنی های سال ششم و هشتم و دهم بسیار نزدیک به هم هستند و تفاوت معنی داری را بین آنها نشان نمی دهند. همچنین در دماهای بیشتر از 25 درجه سانتی گراد منحنی ها تقریباً بر همدیگر منطبق شده اند.

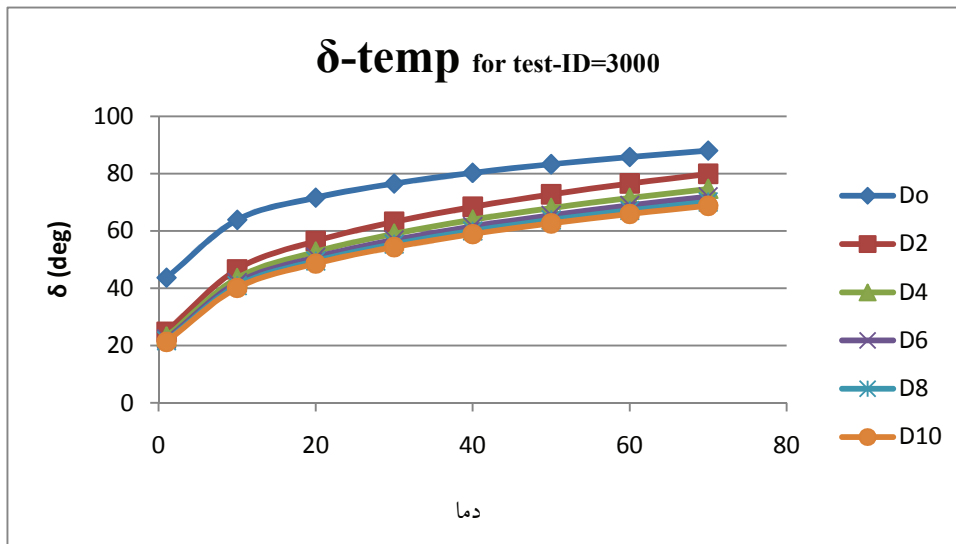
در انتها با بررسی و مقایسه مقادیر G^* تمام کدهای آزمایشی که در دماهای مختلف بدست آمده اند، مدل زیر برای تبدیل مقدار G^* از یک دمای اولیه به هر دمای دیگر به صورت زیر پیشنهاد می شود.

$$G_p^* = G_0^* \cdot \text{Exp}[0.129 (t_p - t_0)], R^2 = 0.76 \quad (12)$$

بدین ترتیب با یک بار انجام آزمایش DSR در دمای t_0 و ثبت نتیجه آزمایش (G_0^*) می توان مقدار G_p^* را در هر دمای دلخواه t_p محاسبه نمود. به عنوان مثال اگر نتیجه آزمایش DSR برای یک نمونه قیر اولیه در دمای 60 درجه سانتی گراد مقدار G^* آن را برای $2/5$ کیلو پاسکال



شکل ۵. برآورد δ در طول زمان بهره برداری (قیر با کد TEST-ID=30000)



شکل ۶. برآورد δ در دماهای مختلف (قبر با کد TEST-ID=۳۰۰۰۰)

با نتایج پس از آزمایش RTFOT و پس از آزمایش PAV می‌باشند. پیش‌بینی مدل در کنار مقادیر اندازه‌گیری شده G^* و δ در جدول ۳ درج شده است.

همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود، مقدار تخمین‌ها به مقادیر اندازه‌گیری شده بسیار نزدیک است. هرچند در مورد G^*_r درصد خطا نسبتاً زیاد است اما باید توجه داشت که درصد زیاد خطا به دلیل مقادیر کوچک پارامتر محاسبه شده است. در مورد بیشترین درصد خطا در این قسمت در واقع کمتر از ۰/۲ کیلو پاسکال اختلاف بین تخمین و اندازه‌گیری وجود دارد اما به دلیل مقدار کوچک پارامتر (۰/۷) درصد خطای زیادی را نشان می‌دهد. در شرایط بهره‌برداری از راه که دمای محیط کمتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد است انتظار می‌رود که مدل با خطایی

سرعت بارگذاری روی تمام نمونه‌ها یکسان است، لذا از تأثیر این عامل در مدلسازی صرف‌نظر شده است.

۳-۳ ارزیابی مدل

همان‌طور که در بخش ۲ ذکر شد، داده‌های کد آزمایشی TEST-ID=۴۸۰۰۰ از مجموع داده‌های اولیه حذف شد تا بتوان از آنها برای ارزیابی مدل و سنجش جواب‌های آن استفاده نمود. اطلاعات مربوط به این کد آزمایشی در جدول ۲ ملاحظه می‌گردد.

با استفاده از روابطی که برای پیش‌بینی مقادیر G^* و δ در این مقاله ارائه گردید و با داشتن مقادیر G^* و δ ، مقادیر این پارامترها در سال‌های اول و دهم محاسبه می‌شود که معادل

جدول ۲. نتایج آزمایش DSR روی قبر با کد TEST-ID=۴۸۰۰۰ (مرجع: LTPP)

قبر پس از PAV			قبر پس از RTFOT			قبر اولیه		
δ_p (deg)	G^*_p (KPa)	دمای آزمایش (°C)	δ_r (deg)	G^*_r (KPa)	دمای آزمایش (°C)	δ (deg)	G^* (KPa)	دمای آزمایش (°C)
۴۴/۳	۱۱۴۱۳	۱۹	۸۱/۲	۷/۷	۵۸	۸۵/۳	۳/۱	۵۸
۴۷/۷	۷۳۱۷	۲۲	۸۳/۴	۳/۴	۶۴	۸۷/۵	۱/۴	۶۴
۵۰/۶	۴۷۴۹	۲۵	۸۵/۹	۱/۶	۷۰	۸۹	۰/۶	۷۰
۵۳/۵	۳۰۲۱	۲۸	۸۷/۶	۰/۷	۷۶	۸۹/۸	۰/۳	۷۶

ارائه مدل پیش بینی مدول مرکب برشی (G^*) و زاویه فازی (δ) قیر تحت اثر فرسودگی

جدول ۳. مقایسه پیش‌بینی مدل با نتایج اندازه‌گیری شده روی قیر با کد TEST-ID=۸۰۰۰۰

قیر پس از PAV				قیر پس از RTFOT			
ارزیابی مدل پیش‌بینی مدول مرکب برشی G^*							
درصد خطا	$G_p^*(est)$	$G_p^*(obs)$	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)	درصد خطا	$G_r^*(est)$	$G_r^*(obs)$	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)
- ۱۱/۷۳	۱۰۰۷۴	۱۱۴۱۳	۱۹	۱۶/۴۲	۹/۲۱	۷/۷	۵۸
- ۸/۴۵	۶۶۹۹	۷۳۱۷	۲۲	۱۸/۲۸	۴/۱۶	۳/۴	۶۴
- ۱۰/۹۹	۴۲۲۸	۴۷۴۹	۲۵	۱۰/۲۷	۱/۷۸	۱/۶	۷۰
۳/۰۳	۳۱۱۳	۳۰۲۱	۲۸	۲۱/۴۹	۰/۸۹	۰/۷	۷۶
ارزیابی مدل پیش‌بینی زاویه فازی δ							
درصد خطا	$\delta_p(est)$	$\delta_p(obs)$	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)	درصد خطا	$\delta_r(est)$	$\delta_r(obs)$	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)
۱۴/۶۹	۵۰/۸	۴۴/۳	۱۹	۵/۴۲	۸۵/۶	۸۱/۲	۵۸
۱۱/۹۵	۵۳/۳	۴۷/۷	۲۲	۶/۴۳	۸۸/۷۷	۸۳/۴	۶۴
۹/۷۷	۵۵/۵	۵۰/۶	۲۵	۶/۶۱	۹۱/۵۸	۸۵/۹	۷۰
۷/۳۴	۵۷/۶	۵۳/۵	۲۸	۷/۳۴	۹۴/۰۳	۸۷/۶	۷۶

پیش‌بینی مدل با اندازه‌گیری‌ها در جدول ۵ ملاحظه می‌شود. مشابه حالت قبل حداکثر مقدار خطا در مورد مدول برشی قیر در یک دوره ده ساله به حدود ۱۵ درصد می‌رسد که خطای قابل قبولی است. در عین حال در مورد زاویه فازی قیر خطا افزایش زیادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً هم ذکر شد، زاویه فازی قیر تغییر رفتار مکانیکی قیر را در بین دو حالت الاستیک و ویسکوز نشان می‌دهد و چون این رفتار تابع مواد تشکیل‌دهنده قیر است و در واقع به منبع تهیه قیر بستگی دارد لذا انتظار می‌رود خطای برآوردها زیاد باشد. در این مورد بهتر است که برای قیرهای داخلی، مدل کالیبره شود.

کمتر از ۱۵ درصد بتواند مقدار G^* قیر را برآورد نماید. در تخمین زاویه فازی δ نیز خطای تخمین‌ها کمتر از ۱۵ درصد می‌باشد. هرچند که در دماهای بالا ممکن است جواب‌ها غیر واقعی باشند (۹۱ و ۹۴ درجه در دمای بیش از ۷۰ درجه سانتی‌گراد) اما در دمای محیط پیش‌بینی مدل با خطای کمی قابل استفاده است.

همچنین مدل فوق‌بر روی نمونه‌ای از قیرهای تولید داخل کشور هم ارزیابی گردید. برای این منظور از قیر ۷۰/۶۰ پالایشگاه تهران استفاده شده و آزمایش‌های لازم بر روی آنها انجام گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات در جدول ۴ و مقایسه

جدول ۴. نتایج آزمایش DSR روی قیر ۷۰/۶۰ پالایشگاه تهران

قیر پس از PAV			قیر پس از RTFOT			قیر اولیه		
$\delta_p(deg)$	$G_p^*(KPa)$	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)	$\delta_r(deg)$	$G_r^*(KPa)$	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)	$\delta_r(deg)$	$G_r^*(KPa)$	دمای آزمایش ($^{\circ}C$)
۳۳/۴	۱۱۵۸۷	۱۹	۸۰/۹	۸/۵	۵۸	۷۹/۶	۲/۸	۵۸
۳۹/۰	۷۸۰۱	۲۲	۸۲/۷	۲/۹	۶۴	۸۲/۳	۱/۴	۶۴
۴۳/۲	۴۹۵۴	۲۵	۸۴/۶	۱/۳	۷۰	۸۴/۳	۰/۷	۷۰

جدول ۵. مقایسه پیش‌بینی مدل با نتایج اندازه‌گیری شده روی قیر ۶۰/۷۰ پالایشگاه تهران

قیر پس از PAV				قیر پس از RTFOT			
ارزیابی مدل پیش‌بینی مدول مرکب برشی G^*							
درصد خطا	$G_p^*(est)$	$G_p^*(obs)$	دمای آزمایش (°C)	درصد خطا	$G_r^*(est)$	$G_r^*(obs)$	دمای آزمایش (°C)
۱۵/۴	۹۸۰۱	۱۱۵۸۷	۱۹	۲/۳	۸/۳	۸/۵	۵۸
۱۴/۱	۶۷۰۱	۷۸۰۱	۲۲	۳۷	۴	۲/۹	۶۴
۰/۴	۴۹۳۳	۴۹۵۴	۲۵	۵۳	۲	۱/۳	۷۰
ارزیابی مدل پیش‌بینی زاویه فازی δ							
درصد خطا	$\delta_p(est)$	$\delta_p(obs)$	دمای آزمایش (°C)	درصد خطا	$\delta_r(est)$	$\delta_r(obs)$	دمای آزمایش (°C)
۵۰	۵۰/۳	۳۳/۴	۱۹	۳	۸۳/۴	۸۰/۹	۵۸
۳۵	۵۲/۸	۳۹/۰	۲۲	۵	۸۶/۸	۸۲/۷	۶۴
۲۷/۵	۵۵/۱	۴۳/۲	۲۵	۶	۸۹/۷	۸۴/۶	۷۰

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

فرسودگی قیر یکی از عوامل بروز برخی از خرابی‌ها در روسازی آسفالتی است. این فرآیند ناشی از تغییراتی است که در نوع و اندازه مولکول‌های هیدروکربنی قیر اتفاق می‌افتد و در دو مرحله شامل فرسودگی کوتاه‌مدت و فرسودگی درازمدت قابل بررسی است. فرسودگی کوتاه‌مدت به دلیل گرمای آسفالت حین ساخت و پخش آن اتفاق می‌افتد و در اثر آن مقداری از حلال‌ها و روغن‌های سبک قیر تبخیر می‌شود، در عین حال در دمای بالا اکسیداسیون تسریع شده نیز در قیر اتفاق می‌افتد. فرسودگی درازمدت که به تدریج و طی دوره بهره‌برداری از راه‌رخ می‌دهد ناشی از بزرگ‌شدن مولکول‌ها و تغییر ساختار شیمیایی قیر است که به دلیل اکسیداسیون اتفاق می‌افتد. همچنین اشعه گامای موجود در نور آفتاب فرآیند پلیمریزاسیون هیدروکربن‌ها را تشدید کرده و لذا در فرسودگی درازمدت قیر مؤثر است.

در این مقاله، ابتدا تحقیقاتی که درباره مکانیسم فرسودگی قیر و مدلسازی آن انجام شده است بررسی شده و مشخص گردید که امکان پیش‌بینی رفتار قیر تحت اثر فرسودگی و بصورت تابعی از دو عامل زمان و دما وجود ندارد. بر این اساس با استفاده از مجموعه اطلاعات LTPP اقدام به مطالعه این موضوع گردید. در انتها مدلی ارائه شد که قادر است مقادیر مدول مرکب برشی قیر (G^*) و زاویه فازی قیر (δ)

را در طول زمان بهره‌برداری از راه و در دماهای مختلف محاسبه نماید. این رابطه بر اساس اطلاعات مربوط به ۱۰ نوع قیر متفاوت تهیه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق به اختصار شامل موارد ذیل می‌باشند.

- با استفاده از مدل پیشنهادی، با یک‌بار آزمایش DSR روی قیر اولیه و در یک دمای مشخص، میتوان نتایج این آزمایش را روی قیر فرسوده پس مدت زمان دلخواه و در هر دمایی محاسبه نمود.

- این مدل نشان می‌دهد که بیشترین شدت فرسودگی قیر در سه سال اول اتفاق می‌افتد و سپس تا حدود سال ششم فرآیند فرسودگی بطور قابل ملاحظه‌ای ادامه پیدا می‌کند. از سال هفتم به بعد تغییرات ناشی از فرسودگی بسیار کم بوده و قابل اغماض است.

- سخت‌شدگی ناشی از فرسودگی در دمای کمتر از ۲۵ درجه سانتیگراد کاملاً مشهود است اما در دمای بیش از آن تفاوت معنی‌داری بین قیر اولیه و قیر فرسوده دیده نمی‌شود.

- با توجه به اینکه خرابی‌هایی از قبیل شیار افتادگی و سایر تغییر شکل‌ها در دماهای بالا رخ می‌دهند و در این محدوده دما نیز فرسودگی بر خصوصیات مکانیکی قیر بی‌تأثیر است، لذا انتظار می‌رود که فرسودگی قیر در مدل‌های پیش‌بینی شیار نقش نداشته باشد. در مقابل خرابی‌هایی مانند ترک‌های خستگی و ترک‌های برودتی در دماهایی اتفاق می‌افتند که فرسودگی به شدت بر رفتار قیر تأثیر می‌گذارد.

ارائه مدل پیش بینی مدول مرکب برشی (G^*) و زاویه فازی (δ) قیر تحت اثر فرسودگی

VALIDATION" (No. SHRP-A-384). Strategic Highway Research Program.

[7] Lin, M., Chaffin, J. M., Liu, M., Glover, C., Davison, R., & Bullin, J. (1996). "THE EFFECT OF ASPHALT COMPOSITION ON THE FORMATION OF ASPHALTENES AND THEIR CONTRIBUTION TO ASPHALT VISCOSITY". Fuel Science and Technology International, 14(1), 139-162.

[8] Yang, P., Liu, Z., Yan, F., & Liao, K. (2002). "A STUDY ON AGING KINETICS OF ANSHAN PAVING ASPHALT" Taylor & Francis. Petroleum Science and Technology, 20(9), 951-960.

[9] Shalaby, A. (2002). "Modelling short-term aging of asphalt binders using the rolling thin film oven test". Canadian Journal of Civil Engineering, 29(1), 135-144.

[10] Airey, G. (2003). "State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials". International Journal of Pavement Engineering, 4(3), 165-176.

[11] Ruan, Y., Davison, R. R., & Glover, C. J. (2003). "An Investigation of Asphalt Durability: Relationships Between Ductility and Rheological Properties for Unmodified Asphalts". Petroleum Science and Technology, 21(1), 231-254.

[12] Mallick, R. B., & Brown, E. R. (2004). "An Evaluation of Superpave Binder Aging Methods". International Journal of Pavement Engineering, 5(1), 9-18.

[13] Qi, Y., & Wang, F. (2004). "Study and Evaluation of Aging Performance of Petroleum Asphalts and Their Constituents During Oxygen Absorption. II. Chemical Group Composition and Structure Changes". Petroleum Science and Technology, 22(3), 263-274.

14- Huang, S., & Zeng, M. (2007). "Characterization of aging effect on rheological properties of asphalt-filler systems". International Journal of Pavement Engineering, 8(3), 213-223.

بنابراین در هنگام مدلسازی برای بررسی ترک خوردگی روسازی های آسفالتی منظور نمودن اثر فرسودگی قیر الزامی است.

• دقت این مدل برای برآورد رفتار درازمدت قیر و استفاده در مدل های پیش بینی خرابی روسازی قابل قبول است.

۵. پانویس ها

1. Bitumen Aging
2. Strategic Highway Research Program
3. Rotating Thin Film Oven Test
4. Direct Shear Rheometer
5. Thin Film Oven Test
6. Pressure Aging Vessel
7. Rotating Cylinder Aging Test
8. Ductility
9. Long Time Pavement Performance

۶. مراجع

[1] Oort, W. P. V. (1956). "Durability of Asphalt - It's Aging in the Dark". Industrial & Engineering Chemistry, 48(7), 1196-1201.

[2] Traxler, R. N., Kuykendall, W. E., & Hislop, J. S. (1969). "Oxygen distribution on asphalts used for bituminous paving". Analytical Chemistry, 41(6), 827-828.

[3] Bell, C. A., Wieder, A. J., & Fellin, M. J. (1994). "LABORATORY AGING OF ASPHALT-AGGREGATE MIXTURES: FIELD VALIDATION" (No. SHRP-A-390) (p. 204). Strategic Highway Research Program.

[4] Robertson, R. E. (1991). "CHEMICAL PROPERTIES OF ASPHALTS AND THEIR RELATIONSHIP TO PAVEMENT PERFORMANCE" (No. SHRP-A/UWP-91-510) (p. 30). Strategic Highway Research Program.

[5] Jones, D. R., & Kennedy, T. W. (1991). "THE ASPHALT MODEL: RESULTS OF THE SHRP ASPHALT RESEARCH PROGRAM". Presented at the Strategic Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents, Part Four, Gothenburg, Sweden.

[6] Bell, C. A. (1994). "AGING: BINDER