

# امکان‌یابی ارائه منحنی جامع ویژگی‌های بنیادی ویسکوالاستیک قیر با استفاده از نتایج آزمایش جاروب دمایی

مسعود غلامی<sup>۱</sup>، پوریا حاجی کریمی<sup>۲\*</sup>، علی خدائی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
- ۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

phajikarimi@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳

## چکیده

ویژگی‌های ویسکوالاستیک قیرها براساس منحنی‌های جامع مدول برشی مختلط ( $G^*$ ) و زاویه اختلاف فاز ( $\delta$ ) بیان می‌شوند که این منحنی‌ها به طور متداول از انتقال افقی نمودارهای نتایج آزمایش جاروب فرکانسی به کمک ضرایب انتقال دمایی ایجاد می‌شوند. در این پژوهش، توسعه منحنی‌های جامع قیر به کمک نتایج آزمایش جاروب دمایی به جای استفاده از نتایج آزمایش جاروب فرکانسی مورد بررسی و امکان‌سنجی قرار گرفته است. آزمایش‌های جاروب دمایی و جاروب فرکانسی روی قیرهای ساده و اصلاح‌شده حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد پلیمر استایرن-اتیلن/پروپیلن-استایرن (SEPS) به ترتیب در بازه‌های دمایی ۳۰ الی ۹۰ و ۱۰ الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام و به منظور تعیین ضریب انتقال، از روش LCPC استفاده شده است. سپس منحنی‌های جامع مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز قیرها با استفاده از نتایج آزمایش جاروب فرکانسی و جاروب دمایی رسم گردید و الگوها، رفتار و مقادیر نمودارها با یکدیگر مقایسه و همبستگی نتایج تعیین گردید. نتایج نشان داد که روش LCPC به خوبی می‌تواند در تولید منحنی‌های جامع از نتایج آزمایش جاروب دمایی استفاده شود و منحنی‌های جامع با الگو و مقدار صحیح را تشکیل دهد. به علاوه، مقایسه منحنی‌های جامع حاصل از نتایج آزمایش‌های جاروب فرکانسی و جاروب دمایی نشان داد که الگوهای موجود و مقادیر مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز در این منحنی‌های جامع توسعه داده شده، معادل است. بنابراین نتایج آزمایش جاروب دمایی که سریع‌تر از آزمایش جاروب فرکانسی است، می‌تواند جهت ترسیم منحنی‌های جامع مربوط به ویژگی‌های ویسکوالاستیک قیرهای ساده و اصلاح‌شده استفاده شود.

**واژگان کلیدی:** قیر، روش LCPC، منحنی جامع، آزمایش جاروب فرکانسی، آزمایش جاروب دمایی.

## ۱- مقدمه

دماهای متفاوتی را در محدوده ۴۰- تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد تجربه می‌کنند. این مواد ویسکوالاستیک در دماهای مختلف،

مخلوط‌های آسفالتی در فرایندهای تولید، اجرا و بهره‌برداری

و مخلوط‌های آسفالتی [13] کاربرد دارد. این معادله برای دماهای نزدیک‌تر به دمای شیشه‌ای ( $T_g$ ) تناسب بهتری از داده‌ها را فراهم می‌کند [14]. در مقابل روش کیلیبل اصلاح شده عملکرد و دقت مطلوبی در محاسبه ضریب انتقال مخلوط‌های آسفالتی از خود نشان می‌دهد اما این روش نمی‌تواند به خوبی ضرایب انتقال قیرهای اصلاح نشده در دماهای پایین را مشابه با روش WLF محاسبه کند [6, 14]. معادله لگاریتمی - خطی تنها برای تعیین ضریب انتقال مخلوط‌های آسفالتی روش مناسبی است [6, 12]. مطالعات پیشین گویای آن است که روش VTS در محاسبه ضرایب انتقال قیرهای اصلاح نشده در فرکانس‌های پایین و یا دماهای بالا چندان روش قابل اتکایی نیست [16]. یکی از روش‌های محاسباتی که به منظور محاسبه ضریب انتقال خواص ویسکوالاستیک قیر و مخلوط‌های آسفالتی تدوین شده است، روش LCPC<sup>۹</sup> است که در سال ۲۰۰۶ توسط شیو<sup>۱۰</sup> و همکاران [16] براساس روابط کرامر-کرونیگ<sup>۱۱</sup> توسعه داده شد. این روش برای محاسبه ضرایب انتقال قیر و مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوسان‌های جزئی مقادیر ضرایب انتقال حاصل از این روش به خطاهای مرتبط با اندازه‌گیری و به کارگیری تابع زاویه اختلاف فاز ( $\delta$ ) مربوط می‌شوند [17, 18]. در پژوهش یوسف<sup>۱۲</sup> و همکاران کلیه این روش‌ها بررسی و مقایسه شده‌اند و در نهایت مشاهده شد که روش LCPC و WLF بهترین نتایج را از منظر محاسبه ضریب انتقال قیرهای اصلاح شده، اصلاح نشده، ماستیک و مخلوط‌های آسفالتی دارند [6]. آنجالی و همکاران [19] در پژوهشی به بیان یک روش نوآورانه به منظور تولید منحنی‌های جامع پرداختند. آن‌ها در این پژوهش علاوه بر جابه‌جایی افقی از دوران نیز به منظور تولید منحنی‌های جامع استفاده کردند. کاربرد اصلی این روش در تعیین درصد اصلاح‌کننده می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که نوع اصلاح‌کننده، درصد مصرفی و

رفتار مکانیکی متفاوتی را از خود بروز می‌دهند [3-1] روسازی‌های آسفالتی در طول عمر خود علاوه بر قرارگیری تحت بارگذاری ترافیکی با نرخ‌های مختلف، تحت تنش‌های ناشی از تغییرات دما نیز قرار می‌گیرند. با این حال با توجه به آنکه اندازه‌گیری مشخصات مکانیکی مخلوط آسفالتی در فرکانس‌های بالا و دماهای پایین در آزمایشگاه و با استفاده از تجهیزات در دسترس ممکن نیست یا هزینه قابل توجهی دارد، اصل برهم نهی زمان-دما مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌تواند خواص ویسکوالاستیک قیر و مخلوط‌های آسفالتی را در محدوده وسیعی از دماها و فرکانس‌های بارگذاری تعیین کند [5, 4]. ویژگی‌های رئولوژیکی قیر و مخلوط‌های آسفالتی به طور متداول براساس منحنی‌های جامع مدول برشی مختلط ( $G^*$ ) و زاویه اختلاف فاز ( $\delta$ ) بیان می‌شوند [7, 6]. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی در دماها، فرکانس‌ها و زمان‌های بارگذاری متفاوت با استفاده از این منحنی‌ها قابل پیش‌بینی است [8]. منحنی‌های جامع در یک دمای مرجع انتخابی، از انتقال افقی نمودارهای ویژگی‌های ویسکوالاستیک قیر و مخلوط‌های آسفالتی (نتایج آزمایش جاروب فرکانسی) به کمک ضرایب انتقال<sup>۱</sup> دمایی ایجاد می‌شوند. لازم به ذکر است در محدوده رفتار ویسکوالاستیک خطی نیازی به انتقال قائم نبوده ولی چنانچه رفتار ماده تحت تنش‌های بزرگتر یا دماهای بالاتر غیرخطی شود، ضریب انتقال قائم نیز باید در نظر گرفته شود [9, 10]. براساس مطالعات وادا<sup>۲</sup> و هیروس<sup>۳</sup>، با توجه به بازه دمایی نسبتاً محدود عملکرد قیر در روسازی‌های آسفالتی، ضریب انتقال قائم نتایج را به صورت جزئی تغییر می‌دهد [11]. روش‌های مختلفی به منظور تعیین ضریب انتقال  $\alpha_T$  وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به معادله WLF<sup>۴</sup>، روش کیلیبل<sup>۵</sup> اصلاح شده، روش لگاریتمی - خطی<sup>۶</sup>، معادله VTS<sup>۷</sup>، معادله آرنیوس<sup>۸</sup> ... اشاره کرد [6]. روش WLF به منظور تعیین منحنی‌های جامع انواع قیر [12]

7. Viscosity Temperature Susceptibility  
8. Arrhenius Equation  
9. Laboratoire Central des Ponts et Chaussees  
10. Chailleux  
11. Kramers-Kronig  
12. Yusoff

1. Shift factor  
2. Wada  
3. Hirose  
4. Williams, Landel and Ferry Equation  
5. Modified Kaelble Method  
6. Log-Linear approach

پلیمری استایرن - اتیلن/پروپیلن - استایرن (SEPS) استفاده شده و منحنی‌های جامع ترسیم شده مبتنی بر نتایج این آزمون با منحنی جامع ترسیم شده با استفاده از نتایج آزمایش جاروب فرکانسی با یکدیگر مقایسه شده است. هدف اصلی این پژوهش بررسی امکان‌پذیر بودن استفاده از نتایج آزمایش جاروب دمایی (که در یک فرکانس بارگذاری انجام می‌شود)، به عنوان آزمایشی سریع‌تر و آسان‌تر نسبت به آزمایش جاروب فرکانسی، در ترسیم منحنی جامع مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز قیرهای خالص و اصلاح شده است.

## ۲- مبانی نظری

رابطه (۱) ضریب انتقال دمایی را برای مواد ویسکوالاستیک بر حسب فرکانس بیان می‌کند:

$$\alpha_T = \frac{f_T}{f} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $\alpha_T$  ضریب انتقال،  $f$  فرکانس انجام آزمایش و  $f_T$  فرکانس کاهش یافته در دمای مرجع است. مقدار ضریب انتقال در دمای مرجع برابر با ۱ است [6].

در این پژوهش روش LCPC به منظور تعیین ضرایب انتقال موردنیاز در ترسیم منحنی جامع مورد استفاده قرار گرفته است. روش LCPC در سال ۲۰۰۶ توسط شیو و همکاران براساس روابط کرامر-کرونیگ توسعه داده شد [16]. روابط کرامر-کرونیگ، رابطه تبدیل بخش حقیقی و بخش مختلط یک تابع مختلط را بیان می‌کند که برای توابعی که اصل برهم نهی بولتزمن<sup>۲</sup> در آن‌ها برقرار است، قابل استفاده‌اند. بنابراین این روابط می‌توانند برای مدول برشی مختلط (مدول ذخیره<sup>۳</sup> و مدول اتلاف<sup>۴</sup>) و زاویه اختلاف فاز مورد استفاده قرار گیرند. کاربرد روابط کرامر-کرونیگ در محاسبه مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز در روابط (۲ و ۳) قابل مشاهده است [16]:

$$\text{Log} |G_{(\omega)}^*| - \text{Log} |G_{(\omega)}^*| = -\frac{2}{\pi} \times \int_0^{\infty} \frac{u \times \delta_{(u)} - \omega \times \delta_{(\omega)}}{u^2 - \omega^2} du \quad (2)$$

شرایط پیری بر ضریب چرخش تأثیر می‌گذارد. منحنی‌های جامع به صورت گسترده توسط پژوهشگران به منظور تعیین خواص ویسکوالاستیک قیرها به کار گرفته شده‌اند که برای تشکیل این منحنی‌ها در کلیه مقیاس‌ها (قیر، ماستیک، ملات و مخلوط)، به طور متداول از داده‌های آزمایش جاروب فرکانسی استفاده می‌شود [8, 20, 23, 25, 24] در پژوهشی دیگر به توسعه یک مدل سیگموئیدال دوگانه<sup>۱</sup> جدید برای برازش بر منحنی‌های جامع پرداختند و مشاهده کردند که استفاده از این مدل، عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی خواص ویسکوالاستیک قیرهای ساده و اصلاح شده مورد بررسی داشته است.

زمانبر بودن انجام آزمایش‌های جاروب فرکانسی، ضرورت رسیدن نمونه به دمای موردنظر و عدم هماهنگی کامل نتایج آن برای ترسیم منحنی جامع قیر در محل همپوشانی دو نمودار، از جمله مهمترین دغدغه‌هایی است که در جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز برای ترسیم منحنی جامع بر اساس این آزمایش بروز می‌کند. آزمایش‌هایی مانند آزمایش جاروب دمایی نیز می‌توانند برای تعیین ویژگی‌های ویسکوالاستیک قیرها به کار گرفته شوند، اما با بررسی مقالات گذشته مشاهده می‌شود که نتایج آزمایش‌های جاروب دمایی و جاروب فرکانسی در دما و فرکانس یکسان، دقیقاً مقدار مشابهی نخواهد شد و مقادیر اندازه‌گیری شده با یکدیگر اختلاف دارند با توجه به آنکه روش‌های رایج ترسیم منحنی جامع معرفی شده در ادبیات موضوع بر استفاده از داده‌های آزمایش جاروب فرکانسی متمرکز هستند، بکارگیری این نتایج برای ترسیم منحنی جامع همراه با پیچیدگی بیشتری خواهد بود و این نگرانی وجود دارد که استفاده از این نتایج منجر به تولید منحنی‌های جامع با الگوها و مقادیر صحیح نشود. این موضوع در مورد قیرهای اصلاح شده حاوی افزودنی‌های پلیمری ممکن است دغدغه بیشتری نسبت به قیرهای خالص ایجاد کند. در این مطالعه نتایج آزمایش جاروب دمایی به منظور ترسیم منحنی جامع قیر خالص و قیر حاوی افزودنی

می‌باشد)، منحنی جامع مذکور با استفاده از مجموع تجمعی  $T_i$  پس ضریب انتقال دمای  $\text{Log}(\alpha_{(T_i, T_j)})$  ساخته خواهد شد. نسبت به دمای  $T_{ref}$  مطابق با رابطه (۷) محاسبه خواهد شد [16]:

$$\text{Log}(\alpha_{(T_i, T_{ref})}) = \sum_{j=1}^{j=ref} \text{Log}(\alpha_{(T_j, T_{ref})}) \quad (7)$$

در نهایت با جایگزینی رابطه (۶) در رابطه (۷)، مقدار ضریب انتقال دمای  $T_i$  نسبت به دمای  $T_{ref}$  به صورت رابطه (۸) قابل محاسبه خواهد بود [16]:

$$\text{Log}(\alpha_{(T_i, T_{ref})}) = \sum_{j=1}^{j=ref} \frac{\text{Log}(|G_{(T_j, \omega)}^*|) - \text{Log}(|G_{(T_{i+1}, \omega)}^*|)}{\delta_{avg}^{(T_j, T_{i+1})}(\omega)} \times \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

### ۳- مواد و روش آزمون

#### ۳-۱- مواد و مصالح

در این پژوهش از قیر خالص با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ (طبقه‌بندی عملکردی PG58-22 براساس پروتکل سوپرپیو<sup>۱</sup>) کارخانه تهران شرکت نفت پاسارگاد استفاده شده است. جدول ۱ خواص فیزیکی و شیمیایی قیر خالص مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات قیر خالص با درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰

Properties	Value	Standard Method
Density (g/cm <sup>3</sup> )	۱,۰۳	ASTM D7
Penetration (0.1mm)	89	ASTM D5
Softening Point (°C)	49	ASTM D36
Ductility (cm)	> 100	ASTM D113
Flash Point(°C)	> 250	ASTM D92

**Table 1.** The Properties of neat bitumen with an 85-100 penetration grade

علاوه بر آن، در این پژوهش از پلیمر SEPS به منظور اصلاح قیر خالص و تولید قیر پلیمری حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی SEPS استفاده شده است. نمونه‌های حاوی این پلیمر به ترتیب با کدهای SEPS2، SEPS4، و SEPS6 مشخص شده‌اند. این پلیمر مصرفی از شرکت Kraton Polymer تهیه شده است و مشخصات آن در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

$$\delta_{(\omega)} = \frac{2\omega}{\pi} \times \int_0^{\infty} \frac{\text{Log}|G_{(u)}^*| - \text{Log}|G_{(\omega)}^*|}{u^2 - \omega^2} du \quad (3)$$

که در آن،  $G_{(\omega)}^*$  مدول برشی مختلط در فرکانس زاویه‌ای  $\omega$ ،  $G_{(\infty)}^*$  مدول شیشه‌ای،  $\delta_{(\omega)}$  زاویه اختلاف فاز در فرکانس زاویه‌ای  $\omega$  و فرکانس زاویه‌ای هستند.

بوئیج<sup>۱</sup> و همکاران با ساده‌سازی رابطه (۳) موفق شدند تقریبی از این معادله بدست بیاورند که در رابطه (۴) قابل مشاهده است (۲۶).

$$\delta_{(\omega)} \approx \frac{\pi}{2} \times \frac{d\text{Log}(|G_{(\omega)}^*|)}{d\text{Log}(\omega)} \quad (4)$$

شیو و همکاران از رابطه (۴) به منظور تعیین ضریب انتقال استفاده کردند. برای این منظور ابتدا دو فرکانس بسیار نزدیک  $\omega_i$  و  $\omega_{i+1}$  را در نظر گرفتند و از دو طرف معادله مذکور در این بازه انتگرال گرفته و رابطه (۵) را ایجاد نمودند [16]:

$$\delta_{avg}^{(\omega_i, \omega_{i+1})} \times \frac{2}{\pi} = \frac{\text{Log}(|G_{(T, \omega_{i+1})}^*|) - \text{Log}(|G_{(T, \omega_i)}^*|)}{\text{Log}(\omega_{i+1}) - \text{Log}(\omega_i)} \quad (5)$$

که در این رابطه،  $\delta_{avg}^{(\omega_i, \omega_{i+1})}$  میانگین زاویه‌های اختلاف فاز اندازه‌گیری شده در دو فرکانس  $\omega_i$  و  $\omega_{i+1}$  است. همچنین در صورتی که درون‌یابی با توجه به دما انجام شود، می‌توان به تقریب دقیق‌تری از زاویه اختلاف فاز دست یافت. همچنین براساس اصل برهم‌نهی زمان-دما، در محل هم‌پوشانی داده‌ها خواهیم داشت:  $|G_{(T_i, \omega_i)}^*| = |G_{(T_{i+1}, \omega_{i+1})}^*|$ ، پس برای دو دمای نزدیک به هم  $T_i$  و  $T_{i+1}$  رابطه (۵) را می‌توان به صورت رابطه (۶) ساده‌سازی و بازنویسی کرد [16]:

$$\delta_{avg}^{(T_i, T_{i+1})}(\omega_{i+1}) \times \frac{2}{\pi} = \frac{\text{Log}(|G_{(T_i, \omega_{i+1})}^*|) - \text{Log}(|G_{(T_{i+1}, \omega_{i+1})}^*|)}{\text{Log}(\omega_{i+1}) - \text{Log}(\omega_i)} \quad (6)$$

که در این رابطه،  $\delta_{avg}^{(T_i, T_{i+1})}(\omega_{i+1})$  میانگین زاویه‌های اختلاف فاز اندازه‌گیری شده در دو دمای  $T_i$  و  $T_{i+1}$  و فرکانس  $\omega_{i+1}$  می‌باشد. بنابراین براساس رابطه (۶)، مقدار ضریب انتقال را می‌توان تنها در یک فرکانس محاسبه نمود. با فرض اندازه‌گیری دماها به صورت  $T_1, T_2, \dots, T_{i+1}, \dots, T_n$  برای تولید منحنی جامع مرتبط با  $T_{ref}$  (که مابین ۱ و  $n$

## ۱-۲-۳- جاروب فرکانسی

برای انجام آزمایش جاروب فرکانسی، از دستگاه رثومتر برش دینامیکی (DSR) استفاده شده است. این آزمایش بر اساس استاندارد AASHTO TP-101 صورت پذیرفته است [29]. آزمایش جاروب فرکانسی در دمای مورد نظر، با اعمال بارگذاری پیچشی نوسانی با دامنه ثابت در محدوده‌ای از فرکانس‌های بارگذاری انجام شده است. برای این منظور، مقدار کرنش اعمالی ۱ درصد در نظر گرفته شده تا ویژگی‌های قیر بدون آن‌که آسیب ببیند در محدوده ویسکوالاستیک خطی به دست آید. همچنین نمونه ۲۵ میلی‌متری با ضخامت ۱ میلی‌متری برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت و مقدار فرکانس در محدوده ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز (در ۲۰ فرکانس) تغییر کرد. دماهای مورد بررسی در این آزمایش، شش دمای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد بوده و بر این اساس آزمایش‌ها از دمای کمتر به سمت دمای بیشتر انجام شده است. در نهایت نتایج مربوط به مدول برشی مختلط (برحسب پاسکال) و زاویه اختلاف فاز (برحسب درجه) در هر فرکانس به دست آمده است.

## ۲-۲-۳- جاروب دمایی

به منظور انجام آزمایش جاروب دمایی نیز از دستگاه DSR استفاده شده است. آزمایش جاروب دمایی در فرکانس ۱/۵۹ هرتز با اعمال بارگذاری پیچشی نوسانی با دامنه ثابت در محدوده دمایی ۳۰ الی ۹۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. برای این منظور، مقدار کرنش اعمالی ۱ درصد در نظر گرفته شده تا ویژگی‌های قیر بدون آن‌که آسیب ببیند در محدوده ویسکوالاستیک خطی به دست آید. همچنین نمونه ۲۵ میلی‌متری با ضخامت ۱ میلی‌متر برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت و بازه تغییرات دمایی بین دو آزمایش متوالی برابر با ۳ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته و آزمایش‌ها از دمای کمتر به سمت دمای بیشتر انجام شده است. در نهایت نتایج مربوط به مدول برشی مختلط (برحسب پاسکال) و زاویه اختلاف فاز (برحسب درجه) در هر دما به دست آمده است.

جدول ۲. ساختار پلیمر SEPS مصرفی

Type	Kraton G1780M (Multi-arm)
Chemical Base	Styrene and Ethylene/Propylene
Polystyrene content	7%
Form and Structure	Powder & Star Structure

Table 2. The properties of SEPS polymer

همچنین به منظور ایجاد مخلوطی همگن حاوی قیر و پلیمر SEPS، از میکسر IKA که سرعت چرخش آن روی ۵۰۰۰ دور در دقیقه تنظیم شده، استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا قیرخالص تا دمای ۱۷۰ الی ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و سپس پلیمر SEPS به صورت تدریجی به قیر مورد نظر افزوده شده و اختلاط به مدت ۴۵ دقیقه در دمای ثابت ادامه پیدا کرد تا قیر پلیمری حاصل به خوبی همگن شود. به منظور دستیابی اطمینان از پایداری قیر اصلاح شده پلیمری SEPS، مطابق با استاندارد EN 13399 باید قیرهای اصلاح شده در یک لوله فویلی آلومینیومی ریخته و به مدت سه روز در گرمکن با دمای ۱۸۰°C قرار داده شود. سپس لوله‌ها از گرمکن خارج شده و در دمای محیط به صورت قائم خنک شده و سپس برای چندین ساعت درون فریزر با دمای ۲۰°C قرار گیرند. در نهایت لوله‌ها به سه قسمت مساوی تقسیم شده و قسمت‌های بالا و پایین برای ارزیابی پایداری قیر از طریق اندازه‌گیری نقطه نرمی استفاده شوند [27]. راهی و همکاران [28] در پژوهش خود روی قیرهای اصلاح شده با پلیمر SEPS نشان دادند این قیرها مشکلی از نظر پایداری ندارند.

## ۲-۳- روش آزمون

در این پژوهش دو آزمایش جاروب فرکانسی و جاروب دمایی برای به دست آوردن ویژگی‌های ویسکوالاستیک قیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که در ادامه به تفکیک به هر یک از آنها پرداخته شده است:

## ۴- نتایج و بحث

## ۴-۱- نتایج آزمایش‌های جاروب دمایی و جاروب

## فرکانسی قیر

منحنی‌های مربوط به نتایج آزمایش‌های تعیین مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز براساس آزمایش‌های جاروب فرکانسی در دماهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای قیرهای خالص و حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد SEPS به ترتیب در منحنی‌های مربوط به نتایج آزمایش‌های تعیین مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز براساس آزمایش‌های جاروب دمایی نیز برای قیر خالص و قیرهای حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد SEPS به ترتیب در شکل ۳ الف و ب) نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در دماهای مورد بررسی، مدول برشی مختلط قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر SEPS نسبت به قیر خالص بیشتر است و همچنین زاویه اختلاف فاز قیرهای اصلاح‌شده نسبت به قیرهای خالص کمتر است. این نتایج نشان‌دهنده آن است که پارامتر شیارشدگی شکل ۱و) نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود استفاده از پلیمر SEPS سبب افزایش مدول برشی مختلط و کاهش زاویه اختلاف فاز می‌شود که این موضوع می‌تواند به افزایش مقاومت قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر SEPS در برابر پدیده شیارشدگی و بهبود عملکرد این قیرها در دمای بالا منجر شود [28, 30]. هنگامی که پلیمر SEPS به قیر اضافه می‌شود، فاز الاستومری آن، بخش‌های سبک‌تر قیر را جذب کرده و حجم ذرات پلیمری به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد (۳۱). در خصوص پلیمر SBS که از نظر ساختاری مشابهت زیادی با پلیمر SEPS دارد، در درصد‌های پایین (کمتر از ۴٪) پلیمر در ماتریس قیری پراکنده می‌شود، در درصد متوسط (۵٪) یک ماتریس پیوسته ناپایدار تشکیل شده و نهایتاً در درصد‌های بالاتر (بزرگتر از ۷٪) حجم پلیمر به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد به طوری که قیر در ماتریس پلیمری پراکنده می‌شود (۳۲). کلوتز و همکاران (۳۳) مشاهده کردند که استفاده از پلیمر SBS در درصد‌های ۷ الی ۸ درصد وزنی قیر باعث وقوع وارونگی فاز شده و عملکرد خستگی قیر اصلاح‌شده را بهبود می‌بخشد. لازم به ذکر است

( $G^*/\sin\delta$ ) در قیرهای اصلاح‌شده نسبت به قیر خالص بیشتر بوده و عملکرد شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر SEPS نسبت به قیرهای عادی مطلوب‌تر است. همچنین با مشاهده رفتار زاویه اختلاف فاز قیرهای ساده و اصلاح‌شده در، ملاحظه می‌شود که رفتار زاویه اختلاف فاز در قیرهای پلیمری حاوی ۴ و ۶ درصد پلیمر SEPS متفاوت از رفتار زاویه اختلاف فاز قیرهای ساده و حاوی ۲ درصد SEPS می‌باشد. علت این موضوع اندرکنش قیر و پلیمر می‌باشد. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، در درصد‌های پایین (کمتر از ۴ درصد) با افزودن پلیمر به قیر، پلیمر در ماتریس قیری پراکنده می‌شود، درحالی‌که افزودن درصد‌های متوسط پلیمر (۴ الی ۷ درصد) به قیر، سبب ایجاد ماتریس پیوسته ناپایدار خواهد شد. این تفاوت ماتریس‌های ایجاد شده، عامل اختلاف در رفتار زاویه اختلاف فاز قیرهای مورد بررسی می‌باشد.

که پاسخ‌های رئولوژیکی ماده نیز به شرایط آزمایش از قبیل دما، بار و سرعت بارگذاری وابسته است. در این میان نوع قیر پایه بسیار حائز اهمیت بوده و بر تعیین نوع و درصد پلیمر می‌تواند موثر باشد (۳۴، ۳۵). در این پژوهش محدوده استفاده از پلیمر SEPS محدوده درصد‌های پایین و متوسط را در بر می‌گیرد، بنابراین میتوان انتظار داشت که در ۲ درصد وزنی، پلیمر SEPS در ماتریس قیری پراکنده شده و در درصد‌های بالاتر ۴ و ۶ یک ماتریس پیوسته ناپایدار تشکیل دهد. علت اختلاف مشاهده شده در رفتار زاویه فاز قیرهای حاوی SEPS در شکل‌های ۲-پ و ۲-ت نیز به همین موضوع مرتبط است. منحنی‌های مربوط به نتایج آزمایش‌های تعیین مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز براساس آزمایش‌های جاروب دمایی نیز برای قیر خالص و قیرهای حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد SEPS به ترتیب در شکل ۳ الف و ب) نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در دماهای مورد بررسی، مدول برشی مختلط قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر SEPS نسبت به قیر خالص بیشتر است و همچنین زاویه اختلاف فاز قیرهای اصلاح‌شده نسبت به قیرهای خالص کمتر است. این نتایج

در درصد‌های پایین (کمتر از ۴ درصد) با افزودن پلیمر به قیر، پلیمر در ماتریس قیری پراکنده می‌شود، درحالی‌که افزودن درصد‌های متوسط پلیمر (۴ الی ۷ درصد) به قیر، سبب ایجاد ماتریس پیوسته ناپایدار خواهد شد. این تفاوت ماتریس‌های ایجاد شده، عامل اختلاف در رفتار زاویه اختلاف فاز قیرهای مورد بررسی می‌باشد.

نشان‌دهنده آن است که پارامتر شیارشدگی ( $G^*/\sin\delta$ ) در قیرهای اصلاح‌شده نسبت به قیر خالص بیشتر بوده و عملکرد شیارشدگی قیرهای اصلاح‌شده با پلیمر SEPS نسبت به قیرهای عادی مطلوب‌تر است. همچنین با مشاهده رفتار زاویه اختلاف فاز قیرهای ساده و اصلاح‌شده در، ملاحظه می‌شود که رفتار زاویه اختلاف فاز در قیرهای پلیمری حاوی ۴ و ۶ درصد پلیمر SEPS متفاوت از رفتار زاویه اختلاف فاز قیرهای ساده و حاوی ۲ درصد SEPS می‌باشد. علت این موضوع اندرکنش قیر و پلیمر می‌باشد. همانگونه که پیشتر اشاره شد،

شکل ۱. منحنی لگاریتم مدول برشی مختلط برحسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای برای قیر خالص (شکل الف)، قیر حاوی ۲ درصد SEPS (شکل ب)، قیر حاوی ۴ درصد SEPS (شکل پ) و قیر حاوی ۶ درصد SEPS (شکل ت)

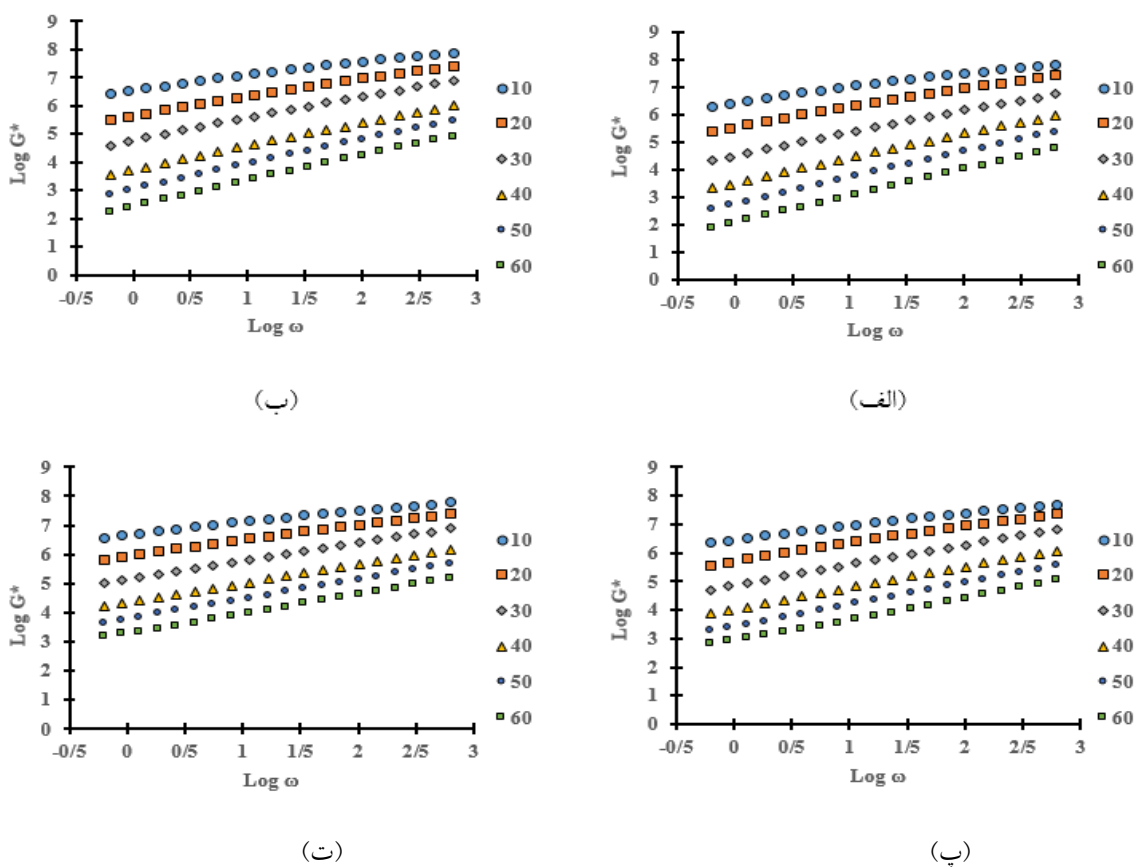


Fig. 1. Complex shear modulus (Log. Scale) versus angular frequency (Log. Scale) for neat bitumen (a), SEPS 2 (b), SEPS 4 (c) and SEPS 6 (d)

شکل ۲. منحنی زاویه اختلاف فاز برحسب لگاریتم فرکانس زاویه‌ای برای قیر خالص (شکل الف)، قیر حاوی ۲ درصد SEPS (شکل ب)، قیر حاوی ۴ درصد SEPS (شکل پ) و قیر حاوی ۶ درصد SEPS (شکل ت)

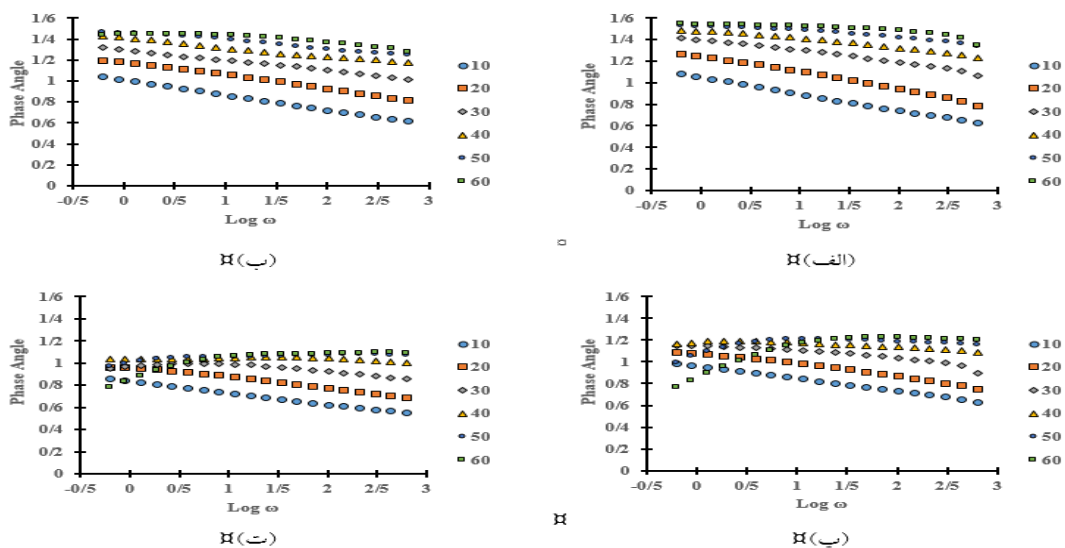


Fig. 2. Phase angle versus angular frequency (Log. Scale) for neat bitumen (a), SEPS 2 (b), SEPS 4 (c) and SEPS 6 (d)

شکل ۳. منحنی لگاریتم مدول برشی مختلط برحسب دما (شکل الف) و منحنی زاویه اختلاف فاز برحسب دما (شکل ب) برای قیر خالص و قیرهای حاوی ۲، ۴ و ۶ درصد وزنی SEPS

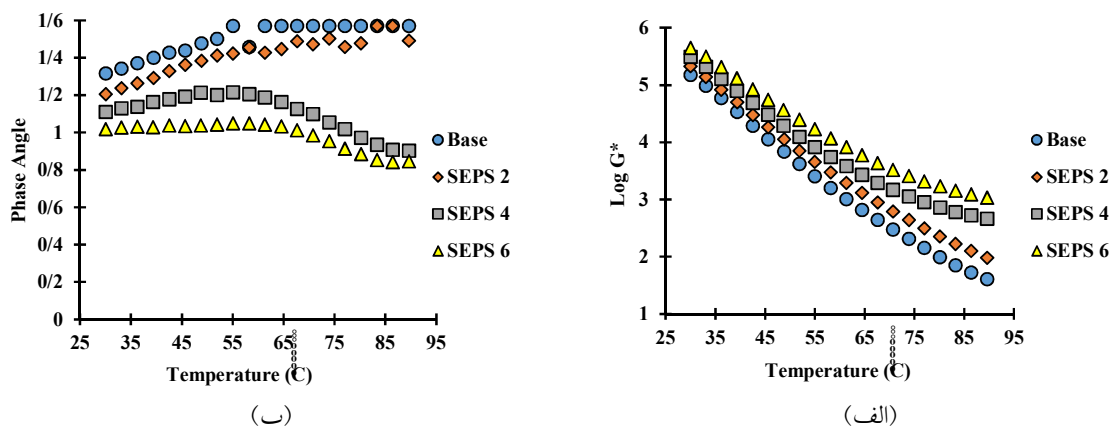


Fig. 3. Complex shear modulus (Log. Scale) versus temperature (a) and phase angle versus temperature (b) for neat bitumen and SEPS modified asphalt binder containing 2, 4 & 6% SEPS.

است. نتایج منحنی‌های جامع مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز به ترتیب در شکل ۴ و ۵ قابل مشاهده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، منحنی‌های جامع ترسیم شده براساس نتایج آزمایش جاروب دمایی به صورت مناسب و با دقت مطلوبی الگوی منحنی‌های جامع حاصل از نتایج آزمایش جاروب فرکانسی را ایجاد کرده است. این موضوع بدان معناست که نتایج

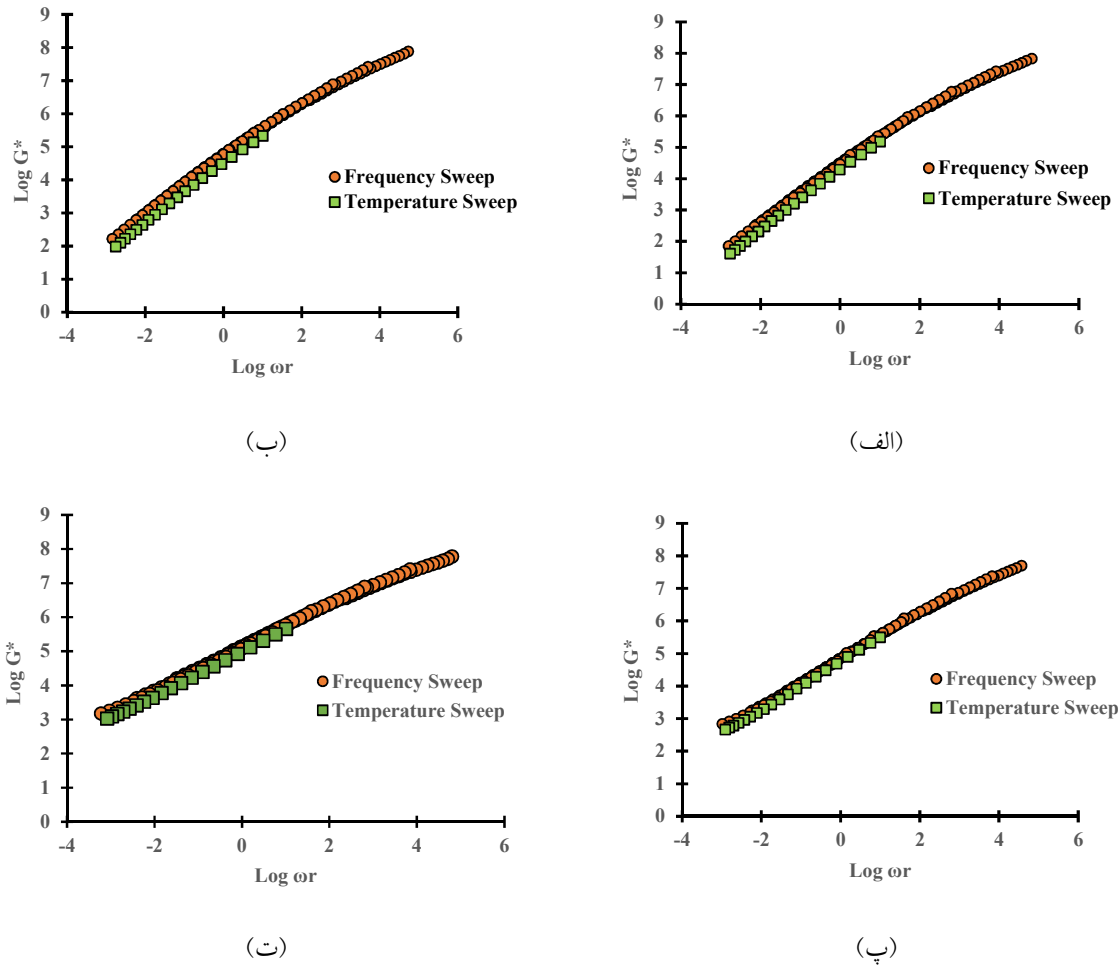
## ۲-۴- مقایسه منحنی‌های جامع تشکیل شده از آزمایش‌های جاروب دمایی و جاروب فرکانسی به کمک روش LCPC

در این بخش، منحنی‌های جامع حاصل از نتایج آزمایش‌های جاروب دمایی و جاروب فرکانسی در دماها و فرکانس‌های مختلف به کمک روش LCPC به تفکیک نوع قیر ترسیم شده



آزمایش جاروب دمایی می‌تواند مشابه نتایج آزمایش جاروب فرکانسی بخش‌های مختلف منحنی‌های جامع مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز را تشکیل دهد. استیست

شکل ۴. منحنی جامع مدول برشی مختلط براساس نتایج آزمایش‌های جاروب فرکانسی و جاروب دمایی برای قیر خالص (شکل الف)، قیر حاوی ۲ درصد SEPS (شکل ب)، قیر حاوی ۴ درصد SEPS (شکل پ) و قیر حاوی ۶ درصد SEPS (شکل ت)



**Fig. 4.** The complex shear modulus master curves based on the results of frequency and temperature sweep tests for neat bitumen (a), SEPS 2 (b), SEPS 4 (c) and SEPS 6 (d)

شکل ۵. منحنی جامع زاویه اختلاف فاز براساس نتایج آزمایش‌های جاروب فرکانسی و جاروب دمایی برای قیر خالص (شکل الف)، قیر حاوی ۲ درصد SEPS (شکل ب)، قیر حاوی ۴ درصد SEPS (شکل پ) و قیر حاوی ۶ درصد SEPS (شکل ت)

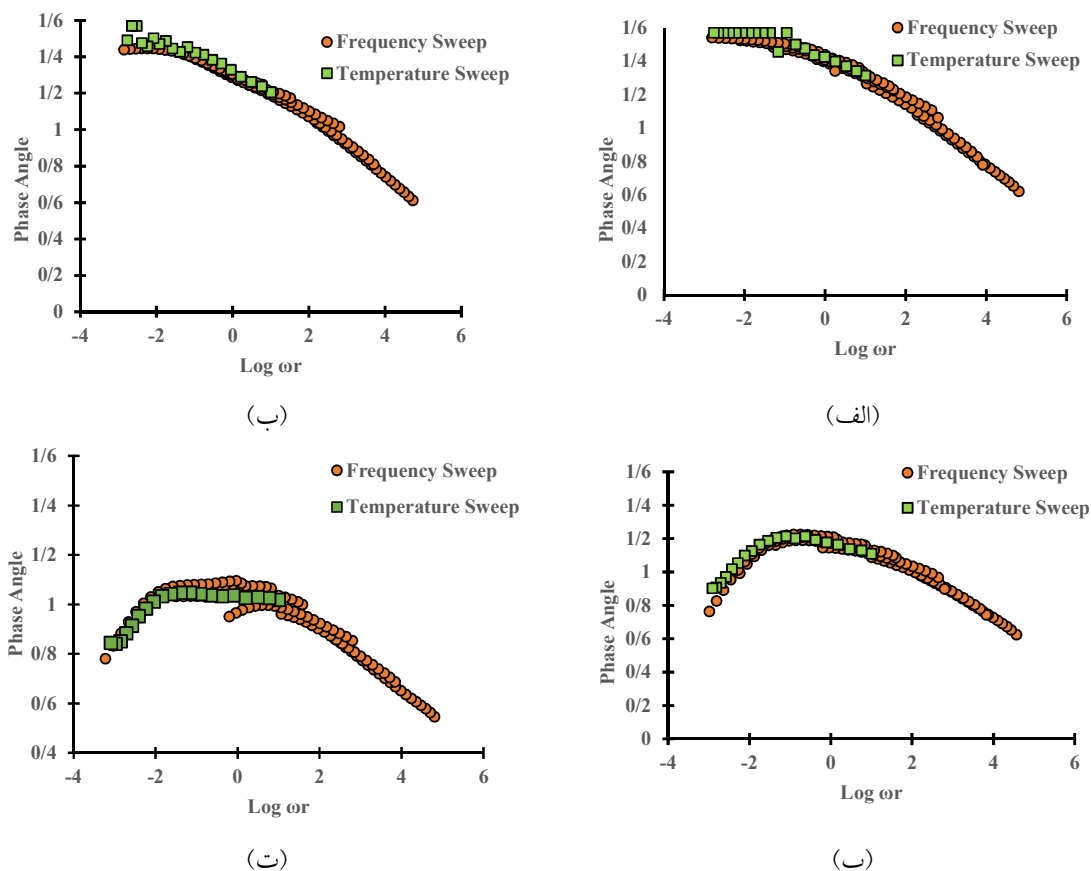


Fig. 5. The phase angle master curves based on the results of frequency and temperature sweep tests for neat bitumen (a), SEPS 2 (b), SEPS 4 (c) and SEPS 6 (d).

آزمایش‌های جاروب دمایی و فرکانسی از نوع خطی با ضریب تعیین مناسب است. با توجه به آنکه نقاط مربوط به مدول‌های برشی مختلط و زاویه‌های اختلاف فاز کلیه قیرها در اطراف و نزدیکی خط  $y=x$  قرار گرفته‌اند و همچنین همبستگی مابین نتایج مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز از نوع خطی با شیب یک و عرض از مبدا جزئی است، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج آزمایش جاروب دمایی در تعیین منحنی جامع با تقریب قابل قبولی معادل نتایج آزمایش جاروب فرکانسی است. بنابراین می‌توان به جای نتایج آزمایش جاروب فرکانسی از نتایج آزمایش جاروب دمایی برای تعیین منحنی جامع استفاده کرد.

همچنین به منظور انجام بررسی‌های دقیق‌تر، نتایج مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز حاصل از آزمایش جاروب دمایی در مقابل نتایج حاصل از آزمایش جاروب فرکانسی برای کلیه قیرهای مورد بررسی (قیر خالص و قیرهای اصلاح‌شده با ۲، ۴ و ۶ درصد پلیمر SEPS) تجمیع و در دو نمودار ترسیم شده است که به ترتیب در اشکال (الف و ب) قابل ملاحظه است. همانطور که مشاهده می‌شود، نقاط ترسیم شده در اطراف خط  $y=x$  قرار گرفته‌اند که حاکی از تقریب قابل قبول نتایج آزمایش جاروب دمایی به نتایج آزمون جاروب فرکانسی است. همچنین مقدار ضریب تعیین<sup>۱</sup> مربوط به بخش (الف) و (ب) به ترتیب برابر با ۰/۹۷ و ۰/۹۸ به دست آمد که مقادیر قابل قبول و مطلوبی می‌باشند. به علاوه، همبستگی بین نتایج زاویه اختلاف فاز

شکل ۶. نمودار همبستگی مدول برشی مختلط (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) حاصل از آزمایش‌های جاروب دمایی و جاروب فرکانسی

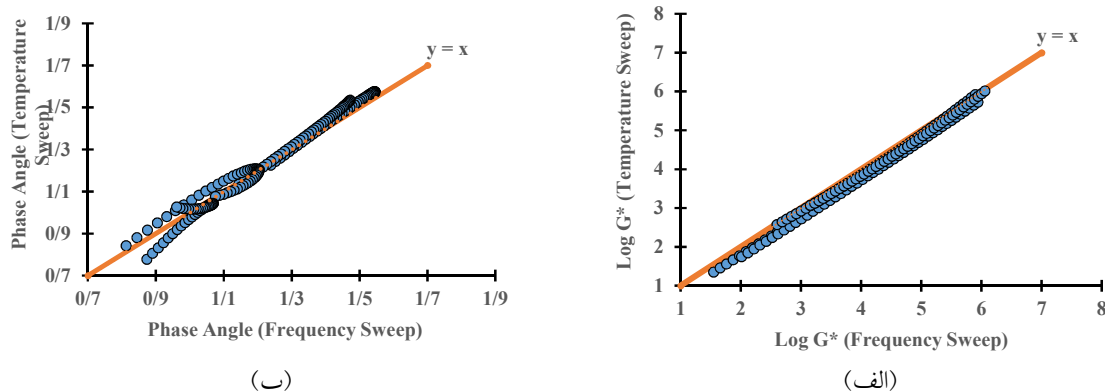


Fig. 6. The correlation between the value of complex shear modulus (a) and phase angle (b) evaluated from master curves based on the results of frequency sweep and temperature sweep tests

جدول ۳- نتایج آزمون T بر روی داده‌های آزمایشگاهی آزمایش‌های جاروب فرکانسی و جاروب دمایی

Viscoelastic Properties	P (T<=t)	P Critical
Complex Shear Modulus	0.123	0.05
Phase Angle	0.621	0.05

[25, 24, 19]

Table 3. The results of T-test for frequency and temperature sweep test results

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، تولید منحنی‌های جامع قیر به کمک نتایج آزمایش جاروب دمایی به جای استفاده از نتایج آزمایش جاروب فرکانسی برای قیرهای ساده و قیرهای اصلاح‌شده با ۲، ۴ و ۶ درصد پلیمر SEPS مورد بررسی و امکان‌سنجی قرار گرفته است. برای این منظور، دو آزمایش جاروب دمایی و جاروب فرکانسی به ترتیب در بازه‌های دمایی ۳۰ الی ۹۰ و ۱۰ الی ۶۰ درجه سانتی‌گراد روی قیرهای مورد بررسی در این پژوهش انجام شدند. سپس به کمک روش LCPC، مقدار ضرایب انتقال منحنی‌های جامع مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز به محاسبه شد و منحنی‌های جامع مذکور براساس نتایج دو آزمایش تشکیل شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج زیر از پژوهش مذکور بیان می‌شود:

آزمون T (T-test) از جمله دیگر آزمون‌هایی است که در این پژوهش به منظور بررسی معناداری اختلاف بین نتایج آزمایش‌های جاروب فرکانسی و جاروب دمایی به کار گرفته شده است. فرض صفر این آزمایش، یکسان بودن نتایج آزمایش‌های جاروب فرکانسی و جاروب دمایی در نظر گرفته شده است. بنابراین در صورت رد فرضیه صفر، به این نتیجه می‌رسیم که نتایج آزمایش جاروب دمایی نمی‌توانند به عنوان نتایج آزمایش جاروب فرکانسی به منظور تولید منحنی‌های جامع به کار گرفته شود. نتایج آزمون T برای منحنی جامع مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز براساس نتایج آزمایش‌های جاروب فرکانسی و جاروب دمایی به شرح می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود مقدار احتمال (P-value) برای هر دو مشخصه ویسکوالاستیک قیرها بیش از ۰/۰۵ می‌باشد و بنابراین فرض صفر رد نمی‌شود. بدین معنا که نمی‌توان مستقل بودن و معناداری اختلاف بین نتایج حاصل از آزمایش‌های جاروب فرکانسی و جاروب دمایی را تایید کرد.

همچنین، پوریا حاجی‌کریمی به عنوان پژوهشگر اصلی با تهیه داده‌های آزمایشگاهی، روش‌شناسی و ویرایش مقاله در این فرآیند مشارکت داشته است. به علاوه علی‌خدائی به عنوان پژوهشگر فرعی در ویرایش مقاله با سایر نویسندگان همکاری داشته است.

## ۸- مراجع

- [1] Dudowicz J, Douglas JF, Freed KF. The meaning of the "universal" WLF parameters of glass-forming polymer liquids. *The Journal of chemical physics*. 2015;142(1):014905.
- [2] Hajikarimi P, Nejad FM. *Applications of Viscoelasticity: Bituminous Materials Characterization and Modeling*; Elsevier; 2021.
- [3] Ma T, Wang H, Zhao Y, Huang X, Wang S. Laboratory investigation of crumb rubber modified asphalt binder and mixtures with warm-mix additives. *International Journal of Civil Engineering*. 2017;15(2):185-94.
- [4] Brinson HF, Brinson LC. *Polymer engineering science and viscoelasticity. An introduction*. 2008.
- [5] Huang W, Zhang X, Yin Y, Cai S. A numerical implementation of the three-dimensional viscoelastic model for asphalt mastic. *International Journal of Civil Engineering*. 2018;16(5):543-51.
- [6] Yusoff NIM, Chailleux E, Airey GD. A comparative study of the influence of shift factor equations on master curve construction. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2011;4(6):324.
- [7] Kim YR. *Modeling of asphalt concrete* 2008.
- [8] Yin Y, Huang W, Lv J, Ma X, Yan J. Unified construction of dynamic rheological master curve of asphalts and asphalt mixtures. *International Journal of Civil Engineering*. 2018;16(9):1057-67.
- [9] Schapery RA. On the characterization of nonlinear viscoelastic materials. *Polymer Engineering & Science*. 1969;9(4):295-310.
- [10] Findley WN, Lai JS, Onaran K. *Creep and relaxation of nonlinear materials*. North-Holland, Amsterdam. 1976.
- [11] Wada Y, Hirose H. Glass transition phenomena and rheological properties of petroleum asphalt. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1960;15(10):1885-94.

۱- استفاده از پلیمر SEPS به عنوان اصلاح‌کننده قیر، سبب افزایش مدول برشی مختلط و کاهش زاویه اختلاف فاز قیر حاصل می‌شود. پس این پلیمر با توجه به افزایش سختی قیر حاصل و همچنین افزایش پارامتر شیاردگی ( $G^*/\text{Sin}\delta$ )، مقاومت در برابر شیاردگی را در قیر حاصل افزایش می‌دهد و منجر به بهبود عملکرد قیر در دماهای بالا می‌شود.

۲- روش LCPC می‌تواند با دقت مناسبی برای ترسیم منحنی‌های جامع براساس نتایج آزمایش جاروب دمایی و جاروب فرکانسی به کار گرفته شود.

۳- نتایج آزمایش جاروب دمایی می‌توانند به عنوان ورودی مورد نیاز برای ترسیم منحنی‌های جامع به جای نتایج آزمایش جاروب فرکانسی مورد استفاده قرار گیرند. منحنی‌های جامع حاصل از نتایج آزمایش جاروب دمایی به خوبی می‌توانند الگوهای منحنی‌های جامع حاصل از نتایج آزمایش جاروب فرکانسی را منعکس کنند. همچنین با ترسیم نمودارهای منحنی‌های جامع مدول برشی مختلط و زاویه اختلاف فاز حاصل از آزمایش‌های جاروب دمایی و فرکانسی در فرکانس‌های متناظر ملاحظه شد، نقاط در نزدیکی و مجاورت خط  $y=x$  پراکنده می‌شود که گویای تقریب قابل قبول نتایج آزمایش جاروب دمایی به نتایج آزمون جاروب فرکانسی با دقت مطلوب و همبستگی خطی بالا است و بنابراین، استفاده از نتایج آزمایش جاروب دمایی، منحنی‌های جامع مشابهی با منحنی‌های جامع معمول را نتیجه می‌دهند. پس می‌توان از نتایج آزمایش جاروب دمایی با توجه به سرعت بالای آزمایش و دقت بالاتر آن نسبت به آزمایش جاروب فرکانسی، برای تولید و ایجاد منحنی‌های جامع قیرهای خالص و اصلاح‌شده بهره برد.

## ۶- تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که در این پژوهش، هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

## ۷- مشارکت نویسندگان

در این پژوهش، مسعود غلامی به عنوان پژوهشگر اصلی به تحلیل داده‌ها، روش‌شناسی و نگارش مقاله پرداخته است.

- curve models for bituminous binders. *Materials and Structures*. 2015;48(1):393-406.
- [24] Alghrafi Y, El-Badawy S, Abd Alla E-SM. A Comparative Study of Different Complex Shear Modulus Master Curve Techniques for Sulfur Extended Asphalt Modified with Recycled Polyethylene Waste. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2022;15(5):1023-50.
- [25] Yan C, Yan J, Shi B, Zhan Y, Zhang A. Proposing a novel double sigmoidal model to fit the master curve for various polymer-modified asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*. 2022:1-14.
- [26] Booij H, Thoone G. Generalization of Kramers-Kronig transforms and some approximations of relations between viscoelastic quantities. *Rheologica Acta*. 1982;21(1):15-24.
- [27] E. Bitumen and bituminous binder—Determination of storage stability of modified bitumen. Elsevier Amsterdam, The Netherlands; 2010.
- [28] Rahi M, Fini EH, Hajikarimi P, Nejad FM. Rutting characteristics of styrene-ethylene/propylene-styrene polymer modified asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2015;27(4):04014154.
- [29] TP101 A. Estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep. *Recuperado el*. 2014;12.
- [30] Azarhoosh A, Koohmishi M. Investigation of the rutting potential of asphalt binder and mixture modified by styrene-ethylene/propylene-styrene nanocomposite. *Construction and Building Materials*. 2020;255:119363.
- [31] Sengoz B, Topal A, Isikyakar G. Morphology and image analysis of polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*. 2009;23(5):1986-92.
- [32] Brule B. Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry: basic principles. *Transportation Research Record*. 1996;1535(1):48-53.
- [33] Klutz R, Willis JR, Molenaar A, Scarpas T, Scholten E, editors. Fatigue performance of highly modified asphalt mixtures in laboratory and field environment. 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements; 2012: Springer.
- [34] Kumar Y, Singh SK, Oberoi D, Kumar P, Mohanty P, Ravindranath SS. Effect of molecular structure and concentration of
- [12] Garcia G, Thompson M. HMA dynamic modulus predictive models (a review). 2007. Report No.: 0197-9191.
- [13] Levenberg E, Shah A. Interpretation of complex modulus test results for asphalt-aggregate mixes. *Journal of Testing and Evaluation*. 2008;36(4):326-34.
- [14] Dealy JM, Read DJ, Larson RG. Structure and rheology of molten polymers: from structure to flow behavior and back again: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG; 2018.
- [15] Rowe G, Baumgardner G, Sharrock M, editors. Functional forms for master curve analysis of bituminous materials. Proceedings of the 7th international RILEM symposium ATCBM09 on advanced testing and characterization of bituminous materials; 2016.
- [16] Chailleux E, Ramond G, Such C, de La Roche C. A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*. 2006;7(sup1):75-92.
- [17] Airey GD. Use of black diagrams to identify inconsistencies in rheological data. *Road Materials and Pavement Design*. 2002;3(4):403-24.
- [18] Velankar S, Giles D. How do I know if my phase angles are correct? *Rheol Bull*. 2007;76.(^)
- [19] Anjali BL, Swamy AK. Time-temperature-dosage superposition approach to predict the complex modulus of asphalt binders. *Construction and Building Materials*. 2022;329:127140.
- [20] Alghrafi Y, El-Badawy S, Abd Alla E-SM. A Comparative Study of Different Complex Shear Modulus Master Curve Techniques for Sulfur Extended Asphalt Modified with Recycled Polyethylene Waste. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2021:1-28.
- [21] Bazi G, Assi TB. Asphalt concrete master curve using dynamic backcalculation. *International Journal of Pavement Engineering*. 2022;23(1):95-106.
- [22] Bayane BM, Yang E, Yanjun Q. Dynamic modulus master curve construction using Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM) model. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2017;7(01):53-63.
- [23] Asgharzadeh SM, Tabatabaee N, Naderi K, Partl MN. Evaluation of rheological master

[35] Nivitha M, Narayan S, Krishnan JM. Non-linear viscoelastic model based ranking of modified binders for their rutting performance. *Materials and Structures*. 2018;51(4):1-14.

styrene-butadiene polymer on upper service temperature rheological properties of modified binders. *Construction and Building Materials*. 2020;249:118790.

# Using Temperature Sweep Test to Develop Master Curves of Bitumen Viscoelastic Properties

Masood Gholami<sup>1</sup>, Pouria Hajikarimi<sup>2,\*</sup>, Ali Khodaii<sup>3</sup>

1 Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

2 Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

3 Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

\* phajikarimi@aut.ac.ir

## Abstract

Asphalt mixtures and bitumens are faced with different traffic loading and thermal stresses during their lifetime. Due to their viscoelastic behavior, these materials exhibit different mechanical properties at different temperatures and traffic loading. Viscoelastic properties of bitumens are commonly expressed using the master curves of complex shear modulus ( $G^*$ ) and phase angle ( $\delta$ ) generally created by the horizontal shifting of the frequency sweep test results using shift factors. There are several methods for evaluating temperature shift factors, such as Williams, Landel, and Ferry (WLF) equation, modified Kaelble method, Log-Linear approach, and LCPC method. The LCPC method, developed using the Kramers-Kronig relationship, can be used to accurately evaluate the shift factor of bitumens, mastics, and asphalt mixtures. This study investigated the possibility of generating the master curves of bitumen based on temperature sweep test results rather than frequency sweep test results. Two types of bitumens were investigated in this study, neat bitumen with an 85-100 penetration grade (PG 58-22 performance grade) and SEPS modified asphalt binder with SEPS polymer content of 2, 4, and 6% by weight of the total binder. Temperature sweep tests were performed on all types of bitumens in a range of temperatures between 30 and 90 °C and the frequency of 1.59 Hz. Also, frequency sweep tests were performed on all kinds of bitumens in a range of temperature between 10 and 60 °C and a range of frequency between 0.1 and 100 Hz. The LCPC method was also investigated to calculate the shift factors for the master curves of complex shear modulus and phase angle, and the master curves of viscoelastic properties for all bitumen types are made based on temperature sweep and frequency sweep test results. The results indicated that the SEPS polymer could effectively increase the complex shear modulus and reduce the magnitude of phase angle. So, this polymer improved the rutting resistance of SEPS polymer-modified binders and led to better high-temperature performance of binders. In addition, the LCPC method effectively produced a valid and accurate form of the master curve using temperature sweep test results similar to the master curve using frequency sweep test results. Furthermore, the master curves of complex shear modulus ( $G^*$ ) and phase angle ( $\delta$ ) derived from temperature and frequency sweep test results exhibited comparable patterns and values. By plotting the value of complex shear modulus and phase angle obtained from the temperature sweep master curves versus the complex shear modulus and phase angle obtained from the frequency sweep master curves at the same reduced frequency, it was observed that all points were scattered in the vicinity of the  $y=x$  line. It was indicated that the master curves created based on temperature sweep test results have an acceptable approximation and accuracy with the master curves created based on frequency sweep test results. As a consequence, it may be preferable to generate the master curve of viscoelastic characteristics of bitumens using the results of the temperature sweep test, which is faster and more accurate in some conditions, compared to the results of the frequency sweep test.

**Keywords:** Bitumen, LCPC Method, Frequency Sweep Test, Temperature Sweep Test, Master Curve.