

Heterogeneous Numerical Modeling of the Viscoelastic Behavior of Asphalt Mastic Based on Random Microstructural Geometry Generation

Amir Taheri¹, Ali Khodaii*² and Pouria Hajikarimi³

Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

Abstract: Asphalt mastic, composed of asphalt binder and mineral filler, plays a critical role in determining the mechanical behavior and performance of asphalt mixtures. Conventional laboratory tests primarily evaluate the overall mechanical response of mastics and cannot capture their local behavior at the microstructural scale. This limitation highlights the need for numerical models that represent the heterogeneous microstructure of asphalt mastic. A key step in such modeling is generating representative microstructural geometries that reflect the characteristics of real samples. Since mastic behavior depends on both binder properties and filler characteristics, including gradation and volumetric content, this study developed specialized software to generate three-dimensional random particle geometries based on predefined gradation curves and volume fractions. Using this tool, two-phase numerical models were constructed according to the specifications of actual mastic samples. The viscoelastic properties of two asphalt binder types, a fresh binder and a reclaimed aged binder, along with their corresponding mastics, were determined through frequency sweep tests using a Dynamic Shear Rheometer. These experimentally measured properties were incorporated into the generated microstructures to develop finite element models of asphalt mastics. To validate the proposed approach, numerical simulations of frequency sweep tests were conducted at selected temperatures and loading frequencies, and the results were compared with experimental measurements. The comparisons demonstrated that the randomly generated geometries effectively represent mastic microstructures, and that the developed models predicted viscoelastic behavior with high accuracy, achieving average agreements of over 95% for complex shear modulus (G^*) and over 90% for the phase angle (δ).

Keywords: Asphalt Mastic, Numerical Modeling, Microstructure, Random Geometry, Linear Viscoelasticity

* Corresponding Author: khodaii@aut.ac.ir

How to Cite: Taheri Amir, Khodaii Ali, Hajikarimi Pouria, Heterogeneous Numerical Modeling of the Viscoelastic Behavior of Asphalt Mastic Based on Random Microstructural Geometry Generation, Journal of Computational Methods in Engineering.





مقاله پژوهشی

مدل‌سازی عددی ناهمگن رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی

مبتنی بر تولید تصادفی هندسه ریزساختار

امیر طاهری^{ID}، علی خدایی^{ID*} و پوریا حاجی کریمی^{ID}

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

چکیده - ماستیک آسفالتی، متشکل از قیر و فیلر معدنی، نقش مهمی در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی دارد. آزمایش‌های متداول تنها قادر به ارزیابی رفتار کلی ماستیک هستند و در توصیف رفتار موضعی آن در مقیاس ریزساختار ناتوانند. از این رو، توسعه مدل‌های عددی با قابلیت بازنمایی ریزساختار برای بررسی رفتار موضعی آن ضروری است. یکی از گام‌های کلیدی در مدل‌سازی عددی غیرهمگن، تولید هندسه ریزساختار است به گونه‌ای که منعکس‌کننده رفتار نمونه‌های واقعی باشد. از آنجا که رفتار مکانیکی ماستیک علاوه بر ویژگی‌های قیر به دانه‌بندی و درصد حجمی فیلر وابسته است، در این پژوهش نرم‌افزاری اختصاصی برای تولید هندسه سه‌بعدی تصادفی ذرات بر مبنای دانه‌بندی و حجم دلخواه توسعه داده شد. با بهره‌گیری از این ابزار، مدل‌های عددی دوفازی ماستیک متناظر با نمونه‌های واقعی ساخته و توانایی آن‌ها در پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک ارزیابی شد. بدین منظور، مشخصات رفتار ویسکوالاستیک دو نوع قیر (تازه و پیرشده بازیافتی) و ماستیک‌های ساخته‌شده با آن‌ها، توسط آزمایش جاروب فرکانس به وسیله رنومتر برش دینامیکی اندازه‌گیری شد. سپس با ادغام خصوصیات ویسکوالاستیک قیرها و هندسه‌های تصادفی تولیدشده، مدل‌های عددی ایجاد شدند. برای صحت‌سنجی مدل‌ها، آزمایش‌های جاروب فرکانس در دماها و فرکانس‌های مختلف به روش اجزای محدود شبیه‌سازی و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد هندسه‌های تصادفی تولیدشده توانایی بالایی در بازنمایی ریزساختار واقعی ماستیک دارند و مدل‌های عددی مبتنی بر آن‌ها رفتار ویسکوالاستیک ماستیک را با میانگین دقت بیش از ۹۵٪ برای مدول برشی مختلط (G^*) و بیش از ۹۰٪ برای زاویه فاز (δ) پیش‌بینی می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: ماستیک آسفالتی، مدل‌سازی عددی، ریزساختار، هندسه تصادفی، ویسکوالاستیک خطی

*: نویسنده مسئول، رایانامه: khodaii@aut.ac.ir

۱. مقدمه

ماستیک آسفالتی، متشکل از ذرات فیلر معدنی و قیر، نقش مهمی در تعیین خصوصیات عملکردی مخصوص آسفالتی دارد [۱]. اندازه ذرات فیلر در ماستیک آسفالتی از مقیاس میکرون هستند و به طور معمول کوچکتر از حدود ۶۳ یا ۷۵ میکرون در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، با توسعه یک مدل دوفازی^۱ متشکل از قیر به عنوان ماتریس و دارای رفتار و خواص ویسکوالاستیک که ذرات فیلر معدنی به صوت دانه‌هایی با رفتار الاستیک و دانه‌بندی مشخص در آن توزیع شده‌اند، می‌توان به شکل مطلوبی رفتار مکانیکی کلی و موضعی ماستیک آسفالتی را شبیه‌سازی نمود [۳-۱]. اثرات متقابل^۲ ذرات فیلر با یکدیگر و قیر در ماستیک، تأثیر قابل توجهی در عملکرد ماستیک در مخلوط آسفالتی و همچنین خصوصیات مخلوط آسفالتی دارد [۱ و ۴]. مطالعات متعددی نشان داده‌اند عملکرد ماستیک در مخلوط آسفالتی به طور عمده به ساختار و حجم ذرات فیلر در ماستیک (تقویت مکانیکی^۳)، اندرکنش‌های فیزیکی-شیمیایی میان ذرات فیلر و قیر و همچنین واکنش‌های شیمیایی بستگی دارد [۱].

نسبت حجمی ذرات فیلر در ماستیک با درصد پرشدگی بیان می‌شود و به صورت نسبت حجم ذرات فیلر در ماستیک به حجم کل ماستیک بیان می‌شود. با افزایش درصد پرشدگی فیلر در ماستیک، شدت برهم‌کنش ذرات فیلر با یکدیگر و با قیر افزایش یافته و می‌توانند ساختار شبکه‌ای به هم پیوسته تشکیل دهند که باعث افزایش قابل توجه سختی ماستیک می‌شود [۵ و ۶]. ذرات ریزتر فیلر با افزایش سطح مخصوص فیلر می‌توانند باعث بهبود تماس و چسبندگی کلی میان فیلر و قیر شوند و در عین حال ممکن است در درصدهای پرشدگی بالا باعث ضعف ساختار داخلی فیلر گردند. به طور کلی، اندرکنش مکانیکی میان ذرات فیلر و قیر از مشخصات فیزیکی فیلر، مثل اندازه ذرات، دانه‌بندی و بافت سطحی ذرات، تأثیر می‌پذیرد [۷]. بنابراین، برای مدل‌سازی ریزساختار ماستیک، درصد پرشدگی ماستیک با ذرات فیلر و همچنین دانه‌بندی ذرات فیلر دارای اهمیت است. اندرکنش‌های فیزیکی-شیمیایی به نیروهای ضعیف در سطوح

تماس، مثل نیروهای واندروالس، نیروهای الکترواستاتیک و پیوندهای هیدروژنی میان ذرات فیلر و قیر اشاره دارد که می‌تواند منجر به بهبود چسبندگی میان فیلر و قیر شود. واکنش‌های شیمیایی نیز شامل ایجاد ترکیبات و پیوندهای شیمیایی جدید در سطوح تماس می‌شود [۱].

نرم‌افزارهای تجاری مدل‌سازی به روش اجزای محدود نظیر آباکوس، توان تولید هندسه ذرات فیلر یا سنگدانه به شکل تصادفی و بر مبنای دانه‌بندی آن‌ها را ندارند. به همین دلیل پژوهشگران از دو روش؛ پردازش تصویر، و توسعه نرم‌افزار برای تولید هندسه ذرات به صورت تصادفی برای تولید هندسه ذرات در مدل‌سازی غیرهمگن مواد و مخلوط‌های آسفالتی استفاده کرده‌اند. در روش پردازش تصویر، با تصویربرداری از نمونه‌های واقعی یا آزمایشگاهی، هندسه واقعی ذرات نمونه مدل شده و در ساخت مدل‌های دوبعدی یا سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸-۱۰]. اگرچه روش مبتنی بر پردازش تصویر دقت قابل قبولی را تضمین کرده و خطاهای ناشی از مدل‌سازی تصادفی را از بین می‌برد، اما محدودیت‌های مهمی نیز دارد. برای استفاده از روش مبتنی بر پردازش تصویر الزاماً باید نمونه‌های واقعی -حتی به تعداد محدود- تهیه یا ساخته شوند. علاوه بر این، هندسه ساخته‌شده با استفاده از این روش به صورت مستقیم وابسته به آرایش ذرات سنگدانه در نمونه است و نمی‌تواند برای سایر نمونه‌ها با اطمینان به کار گرفته شود. محدودیت مهم بعدی این روش، نیاز به دستگاه‌های برش‌نگار^۴ برای تولید هندسه سه‌بعدی ذرات است. برای ماستیک آسفالتی این محدودیت اهمیت زیادی دارد، زیرا به دلیل ریز بودن ذرات فیلر و ساختار آن‌ها، دستگاه برش‌نگار مورد استفاده باید دارای دقت و وضوح بسیار بالا و بازه توالی تصویربرداری بسیار کوچک باشد [۱۱]. چالش دیگر این روش، تولید هندسه در مدل‌های دوبعدی است. به طور کلی، برای مدل‌سازی دوبعدی یک ماده دوفازی سه‌بعدی مانند ماستیک، یکی از مسائل اساسی، توزیع فاز ذرات در فاز قیر و همچنین نحوه، شدت و هندسه بارگذاری در یک مدل دوبعدی است تا بتواند رفتار واقعی ماده سه‌بعدی را با دقت مناسبی

بازنمایی کند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مدل‌های دوبعدی مخلوط‌های آسفالتی که از روی پارامترهای حجمی نمونه‌های سه‌بعدی ساخته شده‌اند با مدل‌های دوبعدی که با استفاده از تصویربرداری مقاطع برش‌خورده نمونه ساخته شده‌اند، تفاوت دارند [۱۰ و ۱۲].

با هدف غلبه بر محدودیت‌های مطرح‌شده و ایجاد بستری کارآمد برای تحلیل ریزمقیاس ماستیک آسفالتی، در این پژوهش یک نرم‌افزار مبتنی بر برنامه‌نویسی پایتون توسعه داده شد که امکان تولید سریع و منعطف هندسه تصادفی ذرات با دانه‌بندی و حجم مشخص را به صورت سه‌بعدی فراهم می‌سازد (به بخش ۱.۱.۴ مراجعه نمایید). افزون بر این، نرم‌افزار توسعه‌داده‌شده قابلیت اعمال ملاحظات هندسی دیگری نظیر کنترل حداقل فاصله میان ذرات با یکدیگر و حداقل فاصله میان ذرات با دیواره‌های نمونه را داراست که نقش مهمی در بازنمایی واقع‌بینانه ریزساختار ماستیک ایفا می‌کند.

به منظور بررسی و توصیف رفتار قیر و مواد قیری تئوری‌های مختلفی شامل الاستیسیته، ویسکوالاستیسیته خطی و غیر خطی، ویسکوپلاستیسیته و غیره، استفاده شده است [۱۳]. در دماهای پائین و میانی و تحت بارگذاری‌های دارای شدت پایین (در حدود کرنش کمتر از 10^{-1} تا 10^{-4} بسته به دما و خصوصیات ماده)، ویسکوالاستیسیته خطی می‌تواند به خوبی رفتار قیر و مواد قیری را توصیف نماید [۱۷-۱۳]. پاسخ ویسکوالاستیک قیر و مواد قیری، به بارگذاری، شامل مدول مختلط و زاویه فاز، می‌تواند با انجام تعدادی آزمایش محدود رفتار مکانیکی آن‌ها را توصیف کرده و عملکرد آن‌ها را در بازه‌ی گسترده‌ای از دما و فرکانس بارگذاری پیش‌بینی نمایند [۱۰، ۱۳، ۱۶ و ۱۸]. این مشخصات رفتار ویسکوالاستیک برای قیر و ماستیک را می‌توان از طریق آزمایش با رئومتر برشی دینامیکی^۵ (DSR) و با برازش نتایج آزمایش به مدل‌های ویسکوالاستیک که توسط روابط ریاضی مبتنی بر معادلات بنیادی تئوری ویسکوالاستیک تعریف می‌شوند، به دست آورد.

در این پژوهش، با تولید تصادفی هندسه سه‌بعدی ریزساختار ماستیک و به‌کارگیری مدل‌سازی عددی مبتنی بر روش اجزای محدود، رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین، دقت و کارایی مدل‌های عددی توسعه‌یافته از طریق مقایسه پاسخ آن‌ها تحت بارگذاری با نتایج حاصل از آزمایش‌های رئومتر برشی دینامیکی (DSR) ارزیابی شده است. یکی از مزایای کلیدی مدل‌سازی‌های عددی غیرهمگن ماستیک آسفالتی، و به طور کلی مخلوط‌های آسفالتی، فراهم‌سازی امکان بررسی رفتار موضعی این مواد است. این رویکرد امکان تحلیل دقیق تأثیر عواملی نظیر کیفیت چسبندگی میان ذرات و ماتریس قیر بر رفتار مکانیکی و عملکرد ماستیک را فراهم می‌سازد؛ در حالی که دستیابی به چنین سطحی از جزئیات از طریق پژوهش‌های آزمایشگاهی متداول امکان‌پذیر نیست.

۲. مصالح و روش‌ها

۲.۱. مواد و مصالح

در پژوهش جاری از دو نوع قیر خالص، شامل یک قیر تازه با درجه نفوذ ۷۰-۵۰ و یک نوع قیر پیرشده دارای درجه نفوذ ۲۰-۱۰، استفاده شده است. قیر پیرشده، از استخراج^۶ و احیای^۷ قیر موجود در مصالح بازیافتی یک مخلوط آسفالتی پیرشده به دست آمده است. قیر موجود در مصالح مخلوط آسفالتی بازیافتی ابتدا با استفاده از حلال تری‌کلرواتیلن^۸ (TCE) دارای رده آزمایشگاهی و روش سانتریفیوژ استخراج شده است و پس از آن با استفاده از تبخیرکننده دوآر^۹ احیا شده است. جدول ۱ خصوصیات پایه قیرهای مورد استفاده را نشان می‌دهد.

مصالح فیلر معدنی مورد استفاده در پژوهش جاری، عبوری از الک ۰/۰۶۳ mm بوده و بیشتر دارای ترکیب آهکی است.

۲.۲. نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در پژوهش جاری شامل نمونه‌های قیر و ماستیک هستند. نمونه‌های ماستیک با اختلاط مصالح فیلر با قیر

جدول ۱. خصوصیات پایه قیرهای مورد استفاده در پژوهش جاری

Table 1. Basic properties of the asphalt binders				
ویژگی	واحد	روش استاندارد	مقدار	
			۵۰-۷۰ (تازه)	۱۰-۲۰ (پیرشده)
درجه نفوذ در ۲۵°C	dmm	ASTM D5	۶۲	۱۴
نقطه نرمی	°C	ASTM D36	۵۵	۶۸
نقطه جرقه‌زنی	°C	ASTM D92	>۲۵۰	>۲۵۰
خاصیت کشسانی در ۲۵°C	cm	ASTM D113	>۱۰۰	<۱۰۰

جدول ۲. خصوصیات نمونه‌های ماستیک

Table 2. Properties of the mastic samples				
نمونه ماستیک	نوع قیر	درصد حجمی فیلر در ماستیک	مبنای تعیین درصد فیلر	
ماستیک تازه	قیر تازه با درجه نفوذ ۵۰-۷۰	۲۸	مخلوط آسفالتی تازه حاوی ۵٪ قیر و ۳٪ فیلر	
ماستیک پیرشده	قیر پیرشده با درجه نفوذ ۱۰-۲۰	۲۴	مخلوط آسفالتی بازیافتی پیرشده حاوی ۵٪ قیر و ۶۰٪ فیلر	

ساخته شده‌اند. در ادامه، جزئیات نمونه‌ها و نحوه آماده‌سازی آن‌ها آمده است.

۱.۲.۲. نمونه‌های قیر

در پژوهش جاری دو نوع نمونه قیر مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های قیر شامل قیر تازه (پیرنشده) دارای درجه نفوذ ۵۰-۷۰ و قیر پیرشده دارای درجه نفوذ ۱۰-۲۰ احیاشده از مخلوط آسفالتی پیرشده بازیافتی هستند. برای ساخت نمونه‌های آزمایشی قیر، ابتدا قیرهای تازه و پیرشده به ترتیب در دمای ۱۵۰°C و ۱۶۰°C برای مدت ۳۰ min داخل گرمکن قرار داده شدند و سپس به صورت داغ داخل قالب‌های آزمایش مورد نظر ریخته شدند.

۲.۲.۲. نمونه‌های ماستیک

در پژوهش جاری دو نوع نمونه ماستیک با اختلاط قیر و فیلر معدنی؛ یکی ماستیک حاوی قیر تازه و دیگری ماستیک حاوی قیر پیرشده ساخته شدند و مورد ارزیابی قرار گرفتند. درصد فیلر در نمونه‌های ماستیک بر مبنای دانه‌بندی، درصد قیر و

خصوصیات وزنی-حجمی دو مخلوط آسفالتی واقعی تعیین شده است. بدین ترتیب، درصد حجمی فیلر در نمونه‌های ماستیک حاوی قیر تازه، بر مبنای یک مخلوط آسفالتی تازه برابر با ۲۸٪ و در نمونه‌های ماستیک حاوی قیر پیرشده، بر مبنای مخلوط آسفالتی بازیافتی پیرشده که قیر پیرشده از آن استحصال شده است، برابر با ۲۴٪ در نظر گرفته شد. جدول ۲ نوع و مشخصات نمونه‌های ماستیک مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای ساخت نمونه‌های ماستیک، مصالح فیلر برای مدت ۲۴ ساعت داخل گرمکن با دمای ۱۶۰°C قرار داده شدند و سپس با قیر داغ مخلوط شدند. همچنین، اختلاط قیر با مصالح فیلر داخل یک ظرف فلزی دارای دمای ۸۰°C و به صورت دستی و برای مدت ۵ دقیقه انجام پذیرفت. برای ساخت ماستیک حاوی قیر تازه، ابتدا قیر تازه به مدت ۳۰ دقیقه داخل گرمکن با دمای ۱۵۰°C قرار داده شد و سپس با فیلر داغ مخلوط گردید. برای ساخت ماستیک حاوی قیر پیرشده، ابتدا قیر پیرشده به مدت ۳۰ دقیقه داخل گرمکن با دمای ۱۶۰°C قرار داده شد و سپس با فیلر داغ مخلوط گردید. نمونه‌ها بلافاصله پس از ساخت، داخل قالب‌های آزمایش ریخته شدند.

۳.۲. آزمایش‌ها

۱.۳.۲. استخراج قیر از آسفالت بازیافتی

قیر پیرشده مورد استفاده در پژوهش جاری از مصالح بازیافتی یک مخلوط آسفالتی پیرشده حاوی ۵٪ قیر و مطابق با استاندارد ASTM D2172 [۱۹] استخراج شده است. برای استخراج قیر از مخلوط بازیافتی، از حلال تری‌کلرواتیلن و دستگاه سانتریفیوژ استفاده شده است. ابتدا نمونه مخلوط بازیافتی برای مدتی در گرمکن با دمای 110°C قرار داده شد و پس از اینکه نمونه به اندازه کافی گرم شد، به صورت دستی تا جای ممکن گسسته^{۱۰} و داخل یک ظرف پهن قرار داده شد تا به دمای محیط برسد. پس از آن، نمونه گسسته‌شده داخل محفظه دستگاه استخراج قرار داده شد و حلال مورد استفاده (تری‌کلرواتیلن) روی آن ریخته شد تا جایی که حلال به طور کامل نمونه را بپوشاند. به نمونه و حلال داخل محفظه دستگاه استخراج برای مدت یک ساعت زمان داده شد و پس از هم‌زدن مخلوط نمونه و حلال، فرآیند استخراج شروع گردید. به منظور اطمینان از استخراج تمام قیر موجود در نمونه، پس از گذشت مدتی از شروع فرآیند استخراج و کم شدن جریان خروجی حاوی قیر و حلال از دستگاه، طی چند مرحله مقدار مشخصی از حلال به محفظه اضافه گردید تا جایی که جریان خروجی دستگاه فاقد قیر باشد و رنگ آن شفاف (به رنگ حلال) گردد. در مرحله اول، خروجی دستگاه استخراج شامل قیر موجود در نمونه، حلال، و بخشی از فیلر موجود در نمونه است. در مرحله اول، بخشی از فیلر موجود در نمونه از کاغذ فیلتر دستگاه عبور می‌کند. در مرحله بعد، فیلر موجود در محلول قیر و حلال (خروجی مرحله اول استخراج)، با استفاده از فیلتر کاغذی متراکم و فرآیند سانتریفیوژ مورد جداسازی قرار گرفت.

۲.۳.۲. احیای قیر از محلول حاوی حلال و قیر با استفاده از

تبخیرکننده دوآر

قیر موجود در محلول قیر و حلال که از فرآیند استخراج قیر از مصالح آسفالت بازیافتی به دست آمده بود، با استفاده از دستگاه تبخیرکننده دوآر و مطابق با استاندارد ASTM D5404 [۲۰] احیا

شد. برای این منظور، در مرحله اول، فشار داخل محفظه دستگاه به مقدار حدود ۶ kPa کمتر از فشار محیط کاهش داده شده و پس از اینکه بخش عمده حلال موجود در نمونه تبخیر شد، در مرحله دوم، فشار داخل محفظه به صورت تدریجی به مقدار حدود ۸۰ kPa کمتر از فشار محیط کاهش داده شد و برای مدت حدود ۱۰ دقیقه حفظ گردید تا حلال باقی مانده در نمونه تبخیر شود. دمای حمام روغن دستگاه (دمای نمونه) هنگام فرآیند احیا برابر با 140°C و سرعت دوران بالن حاوی نمونه در حمام روغن دستگاه در مرحله اول برابر با ۴۰ rpm و در مرحله دوم برابر با ۴۵ rpm تنظیم شد.

پس از فرآیند احیا، بالن حاوی نمونه برای مدت حداکثر ۱۵ دقیقه به صورت وارون داخل گرمکن با دمای 163°C قرار داده شد تا نمونه از آن خارج گردد. سپس، قیر احیا شده به صورت لایه‌ای با ضخامت حدود ۳ mm درون یک ظرف پهن ریخته شد و به مدت چهار ساعت در گرمکن با دمای 95°C قرار گرفت تا در صورت باقی ماندن مقادیری حلال در نمونه، حلال باقیمانده تا حد امکان از آن خارج شود.

۳.۳.۲. آزمایش جاروب فرکانس با استفاده از رئومتر برش

دینامیکی

آزمایش‌های جاروب فرکانس با استفاده از دستگاه رئومتر برشی دینامیکی در بازه دمایی 10°C تا 20°C و در بازه فرکانسی Hz ۱ تا ۵۰ Hz برای نمونه‌های قیر و ۰/۱ Hz تا ۲۵ Hz برای نمونه‌های ماستیک انجام شدند. هندسه آزمایش‌های جاروب فرکانس به صورت دو صفحه موازی با قطر ۸ mm و فاصله ۲ mm در نظر گرفته شد و بارگذاری به صورت کرنش-کنترل و با تابع سینوسی به نمونه‌ها اعمال گردید. خروجی آزمایش‌های جاروب فرکانس شامل مدول دینامیکی برشی، G^* ، و زاویه فاز، δ ، است.

شدت کرنش اعمالی به هر نمونه بر اساس ارزیابی محدوده رفتار ویسکوالاستیک خطی در هر دما در نظر گرفته شد. برای

جدول ۳. حداکثر کرنش قابل اعمال به نمونه‌ها در هر دما جهت باقی ماندن در محدوده رفتار ویسکوالاستیک خطی

Table 3. Maximum applicable strain for the samples at each temperature to remain within the linear viscoelastic range

نمونه	دما (°C)	حداکثر کرنش در محدوده خطی (%)	
		تازه	پیر شده
قیر	-۱۰	۰/۰۵	۰/۱
	۰	۰/۱۶	۰/۴
	۱۰	۰/۸	۱
	۱۵	۱	۱
	۲۰	۱	۱
ماستیک	-۱۰	۰/۰۲۵	۰/۰۰۸
	۰	۰/۰۴	۰/۰۰۱
	۱۰	۰/۰۶	۰/۰۰۱
	۱۵	۰/۰۸	۰/۰۰۴
	۲۰	۰/۴۵	۰/۱

۳. تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک نمونه‌ها

خصوصیات ویسکوالاستیک نمونه‌ها با در نظر گرفتن رفتار خطی نمونه‌ها و با استفاده از مدل مکانیکی ماکسول تعمیم‌یافته^{۱۱} و سری پرونی^{۱۲} متناظر آن تعیین شد. مدل ماکسول تعمیم‌یافته یک مدل مکانیکی متشکل از فنرها و میراگرها به منظور توصیف رفتار ویسکوالاستیک خطی است.

۱.۳. مدل مکانیکی ماکسول تعمیم‌یافته

مدل ماکسول تعمیم‌یافته شامل ترکیب موازی یک فنر و تعدادی المان فنر-میراگر است که در هر المان، یک فنر و یک میراگر به طور سری به یکدیگر متصل هستند [۲۱]. مدل ماکسول تعمیم‌یافته به دلیل سری بودن فنرها با میراگرها در هر المان، توانایی مدل‌کردن کرنش و تغییر شکل آنی اعمال‌شده به نمونه را دارد و بنابراین، گزینه‌ای مناسب برای مدل‌کردن رفتار ویسکوالاستیک تحت اعمال بارگذاری کرنشی است. شکل ۱ مدل ماکسول تعمیم‌یافته را نشان می‌دهد که در آن مقادیر مدول الاستیک فنرها با G و مقادیر ویسکوزیته میراگرها با η نشان داده شده است.

این منظور، در هر دما شدت کرنش اعمالی به صورت تدریجی افزایش یافت (از ۰/۰۰۰۵٪ تا ۱٪) و محدوده رفتار خطی تا جایی در نظر گرفته شد که افزایش کرنش باعث کاهش مقدار مدول دینامیکی اولیه نمونه به مقدار بیش از ۵٪ نشود. جدول ۳ حداکثر درصد کرنش قابل اعمال به هر نمونه در محدوده رفتار خطی در دماهای آزمایش جاروب فرکانس را نشان می‌دهد.

برای در نظر گرفتن حاشیه اطمینان از رفتار خطی نمونه‌ها، مقادیر مدول برشی دینامیکی و زاویه فاز نمونه‌ها در سطوح کرنش کمی کمتر از مقادیر جدول ۴ تعیین شدند. همچنین، طبق اعلام شرکت سازنده دستگاه رئومتر برشی دینامیکی، فاصله میان دو صفحه موازی (ضخامت نمونه) برای آزمایش نمونه‌های ماستیک باید حداقل پنج برابر بزرگترین قطر ذرات فیلر موجود در نمونه‌ها باشد. در این پژوهش، بزرگترین قطر ذرات فیلر معدنی در نمونه‌های ماستیک برابر با ۰/۰۶۳ mm است و با در نظر داشتن فاصله میان صفحات موازی در آزمایش‌های DSR برابر با ۲ mm، محدودیت حداقل ضخامت نمونه‌ها برآورده می‌شود.

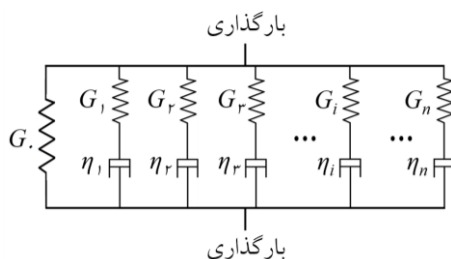


Fig. 1. Generalized Maxwell's mechanical model.

شکل ۱. مدل مکانیکی ماکسول تعمیم یافته

ماکسول تعمیم یافته است و با پارامترهای G_i (مدول الاستیک فنرها) و λ_i (زمان رهاش هر المان) مشخص می شود.

۲.۳. سری پرونی در بارگذاری نوسانی بر مبنای مدل ماکسول تعمیم یافته

در صورتی که بارگذاری به صورت کرنش نوسانی سینوسی مطابق با رابطه (۵) به نمونه اعمال شود، پاسخ تنش آن نیز به صورت سینوسی و با اختلاف فاز δ مطابق با رابطه (۶) خواهد بود [۲۲]:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$\tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t - \delta) \quad (6)$$

t : زمان، γ_0 و τ_0 : به ترتیب شدت کرنش اعمالی و شدت پاسخ تنش؛ ω : سرعت زاویه ای، δ : زاویه فاز، rad هستند. با توجه به روابط (۵) و (۶)، در صورتی که $\delta = 0$ باشد اختلاف زمانی میان بارگذاری و پاسخ ناشی از آن برابر با صفر خواهد بود و نشان دهنده رفتار الاستیک کامل است. از طرف دیگر، در صورتی که $\delta = 90^\circ$ باشد حداکثر پاسخ زمانی رخ می دهد که شدت بارگذاری به صفر می رسد که نشان دهنده رفتار کاملاً ویسکوز است. بنابراین، در رفتار ویسکوالاستیک مواد، زاویه فاز مقداری بین صفر تا 90° دارد و هرچه مقدار زاویه فاز کمتر باشد، رفتار به رفتار الاستیک کامل نزدیک تر خواهد بود. شکل ۲ نمودار بارگذاری کرنش سینوسی به همراه پاسخ تنش ناشی از آن را به صورت کیفی نشان می دهد.

زمانی که مدل ماکسول تعمیم یافته تحت اعمال کرنش قرار گیرد، در هر لحظه کرنش تمام المان های مدل با یکدیگر برابر و مساوی با کرنش اعمالی، و تنش کل مدل برابر با جمع تنش های ایجاد شده در المان های مدل خواهد بود. معادله اساسی حاکم بر هر المان مدل ماکسول تعمیم یافته (المان i ام) مطابق با رابطه (۱) خواهد بود [۲۲]:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}_i}{G_i} + \frac{\tau_i}{\eta_i} \quad (1)$$

γ : کرنش اعمالی؛ τ_i : تنش المان i ام؛ G_i : مدول الاستیک فنر المان i ام؛ η_i : ویسکوزیته میراگر المان i ام هستند.

اگر مقدار کرنش ثابت باشد، معادله (۱) را می توان به صورت معادله (۲) بازنویسی نمود:

$$\dot{\tau}_i + \tau_i \frac{G_i}{\eta_i} = 0 \quad (2)$$

با حل معادله دیفرانسیل رابطه (۲) و اعمال شرایط اولیه در زمان $t = 0$ ، پاسخ تنش مدل ماکسول تعمیم یافته تحت اعمال بارگذاری کرنشی مطابق با رابطه (۳) به دست می آید [۲۲]:

$$\tau(t) = \gamma_0 \left(G_e + \sum_{i=1}^n G_i e^{-\frac{t}{\lambda_i}} \right), \quad \lambda_i = \frac{\eta_i}{G_i} \quad (3)$$

γ_0 : شدت کرنش اعمالی؛ λ_i : زمان رهاش i ام المان هستند. در نهایت، با تقسیم طرفین رابطه (۳) بر کرنش، مدول مدل ماکسول تعمیم یافته به صورت رابطه (۴) به دست می آید:

$$G(t) = G_e + \sum_{i=1}^n G_i e^{-\frac{t}{\lambda_i}}, \quad \lambda_i = \frac{\eta_i}{G_i} \quad (4)$$

به سری $\sum_{i=1}^n G_i e^{-\frac{t}{\lambda_i}}$ در پاسخ مدل ماکسول تعمیم یافته، سری پرونی گفته می شود. بنابراین، هر سری پرونی متناظر با یک مدل

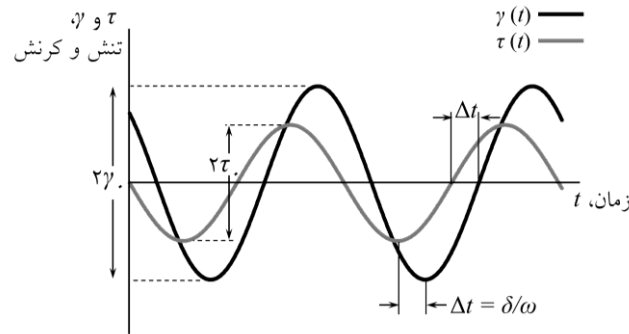


Fig. 2. Schematic representation of sinusoidal loading and the resulting response

شکل ۲. نمودار کیفی بارگذاری سینوسی و پاسخ ناشی از آن

جدول ۴. ضرایب سری پرونی نمونه‌های قیر و ماستیک در دمای مرجع ۱۵°C

Table 4. Prony series coefficients of the asphalt binder and mastic samples at the reference temperature of 15 °C

المان	قیر تازه (R² = ۹۹/۸٪)		قیر پیرشده (R² = ۹۸/۰٪)		ماستیک تازه (R² = ۹۹/۱٪)		ماستیک پیرشده (R² = ۹۹/۹٪)	
	λ _i	G _i	λ _i	G _i	λ _i	G _i	λ _i	G _i
۰	-	۴/۸۵ × ۱۰ ^۵	-	۲/۵۱ × ۱۰ ^۷	-	۱/۶۵ × ۱۰ ^۴	-	۵/۰۷ × ۱۰ ^۷
۱	۳/۴۶ × ۱۰ ^{-۶}	۹/۴۳ × ۱۰ ^۷	۱/۰۵ × ۱۰ ^{-۸}	۱/۹۲ × ۱۰ ^{-۶}	۷/۵۵ × ۱۰ ^{-۶}	۱/۸۴ × ۱۰ ^{-۸}	۱/۴۲ × ۱۰ ^{-۵}	۱/۴۲ × ۱۰ ^{-۵}
۲	۴/۴۲ × ۱۰ ^{-۷}	۴/۴۲ × ۱۰ ^{-۵}	۴/۵۳ × ۱۰ ^{-۷}	۶/۱۲ × ۱۰ ^{-۶}	۹/۷۰ × ۱۰ ^{-۷}	۵/۴۴ × ۱۰ ^{-۷}	۴/۷۸ × ۱۰ ^{-۵}	۴/۷۸ × ۱۰ ^{-۵}
۳	۵/۱۴ × ۱۰ ^{-۷}	۵/۱۴ × ۱۰ ^{-۵}	۷/۵۴ × ۱۰ ^{-۷}	۱/۹۵ × ۱۰ ^{-۵}	۱/۰۶ × ۱۰ ^{-۸}	۱/۵۳ × ۱۰ ^{-۸}	۱/۶۱ × ۱۰ ^{-۴}	۱/۶۱ × ۱۰ ^{-۴}
۴	۵/۴۷ × ۱۰ ^{-۷}	۹/۲۸ × ۱۰ ^{-۵}	۶/۴۰ × ۱۰ ^{-۷}	۶/۲۳ × ۱۰ ^{-۵}	۱/۲۹ × ۱۰ ^{-۸}	۸/۷۳ × ۱۰ ^{-۷}	۸/۷۳ × ۱۰ ^{-۷}	۸/۷۳ × ۱۰ ^{-۷}
۵	۴/۱۳ × ۱۰ ^{-۷}	۲/۷۸ × ۱۰ ^{-۴}	۶/۸۳ × ۱۰ ^{-۷}	۱/۹۹ × ۱۰ ^{-۴}	۱/۰۱ × ۱۰ ^{-۸}	۱/۲۴ × ۱۰ ^{-۸}	۱/۸۱ × ۱۰ ^{-۳}	۱/۸۱ × ۱۰ ^{-۳}
۶	۵/۱۹ × ۱۰ ^{-۷}	۸/۳۱ × ۱۰ ^{-۴}	۷/۲۱ × ۱۰ ^{-۷}	۶/۳۵ × ۱۰ ^{-۴}	۱/۱۴ × ۱۰ ^{-۸}	۱/۳۱ × ۱۰ ^{-۸}	۱/۳۱ × ۱۰ ^{-۸}	۱/۳۱ × ۱۰ ^{-۸}
۷	۳/۵۴ × ۱۰ ^{-۷}	۲/۴۹ × ۱۰ ^{-۳}	۷/۱۶ × ۱۰ ^{-۷}	۱۰ ^{-۳}	۴/۸۳ × ۱۰ ^{-۷}	۱/۱۵ × ۱۰ ^{-۸}	۲/۹۴ × ۱۰ ^{-۲}	۲/۹۴ × ۱۰ ^{-۲}
۸	۲/۰۴ × ۱۰ ^{-۷}	۷/۴۵ × ۱۰ ^{-۳}	۴/۸۰ × ۱۰ ^{-۷}	۶/۴۶ × ۱۰ ^{-۳}	۴/۹۵ × ۱۰ ^{-۷}	۴/۲۴ × ۱۰ ^{-۲}	۶/۸۷ × ۱۰ ^{-۲}	۶/۸۷ × ۱۰ ^{-۲}
۹	۷/۱۴ × ۱۰ ^{-۶}	۲/۲۳ × ۱۰ ^{-۲}	۴/۲۱ × ۱۰ ^{-۷}	۱۰ ^{-۲}	۱/۲۲ × ۱۰ ^{-۷}	۱/۰۴ × ۱۰ ^{-۸}	۲/۳۱ × ۱۰ ^{-۱}	۲/۳۱ × ۱۰ ^{-۱}
۱۰	۹/۱۱ × ۱۰ ^{-۶}	۶/۶۷ × ۱۰ ^{-۲}	۴/۱۸ × ۱۰ ^{-۷}	۶/۵۸ × ۱۰ ^{-۲}	۲/۲۴ × ۱۰ ^{-۶}	۴/۹۹ × ۱۰ ^{-۱}	۷/۷۵ × ۱۰ ^{-۱}	۷/۷۵ × ۱۰ ^{-۱}
۱۱	۱/۹۵ × ۱۰ ^{-۶}	۱۰ ^{-۱}	۱/۸۰ × ۱۰ ^{-۷}	۱۰ ^{-۱}	۶/۲۴ × ۱۰ ^{-۶}	۱/۷۱	۲/۶۰	۲/۶۰
۱۲	۱/۲۳ × ۱۰ ^{-۶}	۵/۹۸ × ۱۰ ^{-۱}	۲/۹۶ × ۱۰ ^{-۷}	۱۰ ^{-۱}	۲/۸۱ × ۱۰ ^{-۲}	۵/۸۸	۷/۹۴ × ۱۰ ^{-۷}	۷/۹۴ × ۱۰ ^{-۷}

$$\tau(t) = \gamma_0 \left(\underbrace{\int_0^\infty \omega G(\chi) \sin(\omega\chi) d\chi}_{G'(\omega)} \sin(\omega t) + \underbrace{\int_0^\infty \omega G(\chi) \cos(\omega\chi) d\chi}_{G''(\omega)} \cos(\omega t) \right) \quad (9)$$

به $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ به ترتیب مدول ذخیره^{۱۶} و مدول اتلاف^{۱۷} گفته می‌شود. اکنون با برابر قرار دادن رابطه (۹) با رابطه (۶):

رابطه بنیادی^{۱۴} رفتار ویسکوالاستیک خطی بر مبنای اصل برهم‌نهی بولتزمن^{۱۵} به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$\tau(t) = \int_{-\infty}^t G(t-\xi) \frac{d\gamma(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (7)$$

با جایگذاری رابطه (۵) در رابطه (۷) و تغییر متغیر $\chi = t - \xi$:

$$\tau(t) = \int_{-\infty}^t G(\chi) \gamma_0 \omega \cos(\omega(t-\chi)) (-d\chi) \quad (8)$$

با باز کردن جمله کسینوس، رابطه (۸) را می‌توان به فرم رابطه (۹) بازنویسی کرد:

جدول ۵. ضرایب سری پرونی نمونه‌های قیر و ماستیک در دمای مرجع °C

Table 5. Prony series coefficients of the asphalt binder and mastic samples at the reference temperature of 0 °C								
ماستیک پیرشده (R ² = ۹۹,۸٪)		ماستیک تازه (R ² = ۹۹,۲٪)		قیر پیرشده (R ² = ۹۹,۰٪)		قیر تازه (R ² = ۹۸,۸٪)		نمونه
λ_i	G_i	λ_i	G_i	λ_i	G_i	λ_i	G_i	لمان
—	۱/۳۴ × ۱۰ ^۷	—	۱/۰۱ × ۱۰ ^۷	—	۲/۵۰ × ۱۰ ^۷	—	۵/۹۶ × ۱۰ ^۵	۰
× ۱۰ ^{-۶}	۴/۴۴ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۵}	۱/۳۴ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۴}	۱/۱۵ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۴}	۱/۰۶ × ۱۰ ^۸	۱
× ۱۰ ^{-۶}	۷/۱۶ × ۱۰ ^۵	× ۱۰ ^{-۵}	۲/۳۷ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۴}	× ۱۰ ^{-۲}	× ۱۰ ^{-۴}	۳/۰۹ × ۱۰ ^۸	۲
× ۱۰ ^{-۵}	۳/۲۳ × ۱۰ ^۵	× ۱۰ ^{-۴}	۵/۴۵ × ۱۰ ^۶	× ۱۰ ^{-۴}	۹/۱۱ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۳}	۷/۵۴ × ۱۰ ^۷	۳
× ۱۰ ^{-۴}	۳/۳۸ × ۱۰ ^۶	× ۱۰ ^{-۴}	۷/۹۴ × ۱۰ ^۵	× ۱۰ ^{-۳}	۱/۹۳ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۳}	۸/۸۹ × ۱۰ ^۶	۴
× ۱۰ ^{-۴}	۴/۶۵ × ۱۰ ^۳	× ۱۰ ^{-۴}	۱/۷۱ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۳}	۸/۴۸ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۳}	۶/۹۷ × ۱۰ ^۷	۵
× ۱۰ ^{-۳}	۱/۵۹ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۳}	۲/۴۰ × ۱۰ ^۵	× ۱۰ ^{-۲}	۲/۱۳ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۲}	۱/۰۶ × ۱۰ ^۷	۶
× ۱۰ ^{-۳}	۲/۰۳ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۳}	۴/۱۰ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۲}	۸/۵۴ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۲}	۵/۵۶ × ۱۰ ^۷	۷
× ۱۰ ^{-۲}	۱/۸۹ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۳}	۱/۳۲ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۲}	۳/۰۰ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۲}	۲/۴۹ × ۱۰ ^۷	۸
× ۱۰ ^{-۱}	۱/۶۶ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۲}	۳/۰۸ × ۱۰ ^۵	× ۱۰ ^{-۱}	۷/۸۱ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۱}	۲/۹۴ × ۱۰ ^۷	۹
۱/۰۰	۱/۹۶ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۲}	۱/۸۷ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۱}	۱/۴۱ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۱}	۱/۶۴ × ۱۰ ^۷	۱۰
۵/۱۸ × ۱۰ ^۱	۱/۶۹ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۱}	۴/۷۴ × ۱۰ ^۶	۱/۴۳	۵/۰۳ × ۱۰ ^۷	۱/۱۰	× ۱۰ ^{-۵}	۱۱
۳/۷۳ × ۱۰ ^۲	۱/۲۵ × ۱۰ ^۸	× ۱۰ ^{-۱}	۳/۴۰ × ۱۰ ^۷	۳/۵۵	۲/۲۵ × ۱۰ ^۷	۲/۶۰	۱/۴۱ × ۱۰ ^۷	۱۲
۲/۶۸ × ۱۰ ^۳	۸/۶۷ × ۱۰ ^۷	× ۱۰ ^{-۱}	۶/۹۵ × ۱۰ ^۵	۸/۸۴	۳/۳۸ × ۱۰ ^۷	۶/۱۵	۱/۱۲ × ۱۰ ^۵	۱۳
۱/۹۳ × ۱۰ ^۴	۳/۸۰ × ۱۰ ^۶	× ۱۰ ^{-۱}	۱/۱۵ × ۱۰ ^۸	۲/۲۰ × ۱۰ ^۱	۶/۲۹ × ۱۰ ^۶	۱/۴۶ × ۱۰ ^۱	۳/۰۸ × ۱۰ ^۶	۱۴
۱/۳۹ × ۱۰ ^۵	۴/۷۲ × ۱۰ ^۷	۲/۸۵	۷/۶۷ × ۱۰ ^۷	۵/۴۸ × ۱۰ ^۱	۳/۰۳ × ۱۰ ^۷	۳/۴۴ × ۱۰ ^۱	۵/۱۲ × ۱۰ ^۵	۱۵

به منظور توسعه سری پرونی با استفاده از پاسخ بارگذاری نوسانی، باید روابط به دست آمده برای G' و G'' از حوزه فرکانسی به حوزه زمانی تبدیل شوند. با جایگذاری رابطه (۴) در روابط به دست آمده برای G' و G'' در رابطه (۹) و سپس با استفاده از تبدیل لاپلاس برای توابع سینوس و کسینوس، G' و G'' به ترتیب به صورت سری‌های روابط (۱۴) و (۱۵) به دست می‌آیند [۲۲]:

$$G'(\omega) = G_e + \sum_{i=1}^n G_i \omega \frac{\omega}{\omega^2 + \frac{1}{\lambda_i^2}} \quad (14)$$

$$= G_e + \sum_{i=1}^n \frac{G_i \omega^2 \lambda_i^2}{\omega^2 \lambda_i^2 + 1}$$

$$\tau(t) = \tau_0 (G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t) = \tau_0 (\cos \delta \sin \omega t + \sin \delta \cos \omega t) \quad (10)$$

با توجه به رابطه (۱۰)، مدول ذخیره و مدول اتلاف به ترتیب به صورت روابط (۱۱) و (۱۲) قابل ارائه خواهند بود:

$$G'(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (11)$$

$$G''(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (12)$$

با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲)، رابطه میان شدت کرنش اعمالی و پاسخ تنش به صورت رابطه (۱۳) خواهد بود:

$$\tau_0 = \gamma_0 \sqrt{(G'(\omega))^2 + (G''(\omega))^2} = \gamma_0 G^*(\omega) \quad (13)$$

$G^*(\omega)$: مدول دینامیکی، برابر با مجذور مجموع مربعات مدول ذخیره و مدول اتلاف است.

۴. مدل سازی عددی

۱.۴. توسعه مدل های عددی

مدل های عددی مطابق با نمونه های آزمایش جاروب فرکانس با دستگاه DSR و با استفاده از نرم افزار آباکوس^{۱۸} به روش اجزای محدود^{۱۹} توسعه داده شدند.

۱.۱.۴. هندسه مدل ها

در مطابقت با نمونه های واقعی آزمایش جاروب فرکانس با DSR، هندسه مدل ها به شکل استوانه و با نسبت شعاع به ارتفاع ۲ به ۱ در نظر گرفته شد. نمونه های قیر به صورت استوانه های همگن تکفازی با قطر ۸ mm و ضخامت ۲ mm و نمونه های ماستیک به صورت دوفازی و متشکل از ذرات فیلر و قیر مدل شدند.

ذرات فیلر در مدل های ماستیک به صورت کروی و با توزیع تصادفی و مطابق با دانه بندی مشخص مدل شدند. برای این منظور، با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون^{۲۰} یک نرم افزار توسعه داده شد که مشخصات و ابعاد نمونه و دانه بندی مورد نظر به همراه درصد پُرشدگی نمونه با ذرات را به عنوان ورودی دریافت می کند و مشخصات هندسی ذرات دارای دانه بندی وارد شده و با توزیع تصادفی در فضای نمونه را به عنوان خروجی به دست می دهد. خروجی های نرم افزار را می توان به دو دسته فایل های حاوی مشخصات ذرات تولید شده و خروجی های تصویری تقسیم بندی نمود.

مهم ترین خروجی نرم افزار، یک فایل با پسوند STP است که حاوی مشخصات ذرات تولید شده، شامل مختصات مراکز ذرات در فضای هندسی نمونه و شعاع مربوط به هر ذره، و قابل خواندن به وسیله نرم افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر (CAD^{۲۱}) است. سایر فایل های خروجی شامل یک صفحه کاری Excel حاوی مختصات مرکز و شعاع ذرات تولید شده و یک فایل متنی با پسوند txt حاوی ورودی های کاربر به همراه مشخصات ذرات تولید شده هستند.

$$G''(\omega) = \sum_{i=1}^n G_i \omega \frac{\frac{1}{\lambda_i}}{\omega^2 + \frac{1}{\lambda_i^2}} = \sum_{i=1}^n \frac{G_i \omega \lambda_i}{\omega^2 \lambda_i^2 + 1} \quad (15)$$

۳.۳. تعیین سری پرونی نمونه ها با استفاده از نتایج آزمایش های

جاروب فرکانس

به منظور برازش سری پرونی به داده های حاصل از آزمایش جاروب فرکانس، ابتدا با استفاده از مقادیر مدول دینامیکی و زاویه فاز اندازه گیری شده، در هر دما و فرکانس مشخص مقادیر $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ محاسبه شدند. سپس با در نظر گرفتن تعداد مشخصی المان برای مدل ماکسول (n)، مقادیر G_i و λ_i به نحوی تعیین شدند که مقادیر $G'(\omega)$ و $G''(\omega)$ محاسبه شده با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۵)، دارای کمترین اختلاف با مقادیر به دست آمده از نتایج آزمایش جاروب فرکانس باشند. برای تعیین مقادیر G_i و λ_i سری های پرونی، از افزونه Solver نرم افزار Excel و رویکرد کمینه مجموع مربعات خطا استفاده شد.

دماهای مرجع برای تعیین سری پرونی نمونه ها برابر با ۰°C و ۱۵°C در نظر گرفته شد. به منظور تعیین تعداد المان های سری پرونی در دماهای مرجع مورد نظر، برای تعدادی از نمونه ها سری هایی با تعداد ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۸ و ۲۰ المان به دست آورده شد و دقت سری ها در مطابقت با نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر مبنای مقایسه دقت سری ها، مشاهده شد که افزایش تعداد المان ها برای دمای مرجع ۰°C از تعداد ۱۵ به بعد، و برای دمای مرجع ۱۵°C از ۱۲ به بعد تأثیر محسوسی در افزایش دقت سری پرونی در مطابقت با نتایج آزمایشگاهی ندارد. بنابراین، در پژوهش جاری برای دماهای مرجع ۰°C و ۱۵°C به ترتیب تعداد ۱۵ و ۱۲ المان برای سری های پرونی نمونه ها در نظر گرفته شد. سری پرونی متناظر با یک رفتار ویسکوالاستیک، یکتا نیست و حتی برای تعداد مشخص از المان ها، سری های پرونی متعددی با ترکیب های متفاوت G_i و λ_i وجود دارد که رفتار مورد نظر را توصیف می کنند. جداول ۴ و ۵ ضرایب سری های پرونی نمونه های قیر و ماستیک را به ترتیب در دماهای مرجع ۱۵°C و ۰°C نشان می دهند.

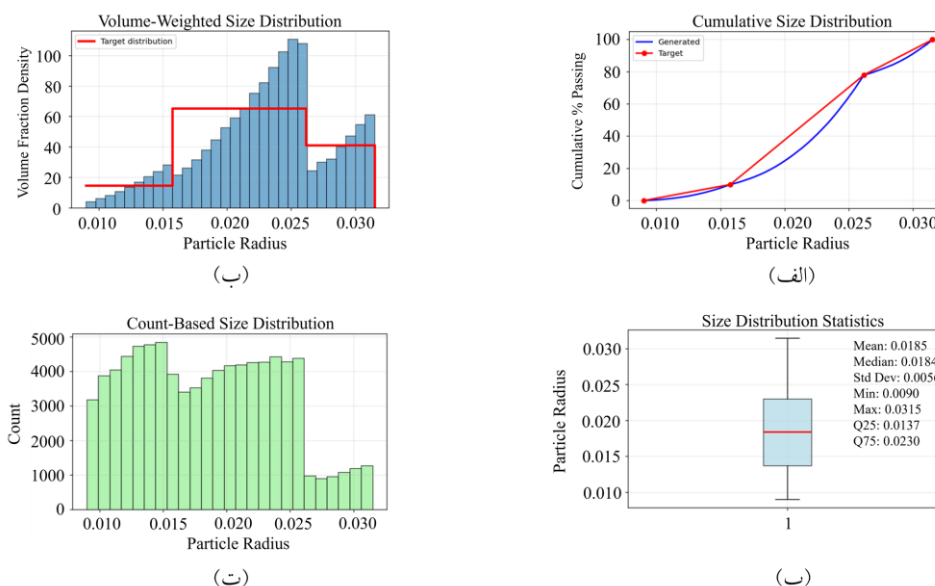


Fig. 3. (a) Particle size distribution (based on particle radius); (b) particle volume distribution based on particle radius; (c) statistical parameters of the particle radius distribution; and (d) particle number distribution based on particle radius
 شکل ۳. نمودار (الف) دانه‌بندی (بر مبنای شعاع ذرات)؛ (ب) توزیع حجمی ذرات بر اساس شعاع ذرات؛ (پ) پارامترهای آماری توزیع شعاع ذرات؛ و (ت) توزیع تعداد ذرات بر اساس شعاع ذرات

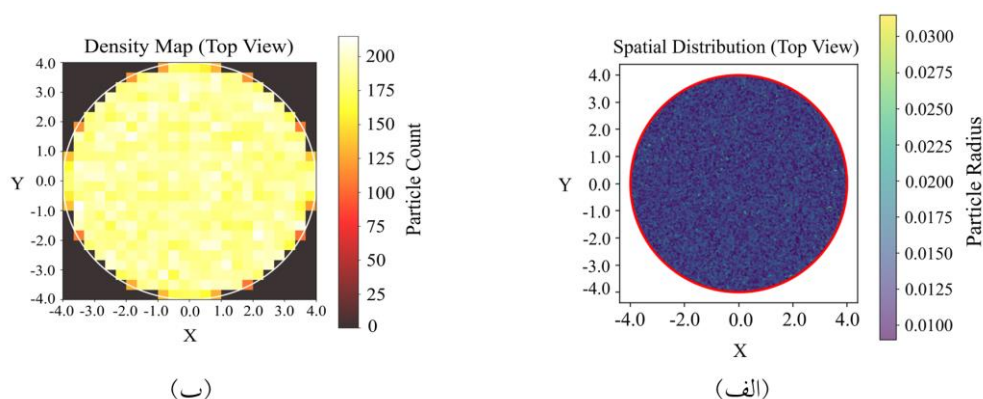


Fig. 4. (a) Spatial distribution of particles in the sample based on particle radius; and (b) particle number distribution in the sample

شکل ۴. (الف) توزیع فضایی ذرات در نمونه بر اساس شعاع و (ب) توزیع تعداد ذرات در نمونه

در آن برابر ۴۰۲ است. خروجی‌های تصویری نرم‌افزار را می‌توان به چهار دسته؛ نمودارهای دانه‌بندی و توزیع ذرات بر اساس شعاع ذرات (شکل ۳)، شکل‌های تراکم ذرات در فضای نمونه (شکل ۴)، نمودارهای توزیع شعاعی و ارتفاعی ذرات در فضای نمونه (شکل ۵)، و شکل‌هایی از ذرات در فضای نمونه (شکل ۶) و یک پویانمایی از نحوه و توالی تولید و چینش ذرات در فضای نمونه تقسیم نمود.

روش‌های عددی در مهندسی

(۱) در توسعه این نرم‌افزار، سعی شد خروجی‌های تصویری آن به‌گونه‌ای طراحی شوند که درک جامعی از ویژگی‌های هندسی و نحوه توزیع ذرات تولیدشده در فضای نمونه فراهم کنند. شکل‌های ۳ تا ۶ یک نمونه از خروجی‌های تصویری نرم‌افزار را برای یک نمونه استوانه‌ای دارای شعاع ۴ و ارتفاع ۲ با ۲۸٪ پُرشدگی نشان می‌دهند که نسبت اندازه بزرگترین ذره به کوچکترین ذره

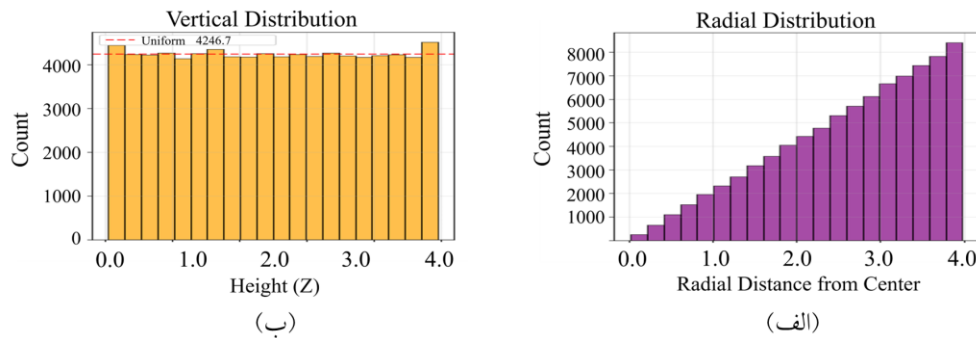


Fig. 5. (a) Radial distribution of particles in the sample and (b) Vertical distribution of particles in the sample
شکل ۵. نمودارهای (الف) توزیع شعاعی ذرات در نمونه و (ب) توزیع ارتفاعی ذرات در نمونه

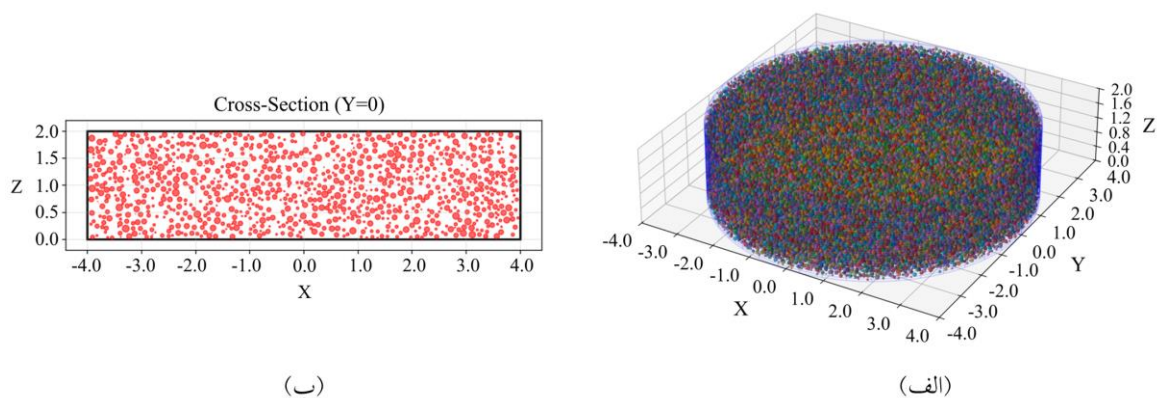


Fig. 6. (a) Particles distributed within the sample and (b) particle distribution in a vertical cross-section of the sample
شکل ۶. (الف) ذرات توزیع شده در نمونه و (ب) توزیع ذرات در یک مقطع عمودی نمونه

در بازه اندازه مورد نظر تولید را می‌کند. ابتدا یک نقطه تصادفی در فضای نمونه تولید شده و سپس یک شعاع تصادفی در بازه اندازه مربوطه به آن اختصاص داده می‌شود. با اعمال محدودیت‌هایی روی مختصات تصادفی مطابق با روابط (۱۶) و (۱۷)، از قرار گرفتن حجم ذره تولیدشده در داخل فضای نمونه اطمینان حاصل می‌شود:

$$-(R - r - d) < x, y < R - r - d \quad (16)$$

$$r + d < z < H - (r + d) \quad (17)$$

x و y و z ، مختصات مرکز ذره؛ R و r به ترتیب شعاع نمونه و شعاع ذره؛ و d حداقل فاصله ذرات تا سطوح نمونه (می‌تواند صفر باشد) هستند.

پس از تولید مختصات تصادفی هر ذره، با در نظر گرفتن یک مش‌بندی^{۲۲} فضایی حول مختصات مرکز ذرات، هم‌پوشانی ذره تولیدشده فقط با ذرات اطراف آن کنترل

اساس کار نرم‌افزار توسعه داده شده به صورت زیر است:

(۱) تعیین حجم مورد نیاز بر اساس بازه‌بندی اندازه ذرات بر مبنای دانه‌بندی ورودی

ابتدا با توجه به دانه‌بندی و بزرگترین و کوچکترین اندازه وارد شده برای ذرات و همچنین با در نظر گرفتن ابعاد وارد شده برای نمونه، حجم مورد نیاز از ذرات دارای اندازه میان هر دو اندازه کنترلی متوالی در دانه‌بندی وارد شده، تعیین می‌شود. برای مثال، در صورتی که درصدی عبوری از دو الک یا اندازه کنترلی متوالی با اندازه‌های A و B ($A > B$) به ترتیب برابر با $a\%$ و $b\%$ باشد، $(a - b)\%$ از حجم کل ذرات باید شامل ذراتی دارای اندازه‌ای در بازه $[B, A]$ باشد.

(۲) تولید مختصات سه‌بعدی ذرات

برای تولید مختصات ذرات، دو تابع تعریف شده است؛ یکی مختصات تصادفی مراکز ذرات و دیگری شعاعی تصادفی

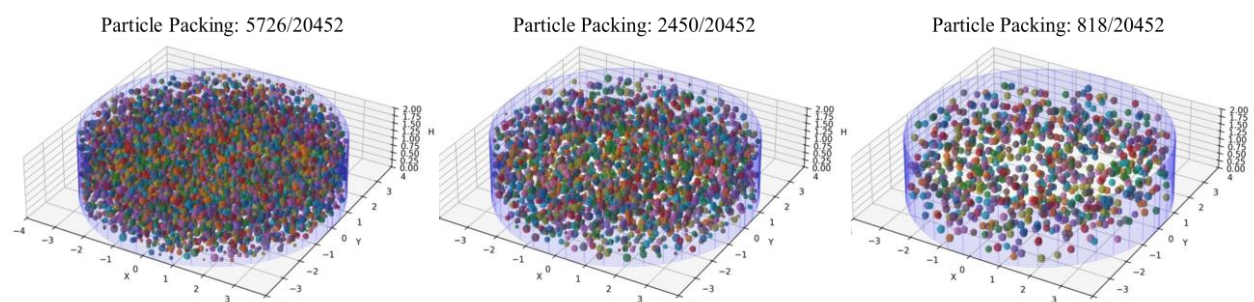


Fig. 7. An example of the particle generation process and filling the sample volume with the generated particles

شکل ۷. نمونه‌ای از روند تولید ذرات و پرکردن فضای نمونه به وسیله ذرات تولیدشده

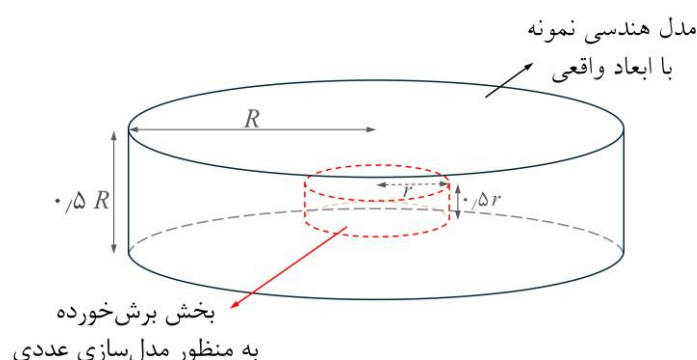


Fig. 8. Geometric cutting procedure for the two-phase mastic models

شکل ۸. نحوه برش هندسی مدل‌های دوفازی ماستیک

کوچکترین اندازه وارد شده برای ذرات و اندازه کنترلی قبل از آن، ادامه می‌یابد. شکل ۷ نمونه‌ای از نحوه چینش و پر کردن فضای نمونه را نشان می‌دهد.

به منظور کاهش حجم محاسبات و زمان فرآیند شبیه‌سازی عددی، برای شبیه‌سازی عددی ماستیک (مدل‌های دوفازی) از مدل‌هایی با ابعاد کاهش داده شده در مقایسه با نمونه‌های واقعی استفاده شد. برای این منظور، ابتدا هندسه مدل‌های استوانه‌ای با ابعاد بزرگتر ایجاد شد و سپس استوانه‌هایی دارای نسبت قطر به ارتفاع یکسان با نمونه واقعی از مرکز آن برش داده شد. ارتفاع بخش‌های برش داده شده به نحوی در نظر گرفته شد که حدود چهار برابر بزرگترین شعاع ذرات سنگدانه در نمونه و مدل باشد. به عبارت دیگر، قسمت برش داده شده به عنوان بخشی از نمونه واقعی در نظر گرفته شد که با اعمال شرایط مرزی و بارگذاری صحیح می‌تواند نشان‌دهنده پاسخ مکانیکی مدل با ابعاد واقعی باشد. شکل ۸ نحوه برش مدل‌های ماستیک را نشان می‌دهد.

می‌شود. همچنین، در صورت وارد کردن حداقل فاصله میان ذرات، داشتن حداقل فاصله مورد نظر با ذرات اطراف نیز کنترل می‌شود. مختصات مرکز و شعاعی مورد قبول واقع می‌شود که با ذرات اطراف هم‌پوشانی نداشته و شرط وجود حداقل فاصله مورد نظر با ذرات اطراف آن (در صورت وجود) برآورده شود. در صورت مورد قبول بودن مختصات و شعاع ذره تولید شده، حجم آن محاسبه می‌شود و به مجموع حجم ذرات در بازه اندازه مورد نظر اضافه می‌گردد. این روند تکرار می‌شود تا جایی که حجم ذرات تولید شده به حجم مورد نیاز بازه مورد نظر برسد.

(۳) تولید هندسه ذرات، با ذرات دارای اندازه بزرگتر شروع می‌شود. یعنی ابتدا ذرات دارای اندازه‌ای میان حداکثر اندازه وارد شده برای ذرات و اندازه کنترلی پس از آن، تولید می‌شوند و به همین ترتیب تا تولید ذرات با اندازه‌ای میان

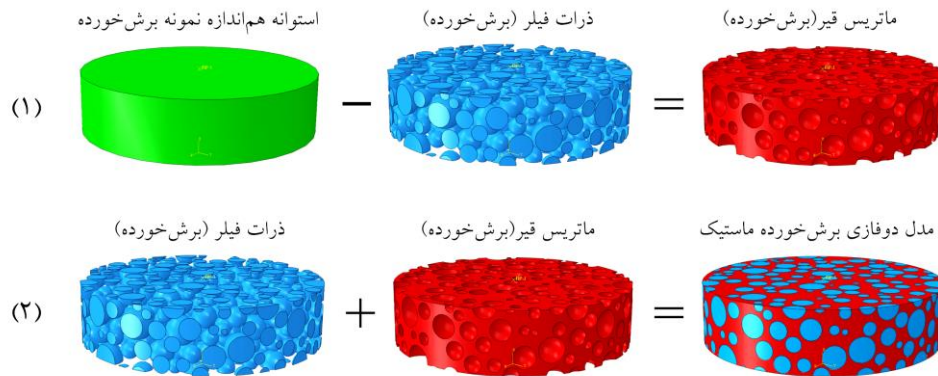


Fig. 9. Two-step generation and assembly of the two-phase mastic numerical model geometry: generation of the asphalt binder matrix by subtracting the particle geometry from a cylinder with the same dimensions as the sample, and addition of the particles to the matrix

شکل ۹. تولید و مونتاژ^{۲۴} هندسه مدل عددی دوفازی ماستیک در دو مرحله شامل تولید ماتریس قیر از طریق تفریق هندسه ذرات از استوانه هم‌اندازه نمونه و سپس اضافه کردن ذرات به ماتریس

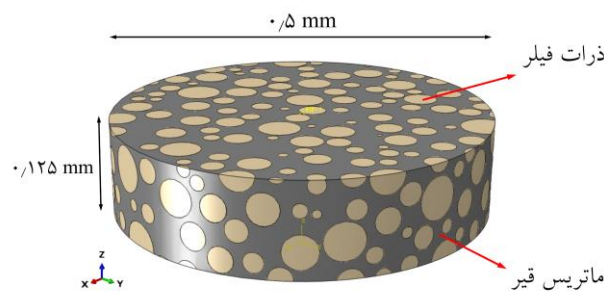


Fig. 10. Geometry of a cutaway mastic model
شکل ۱۰. هندسه یک مدل برش خورده ماستیک

خصوصیات ذرات در پاسخ موضعی و کلی و یا بررسی خصوصیات چسبندگی میان ذرات و ماتریس قیر در پاسخ‌های موضعی و کلی مدل کاربرد آن است. بنابراین، تولید و توسعه هندسه ریزساختار به صورت غیرهمگن برای نیل به اهداف برشمرده ضروری بوده و در این پژوهش مدلسازی با هندسه همگن یا روش‌های همگن‌سازی مدل‌ها در نظر گرفته نشده است.

۲.۱.۴. مشخصات مواد

رفتار قیر در مدل‌های تک‌فازی قیر و در مدل‌های دوفازی ماستیک به صورت ویسکوالاستیک خطی و بر مبنای سری پرونی به‌دست‌آورده‌شده از آزمایش جاروب فرکانس مدل شد. برای

برای ایجاد هندسه ماتریس قیری در اطراف ذرات فیلر موجود در ماستیک، از عملگر بولی^{۲۳} مطابق با شکل ۹ استفاده شد. شکل ۱۰ هندسه یک مدل دوفازی برش‌خورده ماستیک را نشان می‌دهد.

پاسخ‌های کلی نمونه‌های ماستیک به بارگذاری با مدلسازی همگن و یا استفاده از روش‌های همگن‌سازی، می‌تواند با هزینه محاسباتی بسیار کمتر در مقایسه با مدلسازی ناهمگن قابل دستیابی باشد. هدف از تولید تصادفی ساختار هندسی داخلی ماستیک به صورت غیرهمگن و بررسی پاسخ کلی مدل به بارگذاری، ایجاد بستری برای نشان‌دادن کارایی مدل در ارزیابی قابل‌اتکابودن پاسخ‌های موضعی آن است. به عنوان مثال؛ تمرکز تنش، بررسی نواحی رشد ترک، بررسی تأثیر مستقیم مدول و

پرداخته باشند، محدود هستند. در بسیاری از پژوهش‌های گذشته مقدار ضریب پواسون ثابت و برابر با مقداری در بازه ۰٫۳ تا ۰٫۵ فرض شده است [۲۴-۲۷]. با این حال، نتایج پژوهش‌هایی که به اندازه‌گیری مستقیم ضریب پواسون قیر یا مصالح قیری پرداخته‌اند، نشان می‌دهند که ضریب پواسون قیر در دماهای بالای °C ۰٫۴۵ بزرگتر از ۰٫۴۵ داشته و با افزایش دما و کاهش فرکانس افزایش می‌یابد و به مقدار ۰٫۵ نزدیک و تثبیت می‌شود [۱۵، ۲۳، ۲۵ و ۲۸]. برخی از پژوهش‌های انجام‌پذیرفته، روابطی تجربی به منظور تخمین ضریب پواسون مختلط قیر یا مواد قیری در یک دما و فرکانس و بر اساس مدول مختلط پیشنهاد داده‌اند [۱۵، ۲۳ و ۲۸]، اما روابط پیشنهادشده بر مبنای فرض‌های ساده‌انگارنده و مقادیر خاصی از ضریب پواسون به ازای دماها و فرکانس‌های خیلی پایین یا خیلی بالا هستند.

در مدل‌های همگن و تک‌فازی قیر، با توجه به اینکه مدول یانگ نمونه‌های قیر از روی نتایج آزمایش نمونه تحت برش و بر مبنای رابطه (۳۰) تخمین زده شده است، نتایج مدل‌سازی مستقل از ضریب پواسون قیر است. با تغییر ضریب پواسون قیر، مقدار مدول یانگ متناظر که با استفاده از مدول برشی و رابطه (۲۰) برآورد شده و وارد نرم‌افزار می‌شود، تغییر می‌کند و از طرف دیگر، نرم‌افزار به طور معکوس دوباره بر مبنای ضریب پواسون ماده و مدول یانگ آن، مدول برشی را تخمین می‌زند. بنابراین، در مدل‌های تک‌فازی قیر، مقدار مدول برشی در فرکانس و دمای مورد نظر با استفاده از سری پرونی و مطابق با رابطه (۱۹) تعیین می‌شود و بر مبنای یک ضریب پواسون فرضی، مقدار مدول یانگ نمونه به دست آمده و وارد نرم‌افزار می‌گردد. با توجه به این‌که نتایج مدل‌سازی‌های عددی مدل‌های تک‌فازی قیر مستقل از ضریب پواسون هستند، مقدار ضریب پواسون ۰٫۴۵ برای همه نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

در مدل‌های دوفازی ماستیک، به دلیل برهم‌کنش میان ذرات فیلر و قیر، نتایج مدل‌سازی به ضریب پواسون قیر وابسته است [۲۴]. ضرایب پواسون قیر در مدل‌های دوفازی بر مبنای مطالعات پیشین و با مرور ادبیات فنی تعیین گردید [۲۳، ۲۵ و ۲۸]. جدول ۶

روش‌های عددی در مهندسی

تعریف سری پرونی در نرم‌افزار آباکوس، ابتدا باید ضرایب مدول سری پرونی نرمال شوند. برای این منظور، در صورتی که G_0 ، G_1 ، ... و G_n ضرایب مدول و λ_1 ، λ_2 ، ... و λ_n ضرایب زمان رهاش سری پرونی مورد نظر باشند، ضرایب مدول نرمال‌شده، g_i ، با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شوند. مجموع ضرایب مدول نرمال‌شده، یعنی $\sum g_i$ ، باید کمتر از ۱ باشد. در نهایت، ضرایبی که وارد نرم‌افزار می‌شوند، g_i و λ_i خواهند بود.

$$g_i = \frac{G_i}{\sum_{j=0}^n G_j}, \quad 1 \leq i \leq n \quad (18)$$

با توجه به اینکه آزمایش‌های جاروب فرکانس با دستگاه DSR در مد برشی انجام می‌پذیرد، مدول یانگ^{۲۵} قیر با استفاده از ضرایب سری پرونی و ضریب پواسون^{۲۶} قیر تخمین زده شد. همانطور که در رابطه (۱۹) نشان داده شده است، مدول برشی قیر در دما و فرکانس بارگذاری مورد نظر برابر با مجموع ضرایب مدول سری پرونی در نظر گرفته می‌شود. سپس، بر مبنای رابطه الاستیک میان مدول برشی و مدول یانگ و ضریب پواسون، مدول یانگ قیر در دما و فرکانس مورد نظر طبق رابطه (۲۰) تخمین زده می‌شود.

$$G = \sum_{i=0}^n G_i \quad (19)$$

$$E = (1 + \nu) G \quad (20)$$

G : مدول برشی در دما و فرکانس مورد نظر؛ E : مدول یانگ در دما و فرکانس مورد نظر؛ ν : ضریب پواسون در دما و فرکانس مورد نظر هستند.

وقتی ماده دارای رفتار ویسکوالاستیک باشد، رابطه (۲۰) در یک دما و فرکانس بارگذاری مشخص می‌تواند تخمینی از رابطه مدول برشی و یانگ ماده باشد. در این صورت، ضریب پواسون مورد استفاده در رابطه (۲۰) علاوه بر دما به فرکانس بارگذاری هم وابسته است و به عنوان ضریب پواسون مختلط^{۲۷} (ν^*) در نظر گرفته می‌شود [۲۳-۲۵].

یک موضوع مهم در مدل‌سازی‌های دوفازی یا چندفازی شبیه به پژوهش جاری، تعیین مقدار ضریب پواسون فاز قیر یا فاز ماتریس قیری است. با مرور ادبیات فنی مشخص شد که پژوهش‌های منتشرشده‌ای که به بررسی و اندازه‌گیری ضریب پواسون قیر یا ماتریس قیری بر پایه انجام آزمایش‌های تجربی

جدول ۶. ضرایب پواسون قیر در مدلسازی‌های عددی

Table 6. Poisson's ratios of the asphalt binders used in the numerical modeling

نمونه	دما (°C)	فرکانس (Hz)	ضریب پواسون
قیر تازه	۰	۱/۵۹	۰/۴۸۱
		۱۰	۰/۴۷۴
		۱/۵۹	۰/۴۸۸
	۱۵	۱۰	۰/۴۸۲
		۱/۵۹	۰/۴۶۳
قیر پیرشده	۰	۱۰	۰/۴۵۹
		۱/۵۹	۰/۴۶۹
	۱۵	۱۰	۰/۴۶۴
		۱/۵۹	۰/۴۶۴

با تابع سینوسی به مدل‌ها وارد شد. هر مدل دو بار تحت بارگذاری قرار داده شد، یک بار با فرکانس 10 rad/s (1059 Hz) و یک بار با فرکانس 6028 rad/s (10 Hz) که هر کدام به ترتیب با 63 و 100 نقطه در هر سیکل (متناظر با فواصل زمانی به ترتیب 0.01 s و 0.001 s) تعریف شدند. فرکانس 10 rad/s ، فرکانس استاندارد در بسیاری از آزمایش‌های تعیین رده و خصوصیات مکانیکی قیر و آسفالت است و معمولاً هم‌ارز با عبور بار وسایل نقلیه با سرعت حدود 90 km/h از روی روسازی در نظر گرفته می‌شود. به منظور رسیدن پاسخ مدل به شرایط پایدار^{۳۰}، به ازای هر فرکانس تعداد پنج سیکل بارگذاری به هر مدل اعمال شد. شکل ۱۱ نمودار بارگذاری‌های اعمال‌شده به مدل‌ها و شکل ۱۲ مثالی از مدل‌های دوفازی ماستیک و مدل‌های تک‌فازی قیر را به همراه بارگذاری و شرایط مرزی نشان می‌دهند.

۴.۱.۴. قیدهای داخلی^{۳۱}

در هر دو نوع مدل‌های تک‌فازی قیر و دوفازی ماستیک، نقطه مرجع در نظر گرفته شده روی مرکز سطح بالایی به صورت صلب به سطح بالایی مدل متصل شد (شبه صفحه بالایی دستگاه DSR). با توجه به اعمال بارگذاری کرنشی به نقطه مرجع، با اتصال صلب آن به سطح بالایی مدل می‌توان انتظار داشت که

مقادیر ضریب پواسون در نظر گرفته شده برای فاز قیر در مدل‌های دوفازی ماستیک را نشان می‌دهد.

رفتار ذرات فیلر در مدل‌های عددی به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه سختی و مدول ذرات فیلر در مقایسه با قیر بسیار بیشتر است، ذرات فیلر در مدل‌های عددی رفتاری نزدیک به رفتار جسم صلب خواهند داشت. مدول الاستیک ذرات فیلر در مدل‌های عددی برابر با $55,000 \text{ MPa}$ و ضریب پواسون آن برابر با 0.15 در نظر گرفته شد [۸، ۱۰ و ۲۹].

۳.۱.۴. شرایط مرزی و بارگذاری

در مطابقت با نزدیک‌ترین شرایط تکیه‌گاهی به آزمایش DSR، سطح پایین مدل‌ها به صورت گیردار مقید شدند. شرایط گیردار بودن سطح زیرین نمونه در آزمایش DSR با این فرض است که نمونه به طور کامل به صفحه پائینی دستگاه می‌چسبد و درجات آزادی سطح زیرین آن برابر با صفر است. بنابراین، نیروها و لنگر پیچشی تکیه‌گاهی سطح زیرین نمونه هنگام آزمایش به مقاطع افقی آن منتقل می‌شود.

بارگذاری مدل به صورت یک شرط مرزی^{۲۸} تعریف شد. برای این منظور، یک نقطه مرجع^{۲۹} روی مرکز سطح بالایی مدل‌ها ایجاد شد و با مقید کردن نقطه مرجع به سطح بالایی نمونه، بارگذاری به صورت یک شرط مرزی به نقطه مرجع اعمال شد. برای اعمال کرنش مد نظر به مدل، بارگذاری به صورت تغییر شکل زاویه‌ای و

روش‌های عددی در مهندسی

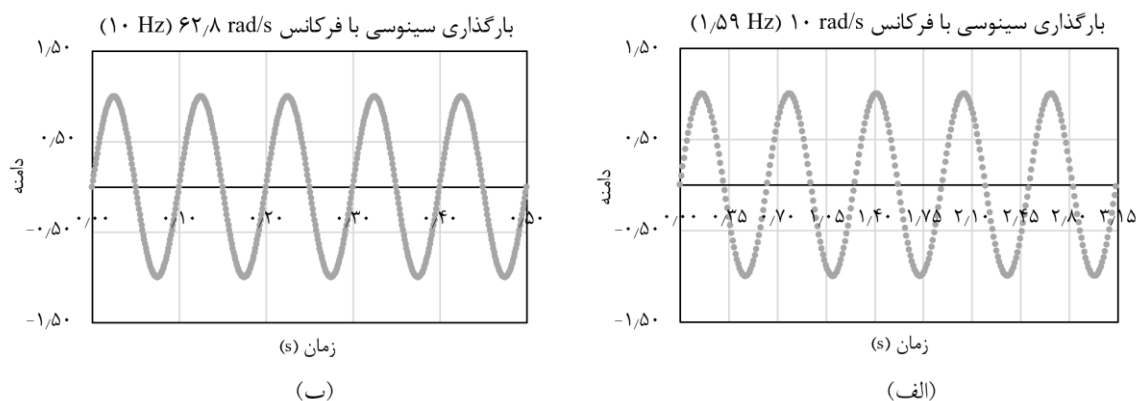


Fig. 11. Five loading cycles applied to the models: (a) frequency of 10 rad/s with 63 points defined per cycle and (b) frequency of 62.8 rad/s with 100 points defined per cycle

شکل ۱۱. پنج سیکل بارگذاری اعمال شده به مدل‌ها الف) فرکانس ۱۰ rad/s با تعریف ۶۳ نقطه در هر سیکل و ب) فرکانس ۶۲.۸ rad/s با تعریف ۱۰۰ نقطه در هر سیکل

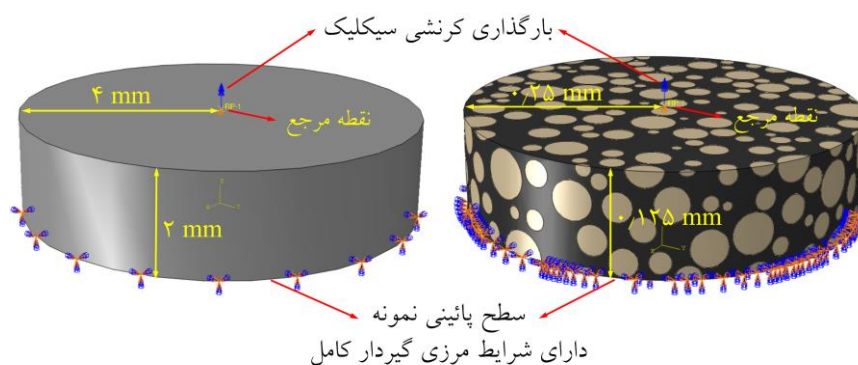


Fig. 12. Examples of two-phase mastic and single-phase asphalt binder models with applied boundary conditions and loading

شکل ۱۲. مثالی از مدل‌های دوفازی ماستیک و تک‌فازی قیر با شرایط مرزی و بارگذاری

۵.۱.۴. نوع المان‌ها و مش‌بندی

برای مدل‌های تک‌فازی قیر از المان‌های چهاروجهی^{۳۳} درجه دوم دارای ۱۰ گره (C3D10) استفاده شد. اندازه المان‌های مدل‌های قیر از مقدار ۰.۴ mm (یک پنجم کوچکترین بعد نمونه) به مقادیر کوچکتر از آن تغییر داده شد تا جایی که کاهش اندازه المان‌ها تغییری در نتایج مدل‌سازی ایجاد نکند. در نهایت، اندازه المان‌ها در مدل‌های تک‌فازی قیر در حدود ۰.۱۵ mm در نظر گرفته شد که منجر به ایجاد حدود ۱۷۰,۰۰۰ تا ۲۲۰,۰۰۰ المان در مدل گردید.

در مدل‌های دوفازی ماستیک، برای ماتریس قیر از المان‌های چهاروجهی درجه دوم^{۳۴} دارای ۱۰ گره (C3D10) و برای ذرات

بارگذاری کرنشی اعمال شده به نقطه مرجع به صورت کامل به سطح بالای مدل منتقل و اعمال می‌شود.

همچنین، در مدل‌های دوفازی ماستیک، اتصال ذرات فیلر به ماتریس قیر به صورت مقید کامل^{۳۲} در نظر گرفته شد. چنین قیدی فرض می‌کند که ذرات فیلر چسبندگی کاملی با قیر برقرار کرده‌اند و تغییر شکل‌های ماتریس قیر در سطوح اتصال ذرات فیلر به قیر، از تغییر شکل ذرات فیلر تبعیت می‌کند. با توجه به استفاده از فیلر تازه در ساخت نمونه‌های ماستیک، فرض اتصال کامل میان ذرات فیلر و ماتریس قیر قابل قبول به نظر می‌رسد و علاوه بر پژوهش‌های پیشین [۳۰-۳۲]، نتایج مدل‌سازی‌ها نیز آن را تأیید می‌کنند.

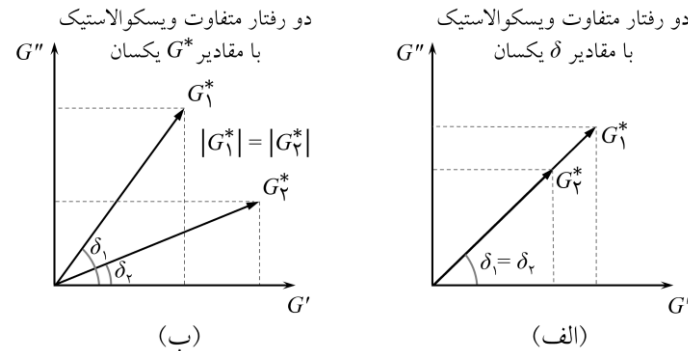


Fig. 13. Different linear viscoelastic behaviors with (a) identical δ values and (b) identical G^* values

شکل ۱۳. رفتارهای متفاوت ویسکوالاستیک خطی با (الف) مقادیر δ یکسان و (ب) مقادیر G^* یکسان

انجام پذیرفت. برای اطمینان از صحت مدلسازی عددی، ارزیابی هم‌زمان هر دو پارامتر G^* و δ ضروری است و بررسی هر یک به تنهایی نمی‌تواند معیار قابل‌اتکایی برای سنجش عملکرد مدل عددی باشد. به بیان دیگر، انطباق مقادیر تنها یکی از این دو پارامتر در نتایج حاصل از مدلسازی عددی و آزمایش، لزوماً به معنای توانایی مدل در شبیه‌سازی صحیح رفتار ویسکوالاستیک نمونه نخواهد بود. این موضوع در شکل ۱۳ روشن شده است.

۲.۲.۴. خروجی گرفتن از مدلسازی‌های عددی

برای گرفتن خروجی از مدل‌های همگن تک‌فازی قیر، مقدار G^* با تقسیم بیشینه تنش برشی (S13 یا S23) بر حداکثر کرنش متناظر با تغییر شکل زاویه‌ای اعمال‌شده به مدل (E13 یا E23) محاسبه شدند. با توجه به تقارن مدل‌های همگن قیر، مقادیر S13 با S23 و E13 با E23 برابر هستند. برای محاسبه مقادیر زاویه فاز مدل‌های تک‌فازی قیر، فاصله تأخیر زمانی میان پاسخ تنش حداکثر مدل، یعنی بیشینه S13، و مقدار کرنش حداکثر مدل، یعنی E13، برای سیکل آخر بارگذاری تعیین شد. سپس با استفاده از رابطه (۲۱) مقدار زاویه فاز محاسبه گردید (شکل ۲).

$$\delta = \omega \cdot \Delta t \quad (21)$$

δ : زاویه فاز، ω : فرکانس بارگذاری، rad/s و Δt : تأخیر زمانی میان بارگذاری (کرنش) و پاسخ (تنش) هستند. در مدل‌های دوفازی ماستیک، با توجه به وجود تمرکز تنش در محل تماس ذرات فیلر و قیر، روند استخراج و محاسبه مقادیر

فیلر از المان‌های چهاروجهی خطی دارای ۴ گره (C3D4) استفاده شد. با توجه به اینکه رفتار ذرات فیلر به صورت الاستیک خطی مدل شده است، المان‌های خطی ۴ گره‌ای به خوبی رفتار ذرات را توصیف می‌کنند و به نظر می‌رسد نیازی به استفاده از المان‌های دارای درجات بالاتر و افزایش حجم محاسبات مدلسازی نیست. اندازه المان‌ها در مدل‌های ماستیک، در حدود یک چهارم قطر کوچکترین ذرات فیلر در نظر گرفته شد. تعداد کل المان‌های مدل‌های دوفازی ماستیک، بسته به اندازه المان‌های فاز فیلر و فاز ماستیک در حدود ۸۰۰,۰۰۰ تا ۱,۰۰۰,۰۰۰ به دست آمد. یک خطای متداول در شبکه‌بندی مدل‌های سه‌بعدی با استفاده از المان‌های چهاروجهی، خطای ایجاد المان‌های دارای حجم نزدیک به صفر^{۳۵} است. این خطا زمانی بروز می‌کند که چهار رأس یک یا چند المان به طور تقریبی در یک صفحه واقع شوند. برای رفع این خطا دو راهکار کاهش اندازه المان‌ها و اصلاح هندسه مدل در نواحی که خطا ایجاد می‌کند استفاده شد.

۲.۴. خروجی مدلسازی‌های عددی

۱.۲.۴. معیارهای خروجی جهت صحت‌سنجی مدلسازی‌های

عددی

با توجه به اینکه خروجی آزمایش‌های جاروب فرکانس با DSR مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) هستند و رفتار مدل‌ها به صورت ویسکوالاستیک خطی در نظر گرفته شده است، ارزیابی صحت مدلسازی‌های عددی با استفاده از همین دو متغیر

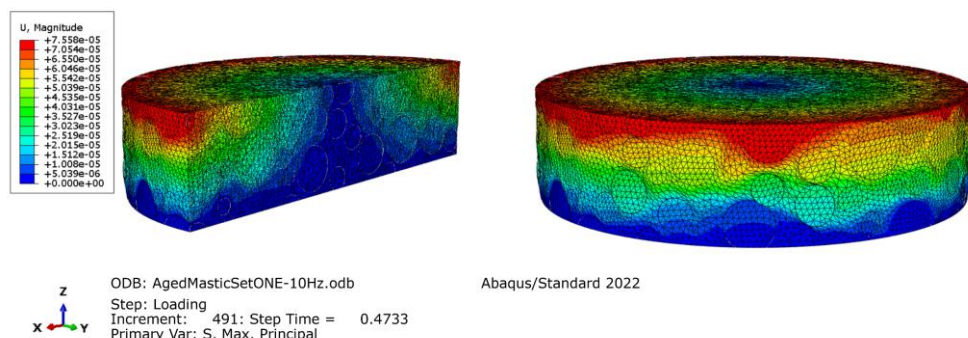


Fig. 14. Magnitude of deformation induced by loading in one of the mastic numerical models at a specific time (0.4733 s) after the start of loading at a frequency of 10 Hz

شکل ۱۴. شدت تغییر شکل ناشی از بارگذاری در یکی از مدل‌های عددی ماستیک و در یک لحظه خاص (۰.۴۷۳۳ ثانیه) پس از شروع بارگذاری با فرکانس ۱۰ Hz

بارگذاری؛ γ_{Max} و γ_{Min} : به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل کرنش برشی در سیکل آخر بارگذاری هستند. به منظور استخراج مقدار زاویه فاز در مدل‌های دوفازی ماستیک، ابتدا فاصله زمانی میان حداکثر تنش برشی محاسبه شده از رابطه (۲۲)، یعنی $\text{Max}\{\tau_m(t)\}$ ، و حداکثر کرنش برشی محاسبه شده از روی بارگذاری اعمال شده به مدل، یعنی γ_{Max} ، در سیکل آخر بارگذاری تعیین شده و سپس با استفاده از رابطه (۲۱) مقدار زاویه فاز محاسبه می‌شود.

در مدل‌سازی‌های انجام پذیرفته در این پژوهش، مقادیر پاسخ مدل‌ها حداکثر از سیکل چهارم به بعد به حالت پایدار رسیدند. به همین دلیل، جهت اطمینان از پایدار بودن پاسخ مدل، برای استخراج مقادیر مدول و زاویه فاز از مقادیر پاسخ مدل در سیکل آخر بارگذاری استفاده گردید.

۵. نتایج و بحث

به عنوان مثال‌هایی از خروجی بصری مدل‌سازی‌های انجام شده، شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ترتیب شدت تغییر شکل ایجاد شده در یکی از مدل‌های عددی ماستیک، حداکثر تنش اصلی^{۳۶} ایجاد شده در یکی از مدل‌های قیر و تمرکز تنش در محل اتصال ذرات فیلر و قیر در یکی از مدل‌های ماستیک را در یک لحظه خاص پس از شروع بارگذاری نشان می‌دهند. نحوه تغییر شکل ایجاد شده در

G^* و δ با مدل‌های همگن قیر متفاوت است. برای گرفتن خروجی از مدل‌های دوفازی ماستیک، در هر مدل ابتدا مقادیر لنگر پیچشی ناشی از بارگذاری حول محور z (RM3) و در نقطه مرجع سطح بالایی مدل به تنش برشی تبدیل شد. تنش برشی بیشینه یا کمینه در هر لحظه مشخص با استفاده از لنگر پیچشی و با توجه به ممان اینرسی پیچشی مقطع مدل، مطابق با رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود:

$$\tau_m(t) = \frac{T(t) \cdot r}{J} = \frac{T(t) \cdot r}{\frac{\pi r^4}{2}} = \frac{2T(t)}{\pi r^3} \quad (22)$$

t : زمان؛ $\tau_m(t)$: تنش برشی بیشینه یا کمینه در لحظه t (در سطح محیطی مدل رخ می‌دهد)؛ $T(t)$: لنگر پیچشی حول محور z (RM3) در لحظه t ؛ J : ممان اینرسی پیچشی مقطع مدل (دیسک)؛ r : شعاع مدل هستند.

پس از محاسبه تنش‌های برشی بیشینه طی زمان بارگذاری، با مشخص کردن حداکثر و حداقل تنش‌های برشی محاسبه شده از رابطه (۲۲) برای سیکل آخر بارگذاری و همچنین مقادیر کرنش حداکثر و حداقل ناشی از تغییر شکل زاویه‌ای اعمال شده، مقدار G^* را می‌توان با استفاده از رابطه (۲۳) محاسبه نمود:

$$G^* = \frac{\text{Max}\{\tau_m(t)\} - \text{Min}\{\tau_m(t)\}}{\gamma_{Max} - \gamma_{Min}} \approx \frac{\text{Max}\{\tau_m(t)\}}{\gamma_{Max}} \quad (23)$$

G^* : مقدار مدول دینامیکی برشی؛ $\text{Max}\{\tau_m(t)\}$ و $\text{Min}\{\tau_m(t)\}$: به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل تنش برشی (در سیکل آخر

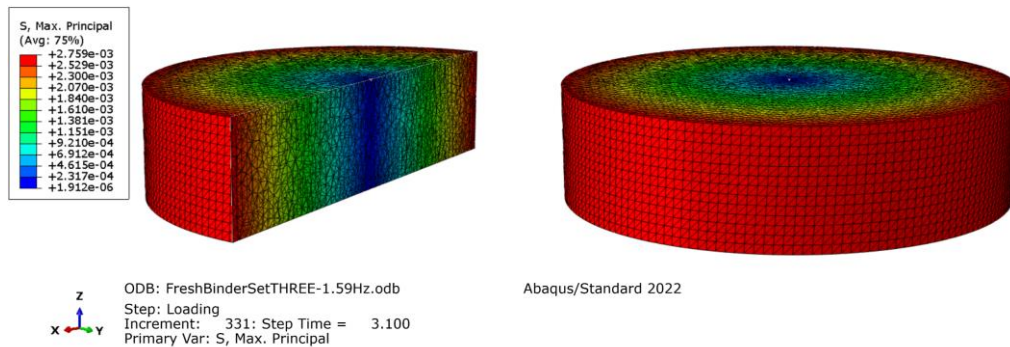


Fig. 15. Magnitude of the principal stress induced by loading in one of the asphalt binder numerical models at a specific time (3.100 s) after the start of loading at a frequency of 1.59 Hz

شکل ۱۵. شدت تنش اصلی ناشی از بارگذاری در یکی از مدل‌های عددی قیر و در یک لحظه خاص (۳٫۱۰۰ ثانیه) پس از شروع بارگذاری با فرکانس ۱٫۵۹ Hz

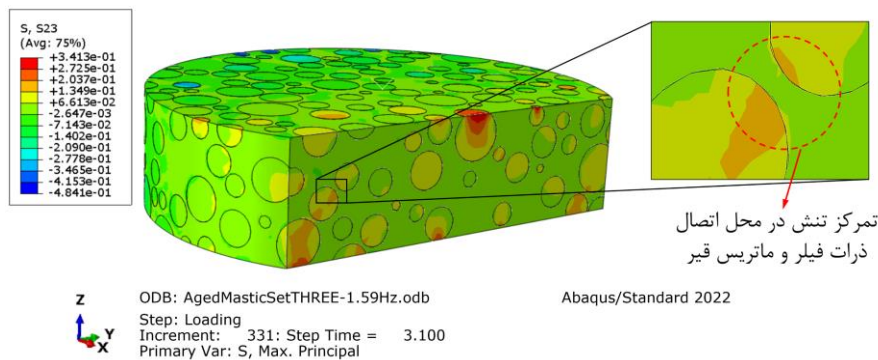


Fig. 16. Stress concentration induced by loading at the interface between filler particles and the asphalt binder matrix in a two-phase mastic model

شکل ۱۶. تمرکز تنش ناشی از بارگذاری در محل اتصال ذرات فیلر و ماتریس قیر در یک مدل دوفازی ماستیک

عملکرد مدل‌سازی‌های عددی در پیش‌بینی پاسخ نمونه‌ها به بارگذاری، با استفاده از دو خصوصیت رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌ها، یعنی مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ)، ارزیابی شد. برای این منظور، پس از استخراج و محاسبه مقادیر G^* و δ برای هر یک از مدل‌سازی‌های انجام‌پذیرفته (به بخش ۲.۲.۴ مراجعه کنید)، اختلاف آن‌ها با مقادیر اندازه‌گیری‌شده از آزمایش محاسبه گردید. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مقادیر G^* حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایش را به همراه درصد‌های خطا به ترتیب برای نمونه‌های قیر و ماستیک نشان می‌دهند.

به منظور بررسی و مقایسه بهتر نتایج مدل‌سازی‌های عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نمودار بزرگی درصد‌های خطای مدل‌سازی‌های عددی در پیش‌بینی

مدل ماستیک نشان‌داده‌شده در شکل ۱۴، مطابق با بارگذاری مدل بوده و ماهیت بارگذاری کرنشی اعمال‌شده به مدل و شرایط مرزی آن را به خوبی نشان می‌دهد. همچنین، نحوه توزیع شدت تنش اصلی در مدل قیر نشان‌داده‌شده در شکل ۱۵، افزایش تنش با افزایش فاصله از مرکز را مطابق با رابطه (۲۲) نشان می‌دهد. به منظور بررسی تأثیر توزیع تصادفی هندسه ذرات در مدل‌های ماستیک، به ازای هر نمونه سه مدل هندسی ساخته شد و مورد بررسی قرار گرفت و میانگین نتایج آن‌ها به عنوان نتیجه مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شد. با این حال، با توجه به اینکه نرم‌افزار توسعه‌داده‌شده اندازه و توزیع ذرات را در بازه اندازه‌های تعیین‌شده به صورت یکنواخت تولید می‌کند، اختلاف نتایج مدل‌سازی‌های مربوط به هر نمونه ناچیز به دست آمد.

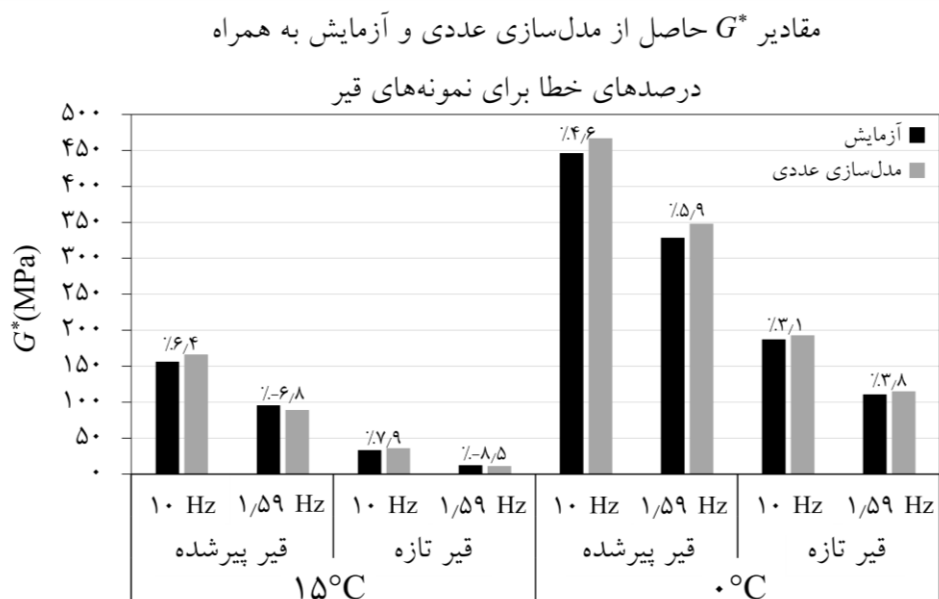


Fig. 17. G^* values obtained from numerical modeling and experimental testing, along with the percentage errors, for the asphalt binder samples

شکل ۱۷. مقادیر G^* حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایش به همراه درصد‌های خطا برای نمونه‌های قیر

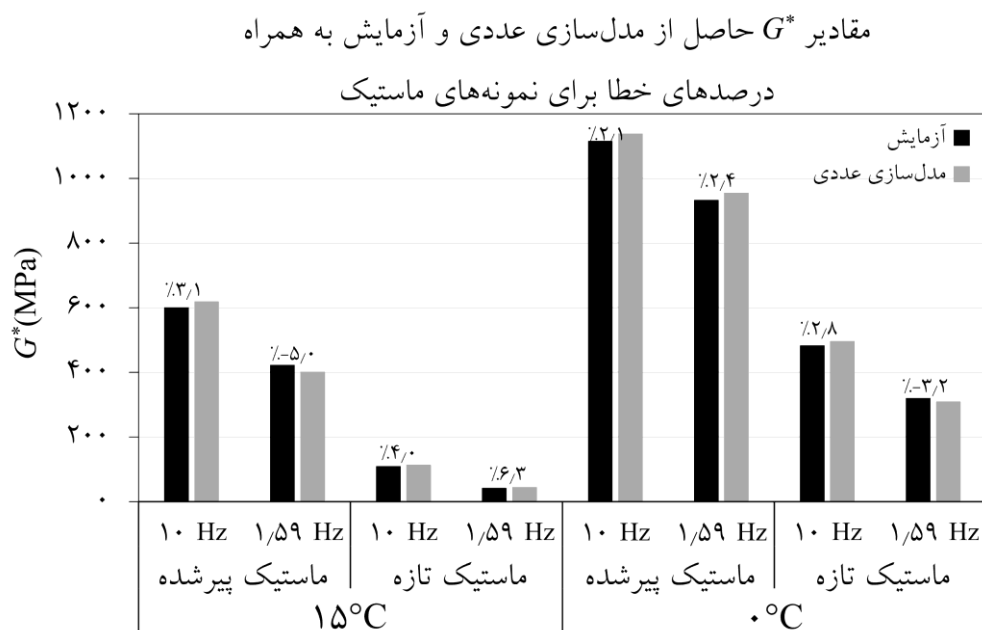


Fig. 18. G^* Values obtained from numerical modeling and experimental testing, along with the percentage errors, for the mastic samples

شکل ۱۸. مقادیر G^* حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایش به همراه درصد‌های خطا برای نمونه‌های ماستیک

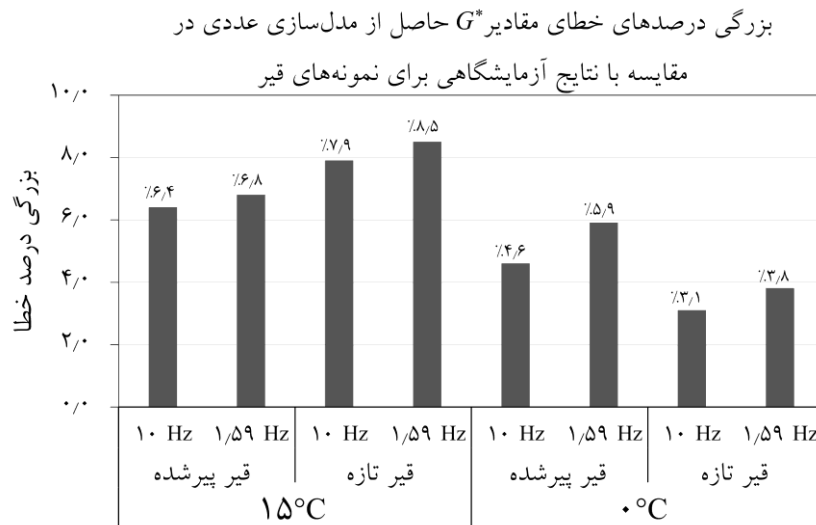


Fig. 19. Percentage errors of the numerical models in predicting the G^* of the asphalt binder samples relative to the experimental results

شکل ۱۹. درصد‌های خطای مدلسازی‌های عددی در پیش‌بینی G^* نمونه‌ها نسبت به نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های قیر

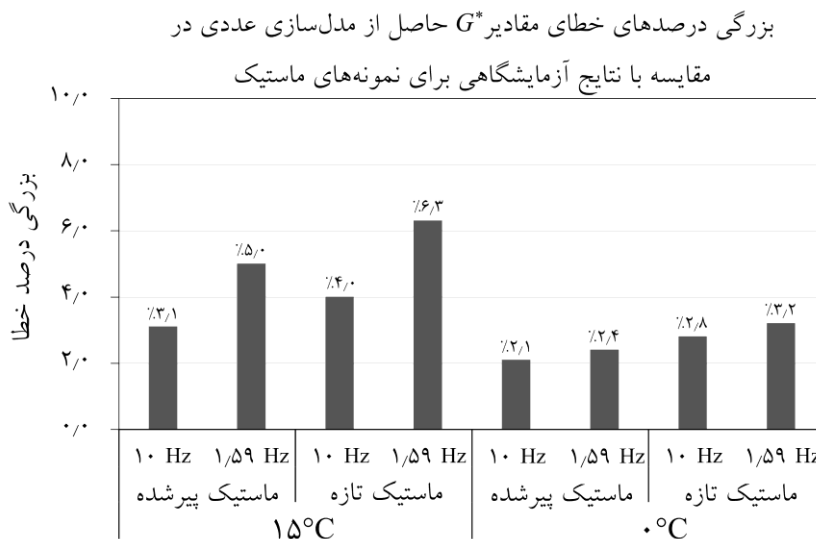


Fig. 20. Percentage errors of the numerical models in predicting the G^* of the mastic samples relative to the experimental results

شکل ۲۰. درصد‌های خطای مدلسازی‌های عددی در پیش‌بینی G^* نمونه‌ها نسبت به نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های ماستیک

دقت بالایی آزمایش‌های DSR را شبیه‌سازی کرده و مقادیر G^* نمونه‌ها را پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین، در تمام مدلسازی‌های انجام‌پذیرفته، با کاهش دما و افزایش فرکانس دقت مدلسازی‌های عددی در پیش‌بینی G^* نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. با توجه به اینکه رفتار قیر و مواد آسفالتی با کاهش دما و

مقادیر G^* نمونه‌ها را به ترتیب برای نمونه‌های قیر و ماستیک نشان می‌دهند.

نمودارهای شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان می‌دهند خطای مدلسازی‌های عددی در پیش‌بینی G^* نمونه‌ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کمتر از ۱۰٪ است و مدلسازی‌های انجام‌پذیرفته با

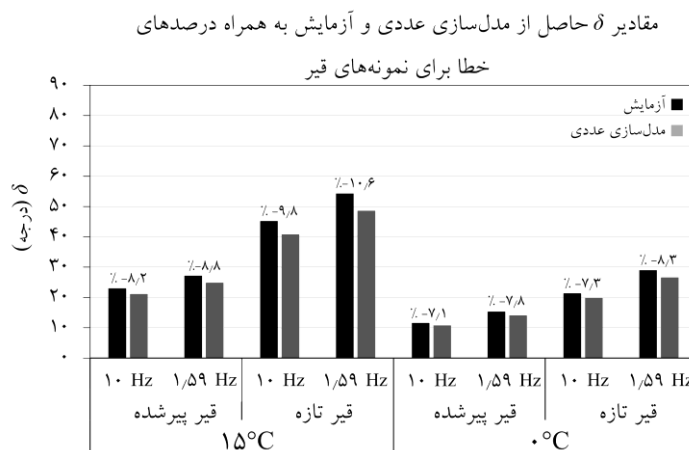


Fig. 21. δ values obtained from numerical modeling and experimental testing, along with the percentage errors, for the asphalt binder samples

شکل ۲۱. مقادیر δ حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایش به همراه درصد‌های خطا برای نمونه‌های قیر



Fig. 22. δ values obtained from numerical modeling and experimental testing, along with the percentage errors, for the mastic samples

شکل ۲۲. مقادیر δ حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایش به همراه درصد‌های خطا برای نمونه‌های ماستیک

۲۳ و ۲۴ نمودار بزرگی درصد‌های خطای مدل‌سازی‌های عددی در پیش‌بینی مقادیر δ نمونه‌ها را به ترتیب برای نمونه‌های قیر و ماستیک نشان می‌دهند.

شبیبه به آنچه در مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با آزمایش برای مقادیر G^* مشاهده شد، نمودارهای شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ نشان می‌دهند با کاهش دما و یا افزایش بارکنس بارگذاری، دقت مدل‌سازی‌های عددی در پیش‌بینی δ برای تمام نمونه‌های بررسی شده افزایش یافته است. بنابراین، می‌توان گفت به طور

یا افزایش فرکانس بارگذاری به سمت رفتار الاستیک متمایل می‌شود، این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که هر چه رفتار نمونه الاستیک‌تر باشد، دقت مدل‌سازی‌ها در پیش‌بینی G^* بیشتر شده است.

شکل‌های ۲۱ و ۲۲ مقادیر δ حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایش را به همراه درصد‌های خطا به ترتیب برای نمونه‌های قیر و ماستیک نشان می‌دهند. همچنین، برای مقایسه بهتر نتایج مدل‌سازی‌های عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، شکل‌های

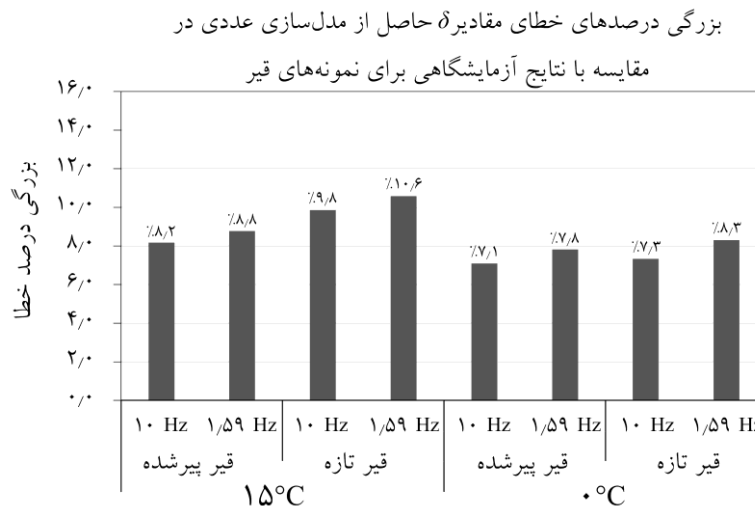


Fig. 23. Percentage errors of the numerical models in predicting δ of the asphalt binder samples relative to the experimental results

شکل ۲۳. درصدهای خطای مدلسازی‌های عددی در پیش‌بینی δ نمونه‌ها نسبت به نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های قیر

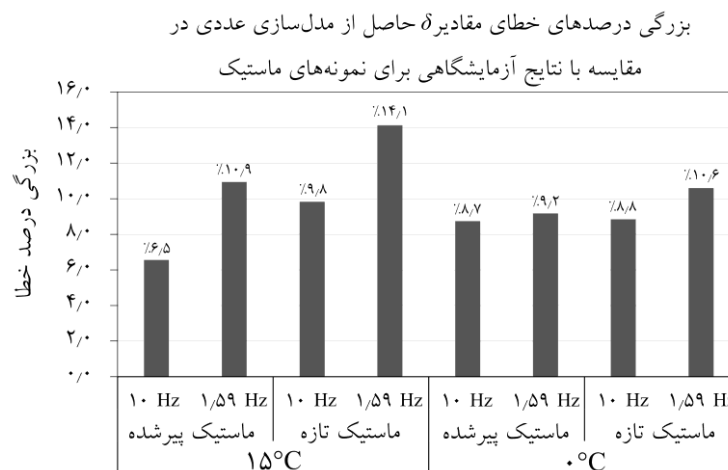


Fig. 24. Percentage errors of the numerical models in predicting δ of the mastic samples relative to the experimental results

شکل ۲۴. درصدهای خطای مدلسازی‌های عددی در پیش‌بینی δ نمونه‌ها نسبت به نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های ماستیک

توسعه داده شده در مقایسه با نمونه‌های واقعی رفتاری الاستیک‌تر از خود نشان داده‌اند. بخشی از این موضوع می‌تواند به چسبندگی کامل ذرات فیلر و ماتریس قیر در مدل‌های عددی مربوط باشد. همانطور که در بخش ۴.۱.۴ مطرح شد، در مدل‌های عددی توسعه داده شده اتصال سطوح ذرات فیلر به ماتریس قیر به صورت کاملاً مقید در نظر گرفته شد، در حالی که در نمونه‌های واقعی ممکن است با توجه به شکل غیر کروی ذرات، جنس و

کلی هرچه رفتار نمونه به رفتار الاستیک کامل نزدیک‌تر باشد (یعنی زاویه فاز به صفر نزدیک‌تر باشد)، مدلسازی‌های عددی توسعه داده شده دقت بالاتری در پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک آن خواهند داشت.

منفی بودن همه مقادیر درصدهای خطا در نمودارهای شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نشان می‌دهد مدلسازی‌های عددی، مقادیر زاویه فاز نمونه‌ها را کمتر از مقادیر حاصل از آزمایش پیش‌بینی کرده‌اند. به عبارت دیگر، می‌توان گفت مدل‌های عددی

پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌ها از طریق مدل‌سازی عددی آزمایش DSR مورد ارزیابی قرار گرفت.

مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد مدل‌سازی‌های عددی انجام‌پذیرفته با استفاده از هندسه‌های تصادفی تولیدشده برای ریز ساختار ماستیک، توانسته‌اند با دقت رضایت‌بخشی رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی را پیش‌بینی نمایند. به طور میانگین، مدل‌سازی‌های عددی مقادیر G^* نمونه‌ها را با دقتی بیش از ۹۵٪ و مقادیر δ آن‌ها را با دقتی بیش از ۹۰٪ پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین، این مقایسه نشان داد شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل‌های عددی دوفازی ماستیک، به عنوان بخشی برش‌خورده از نمونه با ابعاد واقعی، با شرایط واقعی آزمایش جاروب فرکانس تطابق مناسبی داشته و به درستی اعمال شده‌اند.

واژه‌نامه

- | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 1. biphasic | 14. constitutive equation | 26. Poisson's ratio |
| 2. interactions | 15. Boltzmann superposition principle | 27. complex Poisson's ratio |
| 3. mechanical reinforcement | 16. storage modulus | 28. boundary condition |
| 4. tomograph | 17. loss modulus | 29. reference point |
| 5. Dynamic Shear Rheometer | 18. Abaqus | 30. steady |
| 6. extraction | 19. finite element | 31. interactions |
| 7. recovery | 20. Python | 32. tie |
| 8. trichloroethylene | 21. Computer Aided Design | 33. tet |
| 9. rotary evaporator | 22. grid | 34. parabolic |
| 10. loose | 23. Boolean operator | 35. zero_volume_element error |
| 11. generalized Maxwell | 24. assembly | 36. principal |
| 12. Prony series | 25. Young's modulus | |
| 13. relaxation time | | |

بافت سطحی آن‌ها و همچنین خصوصیات شیمیایی قیر و سطح ذرات، اتصال ذرات فیلر به ماتریس قیر به طور کامل مقید نباشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور ساخت مدل‌های عددی از ریزساختار ماستیک، یک نرم‌افزار توسعه داده شد که قادر به تولید هندسه سه‌بعدی تصادفی ذرات بر اساس دانه‌بندی و درصد حجمی دلخواه و همچنین اعمال قیدهایی نظیر حداقل فاصله ذرات با یکدیگر و با دیواره‌های نمونه است. علاوه بر این، خروجی‌های این نرم‌افزار درک روشنی از نحوه توزیع و آرایش ذرات تولیدشده در فضای نمونه را به دست می‌دهند. با استفاده از نرم‌افزار توسعه‌داده‌شده، مدل‌هایی عددی از ریزساختار دو نوع نمونه ماستیک آسفالتی، شامل ماستیک حاوی قیر تازه با ۲۸٪ پرشدگی با ذرات فیلر و ماستیک حاوی قیر پیرشده دارای ۴۴٪ پرشدگی با ذرات فیلر، ساخته شد و دقت و عملکرد آن‌ها در

منابع

1. Roja KL, Chatzigeorgiou G, Meraghni F, Masad E. Experimental investigation and multi-scale Mori-Tanaka modeling of viscoelastic asphalt mastic with imperfect interfaces. *Construction and Building Materials*. 2026;506:144715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.14471>
2. Buttlar WG, Bozkurt D, Al-Khateeb GG, Waldhoff AS. Understanding Asphalt Mastic Behavior Through Micromechanics. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1999 ;1681(1):157–69. <https://doi.org/10.3141/1681-19>
3. N Shashidhar, Shenoy A. On using micromechanical models to describe dynamic mechanical behavior of asphalt mastics. *Mechanics of Materials*. 2002;34(10):657–69. [https://doi.org/10.1016/s0167-6636\(02\)00166-7](https://doi.org/10.1016/s0167-6636(02)00166-7)
4. Wu W, Jiang W, Yuan D, Lu R, Shan J, Xiao J, et al. A review of asphalt-filler interaction: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors. *Construction and Building Materials*. 2021 Sep;299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124279>
5. Faheem AF, Bahia HU. Modelling of Asphalt Mastic in Terms of Filler-Bitumen Interaction. *Road*

- Materials and Pavement Design. 2011 Jan;11(sup1):281–303.
https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690335
6. Clopotel C, Velasquez R, Bahia H. Measuring physico-chemical interaction in mastics using glass transition. Road Materials and Pavement Design. 2012 Jun;13(sup1):304–20.
https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657095
 7. Faheem AF, Wen H, Stephenson L, Bahi, H. Effect of Mineral Filler on Damage Resistance Characteristics of Asphalt Binders. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists- Proceedings of the Technical Sessions. 2008; 77: 885–907.
 8. Kim H, Wagoner MP, Buttlar WG. Numerical fracture analysis on the specimen size dependency of asphalt concrete using a cohesive softening model. Construction and Building Materials. 2009 May;23(5):2112–20.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.014
 9. You T, Abu Al-Rub RK, Darabi MK, Masad EA, Little DN. Three-dimensional microstructural modeling of asphalt concrete using a unified viscoelastic-viscoplastic-viscodamage model. Construction and Building Materials. 2012 Mar;28(1):531–48.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.061
 10. Chen J, Ouyang X, Sun X. Numerical Investigation of Asphalt Concrete Fracture Based on Heterogeneous Structure and Cohesive Zone Model. Applied Sciences. 2022 Nov 3;12(21):11150–0.
https://doi.org/10.3390/app12211150
 11. Hu J, Qian Z. The prediction of adhesive failure between aggregates and asphalt mastic based on aggregate features. Construction and Building Materials. 2018 Sep;183:22–31.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.145
 12. Kim Y, Haft-Javaherian M, Castro LM. Two-Dimensional Virtual Microstructure Generation of Particle-Reinforced Composites. Computing in Civil Engineering. 2016 Jan 1;30(1).
https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000448
 13. Hajikarimi P, Ehsani M, El Haloui Y, Tehrani FF, Absi J, Moghadas Nejad F. Fractional viscoelastic modeling of modified asphalt mastics using response surface method. Construction and Building Materials. 2021 Dec 6;317:125958–8.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125958
 14. Olard F, Di Benedetto H. General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. Road Materials and Pavement Design. 2003 Jan;4(2):185–224.
https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946
 15. Chailleux E, de La Roche C, Piau JM. Modeling of complex modulus of bituminous mixtures measured in tension/compression to estimate secant modulus in indirect tensile test. Materials and Structures. 2010 Sep 5;44(3):641–57. https://doi.org/10.1617/s11527-010-9655-z
 16. Yusoff NI, Mounier D, Marc-Stéphane G, Rosli Hainin Mohd, Airey GD, Di Benedetto H. Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model. Construction and Building Materials. 2013 Jan;38:395–406.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.038
 17. Nguyen QT, Tran BV, Nguyen ML, Hoang TTN, Chailleux E, Bui VP. Relationships between 3D linear viscoelastic properties of bitumen, asphalt mastics and asphalt mixtures using micromechanical models. Construction and Building Materials. 2024 Feb;416:135299.
https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135299
 18. Nguyen QT, Nguyen ML, Benedetto HD, Cédric Sauzéat, Chailleux E, Thanh T. Nonlinearity of bituminous materials for small amplitude cyclic loadings. Road Materials and Pavement Design. 2018 Apr 21;20(7):1571–85.
https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1465452
 19. ASTM International. Standard test methods for quantitative extraction of asphalt binder from asphalt mixtures (ASTM D2172). 2005.
https://doi.org/10.1520/D2172_D2172M-17E01
 20. ASTM International. Standard Practice for Recovery of Asphalt from Solution Using the Rotary Evaporator (ASTM D5404). 2003.
https://doi.org/10.1520/D5404-03
 21. Hajikarimi P, Sadat Hosseini A, Fakhari Tehrani F, Rahi M, Absi J, Moghadas Nejad F. Heterogeneous visco-hyperelastic numerical modelling of crumb rubber-modified asphalt binders. International Journal of Pavement Engineering. 2020 Aug 19;1–12.
https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1808652
 22. Hajikarimi P, Moghadas Nejad F. Applications of Viscoelasticity: Bituminous Materials Characterization and Modeling. Elsevier; 2021.
 23. Di Benedetto H, Delaporte B, Sauzéat C. Three-Dimensional Linear Behavior of Bituminous Materials: Experiments and Modeling. International Journal of Mechanics. 2007 Mar 1;7(2):149–57.
https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2007)7:2(149)
 24. Underwood BS, Kim YR. A four phase micro-mechanical model for asphalt mastic modulus. Mechanics of Materials. 2014 Aug;75:13–33.
https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2014.04.001
 25. Kim YS, Agudo JR, Wistuba MP, Büchner J, Schäffler M. Determination of complex Poisson's ratio of asphalt binders using torsion-tension tests in a dynamic shear rheometer. Road Materials and Pavement Design. 2024 May 22;26(2):397–419.
https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2356787
 26. Garboczi EJ, Berryman JG. Elastic moduli of a material containing composite inclusions: effective

- medium theory and finite element computations. *Mechanics of Materials*. 2001 Aug;33(8):455–70. [https://doi.org/10.1016/s0167-6636\(01\)00067-9](https://doi.org/10.1016/s0167-6636(01)00067-9)
27. Raschia S, Mignini C, Graziani A, Carter A, Perraton D, Vaillancourt M. Effect of gradation on volumetric and mechanical properties of cold recycled mixtures (CRM). *Road Materials and Pavement Design*. 2019 Jul 4;20(sup2):S740–54. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1633754>
 28. Graziani A, Bocci M, Canestrari F. Complex Poisson's ratio of bituminous mixtures: measurement and modeling. *Materials and Structures*. 2013 Jun 17;47(7):1131–48. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0117-2>
 29. El Sawda C, Fakhari-Tehrani F, Absi J, Allou F, Petit C. Multiscale heterogeneous numerical simulation of asphalt mixture. *Material Design & Processing Communications*. 2019 Feb 20;1(3):e42. <https://doi.org/10.1002/mdp2.42>
 30. Hajikarimi P, Hosseini AS, Fini EH. A heterogeneous micromechanical model for bituminous composites containing rigid and flexible particulates. *Construction and Building Materials* [Internet]. 2021 Jan 9;275:122102. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122102>
 31. Sawda CE, Tehrani FF, Absi J, Petit C, Reynaud P. Heterogeneous numerical simulation of fatigue behaviour of porous HMA by a multi-scale approach. *Road Materials and Pavement Design* [Internet]. 2023 Mar 19;24(sup1):690–705. Available from: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2186134>
 32. Khadijeh M, Kasbergen C, Erkens S, Varveri A. Exploring the roles of numerical simulations and machine learning in multiscale paving materials analysis: Applications, challenges, best practices. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [Internet]. 2024 Oct 30;433:117462. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.117462>