

مدل سازی اجزاء محدود حرکت تاپر بر روی بستر آسفالت هوشمند و بررسی اثر بازیابی آسیب (ترمیم)

Original Article

روزبه اقبال پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مصطفی باغانی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

حمید شهسواری (دکتري مکانیک)

محمد شجاعی فرد (کارشناسی ارشد)

سعید سهراب پور (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

خرابی در بسترهای آسفالتی یکی از بزرگترین مشکلات راه سازی است که سالانه مبالغ فراوانی صرف بازسازی آنها می شود. فرایند ترمیم برای بازیابی آسیب یکی از روش های مؤثر به منظور افزایش عمر این بسترهاست که اخیراً توسط محققین ارائه شده است. لذا در این پژوهش با در نظر گرفتن یک مدل سازگار ترمودینامیکی، رفتار مکانیکی بستر آسفالت خودترمیم حین حرکت وسیله‌ی نقلیه در نرم افزار اجزاء محدود بررسی شده است. به همین دلیل مدل ساختاری مذکور صریحاً گسسته سازی زمانی شده و در غالب زیرروال VUMAT در نرم افزار ABAQUS مورد استفاده قرار گرفته است. در این شبیه سازی عمر بستر آسفالت با در نظر گرفتن اثر ترمیم و بدون آن مقایسه می شود. نتایج به دست آمده از شبیه سازی های انجام گرفته نشان می دهد که با اعمال اثر ترمیم سرعت رشد آسیب و خرابی ناشی از تغییر شکل دائمی بستر کاهش پیدا کرده و می توان عمر بستر را تا بیش از ۷۰٪ افزایش داد.

r.eghbalpoor@ut.ac.ir
 baghani@ut.ac.ir
 hamid.shahal@gmail.com
 m.shojaefard@ut.ac.ir
 saeed@sharif.edu

واژگان کلیدی: بستر آسفالت، اثر ترمیم، آسیب، گسسته سازی زمانی صریح، مدل سازی اجزاء محدود.

۱. مقدمه

برخی پلیمرها، قیر، بتن سیمانی و مخلوط های آسفالتی نشان داده که رشد آسیب و اثر ترمیم نقش به سزایی در رفتار مکانیکی این مواد داشته است به طوری که اگر از اثرات ترمیم صرف نظر شود، این معادلات ساختاری پیش بینی نادرستی از وضعیت تنش و مقاومت مواد خواهند داشت.^[۷-۱۰]

محققین در سال ۲۰۱۰، یک مدل ساختاری میکروآسیب - ترمیم بر پایه‌ی مکانیک آسیب محیط پیوسته، برای پیش بینی رفتار ویسکوالاستیک - ویسکوپلاستیک - ویسکوالاستیک در بارگذاری خستگی ارائه دادند.^[۴] آنها به ترتیب از الگوریتم های تکرار بازگشتی^۱ و برگشت شعاعی^۲ در مدل های ویسکوالاستیسیته و ویسکوپلاستیسیته استفاده کردند در حالی که مدل های ویسکوالاستیک و میکروآسیب - ترمیم بر پایه‌ی وضعیت طبیعی مؤثر^۳ بودند. در انتها، استفاده از آزمایش های خزش - بازیابی چرخه‌ی تحت بارگذاری کششی و فشاری یک بعدی، صحت مدل خود را بررسی کردند.

وو یاجیس و همکاران^[۱۱-۱۳] تحقیقات زیادی بر مدل سازی رفتاری مواد خودترمیم

مواد خودترمیم دسته‌ی از مواد هوشمند هستند که توانایی بازیابی خواص مکانیکی تضعیف شده ناشی از وارد شدن آسیب را دارند. این آسیب ها با یک تحریک خارجی مانند نیرو، دما یا رطوبت به وجود می آیند و در مقیاس میکرو که در غالب میکروتک ها و میکرو حفره ها در ساختار ماده پدیدار می شوند، بر خواص مکانیکی از جمله استحکام و سختی آن تأثیر گذارده و از میزان آن می کاهد.^[۴-۱۱] در برخی مواد طبیعی و همچنین مواد مهندسی، به صورت تجربی مشاهده شده که خواص مکانیکی بخش آسیب دیده با مرور زمان بازیابی می شود و این رفتار که به «اثر ترمیم» شناخته می شود توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است.^[۴-۶] تاکنون معادلات ساختاری بسیاری برای مواد خودترمیم ارائه شده که ویژگی مشترک همه‌ی آنها کاهش مقدار آسیب در گذر زمان است. مطالعات آزمایشگاهی روی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۹/۱، اصلاحیه ۱۳۹۷/۶/۴، پذیرش ۱۳۹۷/۷/۱۴

DOI:10.24200/J.2018.10835.1452

انجام دادند. آنها ابتدا با بررسی و شناخت مدل‌های آسیب موجود، دو متغیر آسیب و ترمیم جدید را بر پایه سفتی کشسانی معرفی کردند. آنها کارایی این دو متغیر جدید را برای فرایندهای مختلف مانند سیستم‌های خودترمیم جفت و غیرجفت بررسی کردند و وجود سازگاری بین نظریه‌ی خود و مکانیک آسیب محیط پیوسته را نشان دادند. وویاجیس و همکاران با استفاده از مکانیک محیط پیوسته‌ی آسیب - ترمیم و ارضای نامساوی کلازیوس - دوتم، فرمول‌بندی سازگار با ترمودینامیک مواد برای فرایندهای جفت آسیب - ترمیم ارائه کردند. آنها تغییر شکل‌ها را کوچک و اثرات سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک را برای فرایندهای ترمیم در نظر گرفتند. همچنین با انجام آزمایش فشاری یک‌بعدی روی یک ماده‌ی خودترمیم از جنس پلیمر حافظه‌دار و ذرات ترموپلاست و به دست آوردن متغیرهای آسیب و ترمیم با استفاده از تغییرات مدول الاستیسیته، نظریه‌ی خود را با نتایج تجربی صحت‌سنجی کردند.

اخیراً محققین یک مدل پدیده‌شناختی ویسکوالاستیک وابسته به دما ارائه کرده‌اند که با مدل ویسکوالاستیک شپری و ویسکوپلاستیسیته پرزینا ترکیب شده تا رفتار مکانیکی واقعی مخلوط آسفالت را پیش‌بینی کند.^[۱۴] آنها همچنین با در نظر گرفتن اثر ترمیم، یک مدل ساختاری ویسکوالاستیک - ویسکوپلاستیکی برای مواد خودترمیم وابسته به دما معرفی کردند و با اندازه‌گیری مقدار آسیب به صورت تجربی در شرایط بارگذاری مختلف روی نمونه آسفالت، مدل‌های ویسکوالاستیک و ویسکوترمیم خود را کالیبره کردند.^[۱۵]

در سال ۲۰۱۶ ضمن ارائه‌ی یک مدل سازگار ترمودینامیکی، رفتار الاستیک - ویسکوالاستیک - ویسکوپلاستیکی مواد در چارچوب مکانیک محیط‌های پیوسته‌ی آسیب (CDM)^۴ پیش‌بینی شد.^[۱] در این مدل برای توصیف آسیب، معادله‌ی رشد به صورت از پیش توصیف شده^۵ ارائه شد و برای اعتبارسنجی مدل و واسنجی پارامترهای مادی آن از نتایج آزمایش خزش و خزش - بازیابی و خزش - بازیابی چرخه‌ی موجود برای مخلوط آسفالت استفاده شد. با بررسی مفهوم ترمیم، محققین برپایه‌ی ترمودینامیک محیط‌های پیوسته پاسخ ویسکوالاستیک - ویسکوپلاستیکی پلیمرهای خودترمیم را برای کرنش‌های کوچک تخمین زدند. آنها در مطالعه‌ی خود کرنش کل را به صورت جمعی به سه بخش الاستیک، ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیکی تجزیه کردند و با اعمال نامساوی کلازیوس - دوتم، روابط رشد کرنش‌های ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیکی را به دست آوردند. آنها همچنین برای بیان آسیب و ترمیم از روابط از پیش توصیف شده استفاده کردند و مدل خود را با نتایج آزمایشگاهی نمونه آسفالت اعتبارسنجی کردند.^[۷]

به منظور بررسی کارایی مدل ساختاری ارائه شده، لازم است از این مدل برای تحلیل مسائلی با بارگذاری سه‌بعدی وابسته به زمان استفاده شود. وظیفه‌ی اصلی در این قسمت، استفاده از یک روش انتگرال‌گیری مناسب برای معادلات رشد متغیرهای داخلی است. از این رو، باید فرم گسسته‌سازی شده‌ی زمانی این مدل ساختاری را به دست آورد. برای به دست آوردن فرم گسسته‌سازی شده‌ی زمانی، یکی از روش‌های رایج مورد استفاده‌ی پژوهشگران، روش صریح^۶ است که طی آن، وضعیت سیستم در گام‌های زمانی بعدی با فرض معلوم بودن وضعیت فعلی و استفاده از آن محاسبه می‌شود. از مزایای استفاده از این روش حجم محاسبات پایین و همچنین افزایش سرعت محاسبات در عین لزوم برداشتن گام‌های زمانی کوچک برای رسیدن به پایداری است. در تحلیل‌های دینامیکی، به جهت استفاده از مدل ساختاری مورد نظر در قالب زیرروال VUMAT باید از حل‌گر ABAQUS/Explicit استفاده کرد. برای آشنایی بیشتر با روش صریح، معادله‌ی دیفرانسیل ۱ را در نظر

$$y'(t) = f(t, y(t)), \quad y(t_0) = y_0 \quad (۱)$$

مطابق حل صریح خواهیم داشت:

$$y_{n-1} = y_n + f(t_n, y_n) \Delta t \quad (۲)$$

که نشان می‌دهد مجهولات زمانی ما با برداشتن گام زمانی مناسب و دانستن مقادیر آنها در گام زمانی قبل بروز می‌یابند.

در این پژوهش با استفاده از مدل سازگار ترمودینامیکی شهسواری به بررسی رفتار مکانیکی بستر هوشمند آسفالت پرداخته شده است. برای بررسی اجزاء محدود بستر مورد نظر، فرم زمان گسسته‌ی معادلات ساختاری را به روش صریح به دست آورده و با تهیه‌ی زیرروال VUMAT^۷ در نرم‌افزار ABAQUS حرکت تآبیر روی بستر مدل می‌شود. در نهایت با بررسی اثر ترمیم، کاهش سرعت رشد آسیب که منجر به افزایش عمر بستر می‌شود، بررسی می‌شود.

۲. مبانی نظری

در لحظه‌ی اعمال بارگذاری، رفتار الاستیک در بسیاری از مواد مهندسی مشاهده می‌شود. در اکثر این مواد با افزایش بار، آسیب شروع به رشد می‌کند. به مرور زمان آسیب به وجود آمده در مواد خودترمیم کاهش می‌یابد. بنابراین، در چارچوب مکانیک محیط‌های پیوسته آسیب - ترمیم (CDMH) با چهار وضعیت مدل‌سازی روبرو هستیم:^[۱] ۱. ابتدای بارگذاری هیچ آسیب و ترمیمی اتفاق نیفتاده است؛ ۲. آسیب وارد شده اما ترمیم انجام نگرفته است؛ ۳. عملیات ترمیم روی آسیب وارد شده انجام می‌گیرد؛ ۴. در وضعیت مؤثر^۸ آسیب ترمیم نشده از کل سطح مقطع جدا می‌شود. این موقعیت‌ها با موقعیت اولیه (initial)، آسیب دیده (damaged)، آسیب دیده - ترمیم شده (damaged-healed) و وضعیت مؤثر یا موهومی (or fictitious or effective) بیان می‌شود. وضعیت مؤثر یک وضعیت موهومی آسیب ندیده است که در آن سطوح ترمیم نشده‌ی آسیب به طور کامل حذف می‌شود و لذا سطح مقطع در وضعیت مؤثر کوچک‌تر از سایر موقعیت‌هاست. در چارچوب مکانیک محیط‌های پیوسته، متغیرهای آسیب و ترمیم، در صورتی که تغییرات آن همسان^۹ فرض شود، به ترتیب یک کمیت عددی آسیب (D) و ترمیم (h) به صورت نسبت مساحت آسیب دیده (A^d) به مساحت کل (A) و نسبت مساحت ترمیم یافته‌ی آسیب A^h به مساحت آسیب دیده (A^d) تعریف می‌شود. بر همین اساس داریم:

$$D = \frac{A^d}{A}; \quad 0 < D < 1 \quad (۳)$$

$$h = \frac{A^h}{A^d}; \quad 0 < h < 1 \quad (۴)$$

حالت $D = 0$ و $h = 0$ به ترتیب معادل سطح مقطع بدون آسیب و سطح مقطع بدون ترمیم است و $D = 1$ و $h = 1$ مربوط به 100% سطح آسیب دیده و ترمیم کل سطح آسیب دیده است. مطابق این چارچوب برای بیان وضعیت تنش و کرنش ماده در وضعیت مؤثر از فرضیه‌ی نیرو برابر و انرژی کرنشی برابر استفاده می‌شود و اثر ترمیم را در متغیر آسیب مؤثر (\tilde{D}) اعمال می‌کنند. لذا:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D}, \quad (۵)$$

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon(1 - D), \quad (۶)$$

$$\tilde{D} = D(1 - h) \quad (۷)$$

نسبی هستند و چنین محاسبه می شوند: [۷]

$$\begin{aligned} \tilde{s}_1 &= 2\mu^e \tilde{e}^e, \\ \tilde{s}_2 &= 2\mu^e \tilde{e}^e + 2\mu^{ev} (\tilde{e}^e + \tilde{e}^{ev}) - 2\mu^{vp} \tilde{e}^{vp}, \\ \tilde{p}_1 &= K^e \tilde{\theta}^e, \\ \tilde{p}_2 &= K^e \tilde{\theta}^e + K^{ev} (\tilde{\theta}^e + \tilde{\theta}^{ev}) - K^{vp} \tilde{\theta}^{vp} \end{aligned} \quad (12)$$

μ ها و K ها به ترتیب مدول های برشی و حجمی هستند. نرخ ضریب لاگرانژ $\dot{\lambda}$ با استفاده از یک تابع فرانتش^{۱۷} محاسبه می شود: [۷]

$$\dot{\lambda} = \Gamma^{vp} (\Phi(\tilde{F}))^N \quad (13)$$

که در آن Γ^{vp} پارامتر ویسکوزیته پلاستیک و \tilde{F} مطابق رابطه ی ۱۴ سطح تسلیم دراکر - پراگر است:

$$\tilde{F} = \tilde{s}_2 - \alpha \tilde{p}_2 - \tilde{R} \quad (14)$$

(□) براکت ماکالی است و عبارت است از: [۷]

$$\langle \Phi(\tilde{F}) \rangle = \begin{cases} 0 & \tilde{F} < 0 \\ \frac{\tilde{F}}{\sigma_v} & \tilde{F} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

\tilde{F} سطح تسلیم اولیه و \tilde{R} شعاع رویه تسلیم است و عبارت اند از: [۷]

$$\tilde{R} = R_0 + R_1 [1 - \exp(-R_2 \tilde{e}_{eq}^{vp})] \quad (16)$$

R_0 ، R_1 و R_2 پارامترهای مادی هستند و مقدار \tilde{e}_{eq}^{vp} از محاسبه ی $\sqrt{\tilde{e}_{ij}^{vp} \tilde{e}_{ij}^{vp}}$ به دست می آید. در نهایت بخش حجمی و انحرافی تانسور تنش چنین محاسبه می شود: [۷]

$$\begin{aligned} \tilde{s} &= 2\mu^e \tilde{e}^e + 2\mu^{ev} (\tilde{e}^e + \tilde{e}^{ev}) \\ \tilde{p} &= K^e \tilde{\theta}^e + k^{ev} (\tilde{\theta}^e + \tilde{\theta}^{ev}) \end{aligned} \quad (17)$$

برای محاسبه ی رشد آسیب از یک رابطه ی از پیش توصیف شده^{۱۸} استفاده شده که مطابق رابطه ی ۱۸ شامل چهار قسمت است. [۷] قسمت اول (Γ^{vd}) به عنوان یک پارامتر مادی در میزان دامنه رشد اثرگذاری دارد. با در نظر گرفتن نیروی آسیب مرجع (Y_c) به عنوان یک ثابت مدل، قسمت دوم وابستگی آسیب به تنش مؤثر معادل^{۱۹} (\tilde{Y}_{eq}) را نشان می دهد. قسمت سوم عبارت $(1-D)^{p_z}$ مسئول اشباع متغیر آسیب در این قانون رشد است:

$$\dot{D} = \Gamma^{vd} \left(\frac{\tilde{Y}_{eq}}{Y_c} \right)^{X_1} (1-D)^{X_2} \exp(K_D \tilde{e}_{eq}) \quad (18)$$

قسمت چهارم در این مدل، رشد آسیب تابعی نمایی از کرنش مؤثر معادل \tilde{e}_{eq} است. X_1 ، X_2 و X_D پارامترهای حساسیت مادی هستند. تنش و کرنش مؤثر معادل مطابق رابطه ی ۱۹ به دست می آید: [۷]

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{eq} &= \sqrt{3/2} \sqrt{\tilde{s}_{ij} \tilde{s}_{ij}} \\ \tilde{e}_{eq} &= \sqrt{3/2} \sqrt{\tilde{e}_{ij} \tilde{e}_{ij}} \end{aligned} \quad (19)$$

همچنین مشابه رابطه ی رشد آسیب، از یک رابطه ی از پیش توصیف شده برای معرفی رابطه ی رشد ترمیم استفاده شده است. مطابق رابطه ی ۲۰، این قانون

که در آن σ و ε تانسور تنش و کرنش است و علامت (\sim) بیانگر مفهوم متغیر در وضعیت مؤثر است.

هنگامی که یک مدل محیط پیوسته وارد فرایند تغییر شکل می شود، متغیرهای حالت آن -- از جمله کرنش و دما -- دستخوش تغییراتی با تغییر مکان و همچنین تغییر زمان می شوند. به بیان دیگر، در حالت کلی وضعیت ترمودینامیکی مدل محیط پیوسته غیریکنواخت و در وضعیت غیرتعادلی قرار دارد که در این حالت فرایند ترمودینامیکی غیر قابل بازگشت^{۱۰} است. بر همین اساس، قوانین ترمودینامیکی برای فرایندهای غیر قابل بازگشت باید ارضا شود. با در نظر گرفتن نامساوی کلازیوس - دوئم این محدودیت های مورد نیاز به دست می آید و روابط بین تنش - کرنش محاسبه می شود: [۱۶]

$$\sigma : \dot{\varepsilon} - \rho(\dot{\Psi} + \dot{T}s) - q \cdot \frac{gradT}{T} \geq 0 \quad (8)$$

که در آن σ و ε تانسور تنش و کرنش هستند و Ψ انرژی آزاد هلمهولتز است. s و T به ترتیب آنتروپی و دما و بردار q شار حرارتی هستند. علامت نقطه بیانگر مشتق نسبت به زمان است. این نابرابری محدودیت های ضروری را برای معادلات اساسی ایجاد می کند و به طور خاص برای تعیین کردن معادلات ساختاری یک ماده، که سازگار ترمودینامیکی^{۱۱} باشد، به کار می رود. پس از ارضای نامساوی فوق، معادلات ساختاری مورد نظر به دست می آید.

در فرمول بندی عددی معادلات ساختاری استخراج شده، به معادلات دیفرانسیلی زمانی برخورد می کنیم که غالب این معادلات غیرخطی هستند. لذا حل این معادلات به روش های رایج معادلات دیفرانسیل و به دست آوردن جواب دقیق میسر نمی شود. به همین دلیل، در اکثر این موارد از روش های حل عددی به جای به دست آوردن پاسخ دقیق و گسسته سازی زمانی استفاده می شود. یکی از این روش ها استفاده از روش گسسته سازی صریح^{۱۲} و محاسبه ی نتایج در گام های زمانی مختلف است. طی این روش بازه زمانی مسئله $[0, T]$ به بازه های کوچک تر تقسیم، و معادلات روی بازه دلخواه $[t, t + \Delta t]$ با طول بازه Δt حل خواهد شد.

۳. معرفی معادلات ساختاری

در این بخش پس از بیان معادلات ساختاری ارائه شده برای توصیف سینماتیک و قیود ترمودینامیکی مدل سازی، به معرفی معادلات رشد^{۱۳} آسیب و ترمیم خواهیم پرداخت. بر اساس سینماتیک ارائه شده، کرنش کل به صورت جمعی به سه بخش الاستیک (e)، ویسکوالاستیک (ve) و ویسکوپلاستیک (vp) تجزیه می شود. از طرفی هر مؤلفه به بخش های انحرافی (e)^{۱۴} و حجمی (θ)^{۱۵} تقسیم شده است. معادلات ساختاری مورد نظر برای مؤلفه های کرنش فوق عبارت است از: [۷]

$$\dot{e}^{vp} = \dot{\lambda} \frac{\tilde{s}_2}{\|\tilde{s}_2\|}, \quad \dot{\theta}^{vp} = -\dot{\lambda} \beta, \quad (9)$$

$$\dot{e}^{ve} = \frac{1}{\zeta_e} \tilde{s}_1, \quad \dot{\theta}^{ve} = \frac{1}{\zeta_\theta} \tilde{p}_1, \quad (10)$$

$$\dot{e}^e = \dot{\varepsilon} - \dot{e}^{ve} - \dot{e}^{vp}, \quad \dot{\theta}^e = \dot{\theta} - \dot{\theta}^{ve} - \dot{\theta}^{vp} \quad (11)$$

که در آن $\dot{\lambda}$ ضریب لاگرانژ، β مقدار ثابت، ζ_e و ζ_θ پارامترهای مادی انحرافی و حجمی ویسکوالاستیک هستند. $\|\square\|$ اپراتور نرم^{۱۶} است که برای تانسور مرتبه دوم A به صورت $\|A\| = \sqrt{A:A}$ تعریف می شود. \tilde{s}_1 ، \tilde{p}_1 ، \tilde{p}_2 و \tilde{s}_2 تنش های

با در نظر گرفتن معادلات ۱۲ و ۱۷، قسمت های حجمی و انحرافی تنش های مؤثر نسبی و تنش مؤثر کل مشخص می شود:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{\lambda,t} &= \gamma \mu^e \tilde{e}_t^e, \\ \tilde{s}_{r,t} &= \gamma \mu^e \tilde{e}_t^e + \gamma \mu^{ev} (\tilde{e}_t^e + \tilde{e}_t^{ve}) - \gamma \mu^{vp} \tilde{e}_t^{vp}, \\ \tilde{p}_{\lambda,t} &= K^e \tilde{\theta}_t^e, \\ \tilde{p}_{r,t} &= K^e \tilde{\theta}_t^e + K^{ev} (\tilde{\theta}_t^e + \tilde{\theta}_t^{ve}) - K^{vp} \tilde{\theta}_t^{vp}, \\ \tilde{s}_{\lambda} &= \gamma \mu^e \tilde{e}_t^e + \gamma \mu^{ev} (\tilde{e}_t^e + \tilde{e}_t^{ve}), \\ \tilde{p}_t &= K^e \tilde{\theta}_t^e + K^{ev} (\tilde{\theta}_t^e + \tilde{\theta}_t^{ve}). \end{aligned} \quad (25)$$

تنش و کرنش مؤثر معادل در زمان t برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{eq,t} &= \sqrt{3/2} \sqrt{\tilde{s}_{ij,t} \tilde{s}_{ij,t}} \\ \tilde{\epsilon}_{eq} &= \sqrt{3/2} \sqrt{\tilde{\epsilon}_{ij,t}^{vp} \tilde{\epsilon}_{ij,t}^{vp}} \end{aligned} \quad (26)$$

مقدار به روز شده ی متغیر آسیب از معادلات ۱۸ و ۲۶ محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} D_t &= D_{t-\Delta t} + \Gamma^{vd} \left(\frac{\tilde{Y}_{eq}}{Y_c} \right)^{X_1} (\lambda - D_{t-\Delta t})^{X_2} \\ &\quad \times \exp(K_D \tilde{\epsilon}_{eq,t}) \Delta t \end{aligned} \quad (27)$$

با جایگذاری معادله ی فوق در رابطه ی ۲۰، متغیر ترمیم مشخص می شود:

$$\begin{aligned} h_t &= u(\tilde{D} - D_c) \Gamma^h [\lambda - \tilde{D}_t (\lambda - h_{t-\Delta t})]^{Y_1} \\ &\quad \times (\lambda - h_{t-\Delta t})^{Y_2} \Delta t + h_{t-\Delta t} \end{aligned} \quad (28)$$

متغیر آسیب مؤثر با استفاده از معادلات ۲۷ و ۲۸ به دست می آید:

$$\tilde{D}_t = D_t (\lambda - h_t) \quad (29)$$

حال می توان با تهیه ی زیرروال VUMAT به زبان برنامه نویسی فورترن و استفاده از آن در برنامه ی ABAQUS مدل اجزاء محدود بستر هوشمند آسفالت را به دست آورده و تحلیل تنش مورد نظر را انجام داد. همچنین باید توجه داشت که در گسسته سازی معادلات به روش صریح مجهولات به طور خودکار در هر گام زمانی به روز می شوند. نکته ی قابل ذکر استفاده از گام های زمانی کوچک در این روش گسسته سازی، و همچنین الاستیک در نظر گرفتن تمامی تغییرات شکل و کرنش ها در گام زمانی اول است.

۵. اعتبارسنجی فرم زمانی گسسته سازی شده

در این بخش فرم گسسته سازی شده مدل ساختاری که در بخش قبل ارائه شد با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در تحقیقات پیشین^[۱۷] اعتبارسنجی می شود. در شکل ۱ نتایج تحلیل اجزاء محدود با نتایج تجربی در قالب آزمایش های مختلف ارائه شده و قابل مقایسه است.

۶. مدل سازی اجزاء محدود

همان طور که پیش تر اشاره شد در این پژوهش به بررسی اثر ترمیم در کاهش تغییر شکل های دائمی و خرابی های به وجود آمده ناشی از حرکت وسایل نقلیه روی بستر

جدول ۱. پارامترهای مادی بکار رفته در این پژوهش.^[۷]

$E^e (MPa)$	$E^{ev} (MPa)$	$E^{vp} (MPa)$	$\sigma_y^v (MPa)$
۲۲۸,۵۲	۲۶,۴۰	۳۵,۶۱	۲۶,۸۲
$Y_c (kPa)$	$R_c (kPa)$	$R_{\lambda} (kPa)$	R_r
۷۲۶,۲۲	۵۴,۵۷	۱۰,۴۲	۳,۶۷
N	$\Gamma^{vp} (\frac{1}{s})$	$\Gamma^{vd} (\frac{1}{s})$	$\Gamma^h (\frac{1}{s})$
۰,۹۲	$4/12 \times 10^{-1}$	$6/84 \times 10^{-1}$	$5/32 \times 10^{-1}$
X_1	X_2	$\zeta_e (GPa)$	$\zeta_{\theta} (GPa)$
۲,۲۳	۳,۷۹	۳,۰۰	۱,۰۰
Y_{λ}	Y_r	K_D	D_c
۰,۴	۱۵,۴۸	۷۸,۱۴	۰,۱۶

رشد نیز شامل چهار قسمت است: ۱. $u(\bullet)$ تابع پله و D_c به عنوان آستانه ی آسیب برای رشد ترمیم است؛ ۲. (Γ^h) به عنوان یک پارامتر مادی، دامنه ی رشد را مشخص می کند؛ ۳. $(1 - \tilde{D})^{Y_1}$ وابستگی ترمیم به مقدار آسیب را نشان می دهد. با افزایش آسیب، فاصله بین صفحات میکروتک در ماده آسیب دیده افزایش یافته و در نتیجه رشد ترمیم کاهش می یابد. ۴. جمله $(1 - h)^{Y_2}$ منجر به اشباع متغیر ترمیم خواهد شد و به بیان دیگر مقدار ترمیم هیچ گاه به یک نخواهد رسید.^[۷]

$$\dot{h} = u(\tilde{D} - D_c) \Gamma^h (\lambda - \tilde{D})^{Y_1} (\lambda - h)^{Y_2} \quad (20)$$

پارامترهای مادی معادلات ساختاری به کار رفته در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی حاصل از بارگذاری های مختلف روی نمونه آسفالت واسنجی شده است.^[۷] در جدول ۱ مقادیر این پارامترها آورده شده است.

۴. به دست آوردن فرم زمان گسسته ی صریح

با دانستن مقدار کرنش در ابتدا و انتهای بازه حل (یعنی ϵ_t و $\epsilon_{t-\Delta t}$) تمامی متغیرهای داخلی به روز می شوند. با در نظر گرفتن رابطه ی ۱۳، فرم گسسته ی زمانی ضریب لاگرانژ بدین صورت به دست می آید:

$$\Delta \lambda = \lambda_t - \lambda_{t-\Delta t} = \Gamma^{vp} (\Phi(\tilde{F}))^N \Delta t \quad (21)$$

که در آن مقدار تابع تسلیم در زمان t برابر است با:

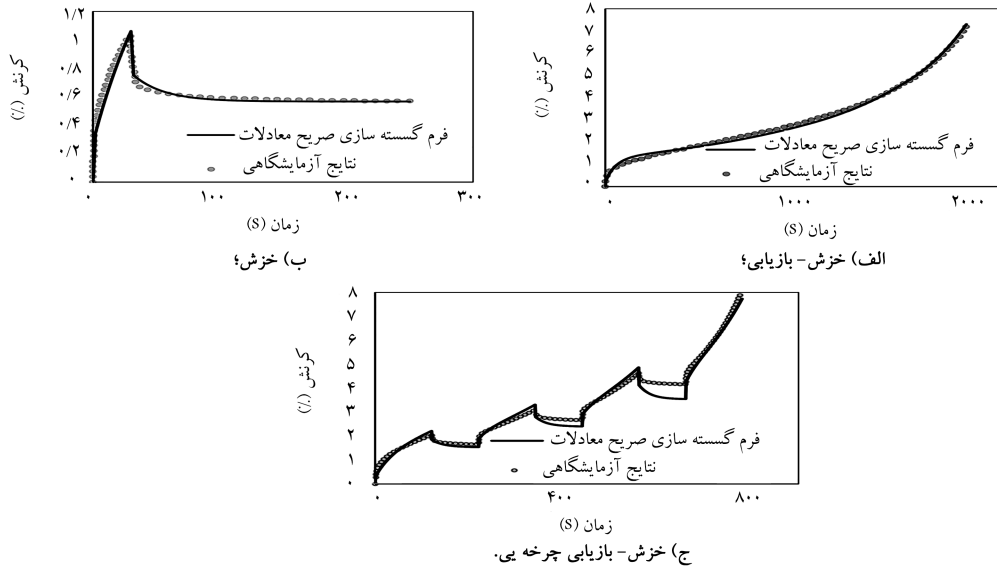
$$\tilde{F}_t = ||\tilde{s}_{r,t}|| - \alpha \tilde{p}_{r,t} - \tilde{R}_t \quad (22)$$

مطابق رابطه ی ۱۶، برای R_t داریم:

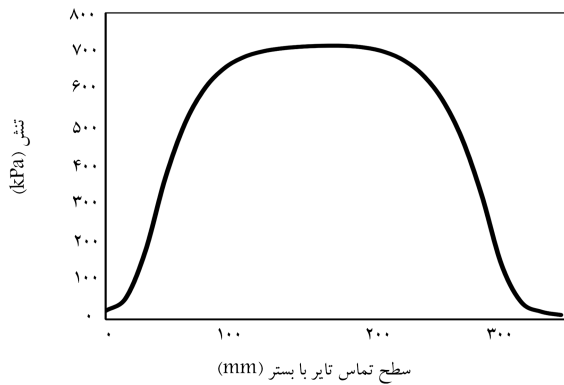
$$\tilde{R}_t = R_c + R_{\lambda} [1 - \exp(-R_r \tilde{\epsilon}_{eq,t}^{vp})] \quad (23)$$

قسمت های حجمی و انحرافی کرنش های الاستیک، ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک در زمان t چنین به دست می آید:

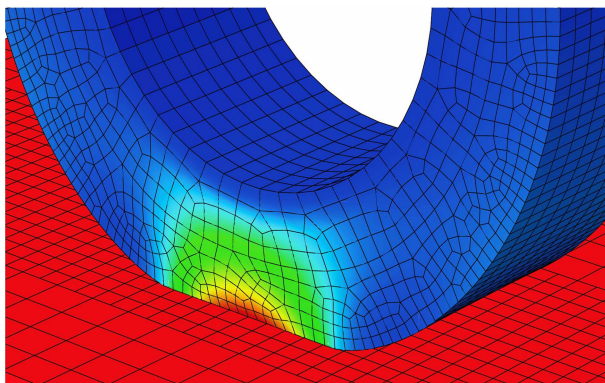
$$\begin{aligned} \dot{\tilde{e}}_t^{vp} + \dot{\tilde{e}}_{t-\Delta t}^v \left(\frac{\tilde{s}_{r,t}}{||\tilde{s}_{r,t}||} \right) \\ \tilde{\theta}_t^{vp} = \tilde{\theta}_{t-\Delta t}^{vp} - \beta \Delta \lambda \\ \dot{\tilde{e}}_t^{ve} = \tilde{e}_{t-\Delta t}^{ve} + \frac{\Delta t}{\zeta_e} \tilde{s}_{\lambda,t}, \quad \dot{\tilde{\theta}}_t^{ve} = \tilde{\theta}_{t-\Delta t}^{ve} + \frac{\Delta t}{\zeta_{\theta}} \tilde{p}_{\lambda,t} \\ \tilde{e}_t^e = \tilde{e}_t - \tilde{e}_t^{ve} - \tilde{e}_t^{vp}, \quad \tilde{\theta}_t^e = \tilde{\theta}_t - \tilde{\theta}_t^{ve} - \tilde{\theta}_t^{vp} \end{aligned} \quad (24)$$



شکل ۱. بستر اعتبارسنجی فرم زمانی گسسته شده با نتایج آزمایشگاهی.



شکل ۲. منحنی تنش اعمالی به بستر ناشی از حرکت تایلر روی آن.



شکل ۳. نمایی از تغییر شکل عمودی تایلر پس از بارگذاری.

مش برای کاهش هزینه‌ی محاسبات استفاده شده است، بدین شرح که مشابه تایلر از المان‌های مکعب سه‌بعدی ۸ گره (C3D8) استفاده شده است و سطوح مختلف با سه سطح مش متفاوت ۱۵، ۲، ۳ و ۳ متر با قید tie در کنار هم گذاشته شده‌اند. تماس تایلر و بستر از نوع اصطکاکی با ضریب اصطکاک $\mu = 0.4$ است. مدل اجزاء محدود بستر در شکل ۴ قابل مشاهده است.

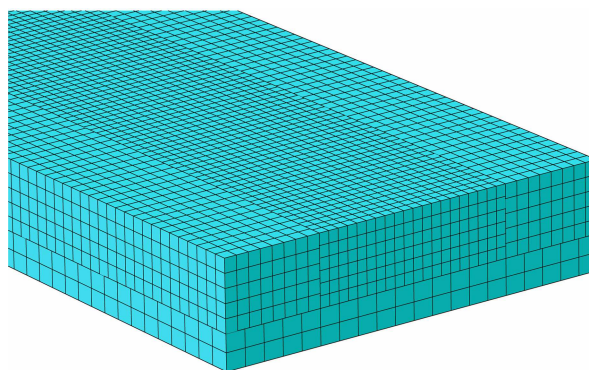
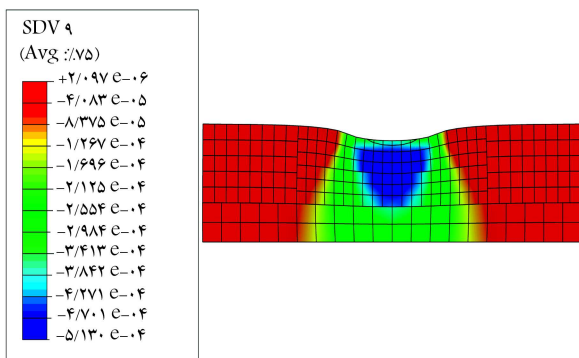
آسفالت می‌پردازیم. در بخش قبل زیرروال مورد نیاز برای بررسی رفتاری آسفالت هوشمند به دست آمد. حال باید مدل‌سازی بستر آسفالت و تایلر مورد نظر انجام شود.

۱.۶. مدل‌سازی تایلر

با توجه به خاصیت تغییر شکل بزرگ مواد لاستیکی، مدل‌سازی تایلر ماشین با در نظر گرفتن خاصیت هایپرلاستیک همسان با تابع انرژی کرنشی چندجمله‌یی^{۲۰} ($C_{10} = 1000000$ و $D_{10} = 1e-6$) و همچنین خاصیت ویسکوالاستیک با در نظر گرفتن تابع سری پرونی ($G_1 = 0.3$ و $\tau_1 = 0.1$) انجام گرفته است.^{۱۸} از این رو پس از اعمال بارگذاری سطح تماس تایلر و بستر افزایش می‌یابد. وزن تقریبی اعمالی روی چرخ ۳۵۰ کیلوگرم است و ابعاد تقریبی تایلر براساس استاندارد وسایل نقلیه‌ی کشور مدل 185/65R14 در نظر گرفته شده است. سرعت حرکت تایلر روی بستر ۵۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است که این سرعت معادل ۱۸ درجه تائیه زمان بارگذاری است. برای درک بهتر از بارگذاری اعمالی به بستر ناشی از حرکت تایلر بر آن، منحنی تنش‌ی اعمالی به سطح آسفالت در شکل ۲ نمایش داده شده است. مطابق این شکل سطح تماس تایلر با بستر حدود ۳۵۰ میلی‌متر است. در شکل ۳ شمایی از چرخ تحت بارگذاری نشان داده شده که بر بستر آسفالت قرار گرفته است. در این مدل‌سازی در جهت کاهش زمان و حجم محاسبات، سطوح با ابعاد مش متفاوت در نظر گرفته شده است. برای مش‌بندی تایلر از المان‌های مکعب سه‌بعدی ۸ گره (C3D8) و همچنین ابزار mesh seed edge استفاده شده؛ بدین طریق که لبه‌های داخلی تایلر با ابعاد ۱/۰ متر و لبه‌های خارجی آن با ابعاد ۲/۰ متر مش‌بندی شده است.

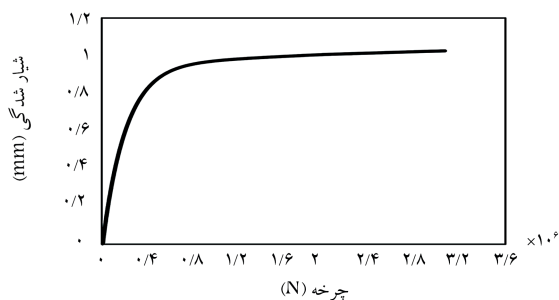
۲.۶. مدل‌سازی بستر

برای مدل‌سازی بستر، ارتفاع بستر ۱۵ سانتی‌متر و عمق آن ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. موقعیت حرکت تایلر وسط بستر در نظر گرفته شده و تمام درجات آزادی سطح پایین بسته شده و سطوح کنار به دلیل اثرگذاری تنش و کرنش بسیار جزئی و قابل اغماض در نظر گرفته شده است. مشابه مدل تایلر، از اندازه‌های مختلف

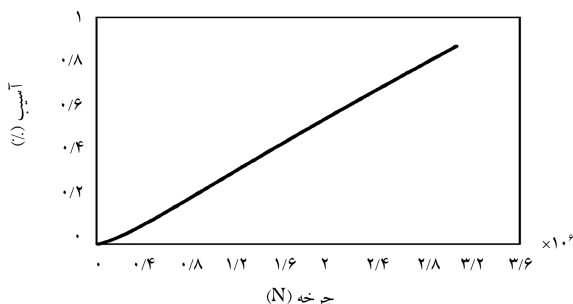


شکل ۴. بستر آسفالت مدل شده برای تحلیل تنش در نرم افزار.

شکل ۵. نمایی از تغییر شکل دائمی به وجود آمده در بستر آسفالت.



الف) میزان شیار شدگی؛



ب) آسیب.

شکل ۶. تغییر شکل مورد بررسی

۳.۶. تغییر شکل مورد بررسی

چنان که اشاره شد، در این پژوهش به بررسی آسیب و اثر ترمیم در به تأخیر انداختن تغییر شکل های دائمی در بستر آسفالت پرداخته ایم. از جمله تغییر شکل های دائمی به وجود آمده می توان به پدیده ی شیار شدگی^{۲۱} اشاره کرد. شیار شدگی، فرورفتگی سطحی در راستای مسیر حرکت چرخ است که همراه با جابه جایی عمودی خواهد بود. نمونه یی از این پدیده در شکل ۵ نمایش داده شده است. پدیده ی فوق با تکرار دفعات زیاد و با توجه به عمر چندساله ی بستر به مرور زمان اتفاق می افتد. به همین علت، در این پژوهش حرکت چرخ بر بستر با تعداد دفعات بالا انجام گرفته است.

۷. نتایج به دست آمده

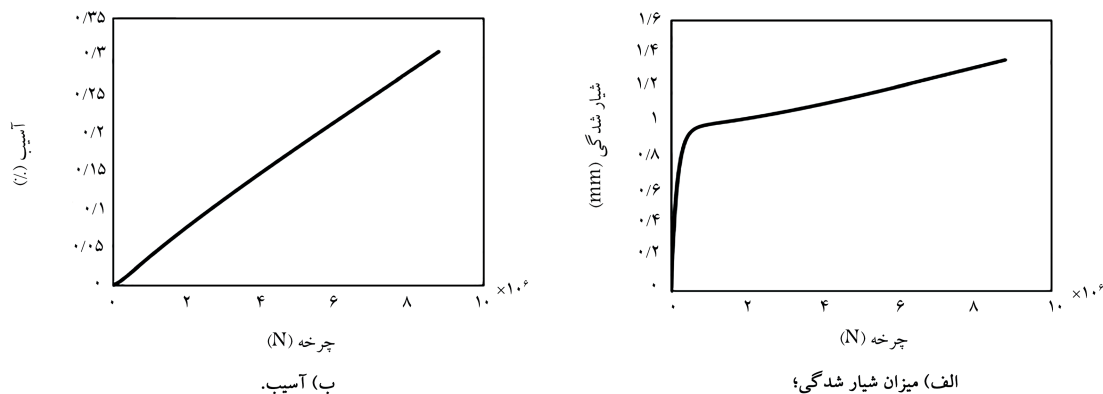
در این بخش نتایج به دست آمده از مدل سازی معرفی شده در بخش قبل بیان می شود. در شکل ۶ تغییر شکل دائمی به وجود آمده در بستر آسفالت پس از ۱۰۰۰۰ چرخه ی رفت تاینر با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر نشان داده شده است^{۲۲}. بر اساس ادبیات تحقیق، برای محاسبه ی شیار شدگی از رابطه ی ۳۰ استفاده می شود:^[۱۹]

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

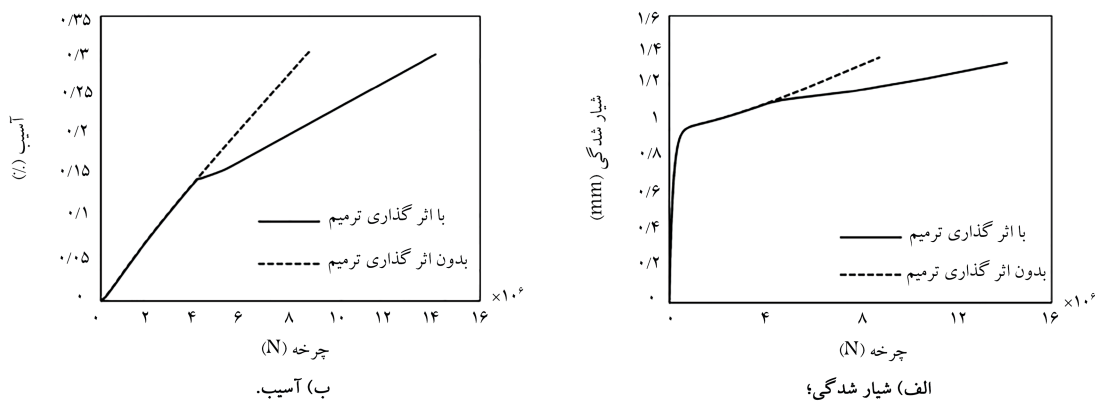
که در آن $u_{nutting}$ جابه جایی دائمی (شیار شدگی)، $\varepsilon^{vp(k)}$ کرنش ویسکوپلاستیک عمودی در لایه ی K ام و h ضخامت آن لایه است. شیار شدگی را برای نقطه یی

در میانه ی پهنای بارگذاری محاسبه می کنیم. در شکل ۷ نتایج به دست آمده برای حدود ۳ میلیون چرخه ی رفت تاینر بر بستر آسفالت نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده در نمودارهای شکل ۷ میزان شیار شدگی کم و مقدار آسیب نهایی پس از حدود ۳ میلیون چرخه ی رفت معادل ۰.۸٪ است که این مقدار برای بررسی اثرگذاری ترمیم مناسب نیست. چنان که در بخش ۳ اشاره شد، در آستانه ی شروع ترمیم مقدار آسیب ۱.۶٪ است و بنابراین برای رسیدن به میزان مطلوب و کاهش هزینه ی محاسبات و تسریع در رشد آسیب، سرعت حرکت تاینر را به نصف کاهش داده و شبیه سازی مجدد انجام می شود. نتایج به دست آمده در ادامه قابل مشاهده است.

چنان که در شکل ۸ مشاهده می شود، پس از حدود ۸ میلیون چرخه بارگذاری مقدار آسیب به ۳.۰٪ رسیده است که برای مقادیر بیشتر آن، در واقعیت نمونه دچار گسیختگی خواهد شد. حال با این شرایط می توان اثرگذاری ترمیم را بر کاهش سرعت رشد آسیب و در نتیجه افزایش عمر بستر بررسی کرد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۹، پس از رسیدن مقدار آسیب به آستانه ی شروع ترمیم شیب منحنی آسیب،



شکل ۸. نتایج شبیه‌سازی حرکت چرخ با کاهش سرعت.



شکل ۹. مقایسه اثر ترمیم در میزان.

مکانیکی این مواد تحت تحلیل اجزاء محدود است. در ادامه با مدل‌سازی حرکت تابر روی بستر آسفالت، تغییر شکل دائمی موسوم به شیاردگی مورد مطالعه قرار گرفت. به دلیل عمر چندساله بستر آسفالت، این شبیه‌سازی باید در تعداد تکرار بالا انجام گیرد. لذا این بارگذاری به صورت چرخه‌یی و تعداد بالا انجام گرفت تا بتوان اثر پدیده‌ی ترمیم را در کاهش سرعت آسیب مشاهده کرد. مطالعه‌ی انجام شده نشان می‌دهد با اثر ترمیم می‌توان سرعت رشد آسیب را تا حدی کاهش داد، به نحوی که عمر بستر آسفالت تا بیش از ۷۰٪ افزایش یابد. لذا می‌توان دریافت که مطالعه‌ی اثر ترمیم در رفتار مکانیکی بستر آسفالت که دسته‌یی از مواد هوشمند است در تخمین عمر آن حائز اهمیت است. با تعیین ساختار پلیمری ویژه برای افزایش اثر ترمیم می‌توان هزینه‌های مربوط به نوسازی بسترهای آسفالت و خرابی‌های مورد نظر را تا میزان قابل توجهی کاهش داد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور INSF انجام شده است.

یا به عبارتی نرخ آن، کاهش پیدا کرده و تعداد چرخه‌های بیشتری را می‌توان به بستر اعمال کرد. انرژداری ترمیم در افزایش عمر بستر نیز با مشاهده‌ی میزان شیاردگی به خوبی قابل مشاهده است. مطابق این نتایج تا بیش از ۱۴ میلیون سیکل بارگذاری نمونه‌ی مورد نظر دوام آورده است.

۸. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای مطالعه‌ی اثر ترمیم در کاهش نرخ رشد آسیب، مدل ترمودینامیکی ارائه شده برای بستر آسفالت هوشمند در قالب زیرروال VUMAT در نرم‌افزار تحلیل تنش ABAQUS به کار گرفته شده و توضیحات دقیق و مرحله به مرحله در به دست آوردن فرم زمان‌گسسته‌ی معادلات ساختاری ارائه شده است. همچنین نمونه‌ی آسفالت مورد نظر تحت بارگذاری‌های تنشی مختلف خزش، خزش - بازیابی، خزش - بازیابی چرخه‌یی مطابق بارگذاری‌های آزمایشگاهی قرار گرفته و برنامه نوشته شده اعتبارسنجی شد که این مورد خود گامی مهم در راستای بررسی و پیش‌بینی رفتار

پانویس‌ها

1. recursive iterative
2. radial return

3. effective natural configuration
4. continuum damage mechanics
5. prescribed evolution equation
6. explicit method

7. subroutine
8. effective configuration
9. isotropic
10. irreversible
11. thermodynamically consistent
12. implicit
13. evolution equation
14. deviatoric part
15. volumetric part
16. norm operator
17. over stress function
18. prescribed evolution equation
19. equivalent effective stress
20. polynomial energy function
21. rutting
22. simulated using simorgh supercomputer center (SSC) high-performance computing, School of Mechanical Engineering, Tehran University.

منابع (References)

1. Shakiba, M., et al. "Continuum coupled moisture-mechanical damage model for asphalt concrete. transportation research record:", *Journal of the Transportation Research Board*, **2372**(1), pp. 72-82 (2013).
2. Shahsavari, H., et al. "A viscoelastic-viscoplastic constitutive model considering damage evolution for time dependent materials: application to asphalt mixes", *International Journal of Damage Mechanics*, **25**(7), pp.921-942 (2016).
3. Roux, E., et al. "A new finite element approach for modelling ductile damage void nucleation and growth-analysis of loading path effect on damage mechanisms", *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, **22**(7) pp. 075001 (2014).
4. Al-Rub, R.K.A., et al. "A micro-damage healing model that improves prediction of fatigue life in asphalt mixes", *International Journal of Engineering Science*, **48**(11), pp. 966-990 (2010).
5. 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*, **49**(3), pp. 492-513 (2012).
6. Lucas, S.S., et al. "Study of quantification methods in self-healing ceramics, polymers and concrete: a route towards standardization", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **27**(19), pp. 2577-2598 (2016).
7. Shahsavari, H., et al. "A thermodynamically consistent viscoelastic-viscoplastic constitutive model for self-healing materials" *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **29**(6), pp. 1065-1080 (2018).
8. Konartakhteh, M.D., Thermo-viscoelastic-viscoplastic-viscodamage-healing modeling of bituminous materials: Theory and computation. Texas A&M University (2011).
9. Formia, A., et al. "Experimental analysis of self-healing cement-based materials incorporating extruded cementitious hollow tubes", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **27**(19), pp. 2633-2652 (2016).
10. Zhu, H., et al. "A two-dimensional micromechanical damage-healing model on microcrack-induced damage for microcapsule-enabled self-healing cementitious composites under tensile loading", *International Journal of Damage Mechanics*, **24**(1) pp.99-115 (2014).
11. Voyiadjis, G.Z., et al. "Continuum damage-healing mechanics with introduction to new healing variables", *International Journal of Damage Mechanics*, **21**(3), pp. 391-414 (2012).
12. Voyiadjis, G.Z., Shojaei, A. and Li, G. "A thermodynamic consistent damage and healing model for self healing materials", *International Journal of Plasticity*, **27**(7), pp. 1025-1044 (2011).
13. Voyiadjis, G.Z., Shojaei, A. and Li, G. "A generalized coupled viscoplastic-viscodamage-viscohealing theory for glassy polymers", *International Journal of Plasticity*, **28**(1), pp. 21-45 (2012).
14. Darabi, M.K., et al. "A thermo-viscoelastic-viscoplastic-viscodamage constitutive model for asphaltic materials", *International Journal of Solids and Structures*, **48**(1), pp. 191-207 (2011).
15. Darabi, M.K., et al. "Constitutive modeling of fatigue damage response of asphalt concrete materials with consideration of micro-damage healing", *International Journal of Solids and Structures*, **50**(19), pp. 2901-2913 (2013).
16. Murakami, S., "Continuum damage mechanics: a continuum mechanics approach to the analysis of damage and fracture", *Science & Business Media*, **185**, Springer (2012).
17. Darabi, M.K., et al. "Thermodynamic-based model for coupling temperature-dependent viscoelastic, viscoplastic, and viscodamage constitutive behavior of asphalt mixtures", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **36**(7), pp. 817-854 (2012).
18. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, ABAQUS: Example Problems Manual. 2 (2001).
19. Abu Al-Rub, R.K., et al. "Comparing finite element and constitutive modelling techniques for predicting rutting of asphalt pavements", *International Journal of Pavement Engineering*, **13**(4), pp. 322-338 (2012).