

پیش‌بینی مشخصات رئولوژیکی قیر و ماستیک آسفالتی حاوی پودر لاستیک با استفاده از مدل میکرومکانیکی خودسازگار تعمیم‌یافته

مقاله علمی - پژوهشی

آرزو خراشادی‌زاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران

پوریا حاجی‌کریمی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران

محمد راهی، مدیر واحد تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، تهران، ایران

سحر منیعی، کارشناس مسئول واحد تحقیق و توسعه، شرکت نفت پاسارگاد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: phajikarimi@aut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

صفحه ۳۲۹-۳۳۸

چکیده

از دهه ۱۹۹۰ مدل‌های میکرومکانیکی برای پیش‌بینی خواص ماستیک‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، بسیاری از این مدل‌ها در پیش‌بینی خواص ماستیک آسفالتی رضایت‌بخش نیستند، زیرا اندرکنش فیزیکی و شیمیایی بین قیر و فیلر و همچنین اندرکنش ذرات فیلر را در نظر نمی‌گیرند. در این مقاله، مدل میکرومکانیکی خودسازگار تعمیم‌یافته برای پیش‌بینی مدول برشی مختلط (G^*) قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و همچنین ماستیک آسفالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدل میکرومکانیکی مبتنی بر خواص مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها و همچنین اندرکنش ذرات است. یک قیر اصلی و دو قیر اصلاح شده با پودر لاستیک با دو درصد وزنی ۱۰ و ۱۵ برای ساخت ماستیک‌های آسفالتی با دو نسبت حجمی مختلف فیلر ۱۸٪ و ۳۵٪ انتخاب شده است. صحت پیش‌بینی با مقایسه اختلاف نسبی بین منحنی‌های مدول برشی مختلط تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل GSCS انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل خود سازگار تعمیم‌یافته پیش‌بینی رضایت‌بخش در نسبت پرشدگی حجمی کم فیلر دارد، اما دقت آن‌ها به طور معناداری خود را از دست می‌دهد. لذا لحاظ نمودن اندرکنش شیمیایی قیر و فیلر، به ویژه قیرهای اصلاح‌شده و فیلر، قابلیت اطمینان خود را از دست می‌دهد. لذا لحاظ نمودن اندرکنش شیمیایی قیر و فیلر، به ویژه قیرهای اصلاح‌شده و فیلر، در مدل‌هایی که به منظور رفع این ناکارآمدی و مشکل می‌بایست توسعه داده شوند ضروری است.

واژه‌های کلیدی: ماستیک آسفالتی، پودر لاستیک، فیلر سیلیسی، مدل میکرومکانیکی

۱-مقدمه

حل مشکل دفع و دست‌یابی به خصوصیات مهندسی مناسب در روسازی‌های آسفالتی، استفاده از لاستیک‌های مستعمل به شکل پودر لاستیک مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است (Palit et al., 2004; Wang et al., 2018). استفاده از آسفالت لاستیکی باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی می‌شود (Bartolozzi et al., 2012). با این حال،

پودر لاستیک یکی از شناخته شده‌ترین و قدیمی‌ترین اصلاح‌کننده‌های قیر است که از آن برای بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در دمای پایین در مناطق سردسیر، افزایش عملکرد خستگی و شیارشدگی مخلوط آسفالتی و همچنین حل مشکلات مربوط به دفع لاستیک‌های دست دوم استفاده می‌شود (Lo Presti, 2013; Wang et al., 2017). برای

بنابراین بسیاری از محققین بر روی درک رفتار ماستیک آسفالتی متمرکز شده‌اند و تحقیقات آنها شامل اندرکنش بین قیر و فیلر، عوامل مؤثر بر خصوصیات رئولوژیکی ماستیک و مدل‌هایی برای پیش‌بینی عملکرد ماستیک می‌باشد. در بین این مطالعات، پیش‌بینی مدول برشی مختلط مؤثر ماستیک آسفالتی مورد توجه محققین قرار گرفته است، زیرا این پیش‌بینی بسیاری از کارهای مهندسی مثل انتخاب مناسب‌تر منابع مواد (قیر و فیلر)، بهبود طراحی ماستیک و مخلوط آسفالتی در چارچوب رویکردهای چندمقیاسی و ارتقای توسعه مواد قیری برای دستیابی به خواص مطلوب را ممکن می‌سازد (Ma et al., 2019).

عملکرد ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی نه تنها به خواص قیر و فیلر بلکه همچنین به جنبه‌های ریزساختاری (توزیع و شکل فیلرها) بستگی دارد. بنابراین مدل‌های میکرومکانیکی می‌توانند به عنوان ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی رفتار مؤثر ماستیک بر اساس پیش‌فرض‌ها و ساده‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گیرند. باتلر و روک اولین کسانی بودند که پتانسیل مدل‌های میکرومکانیکی را برای پیش‌بینی رفتارهای ماستیک آسفالتی و مخلوط‌ها به رسمیت شناختند. در سال ۱۹۹۹، باتلر از مدل خود سازگار تعمیم یافته GSCS برای پیش‌بینی اثرات سخت‌شدگی انواع فیلرها بر روی یک قیر خالص استفاده کرد (Buttler et al., n.d.). وی دریافت که مدل GSCS اثر سخت‌کنندگی فیلر را به ویژه در نسبت حجمی بالای فیلر، کمتر از مقدار واقعی ارزیابی کرده است. همچنین، مقدار محاسبه شده از مدول برشی پیچیده بر اساس مدل GSCS فقط مربوط به نسبت حجمی بوده است و به خصوصیات شیمیایی و اندازه ذرات فیلرها بستگی نداشته است. این بدان معنی است که فیلرهای مختلف با نسبت حجمی یکسان دارای خاصیت سخت‌کنندگی یکسانی هستند که بدیهی است با حقیقت مغایر است. بنابراین، باتلر تعریفی از غلظت مؤثر حجم فیلر را برای بهبود پیش‌بینی و محاسبه نسبت حجمی مؤثر بر اساس ضخامت لایه قیر تحت تاثیر ارائه داد. از آن زمان، GSCS به یکی از مدل‌های پرکاربرد برای پیش‌بینی مدول برشی مؤثر ماستیک آسفالتی تبدیل شده است.

در این تحقیق، از آزمایش جاروب فرکانسی برای تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک قیر اصلی و قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و ماستیک ساخته شده از قیر اصلاح شده همراه

تولید آسفالت لاستیکی تا حدودی موجب انتشار گازهای گلخانه‌ای منتشر شده توسط تولید مخلوط آسفالتی گرم می‌شود (Farina et al., 2017). در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۹، اثرات بالقوه زیست‌محیطی مخلوط‌های آسفالتی حاوی پودر لاستیک و روسازی آسفالتی بازیافتی (RAP) با استفاده از ارزیابی چرخه عمر (LCA) بررسی شده است (Bressi et al., 2021). افزودن پودر لاستیک به مخلوط آسفالتی در صورت در نظر گرفتن مقاومت مواد می‌تواند مقرون به صرفه باشد. صابری و همکاران مخلوط‌های آسفالتی از جمله روسازی آسفالتی بازیافتی را که توسط پودر لاستیک اصلاح شده از نظر حساسیت رطوبتی، ترک خستگی و تغییر شکل دائمی بررسی کردند (Saberik et al., 2017). این مطالعه نشان داد که اندازه ریز پودر لاستیک می‌تواند منجر به ایجاد یک مخلوط همگن شود و مقاومت خستگی مخلوط آسفالتی را به طور مؤثر افزایش دهد. تهمی و همکاران مطالعه‌ای در مورد تأثیر همزمان استفاده از درصد بالای پودر لاستیک در مخلوط آسفالتی و توسعه روند خشک شدن انجام دادند. افزایش قابل توجه مقاومت در برابر خرابی مخلوط آسفالتی در نتیجه استفاده از ذرات خیلی ریز پودر لاستیک هنگام فرآیند پخت مشاهده شد (Tahami et al., 2019).

یکی از نگرانی‌های عمده در مورد قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک، پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی آنها و یافتن مقدار بهینه استفاده از پودر لاستیک است. از آنجا که منبع تایرهای دست دوم که خرد شده و تولید پودر لاستیک می‌کنند متفاوت است، لازم است آزمون‌های تجربی در فواصل کوتاه انجام شود تا از خواص رئولوژیکی مطلوب اطمینان حاصل شود. این امر می‌تواند به طور مستقیم بر دمای اختلاط و تراکم قیرهای اصلاح شده و همچنین بر روی مشخصات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر بگذارد. با داشتن خصوصیات قیر اصلی و پودر لاستیک می‌توان از روش‌های مدل‌سازی برای پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک استفاده کرد. همچنین مطالعات انجام شده بر روی رفتارهای چندمقیاسی از مواد قیری ثابت کرد که خصوصیات رئولوژیکی ماستیک آسفالتی به طور قابل توجهی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی تأثیر می‌گذارد (Faheem & Bahia, 2010; Li et al., 2018; Pichler et al., 2012; Underwood & Kim, 2014).

$$(3-v_m)v_m\eta_2\phi_f+3(15v_m-7)\eta_2\eta_3 \quad (3)$$

$$C=4\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)(5v_m-7)\eta_1\phi_f^{\frac{10}{3}}-2\left(63\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)\eta_2\right. \\ \left.+2\eta_1\eta_3\right)\phi_f^{\frac{7}{3}}+252\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)\eta_2\phi_f^{\frac{5}{3}}+25\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right) \\ (v_m^2-7)\eta_2\phi_f-3(7+5v_m)\eta_2\eta_3 \quad (4)$$

که در آن η_1 و η_2 و η_3 برابر است با:

$$\eta_1=\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)(49+50v_rv_m)+35\left(\frac{G_f}{G_m}\right) \\ (v_r-2v_m) \\ +(2v_r-v_m) \quad (5)$$

$$\eta_2=5v_r\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-8\right)+7\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)+4\right) \quad (6)$$

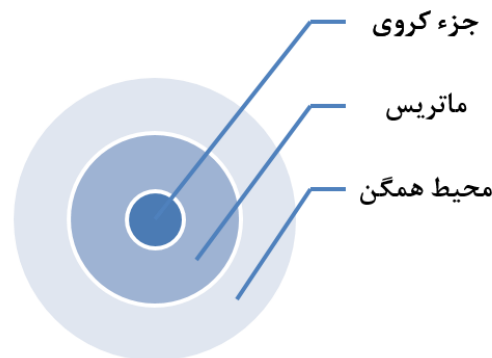
$$\eta_3=\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)(8-10v_m)+(7-5v_m)\right) \quad (7)$$

در این روابط پارامتر G برابر با مدول برشی، v ضریب پواسون، ϕ درصد پرشدگی است، به طوری که اندیس های C ، m و f به ترتیب به کامپوزیت، ماتریکس و فیلر تخصیص داده شده است. در این مقاله دو رویکرد متفاوت در نظر گرفته شده است. رویکرد اول شامل یک مرحله است طوری که کامپوزیت همان ماستیک آسفالتی است و ماتریس و فیلر به ترتیب قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و سنگدانه های سیلیسی می باشند. رویکرد دوم شامل ۲ مرحله است. در مرحله اول کامپوزیت، قیر اصلاح شده با پودر لاستیک است، در حالی که ماتریس و فیلر به ترتیب قیر اصلی و پودر لاستیک هستند. به عبارت دیگر در این مرحله ذرات پودر لاستیک به صورت جزء کروی داخل ماتریسی از قیر اصلی پراکنده شده است. کامپوزیت در مرحله دوم ماستیک است و ماتریس و فیلر به ترتیب قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و سنگدانه های سیلیسی می باشند. در رویکرد اول مدول برشی سنگدانه های سیلیسی برابر با ۵۰۰۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ماتریس و فیلر به ترتیب برابر با ۰/۳۵ و ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. در رویکرد دوم نیز مدول برشی و ضریب پواسون پودر لاستیک به ترتیب برابر با ۵۵ مگاپاسکال و ۰/۴ در نظر گرفته شده است.

فیلر سیلیسی استفاده شده است. سپس، نتایج مدل سازی قیر حاوی پودر لاستیک و ماستیک آسفالتی شامل مدول برشی پیچیده (G^*) و زاویه فاز (δ) با نتایج آزمایش تجربی مقایسه می شود تا صحت مدل GSCS ارائه شده برای پیش بینی رفتار ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده و ماستیک بررسی شود.

۲- پیشینه تحقیق

مدل میکرومکانیکی که برای توصیف رفتار دینامیکی مکانیکی ماستیک های آسفالتی انتخاب شده است، مدل کریستنسن و لو است که به عنوان GSCS شناخته می شود و در آن سیستم به عنوان یک کامپوزیت در نظر گرفته شده است و همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده، دارای یک جزء کروی است که در یک محیط همگن با یک پوسته ماتریس احاطه شده است.



شکل ۱. شماتیک مدل سه فازی از رفتار ماستیک آسفالتی متناسب با مدل GSCS

معادله بنیادی این مدل که توسط کریستنسن و لو ارائه شده است، به شرح زیر است:

$$A\left(\frac{G_C}{G_m}\right)^2+2B\left(\frac{G_C}{G_m}\right)+C=0 \quad (1)$$

$$A=8\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)(4-5v_m)\eta_1\phi_f^{\frac{10}{3}}-2\left(63\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)\eta_2\right. \\ \left.+2\eta_1\eta_3\right)\phi_f^{\frac{7}{3}}+252\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)\eta_2\phi_f^{\frac{5}{3}}-50\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right) \\ (7-12v_m+8v_m^2)\eta_2\phi_f+4(7-10v_m)\eta_2\eta_3 \quad (2)$$

$$B=-4\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)(1-5v_m)\eta_1\phi_f^{\frac{10}{3}}+4\left(63\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)\eta_2\right. \\ \left.+2\eta_1\eta_3\right)\phi_f^{\frac{7}{3}}-504\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)\eta_2\phi_f^{\frac{5}{3}}+150\left(\left(\frac{G_f}{G_m}\right)-1\right)$$

۳- مصالح و روش‌های آزمایش

۳-۱- مصالح

در این پژوهش از قیر خالص تولید شده توسط کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد با رده‌بندی عملکردی PG58-22 استفاده شده است. مهمترین خصوصیات متعارف این قیر در جدول (۱) گزارش شده است. از پودر لاستیک جهت اصلاح

خصوصیات قیر اصلی استفاده شده است. همچنین از فیلر سیلیسی (ریزدانه‌های عبوری از الک شماره ۲۰۰) با اندازه ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون نیز به منظور ساخت ماستیک آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است. وزن مخصوص فیلر سیلیسی محاسبه گردید که برابر ۲/۶۵۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد.

جدول ۱. خواص متعارف قیر اصلی مورد استفاده در این مطالعه

مقدار	استاندارد	آزمایش
۹۲	ASTM D5	درجه نفوذ (۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه، ۲۵ درجه سانتیگراد)، ۰٫۱ میلی‌متر
۴۷/۹	ASTM D36	نقطه نرمی، درجه سانتیگراد
>۱۰۰	ASTM D113	شکل‌پذیری (۲۵ درجه سانتیگراد، ۵ سانتی‌متر بر دقیقه)، سانتی‌متر
۲۷۵	ASTM D92	نقطه اشتعال، درجه سانتیگراد
۰/۳۱۵	ASTM D4402	گرانروی در ۱۳۵ درجه سانتیگراد، پاسکال.ثانیه
۰/۱	ASTM D1754	کاهش جرم پس از TFOT، %

۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

به منظور اصلاح قیر اصلی با پودر لاستیک، درصد‌های وزنی موردنظر ۱۰ و ۱۵ برای پودر لاستیک انتخاب شده است. سپس پودر لاستیک به قیر خالص با استفاده از میکسر برش بالا (۵۵۰۰ دور در دقیقه) به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد اضافه شد. با داشتن وزن مخصوص پودر لاستیک (۱/۱۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و وزن مخصوص قیر اصلی (۱/۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) می‌توان به سادگی میزان پرشدگی حجمی ذرات پودر لاستیک در ماتریس قیر را تعیین کرد و در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲. کد نمونه و پرشدگی حجمی تمام قیرهای اصلاح شده

با پودر لاستیک

کد نمونه	مقدار (% وزنی)	پرشدگی حجمی (%)
CR10	۱۰/۰۰۰	۹/۱۹۳
CR15	۱۵/۰۰۰	۱۳/۸۵۶

همچنین، به منظور دستیابی به مقادیر پرشدگی حجمی ۱۸ و ۳۵ در ماستیک‌های آسفالتی ساخته شده با فیلر سیلیسی، درصد‌های حجمی موردنظر بر اساس وزن مخصوص اندازه‌گیری شده برای فیلر سیلیسی طی مراحل‌ی که در ادامه به

مقادیر جرمی ارائه شده در جدول ۳ تبدیل گردید. سپس فیلرها به قیر خالص اضافه شده و اختلاط با میکسر دور پایین به مدت ۱۲۰ ثانیه صورت پذیرفته است.

$$\rho_{bitumen} = \frac{m_b}{v_b} \quad (8)$$

$$\rho_{filler} = \frac{m_f}{v_f} \quad (9)$$

که در آن از زیرنویس **b** و **f** بترتیب برای قیر و فیلر سیلیسی استفاده شده است. برای تعیین جرم مخصوص (**M**) و حجم (**V**) ماستیک، می‌توان از معادلات زیر با صرف نظر کردن میزان فضای خالی استفاده نمود.

$$m_b + m_f = M \quad (10)$$

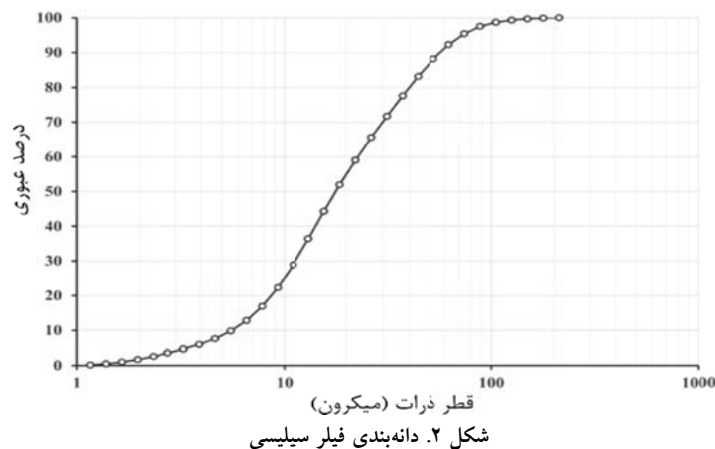
$$v_b + v_f = V \quad (11)$$

با جایگزین کردن اعداد ۰٫۱۸ و ۰٫۳۵ بجای مقدار ۰٫۷۴ می‌توان درصد جرمی فیلر سیلیسی را به صورت زیر تعیین نمود.

$$\%mass = \frac{m_f}{M} = \frac{m_f}{m_b + m_f} \quad (12)$$

در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به قیر پایه اضافه و به مدت ۴-۵ دقیقه مخلوط شده‌اند.

منحنی دانه‌بندی فیلر طبق دستورالعمل ISO 13320 انجام شده و در شکل (۲) نشان داده شده است. فیلرها به تدریج و



۳-۳- آزمایش جاروب فرکانس

پیش‌بینی شده ماستیک از مدل GSCS با نتایج تجربی در نسبت پرشدگی ۳۵٪ فیلر بیشتر از نسبت پرشدگی ۱۸٪ است. به عبارت دیگر با افزایش درصد پرشدگی حجمی فیلر، صحت نتایج پیش‌بینی شده مدل GSCS کاهش پیدا می‌کند که علت این امر نقش اندرکنش شیمیایی بین فیلر و قیر می‌باشد که مدل GSCS نمی‌تواند به خوبی آن را مدل‌سازی کند.

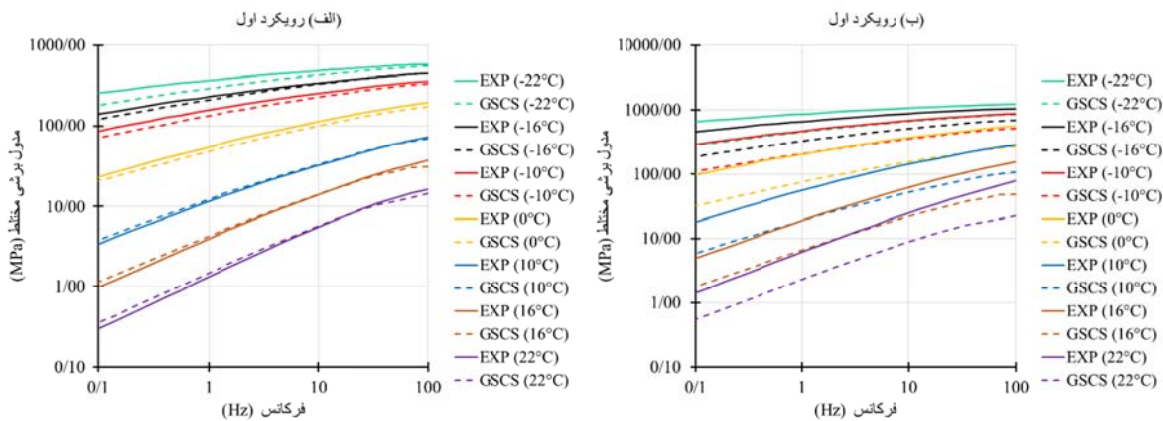
شکل ۵ میزان اختلاف G^* قیر اصلاح شده با پودر لاستیک را با نتایج پیش‌بینی شده از مدل GSCS نمایش داده است. در تمامی دماها با تقریب خوبی می‌توان گفت نتایج مدول برشی مختلط قیر اصلاح شده از مدل GSCS کمتر از نتایج تجربی است و هر چه دما کمتر شده نتایج مدول برشی مختلط قیر اصلاح شده با پودر لاستیک به دست آمده از مدل GSCS به نتایج تجربی نزدیکتر شده است.

مشابه رویکرد اول، شکل ۶ و ۷ به ترتیب میزان اختلاف مدول برشی مختلط ماستیک‌های ساخته شده با فیلر سیلیسی را در نسبت‌های پرشدگی ۱۸٪ و ۳۵٪ با نتایج پیش‌بینی شده از مدل GSCS نمایش داده است. با توجه به شکل ۶ و ۷، در دماهای بالاتر میزان اختلاف مدول برشی مختلط ماستیک به دست آمده از مدل GSCS با نتایج تجربی افزایش یافته است. به عبارت دیگر، بین خطای مدل GSCS و دما رابطه مستقیم وجود دارد. همچنین اختلاف بین مدول برشی ماستیک به دست آمده از مدل GSCS با نتایج تجربی در نسبت پرشدگی ۳۵٪ فیلر بیشتر از نسبت پرشدگی ۱۸٪ است. همچنین در فرکانس‌های بالاتر، مدل GSCS با تقریب خوبی مقدار مدول برشی مختلط ماستیک را پیش‌بینی کرده است.

در این پژوهش آزمایش جاروب فرکانسی با استفاده از دستگاه رثومتر برش دینامیکی (DSR) با هدف تعیین مشخصات ویسکوالاستیک قیر اصلی و قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک و ماستیک‌های آسفالتی (G^* و δ) مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمایش در بازه فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز (در ۲۱ فرکانس مختلف) و در ۷ دمای متفاوت شامل ۱۶-، ۱۰-، صفر، ۱۰، ۱۶ و ۲۲ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. دامنه کرنش اعمال شده به نمونه‌ها ۰/۰۱ درصد بوده تا اطمینان حاصل شود که رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌ها در محدوده خطی باقی می‌ماند. مطابق ASTM D7175 از نمونه‌هایی با قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۲ میلی‌متر بین صفحه‌های موازی استفاده شده است. همه نمونه‌ها روی صفحات DSR در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس با سرد کردن آنها سایر دماهای آزمایش تأمین شده‌اند.

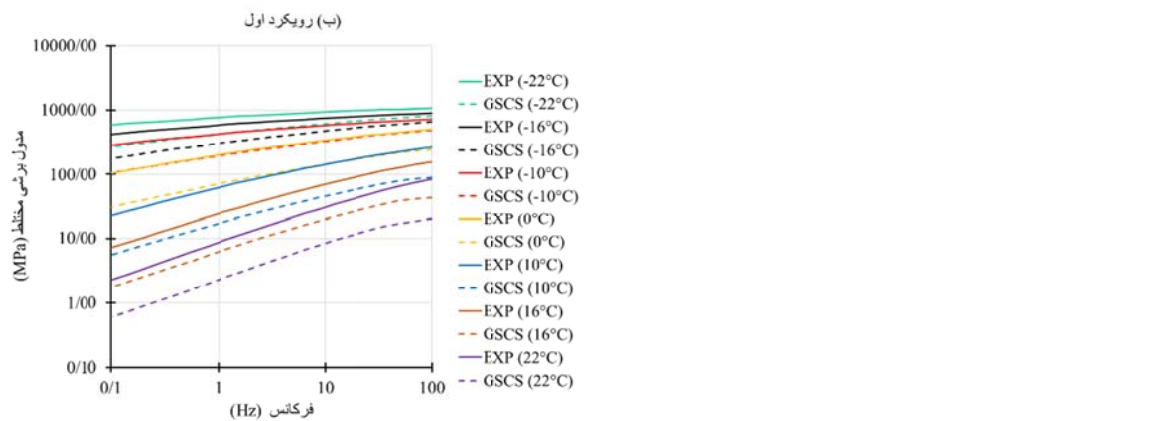
۴- نتایج آزمایش‌ها و بحث

با توجه به خروجی آزمایش جاروب فرکانس، نمودارهای مدول برشی مختلط قیر اصلی، قیرهای اصلاح شده با پودر پلاستیک و ماستیک‌های آسفالتی در ۷ دمای مختلف ترسیم شده است. شکل ۳ و ۴ به ترتیب میزان اختلاف مدول برشی مختلط ماستیک‌های ساخته شده با فیلر سیلیسی را در نسبت‌های پرشدگی ۱۸٪ و ۳۵٪ با نتایج پیش‌بینی شده از مدل GSCS از طریق رویکرد اول نمایش داده است. با توجه به شکل ۳ و ۴، در دماهای بالاتر میزان اختلاف مدول برشی مختلط پیش‌بینی شده ماستیک از مدل GSCS با نتایج تجربی افزایش یافته است. به عبارت دیگر، بین خطای مدل GSCS و دما رابطه مستقیم وجود دارد. همچنین اختلاف بین مدول برشی



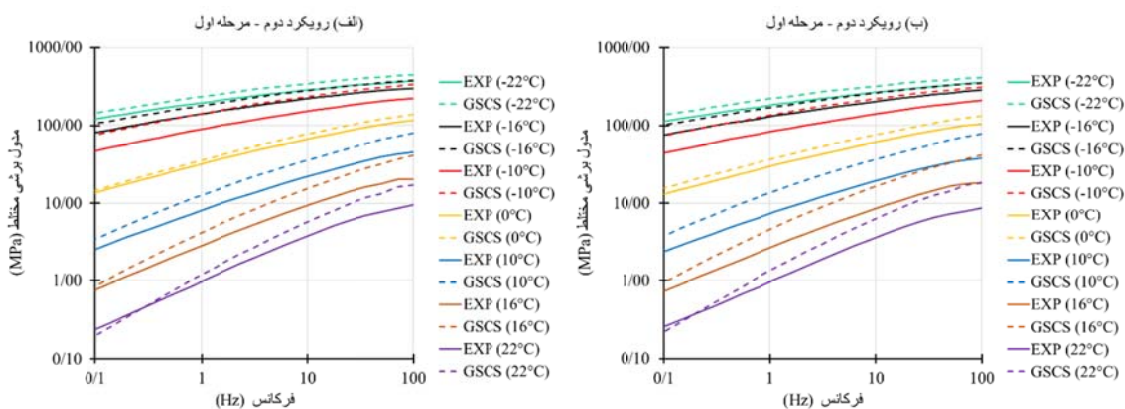
شکل ۳. مقایسه منحنی مدول برشی مختلط ماستیک ساخته شده از قیر اصلاح شده با (۱۰٪ وزنی) پودر لاستیک و فیبر سیلیسی

(الف) ۱۸٪ پرشدگی فیبر (ب) ۳۵٪ پرشدگی فیبر

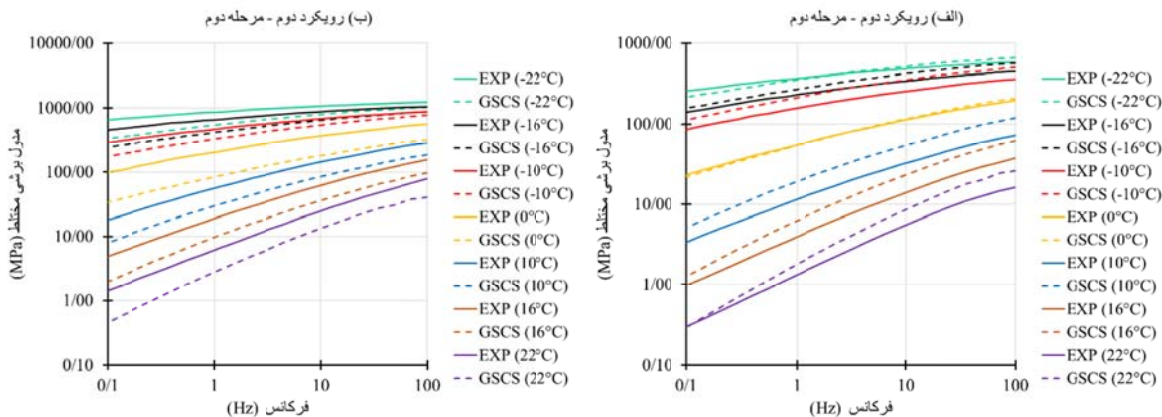


شکل ۴. مقایسه منحنی مدول برشی مختلط ماستیک ساخته شده از قیر اصلاح شده با (۱۵٪ وزنی) پودر لاستیک و فیبر سیلیسی

(الف) ۱۸٪ پرشدگی فیبر (ب) ۳۵٪ پرشدگی فیبر

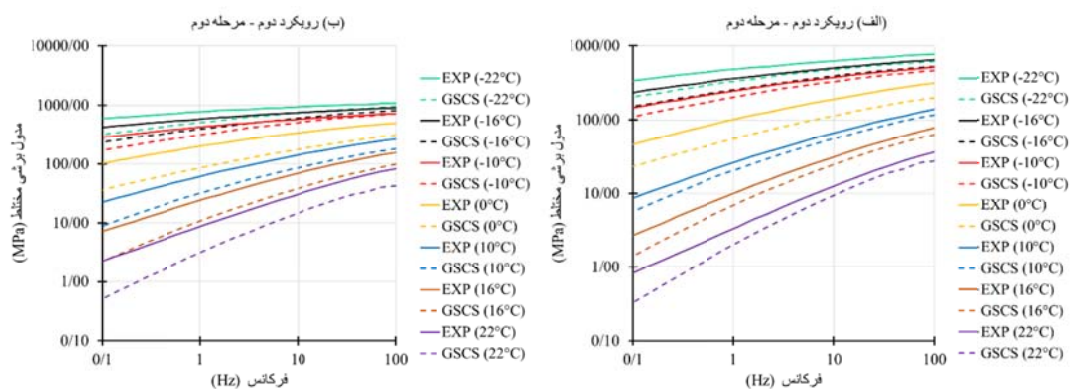


شکل ۵. مقایسه منحنی G^* قیر اصلاح شده با پودر لاستیک، (الف) ۱۰٪ وزنی پودر لاستیک (ب) ۱۵٪ وزنی پودر لاستیک



شکل ۶. مقایسه منحنی مدول برشی مختلط ماستیک ساخته شده از قیر اصلاح شده با (۱۰٪ وزنی) پودر لاستیک و فیبر سیلیسی

(الف) ۱۸٪ پرشدگی فیبر (ب) ۳۵٪ پرشدگی فیبر

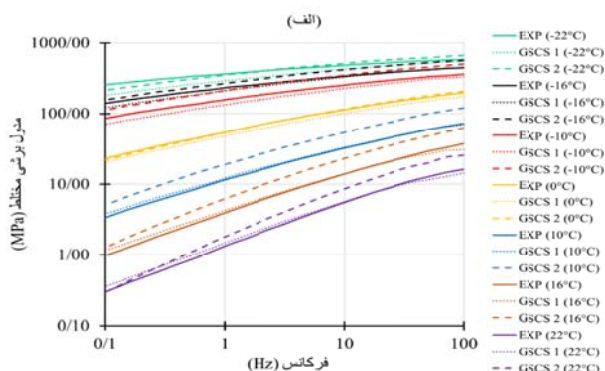


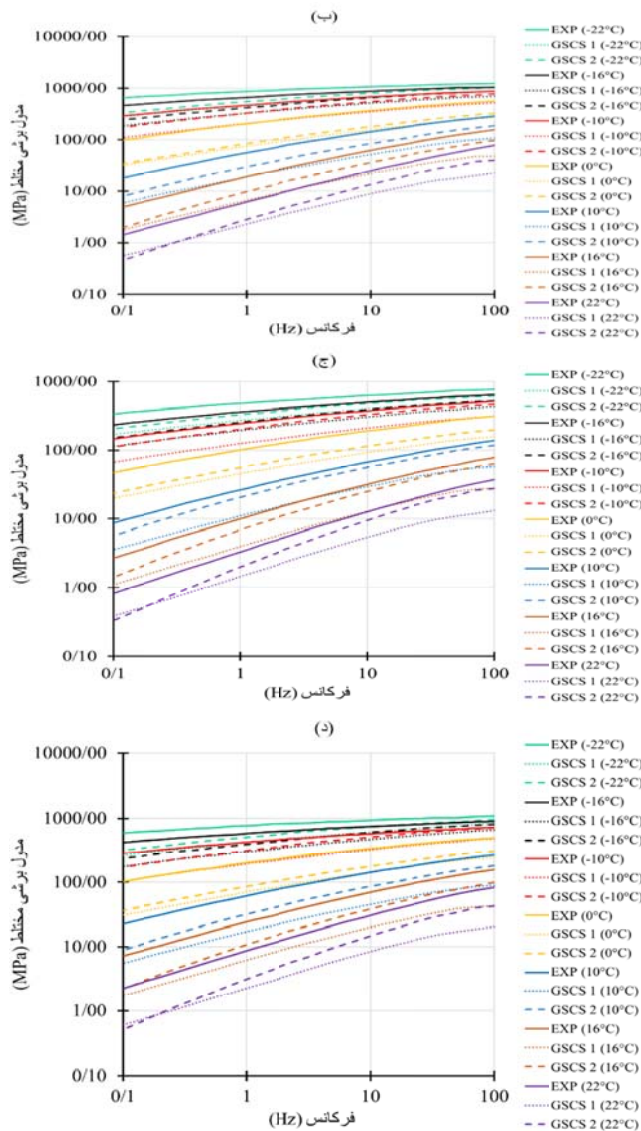
شکل ۷. مقایسه منحنی مدول برشی مختلط ماستیک ساخته شده از قیر اصلاح شده با (۱۵٪ وزنی) پودر لاستیک و فیبر سیلیسی

(الف) ۱۸٪ پرشدگی فیبر (ب) ۳۵٪ پرشدگی فیبر

رویکرد اول افزایش یافته به طوری که در نسبت پرشدگی ۳۵ درصد میزان مقادیر بدست آمده از مدل GSCS بسیار کمتر از مقادیر تجربی می‌باشد. همچنین در نسبت‌های پرشدگی بالا رویکرد دوم خطای کمتری را دارا می‌باشد و انتخاب مناسب‌تری برای پیش‌بینی مقادیر مدول برشی مختلط ماستیک آسفالتی است.

شکل ۸ اختلاف مقادیر مدول برشی مختلط پیش‌بینی شده توسط مدل GSCS از طریق رویکرد اول و رویکرد دوم را با نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های ماستیک آسفالتی نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸-الف در نسبت پرشدگی ۱۸٪ رویکرد اول مدل GSCS پیش‌بینی دقیق‌تری از نتایج تجربی نموده است اما با افزایش نسبت پرشدگی ماستیک خطای پیش‌بینی





شکل ۸. مقایسه منحنی مدول برشی مختلط بدست آمده از رویکرد اول (GSCS 1) و رویکرد دوم (GSCS 2) با نتایج آزمایشگاهی (EXP) برای الف) ماستیک ساخته شده از قیر اصلاح شده با (۱۰٪ وزنی) پودر لاستیک و ۱۸٪ پرشدگی فیلر سیلیسی (ب) ماستیک ساخته شده از قیر اصلاح شده با (۱۰٪ وزنی) پودر لاستیک و ۳۵٪ پرشدگی فیلر سیلیسی (ج) ماستیک ساخته شده از قیر اصلاح شده با (۱۵٪ وزنی) پودر لاستیک و ۱۸٪ پرشدگی فیلر سیلیسی (د) ماستیک ساخته شده از قیر اصلاح شده با (۱۵٪ وزنی) پودر لاستیک و ۳۵٪ پرشدگی فیلر سیلیسی

استفاده شده است. به طور کلی نتایج زیر به عنوان

خروجی های این پژوهش قابل ارائه است:

- هرچه نسبت پرشدگی فیلر در ماستیک آسفالتی بیشتر شود، مقدار خطای نسبی مدول برشی مختلط مدل GSCS بیشتر شده است که علت این امر نقش اندرکنش شیمیایی بین فیلر و قیر می باشد که مدل GSCS نمی تواند به خوبی آن را مدل سازی کند.

- در دماهای بالاتر میزان اختلاف مدول برشی مختلط ماستیک پیش بینی شده از مدل GSCS با نتایج تجربی افزایش یافته

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه از مدل GSCS برای پیش بینی رفتار ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و ماستیک استفاده شده است. مدول مختلط برشی (G^*) و زاویه فاز (δ) به عنوان پارامترهای اصلی و نماینده رفتار ویسکوالاستیک ماستیک انتخاب گردیدند و متغیرهای خروجی در نظر گرفته شدند. از آزمایش جاروب فرکانس برای تعیین این دو پارامتر در دماهای ۲۲، ۱۶، ۱۰، ۰، -۱۰، -۱۶، -۲۲ درجه سانتی گراد

-Ma, X., Chen, H., Yang, P., Xing, M., Niu, D., & Wu, S. (2019). Assessment of existing micro-mechanical models for asphalt mastic considering inter-particle and physico-chemical interaction. *Construction and Building Materials*, 225, 649–660.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.227

-Palit, S. K., Reddy, K. S., & Pandey, B. B. (2004). Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1).

[doi.org/10.106108991561\(2004\)16:1\(45\)](https://doi.org/10.106108991561(2004)16:1(45))

-Pichler, C., Lackner, R., & Aigner, E. (2012). Generalized self-consistent scheme for upscaling of viscoelastic properties of highly-filled matrix-inclusion composites Application in the context of multiscale modeling of bituminous mixtures. *Composites Part B: Engineering*, 43(2).

doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.05.034

-Saberik, F., Fakhri, M., & Azami, A. (2017). Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 165.

doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.079

-Tahami, S. A., Mirhosseini, A. F., Dessouky, S., Mork, H., & Kavussi, A. (2019). The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process. *Construction and Building Materials*, 222.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.180

-Underwood, B. S., & Kim, Y. R. (2014). Structuralization as characteristic to link the mechanical behaviours of asphalt concrete at different length scales. *Asphalt Pavements Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements, ISAP 2014*, 1.

doi.org/10.1201/b17219-117

-Wang, T., Xiao, F., Amirhanian, S., Huang, W., & Zheng, M. (2017). A review on low temperature performances of rubberized asphalt materials. In *Construction and Building Materials*, Vol. 145.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.031

-Wang, T., Xiao, F., Zhu, X., Huang, B., Wang, J., & Amirhanian, S. (2018). Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement. In *Journal of Cleaner Production*, Vol. 180.

doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.086

است. به عبارت دیگر، بین خطای مدل GSCS و دما رابطه مستقیم وجود دارد.

-در مرحله اول مدل‌سازی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک، مدل GSCS در فرکانس‌های پایین‌تر، مقدار مدول برشی مختلط قیر اصلاح شده را دست بالا پیش‌بینی کرده است.

-در نسبت پرشدگی ۱۸٪ ماستیک ساخته از قیر اصلاح شده با ۱۰ درصد وزنی پودرلاستیک، خطای نسبی رویکرد اول کمتر از رویکرد دوم به دست آمده است.

۶-مراجع

-Bartolozzi, I., Antunes, I., & Rizzi, F. (2012). The environmental impact assessment of Asphalt Rubber: Life Cycle Assessment. *5th Asphalt Rubber Roads of the Future International Conference*.

-Bressi, S., Santos, J., Orešković, M., & Losa, M. (2021). A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(4).

doi.org/10.1080/10298436.2019.1623404

-Buttler, William G, Bozkurt, Diyar, Al-Khateeb, Ghazi G, Waldhoff, & Angela S. (n.d.). *Understanding Asphalt Mastic Behavior Through Micromechanics*.

-Faheem, A. F., & Bahia, H. U. (2010). Modelling of asphalt mastic in terms of filler bitumen interaction. *Road Materials and Pavement Design*, 11, 281–303.

doi.org/10.1080/14680629.2010.9690335

-Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., & Blengini, G. A. (2017). Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 117.

doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015

-Li, J., Ni, F., & Lu, Q. (2018). Experimental Investigation into the Multiscale Performance of Asphalt Mixtures with High Contents of Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6).

[doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002269](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002269)

-Lo Presti, D. (2013). Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863–881.

doi.org/10.1016/J.conbuildmat.2013.09.007

Prediction of Rheological Properties of Asphalt Binder and Asphalt Mastic Containing Crumb Rubber Using Generalized Self-Consistent Micromechanical Model (GSCS)

Arezoo Khorashadizadeh, M.Sc., Grad., Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Pouria Hajikarimi, Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Mohammad Rahi, Director of Department of Research & Development, Pasargad Oil Company, Tehran, Iran.

Sahar Maniei, Supervisor of Department of Research & Development, Pasargad Oil Company, Tehran, Iran.

E-mail: phajikarimi@aut.ac.ir

Received: September 2003 Accepted: January 2024

ABSTRACT

Since the 1990s, micromechanical models have been used to predict mastic asphalt properties. However, a significant number of these models are deemed unsatisfactory in predicting the properties of asphalt mastics due to their failure to account for the physical and chemical interactions between the bitumen and filler, as well as the interactions between filler particles. In this article, the generalized self-consistent scheme (GSCS) micro-mechanical model is investigated for its efficacy in predicting the complex shear modulus of modified bitumen with crumb rubber and asphalt mastics. The micro-mechanical model is founded on the mechanical properties of the constituent materials and their particle interactions. One base bitumen and two modified bitumen with crumb rubber at weight percentages of 10% and 15% were selected to produce asphalt mastics with two different filler volume ratios of 18% and 35%. The accuracy of the predictions was evaluated by comparing the relative difference between the experimental and predicted complex shear modulus curves using the GSCS model. The results demonstrate that the generalized self-consistent scheme model has satisfactory predictions for low filler volume ratios, but its accuracy is significantly influenced by frequency. Furthermore, as the filler percentage increases, the model error increases, and its reliability is compromised. Therefore, it is imperative to consider the chemical interaction between bitumen and filler, particularly modified bitumen and fillers, in developing models to address this inefficiency and problem.

Keywords: Asphalt Mastic, Crumb Rubber, Silica Filler, Micro-mechanical Model