

مطالعه تاثیر شیارشدگی بر رفتار مکانیکی بستر آسفالت تحت بارگذاری متحرک

شیارشدگی یکی از اصلی‌ترین اختلالات بوجود آمده در بستر آسفالت است که عملکرد آسفالت را تحت شعاع قرار می‌دهد. با توجه به پیچیدگی رفتار آسفالت، در این مطالعه به شبیه‌سازی پاسخ مکانیکی آن تحت اعمال بارگذاری واقعی حرکتی و دو بارگذاری معادل و پالسی که در مطالعات پیشین اغلب بعنوان جایگزین بارگذاری واقعی حرکتی بوده، پرداخته شده است. از این رو یک مدل سازگار ترمودینامیکی ویسکوالاستیک- ویسکوپلاستیک- ویسکوآسیب را بصورت ضمنی گسسته‌سازی زمانی کرده تا در قالب سابروتین UMAT در نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS مورد تحلیل قرار گیرد. در تعداد سیکل بالا، حدود ۴۰ درصد اختلاف میزان شیارشدگی در بارگذاری‌های معادل و پالسی نسبت به بارگذاری واقعی حرکتی مشاهده می‌شود. این امر موجب تخمین نادرست عمر بستر آسفالت حاصله از این دونوع بارگذاری می‌شود.

محمد شجاعی فرد^۱

کارشناسی ارشد

مصطفی باغانی^۲

استادیار

حمید شهسواری^۳

دکتر

روزبه اقبال‌پور^۴

دانشجوی کارشناسی ارشد

واژه‌های راهنما: بستر آسفالت، پدیده شیارشدگی، مدل‌سازی اجزا محدود، گسسته‌سازی ضمنی، بارگذاری متحرک.

۱- مقدمه

مطابق با استفاده عمده از راه‌های ارتباطی زمینی، بستر آسفالت امروزه یکی از بزرگ‌ترین دارایی‌های زیربنایی کشورمان ایران و دیگر کشورهای جهان می‌باشد. با توجه به این نکته، طراحی چنین بسترهایی امروزه برخلاف گذشته که کاری هنری محسوب می‌شد، فرایندی علمی می‌باشد؛ که روابط تجربی و فرمول‌ها نقش عمده‌ای را در کتاب‌های راهنمای طراحی ایفا می‌کنند. رفتار پیچیده‌ی اجزای بستر آسفالت و وجود فاکتورهای محیطی تاثیرگذار بر آن، موجب پیچیدگی بسیار پیش‌بینی رفتار بستر آسفالت در مدت عمر آن شده است. براساس اجزای تشکیل‌دهنده مخلوط آسفالت آزمایش‌ها و مدل‌های متنوعی برای توصیف پاسخ‌های رفتاری این مواد بوجود آمده است.

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران m.shojaefard@ut.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران baghani@ut.ac.ir

^۳ دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شریف hamid.shahal@gmail.com

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران r.eghbalpoor@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۹/۰۲، تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۵/۰۵

چرخش و لیز خوردن توده‌های مخلوط آسفالت در بین دانه‌ها خود باعث ایجاد رفتار غیرخطی می‌گردد. در واقع اثر متقابل بین این لایه‌ها منبع اصلی رفتار غیرخطی مخلوط آسفالت تحت بارگذاری می‌باشد. آزمایش‌ها و مطالعات بسیاری نشان داده است توده‌های مخلوط آسفالت رفتاری وابسته به زمان و نرخ دارند [۱]. آسفالت برخلاف بسیاری دیگر از مواد، دارای رئولوژیک ذاتی یا خواص وابسته به زمان می‌باشد. به بیان ساده، عمده‌ی خواص مکانیکی این مواد، مانند مدول الاستیسیته، مقاومت و ضریب پواسون، نسبت به زمان متغیر می‌باشد. با وجود اینکه اکثر مواد بر اثر دمای بالا، نفوذ رطوبت، خوردگی و عوامل دیگر از خود خواص وابسته به زمان نشان می‌دهند، این‌گونه رفتار آسفالت‌ها به علت اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها می‌باشد [۱، ۲]. نتایج و مشاهدات تجربی بسیاری نشان داد که پاسخ مخلوط آسفالتی به بارگذاری‌های مکانیکی به طور ویژه‌ای وابسته به نرخ و زمان می‌باشد، از این رو محققان بسیاری، با توجه به نتایج تجربی خود، تغییر شکل مخلوط آسفالت را به دو بخش مختلف تقسیم کرده‌اند.

بخشی از تغییر شکل برگشت‌پذیر و بخش دیگر را برگشت‌ناپذیر می‌دانند. برای بررسی رفتاری قسمت برگشت‌پذیر معمولاً از مدل‌های ویسکوالاستیک جامد استفاده شده، در حالی که تغییر شکل برگشت‌ناپذیر را با مدل‌های ویسکوالاستیک سیال و یا مدل‌های ویسکوپلاستیک شبیه‌سازی می‌شوند [۳-۵] در طی بارگذاری‌های متنوع بر روی بستر آسفالت، تغییر در میکروساختار مواد^۱ طی تغییر شکل، معمولاً منجر به میکروآسیب^۲ (شامل میکروتُرک^۳ و میکرو حفره^۴) می‌شود. ایجاد و رشد میکروآسیب در ماده منجر به تغییر بسیاری از خواص مکانیکی (شامل استحکام و سفتی) آن خواهد شد که این تغییر خواص می‌تواند تا حد بحرانی آسیب هم پیش رود. تجمع میکرو حفره‌ها در یک ناحیه باعث ایجاد ترک در ماده می‌شود. عیوب موجود در یک ماده که ناشی از عوامل متفاوتی در ماده هستند، نه تنها باعث بوجود آمدن ترک و شکست نهایی می‌شوند، بلکه باعث افزایش میزان آسیب در نواحی مختلف ماده و به طبع آن، کاهش استحکام، صلیبت^۵، سفتی و عمر باقیمانده خواهد شد [۶].

علاوه بر این، رشد تغییر شکل دائمی^۶ در مخلوط آسفالت باعث می‌شود رفتار این مواد غیرخطی‌تر از پیش شود که خود منبع اغتشاش و ایجاد حفره در بستر آسفالت است، چنین رفتاری را شیارشدگی^۷ گویند. شیارشدگی فرورفتگی سطحی در راستای مسیر حرکت چرخ است که اگر در لایه آسفالتی رخ دهد همراه با جابجایی عرضی خواهد بود. شیارشدگی از مسائل اصلی موجود در تخریب بستر آسفالت است که در اثر تجمع تغییر شکل ایجاد شده در آن بوجود می‌آید. از عوامل اصلی در ایجاد این پدیده حجم بالای ترافیک، بارگذاری عمودی و طولی و شرایط نامناسب آب و هوا می‌باشد [۷]. شیارشدگی با توجه به اثرات تغییر شکل دائمی که در بستر آسفالت ایجاد می‌کند، پتانسیل ایجاد خطرات جانی و مالی فراوانی دارند؛ از این رو محققان بسیاری را در چند دهه اخیر را به خود جذب کرده است [۸].

¹ Material Microstructure

² Microdamage

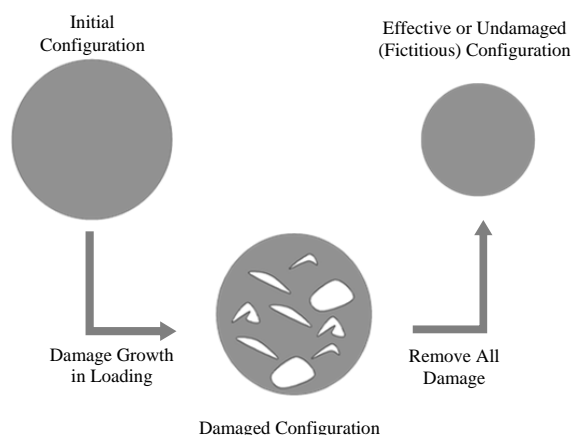
³ Microcrack

⁴ Microvoid

⁵ Rigidity

⁶ Permanent Deformation

⁷ Rutting



شکل ۱- وضعیت‌های مختلف مدل‌سازی در حین بارگذاری در مواد آسیب‌دیده [۹]

تئوری‌های بر پایه‌ی مکانیک محیط پیوسته‌ی آسیب^۱، به منظور بیان تغییر خواص مکانیکی ناشی از رشد میکروآسیب‌ها در مواد مختلف به کار برده می‌شود که برگشت‌ناپذیر بودن پدیده‌ی آسیب یا همیشه افزایشی بودن متغیر آسیب فرض اساسی در این تئوری‌ها است. تئوری مکانیک محیط پیوسته آسیب با اعمال بارگذاری، آسیب در ماده شروع به رشد خواهد کرد. در این تئوری وضعیت خیالی (مؤثر) برای ماده در نظر گرفته که طبق آن تمام آسیب از وضعیت قبلی حذف شده است. همان‌طور که در شکل (۱) قابل مشاهده است، با توجه به در نظر نگرفتن این میزان آسیب در ماده، سطح جدید بدست آمده از سطوح در وضعیت‌های قبلی کمتر می‌باشد. طبق تئوری مکانیک محیط پیوسته آسیب، متغیر آسیب بصورت نسبت مساحت آسیب دیده به مساحت کل تعریف می‌شوند:

$$D = \frac{A^d}{A}; \quad 0 \leq D < 1 \quad (1)$$

با استفاده از فرضیه انرژی کرنشی معادل و برابری نیروی وارده بر هر سطح آسیب‌دیده با نیروی وارده قبل از وجود آسیب، روابط زیر قابل بیان می‌باشد:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (2)$$

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon(1-D) \quad (3)$$

که در این روابط D متغیر آسیب، ϵ تانسور کرنش و σ تانسور تنش می‌باشد. علامت (\sim) بیانگر مقدار متغیر در وضعیت مؤثر می‌باشد. با اعمال بارگذاری بر یک مدل محیط پیوسته فرآیند تغییر شکل شروع می‌شود، که در این حین مدل محیط پیوسته در وضعیت ترمودینامیکی غیریکنواخت غیرتعادلی قرار می‌گیرد. بر این اساس، برای فرآیندهای غیرقابل بازگشت، قوانین ترمودینامیکی باید ارضاگردند.

¹ Continuum Damage Mechanics (CDM)

از قانون اول و دوم ترمودینامیک و با استفاده از تعریف انرژی آزاد هلمهولتز، نامساوی کلازیوس-دوئم بدست می‌آید و با در نظر گرفتن این رابطه، روابط بین تنش- کرنش محاسبه می‌گردد.

$$\sigma : \dot{\varepsilon} - \rho(\dot{\psi} + \dot{T}s) - \mathbf{q} \cdot \frac{\text{grad } T}{T} \geq 0 \quad (4)$$

که در آن ψ انرژی آزاد هلمهولتز می‌باشد. s ، T و به ترتیب بردار شار حرارتی، آنتروپی و دما می‌باشند. علامت نقطه در بالای پارامترها نیز بیانگر مشتق نسبت به زمان این پارامترها می‌باشد.

با توجه به اهمیت موضوع و پیچیدگی‌های موجود در رفتار بستر آسفالت، اعم از وابستگی به نرخ و زمان، وجود تغییرشکل‌های برگشت‌پذیر و ماندگار و همچنین ایجاد میکروآسیب در حین بارگذاری بر این مواد، نیازمند مدلی با توانایی شبیه‌سازی دقیق رفتار مکانیکی بستر آسفالت در حین بارگذاری‌های چرخه‌ای در تعداد سیکل بالا می‌باشیم. مدل ساختاری مورد استفاده باید قادر به توصیف رفتار آسیب غیرالاستیک مواد تحت بارگذاری‌های مکانیکی در سطح تنش‌ها و نرخ بارگذاری‌های مختلف باشد. بسیاری از مدل‌ها بر پایه‌ی مکانیک محیط‌های پیوسته آسیب بنا شده‌اند که در این مدل‌ها با در نظر گرفتن پدیده آسیب در مواد تحت بارگذاری با توجه به ایجاد ترک و حفره‌ها به راحتی می‌توانند تنزل در خواص مکانیکی ماده را شبیه‌سازی کنند [۱۰-۱۲]. از جمله این مدل‌ها می‌توان مدل ساختاری که اخیراً توسط دارابی و همکارانش ارائه شده را بیان کرد؛ که یک مدل پدیده‌شناختی ویسکوالاستیک وابسته به دما می‌باشد. در این مدل ساختاری با ترکیب مدل ویسکوالاستیک شپری و ویسکوپلاستیسیته پرزینا رفتار مکانیکی واقعی مخلوط آسفالت را تحت بارگذاری‌های مکانیکی پیش‌بینی کند [۳]. همچنین دارابی و همکارانش در سال (۲۰۱۳) با فرض کرنش کوچک به بررسی تئوری و عددی مدل ساختاری برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی پرداختند. این مدل برای مواد وابسته به زمان و نرخ ارائه گردیده که با در نظر گرفتن جفت‌شدگی ویسکوالاستیسیته، ویسکوپلاستیسیته، ویسکوالاستیک بر پایه‌ی ترمودینامیک محیط پیوسته بنا شده است [۱۳، ۱۴].

تاکنون برای مدل‌سازی اجزا محدود بستر آسفالت، مطالعات بسیاری در شرایط مختلف بارگذاری انجام گرفته است. لو و رایت بوسیله‌ی مدل ویسکوپلاستیک پرزینا در حالت دو بعدی به بررسی تغییرشکل‌های بزرگ تحت بارگذاری پالسی در تعداد چرخه بالا پرداخته است [۱۵]. بارگذاری پالسی یکی از بارگذاری‌های متداول جهت شبیه‌سازی بارگذاری متحرک بر روی بستر آسفالت است. بارگذاری دو بعدی کرنش صفحه‌ای آن‌ها، در حقیقت اعمال بارگذاری بصورت بی‌نهایت در بعد سوم را تداعی می‌کند. هانتر و همکارانش بار دیگر با در نظر گرفتن مدل‌سازی دو بعدی کرنش صفحه‌ای و با اعمال بارگذاری پالسی به بررسی پدیده شیاردگی در بستر آسفالت پرداخته که البته در این مطالعه، مدل ساختاری کرنش ویسکوپلاستیک توانی برای ماده در نظر گرفته شده است [۱۶]. کیت و همکارانش بارگذاری‌های پالسی و معادل را که برای شبیه‌سازی تیر و بستر آسفالت استفاده می‌شوند را در حالت دوبعدی با یکدیگر مقایسه کردند، البته در این پژوهش مدل ساختاری الاستو-ویسکوپلاستیک در نظر گرفته شده است و رفتار ویسکوالاستیک و آسیب ماده در نظر گرفته نشده است [۱۷]. هانگ و همکارانش مدل مشابه الاستو-ویسکوپلاستیک را برای حالت سه‌بعدی در نظر گرفته و پدیده شیاردگی را بصورت دقیق‌تر مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. هانگ با ارائه‌ی شبیه‌سازی بارگذاری چرخه‌ای در حالت سه‌بعدی به بررسی انباشتگی تغییرشکل پرداخت؛ در این شبیه‌سازی بارگذاری حرکتی به صورت پله‌ای بر روی میان بستر آسفالت در نظر گرفته شده است.

سلیب و همکارانش بارگذاری حرکتی به صورت پله‌ای را با حرکت روی المان‌های پشت‌سرهم و با استفاده از مدل ساختاری ویسکوالاستوپلاستیک شبیه‌سازی کرده است [۱۹].

در این پژوهش سعی شده با در نظر گرفتن عمده‌ی شرایط حاکم، مسئله را بصورت هرچه واقعی‌تر و دقیق‌تر بررسی کنیم. از جمله این عوامل می‌توان مدل ساختاری، که بخوبی تمامی ویژگی‌های بستر آسفالت را دربرداشته باشد و نحوه اعمال بارگذاری، که به حالت واقعی نزدیک‌تر باشد، را نام برد. در این پژوهش، با بکارگیری معادله ساختاری که توسط شهسواری و همکاران [۹] ارائه شده رفتار وابسته به زمان بستر ویسکوالاستیک، ویسکوپلاستیک و ویسکواسیب مورد بررسی قرار می‌گیرد. طبق این مدل ساختاری سازگار ترمودینامیکی، پاسخ ویسکوالاستیک-ویسکوپلاستیک پلیمرها بر پایه ترمودینامیک محیط‌های پیوسته با فرض کرنش‌های محدود پیش‌بینی می‌شود.

برای مدل‌سازی اجزاء محدود آسفالت، روابط ساختاری را می‌بایست گسسته‌سازی زمانی کرد و روابط حاصله از این گسسته‌سازی را در قالب سابروتین در نرم‌افزار اجزاء محدود مورد استفاده قرار داد. در ادامه برای اطمینان از صحت گسسته‌سازی و کد سابروتین، مدل‌سازی اجزا محدود را در شرایط خاصی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. سپس به شبیه‌سازی انواع پدیده‌های بوجود آمده ناشی از آسیب و تغییر شکل‌های ماندگار در بستر آسفالت می‌پردازیم. در ادامه به مطالعه عوامل مختلف بارگذاری خارجی مثل زمان بارگذاری، زمان باربرداری و سطح تنش بارگذاری اعمالی در بارگذاری خزش-بازیابی چرخه‌ای در سه نوع مختلف بارگذاری متحرک بر رفتار مکانیکی آسفالت پرداخته شده است.

۲- معادلات حاکم بر مدل توصیف کننده رفتار ماده

در این پژوهش، معادلات ساختاری ارائه شده توسط شهسواری و همکاران [۹] مورد بررسی قرار گرفته که در ادامه بخش‌های توصیف سینماتیک و قیود ترمودینامیکی و همچنین معادله رشد آسیب به تفصیل بیان گردیده‌است. با فرض کرنش کوچک، کرنش مؤثر کل را می‌توان به صورت جمعی از دیگر کرنش‌ها نوشت. همچنین با ارضای نامساوی کلازیوس-دوئم، انرژی آزاد هلمهولتز به فرم مرتبه دو بدست آمده است و در نهایت روابط معادلات ساختاری مربوط به کرنش‌های الاستیک، ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک بدست آمده است. در این مدل ساختاری معادلات رشد آسیب به صورت تابع از پیش توصیف شده^۱ ارائه شده است. در قسمت‌های بعدی به تفصیل این روابط گنجانده شده است.

۲-۱- روابط مولفه‌های کرنش و تنش

با فرض کرنش کوچک در این پژوهش، کرنش کل به مجموع سه بخش الاستیک (e)، ویسکوالاستیک (ve) و ویسکوپلاستیک (vp) تجزیه می‌شود و هر کدام از این مولفه‌ها به بخش‌های انحرافی^۲ e و حجمی^۳ θ تقسیم شده‌اند.

¹ Prescribed Evolution Function

² Deviatoric Part

³ Volumetric Part

$$\tilde{\mathbf{e}} = \tilde{\mathbf{e}}^e + \tilde{\mathbf{e}}^{ve} + \tilde{\mathbf{e}}^{vp} \quad (5)$$

با ارضای نامساوی کلازیوس-دوئم در این معادلات ساختاری مولفه‌های انحرافی و حجمی ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\dot{\tilde{\mathbf{e}}}^{vp} = \dot{\lambda} \frac{\tilde{\mathbf{s}}_2}{\|\tilde{\mathbf{s}}_2\|}, \quad \dot{\tilde{\theta}}^{vp} = -\dot{\lambda}\beta \quad (6)$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{e}}}^{ve} = \frac{1}{\zeta_e} \tilde{\mathbf{s}}_1, \quad \dot{\tilde{\theta}}^{ve} = \frac{1}{\zeta_\theta} \tilde{p}_1 \quad (7)$$

حال روابط مولفه‌های انحرافی و حجمی کرنش الاستیک را بعد از مشخص شدن دیگر کرنش‌ها داریم:

$$\dot{\tilde{\mathbf{e}}}^e = \dot{\tilde{\mathbf{e}}}^{tot} - \dot{\tilde{\mathbf{e}}}^{ve} - \dot{\tilde{\mathbf{e}}}^{vp}, \quad \dot{\tilde{\theta}}^e = \dot{\tilde{\theta}}^{tot} - \dot{\tilde{\theta}}^{ve} - \dot{\tilde{\theta}}^{vp} \quad (8)$$

که در آن $\dot{\lambda}$ ضریب لاگرانژ، β مقدار ثابت، ζ_e و ζ_θ پارامترهای مادی ویسکوالاستیک که به ترتیب بخش انحرافی و حجمی می‌باشند. $\|\cdot\|$ اپراتور نرم^۱ برای تانسور مرتبه دوم \mathbf{A} بصورت $\|\mathbf{A}\| = \sqrt{\mathbf{A}^T : \mathbf{A}}$ تعریف می‌شود. در این روابط $\tilde{\mathbf{s}}_1$ ، \tilde{p}_1 ، \tilde{p}_2 و $\tilde{\mathbf{s}}_2$ تنش‌های نسبی می‌باشند که به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}}_1 &= 2\mu^e \tilde{\mathbf{e}}^e, \\ \tilde{\mathbf{s}}_2 &= 2\mu^e \tilde{\mathbf{e}}^e + 2\mu^{eve} (\tilde{\mathbf{e}}^e + \tilde{\mathbf{e}}^{ve}) - 2\mu^{vp} \tilde{\mathbf{e}}^{vp}, \\ \tilde{p}_1 &= K^e \tilde{\theta}^e, \\ \tilde{p}_2 &= K^e \tilde{\theta}^e + K^{eve} (\tilde{\theta}^e + \tilde{\theta}^{ve}) - K^{vp} \tilde{\theta}^{vp}, \end{aligned} \quad (9)$$

μ_{vp} و μ_{eve} ، μ_e مدول‌های برشی الاستیک، ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک و همچنین K_e ، K_{eve} و K_{vp} ها به ترتیب مدول‌های حجمی الاستیک، ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک هستند. نرخ ضریب لاگرانژ ($\dot{\lambda}$) با استفاده از یک تابع همیشه نامنفی بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{\lambda} = \Gamma^{vp} \left\langle \Phi(\tilde{\mathbf{F}}) \right\rangle^N \quad (10)$$

که در این رابطه Γ^{vp} پارامتر ویسکوزیته پلاستیک و $\tilde{\mathbf{F}}$ مطابق رابطه (۱۱) سطح تسلیم دراکر-پراگر می‌باشد. با توجه به ماهیت کرنش ویسکوپلاستیک که تابعی غیر منفی بوده، $\Phi(\tilde{\mathbf{F}})$ براکت ماکالی بصورت رابطه (۱۲) قابل بیان می‌باشد. قابل ذکر است، با اعمال بارگذاری خارجی بر جسم، طبق شرط سازگاری، زمانی که در سطح تنش موجود، بر روی سطح تسلیم قرار داشته در ماده کرنش ویسکوپلاستیک بوجود آمده که غیرقابل بازگشت می‌باشد و به عنوان کرنش دائمی در جسم ظاهر می‌گردد. از این رو، در این مدل ساختاری، در هر بازه زمانی مقدار تابع تسلیم بدست آمده و با مشاهده‌ی مقدار نامنفی و یا منفی بودن مقدار آن می‌توان به وجود یا عدم وجود تغییرات کرنش ویسکوپلاستیک پی برد. همان‌طور که در رابطه (۱۲) نیز قابل مشاهده است با منفی شدن مقدار تابع تسلیم، مقدار تغییرات کرنش پلاستیک توسط براکت ماکالی صفر می‌گردد.

$$\tilde{\mathbf{F}} = \|\tilde{\mathbf{s}}_2\| - \alpha \tilde{p}_2 - \tilde{R} \quad (11)$$

¹ Norm Operator

$$\langle \Phi(\tilde{F}) \rangle = \begin{cases} 0 & \tilde{F} < 0 \\ \frac{\tilde{F}}{\sigma^y} & \tilde{F} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

σ^y سطح تسلیم اولیه و \tilde{R} شعاع ناحیه الاستیک رویه تسلیم می‌باشد که با توجه به پاسخ مکانیکی این مواد از رابطه نمایی پیروی می‌کنند. این رابطه که پیش‌تر در مطالعات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است، به صورت زیر قابل بیان می‌باشد [۲۰]:

$$\tilde{R} = R_0 + R_1[1 - \exp(-R_2 \tilde{\epsilon}_{eq}^{vp})] \quad (13)$$

R_0 ، R_1 و R_2 پارامترهای مادی هستند و مقدار $\tilde{\epsilon}_{eq}^{vp}$ که کرنش ویسکوپلاستیک موثر می‌باشد از جذر نرم کرنش ویسکوپلاستیک به صورت رابطه $\sqrt{\tilde{\epsilon}_{ij}^{vp} \tilde{\epsilon}_{ij}^{vp}}$ دست می‌آید. با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۱۱) تابع تسلیم به صورت زیر بازنویسی می‌گردد.

$$\tilde{F} = \left\| 2\mu^e \tilde{\mathbf{e}}^e + 2\mu^{eve} (\tilde{\mathbf{e}}^e + \tilde{\mathbf{e}}^{ve}) - 2\mu^{vp} \tilde{\mathbf{e}}^{vp} \right\| - \alpha \left(K^e \tilde{\theta}^e + K^{eve} (\tilde{\theta}^e + \tilde{\theta}^{ve}) - K^{vp} \tilde{\theta}^{vp} \right) - R_0 - R_1[1 - \exp(-R_2 \sqrt{\tilde{\epsilon}_{ij}^{vp} \tilde{\epsilon}_{ij}^{vp}})] \quad (14)$$

در انتها نیز، بخش حجمی و انحرافی تانسور تنش بصورت زیر ارائه شده است:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}} &= 2\mu^e \tilde{\mathbf{e}}^e + 2\mu^{eve} (\tilde{\mathbf{e}}^e + \tilde{\mathbf{e}}^{ve}), \\ \tilde{\mathbf{p}} &= K^e \tilde{\theta}^e + K^{eve} (\tilde{\theta}^e + \tilde{\theta}^{ve}). \end{aligned} \quad (15)$$

۲-۲- معادله رشد آسیب

طبق معادله ساختاری استفاده شده، معادله‌ی رشد آسیب ارائه شده توسط شهسواری و همکاران [۹] بصورت زیر می‌باشد:

$$\dot{D} = \Gamma^{vd} \left(\frac{\tilde{Y}_{eq}}{Y_0} \right)^{X_1} (1 - D)^{X_2} \exp(K_D \tilde{\epsilon}_{eq}) \quad (16)$$

این معادله دارای چهار بخش قابل اهمیت می‌باشد. بخش اول پارامتر (Γ^{vd}) ، به عنوان یک پارامتر مادی می‌باشد، که به طور مستقیم در میزان دامنه رشد آسیب تاثیر می‌گذارد. بخش دوم این معادله کسری است که نسبت تنش معادل موثر با رابطه $\tilde{Y}_{eq} = \sqrt{3/2} \sqrt{\tilde{s}_{ij} \tilde{s}_{ij}}$ به نیروی آسیب مرجع (Y_0) را نشان می‌دهد و همان طور که از رابطه تنش معادل موثر قابل مشاهده است این بخش وابستگی معادله رشد آسیب به تنش موجود در ماده را نشان می‌دهد. بخش سوم این رابطه را جمله $(1 - D)^{X_2}$ تشکیل می‌دهد که بیان کننده اشباع متغیر آسیب در معادله رشد آسیب می‌باشد. بخش آخر در این رابطه رشد آسیب تابعی نمایی است که نشان دهنده وابستگی رشد آسیب به کرنش مؤثر معادل $\tilde{\epsilon}_{eq} = \sqrt{\tilde{\epsilon}_{ij} \tilde{\epsilon}_{ij}}$ می‌باشد. X_1 ، X_2 و K_D پارامترهای حساسیت مادی هستند.

¹ Equivalent Effective Strain

۳- گسسته‌سازی ضمنی معادلات ساختاری

برای بررسی اجزا محدود پاسخ مکانیکی بستر آسفالت، با توجه به پیچیدگی ذاتی فیزیک مساله و رفتار غیرخطی بستر آسفالت، با مساله‌ای کاملاً غیرخطی روبرو هستیم، از این رو حل عددی به جای حل دقیق بکار گرفته می‌شود. برای بدست آوردن پاسخ معادلات به روش حل عددی مستلزم گسسته‌سازی معادلات ساختاری مورد استفاده می‌باشد. برای بکارگیری مدل ساختاری ذکر شده، با هدف استفاده از آن در چارچوب اجزا محدود به حل عددی آن پرداخته شده است. با توجه به مزایای روش گسسته‌سازی ضمنی، گسسته‌سازی معادلات ساختاری به روش ضمنی صورت گرفته است.

در روش ضمنی، مجهولات مساله با حل یک دستگاه معادله که شامل هر دو وضعیت زمانی فعلی و وضعیت زمانی بعدی می‌باشد، بدست می‌آید. از مزیت‌های گسسته‌سازی ضمنی معادلات ساختاری می‌توان به توانایی برداشتن گام‌های زمانی بزرگتر و همچنین دستیابی به جواب‌های پایدارتر اشاره کرد. با توجه به کوپل بودن معادلات رشد الاستیک، ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک با یکدیگر و پیچیدگی روابط، اولین قدم در بدست آوردن فرم زمان گسسته معادلات ساختاری، نوشتن تمامی معادلات برحسب یکی از متغیرهای کرنش الاستیک یا ویسکوالاستیک یا ویسکوپلاستیک می‌باشد، که با این امر می‌توان تعداد مجهولات و معادلات حل را کاهش داده و بدست آوردن جواب سریع‌تر صورت می‌گیرد.

با در نظر گرفتن این نکته که کرنش‌های الاستیک و ویسکوالاستیک بعد از بروز شدن کرنش ویسکوپلاستیک، بروز می‌گردند، لذا تمامی معادلات ساختاری را با حذف کرنش الاستیک و ویسکوالاستیک بازنویسی می‌کنیم. با معلوم بودن کرنش کل در هر گام زمانی به عنوان ورودی، روابط حاضر به دستگاه معادلات تبدیل شده که، درایه‌های کرنش‌های ویسکوپلاستیک مجهولات این روابط می‌باشند. برای گسسته‌سازی ضمنی روابط، در ابتدا کرنش‌های حجمی و انحرافی الاستیک را با توجه به جداسازی جمعی کرنش کل بر حسب دیگر کرنش‌ها، به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^e &= \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{ve} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp} \\ \tilde{\theta}_{t+\delta t}^e &= \tilde{\theta}_{t+\delta t} - \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{ve} - \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{vp}\end{aligned}\quad (17)$$

سپس کرنش‌های حجمی و انحرافی ویسکوالاستیک با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۷) به صورت زیر بیان گردیده است.

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{ve} &= \tilde{\mathbf{e}}_t^{ve} + \frac{2\mu^e}{\zeta_e} (\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{ve} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp}) \delta t, \\ \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{ve} &= \tilde{\theta}_t^{ve} + \frac{K^e}{\zeta_\theta} (\tilde{\theta}_{t+\delta t} - \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{ve} - \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{vp}) \delta t,\end{aligned}\quad (18)$$

که در آن μ_e و K_e مدول‌های برشی و حجمی الاستیک هستند. حال با مرتب سازی رابطه (۱۸)، کرنش ویسکوالاستیک در گام زمانی حاضر به صورت زیر بازنویسی گردیده است.

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{ve} &= \frac{\left(\frac{2\mu^e}{\zeta_e}\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}\delta t - \frac{2\mu^e}{\zeta_e}\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp}\delta t\right) + \tilde{\mathbf{e}}_t^{ve}}{1 + \frac{2\mu^e}{\zeta_e}\delta t} \\ \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{ve} &= \frac{\frac{K^e}{\zeta_\theta}\delta t\tilde{\theta}_{t+\delta t} - \frac{K^e}{\zeta_\theta}\delta t\tilde{\theta}_{t+\delta t}^{vp} + \tilde{\theta}_t^{ve}}{1 + \frac{K^e}{\zeta_\theta}\delta t}\end{aligned}\quad (19)$$

با توجه به نیاز گسسته‌سازی معادلات به فرم ضمنی، طبق تعریف تابع تسلیم \tilde{F} بر اساس رابطه (۱۴) داریم:

$$\begin{aligned}\tilde{F} = & \left\| 2\mu^e (\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{ve} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp}) + 2\mu^{eve} \left((\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{ve} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp}) + \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t} \right) - 2\mu^{vp} \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp} \right\| \\ & - \alpha \left(\begin{aligned} & K^e (\tilde{\theta}_{t+\delta t} - \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{ve} - \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{vp}) + K^{eve} \left((\tilde{\theta}_{t+\delta t} - \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{ve} - \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{vp}) + \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{ve} \right) \\ & - K^{vp} \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{vp} \end{aligned} \right) \\ & - R_0 - R_1 [1 - \exp(-R_2 \sqrt{\tilde{\mathcal{E}}_{ij,t+\delta t}^{vp} \tilde{s}_{ij,t+\delta t}^{vp}})]\end{aligned}\quad (20)$$

قابل ذکر است، تمامی پارامترهای در گام زمانی حاضر با اندیس $t + \delta t$ و در گام زمانی گذشته با اندیس t نمایش داده شده‌اند. با گسسته‌سازی کرنش‌های حجمی و انحرافی ویسکوالاستیک و الاستیک طبق روابط (۱۸) و (۱۹)، رابطه فوق به صورت زیر بازنویسی می‌گردد.

$$\begin{aligned}\tilde{F} = & \sqrt{\left(A_5 \tilde{\mathbf{e}}_{11}^{vp} + H_{11} \right)^2 + \left(A_5 \tilde{\mathbf{e}}_{22}^{vp} + H_{22} \right)^2 + \left(A_5 \tilde{\mathbf{e}}_{33}^{vp} + H_{33} \right)^2 +} \\ & \sqrt{2 \left(A_5 \tilde{\mathbf{e}}_{21}^{vp} + H_{21} \right)^2 + 2 \left(A_5 \tilde{\mathbf{e}}_{31}^{vp} + H_{31} \right)^2 + 2 \left(A_5 \tilde{\mathbf{e}}_{32}^{vp} + H_{32} \right)^2} \\ & - \alpha \left(K^e \left(\tilde{\theta} - \frac{(A_4 \tilde{\theta} - A_4 \tilde{\theta}^{vp}) + \tilde{\theta}_t^{ve}}{A_2} - \tilde{\theta}^{vp} \right) + K^{eve} (\tilde{\theta} - \tilde{\theta}^{vp}) - K^{vp} \tilde{\theta}^{vp} \right) \\ & - R_0 - R_1 [1 - \exp(-R_2 \sqrt{\left(\tilde{\mathbf{e}}_{11}^{vp} + \frac{\tilde{\theta}^{vp}}{3} \right)^2 + \left(\tilde{\mathbf{e}}_{22}^{vp} + \frac{\tilde{\theta}^{vp}}{3} \right)^2 + \left(\tilde{\mathbf{e}}_{33}^{vp} + \frac{\tilde{\theta}^{vp}}{3} \right)^2 + 2(\tilde{\mathbf{e}}_{12}^{vp})^2 + 2(\tilde{\mathbf{e}}_{13}^{vp})^2 + 2(\tilde{\mathbf{e}}_{23}^{vp})^2})]\end{aligned}\quad (21)$$

که در این روابط A_5 و A_4, A_3, A_2, A_1 به صورت زیر قابل تعریف می‌باشند.

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \left(1 + \frac{2\mu^e}{\zeta_e} \delta t \right) \\
 A_2 &= \left(1 + \frac{K^e}{\zeta_\theta} \delta t \right) \\
 A_3 &= \frac{2\mu^e}{\zeta_e} \delta t \\
 A_4 &= \frac{K^e}{\zeta_\theta} \delta t \\
 A_5 &= \left(\frac{2\mu^e A_3}{A_1} - 2\mu^e - 2\mu^{vp} - 2\mu^{eve} \right)
 \end{aligned} \tag{22}$$

حال پارامتر ویسکوزیته پلاستیک به صورت زیر قابل گسسته‌سازی می‌باشد.

$$\dot{\lambda} = \begin{cases} 0 & \tilde{F} < 0 \\ \Gamma^{vp} \left(\frac{\tilde{F}}{\sigma^y} \right)^N & \tilde{F} > 0 \end{cases} \tag{23}$$

که در آن \tilde{F} مشابه رابطه (۲۱) قابل جایگذاری است.

سپس گسسته‌سازی زمانی معادلات رشد کرنش‌های ویسکوپلاستیک را با جایگذاری رابطه (۹) در رابطه (۶) به صورت زیر قابل بازنویسی می‌باشد.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp} &= \tilde{\mathbf{e}}^{vp} + \Gamma^{vp} \left\langle \Phi(\tilde{F}) \right\rangle^N \frac{\tilde{\mathbf{s}}_{2,t+\delta t}}{\|\tilde{\mathbf{s}}_{2,t+\delta t}\|} \delta t, \\
 \tilde{\theta}_{t+\delta t}^{vp} &= \tilde{\theta}^{vp} - \Gamma^{vp} \left\langle \Phi(\tilde{F}) \right\rangle^N \beta \delta t,
 \end{aligned} \tag{24}$$

در این رابطه تنش نسبی در گام حاضر $\tilde{\mathbf{s}}_{2,t+\delta t}$ با جایگذاری رابطه (۱۷) در رابطه (۹) به صورت زیر قابل بیان است.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{s}}_{2,t+\delta t} &= 2\mu^e (\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^e - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp}) \\
 &+ 2\mu^{eve} (\tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t} - \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp}) \\
 &- 2\mu^{vp} \tilde{\mathbf{e}}_{t+\delta t}^{vp}
 \end{aligned} \tag{25}$$

که با جایگذاری روابط (۱۷) و (۱۸) در رابطه (۲۵) خواهیم داشت:

$$[\tilde{\mathbf{s}}_{2,t+\delta t}]_{ij} = A_5 \tilde{e}_{ij}^{vp} + H_{ij} \tag{26}$$

که در آن H_{ij} و A_k ها متغیرهای واسطه و بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 H_{ij} &= \frac{2\mu^e}{A_1} \tilde{e}_{t,ij}^{ve} + \left(2\mu^{eve} + 2\mu^e - \frac{2\mu^e A_3}{A_1} \right) \tilde{e}_{ij}, \\
 A_1 &= \left(1 + \frac{2\mu^e}{\zeta_e} \delta t \right), \\
 A_3 &= \frac{2\mu^e}{\zeta_e} \delta t, \\
 A_5 &= \left(\frac{2\mu^e A_3}{A_1} - 2\mu^e - 2\mu^{vp} - 2\mu^{eve} \right)
 \end{aligned} \tag{۲۷}$$

با ساده‌سازی‌های بیان شده، می‌توان به راحتی مولفه‌های کرنش ویسکوپلاستیک در گام زمانی جدید را بر حسب مقادیر کرنش کل در گام زمانی جدید و مولفه‌های کرنش کل در گام زمانی قبل بدست آورد. آخرین قدم بدست آوردن دستگاه معادلات و در نظر گرفتن خطایی جهت استفاده از روش عددی تکراری نیوتون-رافسون^۱ برای محاسبه مقادیر درایه‌های کرنش ویسکوپلاستیک می‌باشد. لذا دستگاه معادلات بدست آمده بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$\begin{pmatrix}
 (\tilde{e}_{11}^{vp} - \tilde{e}_{11,t}^{vp}) \|\tilde{\mathbf{s}}_2\| - \dot{\lambda} (A_5 \tilde{e}_{11}^{vp} + H_{11}) \delta t \\
 (\tilde{e}_{22}^{vp} - \tilde{e}_{22,t}^{vp}) \|\tilde{\mathbf{s}}_2\| - \dot{\lambda} (A_5 \tilde{e}_{22}^{vp} + H_{22}) \delta t \\
 (\tilde{e}_{33}^{vp} - \tilde{e}_{33,t}^{vp}) \|\tilde{\mathbf{s}}_2\| - \dot{\lambda} (A_5 \tilde{e}_{33}^{vp} + H_{33}) \delta t \\
 (\tilde{e}_{12}^{vp} - \tilde{e}_{12,t}^{vp}) \|\tilde{\mathbf{s}}_2\| - \dot{\lambda} (A_5 \tilde{e}_{12}^{vp} + H_{12}) \delta t \\
 (\tilde{e}_{13}^{vp} - \tilde{e}_{13,t}^{vp}) \|\tilde{\mathbf{s}}_2\| - \dot{\lambda} (A_5 \tilde{e}_{13}^{vp} + H_{13}) \delta t \\
 (\tilde{e}_{23}^{vp} - \tilde{e}_{23,t}^{vp}) \|\tilde{\mathbf{s}}_2\| - \dot{\lambda} (A_5 \tilde{e}_{23}^{vp} + H_{23}) \delta t \\
 \tilde{\theta}^{vp} - \tilde{\theta}_t^{vp} + \dot{\lambda} \beta \delta t
 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{۲۸}$$

بعد از بدست آوردن تمامی مولفه‌های کرنش‌ها و تنش در هر گام زمانی، پارامتر آسیب بروز می‌گردد. حال با توجه به رابطه (۱۶) و بکارگیری پارامترهای گام جدید، متغیر آسیب به صورت زیر گسسته‌سازی زمانی و محاسبه می‌گردد.

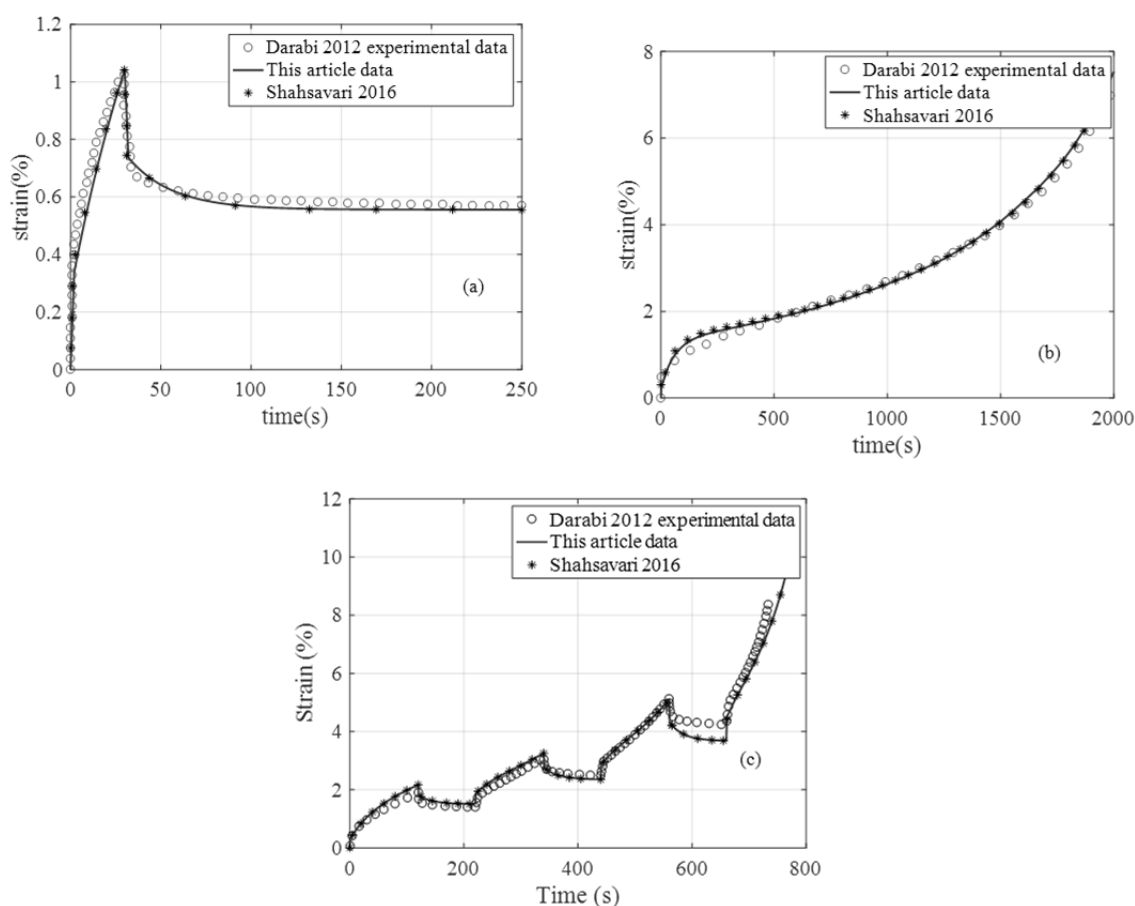
$$\begin{aligned}
 D_{t+\delta t} &= D_t + \Gamma^{vd} \left(\frac{\tilde{Y}_{eq,t+\delta t}}{Y_0} \right)^{X_1} (1 - D_t)^{X_2} \\
 &\quad \times \exp(K_D \tilde{\epsilon}_{eq,t+\delta t}) \Delta t
 \end{aligned} \tag{۲۹}$$

در نهایت، پس از بدست آمدن فرم زمان گسسته ضمنی معادلات ساختاری و تهیه سابروتین UMAT می‌توان به بررسی اجزاء محدود معادلات ساختاری و اعمال بارگذاری‌های مورد نیاز پرداخت.

¹ Newton-Raphson Method

۴- اعتبارسنجی

جهت استفاده از حل عددی ارائه شده در نرم افزارهای اجزا محدود، نیاز است که صحت سنجی نتایج حاصل از فرم زمان گسسته ضمنی معادلات و کد سابروتین فوق الذکر صورت گیرد. به منظور اعتبارسنجی، نتایج بدست آمده از این سابروتین، نتایج بدست آمده از مدل ارائه شده توسط شهسواری و همکاران و داده های تجربی دارابی و همکاران [۴] را در غالب سه بارگذاری خزش، خزش بازیابی و خزش بازیابی چرخه ای مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است نتایج بدست آمده می تواند به خوبی رفتار آسفالت را تحت بارگذاری های مختلف پیش بینی کند. پارامترهای مادی موجود در مدل ساختاری از کالیبراسیون داده های آزمایش های خزش، خزش بازیابی و خزش بازیابی نمونه آسفالت [۴] بدست آمده است. همانطور که در جدول (۱) قابل مشاهده است، پارامترهای ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک از کالیبراسیون داده های آزمایش خزش بازیابی با سطح تنش و زمان بارگذاری کم، بدست آمده است تا تاثیر متغیر آسیب در آن به طور چشمگیری کاهش یابد. از طرف دیگر پارامترهای متغیر آسیب که در جدول (۲) نمایش داده شده اند، با توجه به افزایش نقش آسیب در آزمایش خزش، کالیبراسیون توسط داده های این آزمایش صورت گرفته است.



شکل ۲- اعتبارسنجی فرم زمان گسسته ضمنی معادلات ساختاری تحت بارگذاری (a) خزش بازیابی ($SL = 100 \text{ kPa}$ و $LT = 30 \text{ s}$) (b) خزش ($SL = 150 \text{ kPa}$ و $LT = 120 \text{ s}$) (c) خزش بازیابی چرخه ای ($SL = 100 \text{ kPa}$ و $LT = 30 \text{ s}$)

جدول ۱- پارامترهای مادی الاستیک، ویسکوالاتیگ و ویسکوپلاستیک

E^e (MPa)	E^{eve} (MPa)	E^{vp} (MPa)	N	Γ^{vp} ($1/s$)	ζ_e (GPa)	ζ_θ (GPa)
228.52	26.40	35.61	0.92	4.12×10^{-3}	3.00	1.00

جدول ۲- پارامترهای مادی ویسکواسیب مدل ساختاری

Γ^{vd} ($1/s$)	Y_0 (kPa)	X_1	X_2	K_D
6.84×10^{-5}	726.22	2.23	3.79	78.14

۵- مدل سازی المان محدود

در این پژوهش با مدل سازی یک بستر آسفالت و بارگذاری متحرک بر روی آن به بررسی پدیده شیارشدگی و آسیب پرداخته شده است. مدل ساختاری بستر آسفالت با توجه به ویژگی های ویسکوالاستیک، ویسکوپلاستیک و ویسکواسیب با استفاده از سابروتین UMAT جهت تحلیل به نرم افزار اجزا محدود ارائه گردیده است. در ابتدا مدل سازی تایر بر روی بستر آسفالت در دو حالت دو بعدی و سه بعدی صورت گرفته و مقایسه گردیده است. با توجه به وجود اختلاف در این دو حالت، نمی توان از فرض ساده سازی دوبعدی در شبیه سازی ها استفاده کرد. در نتیجه حالت کلی تر سه بعد برای تمامی شبیه سازی ها در نظر گرفته شده است. بعلاوه هزینه بالای محاسبات در شبیه سازی حرکت تایر بر روی بستر آسفالت در تعداد سیکل بالا، تنش های بوجود آمده از مدل سازی سه بعدی تایر در یک سیکل روی بستر آسفالت، در غالب سابروتین DLOAD و UTRACLOAD بعنوان بار خارجی بر روی بستر به نرم افزار اجزا محدود ارائه گردیده است و همانطور که در شکل (۷) قابل مشاهده است تنش ورودی به بستر آسفالت از هر دو روش سابروتین و شبیه سازی سه بعدی اجزا محدود حرکت تایر با دقت خوبی مطابقت دارد.

قابل توجه است که با بکارگیری روش سایروتین زمان محاسبات در شبیه سازی ۱۰۰۰ سیکل، با حفظ دقت تنش ورودی، به حدود ۰,۰۱ مقدار قبل کاهش یافت. جهت اعمال بارگذاری بر روی بستر آسفالت و شبیه سازی پدیده های مختلف نظیر شیارشدگی و بررسی عواملی مانند آسیب و تغییر شکل های ماندگار که بر خواص مکانیکی این ماده تاثیر بسزایی دارد، نیازمند شباهت هر چه بیشتر این نوع بارگذاری با نمونه واقعی می باشیم. بارگذاری های متداولی که در پژوهش های پیشین برای شبیه سازی حرکت خودرو و ترافیک بر روی بستر آسفالت در نظر گرفته شده اند، در فرم بارگذاری پالسی و معادل بوده است. این نوع بارگذاری ها با هدف شبیه سازی حرکت خودرو بر روی بسترهای متنوعی از جمله الاستیک، ویسکوالاستیک، الاستوویسکوپلاستیک انجام گرفته است [۱۷، ۱۹].

در این پژوهش علاوه بر این دو نوع بارگذاری، بارگذاری متحرک واقعی تایر خودرو نیز بر روی بستر آسفالت با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک-ویسکوپلاستیک-ویسکواسیب در نظر گرفته شده است. از این رو بارگذاری ترافیکی به سه صورت زیر اعمال می‌گردد:

۱. بارگذاری معادل^۱
۲. بارگذاری پالسی^۲
۳. بارگذاری حرکتی^۳

شکل (۳) فرم شماتیک بارگذاری پالسی و معادل را نشان می‌دهد. در فرض بارگذاری معادل، که یکی از فرض‌های متداول برای نشان دادن بارگذاری حرکتی چرخ است، بارگذاری را در طول زمان کل بارگذاری بصورت انباشته و پیوسته، بدون توجه به زمان باربرداری اعمال می‌کنند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرض بارگذاری معادل، می‌تواند مقدار قابل توجهی از زمان محاسبات را کاهش دهد. بارگذاری پالسی معمولاً برای شبیه‌سازی ساده حرکت تایر روی بستر آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بارگذاری مدت زمان بارگذاری و باربرداری، پی‌درپی و بدون تغییر مکان بارگذاری می‌باشد. محل اعمال این دو نوع بارگذاری با تغییر زمان، ثابت باقی می‌ماند. این امر باعث کاهش زمان محاسبات نسبت به روش بارگذاری حرکتی بر روی بستر آسفالت می‌باشد. قابل ذکر است، مقدار عددی زمان و سطح تنش در شکل (۳) در انواع شبیه‌سازی‌ها می‌تواند متفاوت باشد. بطورمثال در بارگذاری کامیون بر روی بستر آسفالت سطح تنش ۷۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد. همچنین مطابق سرعت خودروها که در این پژوهش در حدود ۶۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است، زمان بارگذاری پالسی چیزی در حدود ۰,۰۱۸ ثانیه و زمان کل بارگذاری در نوع معادل ۱۸ ثانیه می‌باشد.

همان‌طور که می‌دانیم بارگذاری در حالت واقعی تفاوت زیادی با بارگذاری پالسی و معادل داشته است، از این رو در این پژوهش سعی در ارائه بارگذاری متحرک واقعی با اعمال بارگذاری از طریق حرکت تایر بر روی بستر آسفالت با در نظر گرفتن خواص ویسکوالاستیک-ویسکوپلاستیک-ویسکواسیب شده است. با توجه به این که در بارگذاری‌های پالسی و معادل بارگذاری بر روی چند المان ثابت اعمال و باربرداری شده است، از تاثیر المان‌های اطراف و بارگذاری‌های آن‌ها بر روی المان‌های دیگر صرفه نظر شده است. اما در نوع سوم بارگذاری با حرکت چرخ روی آسفالت، بارگذاری و باربرداری در ابتدای سیکل بر روی المان‌های ابتدایی بستر آسفالت انجام شده و با ادامه‌ی روند سیکل و حرکت چرخ، بارگذاری روی المان‌های بعدی به سمت المان‌های انتهایی بستر انجام گرفته است. بعد از رسیدن بارگذاری به انتهای مسیر، سیکل بعدی بارگذاری با حرکت تایر دیگر روی بستر آسفالت آغاز می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، عبور بار از روی المان‌ها و حرکت آن بر روی المان‌های بعدی، موجب استراحت در المان‌های قبل می‌گردد. قابل ذکر است که در بارگذاری نوع سوم المان‌های تحت بارگذاری در طول زمان تغییر می‌کنند که این مساله در دونوع بارگذاری دیگر وجود نداشت.

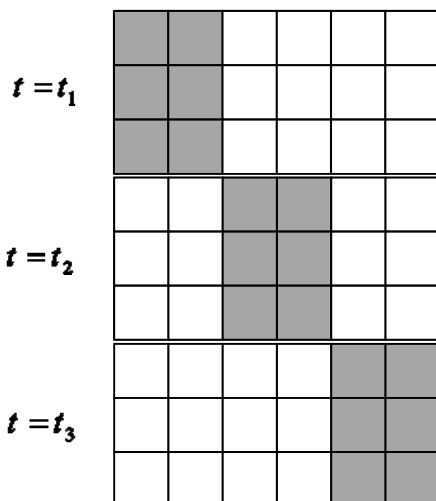
¹ Equivalent Load

² Pulse Load

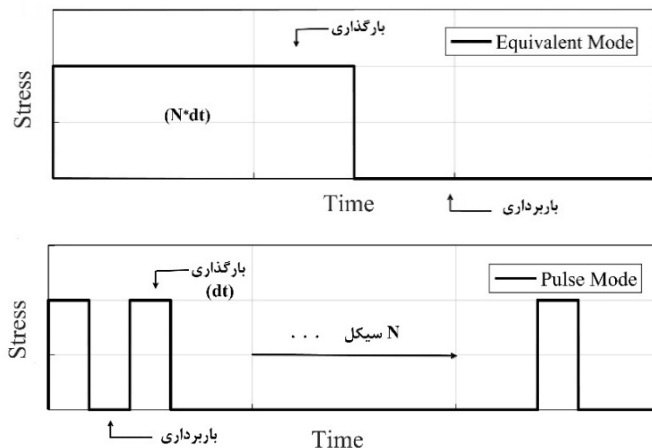
³ Moving Load

با توجه به پیشینه پژوهشی و خواص مکانیکی تایر در زمانی که تحت بار قرار گرفته و زیر وسیله نقلیه نصب شده است، خاصیت تغییرشکل بزرگ مواد لاستیکی، باعث خوابیدن لاستیک بر روی بستر آسفالت و افزایش سطح تماس تایر با بستر آسفالت گردیده است. از این رو در شبیه‌سازی مطابق رفتارهای ذکر شده خاصیت هایپرالاستیک و ویسکوالاستیک برای تایر ماشین در نظر گرفته شده است. برای این منظور، مطابق با مطالعه پیشین [۲۱] مدل‌سازی تایر ماشین با در نظر گرفتن خاصیت هایپرالاستیک همسان با تابع انرژی کرنشی چندجمله‌ای^۱ ($C_{10}=1.0e+5$ و $D_1=1e-6$) و همچنین خاصیت ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن تابع سری پرونی ($G_1=0.3$ و $\tau_1=0.1$) انجام گرفته است و ابعاد نمونه چرخ مطابق با استاندارد 185/65R14 در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از در نظر گرفتن این فرضیات در شکل (۵) با افزایش سطح تماس ناشی از تغییر شکل لاستیک بخوبی مشاهده می‌گردد.

در نوع سوم بارگذاری، شبیه‌سازی تایر ماشین با در نظر گرفتن خاصیت هایپرالاستیک و ویسکوالاستیک و حرکت آن با سرعتی در حدود ۶۰ کیلومتر بر ساعت بر روی بستر آسفالت انجام شده است. همچنین جرم خودرو در حدود ۱۴۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده که سهم هر تایر نیرو قائم ناشی از حدود ۳۵۰ کیلوگرم جرم می‌باشد. بین تایر و بستر آسفالت قید تماس^۲ با ضریب اصطکاک ۰,۳ در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که المان‌های بستر آسفالت نیز برای کاهش زمان محاسبات، در فرمی بهینه همانند شکل زیر در کنار یکدیگر با قید چسب^۳ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۴- نمای بالا از المان‌های بستر آسفالت تحت بارگذاری حرکتی در زمان‌های متفاوت از یک سیکل از بارگذاری

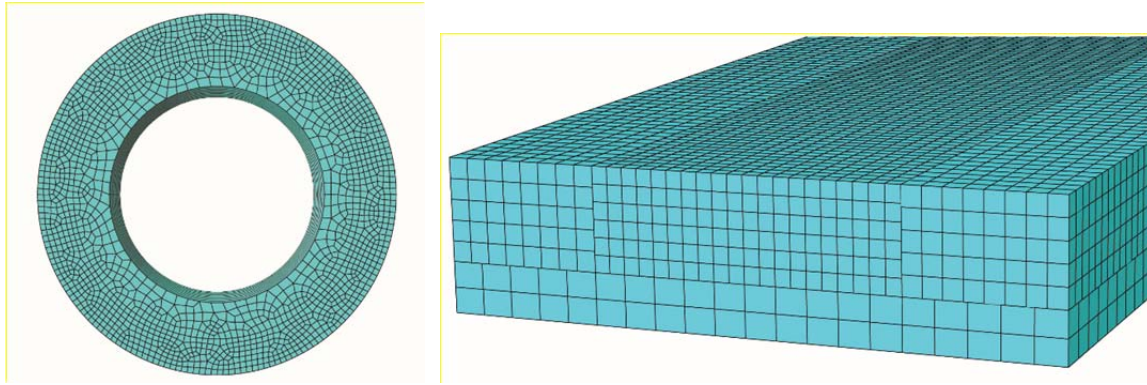


شکل ۳- مقایسه بارگذاری شماتیک اعمالی به بستر آسفالت (الف) بارگذاری معادل (ب) بارگذاری پالسی

¹ Polynomial Energy Function

² Contact Constraint

³ Tie Constraint



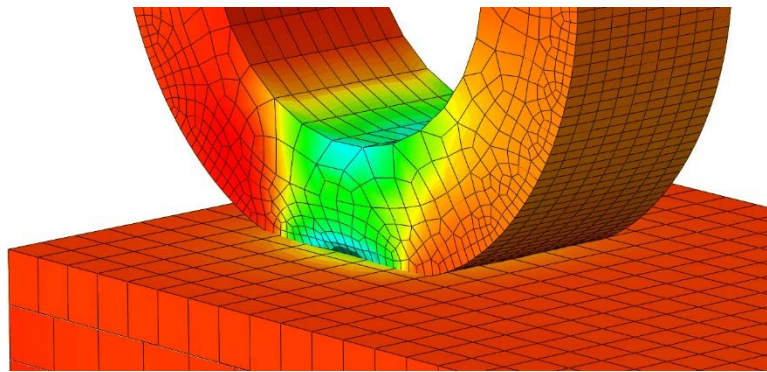
شکل ۵- شکل سه بعدی اجزا محدود تایر و بستر آسفالت

در این پژوهش با مدل سازی این سه نوع بارگذاری و اعمال آن ها بر بستر آسفالت به تعیین عمر و بررسی پدیده شیارشدگی پرداخته شده است. از دیگر پدیده هایی که با توجه به بارگذاری های ترافیکی و متحرک در بستر آسفالت می توان بررسی کرد، ایجاد تغییر شکل های دائمی در ترمزگیری است. که در ادامه به بحث در نتایج مدل سازی اجزا محدود این پدیده و پدیده شیارشدگی پرداخته شده است.

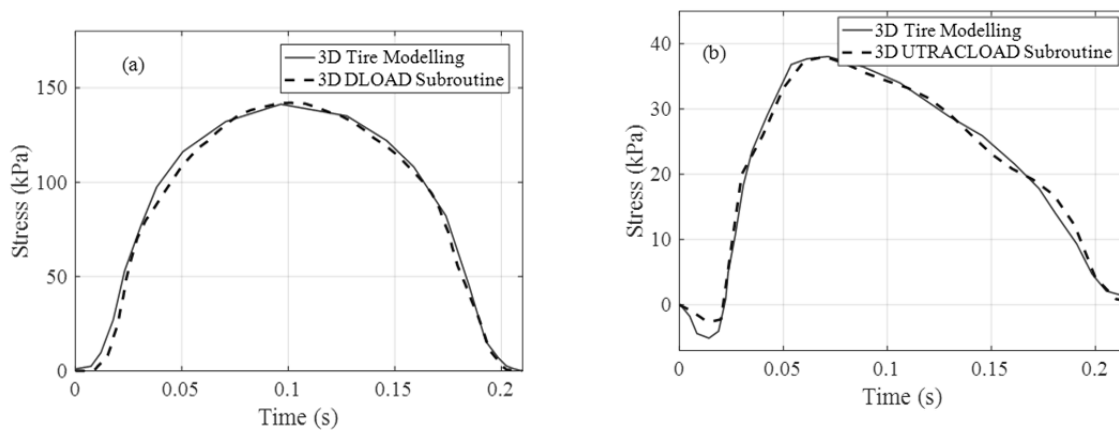
۶- نتایج و بحث

در این پژوهش، برای انجام یک شبیه سازی واقعی تر با مدل سازی نمونه تایر به بررسی آسیب و تغییر شکل های ایجاد شده در بستر آسفالت پرداخته شده است و با شبیه سازی سه بعدی، تنش های عمودی و تنش های محوری در راستای حرکت چرخ مورد ارزیابی قرار گرفته است. شکل (۶) مدل سازی سه بعدی تایر با توجه به خاصیت تغییر شکل بزرگ مواد لاستیکی را بر بستر آسفالت نشان می دهد. در این قسمت به شبیه سازی تایر ماشین با در نظر گرفتن خاصیت های پیرلاستیک و ویسکوالاستیک پرداخته شده است و افزایش سطح تماس ناشی از تغییر شکل لاستیک بخوبی مشاهده می گردد. افزایش هر چه بیشتر سطح تماس باعث افزایش زمان بارگذاری می شود در نتیجه می تواند با سطح تنش یکسان باعث ایجاد کرنش بیشتری در بستر آسفالت گردد. با توجه به نتایج بدست آمده از حرکت تایر بر روی بستر آسفالت در یک چرخه در دو حالت حرکت غلطش آزاد^۱ و ترمزگیری بر روی بستر، تنش های عمودی و طولی در شکل (۷) نشان داده شده است، قابل مشاهده است که تنش عمودی برای هر دو حالت حرکت یکسان می باشد ولی تنش طولی در راستای حرکت تایر تنها در ترمزگیری بوجود می آید. با توجه به زمان کم بارگذاری در یک سیکل حرکت تایر بر روی بستر و همچنین پایین بودن سطح تنش نسبت به آزمایش های صحت سنجی شده این مدل، مقدار رشد کرنش ویسکوپلاستیک، پارامتر آسیب و تغییر شکل دائمی بوجود آمده، کم می باشد در نتیجه در این بازه بستر آسفالت رفتاری نسبتا الاستیک از خود نشان می دهد. بنابراین برای مشاهده اثرات پدیده شیارشدگی و ترمزگیری تایر شبیه سازی در تعداد سیکل بالا انجام شده است.

¹ Free Rolling

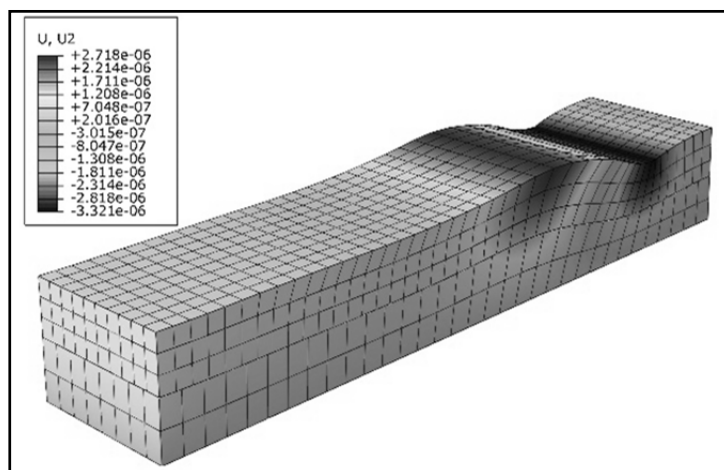


شکل ۶- مدل سازی سه بعدی حرکت تایر بر بستر آسفالت

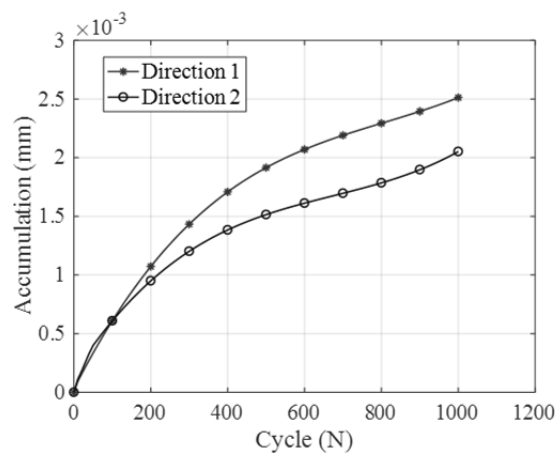
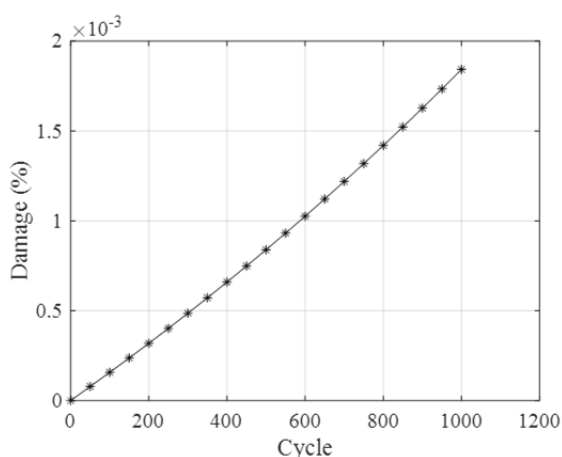


شکل ۷- مقایسه بارگذاری اعمالی به بستر توسط تایر ماشین و سابروتین (الف) تنش عمودی (ب) تنش طولی

همان طور که در شکل (۷) قابل مشاهده است، تنش های اعمالی حین استفاده از سابروتین ها با دقت بالایی با تنش های حاصل از شبیه سازی چرخ مطابقت دارد و این امر ما را مجاز به استفاده از این روش بارگذاری کرده و این بارگذاری ها برای حالت های مختلف شبیه سازی اعمال گردیده است. استفاده از سابروتین DLOAD و UTRACLOAD برای اعمال واقعی تر بارگذاری نسبت به روش های دیگر بارگذاری متحرک، باعث کاهش زمان محاسبات می شود. از این رو بارگذاری متحرک در تعداد سیکل بالا امکان پذیر می گردد و حاصل آن ایجاد پدیده های ناشی از تغییر شکل دائمی بوجود آمده در بستر آسفالت مانند شیارشدگی و انباشتگی ترمز شده است. از آنجا که ترمزگیری یکی از پدیده های خرابی رایج در بستر آسفالت است، این پدیده نیز در این پژوهش مورد شبیه سازی قرار گرفته است. ترمزگیری پی در پی موجب انباشتگی در بستر آسفالت می شود که خود عامل خرابی در بخش های مختلف آسفالت، از جمله محل ترمز وسایل حمل و نقل عمومی، می باشد. تنش بوجود آمده از ترمز در جهت حرکت تایر، در بستر آسفالت جلوی تایر، باعث انباشتگی توده ای از آسفالت در محل ترمزگیری می شود. در شکل (۸) نتایج انباشتگی ناشی از شبیه سازی ترمز در نرم افزار آباکوس، در ۱۰۰۰ سیکل ترمز با شتاب حدود ۵- متر بر مجذور ثانیه، مشاهده می شود.



شکل ۸- تغییر شکل دائمی بوجودآمده ناشی از ترمزگیری (انباشتگی)



شکل ۹- میزان تغییر شکل پلاستیک و آسیب ناشی از ترمزگیری

در شکل (۹) آسیب و تغییر شکل دائمی بصورت جابجایی در راستای ترمزگیری (جهت ۱) و همچنین عمود بر سطح (جهت ۲) با ۱۰۰۰ بار تکرار ترمزگیری نمایش داده شده است. این نتایج، نشان‌دهنده تغییر شکل و خرابی بوجودآمده در بسترهای آسفالت می‌باشد که امروزه در ایستگاه‌های اتوبوس به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. جابجایی ذرات در راستای عمود بر سطح آسفالت و حرکت آن‌ها در جهت ترمزگیری بیان‌کننده جمع و انباشتگی آسفالت در این محدوده می‌باشد.

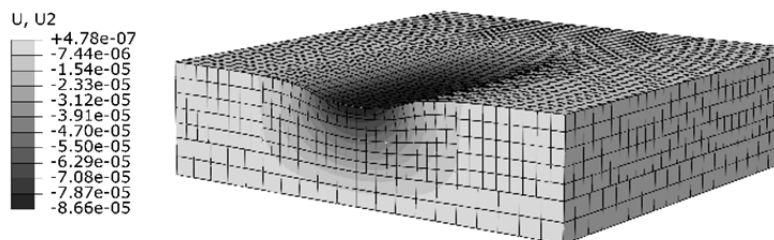
با توجه به این که شیارشدگی به طور صریح به عنوان پارامترهای داخلی محاسباتی سابروتین در نظر گرفته نشده است، از این رو به طور مستقیم قابل محاسبه نیست. بنابراین برای محاسبه‌ی بزرگی شیارشدگی می‌توان با انتگرال‌گیری از این پارامتر در جهت ضخامت بستر آسفالت مقدار آن را محاسبه کرد. برای محاسبه شیارشدگی بستر آسفالت به المان‌های کوچکی با عنوان زیرلایه تجزیه شده است. همان‌طور که در مطالعات دیگر نیز مشاهده می‌شود [۲۲]، برای محاسبه‌ی شیارشدگی در بستر آسفالت مقدار جابه‌جایی در المان‌های راستای ضخامت بستر اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت شیارشدگی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$u_{rutting} = \sum_{i=1}^k \varepsilon^{vp(i)} h^{(i)} \quad (30)$$

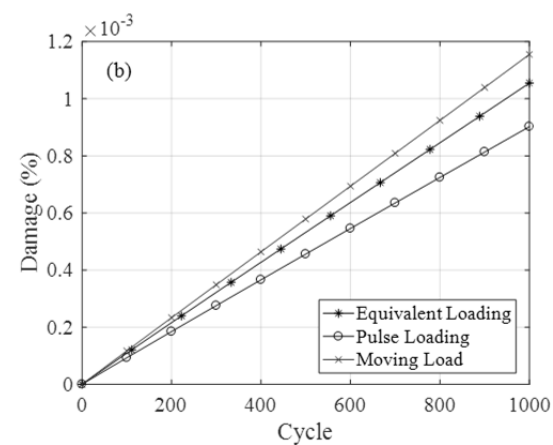
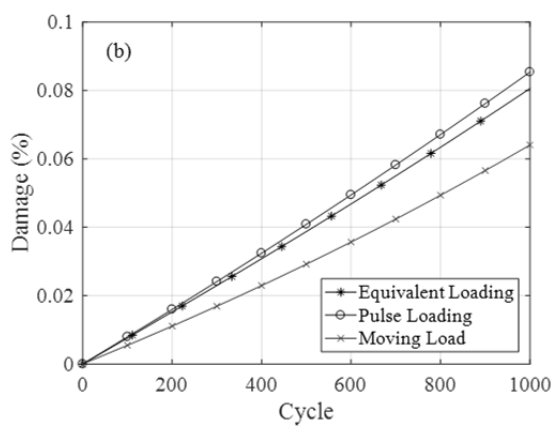
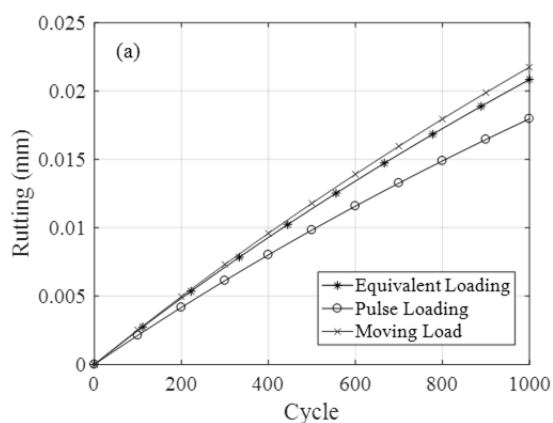
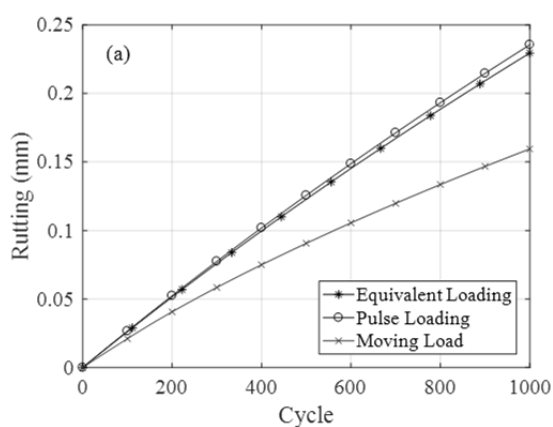
در این رابطه، $u_{rutting}$ جابه‌جایی دائمی، $\varepsilon^{vp(k)}$ کرنش ماندگار عمودی در لایه k ام (طبقات مش) و ضخامت آن لایه $h^{(k)}$ می‌باشد. قابل ذکر است، متغیر شیارشدگی برای حالت‌های مختلف در ۱۰۰۰ سیکل عبور تایر و در وسط بستر آسفالت محاسبه شده است. شکل (۱۰) تغییرشکل دائمی (شیارشدگی) بوجود آمده در میانه‌ی بستر آسفالت برای سرعت تایر حدود $16 \frac{m}{s}$ را نشان می‌دهد.

با انجام بارگذاری متحرک در سه نوع مختلف، برای تایر بر بستر آسفالت، نتایج شکل (۱۱) بدست می‌آید. همانطور که انتظار می‌رود تغییرشکل دائمی و آسیب بوجود آمده در بستر کم می‌باشد که با توجه به عمر چندساله بستر آسفالت این نتایج دور از انتظار نمی‌باشد. به همین جهت نوع شبیه‌سازی، بر اساس اطلاعات تنش عمودی وارد بر بستر آسفالت تغییر یافته است. از این‌رو مدل سازی و بررسی تاثیر سطح تنش و زمان اعمال بارگذاری در این سه نوع بارگذاری بوسیله حرکت تایر یک کامیون انجام شده است. با مقایسه شکل (۱۱) و شکل (۱۲) می‌توان بخوبی افزایش شیارشدگی و آسیب ناشی از افزایش سطح بارگذاری را مشاهده کرد. با مقایسه نتایج بدست‌آمده از حرکت ماشین و حرکت کامیون، مشاهده می‌شود که با افزایش سطح تنش و زمان بارگذاری، تغییرشکل دائمی (شیارشدگی) در بستر نیز افزایش خواهد یافت؛ اما نکته قابل توجه در هر دو شبیه‌سازی پایین بودن میزان آسیب می‌باشد، جهت مشاهده رشد آسیب می‌بایست تعداد سیکل بارگذاری را افزایش داده و اثر آن را بررسی کرد.

در ادامه شبیه‌سازی‌های انجام شده، با تمرکز بر افزایش کرنش پلاستیک، میزان آسیب مورد بررسی قرار می‌گیرد. اطلاعات شبیه‌سازی‌های مربوطه در جدول (۳) آورده شده است و نتایج حاصل از این بارگذاری‌ها در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود. با مشاهده شکل (۱۳) می‌توان دریافت که افزایش سطح بارگذاری اعمالی، در کاهش عمر بستر و تعداد چرخه‌های بارگذاری ممکن بستر تاثیر بسزایی داشته است که این اتفاق نتیجه تسریع رشد آسیب در شرایط بارگذاری یکسان می‌باشد. دیگر مقایسه‌ای که می‌توان نتیجه آن را در شبیه‌سازی‌های فوق مشاهده کرد، افزایش زمان بارگذاری با اعمال سطح بارگذاری یکسان می‌باشد. به عنوان مثال در شرایط بارگذاری ۷۵۰ کیلوپاسکال، طی دو شبیه‌سازی با زمان بارگذاری ۱۰ ثانیه و ۳۰ ثانیه، کرنش حاصل از این دو بارگذاری پس از حدود ۴۵ سیکل بارگذاری بیش از ۵۰٪ اختلاف دارند که خود تاثیر مستقیم افزایش زمان بارگذاری را در میزان شیارشدگی و در نتیجه آسیب نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی شیارشدگی در بستر آسفالت



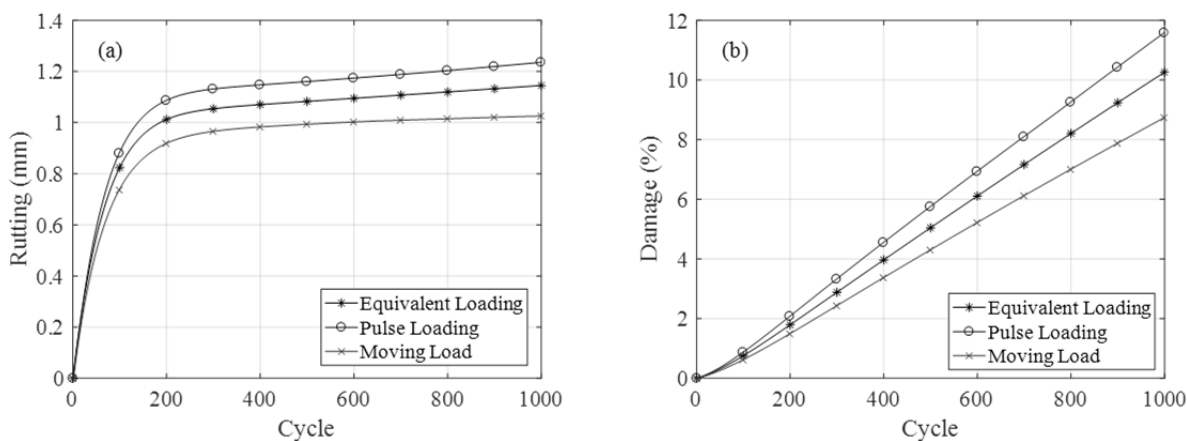
شکل ۱۲ - مقایسه شبیه‌سازی حرکت تایر کامیون بر بستر در سه نوع بارگذاری متحرک (a) شیارشدگی (b) میزان آسیب

شکل ۱۱ - مقایسه شبیه‌سازی حرکت تایر ماشین بر بستر در سه نوع بارگذاری متحرک (a) شیارشدگی (b) میزان آسیب

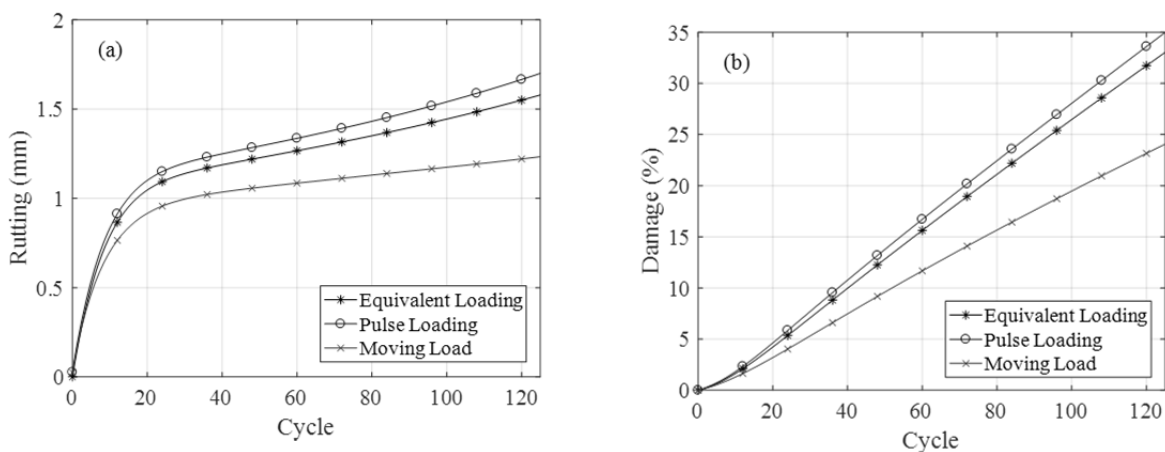
جدول ۳ - شبیه‌سازی‌های مورد استفاده در بررسی شیارشدگی

بارگذاری	سطح تنش [kPa]	زمان بارگذاری [s]	زمان باربرداری [s]
حالت ۱	۷۵۰	۱	۲
حالت ۲	۷۵۰	۱۰	۲۰
حالت ۳	۷۵۰	۳۰	۶۰

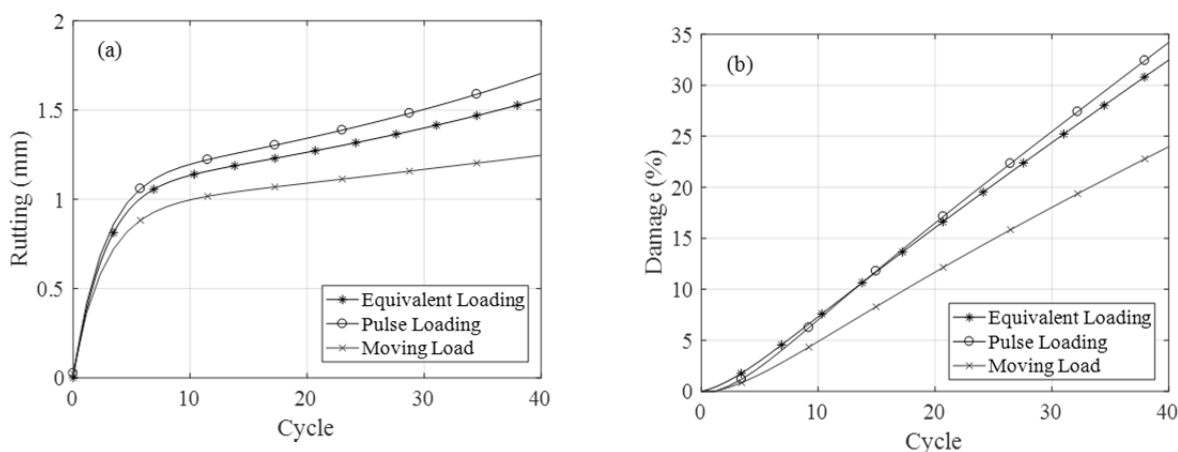
بارگذاری حالت ۱



بارگذاری حالت ۲



بارگذاری حالت ۳



شکل ۱۳- شبیه‌سازی شیارشدگی حرکت تایر کامیون تحت بارگذاری‌های مختلف (a) میزان شیارشدگی (b) مقدار آسیب

همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از بارگذاری‌های پالسی و معادل نسبت به بارگذاری واقعی حرکتی اختلافاً عمده‌ای دارد. میان این سه نوع بارگذاری، مقدار شیارشدگی و آسیب را که با یکدیگر رابطه مستقیم دارند، در بارگذاری پالسی نسبت به دیگر بارگذاری‌ها بیشتر می‌باشد.

با توجه به اختلاف موجود در میزان شیارشدگی و آسیب این بارگذاری‌ها می‌توان دریافت که بارگذاری‌های پالسی و معادل عمر مفید آسفالت را به درستی تخمین نمی‌زنند.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از گسسته‌سازی زمانی ضمنی معادلات ساختاری در قالب کد سابروتین UMAT، امکان تحلیل و بررسی در نرم‌افزارهای اجزا محدود فراهم شده است. همچنین به علت مزایای عمده روش ضمنی، از جمله پایداری جواب‌ها و افزایش گام زمانی حل و کاهش زمان محاسبات انجام محاسبات طولانی بارگذاری چرخه‌ای میسر گردیده است. سپس از نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی حرکت تاینر با دو سطح تنش ۱۲۰ کیلوپاسکال و ۷۵۰ کیلوپاسکال که با سرعت ثابت ۱۶ متر بر ثانیه بر روی بستر حرکت می‌کند، مشاهده شد که میزان شیارشدگی و آسیب وارده به بستر طی ۱۰۰۰ سیکل مقدار نسبتاً کمی دارد. همچنین با دقت در نتایج می‌توان دریافت که با این تغییر سطح تنش میزان شیارشدگی و آسیب حدوداً ۱۰ برابر افزایش می‌یابد. که خود به رابطه‌ی مستقیم سطح تنش و میزان آسیب و شیارشدگی در بستر آسفالت اشاره دارد. استفاده از سابروتین DLOAD و UTRACLOAD برای اعمال بارگذاری واقعی نسبت به روش‌های دیگر بارگذاری متحرک، باعث کاهش زمان محاسبات می‌شود. از این‌رو امکان بارگذاری متحرک در تعداد سیکل بالا فراهم می‌گردد و حاصل آن ایجاد پدیده‌های ناشی از تغییر شکل دائمی بوجود آمده در بستر آسفالت مانند شیارشدگی و انباشتگی ترمز شده است. همان‌طور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی بارگذاری حرکتی، از سه روش بارگذاری معادل، پالس و حرکتی استفاده شده است. مشاهده شد که وجه مشترک سه نوع بارگذاری در تمامی شبیه‌سازی‌ها، کم بودن مقدار شیارشدگی و میزان آسیب در بارگذاری حرکتی در چنین تعداد سیکل می‌باشد. این درحالیست که بارگذاری پالسی بیشترین مقدار شیارشدگی و آسیب را موجب می‌شود. درصد اختلاف مشاهده شده در مقدار دو پارامتر شیارشدگی و آسیب، در تعداد چرخه‌های یکسان میان سه نوع بارگذاری، بین ۳۰ تا ۴۰ درصد می‌باشد و در نتیجه بدلیل وجود چنین اختلاف زیادی نمی‌توان از دو بارگذاری معادل و پالسی برای ساده‌سازی در بارگذاری متحرک استفاده نمود. علت اختلاف را می‌توان چنین توجیه کرد که حین اعمال بارگذاری حرکتی واقعی، تنش اعمالی به هر المان بستر به صورت تدریجی و با پروفایل منحنی شکل (۷) اعمال و همچنین به صورت تدریجی برداشته می‌شود؛ این در حالی است که طی بارگذاری پالسی و یا معادل، بار اعمالی نسبتاً آنی اعمال می‌گردد و مقدار ثابتی دارد. این اختلاف حدود ۳۰-۴۰٪ بارگذاری‌های نوع پالسی و معادل نسبت به بارگذاری واقعی حرکتی باعث تخمین غیردقیق عمر مفید آسفالت و میزان شیارشدگی در بستر آسفالت می‌گردد.

با دقت در نتایج بدست آمده از سه نوع بارگذاری در سه حالت مختلف، می‌توان به تاثیر زمان بارگذاری در حین اعمال بار پی برد. همان‌طور که در شکل (۱۳) قابل مشاهده است با افزایش زمان بارگذاری جسم سریع‌تر وارد ناحیه پلاستیک گشته که خود عامل افزایش نرخ آسیب می‌باشد. از این‌رو می‌توان به رابطه مستقیم زمان بارگذاری و میزان شیارشدگی پی برد. بطور مثال مشاهده می‌شود که تعداد چرخه لازم برای رسیدن جسم به آسیب ۳۵ درصد با افزایش زمان بارگذاری به شدت کاهش یافته است.

مراجع

- [1] Brinson, H.F., and Brinson, L.C., "*Polymer Engineering Science and Viscoelasticity*", Springer, (2008).
- [2] Xu, W., and Li, G., "Constitutive Modeling of Shape Memory Polymer Based Self-healing Syntactic Foam", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, No. 9, pp. 1306-1316, (2010).
- [3] Darabi, M.K., Al-Rub, R.K.A., Masad, E.A., Huang, C. W., and Little, D.N., "A Thermo-viscoelastic-viscoplastic-viscodamage Constitutive Model for Asphaltic Materials", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, No. 1, pp. 191-207, (2011).
- [4] Darabi, M.K., AlRub, R.K.A., Masad, E.A., and Little, D.N., "Thermodynamic Based Model for Coupling Temperaturedependent Viscoelastic, Viscoplastic, and Viscodamage Constitutive Behavior of Asphalt Mixtures", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 36, No. 7, pp. 817-854, (2012).
- [5] Voyiadjis, G.Z., Shojaei, A., and Li, G., "A Generalized Coupled Viscoplastic-viscodamage-viscohealing Theory for Glassy Polymers", *International Journal of Plasticity*, Vol. 28, No. 1, pp. 21-45, (2012).
- [6] Al-Rub, R.K.A., Darabi, M.K., Little, D.N., and Masad, E.A., "A Micro-damage Healing Model that Improves Prediction of Fatigue Life in Asphalt Mixes", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 48, No. 11, pp. 966-990, (2010).
- [7] Drescher, A., Kim, J.R., and Newcomb, D.E., "Permanent Deformation in Asphalt Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 112-128, (1993).
- [8] Liao, G., Wang, S., and Shi, Q., "Enhancing Anti-rutting Performance of Asphalt Pavement by Dispersing Shear Stresses Within Asphalt Layers", *Road Materials and Pavement Design*, pp. 1-17, (2016).
- [9] Shahsavari, H., Naghdabadi, R., Baghani, M., and Sohrabpour, S., "A Viscoelastic-Viscoplastic Constitutive Model Considering Damage Evolution for Time Dependent Materials: Application to Asphalt Mixes", *International Journal of Damage Mechanics*, pp. 1056789516658506, (2016).
- [10] Lemaitre, J., "*A Course on Damage Mechanics*", Springer Science & Business Media, (2012).
- [11] Masad, E., Tashman, L., Little, D., and Zbib, H., "Viscoplastic Modeling of Asphalt Mixes with the Effects of Anisotropy, Damage and Aggregate Characteristics", *Mechanics of Materials*, Vol. 37, No. 12, pp. 1242-1256, (2005).
- [12] Darabi, M.K., Al-Rub, R.K.A., and Little, D.N., "A Continuum Damage Mechanics Framework for Modeling Micro-damage Healing", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, No. 3, pp. 492-513, (2012).

- [13] Al-Rub, R.K.A., and Darabi, M.K., "A Thermodynamic Framework for Constitutive Modeling of Time-and rate-dependent Materials, Part I: Theory", *International Journal of Plasticity*, Vol. 34, pp. 61-92, (2012).
- [14] Darabi, M.K., Al-Rub, R.K.A., Masad, E.A., and Little, D. N., "A Thermodynamic Framework for Constitutive Modeling of Time-and rate-dependent Materials, Part II: Numerical Aspects and Application to Asphalt Concrete", *International Journal of Plasticity*, Vol. 35, pp. 67-99, (2012).
- [15] Lu, Y., and Wright, P., "Numerical Approach of Visco-elastoplastic Analysis for Asphalt Mixtures", *Computers & Structures*, Vol. 69, No. 2, pp. 139-147, (1998).
- [16] Huang, C. W., Masad, E., Muliana, A.H., and Bahia, H., "Nonlinearly Viscoelastic Analysis of Asphalt Mixes Subjected to Shear Loading", *Mechanics of Time-dependent materials*, Vol. 11, No. 2, pp. 91-110, (2007).
- [17] Kettil, P., Lenhof, B., Runesson, K., and Wiberg, N. E., "Simulation of Inelastic Deformation in Road Structures Due to Cyclic Mechanical and Thermal Loads", *Computers & Structures*, Vol. 85, No. 1, pp. 59-70, (2007).
- [18] Huang, B., Mohammad, L., and Rasoulia, M., "Three-dimensional Numerical Simulation of Asphalt Pavement at Louisiana Accelerated Loading Facility", *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1764, pp. 44-58, (2001).
- [19] Saleeb, A., Liang, R.Y., Qablan, H.A., and Powers, D., "Numerical Simulation Techniques for HMA Rutting under Loaded Wheel Tester", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 57-66, (2005).
- [20] Arghavani, J., Auricchio, F., and Naghdabadi, R., "A Finite Strain Kinematic Hardening Constitutive Model Based on Hencky Strain: General Framework, Solution Algorithm and Application to Shape Memory Alloys", *International Journal of Plasticity*, Vol. 27, No. 6, pp. 940-961, (2011).
- [21] Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, "ABAQUS: Example Problems Manual", Vol. 2, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, (2001).
- [22] Abu Al-Rub, R.K., Darabi, M.K., Huang, C. W., Masad, E.A., and Little, D.N., "Comparing Finite Element and Constitutive Modelling Techniques for Predicting Rutting of Asphalt Pavements", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 322-338, (2012).

فهرست نمادهای انگلیسی

A	: مساحت سطح مقطع کل
A^d	: مساحت سطح آسیب دیده
D	: متغیر آسیب
$\bar{\epsilon}$: تانسور انحرافی کرنش موثر
\bar{F}	: سطح تسلیم
K	: مدول حجمی
N	: یک پارامتر حساسیت مثبت نرخ ویسکوپلاستیک
\bar{p}	: تنش مؤثر نسبی
\bar{s}	: تنش مؤثر نسبی
T	: دما
X	: پارامتر آسیب حساسیت مادی

نمادهای یونانی

Γ^{vd}	: پارامتر ویسکوزیته ویسکواسیب
Γ^{vp}	: پارامتر ویسکوزیته ویسکوپلاستیک
ϵ	: تانسور کرنش
$\bar{\theta}$: مولفه حجمی کرنش
λ	: ضریب لاگرانژ
μ	: مدول برشی
ζ	: پارامتر مادی ویسکوالاستیک
σ	: تانسور تنش کوشی
σ^y	: مقدار تنش تسلیم
Y_0	: نیروی آسیب مرجع
\bar{Y}_{eq}	: تنش مؤثر معادل
ψ	: هلمهولتز آزاد انرژی

Abstract

Rutting is one of the most critical distresses influenced the asphalt pavement performance. Due to the complexity of the mechanical asphalt pavement responses, in this study the mechanical behavior of this material under applying real moving load and two other loadings such as equivalent and pulse which has been used in previous studies for simplifying the real moving load, is investigated. A thermodynamically consistent viscoelastic viscoplastic viscodamage constitutive model has been presented in the implicit time discrete form to predict their mechanical responses within the framework of the finite element method in software ABAQUS- Standard. In high cycle loadings, forty percent of rutting difference has been obtained by comparing the pulse and equivalent loadings under moving load that would cause erroneous predictions in asphalt pavement service life.