



Semnan University



Research Article

Experimental and Numerical Micromechanical Modeling of the Viscoelastic Behavior of Asphalt Mastic Containing Limestone Filler

Fereidoon Moghadas Nejad^{a*}, Pouria Hajikarimi^b, Ali Khodaii^c

^a Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

^b Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

^c Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-06-05

Revised: 2024-06-17

Accepted: 2024-06-17

Keywords:

Asphalt mastic,
Limestone filler,
Numerical
micromechanical
modeling,
Viscoelastic,
Finite element modeling.

ABSTRACT

The volume filling ratio and type of filler significantly influence the rheological and mechanical properties of bituminous composites. This effect can stem from either chemical interactions between the filler and bitumen or simple physical phenomena. Understanding the influence of filler on asphalt mastic performance is crucial for comprehending the behavior of asphalt mixtures. This study employs both experimental and numerical modeling approaches. The rheological properties of asphalt mastic samples made with pure bitumen and limestone filler at various filler contents were determined using frequency sweep tests. The experimental results indicated that increasing the volume filling ratio in asphalt mastic leads to non-linear changes in the values of the complex shear modulus (G^*) and phase angle (δ), known as the stiffening phenomenon. Considering the concept of transitional zone between filler and bitumen, a parameter called Effective Volume Filling Ratio (EVFR) was introduced to explain this phenomenon. To predict the viscoelastic behavior of asphalt mastic based on the mechanical properties of bitumen and filler, finite element method (FEM) simulations were utilized. The accuracy of these models was evaluated by calculating the relative difference between the experimental complex shear modulus (G^*) and the complex shear modulus predicted by the model. Results of this evaluation indicated that incorporating the EVFR into the numerical model can significantly enhance the accuracy of the predictions for viscoelastic behavior of asphalt mastic samples.

* Corresponding author.

E-mail address: moghadas@aut.ac.ir

How to cite this article: Moghadas Nejad, F., Hajikarimi, P., & Khodaii, A. (2024). Experimental and Numerical Micromechanical Modeling of the Viscoelastic Behavior of Asphalt Mastic Containing Limestone Filler. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(1), 17-38.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34351.1674>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی میکرومکانیکی رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی حاوی فیلر آهکی

فریدون مقدس‌نژاد^{۱*}، پوریا حاجی کریمی^۲، علی خدایی^۳

^۱دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

^۲دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

^۳دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

چکیده

درصد پرشدگی حجمی و نوع فیلر بر خواص رئولوژیک و مکانیکی مواد مرکب قیری مؤثر است. این تأثیر می‌تواند ناشی از اندرکنش شیمیایی بین فیلر و قیر و یا پدیده‌های فیزیکی ساده باشد. بررسی تأثیر فیلر بر عملکرد ماستیک آسفالتی مسئله‌ای مهم برای درک عملکرد مخلوط آسفالتی است. در این پژوهش، دو رویکرد آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفته است. خواص رئولوژیک نمونه‌های ماستیک آسفالتی ساخته شده با قیر خالص و فیلر آهکی با نسبت‌های پرشدگی مختلف با استفاده از آزمایش جاروب فرکانسی تعیین شده است. نتایج آزمایش نشان داد که افزایش درصد پرشدگی حجمی فیلر در ماستیک آسفالتی منجر به تغییر مقادیر مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) آن با رفتاری غیرخطی می‌شود که موسوم به پدیده سخت‌شوندگی است. با در نظر گرفتن مفهوم ناحیه انتقالی بین فیلر و قیر، شاخصی با عنوان نسبت پرشدگی مؤثر (EVFR) برای توجیه این پدیده معرفی شده است. برای پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی بر اساس ویژگی‌های مکانیکی قیر و فیلر از شبیه‌سازی با روش اجزای محدود (FEM) استفاده شده است. دقت این مدل‌ها بر اساس محاسبه اختلاف نسبی بین مدول برشی مختلط (G^*) آزمایشگاهی و مدول برشی مختلط پیش‌بینی شده توسط مدل ارزیابی شده است. نتایج این ارزیابی نشان‌دهنده این است که معرفی نسبت پرشدگی مؤثر (EVFR) به مدل عددی می‌تواند با تقریب خوبی منجر به افزایش دقت نتایج برای پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌های ماستیک آسفالتی شود.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۸

واژگان کلیدی:

ماستیک آسفالتی،

فیلر آهکی،

مدل‌سازی عددی میکرومکانیکی،

ویسکوالاستیک،

اجزای محدود.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: moghadas@aut.ac.ir

استناد به این مقاله: مقدس‌نژاد، فریدون، حاجی کریمی، پوریا & خدایی، علی. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی میکرومکانیکی رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی حاوی فیلر آهکی. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۰(۱)، ۳۸-۱۷.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34351.1674>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

مخلوط آسفالتی متشکل از قیر، مصالح سنگی و حفرات هوا در طیف گسترده‌ای از دما و نرخ بارگذاری که در معرض آن قرار می‌گیرد، رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهد (حاجی کریمی و مقدس‌نژاد، ۲۰۲۱). بنابراین، پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی نقشی کلیدی در طراحی صحیح روسازی و ارزیابی درست عملکرد آن ایفا می‌کند (کیم، ۲۰۰۹). محققین متعددی اظهار داشته‌اند که برای پیش‌بینی رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی می‌توان رفتار ماستیک آسفالتی را در نظر گرفت (بی و همکاران، ۲۰۲۱). ماستیک آسفالتی مخلوط قیر و فیلر (مصالح سنگی با اندازه ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون) است که حاوی هر دو جزء اصلی تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی، قیر با مشخصات ویسکوالاستیک و فیلر با مشخصات الاستیک مصالح سنگی است (دی‌بندتو و همکاران، ۲۰۰۴). بنابراین، در سال‌های اخیر، برخی از کارهای تحقیقاتی برای درک پدیده‌های مهم بین قیر و ذرات فیلر روی رفتار ماستیک آسفالتی (کوچکترین مقیاس مواد مرکب قیری) متمرکز شده‌اند (الفقادی و همکاران، ۲۰۲۲؛ فهیم و بهیا، ۲۰۱۰).

مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) پارامترهای مورد نیاز برای توصیف خصوصیات ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی هستند. چهار روش برای به‌دست آوردن این پارامترها وجود دارد که عبارتند از آزمون‌های آزمایشگاهی، راه‌حل‌های تحلیلی، مدل‌های رئولوژیک و روش‌های عددی، که در ادامه به اختصار توضیحاتی در خصوص آزمون‌های آزمایشگاهی و روش‌های عددی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند ارائه شده است.

آزمون‌های آزمایشگاهی یکی از قابل اعتمادترین روش‌ها هستند. آزمایش رئومتر برش دینامیک^۱ (DSR)

خواص رئولوژیک و تغییر شکل پذیری ماستیک آسفالتی مانند مدول برشی مختلط و زاویه فاز را در دماهای متوسط تا زیاد اندازه‌گیری می‌کند (دلپورت و همکاران، ۲۰۰۹). مدول برشی مختلط (G^*) عبارت است از مقاومت یک ماده در برابر تغییر شکل ناشی از اعمال یک تنش برشی سینوسی و شامل دو بخش تغییر شکل الاستیک و تغییر شکل ویسکوز (غیرقابل بازگشت) می‌باشد. زاویه فاز نشان‌دهنده مقادیر نسبی اجزای الاستیک و ویسکوز است. تحت دماها و بارگذاری‌های عادی، ماستیک آسفالتی هم‌زمان رفتار الاستیک و ویسکوز داشته و لذا دارای رفتار ویسکوالاستیک است.

روش‌های مدل‌سازی عددی به طور گسترده به منظور درک صحیح رفتار و پیش‌بینی مشخصات مواد مرکب قیری با دقت قابل قبول مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هرچند استفاده از روش اجزای 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 اجزای محدود و با دقت و سرعت زیادی تحلیل نمایند. نرم‌افزار ABAQUS از جمله ابزارهایی است که می‌تواند مبتنی بر روش اجزای محدود و با در نظر گرفتن برخی از مهمترین پارامترهای تعیین‌کننده، رفتار مواد مرکب قیری را شبیه‌سازی نماید. تحقیقات فراوانی در زمینه مدل‌سازی اجزای محدود مواد مرکبی مانند مخلوط‌های آسفالتی انجام گرفته است که در ادامه به برخی از این تحقیقات و نتایج آنها اشاره شده است.

مو و همکاران (۲۰۰۷) مدل میکرومکانیکی اجزای محدود دوبعدی را برای ارزیابی وضعیت تنش در ناحیه تماس میان قیر و سنگدانه در ماستیک آسفالتی به کار بردند. این مدل به گونه‌ای بود که محتویات اصلی مخلوط آسفالتی (سنگدانه‌ها، ماستیک، ناحیه تماس قیر و

^۱- Dynamic Shear Rheometer (DSR)

سنگدانه و فضای خالی) در آن لحاظ شده بود. ساختار هندسی ساده‌ای که محققین در شبیه‌سازی اجزای مخلوط به کار بردند از جمله ویژگی‌های مدل ارائه شده بود. با این حال، دوبعدی بودن مدل موجب شده که نتایج حاصل از مدل‌سازی منعکس‌کننده رفتار ماستیک آسفالتی با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های رفتار سه‌بعدی نباشد. یکی از مهمترین چالش‌ها جهت مدل‌سازی رفتار مواد مرکب قیری نظیر ماستیک آسفالتی یا مخلوط آسفالتی، ناهمگن بودن و درهم‌آمیختگی مواد قیری، مصالح سنگی و حفرات در ساختار آنهاست. یو و همکاران (۲۰۰۸) برای به‌دست آوردن منحنی تنش-کرنش، از طریق استفاده از تصاویر تهیه شده از مقطع مواد مرکب، مدل‌های اجزای محدود دوبعدی و سه‌بعدی ایجاد کردند. محدودیت این مدل‌ها این بود که با توجه به استفاده از تصاویر اخذ شده از مقطع مخلوط آسفالتی، دید واقع‌بینانه‌ای از ساختار سه‌بعدی ناهمگن آن ارائه نمی‌کردند. به منظور غلبه بر این مشکل و افزایش تطابق مدل سه‌بعدی با واقعیت هندسی مسئله، دای (۲۰۱۱) از روش توموگرافی اشعه ایکس برای ارائه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی مخلوط آسفالتی گرم استفاده کرد. مقادیر مدول مختلط دینامیک و زوایه فاز با استفاده از مدل عددی پیش‌بینی و با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند. همانطور که انتظار می‌رفت، این مقایسه نشان داد که مدل سه‌بعدی پیش‌بینی بهتری از رفتار مکانیکی مخلوط آسفالتی گرم نسبت به مدل دوبعدی ارائه می‌دهد.

در کنار مزایای غیرقابل انکار مدل‌های عددی فوق‌الذکر که بر اساس تهیه تصویر از هندسه ناهمگن مواد مرکب قیری توسعه داده شده بودند، دشواری، هزینه‌بر بودن، وابستگی مستقیم به نمونه مورد استفاده و غیرقابل تکرار بودن از جمله مهمترین نکاتی است که استفاده از این مدل‌ها را محدود نموده است. با هدف غلبه بر این محدودیت‌ها، تولید و توزیع تصادفی ذرات در ساخت

هندسه مدل‌های عددی مربوط به مصالح ناهمگن مورد توجه قرار گرفت. فخاری تهرانی و همکاران (۲۰۱۳) با توسعه یک مدل دوفازی متشکل از اجزای دانه‌ای (مصالح سنگی) و محیط متخلخل ماستیک آسفالتی، مدل عددی مبتنی بر روش اجزای محدودی ارائه کردند که به صورت دوبعدی و سه‌بعدی رفتار ویسکوالاستیک خطی مخلوط-های آسفالتی متداول را در کرنش‌های کوچک با موفقیت شبیه‌سازی می‌کند. در مدل توسعه داده شده توسط ایشان، بر اساس دانه‌بندی مصالح سنگی و استفاده از اصل دلونی، ذرات به صورت تصادفی تولید و در هندسه مدل توزیع شده‌اند. این موضوع، وابستگی ساخت مدل به تصویربرداری از طریق روش‌های مختلف را حذف می‌کند. حاجی‌کریمی و همکاران (۲۰۱۹) رفتار مکانیکی ماستیک آسفالتی اصلاح شده با پلیمر را با ۲ درصد پرشدگی حجمی^۱ (VFR) مختلف فیلر (۱۸ و ۳۵ درصد) به کمک روش اجزای محدود دوفازی شبیه‌سازی کردند. ماستیک آسفالتی به عنوان یک محیط ناهمگن متشکل از فیلر (به عنوان اجزا) در داخل قیر (به عنوان ماتریس) تعریف شده است. نظر به اینکه ابعاد ذرات پراکنده شده در ماتریس در مقیاس میکرون است، مدل عددی توسعه داده شده در دسته مدل‌های میکرومکانیکی طبقه‌بندی می‌شود (باتلر و همکاران، ۱۹۹۹). با مقایسه نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی، حاجی‌کریمی و همکاران (۲۰۱۹) نتیجه گرفتند که اگر چه نتایج مدل عددی و آزمون‌های آزمایشگاهی در خصوص نمونه‌های با پرشدگی حجمی ۱۸٪ تطابق مناسبی دارد، ولی در نمونه‌های ماستیک آسفالتی با پرشدگی حجمی ۳۵٪ اثر سخت‌شدگی مانع از دستیابی به این تطابق مناسب می‌شود. ایشان با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری، ناحیه متأثر از سخت‌شدگی را مجموعاً ۱۲٪ در اطراف ذرات فیلر تخمین زده و با اعمال آن در مدل عددی موجب افزایش دقت مدل‌سازی و دستیابی به خطای

^۱- Volume Filling Ratio (VFR)

استفاده از مدل دوفازی مبتنی بر توزیع تصادفی ذرات و اجزای محدود صورت پذیرفته و نتایج آن با یافته های آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۲. مواد و مصالح

۲-۱. قیر

مشخصات متداول قیر با رده عملکردی PG64-22 مورد استفاده در این پژوهش، شامل دانسیته، درجه نفوذ، نقطه نرمی، ویسکوزیته در سه دمای مختلف، خاصیت کشسانی و نقطه اشتعال در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲. فیلر آهکی

در این پژوهش، از یک نوع فیلر آهکی (شکل ۱) برای ساخت نمونه های ماستیک آسفالتی استفاده شده است. وزن مخصوص فیلر بر اساس استاندارد ASTM C128-15 محاسبه شده و برابر $2/650$ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمده است. اندازه ذرات فیلر براساس خواص نوری لیزر با کمک دستگاه سنجش اندازه ذرات لیزری مطابق با استاندارد ISO13320 اندازه گیری شده است، و پس از پردازش توسط کامپیوتر، منحنی دانه بندی ذرات به صورت شکل ۲ (بر حسب درصد عبوری و فراوانی تعداد ذرات) رسم شده است.

حداکثر $5/3$ درصد شدند. حاجی کریمی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مفاهیم مدل سازی میکرومکانیکی دوفازی توسعه داده شده در پژوهش فوق الذکر، تأثیر درصد پرشدگی حجمی فیلر سیلیسی (درصدهای متفاوت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰) بر رفتار سخت شونده ماستیک آسفالتی را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که جهت دستیابی به دقت مناسب در مدل سازی عددی می بایست از مفهوم نسبت پرشدگی حجمی مؤثر^۱ (EVFR) استفاده کرد.

در این پژوهش، تأثیر درصدهای مختلف پرشدگی حجمی فیلر آهکی بر رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی از طریق آزمایشگاهی و مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، چهار میزان پرشدگی حجمی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد در نظر گرفته شده و نمونه های ماستیک آسفالتی با استفاده از یک نوع قیر و فیلر آهکی ساخته شده است. سپس، آزمایش جاروب فرکانس در طیف گسترده ای از دماهای کم و میانی با استفاده از رئومتر برش دینامیک (DSR) روی نمونه ها انجام شده است. همچنین، از تصویربرداری با استفاده از میکروسکوپ نوری جهت بررسی نحوه پراکنش ذرات فیلر در ساختار ماستیک آسفالتی و توصیف چگونگی رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی جهت به کارگیری در مدل سازی عددی استفاده شده است. در کنار بررسی آزمایشگاهی، مدل سازی عددی با

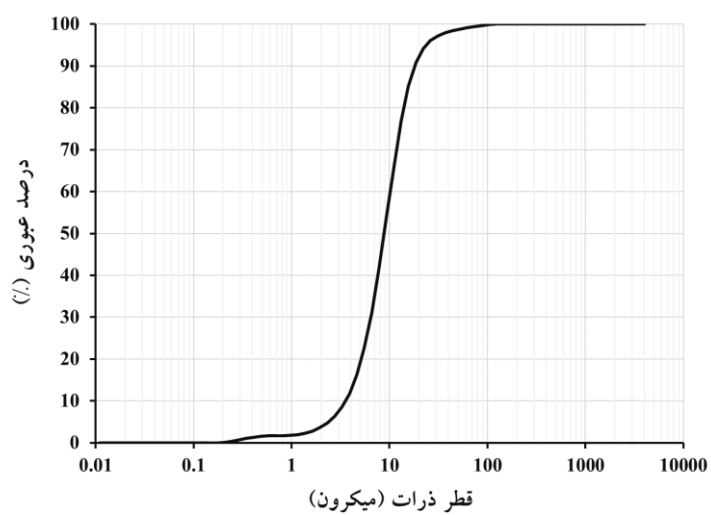
جدول ۱. ویژگی های متداول قیر خالص مورد استفاده

عنوان آزمایش	استاندارد	مقدار
دانسیته در دمای 25°C (g/cm^3)	ASTM D7	۱/۰۳
درجه نفوذ (0.1 mm)	ASTM D5	۵۸
نقطه نرمی ($^{\circ}\text{C}$)	ASTM D36	۵۱/۰
ویسکوزیته در دمای 100°C (mPa.s)	ASTM D4402	۳۶۶۲
ویسکوزیته در دمای 135°C (mPa.s)		۳۸۸
ویسکوزیته در دمای 160°C (mPa.s)		۱۰۰
خاصیت کشسانی در دمای 25°C (cm)	ASTM D113	> ۱۰۰
نقطه اشتعال ($^{\circ}\text{C}$)	ASTM D92	۲۶۵

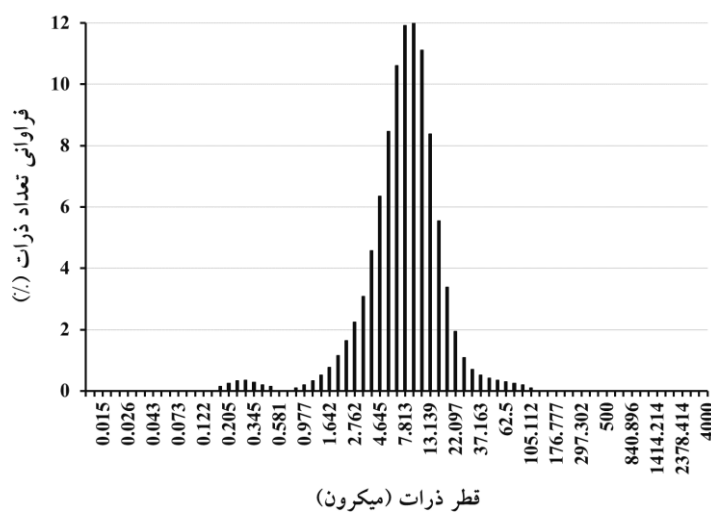
^۱- Effective Volume Filling Ratio (EVFR)



شکل ۱. فیلر آهکی مورد استفاده



(الف)



(ب)

شکل ۲. منحنی دانه‌بندی فیلر مورد استفاده: الف) درصد عبوری و ب) فراوانی تعداد ذرات

۲-۳. آماده سازی نمونه های ماستیک آسفالتی

به منظور دستیابی به مقادیر درصد پرشدگی حجمی در نمونه های ماستیک آسفالتی، مقادیر حجمی مورد نظر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد بر اساس وزن مخصوص فیلر و براساس رابطه (۱) به مقادیر وزنی ارائه شده در جدول ۲ (برای ساخت ۱۰۰ گرم نمونه ماستیک آسفالتی) تبدیل شده است. سپس فیلر به قیر مورد استفاده در این پژوهش اضافه شده و اختلاط با میکسر دور کم به مدت ۱۲۰ ثانیه در دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که حصول اطمینان از پایدار ماندن ذرات فیلر در قیر ممکن نبوده و به منظور جلوگیری از ته نشین شدن ذرات فیلر در قیر، بلافاصله پس از ساخت

نمونه ماستیک آسفالتی آن را درون قالب ریخته و نمونه در دمای زیر صفر نگهداری می شود. بنابراین، برای انجام آزمایش های مورد نظر این پژوهش، نمونه های ماستیک آسفالتی در کوتاه ترین زمان قبل از اجرای آزمایش تولید شده اند.

$$VFR = \frac{v_f}{v_b + v_f} = \frac{m_f / \rho_f}{m_f / \rho_f + m_b / \rho_b} \quad (1)$$

که، v_f و v_b به ترتیب حجم مرتبط با ذرات فیلر و قیر، m_f و m_b مقادیر وزنی ذرات فیلر و قیر، ρ_f و ρ_b وزن مخصوص فیلر و قیر و VFR درصد پرشدگی حجمی فیلر در ماستیک آسفالتی است.

جدول ۲. مقادیر وزنی فیلر و قیر برای ساخت ۱۰۰ گرم نمونه ماستیک آسفالتی

درصد پرشدگی حجمی	وزن فیلر (گرم)	وزن قیر (گرم)
۱۰	۲۱/۲۹۸	۷۸/۷۰۲
۲۰	۳۷/۷۷۲	۶۲/۲۲۸
۳۰	۵۱/۰۷۵	۴۸/۹۲۵
۴۰	۶۱/۸۸۹	۳۸/۱۱۱

۳. روش های آزمایش

۳-۱. آزمایش جاروب فرکانسی

در این پژوهش، آزمایش جاروب فرکانسی با استفاده از دستگاه رئومتر برش دینامیک با هدف اندازه گیری مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) نمونه قیر و ماستیک-های آسفالتی مطابق استاندارد ASTM D7175 مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمایش در بازه فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز (در ۱۶ فرکانس مختلف) انجام شده است. دامنه کرنش اعمال شده به نمونه ها ۰/۰۱ درصد (۰/۰۰۰۱ میلی متر بر میلی متر) بوده تا اطمینان حاصل شود که رفتار ویسکوالاستیک قیر و ماستیک آسفالتی در محدوده خطی باقی می ماند. پنج دمای آزمایش مختلف برای اندازه گیری رفتار ترمومکانیک نمونه های ماستیک

آسفالتی شامل ۱۰-، صفر، ۱۰، ۱۶ و ۲۲ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است، زیرا با استفاده از این دماها می توان رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی را در بازه گسترده دمایی به دست آورد. با توجه به دماهای انتخاب شده برای انجام آزمایش روی نمونه های قیر و ماستیک آسفالتی، برای تمام نمونه های آزمایش جاروب فرکانسی، نمونه با قطر ۸ میلی متر و فاصله ۲ میلی متر بین دو صفحه موازی انتخاب شد. انجام آزمایش روی نمونه ها از کمترین دمای مورد نظر (۱۰- درجه سلسیوس) شروع شده و دما برای دستیابی به مشخصات ویسکوالاستیک در دماهای بیشتر افزایش پیدا کرده است.

۲-۳. استفاده از میکروسکوپ نوری

به منظور مشاهده نحوه توزیع فیلر در ساختار ماستیک آسفالتی، از میکروسکوپ نوری Nikon ECLIPSE 50i استفاده شده است. از آنجا که سطح نمونه‌های ماستیک آسفالتی یکنواخت نیست، به منظور جلوگیری از اثر منفی انعکاس نور روی سطح سه‌بعدی نمونه‌ها و خارج شدن از حالت تنظیم و مشاهده دقیق و باکیفیت با استفاده از میکروسکوپ نوری، می‌بایست سطح نمونه‌ها پولیش شده و تا حد امکان به حالت دوبعدی نزدیک شود. به این منظور، از دستگاه پولیشر متالوگرافی مدل Mecatech 334 PERSI استفاده شده است. به منظور استفاده از دستگاه پولیشر، نمونه‌های ماستیک آسفالتی در قالب‌هایی با قطر ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر ریخته شده است. با استفاده از این دستگاه، سطح نمونه‌ها در چهار مرحله و به ترتیب با دقت‌های ۳۰، ۹، ۶ و ۳ میکرون با اعمال نیروی محوری ۰/۱۵ نیوتن پولیش شده است. مدت پولیش کردن هر یک از مراحل ۱۵ دقیقه بوده و در مجموع، پولیش کردن هر نمونه ۶۰ دقیقه به طول انجامیده است.

۴. مدل‌سازی عددی

مراحل مختلف شبیه‌سازی عددی ماستیک آسفالتی شامل موارد زیر می‌باشد که در این بخش به صورت مختصر به هر یک از آنها پرداخته شده است:

- تولید میکروساختار ماستیک آسفالتی
 - شرایط مرزی مورد استفاده و بارگذاری
 - بهینه‌سازی مش مورد استفاده
- شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS (نسخه 6.14) انجام شده است.

۴-۱. تولید میکروساختار ماستیک آسفالتی

نرم‌افزار MOA^۱ در مرکز تحقیقات IRCER دانشگاه لیموژ فرانسه از طریق برنامه‌نویسی به زبان C++ بر اساس روش مثلث‌بندی دِلونی^۲ توسعه داده شده است. این نرم‌افزار این قابلیت را دارد که هندسه ذرات موجود در یک حجم مشخص را با داشتن درصد پرشدگی حجمی یا تعداد ذرات مورد نظر و با در نظر گرفتن شکل‌های مختلف از قبیل دایره، بیضی و چندضلعی در حالت دوبعدی و کره و تتراهدرال در حالت سه‌بعدی تولید نماید. نرم‌افزار MOA همچنین این قابلیت را دارد که بر اساس منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها (از کمترین تا بیشترین مقدار اندازه سنگدانه‌ها) هندسه مورد نظر را تولید نماید. با توجه به پیچیدگی هندسه حاصل از توزیع تصادفی سنگدانه‌ها و قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) جهت مش‌بندی، اعمال شرایط مرزی و حل مسئله به روش اجزای محدود، از این نرم‌افزار جهت مدل‌سازی عددی استفاده شده است. کلیه خروجی‌های نرم‌افزار MOA قابل معرفی و Import کردن در نرم‌افزار آباکوس جهت تولید هندسه مورد نظر است. در این پژوهش، نرم‌افزار MOA به منظور تولید هندسه ذرات فیلر در ساختار ماستیک آسفالتی بر اساس مراحل چهارگانه زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

- الف) ساختن یک فضای اولیه با ابعاد متناسب با نمونه آزمایشگاهی (کادر اصلی مدل‌سازی)
- ب) تولید هندسه سنگدانه‌ها بر اساس منحنی دانه‌بندی فیلر مورد استفاده (شکل ۲)
- ج) به‌کارگیری عملگر بولی^۳ به منظور تولید ماتریس مواد قیری موجود در اطراف سنگدانه‌ها
- د) کنار هم قرار دادن مواد قیری به عنوان Matrix و سنگدانه‌ها به عنوان Inclusions در یک مدل واحد با استفاده از «Tie» کردن آنها در نرم‌افزار ABAQUS.

²- Delaunay Triangulation

³- Boolean Operator

¹- Modeleur Objects Aléatoires (Random Object Modeler)

شکل ۳، این روند را برای تولید نمونه های مورد استفاده در آزمایش رئومتر برش دینامیک (DSR) نشان می دهد.

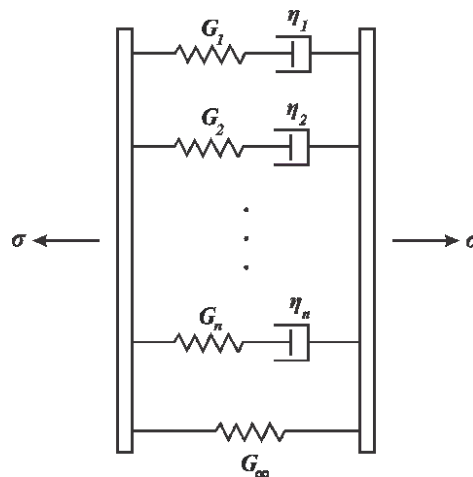


شکل ۳. تولید مدل دوفازی ماستیک آسفالتی با استفاده از عملگر بولی و Tie کردن در نرم افزار آباکوس برای شبیه سازی نمونه مورد استفاده در آزمایش جاروب فرکانس با استفاده از DSR

پذیرفته است. تحقیقات متعددی، مدل ماکسول تعمیم یافته را با موفقیت برای مدل سازی عددی مواد آسفالتی مورد استفاده قرار داده اند (دای، ۲۰۱۱). در این پژوهش نیز مدل ماکسول تعمیم یافته که در شکل ۴ نشان داده شده با هدف محاسبه ضرایب سری پرونی مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۴. مشخصات مصالح

در مدل سازی عددی، قیر به عنوان ماده همگن در نظر گرفته شده است و ویژگی های ویسکوالاستیک آن می بایست در قالب سری پرونی^۱ به نرم افزار ABAQUS معرفی شود. ترسیم منحنی جامع و محاسبه پارامترهای سری پرونی در دمای مرجع ۱۰ درجه سلسیوس صورت



شکل ۴. مدل ماکسول تعمیم یافته

که در آن، G_i سختی فنرها، η_i ویسکوزیته میراگرها و E_∞ سختی فنر تکی است که در شکل ۴ نشان داده شده است. زمان رهایش این مدل نیز به صورت $\tau_i = \eta_i / G_i$ تعریف می شود. نظر به اینکه بارگذاری در آزمایش رئومتر برش

مدول رهایش مدل ماکسول تعمیم یافته با استفاده از رابطه (۲) بیان می شود:

$$G(t) = G_\infty + \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(-\frac{G_i}{\eta_i} t\right) \quad (2)$$

^۱ - Prony Series

شکل پیش فرض تنش حاصل در بارگذاری هارمونیک خواهیم داشت:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 [G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t] = \sigma_0 [\cos \varphi \sin \omega t + \sin \varphi \cos \omega t] \quad (8)$$

بنابراین، مدول ذخیره و مدول اتلاف به شکل روابط (۹) و (۱۰) قابل ارائه خواهند بود:

$$G'(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi \quad (9)$$

$$G''(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi \quad (10)$$

رابطه مستقیم تنش و کرنش بر اساس روابط (۹) و

(۱۰) به فرم رابطه (۱۱) قابل نوشتن خواهد بود:

$$\sigma_0 = \varepsilon_0 \sqrt{G'(\omega)^2 + G''(\omega)^2} = \varepsilon_0 G^*(\omega) \quad (11)$$

که در این رابطه، G^* مدول برشی مختلط نامیده شده و از مجذور مجموع مربعات مدول ذخیره و مدول اتلاف به دست می آید.

به منظور استفاده از مدل ماکسول تعمیم یافته، رابطه مدول رهایش آن به جای $G(\chi)$ در رابطه (۷) جایگزین می شود. همان طور که در رابطه (۷) مشاهده می شود، این رابطه شامل مدول ذخیره و مدول اتلاف در قالب دو جمله مجزاست. در ادامه، روابط مربوط به تبدیل حوزه فرکانسی به حوزه زمانی برای هر دو مؤلفه مدول ذخیره و مدول اتلاف آورده شده است.

$$G(\omega) = \int_0^\infty \omega G(\chi) \sin \omega \chi d\chi = \int_0^\infty \omega \sin \omega \chi \left[G_\infty + \sum_{i=1}^n G_i \exp\left(-\frac{\chi}{\tau_i}\right) \right] d\chi$$

$$= \int_0^\infty G_\infty \omega \sin \omega \chi d\chi + \sum_{i=1}^n G_i \int_0^\infty \omega \sin \omega \chi \exp\left(-\frac{\chi}{\tau_i}\right) d\chi \quad (12)$$

با اشاره به این نکته که تبدیل لاپلاس تابع سینوس از رابطه (۱۳) به دست می آید، رابطه (۱۲) با در نظر گرفتن $s = -1/\tau$ قابل محاسبه به شکل رابطه (۱۴) می باشد:

$$L[\sin t] = \int_0^\infty e^{-st} \sin t dt = \frac{1}{s^2 + 1} \quad (13)$$

دینامیک (DSR) به صورت هارمونیک انجام می شود و خروجی آزمایش در دامنه فرکانسی می باشد، ضروری است معادلات لازم جهت تبدیل داده های به دست آمده در دامنه فرکانسی به دامنه زمانی در این بخش توسعه داده شوند.

چنانچه مصالح ویسکوالاستیک با اعمال کرنش سینوسی (یکی از ساده ترین شکل های بارگذاری هارمونیک که به منظور شبیه سازی بار ترافیکی در نظر گرفته می شود) تحریک شود، پاسخ تنشی آن نیز با اختلاف فاز φ به شکل سینوسی خواهد بود.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

که در این روابط، ω سرعت زاویه ای بر حسب رادیان بر ثانیه و φ زاویه فاز است. با جایگزینی رابطه (۲) در رابطه بنیادی تئوری ویسکوالاستیک خطی خواهیم داشت (اتوسن و ریستینما، ۲۰۰۵):

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t G(t-\xi) \varepsilon_0 \omega \cos \omega \xi d\xi \quad (5)$$

چنانچه در رابطه (۵) تغییر متغیر به شکل $\xi = t - \chi$ در نظر گرفته شود، این رابطه به صورت رابطه (۶) در خواهد آمد:

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t G(\chi) \varepsilon_0 \omega \cos \omega(t-\chi)(-d\chi) \quad (6)$$

با باز کردن رابطه کسینوس، رابطه (۶) به شکل رابطه (۷) قابل نوشتن است:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left[\underbrace{\int_0^\infty \omega G(\chi) \sin \omega \chi d\chi}_{G'(\omega)} \sin \omega t + \underbrace{\int_0^\infty \omega G(\chi) \cos \omega \chi d\chi}_{G''(\omega)} \cos \omega t \right] \quad (7)$$

که در این رابطه، G' مدول ذخیره^۱ و G'' مدول اتلاف^۲ نامیده می شود. با مقایسه رابطه (۷) و رابطه (۴) به عنوان

²- Loss Modulus

¹- Storage Modulus

$$G''(\omega) = \sum_{i=1}^n G_i \omega \frac{1/\tau_i}{\omega^2 + \frac{1}{\tau_i^2}} = \sum_{i=1}^n G_i \frac{\tau_i \omega}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (17)$$

در صورتی که دو رابطه (۱۴) و (۱۷) به صورت هم زمان روی داده های G' و G'' برازش داده شوند، مقادیر G_i و τ_i مورد نیاز در رابطه (۲) به دست آمده و سری پرونی مورد نیاز جهت معرفی به نرم افزار ABAQUS تشکیل خواهد شد. با توجه به روابط فوق الذکر، در نهایت، پارامترهای سری پرونی قیر در دمای ۱۰ درجه سلسیوس محاسبه شده که در جدول ۳ ارائه گردیده است. علت انتخاب ۲۵ المان برای مدل ماکسول تعمیم یافته، افزایش دقت مدل سازی به استناد نتایج تحقیقات پیشین است (الهوی و همکاران، ۲۰۲۰).

$$G'(\omega) = G_\infty + \sum_{i=1}^n G_i \omega \frac{\omega}{\omega^2 + \frac{1}{\tau_i^2}} = G_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{G_i \omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (18)$$

به طور مشابه، برای مدول اتلاف خواهیم داشت:

$$G''(\omega) = \int_0^\infty \omega G(\chi) \cos \omega \chi d\chi = \int_0^\infty \omega \cos \omega \chi \left[\sum_{i=1}^n G_i \exp\left(-\frac{\chi}{\tau_i}\right) \right] d\chi \\ = \sum_{i=1}^n G_i \omega \int_0^\infty \cos \omega \chi \exp\left(-\frac{\chi}{\tau_i}\right) d\chi \quad (19)$$

با اشاره به این نکته که تبدیل لاپلاس تابع کسینوس از رابطه (۱۶) به دست می آید، رابطه (۱۵) با در نظر گرفتن $s = -1/\tau$ قابل محاسبه به شکل رابطه (۱۷) می باشد:

$$L[\sin t] = \int_0^\infty e^{-st} \sin t dt = \frac{s}{s^2 + 1} \quad (16)$$

جدول ۳. پارامترهای سری پرونی قیر در دمای مرجع ۱۰ درجه سلسیوس

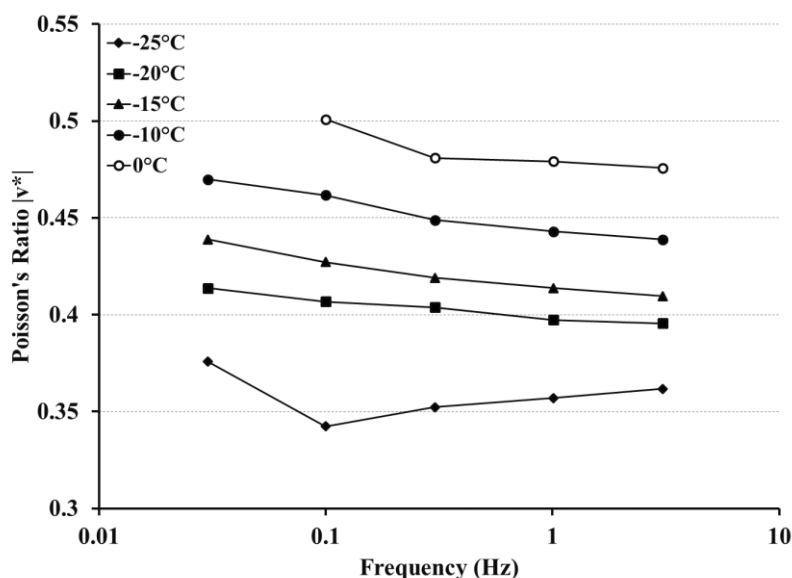
شماره المان	G_i (MPa)	τ_i (s)	شماره المان	G_i (MPa)	τ_i (s)
G_∞	۸۶۳/۷۱۸۹	-	۱۳	۹/۸۹E-۰۲	۱/۸۰E-۰۹
۱	۱/۸۳E-۰۴	۲/۰۴E-۱۹	۱۴	۹/۱۶E-۰۲	۱/۲۱E-۰۸
۲	۲/۱۶E-۰۴	۱/۳۸E-۱۸	۱۵	۲/۲۰E-۰۱	۸/۱۸E-۰۸
۳	۴/۴۰E-۰۴	۹/۲۸E-۱۸	۱۶	۱/۲۷E-۰۱	۵/۵۱E-۰۷
۴	۲/۵۸E-۰۴	۶/۲۵E-۱۷	۱۷	۱/۶۱E-۰۱	۳/۷۲E-۰۶
۵	۱/۷۰E-۰۳	۴/۲۲E-۱۶	۱۸	۶/۴۶E-۰۲	۲/۵۱E-۰۵
۶	۳/۳۴E-۰۳	۲/۸۴E-۱۵	۱۹	۳/۶۱E-۰۲	۱/۶۹E-۰۴
۷	۳/۸۲E-۰۳	۱/۹۲E-۱۴	۲۰	۲/۲۱E-۰۲	۱/۱۴E-۰۳
۸	۷/۹۴E-۰۳	۱/۲۹E-۱۳	۲۱	۱/۰۱E-۰۲	۷/۶۸E-۰۳
۹	۱/۷۸E-۰۲	۸/۷۱E-۱۳	۲۲	۴/۳۱E-۰۳	۵/۱۸E-۰۲
۱۰	۲/۳۶E-۰۲	۵/۸۷E-۱۲	۲۳	۱/۰۴E-۰۳	۳/۴۹E-۰۱
۱۱	۳/۸۲E-۰۲	۳/۹۶E-۱۱	۲۴	۲/۱۳E-۰۴	۲/۳۵E+۰۰
۱۲	۶/۵۴E-۰۲	۲/۶۷E-۱۰	۲۵	۵/۱۲E-۰۵	۱/۵۹E+۰۱

شده است. دی بندتو و همکاران (۲۰۰۷) ضریب پواسون قیر را در پنج دما و پنج فرکانس مختلف مورد بررسی قرار دادند که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. ایشان به این نتیجه رسیدند که میانگین مقدار ضریب

ذرات سنگدانه، با توجه به ماهیت رفتاری آنها، به صورت الاستیک عمل کرده و در این پژوهش مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ذرات سنگدانه در مدل عددی به ترتیب ۴۵ گیگاپاسکال و ۰/۱۵ در نظر گرفته

که به تناسب دمایی که مدل‌سازی در آن انجام می‌شود، ابتدا با لحاظ کردن مشخصات قیر خالص در آزمایش، مقدار ضریب پواسون واسنجی شود و سپس از این ضریب پواسون در ادامه مدل‌سازی استفاده گردد.

پواسون بین ۰/۳۵ (برای فرکانس‌های بالاتر یا دماهای کمتر) تا ۰/۵ (برای فرکانس‌های پایین‌تر یا دماهای بیشتر) در نوسان است. مقدار ضریب پواسون قیر با افزایش فرکانس و کاهش دما کم می‌شود. بنابراین، ضروری است



شکل ۵. ضریب پواسون قیر بر حسب فرکانس در دماهای مختلف (دی بندتو و همکاران، ۲۰۰۷)

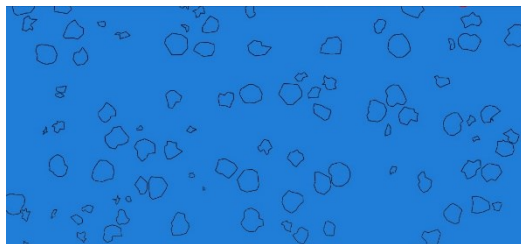
آزمایش رئومتر برش دینامیک وجود نداشته و می‌توان از مدل‌سازی دوبعدی به دلیل هزینه محاسباتی کمتر استفاده نمود. شکل ۶، مدل‌های عددی با درصد‌های پرشدگی مختلف را که با استفاده از نرم‌افزار MOA تولید شده‌اند نشان می‌دهد. ابعاد مدل به نحوی در نظر گرفته شده که حداقل ۱۰ برابر بزرگتر از بزرگترین اندازه سنگدانه مصرف شده در ساخت ماستیک آسفالتی باشد. همچنین، شکل ۷ یک نمونه از مدل‌ها که مش‌بندی شده‌اند را نمایش داده است.

۳-۴. بارگذاری و اعمال شرایط مرزی

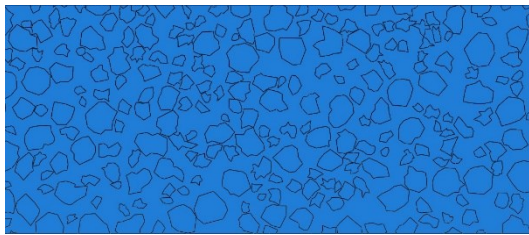
تعیین مدول برشی مختلط و زاویه فاز ماستیک آسفالتی با استفاده از روش اجزای محدود و استفاده از یک مدل دوبعدی از یک مقطع فرضی از مدل سه‌بعدی (حل به صورت تنش مسطح) با درصد پرشدگی مشابه آنچه در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شده است. اخیراً سادات‌حسینی و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده‌اند که تفاوت معناداری بین مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی



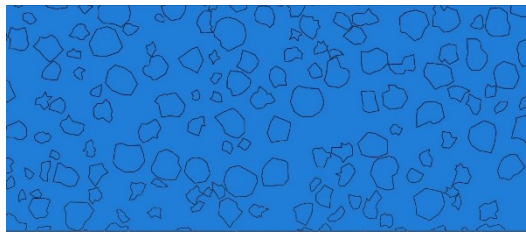
(ب)



(الف)

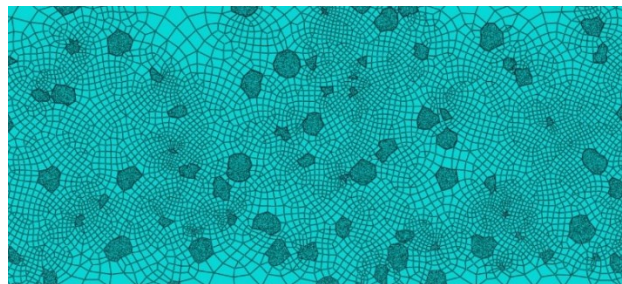


(د)



(ج)

شکل ۶. مدل عددی ماستیک آسفالتی با درصد های پرشدگی حجمی: الف) ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۳۰ و د) ۴۰



شکل ۷. مدل عددی مش بندی شده برای ماستیک آسفالتی با پرشدگی حجمی ۱۰٪

آسفالتی و روند افزایشی زاویه فاز را به درستی ثبت نماید. با توجه به ویژگی های مصالح ویسکوالاستیک، پاسخ تنشی با تحریک رابطه (۳) هم فاز نبوده و در قالب رابطه (۴)، همانطور که پیشتر نیز بدان اشاره شد، قابل بیان است. به منظور محاسبه تنش پس از انجام محاسبات عددی در نرم افزار آباکوس، نیروی مورد نظر با جمع بستن کلیه نیروهای گرهی روی سطح بالایی مدل عددی محاسبه شده است. با تقسیم کردن این نیرو بر اندازه مساحت سطح برشی هندسه مدل، تنش برشی میانگین قابل محاسبه خواهد بود. همچنین، کرنش برشی با تقسیم کردن تغییر مکان اولیه اعمال شده (۰/۰۰۰۱) به شعاع مدل عددی محاسبه می شود. با داشتن مقادیر تنش و کرنش، مدول برشی مختلط با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹) قابل محاسبه خواهد بود:

$$\sigma_0 = |G^*| \varepsilon_0 = (G' + iG'') \varepsilon_0 \quad (18)$$

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (19)$$

که در آن G' و G'' به ترتیب بخش های حقیقی و موهومی مدول مختلط هستند که با استفاده از روابط (۹)

بارگذاری مدل توسط یک تحریک تغییر مکانی سینوسی در سطح بالایی مدل، مطابق با رابطه (۳)، انجام شده است. در این رابطه، ε_0 مقدار دامنه تغییر شکل و معادل $\omega = 2\pi f$ ، ۰/۰۰۰۱ سرعت زاویه ای اعمال تغییر شکل و t زمان است. باید توجه داشت که اعمال شرایط تغییر مکانی رابطه (۳) در نرم افزار آباکوس به عنوان ورودی مسئله به صورت یک تابع صریح مقدور نبوده و می بایست در قالب جدولی از داده ها در نظر گرفته شود. بنابراین، انتخاب بازه زمانی مناسب برای تولید جدول داده ها و گسسته سازی تابع سینوسی پیوسته رابطه (۳) از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مدت زمان بارگذاری بر اساس فرکانس مورد نظر به نحوی انتخاب شده که حداقل ۱۰ سیکل بارگذاری صورت پذیرد. برای مثال، اگر مسئله در فرکانس ۰/۱ هرتز حل می شود، زمان بارگذاری ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است؛ یا برای فرکانس ۱۰ هرتز، زمان بارگذاری یک ثانیه لحاظ شده است. باید توجه داشت که بازه های زمانی در ابتدای حل مسئله باید به اندازه کافی کوچک در نظر گرفته شود (در مقیاس $1E-8$ ثانیه) تا بتواند پاسخ رهایش ماستیک

۴-۴. مش‌بندی مدل عددی

کلیه المان‌ها سه‌گره‌ای و در حالت تنش مسطح هستند. نتایج آنالیز حساسیت که در شکل ۸ نشان داده شده است مبین این موضوع است که اندازه المان‌های کوچکتر از ۰/۰۰۸ میلی‌متر می‌تواند نتایج مطلوبی را به همراه داشته باشد و ضامن همگرایی نتایج باشد. المان مثلثی شش‌گره‌ای (CPS6M) در حالت دوبعدی در نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته است.

و (۱۰) تعریف می‌شوند. در نهایت، مدول مختلط می‌تواند با استفاده از رابطه (۲۰) محاسبه شود:

$$|G^*| = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}} \quad (20)$$

که در آن $\sigma_{\max}$ و $\sigma_{\min}$ تنش‌های بیشینه و کمینه در سطح بالایی مدل عددی هستند. همچنین، $\epsilon_{\max}$ و $\epsilon_{\min}$ کرنش بیشینه و کمینه در این سطح است.



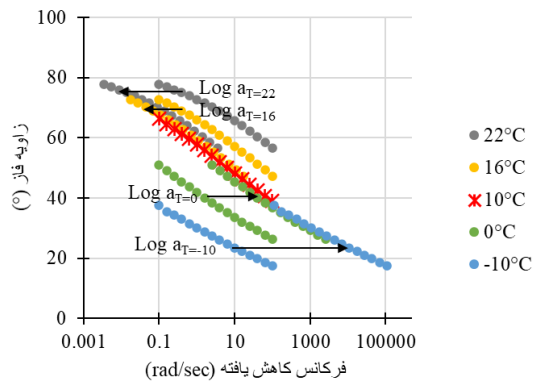
شکل ۸. تغییرات مقدار مدول برشی مختلط با اندازه مش مورد استفاده و بررسی همگرایی آن

۵. نتایج و بحث

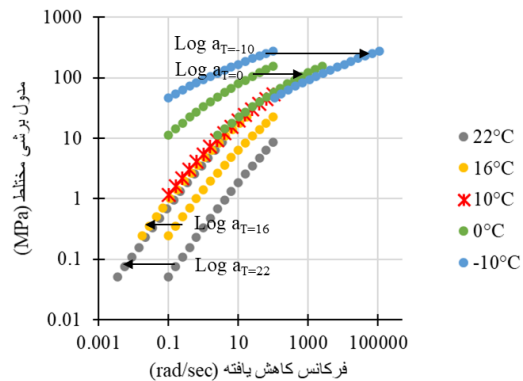
۵-۱. نتایج آزمایشگاهی

از نتایج آزمایش رئومتر برش دینامیک برای ساخت منحنی‌های جامع مدول برشی مختلط و زاویه فاز مطابق با اصل برهم‌نهی زمان - دما به کمک معادله WLF (ویلیامز و همکاران، ۱۹۵۵) استفاده شده است. شکل ۹، روش ساخت منحنی جامع مدول برشی مختلط و زاویه

فاز را با استفاده از ضریب انتقال افقی به صورت نمونه برای قیر خالص نشان می‌دهد. منحنی‌های جامع در دمای مرجع ۱۰ درجه سلسیوس ترسیم شده‌اند. لازم به ذکر است که دمای در نظر گرفته شده برای ترسیم منحنی جامع حائز اهمیت نبوده و با ترسیم منحنی جامع در هر دمایی این امکان وجود دارد که منحنی جامع در دماهای دیگر به سادگی ترسیم شود.



(ب)



(الف)

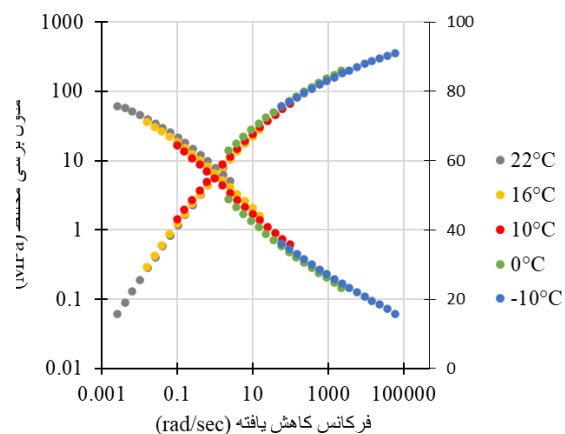
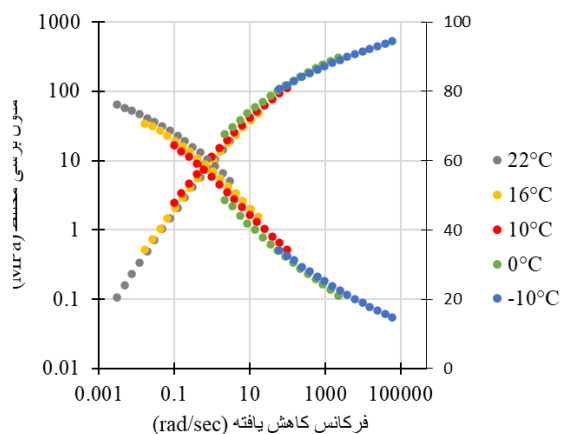
شکل ۹. نحوه ساخت منحنی های جامع: الف) مدول برشی مختلط و ب) زاویه فاز در دمای مرجع

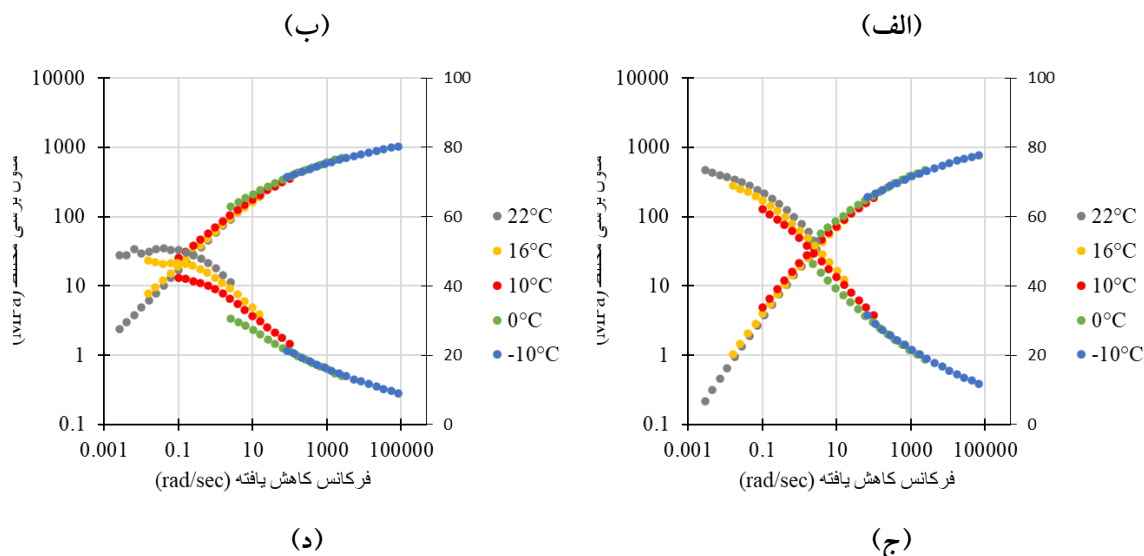
نتایج بر اساس روند ارائه شده در بخش های قبل به دست آمده است. شکل ۱۱، مدول برشی مختلط نمونه های ماستیک آسفالتی را در چهار نسبت پرشدگی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد برای دماهای آزمایش -۱۰، صفر، ۱۰، ۱۶ و ۲۲ درجه سلسیوس برای چهار فرکانس فوق الذکر نشان داده است. در این نمودارها، EXP نتیجه آزمایشگاهی، VFR نتیجه مدل سازی عددی در درصد پرشدگی حجمی، EVFR نتیجه مدل سازی عددی در درصد پرشدگی حجمی مؤثر، ERROR خطای مدل سازی عددی نسبت به نتیجه آزمایشگاهی با در نظر گرفتن VFR در مدل سازی عددی و EVFR خطای مدل سازی عددی نسبت به نتیجه آزمایشگاهی با در نظر گرفتن EVFR است.

شکل ۱۰ منحنی های جامع نمونه های ماستیک آسفالتی را در دمای مرجع ۱۰ درجه سلسیوس نشان می دهد. نتایج آزمایش به وضوح نشان می دهد که افزایش درصد پرشدگی حجمی باعث افزایش مدول برشی مختلط و کاهش زاویه فاز ماستیک های آسفالتی می شود. نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ جهت تعیین ویژگی های ویسکوالاستیک مصالح و استفاده از آنها در مدل سازی عددی به کار خواهد رفت.

۲-۵. نتایج مدل سازی عددی

با انتخاب چهار فرکانس مختلف شامل فرکانس های ۰/۱، ۱/۵۹، ۱۰ و ۱۰۰ هرتز (که نتایج آزمایشگاهی در این فرکانس ها موجود است)، مدل عددی ساخته شده اجرا و

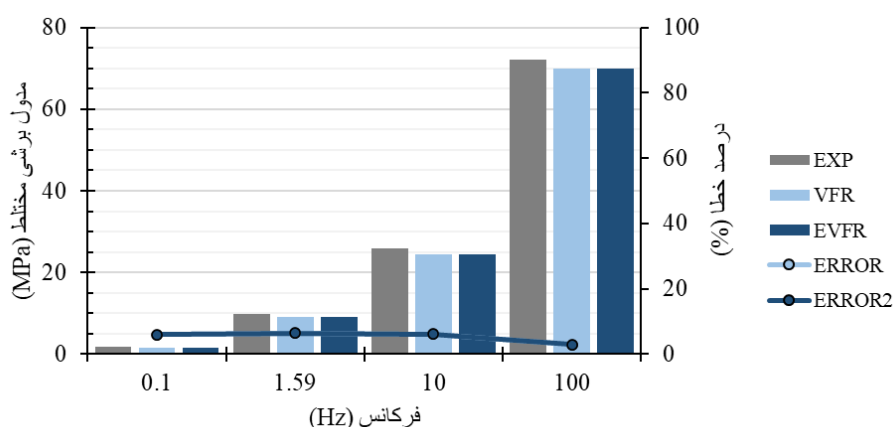




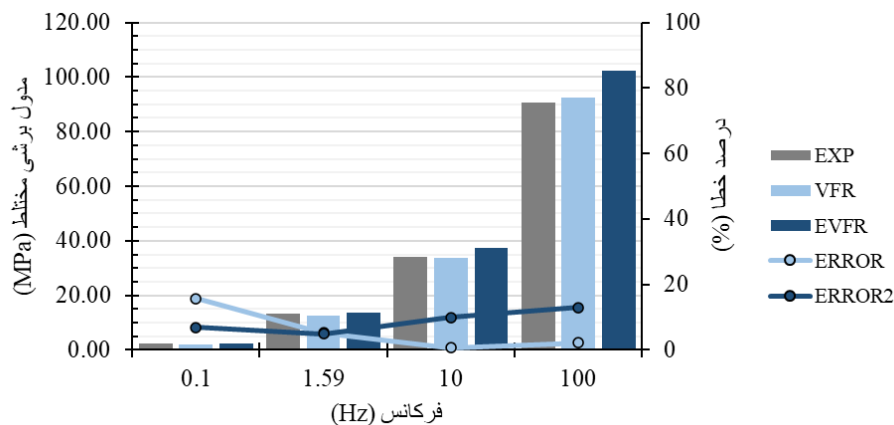
شکل ۱۰. منحنی‌های جامع مدول برشی مختلط و زاویه فاز در دمای مرجع ۱۰ درجه سلسیوس برای ماستیک آسفالتی حاوی: الف) ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۳۰ و د) ۴۰ درصد پرشدگی حجمی

نموده است. این پدیده را پیشتر محققین مختلف نیز گزارش نموده‌اند و از مکانیزم سخت‌شوندگی برای توجیه آن استفاده کرده‌اند (مسعود و همکاران، ۲۰۱۵). با هدف افزایش دقت مدل‌سازی عددی، یک درصد پرشدگی حجمی مؤثر (EVFR) به منظور واسنجی مدل عددی جهت دستیابی به کم‌خط‌ترین نتایج انتخاب شده است.

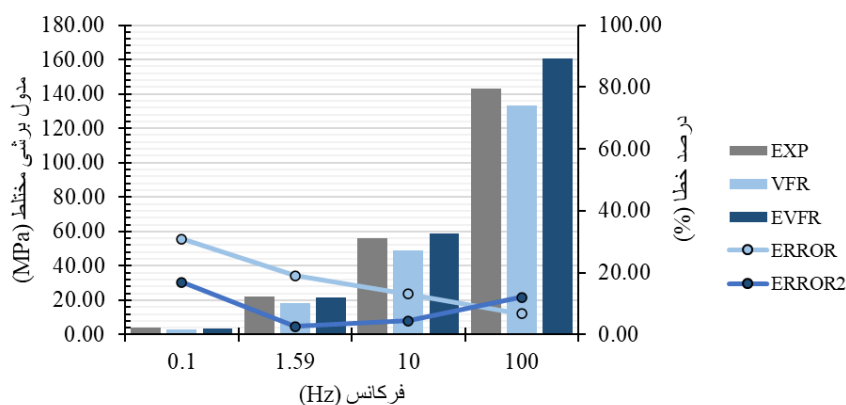
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، در مقادیر پرشدگی حجمی (VFR) کمتر (۱۰ و ۲۰ درصد) مدل‌سازی عددی پیش‌بینی مناسبی از مقدار مدول برشی مختلط دارد. با افزایش مقدار VFR و رسیدن به درصدهای ۳۰ و ۴۰، دقت مدل‌سازی عددی افت قابل توجهی داشته و مدل عددی مقادیر مدول برشی مختلط را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دست پایین پیش‌بینی



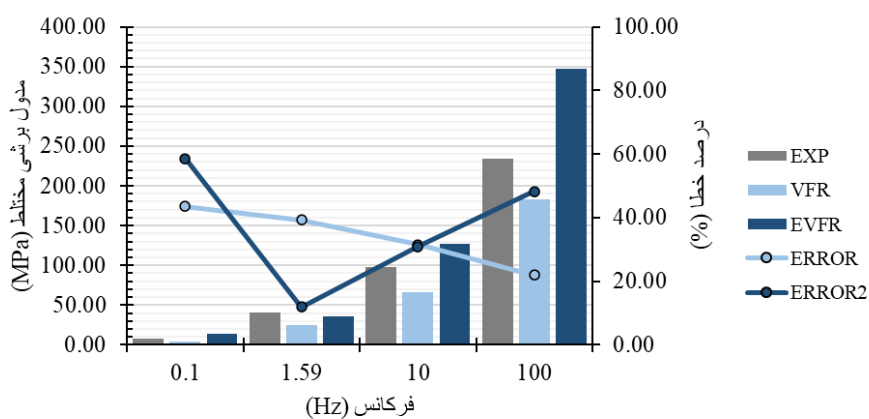
(الف)



(ب)



(ج)

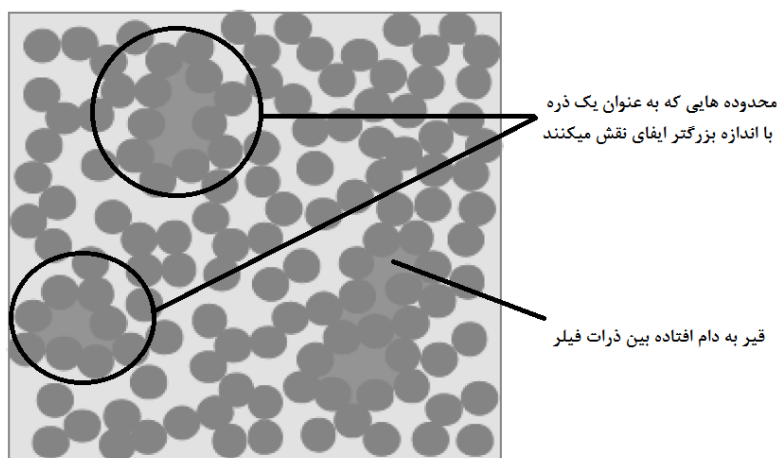


(د)

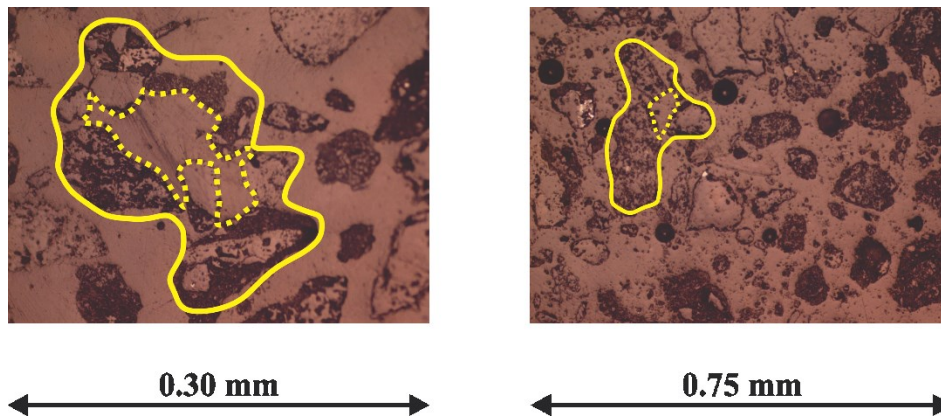
شکل ۱۱. مقایسه نتایج آزمایشگاهی (EXP) با نتایج مدل سازی عددی برای درصد های پرشدگی محاسبانی (VFR) و مؤثر (EVFR) برای نمونه های ماستیک آسفالتی با پرشدگی حجمی متفاوت: الف) ۱۰، ب) ۲۰، ج) ۳۰ و د) ۴۰ درصد در دمای مرجع ۱۰ درجه سلسیوس و میزان خطا برای در نظر گرفتن VFR (ERROR) و میزان خطا برای در نظر گرفتن EVFR (ERROR2)

همراه با ذرات فیلر موجب شکل‌گیری محدوده‌ای گسترده‌تر شده و درصد پرشدگی حجمی به این دلیل افزایش پیدا می‌کند. به این درصد پرشدگی حجمی جدید به‌دست آمده، درصد پرشدگی حجمی مؤثر گفته می‌شود و مدل مفهومی بسیار ساده آن پیشتر توسط حاجی‌کریمی و همکاران (۲۰۱۹) معرفی شده است. این پدیده پیش‌تر توسط ششیدهار و شنوی (۲۰۰۲) نیز گزارش شده است. نحوه چسبیدن ذرات فیلر به یکدیگر و چگونگی تشکیل محدوده سخت‌شوندگی به جنس فیلر مورد استفاده بستگی دارد (باستیداس مارتینز و همکاران، ۲۰۲۰) که در این تحقیق به طور مشخص فیلر آهکی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به معادلات بنیادی مورد استفاده در نرم‌افزار MOA جهت تولید تصادفی هندسه سنگدانه‌ها در یک محدوده مشخص، یکی از قیود اصلی این تولید تصادفی سنگدانه‌ها عدم وجود تماس بین ذرات سنگدانه است. بنابراین، با استفاده از هندسه تولید شده توسط MOA نمی‌توان پدیده سخت‌شوندگی را مستقیماً در مدل‌سازی عددی منعکس نمود.

با افزایش درصد پرشدگی حجمی ذرات فیلر در ماتریس قیر، برخی از ذرات فیلر به یکدیگر چسبیده و بخشی از قیر مصرفی را در ساختار خود به دام می‌اندازند (شکل ۱۲). این قیر به دام افتاده همراه با مصالح سنگی اطراف خود نقش یک ذره جدید را در میکروساختار ماستیک آسفالتی ایفا کرده و موجب افزایش درصد پرشدگی حجمی می‌شود. به منظور نشان دادن چگونگی وقوع این پدیده، شکل ۱۳ تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ نوری (با فیلتر خاص) برای برشی از ماستیک آسفالتی با ۴۰ درصد پرشدگی حجمی که در آن محدوده به دام افتاده بین ذرات فیلر مشخص شده را در دو حالت بزرگنمایی نشان داده شده است. به دام افتادن قیر بین ذرات فیلر در ساختار ماستیک آسفالتی، همانطور که در این شکل مشخص است، پدیده‌ای تصادفی بوده که در مقاطع مختلف ماستیک آسفالتی و همچنین در نقاط مختلف این مقاطع متفاوت است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، قیر به دام افتاده بین ذرات فیلر



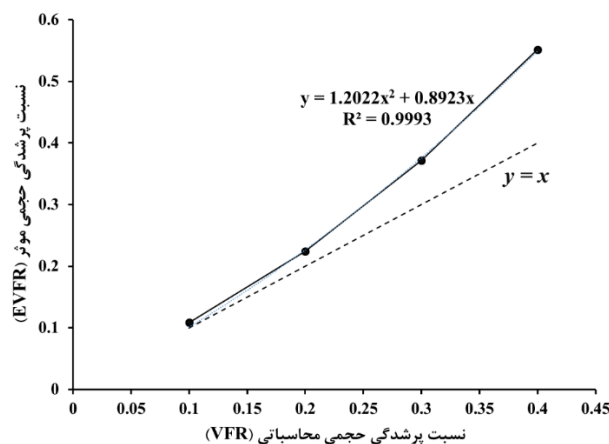
شکل ۱۲. مدل مفهومی مکانیزم سخت‌شوندگی ماستیک آسفالتی در درصدهای پرشدگی حجمی بیشتر



شکل ۱۳. قیر به دام افتاده بین ذرات فیلر (محدوده مشخص شده با خط چین) و محدوده جدید حاصل از اجتماع ذرات فیلر (محدوده مشخص شده با خط توپر) در ماستیک آسفالتی با ۴۰ درصد پرشدگی حجمی

می دهد که به منظور واسنجی مدل عددی نیاز به محاسبه تابع EVFR بر حسب مقادیر مختلف فرکانس می باشد. شکل ۱۴، این ارتباط و تابع برازش داده شده را برای فرکانس ۱/۵۹ هرتز که در این پژوهش مورد نظر بوده نشان داده است. بنابراین، با جاگذاری مقادیر متفاوت VFR در رابطه نشان داده شده در شکل ۱۴ می توان مقادیر متناظر EVFR در مدل سازی عددی را محاسبه نمود و مدل را واسنجی کرد. مشابه این شکل، با روندی مشابه، می تواند برای سایر فرکانس ها نیز تولید شود. لازم به ذکر است که رابطه EVFR بر حسب VFR تابعی از جنس فیلر بوده و رابطه ارائه شده در این پژوهش برای فیلر آهکی معتبر است.

به منظور تعیین EVFR که کمترین خطا را در مدل سازی عددی ماستیک آسفالتی ایجاد کند، از روند سعی و خطا به صورت سیستماتیک استفاده شده و با افزایش دادن مقادیر VFR در گام های نزدیک به یکدیگر، مقادیر EVFR محاسبه شده اند. شکل ۱۴، بیانگر این موضوع است که با در نظر گرفتن EVFR به جای VFR در ساخت مدل عددی، نتایج مدل عددی به نتایج مدل آزمایشگاهی در فرکانس ۱/۵۹ هرتز، که هدف اصلی این بررسی بوده، نزدیک شده است. با این حال، موجب سخت تر شدن مدل عددی در فرکانس های بالاتر شده است که به وضوح در مقادیر Error و Error2 که به ترتیب مربوط به مدل های ساخته شده بر حسب VFR و EVFR است خود را نشان داده است. این مسئله نشان



شکل ۱۴. رابطه بین VFR و EVFR در فرکانس ۱/۵۹ هرتز

۶. نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار رئولوژیک و مکانیکی ماستیک آسفالتی ساخته شده با فیلر خالص و فیلر آهکی به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، نمونه های ماستیک آسفالتی در چهار مقدار پرشدگی حجمی متفاوت ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد ساخته شده است. آزمایش جاروب فرکانس با استفاده از رئومتر برش دینامیک (DSR) روی نمونه های ماستیک آسفالتی در دماهای ۱۰-، صفر، ۱۰، ۱۶ و ۲۲ درجه سلسیوس در بازه فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰۰ هرتز انجام و مدول برشی مختلط (G^*) و زاویه فاز (δ) به عنوان خروجی های آزمایش اندازه گیری شده است.

ساختار ناهمگن ماستیک آسفالتی به صورت دوجزئی (ترکیب قیر و فیلر) بدون در نظر گرفتن حفرات هوا در مدل سازی عددی در نظر گرفته شده است. هندسه مدل های ناهمگن مورد استفاده در مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار MOA (توسعه داده شده در دانشگاه لیموژ فرانسه) ساخته شده که در آن از توزیع تصادفی ذرات فیلر در محیط ماتریس چسبنده استفاده می شود. در این مدل، ذرات فیلر به صورت الاستیک و ماتریس چسبنده به صورت ویسکوالاستیک تعریف شده است. مقایسه نتایج مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موارد زیر را مشخص کرده است:

- مدل عددی ناهمگن دو فازي در پرشدگی حجمی ۱۰ و ۲۰ درصد رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی را با خطای کمتر از ۱۰ درصد پیش بینی می کند که مبین توانمندی روش توزیع تصادفی ذرات فیلر در ساخت مدل های عددی است.
- مدل عددی ناهمگن دوفازی در پرشدگی حجمی ۳۰ و ۴۰ درصد پیش بینی مناسبی از رفتار ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی نداشته و با هدف رفع این مشکل درصد پرشدگی

حجمی مؤثر (EVFR) معرفی شده است که جهت واسنجی مدل عددی مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از EVFR در فرکانس مورد نظر (که در این تحقیق ۱/۵۹ هرتز بوده است) خطای مدل سازی عددی را به زیر ۵ درصد رسانده و می تواند متناسب با هر فرکانس محاسبه شود.

■ رابطه بین درصد پرشدگی حجمی (VFR) و درصد پرشدگی حجمی مؤثر (EVFR) به صورت یک تابع درجه دو با ضریب تعیین $R^2 = 0.9993$ قابل بیان بوده و با داشتن مقدار VFR متناسب با دانه بندی مخلوط آسفالتی و درصد فیلر مصرفی، مقدار EVFR که منجر به کمترین خطا در پیش بینی مشخصات ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی می شود را می توان پیش بینی نمود.

■ با توجه به اینکه درصد پرشدگی حجمی فیلر در ماستیک آسفالتی متناظر با هر مخلوط آسفالتی بر اساس منحنی دانه بندی آن قابل محاسبه می باشد و ماستیک آسفالتی تعیین کننده برخی از مهمترین ویژگی های مخلوط آسفالتی است، پیش بینی مشخصات ماستیک های آسفالتی با درصدهای پرشدگی حجمی متفاوت به شناخت دقیق تر رفتار مخلوط های آسفالتی حاوی درصدهای مختلف فیلر کمک شایانی می نماید. معرفی درصد پرشدگی حجمی مؤثر (EVFR) در این تحقیق موجب افزایش دقت پیش بینی مشخصات ویسکوالاستیک ماستیک آسفالتی و بالتبع موجب ارزیابی مناسب تر و پیش بینی دقیق تر رفتار مکانیکی مخلوط های آسفالتی خواهد شد. به عبارت دیگر، مهندسين روسازی این امکان را خواهند داشت که پیش از طراحی مخلوط های آسفالتی و انجام

خمش و بارگذاری محوری مورد مطالعه قرار گیرند تا دید جامعی نسبت به رفتار رئولوژیک و مکانیکی ماستیک آسفالتی حاصل شود. اندرکنش فیزیکی و شیمیایی فیلر و فیلر که وابسته به جنس فیلر مورد استفاده است نیز موضوعی است که بر رفتار سخت شوندگی ماستیک آسفالتی در مقادیر پرشدگی حجمی بیشتر از ۲۰ درصد تأثیر به سزایی داشته و می بایست در پژوهش های آتی مورد بررسی قرار گیرد.

۸. تقدیر و تشکر

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری های علمی بین المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

آزمایش های زمان بر و پرهزینه، با استفاده از بررسی مشخصات رئولوژیک و مکانیکی ماستیک آسفالتی متناظر با مخلوط آسفالتی مورد نظر، حالت های مختلف طرح مخلوط آسفالتی را بررسی، با یکدیگر مقایسه و بهترین گزینه را انتخاب نمایند.

۷. پیشنهاد پژوهش های آتی

این پژوهش بر مکانیزم سخت شوندگی ماستیک آسفالتی، ساخته شده با فیلر آهکی، در مود بارگذاری برشی، متمرکز بوده است. در تحقیقات آتی باید سایر انواع فیلر در مود بارگذاری برشی و سایر مودهای بازگذاری نظیر

۹. مراجع

- Alfaqawi, R. M., Fareed, A., Zaidi, S. B. A., Airey, G. D. and Rahim, A. 2022. "Effect of hydrated lime and other mineral fillers on stiffening and oxidative ageing in bitumen mastic". *Constr. Build. Mater.*, 315: 125789. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125789>
- Bastidas-Martínez, J. G., Rondón-Quintana, H. A. and Muniz de Farias, M. 2020. "Behavior of asphalt mastics containing different materials as filler". *Can. J. Civ. Eng.*, 48(4): 347-355. <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0342>
- Bi, Y., Guo, F., Zhang, J., Pei, J. and Li, R. 2021. "Correlation analysis between asphalt binder/asphalt mastic properties and dynamic modulus of asphalt mixture". *Constr. Build. Mater.*, 276: 122256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122256>
- Buttlar, W. G., Bozkurt, D., Al-Khateeb, G. G. and Waldhoff, A. S. 1999. "Understanding asphalt mastic behavior through micromechanics". *Transport. Res. Record*, 1681(1): 157-169.
- Dai, Q. 2011. "Two- and three-dimensional micromechanical viscoelastic finite element modeling of stone-based materials with X-ray computed tomography images". *Constr. Build. Mater.*, 25(2). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.066>
- Delaporte, B., Di Benedetto, H., Chaverot, P. and Gauthier, G. 2009. "Linear viscoelastic properties of bituminous materials including new products made with ultrafine particles". *Road Mater. Pavement Des.*, 10(1): 7-38.
- Di Benedetto, H., Delaporte, B. and Sauzeat, C. 2007. "Three-dimensional linear behavior of bituminous materials: Experiments and modeling". *Int. J. Geomech.*, 7(2): 149-157. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2007\)7:2\(149\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(149))
- Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzéat, C. and Delaporte, B. 2004. "Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes". *Road Mater. Pavement Des.*, 5(sup1): 163-202.
- El Haloui, Y., Fakhari Tehrani, F., Absi, J., Courreges, F., El Omari, M., Allou, F. and Petit, C. 2020. "Modelling of asphalt mixes based on X-ray computed tomography and random heterogeneous generation". *Int. J. Pavement Eng.*, 21(13): 1626-1637.
- Faheem, A. F. and Bahia, H. U. 2010. "Modelling of asphalt mastic in terms of filler-bitumen interaction". *Road Mater. Pavement Des.*, 11(sup1): 281-303.
- Fakhari Tehrani, F., Absi, J., Allou, F. and Petit, C. 2013. "Heterogeneous numerical modeling of asphalt concrete through use of a biphasic approach: Porous matrix/inclusions". *Comput. Mater. Sci.*, 69: 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.11.041>

- Hajikarimi, P., Fakhari Tehrani, F., Moghadas Nejad, F., Absi, J., Khodaii, A., Rahi, M. and Petit, C. 2019. "Mechanical behavior of polymer-modified bituminous mastics. II: Numerical approach". *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(1): 4018338.
- Hajikarimi, P. and Moghadas Nejad, F. 2021. "Applications of viscoelasticity: Bituminous materials characterization and modeling". Elsevier.
- Hajikarimi, P., Sadat Hosseini, A., Maniei, S., Rahi, M., Fakhari Tehrani, F. and Absi, J. 2023. "Effective volume filling ratio of siliceous fillers within bituminous composites: Experimental and micromechanical modelling". *Road Mater. Pavement Des.*, 24(6): 1482-1506. <https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2077811>
- Kim, R. Y. 2009. "Modeling of asphalt concrete". Mc-Graw Hill.
- Masoud, R., Alan, C. and Daniel, P. 2015. "New conceptual model for filler stiffening effect on asphalt mastic of microsurfacing". *J. Mater. Civ. Eng.*, 27(11): 4015033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001264](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001264)
- Mo, L. T., Huurman, M., Wu, S. P. and Molenaar, A. A. A. 2007. "Investigation into stress states in porous asphalt concrete on the basis of FE-modelling". *Finite Elem. Anal. Des.*, 43(4): 333-343. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.finel.2006.11.004>
- Ottosen, N. S. and Ristinmaa, M. 2005. "The mechanics of constitutive modeling". Elsevier.
- Sadat Hosseini, A., Hajikarimi, P. and Fini, E. H. 2024. "Simulation of sustainable structural composites produced from waste plastics and bitumen". *Clean Techn. Environ. Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02874-3>
- Shashidhar, N. and Shenoy, A. 2002. "On using micromechanical models to describe dynamic mechanical behavior of asphalt mastics". *Mech. Mater.*, 34(10): 657-669. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(02\)00166-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-6636(02)00166-7)
- Williams, M. L., Landel, R. F. and Ferry, J. D. 1955. "The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids". *J. Amer. Chem. Soc.*, 77(14): 3701-3707.
- You, Z., Adhikari, S. and Dai, Q. 2008. "Three-dimensional discrete element models for asphalt mixtures". *J. Eng. Mech.*, 134(12): 1053-1063. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-93992008134:121053>