

بررسی مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیک جهت تعیین خواص ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی داغ، گرم و حاوی خرده آسفالت

امین تناکی زاده، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان
 غلامعلی شفابخش*، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: Shafabakhsh@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۲ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

چکیده

یکی از نیازهای طراحی روسازی آسفالتی به روش مکانیستیک - تجربی تعیین مشخصات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی، از جمله مدول دینامیک و زاویه فاز، است. از آنجایی که آزمایش تعیین مدول دینامیک مخلوط آسفالتی زمان‌بر و گران است، مدل‌هایی جهت پیش‌بینی آن توسط محققین مختلف ارائه شده است. هدف از مطالعه حاضر، بررسی برخی مدل‌های پیش‌بینی موجود جهت تعیین خواص ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی داغ، گرم و حاوی خرده آسفالت است. برای این منظور، مخلوط‌های آسفالتی با دو نوع دانه‌بندی (با اندازه سنگدانه بیشینه اسمی ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متر) که معرف مخلوط‌های لایه رویه و آستر هستند و نیز سه نوع قیر خالص، قیر اصلاحی با افزودنی ساسوبیت و قیر بازیافتی به روش روسازی ممتاز طراحی شدند. آزمایش‌های رئومتر برشی دینامیک روی قیرها و تعیین مدول دینامیک روی مخلوط‌ها انجام شدند. مدل تجربی NCHRP 1-40D و مدل‌های میکرومکانیکی Hirsch و شکل اصلاح شده آن برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط آسفالتی با داده‌های آزمایشگاهی ارزیابی شدند. با بررسی نتایج مشخص شد که مدل تجربی NCHRP با انجام واسنجی نتایج خیلی خوبی دارد ($R^2 > 0.95$) و پس از آن مدل‌های نیمه تجربی و میکرومکانیکی Hirsch اصلاح شده و Hirsch عملکرد مناسبی داشتند. تمامی مدل‌ها در پیش‌بینی مدول مخلوط‌های با دانه‌بندی ریزتر عملکرد بهتری داشتند. به نظر می‌رسد که مدل‌های مورد بررسی در به حساب آوردن مقاومت ناشی از برخورد سنگدانه‌ها چندان موفق عمل نمی‌کنند. استفاده از مدل‌های پیش‌بینی مدول برای پیاده‌سازی روش طراحی جدید در سطح ۲ مناسب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدول دینامیک، مدل‌های پیش‌بینی، مخلوط آسفالتی گرم، روسازی آسفالتی بازیافتی

۱. مقدمه

دینامیک و زاویه فاز به عنوان داده‌های ورودی فرآیند طراحی استفاده شده است. عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر نیز به شدت تحت تأثیر مدول مخلوط آسفالتی است که خود با تغییر مشخصات مخلوط، سرعت بارگذاری و دما متغیر است.

در روش طراحی روسازی آسفالتی به شیوه مکانیستیک - تجربی^۱ که در راهنمای طراحی جدید آشتو مبنای تعیین ضخامت لایه‌های روسازی قرار گرفته است، از مشخصات ویسکوالاستیک مصالح آسفالتی مانند مدول

2 Phase angle

1

Mechanistic-empirical

وابسته به نوع مخلوط آسفالتی است. بنابراین، درک این که مقادیر مدول دینامیک برای مصالح بومی و محلی تا چه حد قابل مقایسه با مقادیر مدول دینامیک پیش‌بینی شده هستند حائز اهمیت است.

این مطالعه به دنبال دسترسی به اهداف زیر است:

- ۱- بررسی دقت مدل تجربی پیش‌بینی مدول در راهنمای طراحی جدید و واسنجی آن با مصالح بومی
- ۲- بررسی دقت مدل میکرومکانیکی Hirsch و شکل اصلاح شده آن جهت پیش‌بینی مدول دینامیک مصالح بومی

۳- ارزیابی مناسب بودن مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیک برای سه نوع مخلوط آسفالتی داغ، گرم^۴ (با افزودنی ساسوبیت^۵) و آسفالت بازیافتی^۶

۴- مقایسه این مدل‌ها از لحاظ پیش‌بینی مدول دینامیک دو نوع دانه‌بندی متداول در راه‌های کشور با اندازه سنگدانه بیشینه ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متر

به این منظور، آزمایش تعیین مدول دینامیک روی مخلوط‌های متراکم شده در آزمایشگاه صورت گرفته و نتایج با مقادیر تعیین شده از مدل‌ها مقایسه شده است. مخلوط‌های مورد بررسی با دو نوع دانه‌بندی معرف لایه-های آستر و رویه آسفالتی و به روش روسازی ممتاز طراحی شده‌اند. در این مطالعه، فرض بر رفتار الاستیک سنگدانه و رفتار ویسکوالاستیک قیر و آسفالت است. قیر به صورت غیر تراکم‌پذیر با نسبت پواسون برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. همچنین، بررسی‌ها مبتنی بر این فرض است که در مورد مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت، قیر حاصل از آسفالت بازیافتی به طور کامل با قیر جدید مخلوط می‌شود. در ادامه، پس از بررسی برخی مطالعات صورت گرفته در این زمینه و معرفی بعضی از مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیک، مصالح و روش‌های آزمایش به کار گرفته شده تشریح و نتایج به دست آمده بررسی شده‌اند.

۲. مطالعات پیشین

مدول مختلط، که راهی برای بیان خصوصیات ویسکوالاستیک در دامنه فرکانسی است، از طریق بارگذاری نوسانی در فرکانس‌های مختلف به دست می‌آید. برای هر فرکانس مورد نظر (ω) اگر تنش نوسانی ($\sigma_0 e^{i\omega t}$) (بر حسب پاسکال) اعمال شود، پاسخ کرنش برابر ($\epsilon_0 e^{i\omega t}$) نیز نوسانی در همان فرکانس، اما با وقفه‌ای به اندازه زاویه فاز (δ)، خواهد بود (کیم و همکاران، ۲۰۰۸). از آزمایش مدول مختلط، مقادیر مدول مختلط (E^*)، مدول دینامیک (E^*)، مدول ذخیره^۱ (E') و مدول آفت^۲ (E'') (همه بر حسب پاسکال) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} e^{i\phi} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} (\cos(\delta) + i \sin(\delta)) = |E^*| \times (\cos(\delta) + i \sin(\delta)) = E' + i E'' \quad (1)$$

بنابراین، مدول دینامیک یک ویژگی بنیادین مصالح ویسکوالاستیک در دامنه فرکانسی است. این ویژگی از طریق اعمال بارگذاری سینوسی در فرکانس‌های مختلف برای در نظر گرفتن خصوصیات ویسکوالاستیک خطی مخلوط آسفالتی تعیین می‌شود. به صورت ریاضی، مدول دینامیک برابر مقدار مطلق مدول مختلط تعریف می‌شود (دیاب و یو، ۲۰۱۳). منحنی اصلی^۳ ایجاد شده در دمای مرجع بر اساس نتایج آزمایش مدول دینامیک، برای محاسبه مدول دینامیک روی یک بازه وسیع دمایی و فرکانسی به کار می‌رود.

راهنمای طراحی مکانیستیک - تجربی آشتو برای اهداف طراحی روسازی سه سطح متمایز از ورودی‌های ترافیکی و خصوصیات مصالح را ارائه کرده است. در تحلیل سطح یک، انجام آزمایش مدول دینامیک آزمایشگاهی در چندین فرکانس و دما مورد نیاز است. با این وجود، روند آزمایشگاهی برای تعیین مدول دینامیک همیشه امکان پذیر نیست؛ چرا که زمان‌بر، گران و سخت است. تحلیل‌ها در سطوح دو و سه نیازمند داده‌های آزمایشگاهی مدول نیستند. اما مدل‌های تجربی که مبتنی بر ویژگی‌های مخلوط، از جمله خواص حجمی، هستند جهت تخمین مدول دینامیک استفاده می‌شوند. مطالعات زیادی نشان داده‌اند که عملکرد این مدل‌ها پایدار و متقن نیست و

۴	Warm Mix Asphalt (WMA)
۵	Sasobit
۶	Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

1	Storage modulus
2	Loss modulus
3	Master curve

و معلوم شد که این مدل برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی در محدوده دماهای کم مناسب بود. رابینز و تیم (۲۰۱۱) سه مدل Witzak 1-37A، NCHRP 1-40D و Hirsch را برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی جنوب شرق ایالات متحده مورد بررسی قرار دادند. مدل‌های Witzak و NCHRP بیشترین انحراف از مقادیر آزمایشگاهی را داشتند و مدل NCCHRP 1-40D مدول را تا حدود ۶۰٪ بیشتر تخمین می‌زد. مدل Hirsch دقیق‌ترین پیش‌بینی‌ها را داشت. واسنجی این مدل نشان داد که نسبت پواسون انتخاب شده برای قیر اثر کمی بر قابلیت پیش‌بینی مدل دارد. سینگ و همکاران (۲۰۱۱) قابلیت پیش‌بینی مدل Witzak 1-37A برای تعیین مدول دینامیک مخلوط‌های اوکلاهما را بررسی نمودند. مشاهده شد که این مدل مقدار مدول را در تمام سطوح درصد هوا بیشتر تخمین می‌زند و اقدام به واسنجی آن کردند. مدل واسنجی شده در تخمین مقدار مدول برای طراحی سطوح ۲ و ۳ و اجرای طراحی مکانیستیک - تجربی مفید بود. خطاب و همکاران (۲۰۱۴) نیز به ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیک Witzak 1-37A و NCHRP 1-40D در سه سطح مشخصات قیر برای اجرای راهنمای مکانیستیک - تجربی در عربستان پرداختند. مدول پیش‌بینی شده، انحراف و پراکنش در مقادیر، به‌خصوص در دماهای زیاد و کم، نشان داد. مدل 1-37A در مقایسه با 1-40D پیش‌بینی مدول بهتری در تمام سطوح ورودی مشخصات قیر داشت. بیشترین انحراف در مقادیر مدل 1-40D در دمای خیلی کم (۱۰- درجه سلسیوس) و در مدل 1-37A در دمای کم (۴/۴ درجه سلسیوس) رخ داد. سخایی فر و همکاران (۲۰۱۷) یک سری از مدل‌های تک-دمایی برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی توسعه دادند که در آن از خواص مختلف قیر و مخلوط برای تخمین مدول استفاده شده بود. نتایج بیانگر آن بود که مدل‌های جدید عملکرد خوبی نسبت به مدل‌های Witzak و Hirsch داشتند.

هو و همکاران (۲۰۱۶) عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را بر اساس مدول دینامیک پیش‌بینی شده از مدل‌های

معادلات زیادی برای تخمین سختی بتن آسفالتی توسعه یافته است که از اولین آن‌ها می‌توان به مدل Van der Poel اشاره کرد (وان در پول، ۱۹۵۴). مدل‌های قابل کاربرد جدیدتری شامل مدل Witzak 1-37A (آندری و همکاران، ۱۹۹۹)، مدل Bari & Witzak، مدل NCHRP 1-40D و مدل Hirsch نیز در مطالعات به چشم می‌خورد. طبق کارهای تحقیقاتی متعددی که به ارزیابی مدل‌های تجربی موجود پرداخته‌اند، عملکرد یک مدل با نوع مخلوط و دیگر خواص حجمی آن متغیر است. برخی محققین عملکرد مدل Witzak 1-37A را برای مخلوط‌های محلی بررسی کرده و دریافته‌اند که این مدل، مقدار مدول دینامیک را بیشتر تخمین می‌زند (کیم و همکاران، ۲۰۰۵؛ ابولاردی، ۲۰۰۶). همچنین، ابولاردی (۲۰۰۶) و برگیسون و همکاران (۲۰۰۵) نتیجه گرفتند که پیش‌بینی مدول مدل Witzak 1-37A در دماهای بالاتر نسبت به دماهای کمتر، نزدیک‌تر به مقادیر اندازه‌گیری شده بود. با این وجود، طبق مطالعه دیگری، مدل Witzak 1-37A مقدار مدول را کمتر تخمین می‌زند و پیش‌بینی‌ها در دماهای کم و میانی نزدیک‌تر به مقادیر اندازه‌گیری شده بودند (پلتی و همکاران، ۲۰۱۳).

رحمان و همکاران (۲۰۱۷) مدل‌های مبتنی بر رئولوژی قیر جهت پیش‌بینی مدول دینامیک و زاویه فاز مخلوط‌های آسفالتی را ارائه کردند که دو پارامتر مدول نرمی و ضریب یکنواختی سنگدانه‌ها را نیز به عنوان ورودی در نظر می‌گرفت. نتایج، بیانگر تطابق نسبتاً خوب مدل با نتایج آزمایشگاهی مدول در نیومکزیکو بود. ژو و همکاران (۲۰۱۱) منحنی‌های اصلی را برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر توسعه دادند و انطباق مدل Witzak 1-37A را بررسی کردند. مشخص شد که این مدل برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی پلیمری مناسب است. کیم و بوتلار (۲۰۱۱) برای غلبه بر محدودیت‌های مدل تجربی Witzak، یک چارچوب مدل‌سازی میکرومکانیکی بر اساس نظریه محیط واسط مؤثر طرح تفاضلی^۲ را توسعه دادند. آزمایش مدول دینامیک روی نمونه‌ها به روش استوانه توخالی انجام شد

^۱Differential Scheme Effective Medium (DSEM)^۲National Cooperative Highway Research Program

بر اساس مرور مطالعات صورت گرفته، در این مقاله، مدل تجربی NCHRP 1-40D و نیز مدل های نیمه تجربی مبتنی بر میکرومکانیک Hirsch و Hirsch اصلاح شده برای پیش بینی مدول دینامیک مخلوط های آسفالتی بررسی شدند.

۱-۲. مدل Bari and Witzak

باری و ویتزاک (۲۰۰۶) مدل Witzak 1-37A را با استفاده از ۷۴۰۰ داده از ۳۴۶ مخلوط آسفالتی اصلاح کردند. مدل اصلاح شده، مدول برشی دینامیک و زاویه فاز قیر را به عنوان پارامترهای ورودی در مدل قرار می-دهد که در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$\log E^* = -0.0349 + 0.754 \left(|G_b^*|^{-0.0052} \right) \times \left(6.65 - 0.032\rho_{200} + 0.0027(\rho_{200})^2 + 0.011\rho_4 - 0.0001(\rho_4)^2 + 0.006\rho_{38} - 0.00014(\rho_{38})^2 - 0.08V_a - 1.06 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \right) \quad (2)$$

$$+ \frac{2.56 + 0.03V_a + 0.71 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + 0.012\rho_{38} - 0.0001(\rho_{38})^2 - 0.01\rho_{34}}{1 + \exp(-0.7814 - 0.5785 \log(|G_b^*|) + 0.8834 \log(\delta_b))}$$

می تواند به خوبی رئولوژی قیر با تغییرات دما و فرکانس بارگذاری را در نظر بگیرد (باری و ویتزاک، ۲۰۰۶).

۲-۲. مدل NCHRP 1-40D

مدل باری و ویتزاک در پروژه NCHRP 1-40D مورد بازبینی قرار گرفت (ویتزاک و همکاران، ۲۰۰۷). این مدل، همان فرم ریاضی تابع سیگموئید در نسخه قبلی را داشت. اما از میزان انطباق بهتر، انحراف کمتر و دقت بیشتری برخوردار بود. این مدل به صورت رابطه (۳) ارائه شده و تمامی متغیرها همانند رابطه قبل تعریف می شوند.

$$\log E^* = 0.02 + 0.758 \left(|G_b^*|^{-0.0009} \right) \times \left(6.8232 - 0.03274\rho_{200} + 0.00431(\rho_{200})^2 + 0.0104\rho_4 - 0.00012(\rho_4)^2 + 0.00678\rho_{38} - 0.00016(\rho_{38})^2 - 0.0796V_a - 1.1689 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) \right) \quad (3)$$

$$+ \frac{1.437 + 0.03313V_a + 0.6926 \left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right) + 0.00891\rho_{38} - 0.00007(\rho_{38})^2 - 0.0081\rho_{34}}{1 + \exp(-4.5868 - 0.8176 \log(|G_b^*|) + 3.2738 \log(\delta_b))}$$

Witzak 1-37A و NCHRP 1-40D ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که این مدل ها برای پیش بینی عملکرد مخلوط آسفالتی مناسب هستند. همچنین، مشخص شد که مدل NCHRP 1-40D مقادیر مدول دینامیک پیش-بینی شده بهتری ارائه می کند. نعمتی و داو (۲۰۱۸) مدل های پیش بینی مبتنی بر خواص اسمی مخلوط که طی طرح اختلاط در دسترس هستند برای مدول مختلط مخلوط آسفالتی ارائه کردند. شاخص های رئولوژیک برای عملکرد روسازی نیز به سادگی با استفاده از مدل ها قابل محاسبه بودند و طراحان می توانند با بهینه سازی مشخصات طرح اختلاط، قابلیت اطمینان طرح را افزایش و هزینه های چرخه عمر را کاهش دهند.

که در آن E^* مدول دینامیک مخلوط بر حسب $|G_b^*|$ ، ρ_{200} مدول برشی دینامیک قیر بر حسب ρ_{200} درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰، ρ_4 درصد تجمعی مانده روی الک شماره ۴، ρ_{38} درصد تجمعی مانده روی الک ۳/۸ اینچ، ρ_{34} درصد تجمعی مانده روی الک ۳/۴ اینچ، V_a میزان درصد فضای خالی، V_{beff} میزان حجمی قیر مؤثر و δ_b زاویه فاز قیر است. پایگاه داده استفاده شده برای توسعه این مدل شامل شرایط پیرشدگی متنوع از جمله پیرشدگی های کوتاه مدت در آون، آزمایشگاهی، در کارخانه آسفالت و میدانی است. در این مدل، ویسکوزیته به دست آمده از رابطه A-VTS با ورود مستقیم مدول برشی دینامیک قیر و زاویه فاز جایگزین شده است که

$$P_C = \frac{\left(20 + \frac{VFA \times 3 |G_b^*|}{VMA}\right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \times 3 |G_b^*|}{VMA}\right)^{0.58}} \quad (5)$$

که در آن‌ها $|E^*|$ مدول دینامیک بر حسب ψ ، VMA میزان حجم فضای خالی سنگدانه بر حسب درصد، VFA میزان حجم فضای خالی پر شده با قیر بر حسب درصد است و سایر پارامترها مشابه روابط قبل تعریف می‌شوند. پایگاه داده استفاده شده برای توسعه مدل، بازه وسیعی از مقادیر اندازه‌گیری شده مدول در دماهای از ۹- تا ۵۴ درجه سلسیوس را در بر می‌گیرد. اما تنها شامل دو فرکانس بارگذاری ۰/۱ و ۵ هرتز است (کریستنسن و همکاران، ۲۰۰۳). در یک مطالعه قیاسی، پیش‌بینی‌های مدل Hirsch برای مدول دینامیک مخلوط نسبت به مدل Witzzak 1-37A نزدیک‌تر به مقادیر آزمایشگاهی بودند (دونگر و همکاران، ۲۰۰۵).

۲-۴. مدل اصلاح شده Hirsch

ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) شکل اصلاح شده‌ای از مدل Hirsch را برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط آسفالتی ارائه نمودند. مدل ارائه شده خاصیت ویسکوالاستیک قیر و به عبارتی اثر زاویه فاز را با ورود مدل برگر جهت توصیف رفتار قیر در نظر می‌گیرد و در مقایسه با مدل‌های Witzzak و Hirsch دقت پیش‌بینی بهتری دارد. در این مدل، مقدار مدول دینامیک قیر به جای مدول برشی دینامیک آن قرار می‌گیرد. شکل کلی مدل به صورت رابطه زیر است:

آود و همکاران (۲۰۱۱) دقت پیش‌بینی و انحراف مدل را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که هنگام استفاده از داده‌های قیر معمولی، این مدل بهترین تخمین‌ها را از مدول دینامیک تولید می‌کند. با این وجود، در دماهای بیشتر و کمتر، مقادیر مدول با انحراف قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. در حالتی که قیر بر اساس سطح یک راهنمای طراحی تعیین مشخصات شود، مدل کمی مقدار مدول را در دماهای کم کمتر و در دماهای زیاد بیشتر تخمین می‌زند. از طرف دیگر، با تعیین مشخصات قیر در سطح ۳ راهنمای طراحی، مدل در تمام دماها مقادیر مدول را بیشتر تخمین می‌زند.

۲-۳. مدل Hirsch

این مدل، یک روش معقول و نیمه تجربی برای پیش‌بینی مدول دینامیک بتن آسفالتی است که بر اساس نگارشی از قانون مخلوط‌ها^۱ به نام مدل Hirsch، که ترکیبی از المان‌های سری و موازی از فازهای ماده مرکب است، ایجاد گردیده است. برای کاربرد این مدل در مورد مخلوط آسفالتی، کریستنسن و همکاران (۲۰۰۳) مدلی را برای پیش‌بینی مدول مخلوط از مدول برشی قیر و خواص حجمی مخلوط توسعه دادند. پایگاه داده‌ای متشکل از ۱۸ مخلوط متفاوت با ۸ نوع قیر و ۵ دانه‌بندی متفاوت در توسعه مدل به کار رفتند و روابط زیر حاصل شدند:

$$|E^*| = P_C \left[4200000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G_b^*| \left(\frac{VFA \times VMA}{10000} \right) \right] + (1 - P_C) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{VFA \times 3 |G_b^*|} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$|E_{mix}^*| = P_C \left[E_a \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + |E_b^*| \left(\frac{VFA \times VMA}{10000} \right) \right] + (1 - P_C) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{E_a} + \frac{VMA}{VFA \times |E_b^*|} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$P_C = \frac{\left(20 + \frac{VFA \times |E_b^*|}{VMA}\right)^{0.58}}{650 + \left(\frac{VFA \times |E_b^*|}{VMA}\right)^{0.58}} \quad (7)$$

$$\frac{1}{|E_b^*|} = \sqrt{\left(\frac{1}{2(1+\nu)|G_b^*| \cos \delta} + \frac{E_2}{E_2^2 + \eta_2^2 \omega^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\eta_1 \omega} + \frac{\eta_2 \omega}{E_2^2 + \eta_2^2 \omega^2}\right)^2} \quad (8)$$

الاستیسیته سنگدانه مشابه با مدل اصلی برابر ۴۲۰۰۰۰۰ (psi) در نظر گرفته شده است.

که در آن ها $|E_b^*|$ مدول دینامیک قیر بر حسب E_a , psi، مدول الاستیسیته سنگدانه بر حسب ν ، نسبت پواسون قیر، ω فرکانس زاویه ای کاهش یافته بر حسب رادیان بر ثانیه $\omega = 2\pi f$ و f فرکانس بر حسب هرتز) و E_2 ، η_1 و η_2 ضرایب مدل برگر قیر هستند که با حداقل سازی خطا در نرم افزار اکسل به دست می آیند. توسعه دهندگان مدل بر این باورند که این مدل قابلیت پیش بینی بهتر مقدار مدول مخلوط های خاصی که دارای درصد بالای آسفالت بازیافتی (RAP)، پلیمر استایرن بوتادین استایرن (SBS) و گیلسونایت هستند را داراست (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷). لازم به ذکر است که در این مطالعه، مقدار مدول

۳. مصالح و روش های آزمایش

۳-۱. مصالح

قیر مورد استفاده در این تحقیق از شرکت نفت پاسارگاد تهیه شده و دارای درجه عملکردی PG64-16 است. مشخصات این قیر طبق استاندارد آشتو ام-۳۲۰ (AASHTO, 2015a) در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات قیر پایه

وضعیت قیر	مشخصه	استاندارد آزمایش	معیار استاندارد	نتیجه آزمایش
	نقطه اشتعال (°C)	AASHTO T48	>۲۳۰	۳۱۳
قیر پیرنشده	ویسکوزیته در ۱۳۵ °C (Pa.s)	AASHTO T316	<۳	۰/۴۱۲
	$G^*/\sin \delta$ با برش دینامیک در دمای ۶۴ °C و ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۱	۲/۴۰
قیر پیرشده	تغییر جرم پس از RTFO (%)	AASHTO T240	<۱	۰/۰۶
در RTFO	$G^*/\sin \delta$ با برش دینامیک در دمای ۶۴ °C و ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۲/۲	۲/۶۵
	$G^* \cdot \sin \delta$ با برش دینامیک در دمای ۲۱ °C و ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	<۵۰۰۰	۳۳۸۵
قیر پیرشده در PAV	سختی خزشی در دمای ۶ °C - و زمان ۶۰ ثانیه (MPa)	AASHTO T313	<۳۰۰	۱۱۱
	مقدار m در دمای ۶ °C - و زمان ۶۰ ثانیه	AASHTO T313	>۰/۳	۰/۳

در این مطالعه، ساسوبیت به میزان ۱/۵ درصد وزنی قیر و در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به کمک یک همزن برشی دور بالا با قیر مخلوط شد تا قیر اصلاح شده همگنی به دست آید. قیر حاصل، پایداری ذخیره سازی گرم را بدون تمایل به

جداشدگی فاز دارد. طبق آزمایش‌های صورت گرفته، قیر اصلاحی دارای رده عملکردی PG64-10 است. مشخصات قیر اصلاحی با ساسوبیت در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. مشخصات قیر اصلاح شده با ساسوبیت

وضعیت قیر	مشخصه	استاندارد آزمایش	معیار استاندارد	نتیجه آزمایش
	نقطه اشتعال (°C)	AASHTO T48	>۲۳۰	۳۱۳
قیر پیرنشده	ویسکوزیته در ۱۳۵ °C (Pa.s)	AASHTO T316	<۳	۰/۳۱۴
	G*/sinδ با برش دینامیک در دمای ۶۴ °C و ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۱	۳/۴۷
قیر پیرشده	تغییر جرم پس از RTFO (%)	AASHTO T240	<۱	۰/۰۸
در RTFO	G*/sinδ با برش دینامیک در دمای ۶۴ °C و ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۲/۲	۳/۹۹
	G*.sinδ با برش دینامیک در دمای ۲۱ °C و ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	<۵۰۰۰	۳۶۶۳
قیر پیرشده در PAV	سختی خزشی در دمای ۶ °C و زمان ۶۰ ثانیه (MPa)	AASHTO T313	<۳۰۰	۱۵۶
	مقدار m در دمای ۶ °C و زمان ۶۰ ثانیه	AASHTO T313	>۰/۳	۰/۲۵۴

عملکردی، این قیر دارای رده PG94-4 است. مشخصات قیر بازیافتی در جدول ۳ آمده است. مصالح سنگی به کار رفته در این مطالعه از نوع سیلیسی رودخانه‌ای بوده و مشخصات آن به همراه مشخصات سنگدانه بازیافتی از خرده آسفالت در جدول ۴ آمده است.

قیر نمونه‌های خرده آسفالت با انجام فرآیند استخراج و جداسازی فیلر از محلول استخراج مطابق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام- دی ۲۱۷۲ (ASTM، ۲۰۱۱) تقطیر محلول حاصل به روش اَبسون طبق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام- دی ۱۸۵۶ (ASTM، ۲۰۱۵) بازیابی شد. بر اساس درجه‌بندی

جدول ۳. مشخصات قیر بازیافتی

وضعیت قیر	مشخصه	استاندارد آزمایش	معیار استاندارد	نتیجه آزمایش
	نقطه اشتعال (°C)	AASHTO T48	>۲۳۰	۳۲۸
قیر پیرنشده	ویسکوزیته در ۱۳۵ °C (Pa.s)	AASHTO T316	<۳	۱/۶۰۳
	G*/sinδ با برش دینامیک در دمای ۶۴ °C و ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۱	۲۷/۰۲
قیر پیرشده	تغییر جرم پس از RTFO (%)	AASHTO T240	<۱	۰/۱۱
در RTFO	G*/sinδ با برش دینامیک در دمای ۶۴ °C و ۱۰ rad/s (kPa)	AASHTO T315	>۲/۲	۲۹/۱۹
	G*.sinδ با برش دینامیک در دمای	AASHTO T315	<۵۰۰۰	۶۹۰۵

		۲۱ °C و ۱۰ rad/s (kPa)			
۱۱۹	<۳۰۰	AASHTO T313	سختی خزشی در دمای ۶-°C و زمان ۶۰ ثانیه (MPa)	قبر پیرشده PAV در	
۰/۲۶۱	>۰/۳	AASHTO T313	مقدار m در دمای ۶-°C و زمان ۶۰ ثانیه		

جدول ۴. مشخصات مصالح سنگی

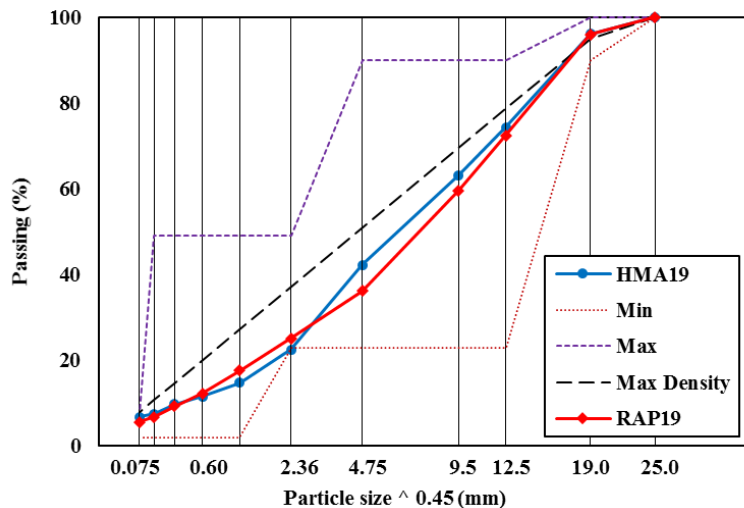
مشخصه	استاندارد	معیار	شن درشت	شن متوسط	شن ریز	ماسه	بازیافتی درشت دانه	بازیافتی ریزدانه
وزن مخصوص ظاهری	ASTM C127,C128	-	۲/۶۶۸	۲/۶۷۴	۲/۶۷۵	۲/۶۸۱	۲/۶۲۰	۲/۶۸۲
وزن مخصوص حقیقی	ASTM C127,C128	-	۲/۵۵۳	۲/۵۴۶	۲/۵۲۹	۲/۴۸۳	۲/۵۰۹	۲/۴۸۹
درصد جذب آب (%)	ASTM C127,C128	-	۱/۷	۱/۹	۲/۲	۳/۰	۱/۶۸۴	۲/۸۸۷
سنگدانه های پهن و دراز نسبت ۱ به ۵ (%)	ASTM D4791	<۱۰	۰/۲	۰/۶	۲/۴	-	۰/۵	-
شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ در یک جبهه (%)	ASTM D5821	>۹۵	۹۸	۹۷	۹۸	-	۹۹	-
شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ در دو جبهه (%)	ASTM D5821	>۹۰	۹۴	۹۴	۹۵	-	۹۵	-
گوشه داری مصالح سنگی ریزدانه (%)	ASTM C1252	>۴۵	-	-	-	۴۵/۵	-	۴۵

۲-۲. روش های آزمایش

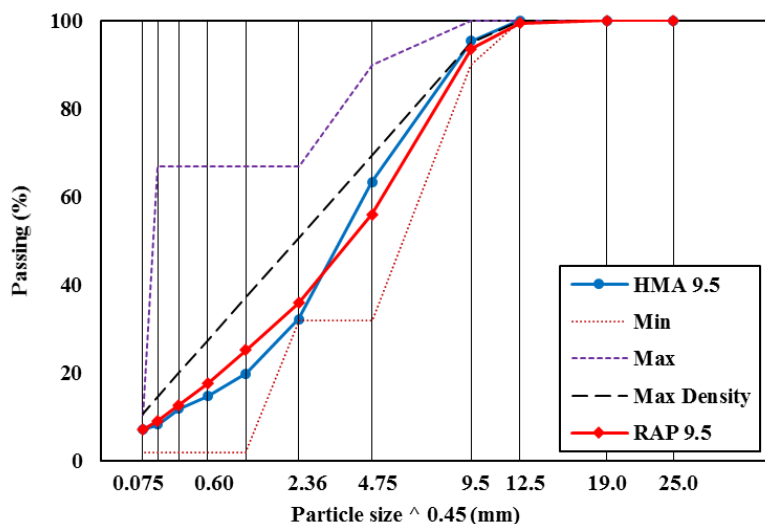
۲-۲-۱. طرح اختلاط

در این مطالعه، چهار طرح اختلاط به روش روسازی ممتاز آشتو آر-۳۵ (AASHTO، b ۲۰۱۵) و مطابق با مشخصات آشتو ام-۳۲۳ (AASHTO، c ۲۰۱۵) با در نظر گرفتن میزان ترافیک سالانه ۳ تا ۱۰ میلیون محور

استاندارد هم ارز برای دو نوع دانه بندی توپر درشت با اندازه سنگدانه بیشینه اسمی ۱۹ و ۹/۵ میلی متر و برای مخلوط های دارای خرده آسفالت و بدون آن تهیه شده است. منحنی دانه بندی مخلوط ها به همراه حدود بالا و پایین روسازی ممتاز در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده-اند.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مخلوط‌های معمولی و دارای خرده آسفالت با اندازه ماکزیمم ۱۹ میلی‌متر



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مخلوط‌های معمولی و دارای خرده آسفالت با اندازه ماکزیمم ۹/۵ میلی‌متر

۱/۱۶ درجه صورت گرفته است. مخلوط‌ها برای میزان فضای خالی 4 ± 0.5 درصد طرح شده‌اند. میزان قیر بهینه، میزان خرده آسفالت و درصد فضای خالی مخلوط‌ها در جدول ۵ آمده است.

مخلوط‌های آسفالت گرم (WMA) نیز با طراحی مشابه مخلوط‌های معمولی تهیه شدند و تنها دمای اختلاط و تراکم آن‌ها ۲۰ درجه سلسیوس کمتر از مخلوط آسفالتی داغ (HMA) بود. تراکم مخلوط‌ها به روش ژیراتوری و با تعداد چرخش ۱۰۰ دور و زاویه چرخش

جدول ۵. مشخصات مخلوط‌های آسفالتی

میزان خرده آسفالت (%)	وزن مخصوص واقعی مخلوط آسفالتی	درصد فضای خالی (%)	VFA (%)	VMA (%)	درصد قیر بهینه	نوع مخلوط
-	۲/۳۰۱	۳/۰۸	۷۶/۹۰	۱۳/۳۱	۴/۹۵	HMA19
-	۲/۲۵۴	۳/۶۷	۷۶/۴۸	۱۵/۵۸	۵/۵	HMA9.5
۳۰	۲/۲۸۱	۴/۰۴	۷۱/۷۵	۱۴/۳۰	۵/۱	RAP19
۶۰	۲/۲۴۴	۴/۲۵	۷۳/۲۲	۱۵/۸۷	۵/۹	RAP9.5

صورت فشار محوری به نمونه استوانه‌ای شکل به ارتفاع ۶ و قطر ۴ اینچ اعمال شده و میزان تغییر شکل آن اندازه‌گیری می‌شود. آزمایش در ۵ دمای ۶-، ۴/۴، ۲۱/۱، ۳۷/۸ و ۵۴ درجه سلسیوس و در فرکانس‌های بارگذاری ۲۵، ۱۰، ۵، ۱، ۰/۵ و ۰/۱ هرتز صورت می‌گیرد. در ادامه، نتایج آزمایش و ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی مختلف مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۳. نتایج آزمایشگاهی و ارزیابی مدل‌های

پیش‌بینی

برای نمایش نتایج آزمایش مدول دینامیک مخلوط آسفالتی از منحنی‌های واحدی به نام منحنی اصلی استفاده می‌شود. به طور معمول، برای ایجاد منحنی اصلی، از مدل‌هایی استفاده می‌شود که در مورد این مطالعه مدل استفاده شده همان مدل به کار رفته در راهنمای طراحی مکانیستیک-تجربی آشتو است. مدل به کار رفته سیگموئید لجستیک تعمیم یافته^۱ (GLSM) است که در رابطه زیر نشان داده شده است (آشون و همکاران، ۲۰۱۷):

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{\left(1 + \lambda \exp(\beta + \gamma(\log f_R))\right)^{\frac{1}{\lambda}}}$$

$$\phi = -90 \times \alpha \gamma \times \frac{\exp(\beta + \gamma(\log f_R))}{\left(1 + \lambda \exp(\beta + \gamma(\log f_R))\right)^{\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)}} \quad (9)$$

که در آن $|E^*|$ مدول دینامیک مخلوط بر حسب پاسکال، ϕ زاویه فاز مخلوط بر حسب درجه، f_R فرکانس کاهش یافته بر حسب هرتز و δ ، α ، λ و β ضرایب رگرسیون هستند که با استفاده از افزونه Solver نرم‌افزار اکسل تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است که برای تعیین فرکانس کاهش یافته نیز از اصل برهم نهی دما - زمان و رابطه WLF^۲ استفاده شده است که در ادامه آورده شده است (نگوین و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\log a(t) = \frac{-C_1 \times (T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)} \quad (10)$$

۲-۲-۲. آزمایش رئومتر برشی دینامیک قیر

این آزمایش مطابق با استاندارد آشتو تی-۳۱۵ (AASHTO، ۲۰۱۵ d) برای اندازه‌گیری خواص ویسکوالاستیک قیر از جمله مدول دینامیک برشی و زاویه فاز به کار رفت. آزمایش روی نمونه‌های پیرشده در آون لایه نازک چرخشی (RTFO) و نیز محفظه پیرشدگی تحت فشار (PAV) در دماهای ۲۱/۱، ۳۷/۸، ۵۴ و ۶۴ درجه سلسیوس و به ترتیب با هندسه صفحات موازی با قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت نمونه یک میلی‌متر و صفحات موازی با قطر ۸ میلی‌متر و ضخامت نمونه ۲ میلی‌متر انجام شد. آزمایش به صورت کنترل تنش و با رعایت قرارگیری مصالح در محدوده رفتار خطی در فرکانس‌های ۰/۱ تا ۲۵ هرتز صورت پذیرفته است.

۲-۲-۳. آزمایش رئومتر تیرچه خمشی قیر

جهت ارزیابی خواص نمونه در دمای کم از آزمایش رئومتر تیرچه خمشی قیر در دماهای ۶- و صفر درجه سلسیوس استفاده شده است. این آزمایش مطابق با استاندارد آشتو تی-۳۱۳ (AASHTO، ۲۰۱۵ e) و با اعمال بار ثابت خزشی ۹۸۰ میلی‌نیوتنی به مدت ۲۴۰ ثانیه در وسط نمونه تیرچه قیری و تعیین سختی خزشی و مقدار m صورت گرفته است. از آنجایی که در این مطالعه، منحنی اصلی مدول دینامیک و زاویه فاز با ترکیب داده‌های دو آزمایش رئومتر برشی دینامیک و رئومتر تیرچه خمشی ایجاد می‌شود، ابتدا مقادیر سختی خزشی به مدول ذخیره و تلف شده تبدیل شده و به کمک آن مدول دینامیک و زاویه فاز تعیین گردیدند. روش تبدیل مشابه روند ارائه شده توسط رو و شاروک (۲۰۱۱) بود.

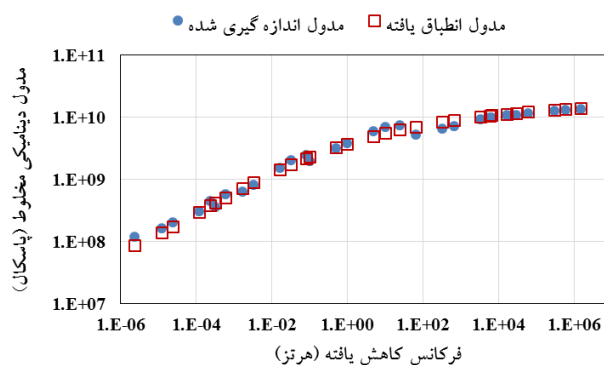
۲-۲-۴. آزمایش تعیین مدول دینامیک مخلوط

آسفالتی

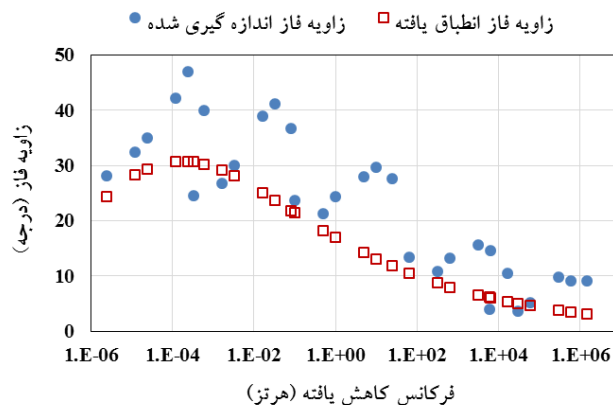
جهت تعیین ویژگی‌های ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی (مدول دینامیک و زاویه فاز) از آزمایش تعیین مدول دینامیک مطابق با استاندارد آشتو تی-۳۴۲ (AASHTO، ۲۰۱۵ f) استفاده شد. در این روش، بار نیم‌سینوسی به

در این مطالعه، با استفاده از نتایج آزمایش رثومتر برشی دینامیک قیر و نیز مشخصات طرح اختلاط مخلوطها از مدل‌های پیش‌بینی NCHRP 1-40D، Hirsch و Hirsch اصلاح شده جهت پیش‌بینی مقادیر مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است.

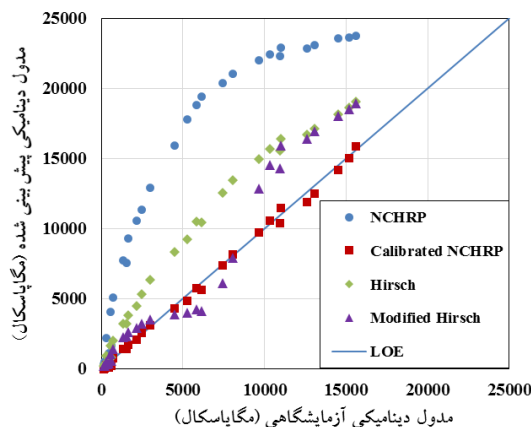
که در آن $a(t)$ ضریب انتقال، T دمای آزمایش بر حسب درجه کلوین، T_R دمای مرجع بر حسب درجه کلوین و C_1 و C_2 ضرایب ثابت هستند. در این مطالعه، دمای مرجع $21/1$ درجه سلسیوس ($294/25$ درجه کلوین) در نظر گرفته شده است. برای رعایت اختصار در شکل‌های ۳ و ۴ منحنی اصلی مدول و زاویه فاز مخلوط HMA19 به عنوان نمونه نشان داده شده‌اند.



شکل ۳. منحنی اصلی مدول دینامیک مخلوط آسفالتی HMA19



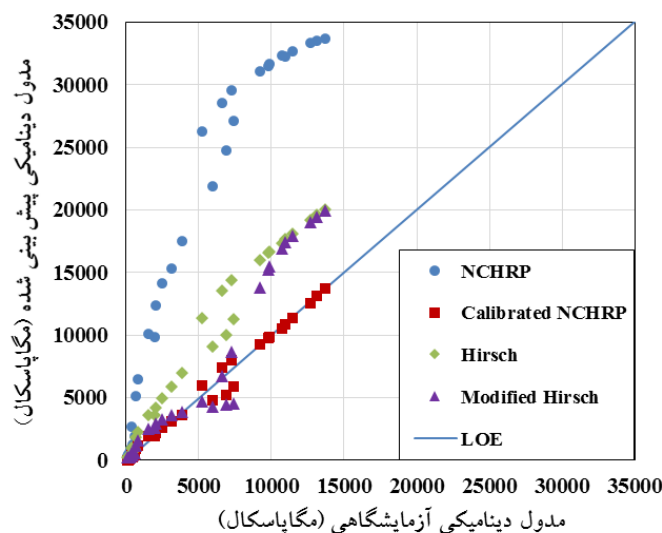
شکل ۴. منحنی اصلی زاویه فاز مخلوط آسفالتی HMA19



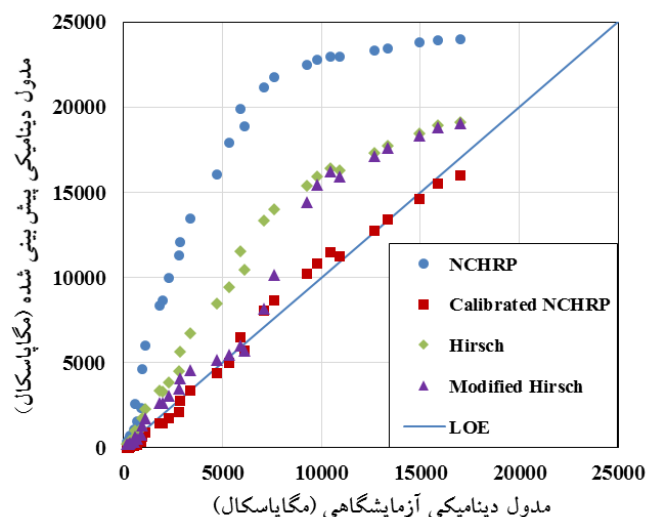
شکل ۵. مقایسه مقادیر مدول پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی HMA9.5

مدول پیش بینی شده و مدول اندازه گیری شده به کمک افزونه Solver نرم افزار اکسل استفاده شده است. دقت پیش بینی این مدل ها در شکل های ۵ تا ۱۰ برای مخلوط های مختلف نشان داده شده است.

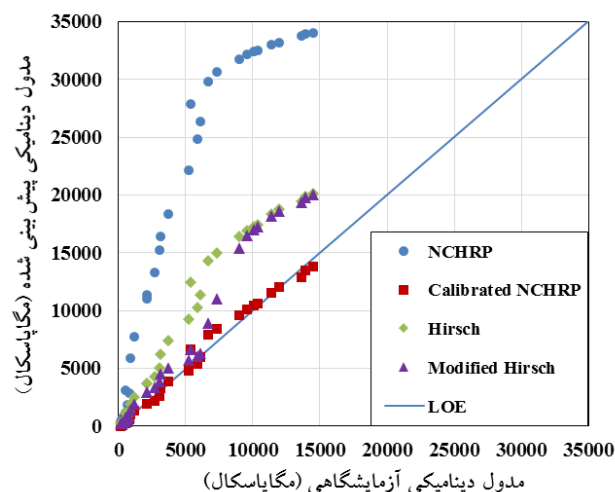
بر اساس نتایج ابتدایی برازش مقادیر مدول، مدل NCHRP 1-40D که مدلی کاملاً تجربی است، نتایج مناسبی ارائه نداد که بدین منظور اقدام به واسنجی مدل برای داده های مدول دینامیک مطالعه حاضر شد. برای واسنجی این مدل نیز از روش حداقل کردن اختلاف مقدار



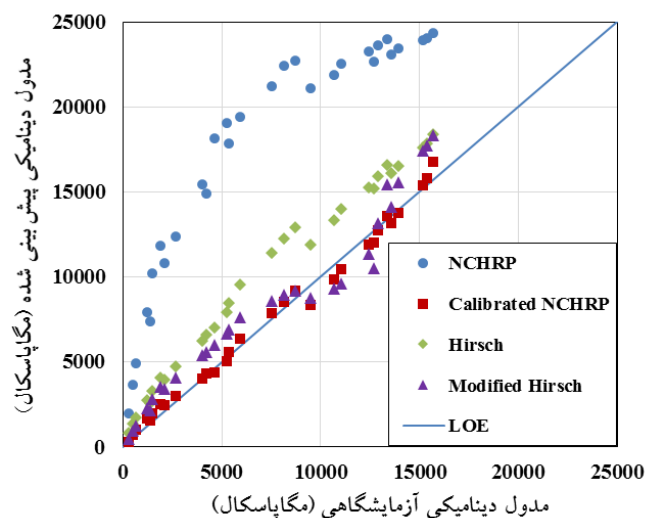
شکل ۶. مقایسه مقادیر مدول پیش بینی شده و آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی HMA19



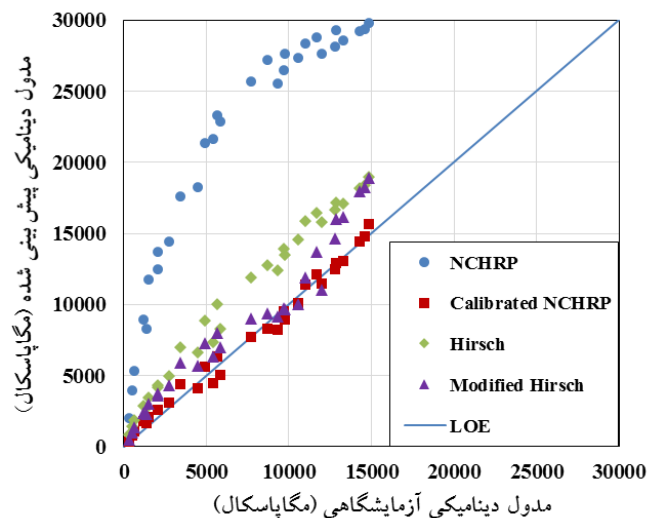
شکل ۷. مقایسه مقادیر مدول پیش بینی شده و آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی WMA9.5



شکل ۸. مقایسه مقادیر مدول پیش بینی شده و آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی WMA19



شکل ۹. مقایسه مقادیر مدول پیش بینی شده و آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی RAP9.5



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر مدول پیش بینی شده و آزمایشگاهی مخلوط آسفالتی RAP19

که در آن ها $|E^*_{predicted}|_i$ مقدار مدول دینامیک پیش بینی شده داده i ، $|E^*_{measured}|_i$ مقدار مدول دینامیک اندازه گیری شده داده i ، $|E^*_{measured}|_{mean}$ مقدار میانگین مدول دینامیک اندازه گیری شده و n تعداد داده (در اینجا ۳۰ عدد برای هر مخلوط) است. جدول ۶ مقدار پارامترهای آماری مخلوط های مختلف را نشان می دهد. مقادیر جدول ۶ نیز مؤید رتبه بندی قبلی هستند. لازم به ذکر است که مقادیر جدول ۶ برای حالت مختصات حسابی هستند و در صورت انطباق داده ها در فضای لگاریتمی، مقادیر پارامترهای آماری بهبود می یابند. برای تعیین کیفیت میزان انطباق مدل ها می توان از جدول ۷ استفاده کرد. بر اساس درجه بندی کیفیت جدول ۷ از لحاظ خوبی برازش و میزان انطباق مدل NCHRP 1-40D واسنجی شده دارای عملکرد عالی برای تمام مخلوط ها است. مدل Hirsch اصلاح شده برای مخلوط باز یافتی ۹/۵ میلی متری دارای عملکرد عالی، برای مخلوط های معمولی ۹/۵ میلی متری، گرم ۹/۵ میلی متری و باز یافتی ۱۹ میلی متری دارای عملکرد خوب و برای مخلوط های معمولی و گرم ۱۹ میلی متری دارای برازش متوسط است. مدل Hirsch برای مخلوط باز یافتی ۹/۵ میلی متری دارای عملکرد خوب، برای مخلوط های معمولی و گرم ۹/۵ میلی متری و باز یافتی ۱۹ میلی متری دارای عملکرد متوسط و برای مخلوط های معمولی و گرم ۱۹ میلی متری برازش خیلی ضعیفی دارد. مدل NCHRP 1-40D برای تمامی مخلوط ها عملکرد بسیار ضعیفی دارد.

بر اساس نمایش گرافیکی ارائه شده در شکل های ۵ تا ۱۰ کاملاً مشخص است که به ترتیب مدل های NCHRP 1-40D واسنجی شده، Hirsch اصلاح شده، Hirsch و NCHRP 1-40D بهترین قابلیت پیش بینی را داشته اند. همچنین، انحراف از مقادیر آزمایشگاهی در دماهای کم و فرکانس های زیاد که دارای مقادیر مدول دینامیک بیشتری هستند مشهودتر است. برای درک بهتر از دقت پیش بینی مدل های مختلف، پارامترهای آماری زیر برای هر یک از مدل ها محاسبه و مورد بررسی قرار گرفتند. این پارامترها شامل مجموع مربعات خطا (SSE)، نسبت خطای استاندارد (Se/Sy)، ضریب تعیین (R^2) و خطای نرمال شده میانگین (MNE) هستند. روابط استفاده شده برای محاسبه هر یک از این پارامترها به صورت زیر ارائه شده اند:

$$SSE = \sum_{i=1}^n \left(|E^*_{predicted}|_i - |E^*_{measured}|_i \right)^2 \quad (11)$$

$$Se / Sy = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(|E^*_{predicted}|_i - |E^*_{measured}|_i \right)^2}{n-1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(|E^*_{measured}|_i - |E^*_{measured}|_{mean} \right)^2}{n-1}}} \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - (Se / Sy)^2 \quad (13)$$

$$MNE = 100 \times \sum_{i=1}^n \frac{\left| \frac{|E^*_{predicted}|_i - |E^*_{measured}|_i}{|E^*_{measured}|_i} \right|}{n} \quad (14)$$

جدول ۶. پارامترهای آماری مدل های پیش بینی مدول دینامیک

MNE	R^2	Se/Sy	SSE (*10 ⁶)	نوع مخلوط	مدل پیش بینی
242.47	-1.945	1.716	2383	HMA9.5	NCHRP 1-40D
314.56	-10.557	3.400	7185	HMA19	
200.59	-2.159	1.777	2551	WMA9.5	
295.37	-11.021	3.467	7660	WMA19	
263.53	-3.058	2.014	3245	RAP9.5	
314.73	-7.940	2.990	6221	RAP19	
21.21	0.9969	0.056	2.527	HMA9.5	Calibrated
22.21	0.9854	0.121	9.100	HMA19	NCHRP 1-40 D

26.50	0.9880	0.110	9.882	WMA9.5	
19.45	0.9878	0.110	7.774	WMA19	
11.49	0.9914	0.093	6.904	RAP9.5	
15.18	0.9869	0.114	9.106	RAP19	
79.35	0.5770	0.650	342	HMA9.5	
85.62	0.0241	0.988	607	HMA19	
58.74	0.5052	0.703	399	WMA9.5	Hirsch
73.86	-0.0566	1.028	673	WMA19	
63.31	0.7436	0.506	205	RAP9.5	
70.67	0.5182	0.694	335	RAP19	
34.96	0.8249	0.418	142	HMA9.5	
40.21	0.4403	0.748	348	HMA19	
27.85	0.7588	0.491	195	WMA9.5	Modified
36.59	0.3738	0.791	399	WMA19	Hirsch
35.24	0.9242	0.275	60.8	RAP9.5	
38.85	0.845	0.393	108	RAP19	

جدول ۷. طبقه‌بندی کیفی پارامترهای آماری میزان انطباق (ژو و همکاران، ۲۰۱۱)

Se/Sy	R ²	رتبه
<0.35	>0.90	عالی
0.36/0.55	0.70-0.89	خوب
0.56-0.75	0.40-0.69	متوسط
0.76-0.90	0.20-0.39	ضعیف
>0.90	<0.19	خیلی ضعیف

واقعیت و یا مدل‌سازی‌های عددی در این زمینه وجود دارد. یکی دیگر از ضعف‌های مدل‌های مورد بررسی، عدم پیش‌بینی مقدار زاویه فاز است. از آنجایی که در تحلیل‌های پیشرفته، مخلوط آسفالتی به صورت یک مصالح ویسکوالاستیک در نظر گرفته می‌شود، تعیین هر دو مشخصه مدول دینامیک و زاویه فاز ضروری است.

۴. نتیجه‌گیری

برای اجرای راهنمای طراحی مکانیستیک-تجربی آشتو در کشور نیاز به تعیین مدول دینامیک مخلوط آسفالتی است. این ویژگی بسته به سطح ورودی راهنمای طراحی به صورت آزمایشگاهی، یا از طریق مدل‌های پیش‌بینی تعیین می‌شود. از آنجایی که انجام آزمایش تعیین مدول دینامیک زمان‌بر و گران است، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی توصیه می‌شود. در این مطالعه، سه مدل پیش‌بینی، NCHRP 1-40D که در راهنمای طراحی آمده است، Hirsch و Hirsch اصلاح شده برای تخمین مدول دینامیک مخلوط‌های معمولی، گرم (با افزودنی

باید توجه داشت که برآزش بهتر داده‌ها در مدل واسنجی شده NCHRP 1-40D به دلیل ماهیت تجربی این مدل است که باید برای هر مصالح جدید، به جز مصالحی که در ایجاد مدل اصلی نقش داشته‌اند، واسنجی شود و قطعاً نتیجه بهتری را در بر خواهد داشت. بدون انجام واسنجی، بهترین مدل پیش‌بینی رابطه Hirsch اصلاح شده است که ماهیت ویسکوالاستیک قیر و زاویه فاز را در نظر می‌گیرد و مبتنی بر قانون مخلوط‌ها و میکرومکانیک است.

به طور کلی، عملکرد مدل‌ها برای مخلوط‌های ۹/۵ میلی‌متری بهتر از مخلوط‌های درشت‌دانه ۱۹ میلی‌متری بوده است. بر این اساس، می‌توان این گونه نتیجه گرفت که مدول دینامیک مخلوط‌های درشت‌دانه که بخش مهمی از قابلیت باربری آن‌ها ناشی از اتکا و قفل و بست داخلی سنگدانه‌ها است به خوبی با مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی مدل نمی‌شوند و نیاز به مدل‌های میکرومکانیکی متن‌تر و شبیه‌سازی‌های نزدیک به

مدل های مورد بررسی قابلیت پیش بینی زاویه فاز که یکی از دو ویژگی بارز مصالح ویسکوالاستیک هستند را نداشتند که در مطالعات آتی نویسندگان مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

قابلیت پیش بینی مدل ها در مورد مخلوط های درشت دانه تر کمتر بود که می تواند بیانگر این باشد که این مدل ها به خوبی اثر مقاومت ناشی از اسکلت سنگدانه ای را در نظر نمی گیرند. بنابراین، توصیه می شود از مدل های مبتنی بر میکرومکانیک متقن تر و یا شبیه سازی های عددی برای بررسی این موضوع استفاده گردد.

به طور کلی، استفاده از روابط پیش بینی NCHRP-140D و Hirsch اصلاح شده جهت تعیین مدول دینامیک مخلوط های آسفالتی بومی توصیه می شود. به این ترتیب، تا زمان تجهیز آزمایشگاه ها، امکان استفاده از روش طرح رسازی جدید آشتو در کشور وجود خواهد داشت.

ساسوبیت) و حاوی آسفالت بازیافتی (RAP) ارزیابی شدند. بنا بر نتایج به دست آمده، به موارد زیر می توان اشاره کرد:

مدل سیگموئید لجستیک تعمیم یافته (GLSM) به همراه رابطه برهم نهی دما - زمان WLF برای تعیین ضرایب انتقال جهت ایجاد منحنی اصلی مخلوط های معمولی، گرم و دارای خرده آسفالت مناسب بود.

در این مطالعه، مدل تجربی NCHRP واسنجی شده و نتایج خوبی ارائه کرد. ولی ممکن است نیاز به واسنجی مجدد برای مخلوط های دیگر داشته باشد. این مورد به دلیل ماهیت کاملاً تجربی این مدل است.

مدل Hirsch عملکرد متوسطی داشت و مدل Hirsch اصلاح شده که به خوبی ویژگی های ویسکوالاستیک قیر را در نظر می گیرد دارای عملکرد مناسبی بود. این مدل برای تخمین مقدار مدول دینامیک مخلوط های ۹/۵ و ۱۹ میلی متری که مناسب استفاده در لایه های رویه و آستر هستند نتایج قابل قبولی داشت.

۵. مراجع

- AASHTO. 2015a. "Standard specification for performance-graded asphalt binder (AASHTO: M320-10)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. 2015b. "Standard practice for superpave volumetric design for asphalt mixtures (AASHTO: R35-15)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. 2015c. "Standard specification for superpave volumetric design (AASHTO: M323-13)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. 2015d. Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR) (AASHTO: T315-12)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. 2015e. "Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR) (AASHTO: T313-12)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO. 2015f. "Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA) (AASHTO: T342-11)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Andrei, D., Witzak, M. W. and Mirza, W. 1999. "Appendix CC-4: Development of a revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures". Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Document, NCHRP Project 1-37A, pp. 66-204, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- ASTM. 2015. "Standard test method for recovery of asphalt from solution by Abson method (ASTM: D1856-09)". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM. 2011. "Standard test methods for quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures (ASTM: D2172/D2172M-11)". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Awed, A. M., El-Badawy, S. M., Bayomy, F. M. and Santi, M. 2011. "Influence of the MEPDG binder characterization input level on the predicted dynamic modulus for Idaho asphalt concrete mixtures". In: Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Bari, J. and Witzak, M. W. 2006. "Development of a new revised version of the Witzak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures". J. Assoc. Asphalt Paving Technol., 75: 381-424.

- Birgisson, B., Sholar, G. and Roque, R. 2005. "Evaluation of a predicted dynamic modulus for Florida mixtures". *J. Transport. Res. Board*, 1929: 200-207.
- Christensen, D. W., Pellinen, T. and Bonaquist, R. F. 2003. "Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 72: 97-121.
- Diab, A. and You, Z. 2013. "A simple approach to estimating dynamic moduli from resilient moduli for the mechanistic empirical design of asphalt pavements". PP. 350-361. *In: Al-Qadi, I. L. and Murrell, S. (Eds.), Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*, Reston, VA.
- Dongre, R., Myers, L., D'Angelo, J., Paugh, C. and Gudimetla, J. 2005. "Field evaluation of Witczak and Hirsch models for predicting dynamic modulus of hot-mix asphalt". *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 74: 381-442.
- Hou, H., Wang, T., Wu, S., Xue, Y., Tan, R., Chen, J. and Zhou M. 2016. "Investigation on the pavement performance of asphalt mixture based on predicted dynamic modulus". *Constr. Build. Mater.*, 106: 11-17.
- Khattab, A. M., El-Badawy, S. M., Al Hazmi, A. and Elmwafi, M. 2014. "Evaluation of Witczak E* predictive models for the implementation of AASHTOWare-Pavement ME Design in the Kingdom of Saudi Arabia". *Constr. Build. Mater.*, 64: 360-369.
- Kim, M. and Buttlar, W. G. 2011. "Differential scheme effective medium theory for hot-mix asphalt [E*] prediction". *J. Mater. Civ. Eng.*, 23(1): 69-78.
- Kim J., Byron, T., Sholar, G. and Kim, S. 2008. "Development of dynamic modulus testing and data interpretation capability". Research Report FL/DOT/SMO/08-514, State of Florida, State Materials Office.
- Kim, Y. R., King, M. and Momen, M. 2005. "Typical dynamic moduli values of hot mix asphalt in North Carolina and their prediction". Report Number: FHWA/NC/2005-03, North Carolina Department of Transportation, Raleigh, NC.
- Nemati, R. and Dave, E. V. 2018. "Nominal property based predictive models for asphalt mixture complex modulus (dynamic modulus and phase angle)". *Constr. Build. Mater.*, 158: 308-319.
- Nguyen, Q. T., Di Benedetto, H., Sauzeat, C. and Tapsoba, N. 2013. "Time temperature superposition principle validation for bituminous mixes in the linear and nonlinear domains". *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(9): 1181-1188.
- Obulareddy, S. 2006. "Fundamental characterization of Louisiana HMA mixtures for the 2002 mechanistic-empirical design guide". MSc. Thesis, Louisiana State University, https://digitalcommons.lsu.edu/grad_school_theses/3501.
- Oshone, M., Dave, E., Daniel, J. S. and Rowe, G. M. 2017. "Prediction of phase angles from dynamic modulus data and implications for cracking performance evaluation". *Road Mater. Pavement Design*, 18(S4): 491-513.
- Plati, C., Georgouli, K. and Loizos, A. 2013. "Asphalt concrete stiffness modulus estimation utilizing an algorithm approach". PP. 1219-1228. *In: Al-Qadi, I. L. and Murrell, S. (Eds.), Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements*, Reston, VA.
- Rahman, A. S. M., Mannan, U. A. and Tarefder, A. 2017. "Binder rheology based dynamic modulus and phase angle predictive models for asphalt concrete". PP. 215-224. *In: Al-Qadi, I. L., Ozer, H., Velez-Vega, E. M. and Murrell, S. (Eds.), Airfield and Highway Pavements 2017: Testing and Characterization of Bound and Unbound Pavement Materials*, Reston, VA.
- Robbins, M. M. and Timm, D. H. 2011. "Evaluation of dynamic modulus predictive equations for Southeastern United States asphalt mixtures". *J. Transport. Res. Board*, 2210: 122-129.
- Rowe, G. M. and Sharrock, M. J. 2011. "Alternate shift factor relationship for describing temperature dependency of viscoelastic behavior of asphalt materials". *Transport. Res. Record: J. Transport. Res. Board*, No. 2207, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 125-135. DOI: 10.3141/2207-16.
- Sakhaeifar, M. S., Kim, Y. R. and Montano, B. E. G. 2017. "Individual temperature based models for nondestructive evaluation of complex moduli in asphalt concrete". *Constr. Build. Mater.*, 137: 117-127.
- Singh, D., Zaman, M. and Commuri, S. 2011. "Evaluation of predictive models for estimating dynamic modulus of hot-mix asphalt in Oklahoma". *J. Transport. Res. Board*, 2210: 57-72.
- Van der Poel, C. 1954. "A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data". *J. Chem. Technol. Biotech.*, 4(5): 221-236.
- Witczak, M., El-Basyouny, M. and El-Badawy, S. 2007. "Incorporation of the new (2005) E* predictive model in the MEPDG". NCHRP 1-40D Final Report, Arizona State University, Tempe, AZ.
- Zhang, C., Shen, S. and Jia, X. 2017. "Modification of the Hirsch dynamic modulus prediction model for asphalt mixtures". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002099](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002099).

Zhu, H., Sun, L., Yang, J., Chen, Z. and Gu, W. 2011. "Developing master curves and predicting dynamic modulus of polymer-modified asphalt mixtures". J. Mater. Civ. Eng., 23(2): 131-137.