



## تولید منحنی جامع مدول دینامیکی و زاویه فاز ملات و مخلوط آسفالتی با استفاده از کمترین تعداد دمای آزمایش و فرکانس بارگذاری

مسعود غلامی، مجتبی خدادادی، پوریا حاجی کریمی\*، علی خدایی

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲  
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱  
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

### کلمات کلیدی:

مخلوط آسفالتی  
ملات آسفالتی  
منحنی جامع  
فرکانس  
دما

**خلاصه:** منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز جهت بیان خواص ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی و ملات استفاده می‌شود. این منحنی‌های جامع از طریق انتقال افقی نمودارهای مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز در دماها و فرکانس‌های مختلف به کمک ضرایب انتقال مناسب ایجاد می‌شوند. در این پژوهش، تولید منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز در دو مقیاس ملات و مخلوط آسفالتی با استفاده از کمترین تعداد آزمایش (کمترین تعداد دما و فرکانس بارگذاری) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور آزمایش مدول دینامیکی در شش فرکانس و دما در مقیاس‌های ملات و مخلوط انجام و روش Laboratoire Central des Ponts et Chaussees به منظور محاسبه ضرایب انتقال مناسب جهت تولید منحنی‌های جامع استفاده شد. به منظور پیش‌بینی خواص ویسکوالاستیک مقیاس‌های مذکور از برازش مدل اصلاح‌شده Christensen-Anderson-Marasteanu بر منحنی‌های جامع استفاده شد. نتایج نشان داد با کاهش تعداد فرکانس‌های آزمایش به دو فرکانس در تعداد دمای ثابت، مدل برازش شده مقادیری با دقت مشابه با مدل اصلی ارائه می‌دهد. از طرفی با کاهش تعداد دماها به سه دما در تعداد فرکانس‌های مختلف (سه تا شش فرکانس)، مدل جدید برازش شده، مقادیر و الگوهای مشابه با مدل ساخته‌شده با تمامی داده‌های دمایی و فرکانسی ارائه می‌دهد. بنابراین با کاهش تعداد دماها و فرکانس‌های آزمایش، می‌توان بدون هدررفت زمان، هزینه و اطلاعات مفید آزمایش مدول دینامیکی، منحنی جامع با دقت بیش از ۹۲٪ نسبت به مدل اصلی، جهت پیش‌بینی خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط و ملات آسفالتی بدست آورد.

### ۱- مقدمه

منظور تولید منحنی‌های جامع این دو پارامتر به کار گرفته می‌شود [۵، ۶]. منحنی‌های جامع بازه وسیعی از دماها و فرکانس‌های بارگذاری را شامل می‌شوند که با استفاده از آنها، پیش‌بینی خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی در حالت‌های مختلف ممکن می‌شود [۷]. منحنی‌های جامع با انتخاب یک دمای مرجع و جابجایی افقی نمودارهای خواص ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی (مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز) در سایر دماها به کمک ضرایب انتقال<sup>۱</sup> دمایی ایجاد می‌شوند [۸، ۹]. مطالعه وادا<sup>۲</sup> و هیروس<sup>۳</sup> نشان داد که با توجه به محدود بودن بازه دمایی که مخلوط آسفالتی در طول عمر خود تجربه می‌کند، می‌توان از جابجایی قائم نمودارها صرف نظر کرد [۱۰]. روش‌های مختلفی به منظور تعیین ضریب انتقال

مخلوط‌های آسفالتی از جمله موادی هستند که به واسطه رفتار ویسکوالاستیک در دماهای مختلف، خواص مکانیکی متفاوتی را از خود نشان می‌دهند [۱]. این مخلوط‌ها در طول عمر خدمت‌دهی، تحت تاثیر تنش‌های ناشی از حرکت وسایل نقلیه و تغییرات دمای محیط قرار می‌گیرند که تاثیر زیادی بر عملکرد روسازی دارد. با توجه به اینکه که شبیه‌سازی کلیه این شرایط در محیط آزمایشگاهی میسر نیست، به منظور بررسی رفتار و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در بازه قابل قبولی از دماها و بارگذاری‌های ترافیکی، اصل برهم‌نهی زمان-دما مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲-۴]. مدول دینامیکی ( $E^*$ ) و زاویه اختلاف فاز ( $\delta$ ) پارامترهای بنیادی در توصیف خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی هستند و اصل برهم‌نهی به

- 1 Shift factor
- 2 Wada
- 3 Hirose

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: phajikarimi@aut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



نیست و بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر مدل‌ها برای قیرهای اصلاح‌شده با تغییرات زیاد در الگوی منحنی جامع زاویه فاز دارد [۱۳]. در مقابل، از معروف‌ترین مدل‌های تجربی-جبری موجود می‌توان به مدل کسری<sup>۸</sup>، مدل CAM اصلاح شده (Modified Christensen-Anderson-Marasteanu model) و مدل لجستیک استاندارد<sup>۹</sup> اشاره کرد [۱۳]. الغرافی و همکاران [۱۴] در پژوهشی به بررسی روش‌های مختلف تولید منحنی جامع مدول برشی مختلط قیرهای اصلاح شده با مواد بازیافتی پرداختند. آنها از مدل‌های CAM، CA و سیگموئیدال استفاده کردند و مشاهده نمودند که اصلاح‌کننده مصرفی و شرایط پیرشدگی قیر در عملکرد مدل‌ها موثر است. با این حال نتایج خروجی منحنی‌های جامع حاصل از کلیه مدل‌ها رضایت بخش بوده است. در پژوهش اصغرزاده و همکاران [۱۳] مدل‌های مکانیکی و جبری بر روی انواع قیر بررسی و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده و در نهایت جایگاه استفاده از هر روش عنوان گردیده است. مدل ماکسول تعمیم‌یافته و مدل کسری از روش‌هایی است که به دلیل داشتن تعداد زیاد پارامترها، هم برای مخلوط آسفالتی و هم انواع قیر خالص و اصلاح‌شده، نتایج خوبی را ارائه می‌کند. با این حال این مدل‌ها تا حد زیادی به تعداد پارامترهایی که برای آن در نظر گرفته می‌شوند، وابسته می‌باشند [۱۳]. همچنین مدل CAM اصلاح‌شده و مدل لجستیک استاندارد از جمله روش‌های جبری هستند که علی‌رغم داشتن تعداد پارامتر کم، عملکرد بسیار مطلوبی در پیش‌بینی خواص ویسکوالاستیک قیرها و مخلوط‌های خالص دارند [۱۳]. تعیین مشخصات ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های قیری با استفاده از نتایج آزمایش جاروب فرکانسی و ترسیم منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز، به صورت گسترده توسط پژوهشگران به کار گرفته شده است [۷، ۱۵-۱۹]. همچنین پژوهشگران با برآزش مدل‌های مکانیکی و یا تجربی-جبری به منحنی‌های جامع حاصل از نتایج آزمایش جاروب فرکانسی، امکان پیش‌بینی مشخصات ویسکوالاستیک در فرکانس‌های دلخواه را با دقت مناسب فراهم کرده‌اند [۱۷، ۲۰، ۲۱].

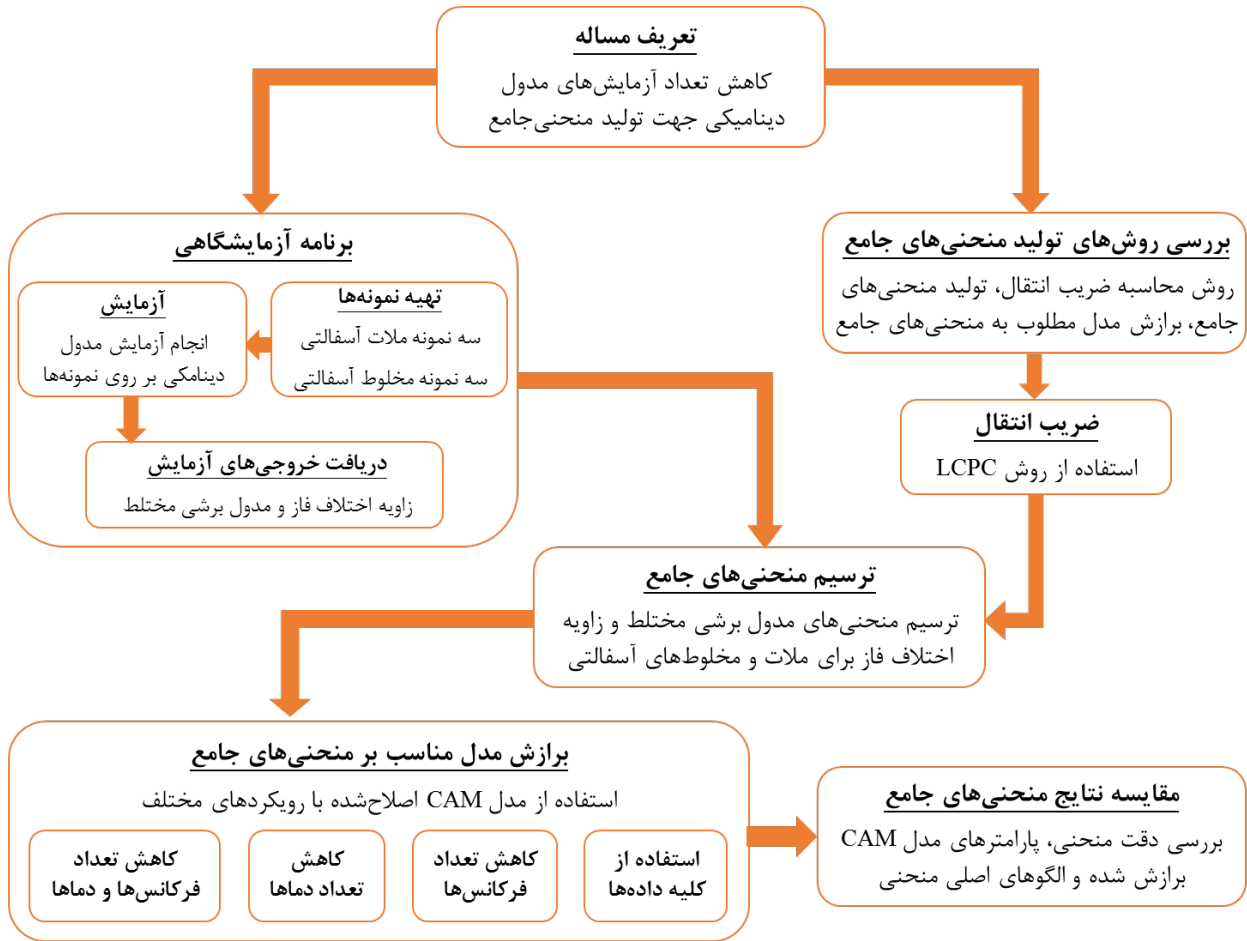
با توجه به آن که انجام آزمایش جاروب فرکانسی مخلوط‌های آسفالتی و ملات آسفالتی نیازمند طیف وسیعی از دماها و فرکانس‌ها است، انجام کامل این آزمایش منوط به صرف زمان و هزینه زیادی

( $\tau, \alpha$ ) وجود دارد که یوسف<sup>۱</sup> و همکاران [۵] در پژوهش خود به آن پرداخته‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به معادله WLF (Wil-LCPC)، روش (Liams, Landel and Ferry Equation)، روش (Laboratoire Central des Ponts et Chaussees)، روش لگاریتمی-خطی<sup>۲</sup>، معادله VTS (Viscosity Temperature Susceptibility)، معادله آرنیوس<sup>۳</sup> و... اشاره کرد که هر کدام از این روش‌ها در موارد مشخصی کاربرد دارند. چن<sup>۴</sup> و همکاران [۱۱] در پژوهشی به بررسی عملکرد روش‌های WLF، لگاریتمی-خطی، آرنیوس، چندجمله‌ای درجه دو و کیبل<sup>۵</sup> پرداختند و مشاهده نمودند که روش WLF جهت تعیین ضریب انتقال منحنی‌های جامع مدول دینامیکی برای مخلوط‌های آسفالتی عملکرد قابل قبولی تری نسبت به سایر روش‌ها دارد. روش LCPC یکی از این روش‌هاست که هم برای قیر و هم برای مخلوط‌های آسفالتی مناسب است. این روش در سال ۲۰۰۶ توسط شیو<sup>۶</sup> و همکاران براساس روابط کرامر-کرونینگ<sup>۷</sup> توسعه داده شد [۱۲]. پژوهش یوسف و همکاران [۵] نشان می‌دهد که این روش در مقایسه با سایر روش‌ها، جهت محاسبه ضریب انتقال قیرهای اصلاح شده و اصلاح‌نشده، ماستیک و مخلوط‌های آسفالتی از عملکرد مطلوب‌تری برخوردار است. پس از تعیین ضریب انتقال مورد نظر و تشکیل منحنی جامع خواص ویسکوالاستیک (مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز)، می‌توان مدل‌های مختلفی به منحنی جامع برآزش داد تا بتواند توصیف‌کننده رفتار قیر و مخلوط‌های آسفالتی باشد. این مدل‌ها در دو دسته کلی مدل‌های مکانیکی و مدل‌های بنیادی طبقه‌بندی می‌شوند که هم برای قیر و هم برای مخلوط‌های آسفالتی قابل استفاده می‌باشند. مدل‌های مکانیکی از ترکیب فنرها و میراگرها به منظور تعیین پاسخ ویسکوالاستیک مواد تشکیل می‌شوند که از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های ماکسول تعمیم‌یافته و (two Springs, two Parabolic elements, 2S2P1D) و (one Dashpot) اشاره کرد [۱۳]. مدل مکانیکی 2S2P1D تنها به کمک هفت پارامتر خواص ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های قیری را پیش‌بینی می‌کند. البته این روش برای کلیه قیرها مناسب

- 1 Yusoff
- 2 Log-Linear approach
- 3 Arrhenius Equation
- 4 Chen
- 5 Kaelble method
- 6 Chailleux
- 7 Kramers-Kronig

8 Fractional Model

9 Sigmoidal Model (Standard Logistic)



شکل ۱. الگوریتم روش انجام پژوهش جاری

Fig. 1. The methodology of current research

جهت تولید منحنی جامع مطلوب و تعیین خواص کامپوزیت‌های قیری بدون از دست دادن اطلاعات مفید (پارامترهای اصلی منحنی جامع همانند  $E^*_{(g)}$ ،  $E^*_{(e)}$  و  $\delta_{(m)}$ ) است. با توجه به توضیحات ارائه شده، الگوریتم روش تحقیق جاری را می‌توان به صورت شکل ۱ ترسیم و ارائه نمود.

## ۲- مبانی نظری

ترسیم منحنی جامع خواص ویسکوالاستیک نیازمند ضریب انتقال افقی دمایی است. ضریب انتقال دمایی را می‌توان به شکل معادله (۱) تعریف کرد [۵]:

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

است. در صورتی که بتوان مدل‌های برازش شده به کل داده‌ها را با مدل‌های برازش شده با بخشی از داده‌ها جایگزین نمود بطوریکه مدل جدید دارای دقت مورد نظر باشد، می‌توان تعداد دماها و فرکانس‌های لازم جهت انجام آزمایش جاروب فرکانسی را کاهش داد. برای این منظور، در این مطالعه، نتایج آزمایش مدول دینامیکی با تعداد دماها و فرکانس‌های بارگذاری مختلف بر روی مخلوط و ملات آسفالتی<sup>۱</sup> مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و منحنی‌های جامع آنها در تعداد دماها و فرکانس‌های بارگذاری متفاوت ترسیم و مدل CAM بر آنها برازش داده شده و خروجی مدل‌های برازش شده بر منحنی‌های جامع با یکدیگر مقایسه شده است. بنابراین هدف اصلی از انجام این پژوهش، انتخاب تعداد بهینه دماها و فرکانس‌های بارگذاری مورد نیاز

شیو و همکاران [۱۲] با استفاده از معادلات ارائه شده توسط بوئج و همکاران و با در نظر گرفتن دو فرکانس بسیار نزدیک  $\omega_j$  و  $\omega_j$  تلاش کردند تا مقدار ضریب انتقال را محاسبه نمایند. آن‌ها با جایگذاری فرکانس‌ها و انتگرال‌گیری از دو طرف معادله (۴) به معادله (۵) دست یافتند:

$$\delta_{avg}^{(\omega_i, \omega_j)} \times \frac{2}{\pi} = \frac{\text{Log} \left( \left| E_{(T, \omega_j)}^* \right| \right) - \text{Log} \left( \left| E_{(T, \omega_i)}^* \right| \right)}{\text{Log}(\omega_j) - \text{Log}(\omega_i)} \quad (۵)$$

در این رابطه،  $\delta_{avg}^{(\omega_i, \omega_j)}$  میانگین زاویه‌های اختلاف فاز اندازه‌گیری شده در دو فرکانس  $\omega_j$  و  $\omega_i$  می‌باشد. به علاوه آن‌ها مشاهده نمودند که در صورتی که درون‌یابی با توجه به دما انجام شود، زاویه اختلاف فاز با تقریب دقیق‌تری به دست خواهد آمد. با استفاده از اصل برهم‌نهی زمان-دما در ناحیه انطباق دو دسته از داده‌ها خواهیم داشت:  $\left| E_{(T_i, \omega_i)}^* \right| = \left| E_{(T_{i+1}, \omega_{i+1})}^* \right|$ . بنابراین می‌توان معادله (۵) را با ساده‌سازی و استفاده از دو دمای نزدیک بهم  $T_i$  و  $T_{i+1}$ ، به معادله (۶) تبدیل نمودند [۱۲]:

$$\delta_{avg}^{(T_i, T_{i+1})}(\omega_{i+1}) \times \frac{2}{\pi} = \frac{\text{Log} \left( \left| E_{(T_i, \omega_{i+1})}^* \right| \right) - \text{Log} \left( \left| E_{(T_{i+1}, \omega_{i+1})}^* \right| \right)}{\text{Log}(\omega_{i+1}) - \text{Log}(\omega_i)} = \frac{\text{Log} \left( \left| E_{(T_i, \omega_{i+1})}^* \right| \right) - \text{Log} \left( \left| E_{(T_{i+1}, \omega_{i+1})}^* \right| \right)}{\text{Log}(\alpha_{(T_i, T_{i+1})})} \quad (۶)$$

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  $\omega_j$  می‌باشد. با بررسی معادله (۶)، ملاحظه می‌گردد که مقدار ضریب انتقال را می‌توان تنها در یک فرکانس به دست آورد. با نام‌گذاری دماهای اندازه‌گیری شده به صورت  $T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_{i+1}, \dots, T_n$  جهت تولید منحنی جامع در دمای مرجع، یعنی  $T_{ref}$  (که اندیس ref مابین ۱ و n می‌باشد)، می‌توان از جمع  $\text{Log}(\alpha_{(T_i, T_j)})$  استفاده نمود. بدین معنا که ضریب انتقال دمای  $T_i$  نسبت به دمای  $T_{ref}$  مطابق با معادله

که در این رابطه،  $\alpha_T$  ضریب انتقال بوده که مقدار آن در دمای مرجع برابر ۱ است. همچنین در این رابطه،  $f$  فرکانس انجام آزمایش و  $f_r$  فرکانس کاهش یافته (تبدیل یافته) می‌باشد [۵].

## ۲-۱- روش عددی LCPC

در این پژوهش، روش LCPC به منظور تعیین ضرایب انتقال مورد نیاز در ترسیم منحنی‌های جامع مورد استفاده قرار گرفته است. شیو و همکاران در سال ۲۰۰۶ روش LCPC را براساس روابط کرامر-کرونیگ توسعه دادند [۱۲]. روابط ارائه شده توسط کرامر-کرونیگ، دو بخش حقیقی و موهومی مدول دینامیکی (مدول ذخیره و مدول اتلاف) و زاویه اختلاف فاز را با استفاده از یک رابطه انتگرالی به یکدیگر مرتبط می‌کند. این روابط برای توابعی که در آن‌ها اصل برهم‌نهی بولتزمن<sup>۱</sup> صادق است، قابل استفاده می‌باشند. روابط کرامر-کرونیگ در معادله‌های (۲) و (۳) ارائه شده‌اند [۱۲]:

$$\text{Log} \left| E_{(\omega)}^* \right| - \text{Log} \left| E_{(\infty)}^* \right| = -\frac{2}{\pi} \times \int_0^{\infty} \frac{u \times \delta_{(u)} - \omega \times \delta_{(\omega)}}{u^2 - \omega^2} du \quad (۲)$$

$$\delta_{(\omega)} = \frac{2\omega}{\pi} \times \int_0^{\infty} \frac{\text{Log} \left| E_{(u)}^* \right| - \text{Log} \left| E_{(\omega)}^* \right|}{u^2 - \omega^2} du \quad (۳)$$

که در آن، پارامترهای  $E_{(\infty)}^*$ ،  $E_{(\omega)}^*$  و  $\delta_{(\omega)}$  به ترتیب مدول دینامیکی در فرکانس زاویه‌ای  $\omega$ ، مدول شیشه‌ای و زاویه اختلاف فاز در فرکانس زاویه‌ای  $\omega$  می‌باشند [۱۲]. بوئج<sup>۲</sup> و همکاران [۲۲] با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و ساده‌سازی معادله (۳)، معادله (۴) را برای زاویه فاز ارائه کردند.

$$\delta_{(\omega)} \approx \frac{\pi}{2} \times \frac{d\text{Log} \left( \left| E_{(\omega)}^* \right| \right)}{d\text{Log}(\omega)} \quad (۴)$$

1 Boltzman superposition principle

2 Booij

(۷) قابل محاسبه خواهد بود [۱۲]:

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

دماهای بالا را امکان‌پذیر کند. بر اساس روش CAM اصلاح شده، مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز برای قیر و مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان از روابط (۹) و (۱۰) بدست آورد:

$$E^* = E_c^* + \frac{E_g^* - E_c^*}{[1 + (f_c / f')^k]^{\frac{m_c}{k}}} \quad (9)$$

$$\delta = 90I - (90I - \delta_m) \left\{ 1 + \left[ \frac{\text{Log}(f_d / f')}{R_d} \right]^2 \right\}^{\frac{m_d}{2}} \quad (10)$$

که در این روابط،  $E_e^*$  مدول دینامیکی معادل (وقتی فرکانس به صفر میل کند)،  $E_g^*$  مدول برشی شیشه‌ای (وقتی فرکانس به بی‌نهایت میل کند)،  $f'$  فرکانس کاهش‌یافته،  $f_c$  و  $f_d$  پارامترهایی از جنس فرکانس،  $\delta_m$  ثابت زاویه اختلاف فاز،  $m_e$ ،  $k$ ،  $m_d$  و  $R_d$  پارامترهای بدون بعد شکل و I برای مخلوط‌های آسفالتی همواره برابر با صفر است و برای قیر صفر (در فرکانس‌های بیشتر از  $f_d$  و ۱ (در فرکانس‌های کمتر از  $f_d$ ) می‌باشد [۶]. در این مدل،  $f'$  با تقسیم فرکانس بر ضریب انتقال محاسبه شده تعیین می‌شود. برای تعیین پارامترهای دیگر مدل CAM اصلاح‌شده در قیر، سه پارامتر  $E_g^*$ ،  $E_e^*$  و  $m_e$  به ترتیب برابر با یک گیگاپاسکال، صفر و یک در نظر گرفته می‌شوند و سایر پارامترها، از برازش مدل CAM اصلاح‌شده بر منحنی جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز به دست خواهند آمد. همچنین برای تعیین پارامترهای مدل CAM اصلاح‌شده در مخلوط‌های آسفالتی، کلیه پارامترها از برازش این مدل بر منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز تعیین خواهند شد [۶].

### ۳- مواد و روش آزمون

#### ۳-۱- مواد و مصالح

##### ۳-۱-۱- قیر

در این پژوهش از قیر خالص با درجه عملکردی PG 64-16 و درجه نفوذ ۶۰/۷۰ تولیدی شرکت پالایش نفت پاسارگاد استفاده شده است. مشخصات قیر مورد استفاده در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

در نهایت شیو و همکاران معادله (۸) را با جایگزینی معادله (۶) در معادله (۷) جهت تعیین مقدار ضریب انتقال دمای  $T_i$  نسبت به دمای  $T_{ref}$  ارائه دادند [۱۲]:

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

#### ۲-۲- مدل CAM اصلاح‌شده

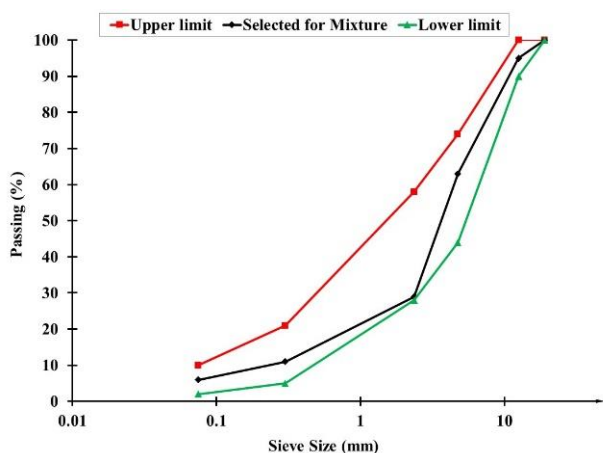
مدل CAM اصلاح شده یکی از مدل‌های عددی جهت پیش‌بینی رفتار منحنی جامع مدول دینامیکی و زاویه فاز قیرهای خالص و مخلوط‌های آسفالتی است که در این پژوهش به کار گرفته شده است. کریستنسن<sup>۱</sup> و اندرسون<sup>۲</sup> [۲۳] در سال ۱۹۹۲، در خلال پروژه شارپ<sup>۳</sup> توانستند یک مدل ریاضی از توزیع ویبال<sup>۴</sup> را به منظور پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی قیر توسعه دهند که مدل CA نام گرفت. در سال ۱۹۹۹، ماراستانو<sup>۵</sup> و اندرسون [۲۴] با بررسی‌های خود، اصلاحاتی بر مدل CA اعمال کرده، مدل جدیدی را توسعه و آن را مدل CAM نام‌گذاری کردند که به طور گسترده در ادبیات موضوع به منظور پیش‌بینی خواص رئولوژیکی قیر به کار گرفته شده است. پس از آن در سال ۲۰۰۱، زنگ<sup>۶</sup> و همکاران [۲۵] مدل CAM را برای توصیف رفتار قیرهای اصلاح‌شده و مخلوط‌های آسفالتی تعمیم دادند و مدل CAM اصلاح‌شده را ایجاد کردند تا پیش‌بینی تغییرات غیرخطی و نواحی مجانب افقی<sup>۷</sup> در نتایج خواص ویسکوالاستیک در

- 1 Christensen
- 2 Anderson
- 3 SHRP
- 4 Weibel
- 5 Marăsteanu
- 6 Zeng
- 7 Plateau region

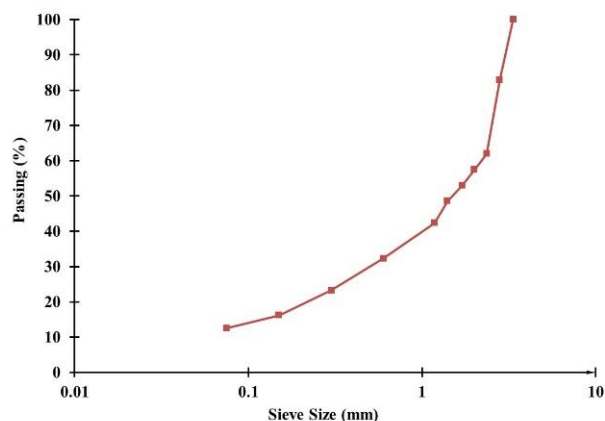
جدول ۱. مشخصات قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ (درجه عملکردی PG 64-16)

Table 1. The properties of a 60-70 penetration grade bitumen

روش آزمایش	مقدار	ویژگی
ASTM D7	۱/۰۲	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )
ASTM D5	۶۶	درجه نفوذ (0.1 mm)
ASTM D36	۴۹/۵	نقطه نرمی (°C)
ASTM D113	> ۱۰۰	شکل پذیری (cm)
ASTM D1754	۰/۷۵	افت وزنی ناشی از حرارت (%)
ASTM D4402	۳۳۱/۵	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵°C (Pa.s)
ASTM D92	۳۱۵	نقطه اشتعال (°C)



(ب)



(الف)

شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در تولید ملات (شکل الف) و مخلوط آسفالتی (شکل ب)

Fig. 2. The gradation of aggregates for asphalt mortar (Fig. a) and asphalt mixture (Fig. b)

استفاده شده است. برای این منظور به کمک دستگاه UTM25-IPC آزمایشگاه روسازی پیشرفته دانشگاه صنعتی امیرکبیر، آزمایش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر و قطر ۷۰ میلی‌متر در مقیاس ملات و نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر و قطر ۱۰۰ میلی‌متر در مقیاس مخلوط آسفالتی انجام شده است. تعداد نمونه‌ها برای هر مقیاس سه عدد بوده است و همچنین این آزمایش در فرکانس‌های بارگذاری ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۵ هرتز و دماهای آزمایش ۱۰-، ۵-، صفر، ۴/۴ و ۱۰ و ۲۱/۱ درجه سانتی‌گراد برای مقیاس ملات و دماهای ۱۰-، صفر، ۴/۴،

۳-۱-۲- مصالح سنگی

در این پژوهش از مصالح سیلیسی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است. نمودار دانه‌بندی مربوط به مخلوط آسفالتی و ملات آسفالتی در شکل ۲ ارائه شده است. همچنین مشخصات مصالح سنگی مصرفی در جدول ۲ ذکر شده است.

۳-۲- روش آزمون

به منظور تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک ملات و مخلوط آسفالتی، از آزمایش مدول دینامیکی مطابق با استاندارد

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی سیلیسی مورد استفاده در این پژوهش

Table 2. The properties of aggregates used in this study

محدودیت‌های استاندارد	روش آزمایش	مقدار	ویژگی
-	ASTM D854	۲/۶۵	وزن مخصوص فیلر (g/cm <sup>3</sup> )
-		۲/۴۹	توده
-	ASTM C128	۲/۵	وزن مخصوص ذرات ریزدانه (g/cm <sup>3</sup> )
-		۲/۵۱	ظاهری
-		۲/۵۱	توده
-	ASTM C127	۲/۵۲	وزن مخصوص ذرات درشت دانه (g/cm <sup>3</sup> )
-		۲/۵۳	ظاهری
حداکثر ۳۰	ASTM C131	۲۶	سایش لس آنجلس (%)
حداکثر ۱۵	ASTM D4791	۲	سنگدانه‌های ورقه‌ای و پوسته شده (%)
حداکثر ۱۲	ASTM C88	۳	سلامت سنگدانه‌ها <sup>۱</sup> با استفاده از سدیم سولفات (%)
حداقل ۹۰	ASTM D5821	۹۱	شکستگی در دو وجه (%)

<sup>1</sup> Soundness

که ملاحظه می‌شود با افزایش دما، مقادیر مدول دینامیکی در ملات و مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد که ناشی از کاهش میزان سختی آن‌ها است. همچنین افزایش دما سبب افزایش مقدار زاویه اختلاف فاز در مخلوط‌های مورد بررسی شده است. به علاوه، تغییرات فرکانس بارگذاری و مدول دینامیکی با یکدیگر رابطه مستقیم و تغییرات فرکانس بارگذاری و زاویه اختلاف فاز با یکدیگر رابطه معکوس دارند. پژوهش‌های پیشین نیز به صورت مشابه کاهش مدول دینامیکی و افزایش زاویه اختلاف فاز را با افزایش دما و کاهش فرکانس بارگذاری گزارش کرده و آن را ناشی از کاهش سختی مخلوط در این حالت‌ها دانسته‌اند [۷، ۱۵، ۱۶].

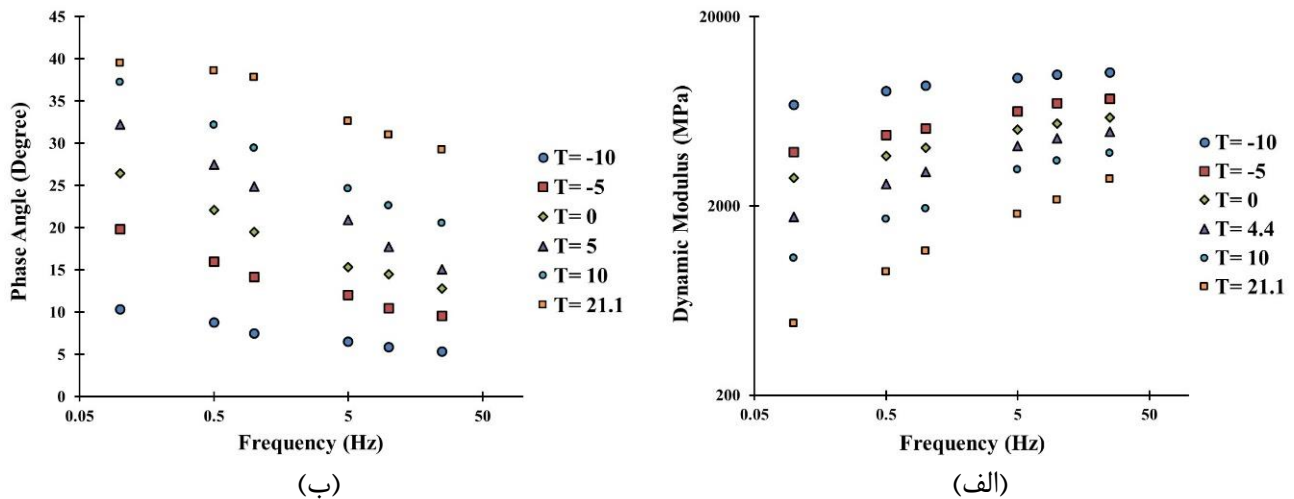
منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز بر حسب فرکانس زاویه‌ای به کمک روش LCPC برای هر دو مقیاس ملات و مخلوط آسفالتی به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ ترسیم شده است. همچنین به منظور تعیین پارامترهای مدل CAM اصلاح‌شده، این مدل بر منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز در هر دو مقیاس برازش داده شد و پارامترهای مدل از طریق کمینه‌سازی

۲۱/۱، ۳۷/۸ و ۵۴/۴ درجه سانتی‌گراد برای مقیاس مخلوط آسفالتی در حالت تنش کنترل و با شکل بارگذاری فشاری نیمه‌سینوسی انجام شده است. نتایج مدول دینامیکی (E\*) و زاویه اختلاف فاز (δ) جهت تولید منحنی‌های جامع خصوصیات ویسکوالاستیک ملات و مخلوط آسفالتی اندازه‌گیری و ثبت شده است. لازم به ذکر است که به دلیل تغییر شکل هندسه اولیه نمونه‌های ملات آسفالتی، انجام آزمایش در دماهای بالاتر (۳۷/۸ و ۵۴/۴ درجه سانتی‌گراد) بر روی این نمونه‌ها امکان‌پذیر نبود.

#### ۴- نتایج و بحث

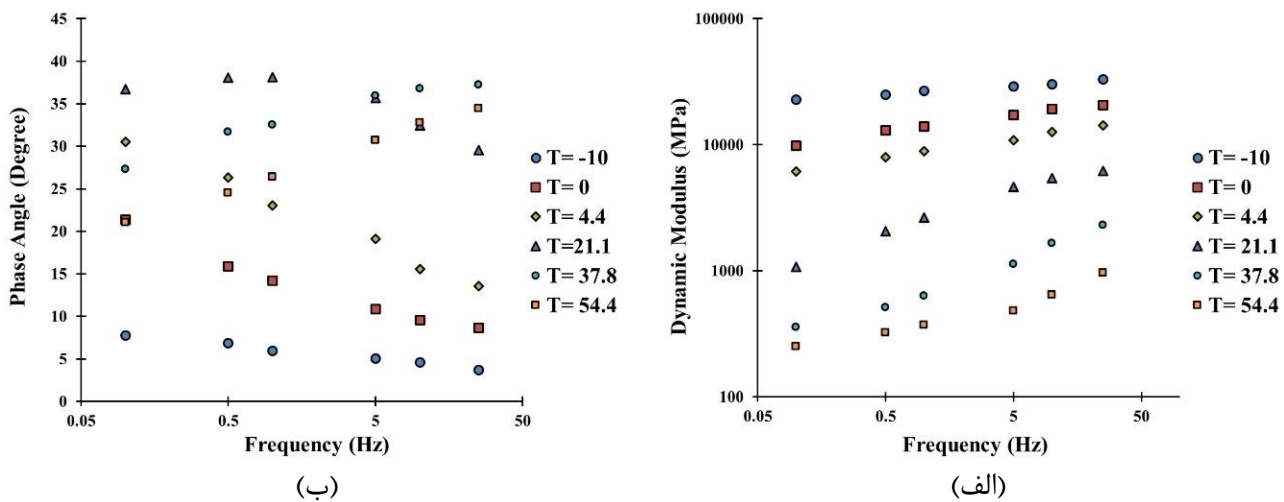
۴-۱- نتایج آزمایش جاروب فرکانسی ملات و مخلوط‌های آسفالتی جهت تعیین خواص ویسکوالاستیک، آزمایش جاروب فرکانسی در دماها و فرکانس‌های بارگذاری مختلف بر روی نمونه‌های ملات و مخلوط آسفالتی انجام شد. مقادیر مدول دینامیکی مختلف و زاویه اختلاف فاز حاصل از انجام آزمایش بر روی نمونه‌های ملات و مخلوط آسفالتی به ترتیب در شکل ۳ و شکل ۴ قابل ارائه شده است. همانطور





شکل ۳. نمودار مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس حاصل از آزمایش مدول دینامیکی بر روی نمونه‌های ملات آسفالتی

Fig. 3. The results of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) of asphalt mortar



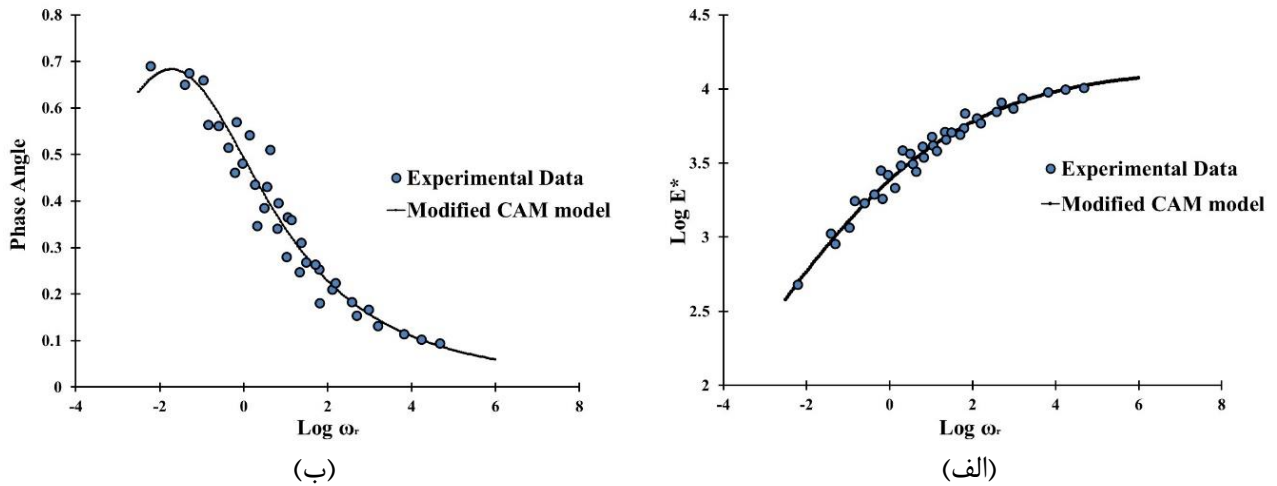
شکل ۴. نمودار مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس حاصل از آزمایش مدول دینامیکی بر روی نمونه‌های مخلوط آسفالتی

Fig. 4. The results of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) of asphalt mixture

و الگوهای منحنی جامع را به خوبی منعکس کرده است. بنابراین نتایج پژوهش جاری، خروجی‌های پژوهش اصغرزاده و همکاران [۱۳] که مدعی عملکرد مطلوب مدل CAM اصلاح‌شده در پیش‌بینی خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی خالص بودند را تایید می‌کند.

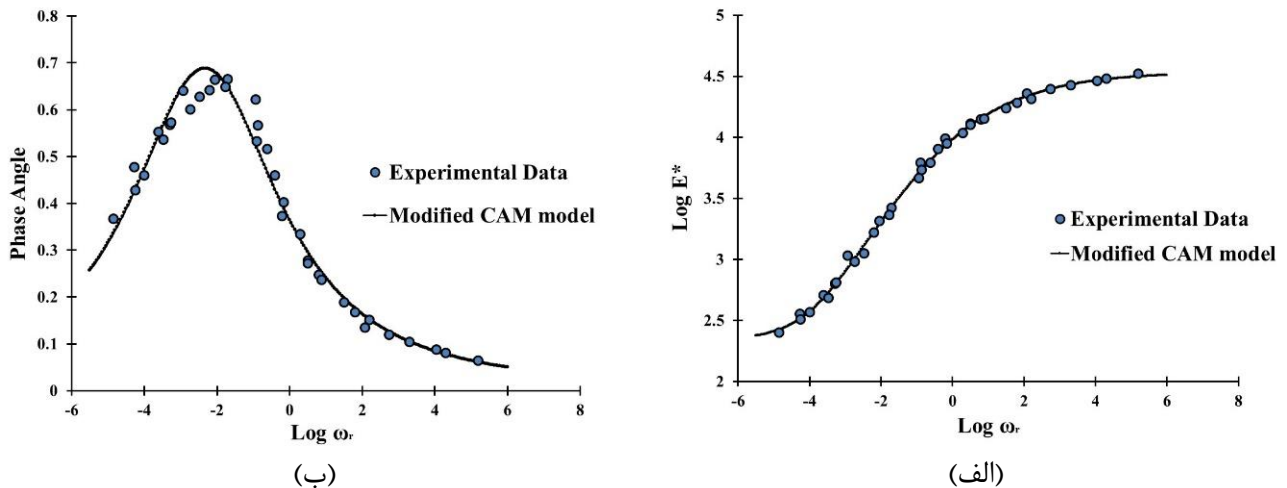
مجموع مربعات خطاها به دست آمده است که در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، روش LCPC به خوبی در تولید منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز برای ملات و مخلوط آسفالتی به کار گرفته شد. همچنین با برازش مدل CAM اصلاح‌شده روی منحنی‌های جامع، ملاحظه می‌شود که این مدل بر منحنی‌های جامع ملات و مخلوط آسفالتی برازش شده





شکل ۵. منحنی جامع مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس زاویه‌ای در مقیاس ملات آسفالتی

Fig. 5. The master curves of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) for asphalt mortar scale



شکل ۶. منحنی جامع مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس زاویه‌ای در مقیاس مخلوط آسفالتی

Fig. 6. The master curves of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) for asphalt mixture scale

منظور، داده‌ها در تک تک فرکانس‌ها به تنهایی مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهده شد که مدل برازش شده بر داده‌های کاهش یافته در یک فرکانس، نمی‌تواند پارامترهای اصلی منحنی جامع و مقادیر مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز را به خوبی مدل پیش‌بینی کند. با افزایش تعداد فرکانس‌های بارگذاری به دو فرکانس و برازش مدل اصلاح شده بر منحنی جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز داده‌های اندازه‌گیری شده در ترکیبات مختلف فرکانس‌ها، مشاهده شد که پارامترهای اصلی مدل برازش شده  $E^*_{(g)}$ ،  $E^*_{(e)}$  و  $S_{(m)}$  در دو

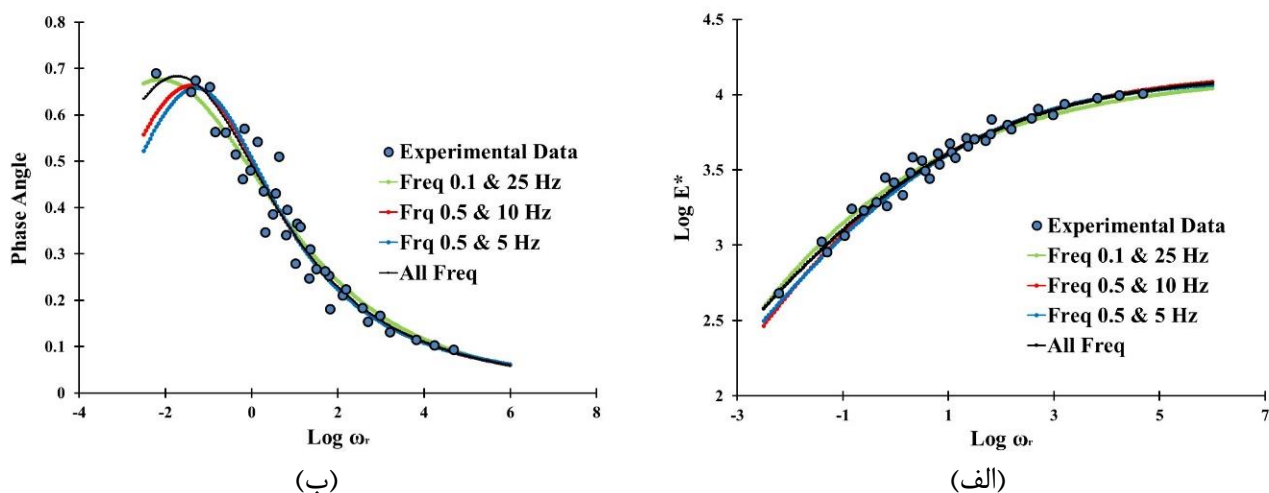
۲-۴ تعیین تعداد فرکانس‌های بهینه در تعداد دمای ثابت جهت تولید منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز

به منظور تعیین تعداد فرکانس‌های بهینه، رویکرد این پژوهش بر این مبناست که اولاً پارامترهای اصلی مدل برازش شده بر منحنی جامع  $E^*_{(g)}$ ،  $E^*_{(e)}$  و  $S_{(m)}$  با کاهش تعداد فرکانس‌ها تغییر معناداری پیدا نکند و ثانیاً مقادیر پیش‌بینی شده مدل برازش شده بر کل داده‌ها و مدل برازش شده بر داده‌های کاهش یافته، مشابه باشند و در نهایت نتایج پیش‌بینی‌های مدل به مقادیر واقعی نزدیک باشند. برای این

جدول ۳. مقادیر پارامترهای مدل اصلاح شده برازش داده شده به منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز کامپوزیت‌های قیری

Table 3. The main parameters of the modified CAM model fitted on master curves of dynamic modulus and phase angle

مخلوط آسفالتی	ملات آسفالتی	پارامترهای مدل اصلاح شده برای تعیین زاویه اختلاف فاز	مخلوط آسفالتی	ملات آسفالتی	پارامترهای مدل اصلاح شده برای تعیین مدول دینامیکی
۰/۶۸۷۸	۰/۶۸۲۵	$\delta_m$	۳۴۰۳۵	۱۳۵۹۶	$E^*(g)$
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۳۱	$f_d$	۲۱۹/۸۵	صفر	$E^*(e)$
۲/۱۸۷۷	۲/۵۳۹۶	$m_d$	۰/۷۱۵	۰/۴۸۸۰	$m_e$
۲/۶۲۳۹	۳/۱۸۱۲	$r_d$	۰/۲۴۷۱	۰/۲۰۶۳	$k$
-	-	-	۰/۰۱۵۴	۰/۲۳۵۵	$f_c$

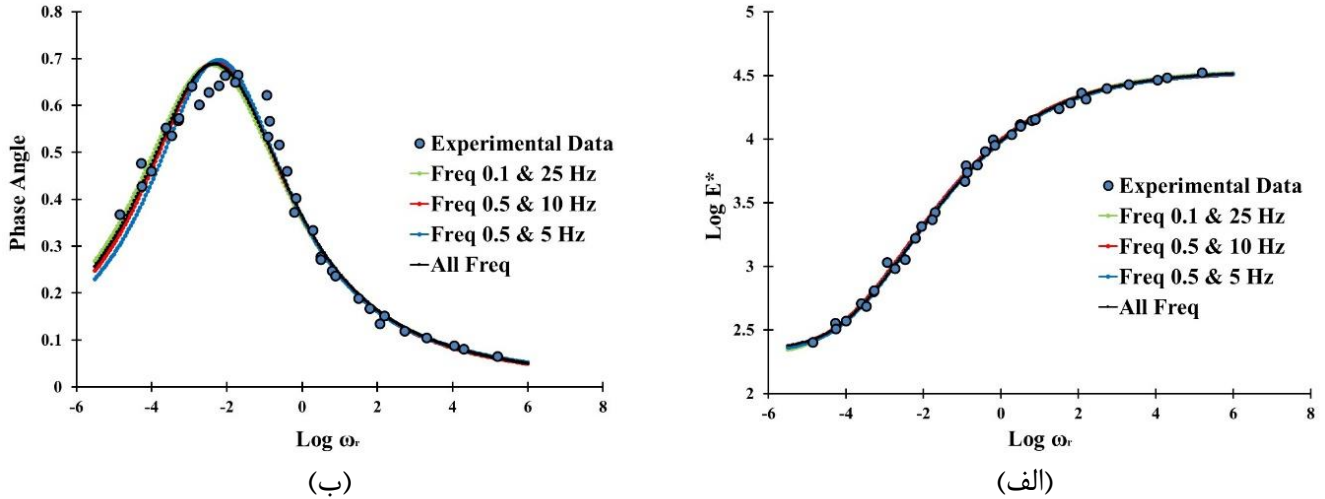


شکل ۷. منحنی جامع مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس زاویه‌ای با برازش مدل اصلاح شده به داده‌های آزمایشگاهی با تعداد فرکانس کمتر در مقیاس ملات آسفالتی

Fig. 7. The master curves of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) for asphalt mortar scale at the least number of frequencies

مدول دینامیکی در شش دما و شش فرکانس، آزمایش را در شش دما و دو فرکانس (یکی از سه ترکیب فوق) انجام داد، به نحوی که علاوه بر تعیین دقیق پارامترهای مدل اصلاح شده، پیش‌بینی صحیحی از مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز مخلوط و ملات آسفالتی حاصل شود. خروجی برازش مدل اصلاح شده بر داده‌های کاهش یافته در مقیاس ملات و مخلوط به ترتیب در شکل ۷ و شکل ۸ نمایش داده شده است. همچنین پارامترهای اصلی مدل‌های اصلاح شده ترسیم شده برای هر دو مقیاس در جدول ۴ قابل مشاهده می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، پارامترهای اصلی مدل‌های برازش شده

فرکانس مشخص با دقت بالایی با پارامترهای اصلی مدل برازش شده بر کل داده‌ها مطابقت دارد. همچنین مقادیر مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز پیش‌بینی شده به کمک مدل بدست آمده از داده‌های کاهش یافته و مقادیر آزمایشگاهی مطابقت دارد. لازم به ذکر است که جهت تعیین فرکانس‌های مطلوب، کلیه فرکانس‌های دو به دو مورد بررسی قرار گرفتند و سه زوج فرکانسی مطلوب (فرکانس‌های ۰/۱ و ۲۵ هرتز، فرکانس‌های ۰/۵ و ۱۰ هرتز و فرکانس‌های ۰/۵ و ۵ هرتز) که دو شرط فوق را در مخلوط آسفالتی و ملات آسفالتی ارضا می‌کنند، تعیین شدند. بدین معنا که می‌توان به جای انجام آزمایش



شکل ۸. منحنی جامع مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس زاویه‌ای با برازش مدل CAM اصلاح شده به داده‌های آزمایشگاهی با تعداد فرکانس کمتر در مقیاس مخلوط آسفالتی

Fig. 8. The master curves of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) for asphalt mixture scale at the least number of frequencies

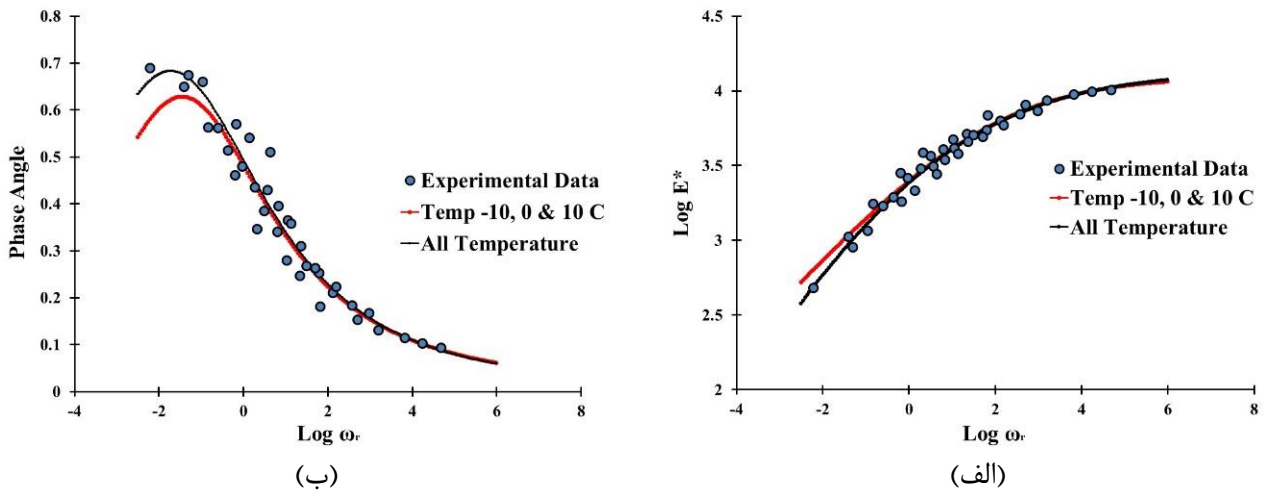
جدول ۴. مقادیر پارامترهای مدل CAM اصلاح شده برازش شده به منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز (با داده‌های کاهش یافته از نظر تعداد فرکانس آزمایش) مقیاس‌های ملات و مخلوط آسفالتی

Table 4. The main parameters of the modified CAM model fitted on master curves of dynamic modulus and phase angle scale at the least number of frequencies

مخلوط				ملات				پارامترهای اصلی مدل CAM اصلاح شده برای تعیین مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز
داده‌ها در فرکانس ۰/۵ و ۵ هرتز	داده‌ها در فرکانس ۰/۵ و ۱۰ هرتز	داده‌ها در فرکانس ۰/۱ و ۲۵ هرتز	داده‌های کامل	داده‌ها در فرکانس ۰/۵ و ۵ هرتز	داده‌ها در فرکانس ۰/۵ و ۱۰ هرتز	داده‌ها در فرکانس ۰/۱ و ۲۵ هرتز	داده‌های کامل	
۳۴۰۰۹	۳۳۶۱۸	۳۴۲۹۰	۳۴۰۳۵	۱۲۷۲۲	۱۴۳۴۰	۱۳۶۶۸	۱۳۵۹۶	$E^*_{(g)}$ (MPa)
٪ ۰/۱۰۸	٪ ۱/۲۳	٪ ۰/۷۵	صفر	٪ ۶/۴۳	٪ ۵/۴۷	٪ ۰/۵۳	صفر	$\frac{E^*_{(g-Reduced)} - E^*_{(g-FullData)}}{E^*_{(g-FullData)}}$
۲۱۲/۱۶	۲۱۲/۷۸	۱۹۶/۶۰	۲۱۹/۸۵	صفر	صفر	صفر	صفر	$E^*_{(e)}$ (MPa)
٪ ۳/۵۰	٪ ۳/۲۲	٪ ۱۰/۵۸	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	$\frac{E^*_{(e-Reduced)} - E^*_{(e-FullData)}}{E^*_{(e-FullData)}}$
۰/۶۹۶۱	۰/۶۹۰۹	۰/۶۸۶۲	۰/۶۸۷۸	۰/۶۵۷۳	۰/۶۶۲۳	۰/۶۷۵۵	۰/۶۸۲۵	$\delta_m$
٪ ۱/۲۱	٪ ۰/۴۵	٪ ۰/۲۳	صفر	٪ ۳/۶۹	٪ ۲/۹۶	٪ ۱/۰۳	صفر	$\frac{\delta_{(m-Reduced)} - \delta_{(m-FullData)}}{\delta_{(m-FullData)}}$

۲۵ هرتز، بیشترین مشابهت را با مدل اصلی (برازش شده بر کلیه داده‌ها) و داده‌های آزمایشگاهی دارد.

بر داده‌های کاهش یافته و داده‌های کامل، مشابه یکدیگر می‌باشند. همچنین با بررسی نتایج و خروجی مدل‌ها به نظر می‌رسد، برازش منحنی CAM اصلاح شده بر داده‌های موجود در فرکانس‌های ۰/۱



شکل ۹. منحنی جامع مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس زاویه‌ای با برازش مدل اصلاح‌شده به داده‌های آزمایشگاهی با تعداد دمای آزمایش کمتر در مقیاس ملات آسفالتی ۱.

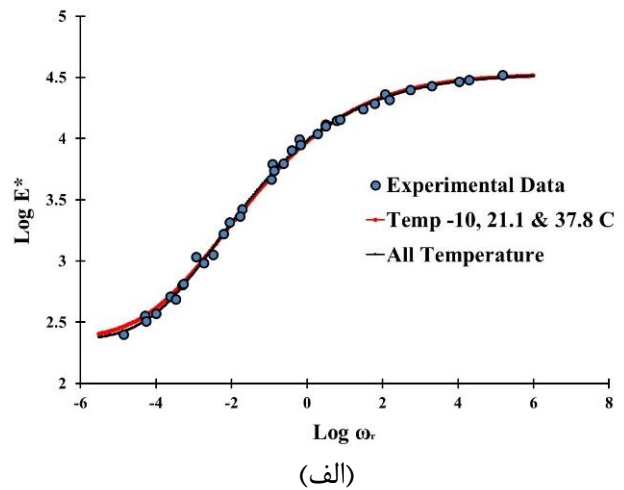
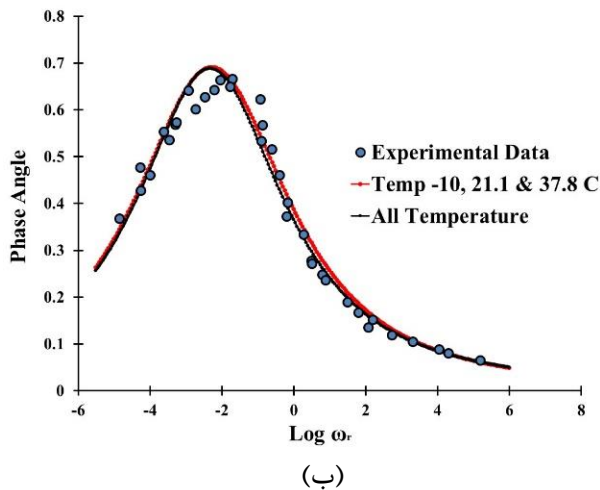
Fig. 9. The master curves of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) for asphalt mortar scale at the least number of temperatures

و مخلوط آسفالتی برازش داده شد. مشاهده گردید که استفاده از سه دما به خوبی می‌تواند مدلی با دقت مدلی اصلی و با پارامترهای اصلی مشابه را نتیجه دهد و در عین حال به خوبی نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی نماید. از این‌رو، ترکیب دمایی مطلوب جهت تولید منحنی جامع مناسب در مقیاس ملات ترکیب دمایی ۰، ۱۰ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد و در مقیاس مخلوط ۱۰، ۲۱/۱ و ۳۷/۸ درجه سانتی‌گراد حاصل شد. نتیجه این ترکیبات سه‌تایی نشان می‌دهد که داده‌های دمای پایین، یکی از بخش‌های اصلی منحنی جامع می‌باشند و در تعیین پارامترهای مدل نقش اصلی داشته که نبایستی از دایره اطلاعات حذف شوند. علاوه بر این، بکارگیری یکی از دماهای بالا برای رسیدن به نتیجه مطلوب الزامی می‌باشد که در این رابطه، دمای ماقبل بیشینه، یعنی ۳۷/۸ درجه سانتی‌گراد، مطلوب‌تر بود، زیرا غالباً منحنی‌های جامع در این دماها تغییر روند می‌دهند و بنابراین استفاده از اطلاعات این دما در افزایش دقت مدل برازش‌شده بر منحنی جامع الزامی است. همچنین دماهای میانی ذکر شده جهت افزایش دقت مدل در ناحیه میانی منحنی جامع حائز اهمیت می‌باشد.

خروجی برازش مدل اصلاح‌شده که بر روی داده‌های کاهش‌یافته برای مقیاس ملات و مخلوط آسفالتی، به ترتیب در شکل ۹ و شکل ۱۰ نمایش داده شده است. همچنین، پارامترهای اصلی مدل‌های اصلاح‌شده برازش‌شده بر کلیه داده‌ها و

۳-۴ تعیین تعداد دماهای بهینه در تعداد فرکانس ثابت جهت تولید منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز

مشابه با رویکرد تعیین تعداد فرکانس‌های بهینه، در این بخش جهت تعیین تعداد دماهای بهینه به این صورت عمل می‌شود که اولاً پارامترهای اصلی مدل برازش‌شده بر منحنی جامع  $E^*_{(g)}$ ،  $E^*_{(e)}$  و  $S_{(m)}$  با کاهش تعداد فرکانس‌ها تغییر معناداری پیدا نکنند و ثانیاً مقادیر پیش‌بینی‌شده مدل برازش‌شده بر کل داده‌ها و مدل برازش‌شده بر داده‌های کاهش‌یافته، مشابه باشند و به عبارت دیگر، نتایج مدل به مقدار واقعی نزدیک باشند. برای این منظور، برازش مدل اصلاح‌شده بر داده‌های آزمایشگاهی در هر مقیاس و در هر یک از دماها به تنهایی انجام گرفت و مشاهده شد که مدل برازش‌شده بر داده‌های کاهش‌یافته در یک دما، نمی‌تواند پارامترهای اصلی منحنی جامع و مقادیر مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز را پیش‌بینی کند. در گام بعدی، تعداد دماهای آزمایش به دو دما افزایش یافته و مدل اصلاح‌شده بر داده‌های آزمایشگاهی بر ترکیب‌های دوتایی مختلف دما برازش شد. نتایج نشان داد که اگرچه منحنی جامع مدول دینامیکی به خوبی می‌تواند بر داده‌های آزمایشگاهی و مدل اصلی منطبق شود، اما منحنی جامع زاویه اختلاف فاز به خوبی با داده‌های کاهش‌یافته قابل تولید نیست. لذا در مرحله بعد، تعداد دماهای آزمایش به سه دما افزایش پیدا کرد و مدل اصلاح‌شده بر داده‌های اندازه‌گیری شده در سه دما (ترکیب‌های مختلف دمایی) برای هر دو مقیاس ملات



شکل ۱۰. منحنی جامع مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس زاویه‌ای با برازش مدل اصلاح‌شده به داده‌های آزمایشگاهی با تعداد دمای آزمایش کمتر در مقیاس مخلوط آسفالتی

Fig. 10. The master curves of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) for asphalt mixture scale at the least number of temperatures

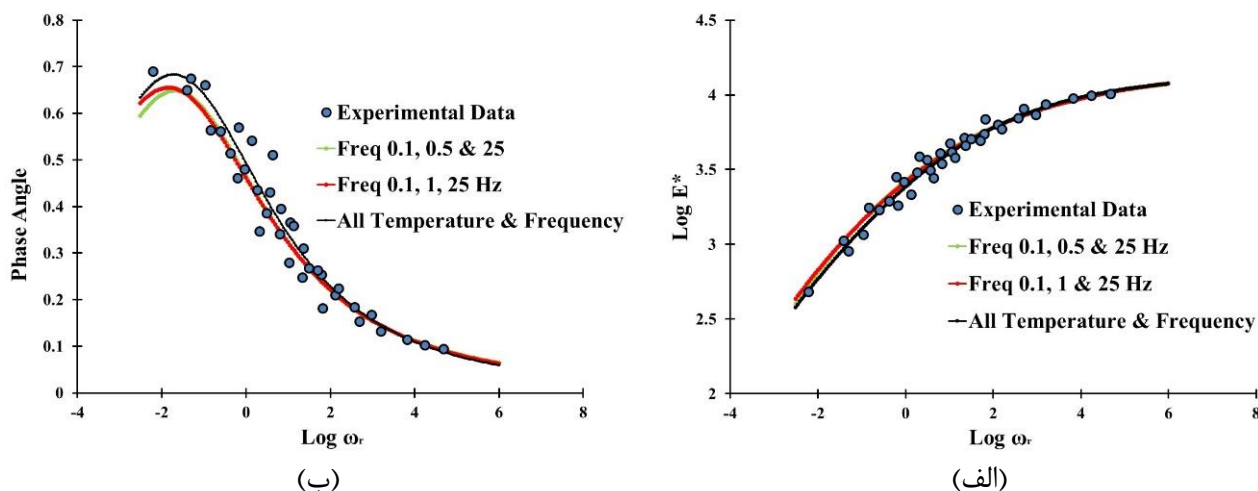
جدول ۵. مقادیر پارامترهای مدل اصلاح‌شده برازش داده شده به منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز (با داده‌های کاهش‌یافته از نظر تعداد دمای آزمایش) در مقیاس‌های ملات و مخلوط آسفالتی

Table 5. The main parameters of the modified CAM model fitted on master curves of dynamic modulus and phase angle at the least number of temperatures

مخلوط آسفالتی		ملات آسفالتی		پارامترهای اصلی مدل اصلاح‌شده برای تعیین مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز
داده‌ها در سه دمای -۱۰ و ۲۱/۱ و ۳۷/۸ درجه سانتی‌گراد	داده‌های کامل	داده‌ها در فرکانس ۰/۵ و ۵ هرتز	داده‌های کامل	$E^*_{(g)}$ (MPa)
۳۳۷۳۹	۳۴۰۳۵	۱۲۴۶۷	۱۳۵۹۶	$\left  \frac{E^*_{(g-Reduced)} - E^*_{(g-FullData)}}{E^*_{(g-FullData)}} \right $
٪ ۰/۸۷	صفر	٪ ۸/۳۰	صفر	$E^*_{(e)}$ (MPa)
۲۲۵/۱۳	۲۱۹/۸۵	صفر	صفر	$\left  \frac{E^*_{(e-Reduced)} - E^*_{(e-FullData)}}{E^*_{(e-FullData)}} \right $
٪ ۲/۴۰	صفر	صفر	صفر	$\delta_m$
۰/۶۹۰۴	۰/۶۸۷۸	۰/۶۲۷۸	۰/۶۸۲۵	$\left  \frac{\delta_{(m-Reduced)} - \delta_{(m-FullData)}}{\delta_{(m-FullData)}} \right $
٪ ۰/۳۸	صفر	٪ ۸/۰۱	صفر	

دینامیکی در شش دما و شش فرکانس، می‌توان آزمایش را در شش فرکانس و سه دما انجام داد، به طوری که علاوه بر تعیین دقیق پارامترهای مدل CAM، پیش‌بینی صحیحی از مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز مخلوط و ملات بدست آورد.

داده‌ها در سه دمای منتخب (دماهای -۱۰، ۰ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد برای مقیاس ملات آسفالتی و دماهای -۱۰، ۲۱/۱ و ۳۷/۸ درجه سانتی‌گراد برای مقیاس مخلوط آسفالتی) در جدول ۵ قابل ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج و خروجی مدل‌ها به طرز معناداری مشابه و قابل قبول می‌باشند. بنابراین به جای انجام آزمایش مدول



شکل ۱۱. منحنی جامع مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس زاویه‌ای با برازش مدل CAM اصلاح‌شده به داده‌های آزمایشگاهی با تعداد بهینه دما و فرکانس بارگذاری در مقیاس ملات آسفالتی

Fig. 11. The master curves of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) for asphalt mortar scale at the least number of temperatures and frequencies

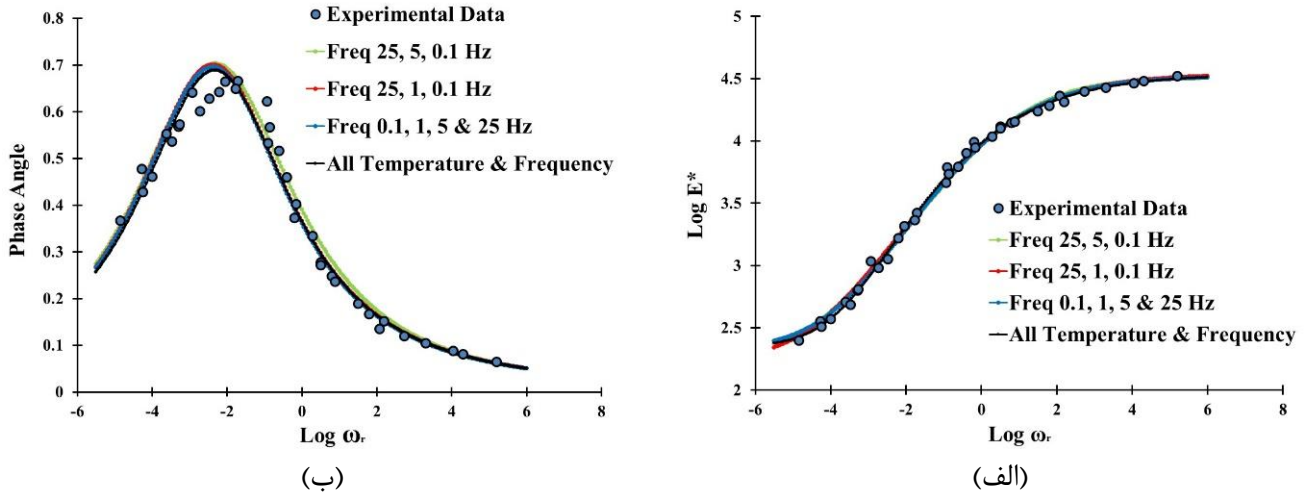
منحنی جامع و مقادیر مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز را به خوبی پیش‌بینی کند. در گام بعدی تعداد فرکانس‌های بارگذاری به سه فرکانس افزایش یافت و مدل CAM اصلاح‌شده بر ۹ داده آزمایشگاهی در سه فرکانس (ترکیب‌های مختلف فرکانسی) برازش شد و مشاهده شد که با استفاده از سه فرکانس، می‌توان به دقت مطلوبی در پیش‌بینی مقادیر مدول دینامیکی، زاویه اختلاف فاز و همچنین پارامترهای اصلی مدل در هر دو مقیاس دست یافت. در نهایت، برای مقیاس ملات (در ترکیب دمایی ۱۰، ۰ و ۱۰ درجه سانتی‌گراد) دو ترکیب ۰/۱، ۰/۵ و ۲۵ و همچنین ۰/۱، ۱ و ۲۵ هرتز و در مقیاس مخلوط (در ترکیب دمایی ۱۰، ۰ و ۲۱/۱ و ۳۷/۸ درجه سانتی‌گراد) دو ترکیب ۰/۱، ۱ و ۲۵ و همچنین ۰/۱، ۵ و ۲۵ هرتز بدست آمد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، فرکانس‌های ۰/۱ و ۲۵ در کلیه ترکیب‌های کاهش‌یافته حضور دارد که حاکی از اهمیت انجام آزمایش‌های مربوط در بیشینه و کمینه فرکانس‌ها می‌باشد. همچنین ترکیب فرکانسی ۰/۱، ۱ و ۲۵ هرتز در هر دو مقیاس ملات و مخلوط آسفالتی نماینده خوبی از کلیه ۶ فرکانس مورد بررسی بوده و می‌تواند جهت تولید منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز به کار گرفته شوند.

خروجی برازش مدل CAM اصلاح‌شده بر داده‌های کاهش‌یافته برای مقیاس ملات و مخلوط آسفالتی به ترتیب در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نمایش داده شده است. همچنین پارامترهای اصلی مدل‌های

۴-۴ تعیین تعداد دماها و فرکانس‌های بهینه جهت تولید منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز

آزمایش جاروب فرکانسی از جمله آزمایش‌های زمان‌بر مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد که بخش اعظمی از زمان آزمایش، صرف به رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای مورد نظر می‌شود. از این‌رو کاهش تعداد دماهای آزمایش در مقیاس با کاهش تعداد فرکانس‌های بارگذاری، تاثیر چشمگیرتری در کاهش زمان انجام آزمایش دارد. با توجه به نتایج بخش ۴-۳ که حداقل تعداد دماهای آزمایش جهت تولید مدل مطلوب که بتواند به خوبی بر داده‌ها برازش شود و پیش‌بینی دقیقی از مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز بدهد سه دما محاسبه شد، در این قسمت تلاش می‌شود تا تعداد فرکانس‌های بارگذاری در این سه دمای مذکور، طوری کاهش یابد تا پارامترهای اصلی مدل برازش‌شده بر منحنی جامع داده‌های کاهش‌یافته  $E_{(g)}^*$ ،  $E_{(e)}^*$  و  $S_{(m)}$  و مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل، در هر دو مقیاس قابل قبول باشد. همچنین با توجه به آنکه در مدل CAM اصلاح‌شده، تعداد پنج پارامتر برای مدول دینامیکی و تعداد چهار پارامتر برای زاویه اختلاف فاز نیاز می‌باشد، لذا حداقل بایستی دو فرکانس جهت تشکیل مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، برازش مدل CAM اصلاح‌شده بر داده‌های آزمایشگاهی در ترکیبات سه دمایی، در دو فرکانس (ترکیب‌های فرکانسی مختلف) انجام گرفت و مشاهده شد که مدل برازش داده شده بر داده‌های کاهش‌یافته، نمی‌تواند پارامترهای اصلی





شکل ۱۲. منحنی جامع مدول دینامیکی (شکل الف) و زاویه اختلاف فاز (شکل ب) در مقابل فرکانس زاویه‌ای با برازش مدل اصلاح‌شده به داده‌های آزمایشگاهی با تعداد بهینه دما و فرکانس بارگذاری در مقیاس مخلوط آسفالتی

Fig. 12. The master curves of dynamic modulus (Fig. a) and phase angle (Fig. b) for asphalt mixture scale at the least number of temperatures and frequencies

### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تولید منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز با کمترین تعداد دما و فرکانس بارگذاری در دو مقیاس ملات و مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، آزمایش تعیین مدول دینامیکی با استفاده از جاروب فرکانسی در دو مقیاس ملات و مخلوط آسفالتی در فرکانس‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۵، ۱۰ و ۲۵ هرتز انجام شد. آزمایش در دماهای ۱۰-، ۵-، ۰، ۴/۴، ۱۰ و ۲۱/۱ درجه سانتی‌گراد برای مقیاس ملات و ۱۰-، ۰، ۴/۴، ۲۱/۱، ۳۷/۸ و ۵۴/۴ درجه سانتی‌گراد برای مقیاس مخلوط انجام شدند. همچنین ضرایب انتقال منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز به کمک روش LCPC تعیین شد و منحنی‌های جامع در تعداد دماها و فرکانس‌های بارگذاری مختلف ترسیم و مدل اصلاح‌شده به آن‌ها برازش داده شد. نتایج زیر از پژوهش انجام شده قابل بیان است:

۱- با کاهش تعداد فرکانس‌های بارگذاری از ۶ فرکانس به ۲ فرکانس، دقت تولید مدل اصلاح‌شده برازش‌شده تغییر

CAM اصلاح‌شده برازش‌شده بر کلیه داده‌ها و همچنین داده‌های سه دمای منتخب (۱۰-، ۰، ۱۰ درجه سانتی‌گراد برای مقیاس ملات و ۱۰-، ۲۱/۱ و ۳۷/۸ درجه سانتی‌گراد برای مقیاس مخلوط) و سه فرکانس منتخب (۰/۱، ۰/۵، ۱ یا ۲۵، ۰/۱ یا ۱ و ۲۵ هرتز برای مقیاس ملات و ۰/۱، ۱ و ۲۵ یا ۰/۱، ۵ و ۲۵ هرتز) در جدول ۶ قابل ارائه شده‌اند. همانطور ملاحظه می‌شود که نتایج و خروجی مدل‌ها به طرز معناداری مشابه و قابل قبول می‌باشند، بنابراین می‌توان به جای انجام آزمایش مدول دینامیکی در شش دما و شش فرکانس، آزمایش را در سه فرکانس و سه دما انجام داد، به نحوی که علاوه بر تعیین دقیق پارامترهای مدل CAM، پیش‌بینی صحیحی از مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز مخلوط و ملات حاصل شود. همچنین نتایج جدول ۶ و شکل ۱۲ نشان می‌دهند که در مقیاس مخلوط، با افزایش تعداد فرکانس‌های بارگذاری به چهار فرکانس، می‌توان دقت تعیین پارامترهای مدل برازش‌شده را افزایش داد. با این حال، در مقیاس ملات با افزایش تعداد فرکانس‌های بارگذاری، دقت تعیین پارامترهای مدل افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا نمی‌کند.



جدول ۶- مقادیر پارامترهای مدل CAM اصلاح شده برازش داده شده به منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز (با داده‌های کاهش یافته از نظر تعداد دما و فرکانس آزمایش) در مقیاس‌های ملات و مخلوط

Table 6. The main parameters of the modified CAM model fitted on master curves of dynamic modulus and phase angle at the least number of temperatures and frequencies

مخلوط آسفالتی			ملات آسفالتی			پارامترهای اصلی مدل CAM اصلاح شده برای تعیین مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز	
داده‌ها در سه دما (۱۰-، ۲۱/۱ و ۳۷/۸) و چهار فرکانس (۰/۱، ۰/۱ و ۲۵)	داده‌ها در سه دما (۱۰-، ۲۱/۱ و ۳۷/۸) و سه فرکانس (۰/۱، ۰/۱ و ۲۵)	داده‌ها در سه دما (۱۰-، ۲۱/۱ و ۳۷/۸) و سه فرکانس (۰/۱، ۰/۱ و ۲۵)	داده‌ها در سه دما (۱۰-، ۲۱/۱ و ۳۷/۸) و سه فرکانس (۰/۱، ۰/۱ و ۲۵)	داده‌ها در سه دما (۱۰-، ۲۱/۱ و ۳۷/۸) و سه فرکانس (۰/۱، ۰/۱ و ۲۵)	داده‌های کامل		
۳۳۰۴۵	۳۴۲۰۸	۳۲۵۱۸	۳۴۰۳۵	۱۴۶۷۸	۱۴۶۴۸	۱۳۵۹۶	$E^*_{(g)}$ (MPa)
٪ ۲/۹۱	٪ ۰/۵۱	٪ ۴/۴۶	صفر	٪ ۷/۹۶	٪ ۷/۷۴	صفر	$\frac{E^*_{(g-Reduced)} - E^*_{(g-Full Data)}}{E^*_{(g-Full Data)}}$
۲۱۲/۴۲	۱۷۲/۳۶	۱۸۲/۵۶	۲۱۹/۸۵	صفر	صفر	صفر	$E^*_{(e)}$ (MPa)
٪ ۰/۶۲	٪ ۲۱/۶۰	٪ ۱۶/۶۹	صفر	صفر	صفر	صفر	$\frac{E^*_{(e-Reduced)} - E^*_{(e-Full Data)}}{E^*_{(e-Full Data)}}$
۰/۶۹۵۷	۰/۷۰۰۱	۰/۷۰۲۵	۰/۶۸۷۸	۰/۶۵۴۴	۰/۶۴۸۲	۰/۶۸۲۵	$\delta_m$
٪ ۱/۱۵	٪ ۱/۷۹	٪ ۲/۱۴	صفر	٪ ۴/۱۲	٪ ۵/۰۳	صفر	$\frac{\delta_{(m-Reduced)} - \delta_{(m-Full Data)}}{\delta_{(m-Full Data)}}$

۳- نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با کاهش تعداد دماها به ۳ دما و فرکانس‌های بارگذاری به ۳ فرکانس نیز می‌توان به منحنی‌های جامع و مدل‌های برازش شده با دقت بالا (در غالب موارد با دقت بیش از ۹۲ درصد) دست یافت، بدون آنکه اطلاعات مفیدی از منحنی‌ها (پارامترهای اصلی، روند و الگو) از دست برود. طبق این رویکرد، با کاهش تعداد دماها به عنوان مهم‌ترین عامل در افزایش زمان و هزینه آزمایش جاروب فرکانسی، می‌توان به طور میانگین ۵۰٪ (استفاده از ۳ دما بجای ۶ دما) هزینه‌ها را کاهش داد و در عین حال به نتایج مطلوب جهت تعیین خواص ویسکوالاستیک مخلوط‌های قیری دست یافت.

لازم به ذکر است که با توجه به آنکه در این پژوهش از یک نوع قیر و مصالح سنگی استفاده شده است، در تحقیقات آتی برای تایید یافته‌ها و دستاوردهای این پژوهش، بهتر است آزمایش‌های مذکور بر روی قیرها و مصالح سنگی مختلف انجام پذیرد.

محسوسی نداشته و پارامترهای اصلی مدل و مقادیر پیش‌بینی شده دارای دقت بسیار مطلوبی بوده است، به طوریکه اختلاف پارامترهای اصلی مدل‌های کاهش یافته نسبت به مدل اصلی غالباً کمتر از ۵ درصد بوده است که حاکی از دقت بیش از ۹۵ درصدی مدل‌های کاهش یافته می‌باشد. در این بین فرکانس‌های کمینه و بیشینه (۰/۱ و ۲۵ هرتز) به خوبی توانستند نماینده کلیه فرکانس‌ها باشند.

۲- کاهش تعداد دماهای بارگذاری از ۶ دما به ۳ دما موجب ضعف در تشکیل و عملکرد مدل‌های برازش شده نمی‌شود و داده‌های آزمایش در سه دما، به خوبی می‌توانند منحنی‌های جامع را با دقت بالا و مشابه با منحنی جامع حاصل از کل داده‌ها تولید نمایند. این مدل‌ها توانسته‌اند با دقت بیش از ۹۲ درصدی، پارامترهای اصلی مدل اصلی را برآورد کنند. همچنین بررسی‌ها نشان‌دهنده اهمیت دمای پایین (۱۰-) در تولید منحنی‌های جامع مدول دینامیکی و زاویه اختلاف فاز بوده است.

- [13] S.M. Asgharzadeh, N. Tabatabaee, K. Naderi, M.N. Partl, Evaluation of rheological master curve models for bituminous binders, *Materials and Structures*, 48(1) (2015) 393-406.
- [14] Y. Alghrafi, S. El-Badawy, E.-S.M. Abd Alla, 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.
- [15] M. Khodadadi, A. Khodaii, J. Absi, F.F. Tehrani, P. Hajikarimi, An experimental length scale investigation on viscoelastic behavior of bituminous composites: Focusing on mortar scale, *Construction and Building Materials*, 308 (2021) 124766.
- [16] G. Bazi, T.B. Assi, Asphalt concrete master curve using dynamic backcalculation, *International Journal of Pavement Engineering*, 23(1) (2022) 95-106.
- [17] B.M. Bayane, E. Yang, Q. Yanjun, Dynamic modulus master curve construction using Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM) model, *Int. J. Eng. Res. Appl*, 7(1) (2017) 53-63.
- [18] Y. Zhao, H. Liu, L. Bai, Y. Tan, Characterization of linear viscoelastic behavior of asphalt concrete using complex modulus model, *Journal of materials in civil engineering*, 25(10) (2013) 1543-1548.
- [19] Y.R. Kim, Y. Seo, M. King, M. Momen, Dynamic modulus testing of asphalt concrete in indirect tension mode, *Transportation Research Record*, 1891(1) (2004) 163-173.
- [20] J.H. Podolsky, R.C. Williams, E. Cochran, Effect of corn and soybean oil derived additives on polymer-modified HMA and WMA master curve construction and dynamic modulus performance, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(6) (2018) 541-552.
- [21] P.M. Vestena, S.L. Schuster, P.O.B. de Almeida Jr, C. Faccin, L.P. Specht, D. da Silva Pereira, Dynamic modulus master curve construction of asphalt mixtures: [1] P. Hajikarimi, F.M. Nejad, Applications of viscoelasticity: Bituminous materials characterization and modeling, Elsevier, 2021.
- [2] W. Huang, X. Zhang, Y. Yin, S. Cai, A numerical implementation of the three-dimensional viscoelastic model for asphalt mastic, *International Journal of Civil Engineering*, 16(5) (2018) 543-551.
- [3] E. Toraldo, E. Mariani, Effects of polymer additives on bituminous mixtures, *Construction and Building Materials*, 65 (2014) 38-42.
- [4] H.F. Brinson, L.C. Brinson, Polymer engineering science and viscoelasticity, An introduction, (2008) 99-157.
- [5] N.I.M. Yusoff, E. Chailleux, G.D. Airey, A comparative study of the influence of shift factor equations on master curve construction, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(6) (2011) 324.
- [6] Y.R. Kim, Modeling of asphalt concrete, 2008.
- [7] Y. Yin, W. Huang, J. Lv, X. Ma, J. Yan, Unified construction of dynamic rheological master curve of asphalts and asphalt mixtures, *International Journal of Civil Engineering*, 16(9) (2018) 1057-1067.
- [8] R.A. Schapery, On the characterization of nonlinear viscoelastic materials, *Polymer Engineering & Science*, 9(4) (1969) 295-310.
- [9] W.N. Findley, J.S. Lai, K. Onaran, Creep and relaxation of nonlinear materials, Noth-Holland, Amsterdam, (1976).
- [10] Y. Wada, H. Hirose, Glass transition phenomena and rheological properties of petroleum asphalt, *Journal of the Physical Society of Japan*, 15(10) (1960) 1885-1894.
- [11] H. Chen, D.M. Barbieri, X. Zhang, I. Hoff, Reliability of Calculation of Dynamic Modulus for Asphalt Mixtures Using Different Master Curve Models and Shift Factor Equations, *Materials*, 15(12) (2022) 4325.
- [12] E. Chailleux, G. Ramond, C. Such, C. de La Roche, A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials, *Road Materials and Pavement Design*, 7(sup1) (2006) 75-92.

- asphalt paving technologists, 61 (1992).
- [24] M. Marasteanu, D. Anderson, Improved model for bitumen rheological characterization, in: Eurobitume workshop on performance related properties for bituminous binders, European Bitumen Association Brussels, Belgium, 1999.
- [25] M. Zeng, H.U. Bahia, H. Zhai, M.R. Anderson, P. Turner, Rheological modeling of modified asphalt binders and mixtures (with discussion), Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 70 (2001).
- Error analysis in different models and field scenarios, Construction and Building Materials, 301 (2021) 124343.
- [22] H. Booij, G. Thoone, Generalization of Kramers-Kronig transforms and some approximations of relations between viscoelastic quantities, Rheologica Acta, 21(1) (1982) 15-24.
- [23] D.W. Christensen, D.A. Anderson, Interpretation of dynamic mechanical test data for pavin=g grade asphalt cements (with discussion), Journal of the Association of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Gholami, M. Khodadadi, P. Hajikarimi, A. Khodaii, *Developing Master Curves of Dynamic Modulus and Phase Angle of Asphalt Mortar and Asphalt Mixture Using the Least Number of Test Temperatures and Frequencies*, Amirkabir J. Civil Eng., 55(4) (2023) 793-810.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21667.7794

