

تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی جهت مدلسازی به روش المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS

حسن طاهرخانی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
مسعود جلالی جیرندهی، دانش آموخته کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: masoud.jalali@znu.ac.ir

دریافت: 95/07/10 - پذیرش: 95/12/15

چکیده

مخلوط‌های آسفالتی در اغلب شرایطی که در طول عمر روسازی در معرض آن قرار می‌گیرند، رفتاری ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند. یکی از روش‌هایی که به طور گسترده جهت پیش‌بینی پاسخ‌های ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش المان محدود است. نرم‌افزار ABAQUS از جمله ابزارهایی است که می‌تواند مبتنی بر روش المان محدود و با در نظر گرفتن همه پارامترهای تعیین‌کننده، رفتار مخلوط آسفالتی را شبیه‌سازی نماید. استفاده از سری پرونی یکی از تکنیک‌های رایج جهت تشریح رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی در نرم‌افزار ABAQUS محسوب می‌شود. برای این منظور، نیاز است تا پارامترهای لازم در این زمینه شامل ثابت‌های پرونی، مدول الاستیسیته لحظه‌ای و نسبت پواسون مخلوط آسفالتی تعیین شوند. از طرفی، تعیین این پارامترها از طریق آزمایش علاوه بر صرف زمان و هزینه‌های زیاد، نیاز به تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی دارد. لذا در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از روابط نظری و بدون انجام آزمایش، پارامترهای لازم محاسبه و تعیین شوند. به منظور دستیابی به این هدف، یک روش تئوری مبتنی بر رابطه ویتزاک و الگوریتمی بر پایه روش پیشنهادی اسکاپری و پارک، بسط داده شد و با استفاده از خصوصیات حجمی مصالح مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی رایج در ایران، پارامترهای مورد نیاز محاسبه و تعیین شدند. براساس نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی رایج در ایران و وابستگی زمانی پاسخ‌های آن را در دمای 21/1 درجه سانتی‌گراد در نرم‌افزار ABAQUS مدلسازی کرد.

واژه‌های کلیدی: روسازی آسفالتی، ویسکوالاستیک، المان محدود، مدلسازی، سری پرونی

1- مقدمه

عملکرد آن ایفا می‌کند. یکی از روش‌های پرکاربرد در پیش‌بینی پاسخ‌های ویسکوالاستیک روسازی‌های آسفالتی، روش المان محدود است که به طور گسترده توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Elseifi, Al-Qadi and Yoo, 2006; Masad et al., 2008; Wang and Al-Qadi, 2010; Souza and Castro, 2012; Breakah and Williams, 2015). به کمک این روش می‌توان رفتار واقعی مخلوط آسفالتی را با دقت

مخلوط آسفالتی در طیف گسترده‌ای از دما و فرکانس بارگذاری که در معرض آن قرار می‌گیرد، رفتاری ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهد (Zhu, Chen and Yang, 2013; Zhao et al., 2015; Zhang, Birgisson and Lytton, 2015). بنابراین، پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی نقشی کلیدی در طراحی صحیح روسازی و ارزیابی درست

بالایی توصیف نمود. هرچند، استفاده از روش المان محدود برای انجام تحلیل و طراحی‌های معمول زمان‌بر و دشوار است اما، نرم‌افزارهای کامپیوتری متعددی در این زمینه ارائه شده‌اند که این مشکل را برطرف نموده و قادرند رفتار ویسکوالاستیک مواد را بر پایه روش المان محدود با دقت و سرعت بالایی تحلیل نمایند.

نرم‌افزار ABAQUS از جمله ابزارهایی است که می‌تواند مبتنی بر روش المان محدود و با در نظر گرفتن همه پارامترهای تعیین کننده، رفتار مخلوط آسفالتی را شبیه‌سازی نماید. یکی از روش‌های رایج جهت تعریف مشخصات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی در نرم‌افزار ABAQUS، استفاده از سری پرونی^۱ است. برای این منظور، نیاز است تا پارامترهای لازم شامل ثابت‌های پرونی، مدول الاستیسیته لحظه‌ای^۲ و نسبت پواسون مخلوط آسفالتی مشخص شوند. از طرفی، تعیین این پارامترها از طریق آزمایش علاوه بر صرف زمان و هزینه‌های زیاد، نیاز به تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی دارد. لذا در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از روابط نظری و بدون انجام آزمایش، پارامترهای لازم (ثابت‌های پرونی و مدول الاستیسیته لحظه‌ای) محاسبه و تعیین گردند.

2- تئوری ویسکوالاستیسیته

در گذشته، در تحلیل‌های مکانیستیک روسازی‌های آسفالتی، مخلوط آسفالتی گرم به عنوان یک ماده الاستیک در نظر گرفته می‌شد در حالی که، مخلوط آسفالتی به صورت طبیعی، بسیار شبیه به یک ماده ویسکوالاستیک رفتار می‌کند. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که فرض رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی سبب می‌شود تا پاسخ‌های روسازی با دقت قابل قبولی پیش‌بینی شوند (Elseifi, Al-Qadi and Yoo, 2006; Liao and Sargand, 2010; Li, Guo and Yang, 2015).

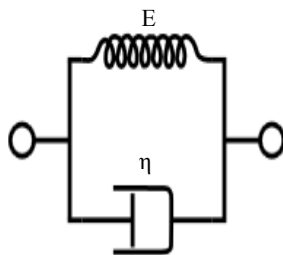
لیائو^۳ و سرگاندا^۴ در سال 2010 تحقیقاتی را انجام دادند و در آن با استفاده از روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار ABAQUS، مدلی سه بعدی از روسازی آسفالتی با فرض رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالتی را شبیه سازی کردند. هدف آن‌ها این بود که مدل مورد نظر بتواند با دقت مناسبی تنش‌ها، کرنش‌ها و تغییر شکل‌های روسازی را تحت بار ترافیک در دماها و سرعت‌های مختلف، پیش‌بینی نماید. آن‌ها نتایج حاصل از مدل ساخته شده را با نتایج به دست آمده از آزمایشات میدانی مورد مقایسه قرار دادند که سازگاری بسیار خوبی بین پاسخ‌ها مشاهده شد. آن‌ها همچنین مقایسه‌ای بین پاسخ‌های حاصل از مدل المان محدود ویسکوالاستیک و الاستیک انجام دادند که نتایج به دست آمده نشان می‌داد، مدل ویسکوالاستیک عملکرد بهتری نسبت به مدل الاستیک داشته و در طیف گسترده‌ای از سرعت‌ها و دماها، دقت خوبی را از خود نشان می‌دهد در مقابل، مدل الاستیک قادر نیست در سرعت‌ها و دماهای مختلف، پاسخ‌های دقیقی ارائه دهد. علاوه بر این، نتایج به دست آمده نشان می‌داد، مدل الاستیک پاسخ‌های روسازی را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند که این می‌تواند منجر به خرابی‌های زودرس در روسازی شود (Liao and Sargand, 2010).

السیفی^۵ و همکاران مطالعاتی را با هدف تعیین مشخصات ویسکوالاستیک روسازی‌های آسفالتی در دماهای متوسط و بالا انجام دادند. آن‌ها در مطالعاتشان با استفاده از پارامترهای حاصل از نتایج آزمایشگاهی و به کمک نرم‌افزار ABAQUS، یک مدل المان محدود سه بعدی از روسازی‌های آسفالتی شبیه سازی کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌داد، مدل ویسکوالاستیک به خوبی می‌تواند وابستگی زمانی پاسخ‌های روسازی را شبیه‌سازی نموده و تغییر شکل سطحی روسازی را قبل و بعد از عبور بار پیش‌بینی کند. آن‌ها همچنین، مقایسه‌ای

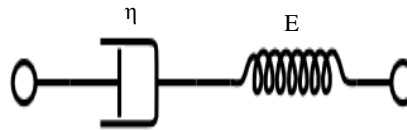
بین پاسخ‌های مدل الاستیک با نتایج میدانی انجام دادند که نشان می‌داد مدل المان محدود الاستیک در دماهای متوسط و بالا، پاسخ‌های روسازی را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. علاوه بر این، مدل الاستیک قادر نیست تا تغییر شکل دائمی و وابستگی زمانی پاسخ‌های لایه آسفالتی را شبیه‌سازی نماید (Elseifi, Al-Qadi and Yoo, 2006).

با توجه به ماهیت ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی، مدل‌های مکانیکی متنوعی برای توصیف پاسخ‌های آن ارائه شده است. این مدل‌ها از دو عنصر اصلی فنر و میراگر تشکیل شده‌اند که فنر نشان دهنده خصوصیات الاستیک و میراگر نشان دهنده خصوصیات ویسکوز مخلوط آسفالتی است. مدل ماکسول و مدل کلونین از

جمله این مدل‌ها هستند که به کمک آن‌ها می‌توان رفتار ویسکوالاستیک خطی مخلوط آسفالتی را به صورت واقعی شبیه‌سازی نمود. همان طور که در شکل 1 نشان داده شده است، مدل ماکسول ترکیبی است از یک فنر و میراگر که به صورت سری به هم وصل شده‌اند (شکل 1) و مدل کلونین ترکیبی از یک فنر و میراگر است که به صورت موازی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند (شکل 1). در شکل 1، E مدول الاستیسیته^۶ اختصاص داده شده به فنر بوده و η نشان دهنده مقاومت اصطکاکی مربوط به میراگر است. ضعف اصلی این مدل‌ها آن است که در مدل ماکسول رفتار خزشی مخلوط آسفالتی به خوبی شبیه سازی نمی‌شود و در مقابل، مدل کلونین نیز تاثیر عامل زمان را در رفتار مخلوط آسفالتی به خوبی نشان نمی‌دهد.



ب. مدل کلونین

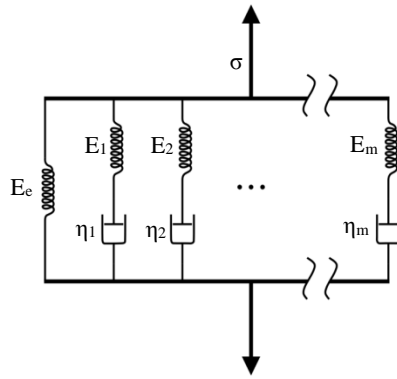


الف. مدل ماکسول

شکل 1. مدل‌های مکانیکی جهت توصیف رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی

به دلیل محدودیت‌هایی که در مدل‌های ماکسول و کلونین وجود دارد، مدل‌های پیچیده‌تری با هدف توصیف بهتر و دقیق‌تر مصالح ویسکوالاستیک توسعه پیدا کردند. مدل تعمیم یافته ماکسول^۷ که در شکل 2 قابل مشاهده است، از جمله این مدل‌ها می‌باشد و این توانایی را دارد تا رفتار هر نوع ماده ویسکوالاستیک (از جمله مخلوط آسفالتی) را به خوبی نشان دهد. مدل تعمیم یافته ماکسول که به

مدل ماکسول-ویچرت^۸ هم معروف است، ترکیبی است از یک فنر با مدول آرامش^۹ E_e و m تعداد المان ماکسول که به صورت موازی در کنار هم قرار داده شده‌اند. از مزایای مدل تعمیم یافته ماکسول آن است که، می‌توان به کمک آن رفتار استراحت^{۱۰} مخلوط آسفالتی را تحت بارهای متحرک ترافیکی به خوبی تشریح نمود.



شکل 2. مدل تعمیم یافته ماکسول

است. E_i مدول استراحت اختصاص داده شده به فنر i ام و τ_i زمان استراحت المان i ام ماکسول را نشان می‌دهند. همان طور که در رابطه (2) مشخص است، بعد از گذشت مدت زمانی طولانی ($t = \infty$)، مقدار مدول استراحت المان‌های ماکسول صفر می‌شود. در این لحظه، تاثیر فنری که به صورت موازی در کنار المان‌های ماکسول قرار گرفته است، مشخص خواهد شد به طوری که، مدول استراحت مدل تعمیم یافته ماکسول با مدول آرامش این فنر برابر می‌شود. بنابراین، معادله مدول استراحت مدل تعمیم یافته ماکسول به صورت رابطه (3) خواهد بود.

(3)

$$E(t) = E_e + \sum_{i=1}^m E_i e^{-t/\tau_i}$$

در رابطه (3)، $E(t)$ مدول استراحت مدل ماکسول تعمیم یافته در لحظه t و E_e نشان دهنده مدول آرامش فنر است. سایر پارامترها مشابه با رابطه (2) تعریف می‌شود. رابطه (3) به عنوان سری پرونی یا سری دیرشله¹² نیز شناخته می‌شود که برای تشریح خصوصیات ویسکوالاستیک مصالح در روش المان محدود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به صورت ریاضی، رابطه (3) را می‌توان به شکل رابطه (4) بازنویسی کرد.

$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^m E_i [1 - e^{-t/\tau_i}] \quad (4)$$

$$E_e = E_0 - \sum_{i=1}^m E_i \quad (4. الف)$$

اگر مدل تعمیم یافته ماکسول تحت یک کرنش ثابت قرار گیرد، نیروهای موجود در هر المان ماکسول (زوج فنر-میراگر) به طور تدریجی آزاد خواهند شد. این پدیده، بیان کننده رفتار استراحت مواد ویسکوالاستیک است. از سوی دیگر، با ثابت نگه داشتن کرنش، مدول استراحت المان m ام ماکسول (زوج m ام فنر-میراگر) مطابق با رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$E_m(t) = E_m e^{-tE_m/\eta_m} = E_m e^{-t/\tau_m} \quad (1)$$

$$\tau_m = \eta_m / E_m \quad (1. الف)$$

در روابط بالا، $E_m(t)$ مدول استراحت المان m ام ماکسول در لحظه t می‌باشد. پارامتر t زمان، E_m مدول استراحت اختصاص داده شده به فنر m ام و η_m مقاومت اصطکاکی مربوط به میراگر m ام را نشان می‌دهند. همچنین، τ_m نشان دهنده زمان استراحت¹¹ المان m ام ماکسول است.

از آنجایی که، تنش‌های مدل تعمیم یافته ماکسول به صورت تجمعی محاسبه می‌شود بنابراین، مدول استراحت مجموعه المان‌های ماکسول مطابق با رابطه (2) قابل تعریف است.

$$E(t) = \sum_{i=1}^m E_i e^{-t/\tau_i} \quad (2)$$

که در این رابطه، $E(t)$ مدول استراحت مجموعه المان‌های ماکسول در لحظه t می‌باشد و پارامتر t بیانگر زمان

در روابط بالا، E_0 مدول اولیه^{۱۳} (یا مدول الاستیسیته لحظه‌ای) می‌باشد و سایر پارامترها مشابه با رابطه (3) تعریف می‌شوند.

طبق تعریف، مدول مواد ویسکوالاستیک (مانند مخلوط آسفالتی) بلافاصله بعد از اعمال بارگذاری را مدول الاستیسیته لحظه‌ای (یا مدول اولیه) می‌نامند. این مفهوم (مدول الاستیسیته لحظه‌ای) به لحاظ فیزیکی، بیان کننده پاسخ‌های اولیه و الاستیک مخلوط آسفالتی خواهد بود.

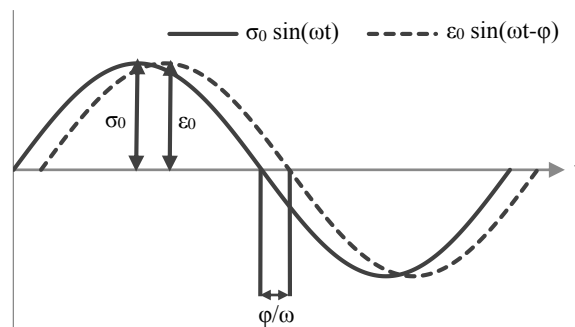
به منظور محاسبه پارامترهای مورد نیاز سری پرونی و تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک مصالح، روش‌های مختلفی ارائه شده است. روش مدول مختلط از جمله روش‌هایی است که به طور گسترده برای این منظور به کار گرفته می‌شود. با استفاده از مدول مختلط می‌توان اطلاعات کاملی از رفتار ویسکوالاستیک خطی مخلوط آسفالتی به دست آورده و مقادیر مدول دینامیکی و زاویه فاز یا معادل آن‌ها، مدول ذخیره^{۱۴} (مدول بخش الاستیک) و مدول اتلاف^{۱۵} (مدول بخش ویسکوز) را تعیین نمود (Zhao et al., 2013). این پارامتر (مدول مختلط)، رابطه تنش- کرنش مصالح ویسکوالاستیک خطی را در دامنه فرکانس تحت بارگذاری سینوسی نشان می‌دهد. به زبان

ریاضی، مدول مختلط دینامیکی به صورت نسبت بزرگی تنش سینوسی در زمان و فرکانس مورد نظر به بزرگی کرنش سینوسی در همان زمان و فرکانس تعریف می‌شود که در رابطه (5) ارائه شده است.

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)}} = \frac{\sigma_0 \sin \omega t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} \quad (5)$$

در رابطه (5)، E^* مدول مختلط دینامیکی، σ_0 تنش حداکثر و ε_0 کرنش حداکثر را نشان می‌دهند. φ زاویه فاز است و اختلاف زمانی بین تنش و کرنش را که ناشی از ویژگی ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی می‌باشد را بیان می‌کند. ω نشان دهنده سرعت زاویه‌ای و t زمان برحسب ثانیه است. همچنین، پارامتر i یک موهومی می‌باشد که مقدار آن را برابر با $\sqrt{-1}$ در نظر می‌گیرند. این پارامترها، در شکل 3 نشان داده شده‌اند.

در شکل 3 الگوی منحنی تنش و کرنش تحت بارگذاری سینوسی نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، به علت رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی، منحنی کرنش با تاخیری معادل φ/ω نسبت به منحنی تنش در نمودار ترسیم می‌شود.



شکل 3. نمونه‌ای از منحنی تنش و کرنش تحت بارگذاری سینوسی

میراگری درونی مصالح است که این موضوع را می‌توان با استفاده از رابطه (6) بیان نمود.

(6)

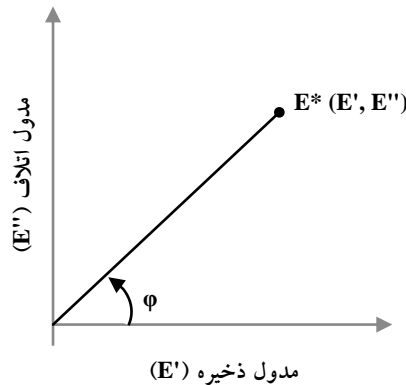
$$E^* = E' + iE'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi + i \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi$$

همان طور که در رابطه (5) مشخص است، مدول مختلط یک کمیت مختلط بوده که بخش حقیقی آن نشان دهنده سختی الاستیک و بخش موهومی آن نشان دهنده

ماده، زاویه فاز بیشتر می‌شود و در نتیجه، نقش بخش موهومی مدول مختلط افزایش می‌یابد. در مقابل، با کاهش زاویه فاز، رفتار ماده الاستیک‌تر شده و سهم مدول ذخیره افزایش می‌یابد.

در این رابطه، E' مدول ذخیره و E'' مدول اتلاف مخلوط آسفالتی محسوب می‌شوند. سایر پارامترها مشابه با رابطه (5) قابل تعریف می‌باشند.

رابطه بین مدول مختلط، مدول ذخیره و مدول اتلاف به صورت گرافیکی در شکل 4 نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با ویسکوز شدن



شکل 4. نمایش گرافیکی مدول مختلط

کاوسی و بابازاده تحقیقاتی را در زمینه، روش‌های تجربی تعیین مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی، انجام دادند. آن‌ها در مطالعاتشان از روابط تجربی ارائه شده توسط محققین و موسسات معتبر، جهت تعیین مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده در راه‌های ایران، استفاده کردند و نتایج حاصل از این روابط را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاصل از مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد، رابطه تجربی ارائه شده توسط ویتزاک^{۱۸} به جهت نوع طرح اختلاط و روش تراکم متناسب با واقعیت‌های اجرایی و همچنین اعمال اثر پارامترهای مختلف، همخوانی خوبی با نتایج واقعی (حاصل از آزمایش مدول دینامیکی) نشان می‌دهد (Kavussi and Babazadeh, 2008).

3- روش تحقیق

روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران از چهار لایه آسفالتی، اساس، زیراساس و بستر تشکیل شده‌اند که هر

به طور کلی، قدر مطلق مدول مختلط به عنوان مدول دینامیکی شناخته می‌شود و طبق رابطه (7) بیان می‌شود.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (7)$$

در رابطه (7)، $|E^*|$ مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی می‌باشد. سایر پارامترها در روابط قبلی شرح داده شده‌اند. مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی از پارامترهای مهم و مورد نیاز در فرآیند ساخت و بازطراحی روسازی‌های آسفالتی محسوب می‌شود.

این پارامتر را می‌توان با استفاده از آزمایش فشاری تک محوری و یا آزمایش کشش غیرمستقیم تعیین نمود اما از آنجایی که، انجام این آزمایشات نیاز به تجهیزات گران قیمت آزمایشگاهی (مانند دستگاه UTM^{۱۶} و یا قاب بارگذاری MTS^{۱۷}) دارد، روش‌های تجربی متعددی جهت تعیین مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی ارائه شده است (Mun, 2015).

4- مشخصات مصالح

به منظور تعیین مدول دینامیکی لایه آسفالتی مورد استفاده در راه‌های ایران با استفاده از رابطه ویتزاک، نخست باید مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی و شرایط محیطی را با توجه به معیارهای طرح انتخاب نمود. دانه‌بندی مصالح سنگی، درصد فضای خالی، درصد حجمی مقدار قیر موثر، ویسکوزیته قیر، دما و فرکانس‌های بارگذاری از جمله مهمترین پارامترهای موثر در تعیین مدول دینامیکی محسوب می‌شوند که مقادیر هر یک از آن‌ها در ادامه شرح داده می‌شود.

دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی مورد مطالعه در این تحقیق، از نوع پیوسته (دانه‌بندی شماره 4 مربوط به آستر و رویه) بوده و بر اساس استانداردهای موجود در نشریه شماره 234 تعیین شده است. این دانه‌بندی که بیشترین کاربرد را براساس استانداردهای موجود در ایران دارد، در جدول 1 ارائه شده است. همچنین، نسبت پواسون مخلوط آسفالتی مطابق با روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران برابر با 0/35 در نظر گرفته شد (Ameri et al., 2011).

کدام از این لایه‌ها خصوصیات رفتاری مخصوص به خود را دارند. لایه‌های مختلف روسازی را از نقطه نظر ویژگی‌های رفتاری، می‌توان به دو گروه الاستیک و ویسکوالاستیک تقسیم‌بندی کرد به طوری که، لایه آسفالتی دارای رفتار ویسکوالاستیک و سایر لایه‌های روسازی رفتاری الاستیک دارند. در نرم‌افزار ABAQUS، خصوصیات ویسکوالاستیک مصالح را می‌توان به کمک سری پرونی تعریف نمود. برای این منظور لازم است تا ثابت‌های پرونی، مدول الاستیسیته لحظه‌ای و نسبت پواسون مخلوط آسفالتی تعیین شود. در این مقاله تلاش می‌شود تا با استفاده از روابط تنوری، پارامترهای لازم محاسبه و تعیین شوند. این تحقیق جهت دستیابی به اهداف ذکر شده، شامل مراحل زیر است:

- محاسبه مدول دینامیکی و زاویه فاز مخلوط آسفالتی در دما و فرکانس‌های بارگذاری مختلف با استفاده از رابطه ویتزاک.
- محاسبه مدول استراحت مخلوط آسفالتی به روش پیشنهاد شده توسط اسکاپری و پارک^{۱۹}.
- تعیین ثابت‌های پرونی جهت کاربرد در سری پرونی.

جدول 1. مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی (Iran Highway Asphalt Paving Code, 2011)

اندازه الک	درصد عبوری از هر الک	محدوده مجاز برحسب درصد (براساس نشریه شماره 234)
19 میلی‌متر	100	100
12/5 میلی‌متر	95	90 - 100
4/75 میلی‌متر (شماره 4)	63	44 - 74
2/36 میلی‌متر (شماره 8)	39	28 - 58
0/3 میلی‌متر (شماره 50)	9	5 - 21
0/075 میلی‌متر (شماره 200)	5	2 - 10

رابطه (8) مورد محاسبه قرار گرفت که مقدار آن برابر با 9/33 درصد به دست آمد (NCHRP 1-37A, 2004).

$$VFA=100 \times \frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a} \quad (8)$$

درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی با توجه به نشریه شماره 234، 4 درصد در نظر گرفته شد. با توجه به نوع ترافیک که سنگین فرض شده است، ابتدا درصد فضای خالی پر شده با قیر براساس نشریه شماره 234، 70 درصد تعیین شد و سپس درصد حجمی مقدار قیر موثر از

مطالعات گذشته برای قیر 60-70 به ترتیب برابر با 10/6508 و 3/5537- در نظر گرفته شد (Kavussi and Babazadeh, 2008)

در رابطه بالا، VFA درصد فضای خالی پر شده با قیر، V_a درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی و V_{beff} درصد حجمی مقدار قیر موثر می‌باشند.

در این تحقیق از مشخصات قیر 60-70 استفاده شده است. برای تعیین ویسکوزیته قیر مورد نظر، از معادله ویسکوزیته-دما که در رابطه (9) بیان شده است، استفاده شد و ویسکوزیته قیر در 5 دمای مختلف (شامل 10-، 4/4، 21/1، 37/8 و 54/4 درجه سانتی‌گراد مطابق با آزمایش مدول دینامیکی) مورد محاسبه قرار گرفت. رابطه (9) به صورت زیر تعریف می‌شود (NCHRP 1-37A, 2004).

$$\log(\log(\eta)) = A + VTS \log(T_R) \quad (9)$$

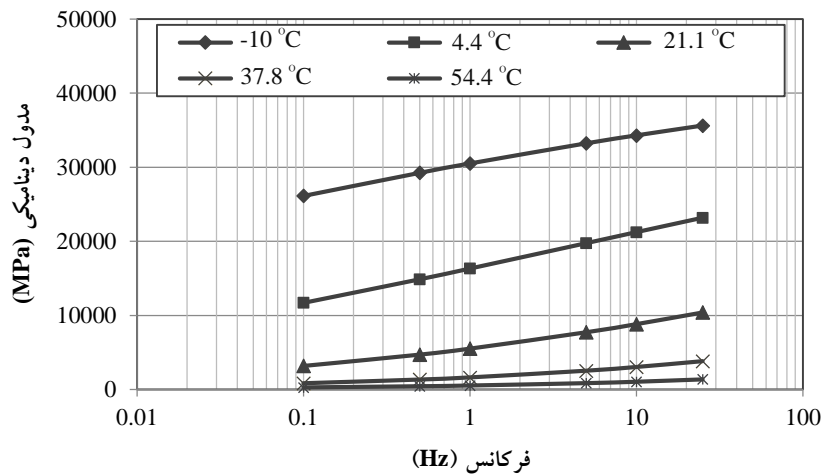
در رابطه (9)، پارامتر η ویسکوزیته قیر را برحسب سانتی پواز نشان می‌دهد. همچنین، T_R نشان دهنده دما برحسب رانکین می‌باشد. همچنین، A و VTS به ترتیب عرض از مبدا رگرسیون و شیب رگرسیون حساسیت دمایی ویسکوزیته است که مقادیر آن برای براساس

(10)

$$\log|E^*| = -1.249937 + 0.02923\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547\rho_{34}}{1 + e^{-0.603313 - 0.393532 \log(\eta) - 0.313351 \log(f)}}$$

مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی در 5 دما (شامل 10-، 4/4، 21/1، 37/8 و 54/4 درجه سانتی‌گراد) و 6 فرکانس مختلف (شامل 0/1، 0/5، 1، 5، 10 و 25 هرتز) به روش ویتزاک محاسبه گردید، که نتایج حاصل از آن در نمودار شکل 5 قابل مشاهده است. همان طور که در این نمودار مشخص است، افزایش دما باعث کاهش مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی می‌شود. همچنین، مشاهده می‌شود که در یک دمای ثابت، با افزایش فرکانس بارگذاری، مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد.

در رابطه (10)، $|E^*|$ مدول دینامیکی لایه آسفالتی برحسب 10^5 psi، f فرکانس بارگذاری برحسب هرتز، η ویسکوزیته قیر برحسب 10^6 Poise، V_a درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، V_{beff} درصد حجمی قیر موثر، ρ_{34} درصد تجمعی مصالح مانده روی الک 19 میلی‌متر، ρ_{38} درصد تجمعی مصالح مانده روی الک 9/5 میلی‌متر، ρ_4 درصد تجمعی مصالح مانده روی الک 4/76 میلی‌متر و ρ_{200} درصد مصالح عبوری از الک 0/075 میلی‌متر، می‌باشند.



شکل 5. مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی در دما و فرکانس‌های بارگذاری مختلف

با داشتن مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی در دماها و فرکانس‌های مورد نظر، می‌توان فرکانس‌های تبدیل شده^{۲۰} را در دمای مرجع، جهت ترسیم منحنی مرجع^{۲۱} مدول دینامیکی، محاسبه نمود. برای این منظور (محاسبه فرکانس‌های تبدیل شده در دمای مرجع)، معادله ویتزاک را می‌توان به شکل رابطه (11) بازنویسی کرده و مورد استفاده قرار داد. این رابطه در زیر آورده شده است (NCHRP, 2005).

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f_r)}} \quad (11)$$

الف)

$$\delta = -1.249937 + 0.02923\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \quad (11)$$

$$\alpha = 3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547\rho_{34} \quad (ب)$$

$$\beta = -0.603313 - 0.393532 \log(\eta_{Tr}) \quad (پ)$$

ت)

$$(11)$$

$$\gamma = -0.313351$$

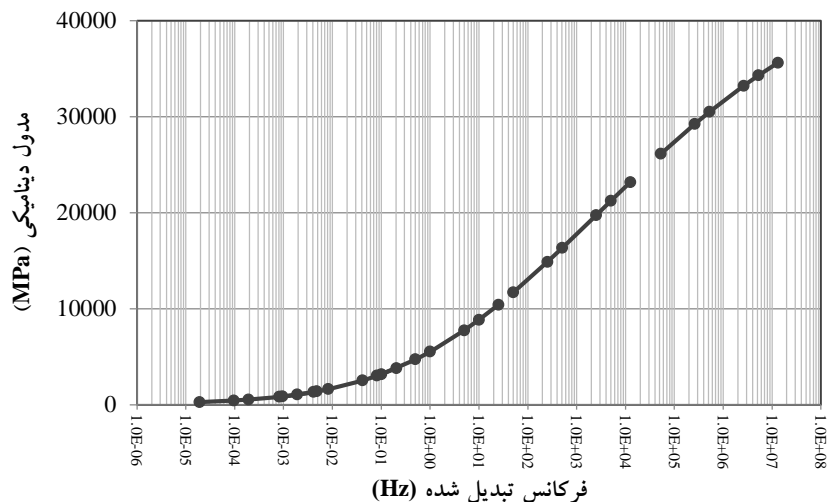
فرکانس تبدیل شده به فرکانس‌هایی اطلاق می‌شود که با حذف متغیر دما در نمودار شکل 5، جایگزین فرکانس-های اصلی می‌شوند. با جایگزین کردن فرکانس تبدیل شده در نمودار شکل 5، نمودارهای به دست آمده در دماهای مختلف (-10، 4/4، 37/8 و 54/4 درجه

با استفاده از نمودار شکل 5 می‌توان مدول الاستیسیته لحظه‌ای مخلوط آسفالتی را در دمای مورد نظر تعیین نمود. مدول مخلوط آسفالتی در یک دمای مشخص و در فرکانس بالای بارگذاری به عنوان مدول الاستیسیته لحظه-ای مخلوط آسفالتی در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق، مقدار مدول الاستیسیته لحظه‌ای مخلوط آسفالتی در دمای مرجع (که در این تحقیق 21/1 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است) برابر با 10693 مگاپاسکال تعیین شد.

در روابط بالا، f_r فرکانس تبدیل شده برحسب هرتز می‌باشد و η_{Tr} ویسکوزیته قیر در دمای مرجع برحسب 10^6 Poise است. سایر پارامترها مشابه با رابطه (10) تعریف می‌شود.

سانتی‌گراد)، نسبت به نمودار مربوط به دمای مرجع (21/1 درجه سانتی‌گراد)، تغییر مکان داده و تشکیل یک منحنی پیوسته و یکنواخت را می‌دهند که به منحنی مرجع مدول دینامیکی معروف است. در شکل 6 منحنی مرجع مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی ترسیم شده است. همان طور که در این نمودار مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس، مقدار مدول دینامیکی نیز افزایش می‌یابد. همچنین مشخص است که در فرکانس‌های بالا و پایین، مقدار مدول دینامیکی به همگرایی میل می‌کند. به طور کلی از منحنی مرجع مدول دینامیکی به عنوان مرجعی جهت پیش‌بینی مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود.

زاویه فاز از جمله پارامترهای مهم و تاثیرگذار در خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی محسوب می‌شود. به کمک این پارامتر، میزان ویسکوز بودن یا الاستیک بودن مخلوط آسفالتی مشخص می‌شود. به عبارت دیگر، زاویه فاز سهم مدول ذخیره و اتلاف را در رفتار مخلوط آسفالتی تعیین می‌کند لذا، پیش‌بینی آن جهت شناخت بهتر رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی اهمیت دارد (Biligiri, Kaloush and Uzan, 2010; Naik and Biligiri, 2015). برای محاسبه زاویه فاز مخلوط آسفالتی، از رابطه (12) استفاده شده است. این رابطه، یک معادله تقریبی است که می‌توان با استفاده از آن زاویه فاز مخلوط آسفالتی را در فرکانس‌های تبدیل‌شده و در دمای مرجع محاسبه نمود (Yang and You, 2015).



شکل 6. منحنی مرجع مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی در دمای مرجع (21/1 درجه سانتی‌گراد)

and You, 2015). سایر پارامترهای موجود در این رابطه

مشابه با رابطه (11) تعریف می‌شود.

نتایج حاصل از محاسبه زاویه فاز به صورت منحنی مرجع زاویه فاز در شکل 7 ارائه شده است. این منحنی، زاویه فاز مخلوط آسفالتی را به ازای فرکانس‌های تبدیل‌شده، به صورت نموداری در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد. در منحنی مرجع زاویه فاز مشاهده می‌شود که با کاهش مقدار فرکانس تبدیل‌شده، زاویه فاز مخلوط آسفالتی افزایش

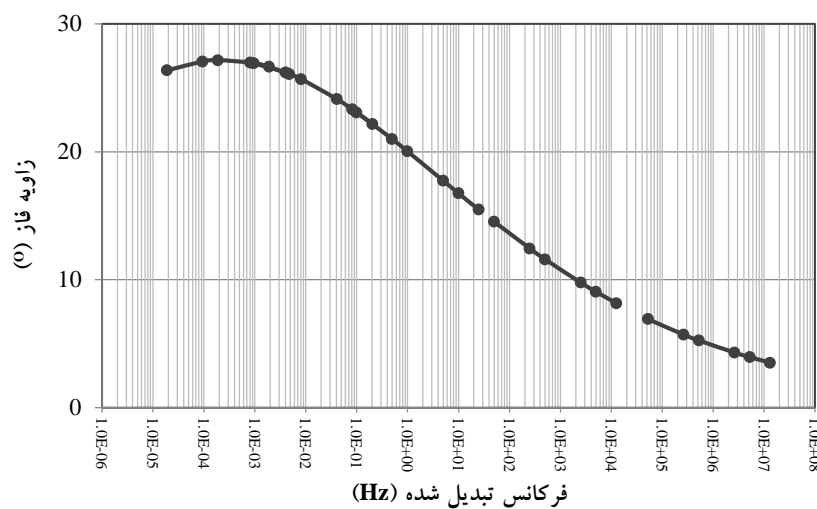
$$\varphi(f_r) = c \quad (12)$$

$$\frac{\pi}{2} \frac{\alpha\gamma}{(1+e^{\beta-\gamma \log(f_r)})^2} e^{(\beta-\gamma \log(f_r))}$$

که در این رابطه، $\varphi(f_r)$ زاویه فاز مخلوط آسفالتی برحسب رادیان است و همان طور که مشاهده می‌شود تابعی از فرکانس تبدیل‌شده می‌باشد. همچنین، پارامتر c به عنوان ضریب اصلاحی در نظر گرفته شده است که با استناد به مطالعات انجام شده در گذشته و دقت قابل قبول گزارش شده، مقدار آن برابر با 1 فرض می‌شود (Yang

می‌یابد. این روند ادامه پیدا می‌کند تا زاویه فاز به حداکثر مقدار خود برسد و پس از آن، با کمتر شدن فرکانس تبدیل شده، زاویه فاز هم کاهش می‌یابد. این پدیده (کاهش زاویه فاز به ازای کاهش فرکانس تبدیل شده) که در فرکانس‌های تبدیل شده پایین اتفاق می‌افتد، با ماهیت رفتاری مخلوط‌های آسفالتی در تناقض است. علت اصلی به وجود آمدن چنین پدیده‌ای که در مطالعات پیشین هم مشاهده شده آن است که، در دمای پایین (یا فرکانس بالای بارگذاری) نقش قیر در رفتار مخلوط آسفالتی بسیار محسوس و تاثیرگذار می‌باشد اما، در دمای بالا (یا

فرکانس پایین بارگذاری) که قیر پایداری خود را از دست می‌دهد و به حالت مایع در می‌آید، نقش بخش سنگدانه‌ای مخلوط آسفالتی افزایش یافته و از رفتار ویسکوز آسفالت (که ناشی از وجود قیراست) کاسته می‌شود (Zhao and Kim, 2003). از آنجایی که، بخش سنگدانه مخلوط آسفالتی رفتاری الاستیک دارد و مقدار زاویه فاز در مواد الاستیک برابر با صفر است، بنابراین با کاهش فرکانس تبدیل شده، مقدار زاویه فاز شروع به کمتر شدن خواهد کرد.



شکل 7. منحنی مرجع زاویه فاز مخلوط آسفالتی

6- محاسبه مدول استراحت مخلوط آسفالتی

مدول استراحت از مهمترین خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی است که روش‌های متفاوتی توسط محققین مختلف برای محاسبه آن ارائه شده است (Forough, Moghadas-Nejad and Khodaii, 2015). طبق تعریف، مدول استراحت رفتار مخلوط آسفالتی را تحت کرنش ثابت بیان می‌کند و تابعی از زمان بارگذاری است. بنابراین، با استفاده از این مفهوم (مدول استراحت) می‌توان وابستگی زمانی پاسخ‌های مخلوط آسفالتی را بیان نمود. در این تحقیق برای تبدیل مدول دینامیکی به مدول استراحت، از روش تقریبی

پیشنهاد شده توسط اسکاپری و پارک مطابق با مراحل زیر استفاده شد (Liao, 2007).

- مدول ذخیره مخلوط آسفالتی براساس مدول دینامیکی و زاویه فاز آن با استفاده از رابطه (13) که در زیر آورده شده است، محاسبه شد.

$$E'(f) = |E^*| \cdot \cos(\phi) \quad (13)$$

در رابطه (13)، $E'(f)$ مدول ذخیره مخلوط آسفالتی بوده و همان طور که مشخص است تابعی از فرکانس بارگذاری است. همچنین، $|E^*|$ نشان دهنده مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی می‌باشد و پارامتر ϕ زاویه فاز مخلوط آسفالتی را برحسب درجه بیان می‌کند.

• تابع تنظیم^{۲۲} با استفاده از رابطه (14) تعیین شد.

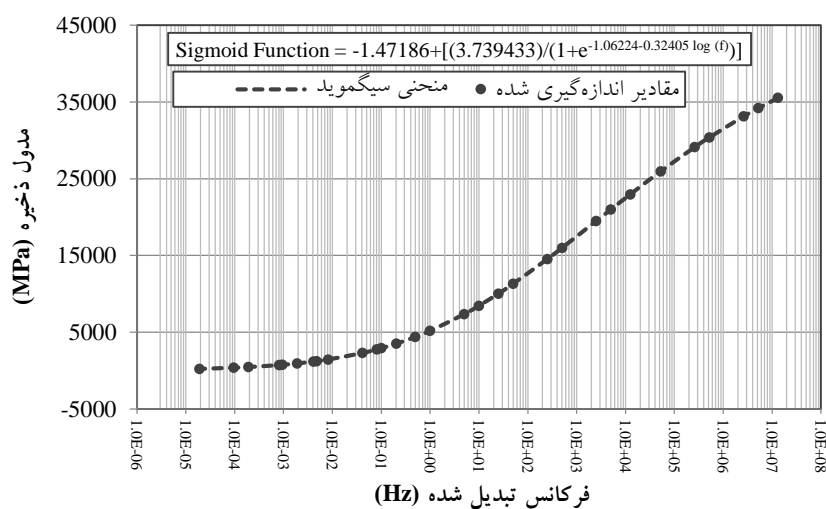
(14)

$$\lambda' = \Gamma(1-n) \cdot \cos(n\pi/2)$$

$$n = \left(\frac{d \log(E'(f))}{d \log(f)} \right) \quad (\text{الف. 14})$$

در روابط بالا، λ' تابع تنظیم و $\Gamma(1-n)$ تابع گاما می‌باشند. سایر پارامترها در بخش‌های قبلی شرح داده شده‌اند. لازم به توضیح است که برای محاسبه مقدار n نیاز است تا مقادیر مدول ذخیره در فرکانس‌های مورد نظر

تعیین و منحنی مرجع آن ترسیم شود. سپس، بایستی تابع سیگموئید^{۲۳} را به منحنی مرجع مدول ذخیره انطباق داده و ضرایب رگرسیونی آن مشخص شود. برای این کار (تعیین ضرایب رگرسیونی تابع سیگموئید)، از دستور Solver در نرم‌افزار Excel 2010 استفاده شده است. در شکل 8 منحنی مرجع مدول ذخیره و تابع سیگموئید مربوط به آن نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس، مقدار مدول ذخیره مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد.



شکل 8. منحنی مرجع مدول ذخیره و تابع مربوط به آن

با مشتق‌گیری از تابع سیگموئید نسبت به فرکانس، می‌توان مقادیر n را در فرکانس‌های مختلف (فرکانس‌های تبدیل‌شده) تعیین نمود. مقادیر n در فرکانس‌های تبدیل شده در جدول 2 ارائه شده است. در این جدول روند تغییرات مقدار n نسبت به تغییرات فرکانس به این

صورت است که، با کاهش فرکانس، مقدار n افزایش می‌یابد تا به حداکثر مقدار خود برسد. پس از آن که n به بیشینه مقدار خود رسید، این روند افزایشی تغییر می‌کند و با کاهش بیشتر فرکانس، روند تغییرات n نیز سیر نزولی پیدا می‌کند و مقدار آن کاهش می‌یابد.

جدول 2. مقادیر به‌دست آمده برای n در فرکانس‌های تبدیل‌شده

f (Hz)	n	f (Hz)	n	f (Hz)	n
13134783	0/038984581	251/5055	0/143299667	0/040975	0/276207684
5253913	0/043946807	50/30111	0/167830952	0/008195	0/291927358
2626957	0/048077837	25	0/178984269	0/004759	0/295796816
525391/3	0/059050448	10	0/193884422	0/004097	0/296723677
262695/7	0/064421163	5	0/205252233	0/001904	0/300484492
52539/13	0/078532027	1	0/231320179	0/000952	0/302420848

12575/28	0/093122553	0/5	0/24210946	0/000819	0/302652196
5030/111	0/103535135	0/204874	0/255302675	0/00019	0/301392389
2515/055	0/111968773	0/1	0/265151979	$9/52 \times 10^{-5}$	0/298590173
503/0111	0/133356317	0/081949	0/26774256	$1/9 \times 10^{-5}$	0/286981313

مدول استراحت مخلوط آسفالتی با استفاده از رابطه (15) محاسبه شد و نتایج حاصل از آن به صورت خلاصه در جدول 3 ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشخص است، با افزایش مدت زمان بارگذاری، مدول استراحت مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد که این موضوع بیانگر رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی است و وابستگی زمانی آن را به خوبی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که زمان‌های ارائه شده در جدول 3 معادل فرکانس تبدیل شده بوده و با استفاده از رابطه (15. الف) محاسبه شده‌اند.

• در مرحله آخر، مدول استراحت مخلوط آسفالتی به صورت تابعی از زمان و با استفاده از رابطه (15) که در زیر آورده شده است، محاسبه شد.

(15)

$$E(t) = E'(f) / \lambda'$$

(15. الف)

$$t = 1/f$$

در روابط بالا، $E(t)$ مدول استراحت مخلوط آسفالتی می‌باشد و همان طور که نشان داده شده است، تابعی از زمان بارگذاری است. همچنین، رابطه بین زمان و فرکانس بارگذاری به صورت معادله (15. الف) تعریف می‌شود.

جدول 3. مدول استراحت مخلوط آسفالتی در زمان‌های مختلف

t (s)	E' (MPa)	t (s)	E' (MPa)	t (s)	E' (Mpa)
$7/61 \times 10^{-8}$	35627/18	$3/98 \times 10^{-3}$	14908/19	$2/44 \times 10^1$	2528/03
$1/90 \times 10^{-7}$	34300/82	$1/99 \times 10^{-2}$	11726/39	$1/22 \times 10^2$	1617/61
$3/81 \times 10^{-7}$	33228/94	$4/00 \times 10^{-2}$	10440/40	$2/10 \times 10^2$	1382/96
$1/90 \times 10^{-6}$	30516/42	$1/00 \times 10^{-1}$	8864/95	$2/44 \times 10^2$	1323/91
$3/81 \times 10^{-6}$	29256/23	$2/00 \times 10^{-1}$	7765/16	$5/25 \times 10^2$	1056/16
$1/90 \times 10^{-5}$	26141/52	1/00	5544/51	$1/05 \times 10^3$	858/37
$7/95 \times 10^{-5}$	23197/96	2/00	4736/13	$1/22 \times 10^3$	820/53
$1/99 \times 10^{-4}$	21255/75	4/88	3825/15	$5/25 \times 10^3$	527/27
$3/98 \times 10^{-4}$	19773/06	$1/00 \times 10^1$	3194/49	$1/05 \times 10^4$	427/35
$1/99 \times 10^{-3}$	16348/44	$1/22 \times 10^1$	3034/79	$5/25 \times 10^4$	264/07

7- محاسبه ثابت‌های پرونی

پرونی مورد استفاده در نرم‌افزار ABAQUS طبق رابطه (16) بیان می‌شود.

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i \left(1 - e^{-t/\tau_i} \right) \quad (16)$$

در رابطه (16)، $g(t)$ به عنوان نسبت مدول برشی^{۲۴} تعریف می‌شود که نحوه محاسبه آن در ادامه شرح داده

در نرم‌افزار ABAQUS خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی با استفاده از سری پرونی در قالب مدول برشی، قابل توصیف است. سری پرونی یک سری نمایی است که رابطه تنش- کرنش را برای یک سیستم ویسکوالاستیک خطی (که به وسیله یک مدل فنر- میراگر نمایش داده می‌شود) بیان می‌کند. شکل کلی معادله سری

محاسبه خواهد شد. برای این منظور، ابتدا مدول برشی با استفاده از رابطه (17) مورد محاسبه قرار گرفت.

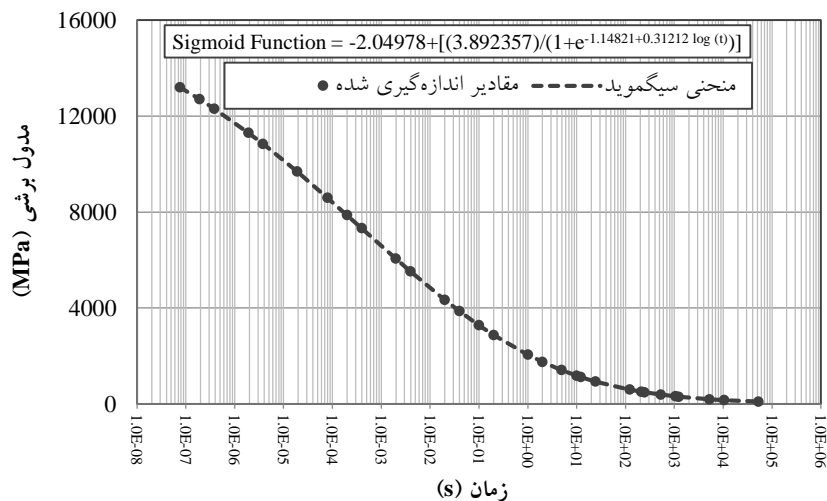
$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\nu)} \quad (17)$$

در رابطه (17)، $G(t)$ مدول برشی، $E(t)$ مدول استراحت و ν نسبت پواسون مخلوط آسفالتی می‌باشند.

در شکل 9 منحنی مرجع مدول برشی در زمان‌های مختلف نشان داده شده است و معادله سیگموئید آن نیز تعیین شده است. به کمک این معادله می‌توان مدول برشی لحظه‌ای را پیش‌بینی نمود که مقدار آن در زمان 10^{-10} ثانیه برابر با 15700 مگاپاسکال به دست آمد.

خواهد شد. همچنین، پارامترهای τ_i و g_i ثابت‌های پرونی هستند که وابسته به مشخصات مصالح می‌باشند و پارامتر t نشان دهنده زمان است و N تعداد جملات سری پرونی را نشان می‌دهد که معمولاً کمترین مقدار آن را 4 در نظر می‌گیرند. البته، مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که یک سری پرونی 5 جمله‌ای می‌تواند نسبت مدول برشی را با دقت مناسبی تقریب بزند (Liao, 2007). در این پژوهش، در جهت اطمینان یک سری پرونی 6 جمله‌ای انتخاب شده است.

برای محاسبه نسبت مدول برشی، ابتدا منحنی مرجع مدول برشی ترسیم می‌شود و پس از تعیین معادله منحنی مرجع، مدول برشی لحظه‌ای (مدول برشی در زمان $t = 0$)



شکل 9. منحنی مرجع مدول برشی و تابع مربوط به آن

با داشتن نسبت مدول برشی می‌توان به کمک روش Solver در نرم‌افزار Excel 2010، ثابت‌های پرونی را محاسبه نمود. در جدول 4 پارامترهای لازم جهت مدلسازی مخلوط آسفالتی به کمک سری پرونی در نرم‌افزار ABAQUS شامل، ثابت‌های پرونی، مدول الاستیسیته لحظه‌ای و نسبت پواسون برای یک سری پرونی 6 جمله‌ای به طور خلاصه آورده شده است. این پارامترها مربوط به روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران (با مشخصات و ضخامت‌های ارائه شده) می‌باشد که در دمای مرجع (21/1 درجه سانتی‌گراد) محاسبه شده‌اند. با

داشتن مدول برشی و مدول برشی لحظه‌ای، می‌توان نسبت مدول برشی را در زمان‌های مختلف با استفاده از رابطه (18) محاسبه کرد که این رابطه در زیر آورده شده است.

$$(18)$$

$$g(t) = \frac{G(t)}{G(t=0)}$$

در رابطه بالا، $G(t)$ مدول برشی در لحظه t و $G(t=0)$ مدول برشی لحظه‌ای می‌باشند.

شرایط مشابه دمایی و با مشخصات روسازی مورد نظر تکرار شود.

توجه به این موضوع بدیهی است که برای سایر روسازی‌ها در مناطق مختلف، نیاز است تا محاسبات در

جدول 4. مشخصات مصالح لایه آسفالتی در دمای مرجع (21/1 درجه سانتی‌گراد)

مشخصات ویسکوالاستیک		مشخصات الاستیک	
ثابت‌های پرونی		نسبت پواسون	مدول الاستیسیته لحظه‌ای (MPa)
g_i	τ_i		
0/449043	0/000606	0/35	10693
0/244553	0/001514		
0/123922	0/076795		
0/095569	1/334061		
0/045907	36/37552		
0/006257	98/04792		

8- نتیجه‌گیری

دینامیکی آن ترسیم شد. براساس نتایج حاصل از نمودار مدول دینامیکی، مدول الاستیسیته لحظه‌ای مخلوط آسفالتی در دمای مرجع به دست آمد. در مرحله بعد، به کمک روش پیشنهادی اسکاپری و پارک مدول استراحت مخلوط آسفالتی به صورت تابعی از زمان بارگذاری مورد محاسبه و تحلیل قرار گرفت که نتایج حاصل از آن نشان دهنده رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی و وابستگی زمانی پاسخ‌های آن می‌باشد. در نهایت، به کمک روش Solver در نرم‌افزار Excel 2010 ثابت‌های پرونی مورد نیاز در نرم‌افزار ABAQUS، در قالب مدول برشی محاسبه و تعیین شدند. براساس نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان رفتار ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی رایج در ایران و وابستگی زمانی پاسخ‌های آن را در دمای 21/1 درجه سانتی‌گراد در نرم‌افزار ABAQUS مدلسازی کرد.

در این مقاله سعی شد تا به کمک روابط نظری و بدون استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی جهت مدلسازی با سری پرونی در نرم‌افزار ABAQUS تعیین شود. به منظور دستیابی به این هدف، یک روش تئوری مبتنی بر رابطه ویتزاک و الگوریتمی بر پایه روش پیشنهادی اسکاپری و پارک، بسط داده شد و با استفاده از خصوصیات حجمی مصالح مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی رایج در ایران، پارامترهای لازم از جمله، ثابت‌های پرونی، مدول الاستیسیته لحظه‌ای و نسبت پواسون محاسبه و تعیین شدند. نتایج حاصل از این تحقیق مربوط به روسازی‌های آسفالتی رایج در ایران (با مشخصات مصالح ارائه شده) می‌باشد که در دمای مرجع (21/1 درجه سانتی‌گراد) محاسبه شده‌اند.

بدیهی است که برای سایر روسازی‌ها در مناطق مختلف، نیاز است تا محاسبات در شرایط مشابه دمایی و با مشخصات روسازی مورد نظر تکرار شود.

برای تعیین پارامترهای ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی، ابتدا بر پایه رابطه ویتزاک، مدول دینامیکی و زاویه فاز مخلوط آسفالتی مورد محاسبه قرار گرفت و منحنی مدول

9- پی‌نوشت‌ها

- 1-Prony Series
- 2-Instantaneous Modulus
- 3-John Liao
- 4-Shad Sargand
- 5-Mostafa Elseifi

axles with no uniform stress distribution", *Road Materials and Pavement Design*, DOI: 10.1080/14680629.2015.1080178, pp. 1-20.

-Liao, J. and Sargand, S. (2010), "Viscoelastic FE modeling and verification of a U.S. 30 perpetual pavement test section", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 11, No. 4, pp. 993-1008.

-Liao, Y. (2007), "Viscoelastic FE modeling of asphalt pavements and its application to U.S. 30 perpetual pavement", Ph.D. Thesis, Faculty of the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University.

-Masad, E., Huang, C.W., Airey, G. and Muliana, A. (2008), "Nonlinear viscoelastic analysis of unaged and aged asphalt binders", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 11, pp. 2170-2179.

-Mun, S. (2015), "Determining the dynamic modulus of a viscoelastic asphalt mixture using an impact resonance test with damping effect", *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 26, No. 4, pp. 189-207.

Naik, A.K. and Biligiri, K.P. (2015), "Predictive models to estimate phase angle of asphalt mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 8, 04014235.

-NCHRP 1-37A. (2004), "Guide for Mechanistic-Empirical design of new and Rehabilitated pavement Structures", Final Report, TRB, National Research Council, Illinois.

-NCHRP. (2005), "Simple performance tests: Summary of recommended methods and database", Report 547, TRB, Arizona State University.

-Souza, F.V. and Castro, L.S. (2012), "Effect of temperature on the mechanical response of thermo-viscoelastic asphalt pavements", *Construction and Building Materials*, Vol. 30, pp. 574-582.

-Wang, H. and Al-Qadi, I.L. (2010), "Evaluation of surface-related pavement damage due to tire braking", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 11, No. 1, pp. 101-121.

6-Relaxation Modulus
7-Generalized Maxwell Model
8-Maxwell-Wiechert Model
9-Equilibrium Modulus
10-Relaxation Behavior
11-Relaxation Time
12-Dirichlet series
13-Initial Modulus
14-Storage Modulus
15-Loss Modulus
16-Universal Testing Machine
17-Material Testing System
18-Witczak
19-Schapery and Park
20-Reduced Frequency
21-Master Curve
22-Adjustment Function
23-Sigmoid Function
24-Shear Modulus Ratio

مراجع-10

-Ameri, M., Mansourian, A., HeidaryKhavas, M., Aliha, M.R.M. and Ayatollahi, M.R. (2011) "Cracked asphalt pavement under traffic loading – A 3D finite element analysis", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, No. 8, pp. 1817-1826.

-Biligiri, K.P., Kaloush, K. and Uzan, J. (2010), "Evaluation of asphalt mixtures' viscoelastic properties using phase angle relationships", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 143-152.

-Breakah, T.M. and Williams, R.C. (2015), "Stochastic finite element analysis of moisture damage in hot mix asphalt", *Materials and Structures*, Vol. 48, No 1, pp. 93-106.

-Elseifi, M.A., Al-Qadi, I.L. and Yoo, P.J. (2006), "Viscoelastic modeling and field validation of flexible pavements", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 132, No. 2, pp. 172-178.

-Forough, S.A., Moghadas-Nejad, F. and Khodaii, A. (2015), "Development of a predictive model for the compressive relaxation modulus of asphalt mixtures", *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 16, No. 3, pp. 674-695.

-Li, S., Guo, Z. and Yang, Y. (2015), "Dynamic viscoelastic response of an instrumented asphalt pavement under various

modulus model", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 10, pp. 1543-1548.

-Zhao, Y., Wang, L., Chen, P. and Zeng, W. (2015), "Determination of surface viscoelastic response of asphalt pavement", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 141, No. 9, pp. 04015031.

-Zhu, X., Chen, W. and Yang, Z. (2015), "Prediction of viscoelastic behavior in asphalt concrete using the fast multipole boundary element method", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 328- 336.

"آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران، نشریه شماره 234" (1390)، تجدید نظر اول، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور.

-کاووسی، ا. و بابازاده، ع. (1387)، "بررسی روش های تجربی تعیین مدول دینامیکی مخلوط های آسفالتی در روسازی های کشور جهت طراحی روسازی در سطوح مختلف"، مجموعه مقالات چهارمین همایش قیر و آسفالت ایران، تهران، آبان 21-22، 1387، ص. 111-127.

-Witczak, M.W. and Bari, J. (2004), "Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures", Research Project, Arizona State University.

-Yang, X. and You, Z. (2015), "New Predictive Equations for Dynamic Modulus and Phase Angle Using a Nonlinear Least-Squares Regression Model", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 04014131.

Zhang, Y., Birgisson, B. and Lytton, R.L. (2015), "Weak form equation based finite-element modeling of viscoelastic asphalt mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, No. 8, pp. 04015115.

Zhao, Y. and Kim, Y.R. (2003), "The time-temperature superposition for asphalt mixtures with growing damage and permanent deformation in compression", *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1832, pp. 161-172.

-Zhao, Y., Liu, H., Bai, L. and Tan, Y. (2013), "Characterization of linear viscoelastic behavior of asphalt concrete using complex

Determination of the Visco-Elastic Properties of Asphaltic Mixtures for Finite Element Modeling In ABAQUS

H. Taherkhani, Assistant Professor, Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

M. Jalali, M.Sc., Graduate, Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: masoud.jalali@znu.ac.ir

Received: Sep. 2016-Accepted: Dec. 2016

ABSTRACT

Asphaltic mixtures show viscoelastic behavior under most conditions in their service life in pavements. A finite element modeling is widely used for predicting the viscoelastic responses of asphaltic mixtures. The general purpose ABAQUS software is a commonly used for finite element modeling analysis of different structures, which has the capability for modeling and analysis of structures contains viscoelastic materials. A common method of simulating the viscoelastic behavior in ABAQUS is the use of Prony series. To use this method, the required parameters, including the Prony constants, instantaneous elastic modulus and Poison's ratio must need to be determined. Determination of this parameters using laboratory tests is time consuming and costly and needs sophisticated equipment. Therefore, in this research, it has been attempted to determine the parameters using theoretical models without conducting laboratory tests. To this end, using the Witczak model for prediction of dynamic modulus of asphaltic mixtures and extending the algorithm proposed by Schapery and Park, the parameters of the typical asphaltic concrete mixes in Iran have been determined. The parameters have been determined using the volumetric properties of the mixtures. The results of this research can be used for modeling the time-dependent viscoelastic behavior of asphaltic concrete mixtures in ABAQUS and determination of their responses at a reference temperature of 21.1 °C.

Keywords: Asphaltic Pavement, Visco-Elastic, Modeling, Prony Series, Finite Elements
