

بررسی رفتار ویسکوالاستیک-ویسکوپلاستیک-ویسکوآسیب پلیمرها تحت بارگذاری چرخه‌ای و مطالعه پارامتریک رفتار مکانیکی آن

محمد شجاعی فرد، مصطفی باغانی*، حمید شهسواری، روزبه اقبال پور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۰۹

بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۱۰

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۲/۱۶

کلمات کلیدی:

ویسکوالاستیک

ویسکوپلاستیک

ویسکوآسیب

شبیه‌سازی اجزای محدود

گسسته‌سازی صریح

خلاصه: با توجه به وابستگی پاسخ پلیمرها به نرخ و زمان، در شرایط اعمال بارگذاری خارجی، پیچیدگی بسیاری جهت پیش‌بینی پاسخ مکانیکی این مواد وجود دارد. از این رو، جهت مطالعه رفتار مکانیکی این مواد در حین اعمال بارگذاری، یک مدل سازگار ترمودینامیکی ویسکوالاستیک-ویسکوپلاستیک-ویسکوآسیب برای پیش‌بینی پاسخ مکانیکی این مواد در نظر گرفته شده است. بدین منظور این مدل ساختاری را به صورت صریح گسسته‌سازی زمانی کرده تا در قالب سابروتین مادی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس بکار گرفته شود، این روش به دلیل دقت و زمان حل مناسب و عدم نیاز به ماتریس شیب و محاسبات پیچیده آن در هر گام زمانی بسیار ارزشمند است. پس از صحت‌سنجی کد سابروتین به وسیله نتایج آزمایشگاهی، به بررسی حساسیت رفتار مکانیکی پلیمر نسبت به خواص مکانیکی از جمله خواص ویسکوالاستیک، ویسکوپلاستیک و ویسکوآسیب آن پرداخته شده است. در ادامه، همچنین تاثیر مستقیم زمان بارگذاری و سطح تنش اعمالی و رابطه معکوس زمان برابرداری بر افزایش متغیر آسیب و کرنش بوجود آمده در این بستر در دو نوع بارگذاری خزش‌بازیابی چرخه‌ای افزایشی و ثابت مشاهده شده است. به طور مثال، دو برابر کردن تعداد سیکل افزایش دامنه از ۵۰ تا ۱۰۰، موجب افزایش عمر و کاهش حدود ۷۵ درصدی میزان آسیب می‌گردد.

۱- مقدمه

وزن مناسب، سفتی^۱، خاصیت الاستیک^۲، مقاومت در برابر خوردگی^۴، عدم هدایت^۵ حرارت و الکتریسیته، رنگ، شفافیت و قیمت کم اشاره کرد که توسعه پلیمرهای مصنوعی و رشد صنایع پلیمر در طی چند دهه اخیر مورد تاثیر چنین عواملی قرار گرفته است [۱]. تفاوت اصلی بین پلیمرها و سایر مواد دیگر، رئولوژیک ذاتی آن‌ها یا خواص وابسته به زمان آن‌ها می‌باشد. به بیان ساده، خواص مکانیکی (همین‌طور خواص نوری، الکتریکی و...) پلیمرها، مانند مدول الاستیسیته، مقاومت و ضریب پواسون، نسبت به زمان متغیر می‌باشد. اکثر مواد در شرایطی همچون دمای بالا، نفوذ رطوبت، خوردگی و عوامل دیگر از خود خواص وابسته به زمان نشان می‌دهند، اما وجود خواص وابسته به زمان در پلیمرها ناشی از ساختار مولکولی منحصر به فرد آن‌ها می‌باشد. در واقع بسیاری از این خصوصیات ویژه برگرفته

بسیاری از مواد اطراف ما را پلیمرهای طبیعی تشکیل می‌دهند. در حقیقت مولکول‌های پایه‌ای تمام گیاهان و جانداران پلیمرهای طبیعی هستند که امروزه به طور گوناگون یافت می‌شوند. پلیمرهای طبیعی شامل موادی مانند خاک، بافت و سلولز می‌باشند. در حالی که بسیاری از پلیمرها و پلاستیک‌های مورد استفاده مهندسی به صورت مصنوعی طراحی شده تا با فرمولاسیون شیمیایی خود دارای ویژگی‌های منحصر به فردی باشند تا در جایگاه مناسب بکار گرفته شوند.

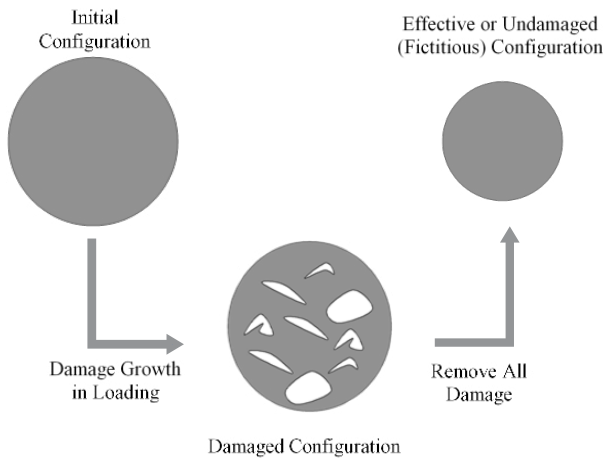
موفقیت تجاری محصولات پلیمری باعث ایجاد درخواست برای تولید بیشتر این مواد شده است، به نحوی که حجم تولیدی این محصولات طی ۲۰ سال گذشته از تمامی محصولات فلزی بیشتر بوده است. از انواع ویژگی‌های خاص این مواد می‌توان به استحکام^۱ بالا یا

- 2 Stiffness
- 3 Elasticity Property
- 4 Resistance to Corrosion
- 5 Lack of Conductivity
- 6 Transparency

- 1 Strength

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: baghani@ut.ac.ir





شکل ۱: وضعیت‌های مختلف مدل‌سازی در حین بارگذاری در مواد آسیب‌دیده

Fig. 1: Different modelling configurations of damaged materials under loading

نمی‌شود. وضعیت آسیب دیده شرایط بعد از بارگذاری و ایجاد آسیب را در ماده نشان می‌دهد. وضعیت موثر یک وضعیت غیر آسیب دیده خیالی است که تمام آسیب از وضعیت قبلی حذف شده است. با توجه به در نظر نگرفتن میزان آسیب در ماده، سطح جدید بدست آمده از سطوح در وضعیت‌های قبلی کمتر می‌باشد.

طبق تئوری مکانیک محیط پیوسته آسیب، متغیر آسیب به صورت نسبت مساحت آسیب دیده به مساحت کل تعریف می‌شوند:

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

با توجه به این حقیقت که نیروی داخلی وارده بر هر سطح آسیب‌دیده با نیروی وارده قبل از وجود آسیب برابر است، روابط زیر برقرار می‌باشد:

$$dF = \sigma dA = \tilde{\sigma} d\tilde{A} \quad (2)$$

$$d\tilde{A} = (1 - D) dA \quad (3)$$

که با ترکیب روابط (۲) و (۳)، رابطه تنش در حالت اولیه و موثر حاصل می‌گردد:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (4)$$

همچنین با استفاده از فرضیه انرژی کرنشی معادل، رابطه (۶) بین

از ساختار مولکولی زنجیره‌ای طولانی این مواد می‌باشد [۱ و ۲]. مشاهدات تجربی بسیاری به طور واضح نشان داد که رفتار وابسته به زمان مواد را می‌توان به دو مولفه برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر تقسیم کرد. 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].

در طی بارگذاری‌های متنوع بر روی مواد پلیمری و تغییر شکل حاصله، میکروساختار این مواد^۱ دچار تغییر می‌شود و این اثر معمولاً منجر به ایجاد میکروآسیب^۲ (شامل میکروتُرک^۳ و میکروحفره^۴) در ماده 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. به‌طور مثال تجمع میکروحفره‌ها 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، صلبیت، سفتی و عمر باقیمانده خواهد شد [۲ و ۴].

تئوری‌های بر پایه مکانیک محیط پیوسته آسیب^۵، به منظور بیان تغییر خواص مکانیکی ناشی از رشد میکروآسیب‌ها در مواد مختلف به کار برده می‌شود که فرض اساسی در این تئوری‌ها، برگشت‌ناپذیر بودن پدیده آسیب یا همیشه افزایشی بودن متغیر آسیب است. طبق تئوری مکانیک محیط پیوسته آسیب، با اعمال بارگذاری بر روی بسیاری از مواد مهندسی، بعد از گذر از رفتار خطی الاستیک ماده، آسیب در ماده شروع به رشد خواهد کرد. بنابراین، در تئوری مکانیک محیط پیوسته آسیب برای ماده سه وضعیت در نظر می‌گیرند که با ارتباط دادن آن‌ها وضعیت موثر توصیف می‌گردد. این وضعیت‌ها همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با نام وضعیت‌های اولیه، آسیب‌دیده و موثر نام‌گذاری شده‌اند. وضعیت اولیه شرایط قبل از اعمال بارگذاری را نشان می‌دهد که در ماده هیچ آسیبی مشاهده

- 1 Material Microstructure
- 2 Microdamage
- 3 Microcrack
- 4 Microvoid
- 5 Continuum Damage Mechanics (CDM)

کرنش‌ها حاصل می‌گردد:

$$\frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{\sigma}}:\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}\boldsymbol{\sigma}:\boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \boldsymbol{\varepsilon}(1-D) \quad (6)$$

که در این روابط D متغیر آسیب، $\boldsymbol{\varepsilon}$ تانسور کرنش و $\boldsymbol{\sigma}$ تانسور تنش می‌باشد. علامت (\sim) بیانگر مقدار متغیر در وضعیت مؤثر می‌باشد.

زمانی که یک مدل محیط پیوسته تحت بارگذاری‌های اعمالی وارد فرآیند تغییرشکل می‌شود، تغییر مکان و تغییر زمان، باعث ایجاد تغییراتی در متغیرهای حالت آن، از جمله کرنش و دما، می‌شوند. به بیان دیگر، مدل محیط پیوسته در وضعیت ترمودینامیکی غیریکنواخت غیرتعادلی قرار دارد که به این حالت فرآیند ترمودینامیکی غیرقابل بازگشت گفته می‌شود. بر این اساس، برای فرآیندهای غیرقابل بازگشت، قوانین ترمودینامیکی باید ارضا گردند. با در نظر گرفتن قانون اول و دوم ترمودینامیک و استفاده از تعریف انرژی آزاد هلمهولتز، نامساوی کلازیوس-دوهم حاصل می‌گردد. بنابراین، با بکارگیری این نابرابری معادلات ساختاری یک ماده سازگار ترمودینامیکی استخراج می‌شوند. از این طریق روابط بین تنش-کرنش محاسبه می‌گردد. این نامساوی به صورت زیر ارائه می‌گردد [۵]:

$$\boldsymbol{\sigma}:\boldsymbol{\varepsilon} - (\dot{\psi} + \dot{T}s) - \mathbf{q} \cdot \left(\frac{\text{grad}T}{T} \right) \geq 0 \quad (7)$$

که در آن $\boldsymbol{\sigma}$ و $\boldsymbol{\varepsilon}$ تانسور تنش و کرنش می‌باشند و ψ انرژی آزاد هلمهولتز می‌باشد. T و s به ترتیب آنتروپی و دما و بردار \mathbf{q} شار حرارتی می‌باشند. علامت نقطه در بالای پارامترها نیز بیانگر مشتق نسبت به زمان از این پارامترها می‌باشد.

بسیاری از مدل‌ها بر پایه 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 [۸-۶]. از جمله این مدل‌ها می‌توان مدل ساختاری که اخیراً توسط دارابی و همکاران [۳] ارائه شده را بیان کرد؛ که یک مدل پدیده‌شناختی ویسکوآسیب وابسته به دما می‌باشد. این مدل ساختاری با ترکیب مدل ویسکوآلاستیک

شپری^۲ و ویسکوپلاستیسیته پرزینا^۳، رفتار پلیمرها را تحت بارگذاری‌های مکانیکی پیش‌بینی می‌کند. همچنین دارابی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۲ 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 ویسکوآلاستیسیت، ویسکوپلاستیسیته، ویسکوآسیب بر پایه ترمودینامیک محیط پیوسته بنا شده است [۹ و ۱۰]. در نتیجه ارائه چنین مدل ساختاری برای مواد پلیمری و آسفالت، مطالعات بسیاری برای شبیه‌سازی رفتار این مواد تحت بارگذاری خارجی انجام گرفته است [۱۳-۱۱].

ابوالراب و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۰، یک مدل ساختاری میکروآسیب بر پایه مکانیک آسیب محیط پیوسته، برای پیش‌بینی رفتار ویسکوآلاستیک-ویسکوپلاستیک-ویسکوآسیب پلیمرها در بارگذاری خستگی ارائه دادند. آن‌ها به ترتیب از الگوریتم‌های تکرار بازگشتی و برگشت شعاعی در مدل‌های ویسکوآلاستیسیت و ویسکوپلاستیسیته استفاده کردند در حالی که مدل ویسکوآسیب بر پایه وضعیت طبیعی مؤثر بودند. در انتها، با استفاده از آزمایش‌های تکرار شونده خزش-بازیابی^۴ تحت بارگذاری کششی و فشاری یک بعدی صحت مدل خود را بررسی کردند.

در این پژوهش، با بکارگیری معادله ساختاری وابسته به زمان، رفتار بستر ویسکوآلاستیک، ویسکوپلاستیک و ویسکوآسیب مورد بررسی قرار گرفته است. طبق این مدل ساختاری سازگار ترمودینامیکی، پاسخ ویسکوآلاستیک-ویسکوپلاستیک پلیمرها بر پایه ترمودینامیک محیط‌های پیوسته با فرض کرنش‌های کوچک پیش‌بینی شده است. برای مدل‌سازی اجزای محدود ماده پلیمری، روابط ساختاری را می‌بایست گسسته‌سازی زمانی کرد و روابط حاصله از این گسسته‌سازی را در قالب سابروتین در نرم‌افزار اجزای محدود مورد استفاده قرار داد. در ادامه برای اطمینان از صحت گسسته‌سازی و کد سابروتین، مدل‌سازی اجزای محدود در شرایط خاصی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. سپس با توجه به اهمیت رفتارهای مکانیکی مواد پلیمری، به بررسی حساسیت پارامترهای مختلف و تاثیر آن‌ها بر رفتار مکانیکی مواد پلیمری پرداخته شده است. در

2 Schapery

3 Perzyna

4 Repeated Creep-Recovery Tests

1 Thermodynamically Consistent

μ ها و K ها به ترتیب مدول‌های برشی و حجمی هستند. نرخ ضریب لاگرانژ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن Γ^{vp} پارامتر ویسکوزیته پلاستیک، \tilde{F} سطح تسلیم دراکر-پراگر و $\langle \Phi(\tilde{F}) \rangle$ براکت ماکالی^۴ می‌باشد که به صورت رابطه (۱۵) بیان می‌گردد.

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

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

σ^y سطح تسلیم اولیه و \tilde{R} شعاع رویه تسلیم می‌باشد که مطابق رابطه زیر بیان می‌شود:

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

R_0, R_1, R_2 پارامترهای مادی هستند و مقدار کرنش ویسکوپلاستیک موثر $\tilde{\epsilon}_{eq}^{vp}$ به صورت رابطه $\tilde{\epsilon}_{eq}^{vp} = \sqrt{\tilde{\epsilon}_{ij}^{vp} \tilde{\epsilon}_{ij}^{vp}}$ بدست می‌آید. در انتها نیز، بخش حجمی و انحرافی تانسور تنش به صورت زیر ارائه شده است:

$$\begin{aligned} \tilde{s} &= 2\mu^e \tilde{\epsilon}^e + 2\mu^{eve} (\tilde{\epsilon}^e + \tilde{\epsilon}^{ve}), \\ \tilde{p} &= K^e \tilde{\theta}^e + K^{eve} (\tilde{\theta}^e + \tilde{\theta}^{ve}). \end{aligned} \quad (17)$$

۲-۲- معادله رشد آسیب

در این معادله ساختاری، معادله رشد آسیب به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{D} = \Gamma^{vd} \left(\frac{\tilde{Y}_{eq}}{Y_0} \right)^{X_1} (1-D)^{X_2} \exp(K_D \tilde{\epsilon}_{eq}) \quad (18)$$

در این قانون رشد آسیب، چهار قسمت مختلف قابل اهمیت می‌باشد. قسمت اول پارامتر Γ^{vd} ، به عنوان یک پارامتر مادی بوده، که به طور مستقیم در میزان دامنه رشد آسیب تاثیر می‌گذارد. با در نظر گرفتن نیروی آسیب مرجع Y_0 به عنوان یک ثابت مدل، قسمت دوم معادله آسیب که وابستگی این پارامتر را به تنش موجود در ماده

انتها به مطالعه عوامل مختلف بارگذاری خارجی مانند زمان بارگذاری، زمان باربرداری و سطح تنش بارگذاری اعمالی در دو بارگذاری خزش-بازیابی چرخه‌ای با دامنه ثابت و افزایشی، بر رفتار مکانیکی این مواد پرداخته شده است.

۲- روابط ساختاری

۲-۱- مولفه‌های کرنش و تنش

با فرض کرنش کوچک در این پژوهش، کرنش کل به سه بخش الاستیک (e)، ویسکوالاستیک (ve) و ویسکوپلاستیک (vp) به صورت جمعی تجزیه می‌شود که هر کدام از این بخش‌ها به دو مولفه انحرافی^۱ ($\tilde{\epsilon}$) و حجمی^۲ ($\tilde{\theta}$) تقسیم شده‌اند.

$$\tilde{\epsilon} = \tilde{\epsilon}^e + \tilde{\epsilon}^{ve} + \tilde{\epsilon}^{vp} \quad (8)$$

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

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

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

$$\tilde{\epsilon}_t^e = \tilde{\epsilon}_t - \tilde{\epsilon}_t^{ve} - \tilde{\epsilon}_t^{vp}, \quad \tilde{\theta}_t^e = \tilde{\theta}_t - \tilde{\theta}_t^{ve} - \tilde{\theta}_t^{vp} \quad (11)$$

که در آن $\dot{\lambda}$ نرخ ضریب لاگرانژ، β مقدار ثابت، ζ_e و ζ_θ پارامترهای مادی ویسکوالاستیک که به ترتیب بخش انحرافی و حجمی می‌باشند. $\|\mathbf{A}\| = \sqrt{\mathbf{A}^T : \mathbf{A}}$ ابراتور نرم^۳ برای تانسور مرتبه دوم \mathbf{A} به صورت \tilde{p}_2 و \tilde{p}_1 روابط \tilde{p}_2 و \tilde{p}_1 و \tilde{s}_2 و \tilde{s}_1 تنش‌های نسبی می‌باشند که به صورت زیر بدست می‌آیند:

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

$$\begin{aligned} \tilde{s}_1 &= 2\mu^e \tilde{\epsilon}^e, \\ \tilde{s}_2 &= 2\mu^e \tilde{\epsilon}^e + 2\mu^{eve} (\tilde{\epsilon}^e + \tilde{\epsilon}^{ve}) - 2\mu^{vp} \tilde{\epsilon}^{vp}. \end{aligned}$$

-
- 1 Deviatoric Part
 - 2 Volumetric Part
 - 3 Norm Operator

4 Macaulay Bracket

کرنش انحرافی و حجمی ویسکوپلاستیک را در گام جدید بدست آورده و در ادامه با استفاده از این مقادیر و رابطه (۱۰) کرنش‌های انحرافی و حجمی ویسکوپلاستیک نیز محاسبه می‌گردد. سپس با داشتن تمامی مولفه‌های کرنش کل، ویسکوپلاستیک و ویسکوپلاستیک، مولفه‌های انحرافی و حجمی کرنش الاستیک محاسبه می‌گردد. در نهایت با در نظر گرفتن تمامی مقادیر مولفه‌های کرنش در گام جدید، مقادیر بخش حجمی و انحرافی تانسور تنش که خروجی هر گام زمانی می‌باشند، طبق رابطه (۱۹) محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}}_t &= 2\mu^e \tilde{\mathbf{e}}_t^e + 2\mu^{eve} (\tilde{\mathbf{e}}_t^e + \tilde{\mathbf{e}}_t^{ve}), \\ \tilde{\mathbf{p}}_t &= K^e \tilde{\theta}_t^e + K^{eve} (\tilde{\theta}_t^e + \tilde{\theta}_t^{ve}) \end{aligned} \quad (19)$$

برای انجام محاسبات جهت بدست آوردن کرنش ویسکوپلاستیک، مولفه‌های انحرافی و حجمی کرنش ویسکوپلاستیک به صورت صریح گسسته‌سازی زمانی گردیده است:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{e}}_t^{vp} &= \tilde{\mathbf{e}}_{t-\Delta t}^{vp} + \Delta\lambda \left(\frac{\tilde{\mathbf{s}}_{2,t}}{\|\tilde{\mathbf{s}}_{2,t}\|} \right) \\ \tilde{\theta}_t^{vp} &= \tilde{\theta}_{t-\Delta t}^{vp} - \beta\Delta\lambda \end{aligned} \quad (20)$$

که در این رابطه تغییرات ضریب لاگرانژ $\Delta\lambda$ ، با توجه به رابطه (۱۳) به صورت زیر بدست آمده است:

$$\Delta\lambda = \Gamma^{vp} \langle \Phi(\tilde{\mathbf{F}}) \rangle^N \Delta t \quad (21)$$

و همچنین مولفه‌های کرنش ویسکوپلاستیک به صورت رابطه (۲۲) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{e}}_t^{ve} &= \tilde{\mathbf{e}}_{t-\Delta t}^{ve} + \frac{\Delta t}{\zeta_e} \tilde{\mathbf{s}}_{1,t} \\ \tilde{\theta}_t^{ve} &= \tilde{\theta}_{t-\Delta t}^{ve} + \frac{\Delta t}{\zeta_\theta} \tilde{\mathbf{p}}_{1,t} \end{aligned} \quad (22)$$

بعد از بدست آوردن تمامی مولفه‌های کرنش‌ها و تنش، پارامتر آسیب محاسبه می‌گردد. متغیر آسیب یک پارامتر صعودی وابسته به کرنش‌ها، تنش و تغییرات زمان است. از این رو با توجه به رابطه (۱۸) و تمامی پارامترهای گام جدید متغیر آسیب به صورت زیر گسسته‌سازی و محاسبه می‌گردد.

$$\begin{aligned} D_t &= D_{t-\Delta t} + \Gamma^{vd} \left(\frac{\tilde{Y}_{eq}}{Y_0} \right)^{X_1} (1 - D_{t-\Delta t})^{X_2} \\ \exp(K_D \tilde{\mathbf{e}}_{eq,t}) \Delta t \end{aligned} \quad (23)$$

را که در قالب تنش مؤثر معادل $\tilde{\sigma}_{eq} = \sqrt{\tilde{s}_{ij} \tilde{s}_{ij}}$ ۱ نشان می‌دهد، معرفی گردیده است. بخش سوم رابطه (۱۸) را جمله $(1-D)^{X_2}$ تشکیل می‌دهد که ترم اشباع متغیر آسیب در این قانون رشد می‌باشد. بخش آخر در رابطه رشد آسیب تابعی نمایی است که تابعیت آسیب را از کرنش مؤثر معادل $\tilde{\epsilon}_{eq} = \sqrt{\tilde{\epsilon}_{ij} \tilde{\epsilon}_{ij}}$ ۲ نشان می‌دهد. X_1 ، X_2 و K_D پارامترهای حساسیت مادی هستند.

۳- گسسته‌سازی صریح معادلات ساختاری

برای بررسی اجزای محدود پاسخ مکانیکی پلیمر، با توجه به طبیعت فیزیک مساله، پیچیدگی رفتار غیرخطی بستر مواد پلیمری با مساله‌ای کاملا غیرخطی روبرو هستیم، از این رو حل عددی به جای حل دقیق بکار گرفته می‌شود. 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 اجزای محدود به بررسی حل عددی آن پرداخته شده است. با توجه به مزایای روش گسسته‌سازی صریح، در این بخش از پژوهش، از این روش در گسسته‌سازی معادلات ساختاری استفاده می‌شود. طی این روش بازه زمانی مساله $[0, T]$ به بازه‌های کوچک‌تر تقسیم شده و معادلات بر روی بازه‌ی دلخواه $[t - \Delta t, t]$ با طول بازه Δt حل خواهند شد. برای ساده‌سازی نشان‌گذاری، اندیس‌های زیرنویس $t - \Delta t$ و t به ترتیب زمان ابتدا و انتهای بازه حل مساله را نشان می‌دهند. با دانستن مقدار کرنش در ابتدا و انتهای بازه حل (یعنی $\epsilon_{t-\Delta t}$ و ϵ_t) تمامی متغیرهای داخلی به روز می‌شوند. در طی این روند با توجه به کویل بودن معادلات رشد الاستیک، ویسکوپلاستیک و ویسکوپلاستیک با یکدیگر، در محاسبه هر پارامتر، پارامترهای دیگر نیز درگیر می‌باشد. هر یک از پارامترها که در بازه زمانی حاضر، حل شده و مقدار آن در زمان حاضر در اختیار است، در روابط با مقدار جدید در نظر گرفته می‌شوند و پارامترهایی که مقدار آن‌ها در بازه زمانی حاضر محاسبه نشده، در روابط با مقدارشان در گام زمانی پیشین جایگزین می‌شوند.

با توجه به معادلاتی که مورد بررسی قرار گرفت، در هر گام زمانی مقدار کرنش کل در گام زمانی حاضر و مقدار تمامی پارامترها در گام زمانی قبل ورودی مساله می‌باشند که با بهره‌گیری از این مقادیر، در ابتدا

- 1 Equivalent Effective Stress
- 2 Equivalent Effective Strain

محدود، صحت‌سنجی نتایج حاصل از فرم زمان گسسته صریح معادلات و کد سابروتین مورد نظر صورت می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی بررسی عددی، نتایج بدست آمده از این سابروتین و داده‌های تجربی دارابی و همکاران [۱۴] در غالب سه بارگذاری خزش، خزش بازیابی و خزش بازیابی چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. هر یک از بارگذاری‌ها در سطح تنش SL، زمان بارگذاری LT و زمان باربرداری ULT بخصوصی انجام گرفته که نمونه‌هایی از آن‌ها در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد، که نتایج بدست آمده از مدل‌سازی اجزای محدود به خوبی می‌تواند رفتار پلیمر را تحت بارگذاری‌های مختلف پیش‌بینی کند.

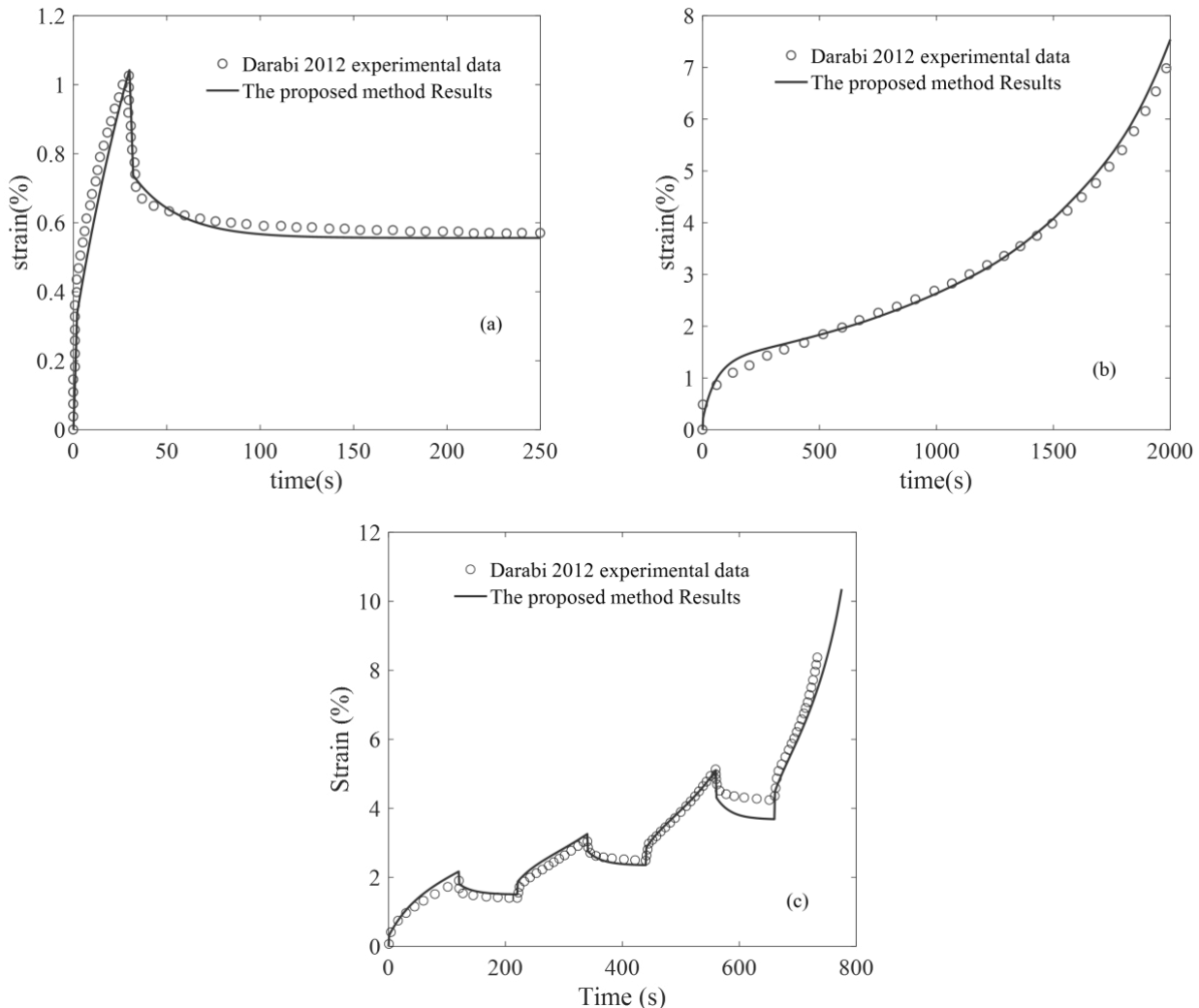
در آخر تنش در وضعیت آسیب دیده از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$\sigma_t = (1 - D_t)(\tilde{s}_t + \tilde{p}_t \mathbf{I}) \quad (24)$$

با بکارگیری روابط بالا فرم زمان گسسته صریح معادلات ساختاری سابروتین مادی صریح تهیه شده است تا امکان بررسی اجزای محدود معادلات ساختاری و اعمال بارگذاری‌های مورد نظر بر روی ماده فراهم شود.

۴- اعتبارسنجی

جهت استفاده از حل عددی ارائه شده در نرم‌افزارهای اجزای



شکل ۲: اعتبارسنجی فرم زمان گسسته صریح معادلات ساختاری تحت بارگذاری (a) خزش بازیابی ($LT = 30s$ و $SL = 1500 \text{ kPa}$) (b) خزش ($SL = 1000 \text{ kPa}$) (c) خزش-بازیابی چرخه‌ای ($SL = 1500 \text{ kPa}$, $LT = 120s$, $ULT = 100s$)

Fig. 2: Verification of Explicit time discrete form of equations (a) creep recovery ($LT=30s$ and $SL=1500 \text{ kPa}$) (b) creep ($SL=1000 \text{ kPa}$) (c) repeated creep recovery ($SL=1500 \text{ kPa}$, $LT=120s$, and $ULT=100s$)

جدول ۱: پارامترهای مادی الاستیک و ویسکوالاستیک در معادلات ساختاری
Table 1: Elastic and viscoelastic material parameters of constitutive equations

| E^e MPa | E^{eve} MPa | ζ_e (GPa) | ζ_θ (GPa) |
|-----------|---------------|-----------------|----------------------|
| ۲۲۸/۵۲ | ۲۶/۴۰ | ۳/۰۰ | ۱/۰۰ |

جدول ۲: پارامترهای مادی ویسکوپلاستیک و آسیب در معادلات ساختاری
Table 2: Viscoplastic and damage material parameters of constitutive equations

| E^{vp} MPa | $\Gamma^{vp} \left(\frac{y}{s} \right)$ | $\Gamma^{vd} \left(\frac{y}{s} \right)$ | σ^y (MPa) |
|--------------|--|--|------------------|
| ۳۵/۶۱ | $۴/۱۲ \times ۱۰^{-۲}$ | $۶/۸۴ \times ۱۰^{-۵}$ | ۲۶/۸۱ |

۵- مطالعه پارامتری

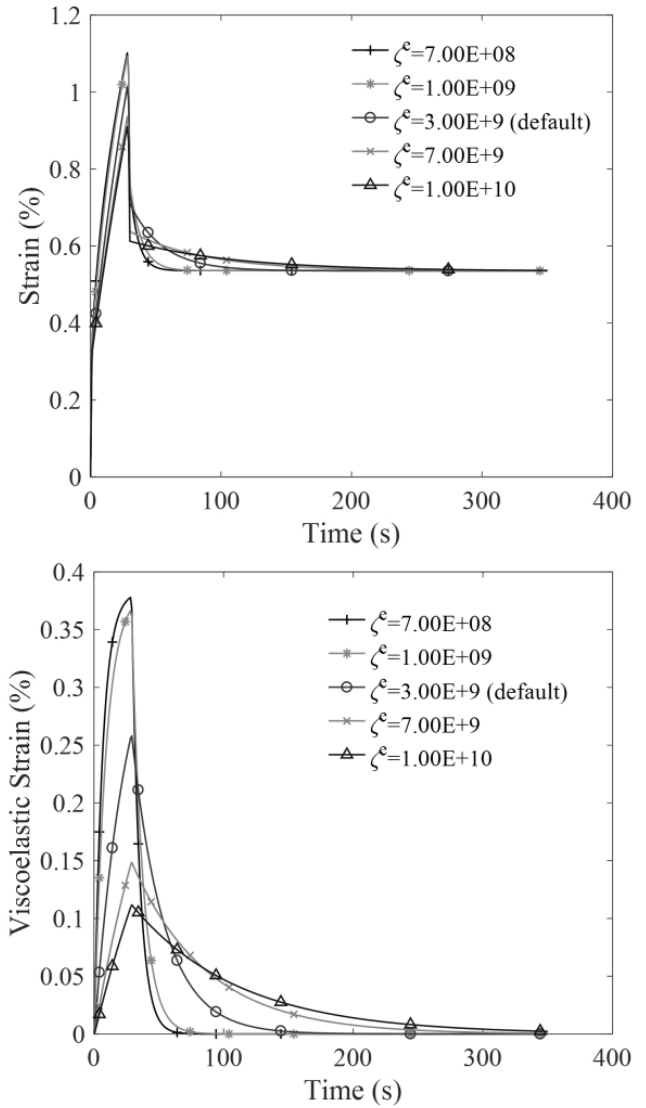
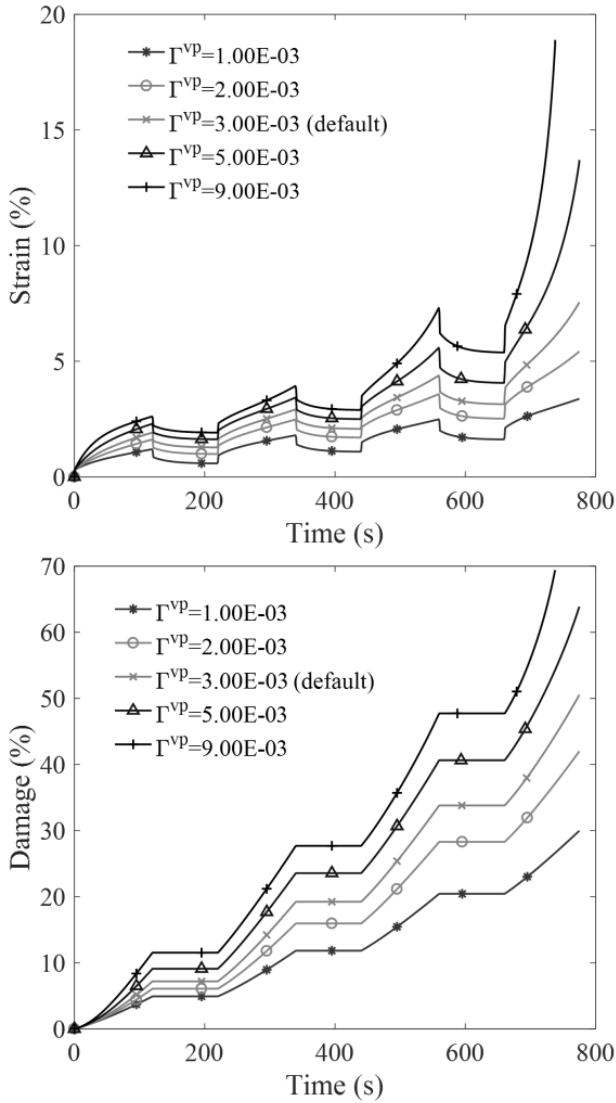
انحرافی میزان ویسکوزیته مدل ساختاری افزایش یافته و کرنش ویسکوالاستیک کمتری در ماده ایجاد می‌شود و تاثیر بسزایی در مقدار کرنش پلاستیک ماندگار در ماده مشاهده نمی‌شود.

کرنش ویسکوپلاستیک از جمله خواص دیگری می‌باشد که مطالعه پارامتری بر روی عوامل تاثیرگذار بر آن، در پیش‌بینی رفتار مکانیکی پلیمر بسیار پراهمیت می‌باشد. از جمله این عوامل می‌توان به پارامتر ویسکوزیته تغییرشکل پلاستیک Γ^{vp} که نقش بسزایی در افزایش نرخ کرنش ویسکوپلاستیک دارد اشاره نمود. برای درک بهتر اثرات زمانی و نرخ کرنش ویسکوپلاستیک بر کرنش‌های مختلف و متغیر آسیب، تغییرات پارامتر ویسکوزیته تغییرشکل پلاستیک در بارگذاری خزش-بازیابی چرخه‌ای مطابق شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج فوق با افزایش ویسکوزیته پلاستیک، نرخ کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد و در پی آن، کرنش دائمی بیشتر و همچنین آسیب وارده بیشتر می‌گردد. در این مطالعه رابطه مستقیم کرنش دائمی و مقدار آسیب قابل مشاهده می‌باشد.

آسیب در تعیین رفتار مکانیکی مواد و همچنین عمر استفاده و بارگذاری مواد دارای نقش مهمی می‌باشد. به همین دلیل آنالیز حساسیت بر پارامتر آسیب از موارد ضروری در این مطالعه به شمار می‌رود. از جمله این عوامل می‌توان به پارامتر ویسکوزیته آسیب Γ^{vd} که نقش بسزایی در افزایش آسیب و کرنش ویسکوپلاستیک دارد، اشاره نمود. شکل ۵ رابطه مستقیم نرخ آسیب را با این پارامتر مشخص می‌کند که به خوبی تاثیر زیاد شدن آسیب را در رفتار مکانیکی پلیمر پیش‌بینی می‌کند. مطابق این نتایج با زیاد شدن آسیب، ماده با سرعت بیشتری خزش می‌کند و کرنش پلاستیک که عمده کرنش کل را به خود اختصاص داده با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد؛ در حالی که

برای بررسی حساسیت رفتار مکانیکی پلیمر نسبت به خواص مکانیکی از جمله خواص ویسکوالاستیک، ویسکوپلاستیک، آسیب و همچنین متغیرهایی چون سطح بارگذاری و زمان استراحت، مطالعه پارامتری بر روی مدل ساختاری انجام شده است. تمامی پارامترهای ذکر شده می‌توانند به نحوی بر رفتار مکانیکی این مواد تاثیر بسزایی داشته باشند که در زیر به بررسی آن‌ها پرداخته شده است. همچنین تمامی پارامترهای اولیه مادی مدل کالیبره شده تحت بارگذاری‌های خزش، خزش-بازیابی و خزش-بازیابی چرخه‌ای در جدول ۱ و ۲ ارائه گردیده و با توجه به مقادیر اصلی این پارامترها و تغییر آن‌ها، به بررسی حساسیت پارامترها بر رفتار مکانیکی پلیمر پرداخته شده است. با توجه به مطالعات انجام گرفته برای بررسی دقیق‌تر خواص ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک ماده از بارگذاری خزش-بازیابی و برای بررسی خواص ویسکوالاستیک از بارگذاری خزش و خزش-بازیابی چرخه‌ای استفاده می‌شود. از این رو در ادامه بطور خلاصه کرنش‌های مربوط به هر بارگذاری با توجه به اهمیت پارامتر موردنظر در بارگذاری‌های ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته است.

اولین پارامتر مورد بررسی در رفتار برگشت‌پذیر ماده، پارامتر مادی ویسکوالاستیک ζ_e می‌باشد که نقش مهمی در خاصیت ویسکوالاستیک ایفا می‌کند. همان‌طور که از رابطه (۱۰) نیز قابل دریافت است، پارامتر مادی ویسکوالاستیک انحرافی دارای رابطه مستقیم با خاصیت ویسکوالاستیک ماده پلیمری می‌باشد. در شکل ۳ این رابطه را با انجام بارگذاری خزش-بازیابی و بررسی کرنش‌های پلاستیک و برگشت‌پذیر مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که با افزایش پارامتر مادی ویسکوالاستیک



شکل ۴: حساسیت مدل به پارامتر ویسکوپلاستیک تغییر شکل پلاستیک در بارگذاری خزش-بازیابی چرخه‌ای (a) کرنش کل (b) آسیب

Fig. 4: Model sensitivity to viscoplastic viscosity parameter under repeated creep-recovery loading (a) total strain (b) damage

شکل ۳: حساسیت مدل به پارامتر ویسکوالاستیک انحرافی در بارگذاری خزش-بازیابی کرنش کل (a) کرنش ویسکوالاستیک

Fig. 3: Model sensitivity to deviatoric viscoelastic material parameter under creep-recovery loading (a) total strain (b) viscoelastic strain

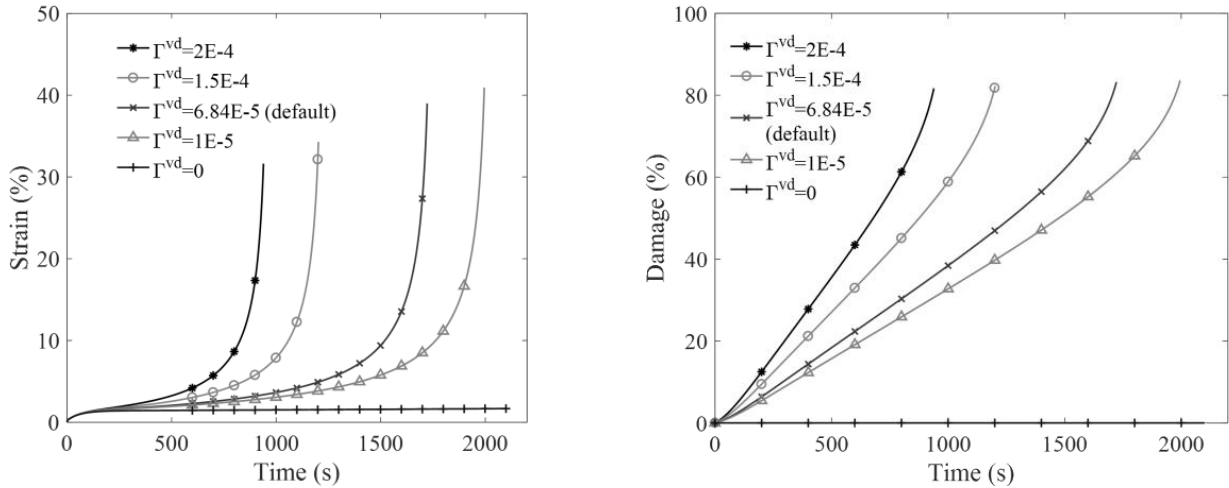
در ابتدا تاثیر این عوامل را مورد ارزیابی قرار داده و سپس به مدل‌سازی انواع بارگذاری چرخه‌ای پرداخته شده است.

از جمله مطالعات مهمی که جهت بررسی خواص ویسکوز مواد پلیمری و پاسخ مکانیکی آن‌ها انجام می‌شود، تغییر زمان بارگذاری و زمان باربرداری می‌باشد. در زمان‌های باربرداری کوتاه بدلیل نبود فرصت کافی برای رهایی و باز شدن زنجیره‌های پلیمری، تنش و کرنش در ماده باقی می‌ماند. به همین دلیل تاثیر افزایش زمان باربرداری در نتایج بارگذاری‌های خزش-بازیابی چرخه‌ای بیشتر قابل مقایسه خواهد بود.

اگر اثر آسیب چشم‌پوشی شود، ماده مقاومت خود را در برابر بارگذاری حفظ می‌کند و دچار خزش نمی‌شود.

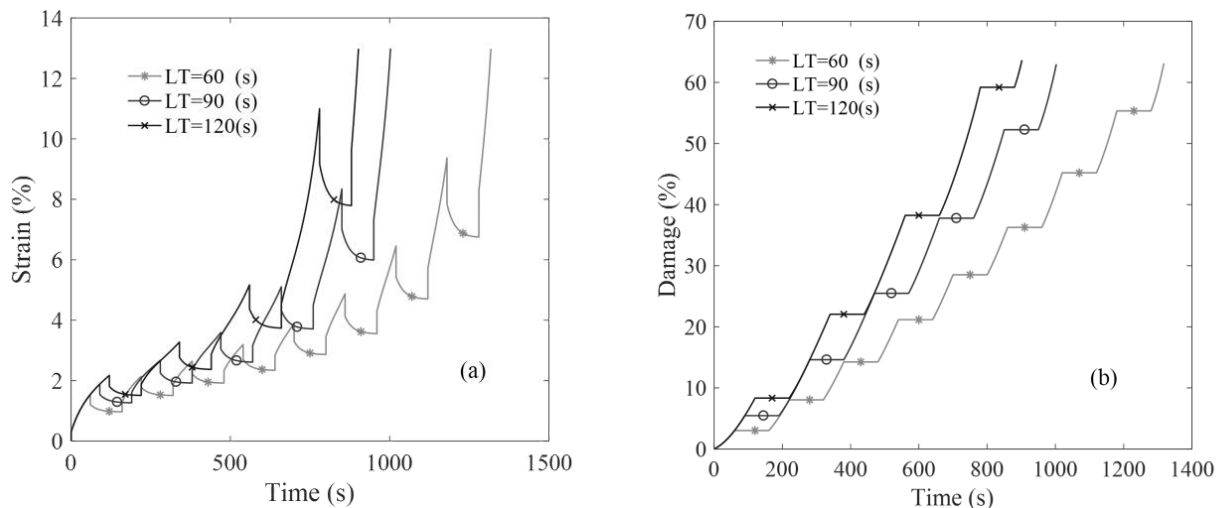
۶- مدل‌سازی اجزای محدود و نتایج مدل‌سازی

در این پژوهش با مدل‌سازی یک بستر از جنس پلیمر و با استفاده از سابروتین مورد بحث، به بررسی آسیب تحت دو نوع بارگذاری چرخه‌ای پرداخته شده است. با توجه به عوامل مهمی از جمله زمان بارگذاری و باربرداری در نحوه رفتار مکانیکی مواد پلیمری تحت بارگذاری چرخه‌ای،



شکل ۵: حساسیت مدل به پارامتر ویسکوزیته آسیب در بارگذاری خزش (a) کرنش کل (b) آسیب

Fig. 5: Model sensitivity to damage viscosity parameter under creep loading (a) total strain (b) damage



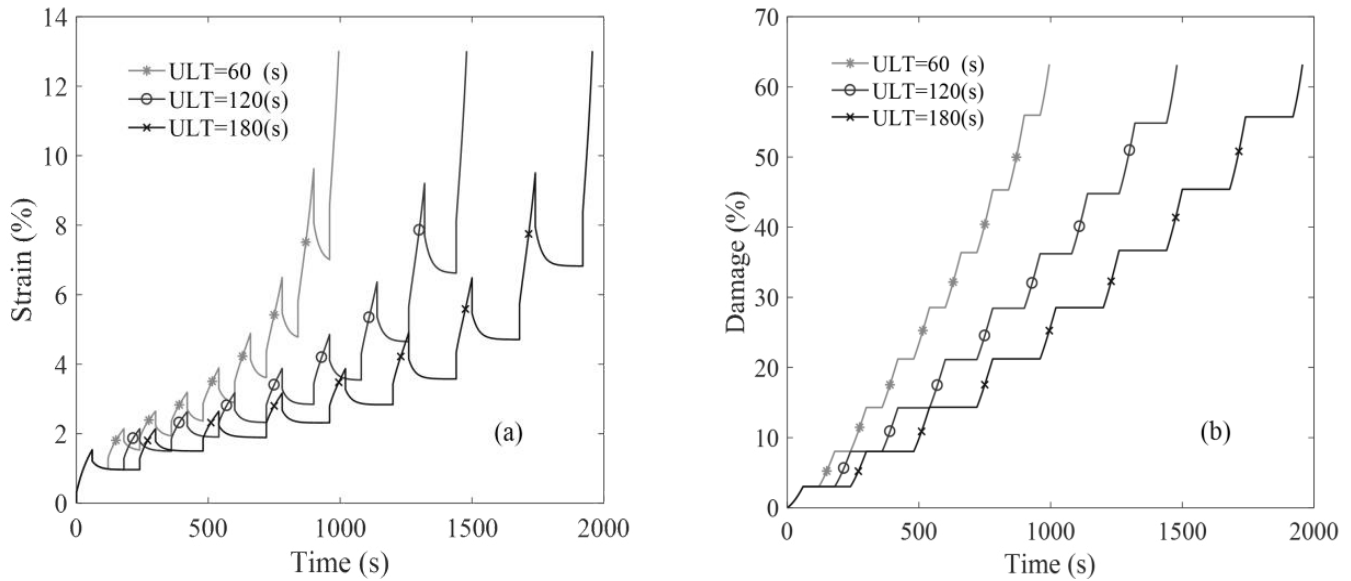
شکل ۶: اثر زمان بارگذاری در رفتار مکانیکی بستر پلیمری تحت بارگذاری خزش-بازیابی (a) کرنش کل (b) آسیب

Fig. 6: Loading time effects on mechanical behavior of polymer foundation under repeated creep-recovery loading (a) total strain (b) damage

می‌باشد. در نتایج زیر به وضوح تاثیر این پارامتر قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش زمان باربرداری و گذشتن از حد رهایی ماده، کرنش ابتدا روند کاهشی پیدا می‌کند تا جایی که افزایش زمان باربرداری تاثیری در رفتار نهایی آن و آسیب وارد شده نداشته باشد، که با افزایش زمان باربرداری کرنش برگشت پذیر ماده کاهش یافته و میکروساختارهای ماده آرایش منظم تری پیدا کرده و باعث ایجاد آسیب و کرنش دائمی کمتر در زمان ثابت می‌گردد. در نتایج شکل ۷ بخوبی کاهش میزان آسیب و افزایش عمر ماده را با افزایش زمان باربرداری می‌توان مشاهده کرد. از این رو افزایش زمان باربرداری عامل مهمی در تخمین عمر مفید

با افزایش زمان بارگذاری نیز انتظار می‌رود ماده دچار تغییر شکل های بیشتر و در پی آن آسیب بیشتر شود. برای سادگی، ابتدا تاثیر زمان بارگذاری در بارگذاری خزش-بازیابی بررسی شده است. این تست در سه زمان بارگذاری متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد، که نتایج بدست آمده به صورت بالا می‌باشد. همان طور که قبل تر پیش بینی شد با افزایش زمان بارگذاری، کرنش بدست آمده بیشتر و نیز آسیب وارد به آن بیشتر شده است. از طرف دیگر، با بررسی تغییر زمان باربرداری می‌توان پاسخ مکانیکی پلیمر را مشاهده کرد.

از پارامترهای مهم در بررسی رفتار ویسکوز مواد، زمان رهایی



شکل ۷: اثر زمان باربرداری در رفتار مکانیکی بستر پلیمری تحت بارگذاری خزش-بازیابی (a) کرنش کل (b) آسیب

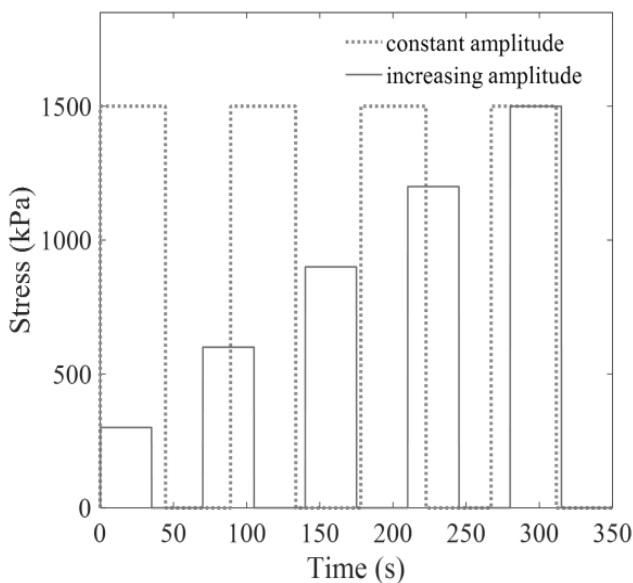
Fig. 7: Unloading time effects on mechanical behavior of polymer foundation under repeated creep-recovery loading (a) total strain (b) damage

به شکل دیگری نشان داده شده است. بر اساس این نتایج میزان تفاوت سطح تنش در بارگذاری‌های افزایشی دیده می‌شود که با کاهش سطح تنش به خوبی می‌توان افزایش عمر بستر را با کاهش میزان آسیب در یک زمان ثابت مشاهده

این مواد است. همچنین در مطالعات دارابی و همکاران [۱۴] نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی خزش-بازیابی در زمان بارگذاری و باربرداری‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج این مطالعه را تصدیق می‌کنند.

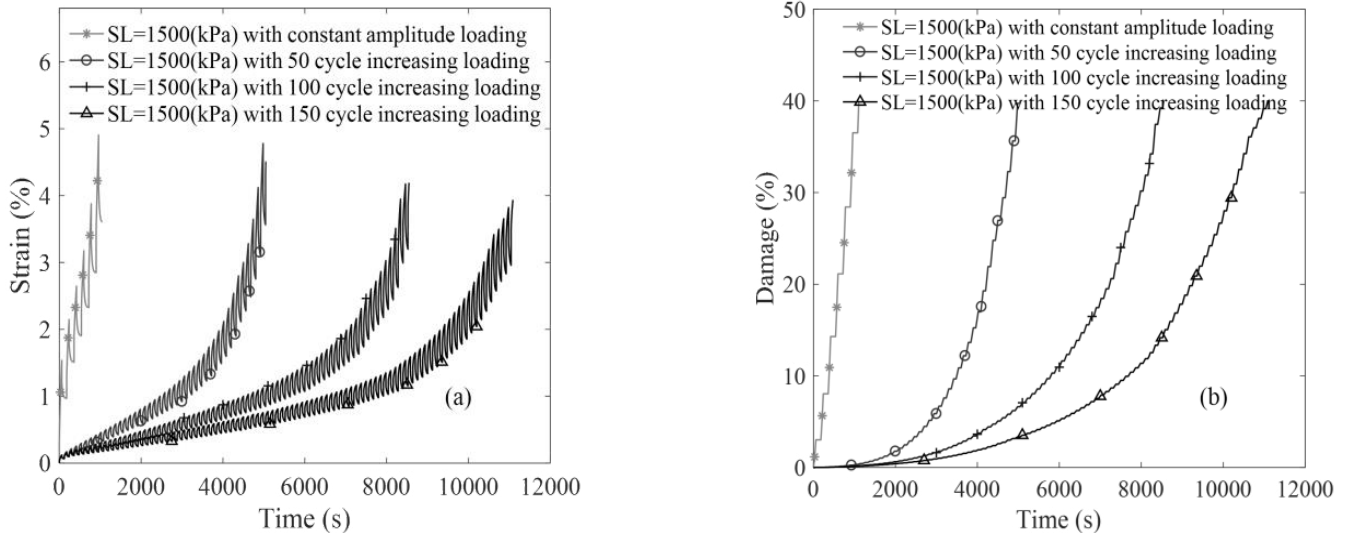
با توجه به نقش اساسی دو عامل سطح بارگذاری و زمان بارگذاری در عمر پلیمر و همچنین کرنش برگشت‌ناپذیر در ماده، در این مطالعه بارگذاری خزش-بازیابی-چرخه‌ای به دو صورت دامنه ثابت و دامنه افزایشی به بستر پلیمری مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، بارگذاری خزش-بازیابی-چرخه‌ای با دامنه ثابت در تمام زمان‌های بارگذاری دارای سطح تنش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. همچنین در بارگذاری خزش-بازیابی-چرخه‌ای با دامنه همواره افزایشی، مقدار سطح تنش در تعداد سیکل معین از مقدار صفر تا مقدار ماکسیمم ۱۵۰۰ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد.

همچنین همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، شبیه‌سازی در چندین نمونه بارگذاری خزش-بازیابی-چرخه‌ای با دامنه همواره افزایشی انجام شده است. در این نمونه‌ها تعداد سیکل رسیدن به سطح تنش نهایی متفاوت انتخاب شده است که این مساله باعث تغییر سطح تنش اعمالی بر بستر پلیمری می‌شود. بدین صورت در این آزمایش اثر تغییر سطح تنش بر دو پارامتر آسیب و کرنش کل



شکل ۸: اعمال بارگذاری چرخه‌ای به دو صورت افزایشی و ثابت

Fig. 8: Applying repeated loading in two increasing and constant forms



شکل ۹: تاثیر انواع بارگذاری خز-بازیابی چرخه‌ای بر رفتار مکانیکی بستر پلیمری (a) کرنش کل (b) آسیب

Fig. 9: The effects of applying various repeated creep-recovery loading on the mechanical behavior of polymer foundation (a) total strain (b) damage

خارجی مدل سازگار ترمودینامیکی ویسکوالاستیک-ویسکوپلاستیک-ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده است. از این رو، با توجه به رفتار ویژه مواد پلیمری همچون وابستگی به زمان و نرخ و با استفاده از تئوری کرنش‌های کوچک به تفکیک کرنش مواد پلیمری به دو مولفه برگشت‌پذیر و برگشت‌ناپذیر پرداخته شده است. برای پیش‌بینی پاسخ مکانیکی و انجام تحلیل‌های مکانیکی این مواد، می‌بایست از جنس این مواد تحت عنوان این مدل ساختاری، در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شود.

حل مستقیم معادلات، با توجه به وجود دقت و زمان حل مناسب از جمله مزیت‌های گسسته‌سازی معادلات ساختاری به روش صریح می‌باشد. همچنین با توجه به لزوم استفاده از گام زمانی کوچک در حین بارگذاری چرخه‌ای، بکارگیری روش‌هایی که گام زمانی بزرگتری را در اختیار ما قرار می‌دهند اهمیت چندانی نداشته است. از این رو، با توجه به این نکته که در گسسته‌سازی معادلات ساختاری به روش صریح نیازی به استفاده از ماتریس شیب و محاسبات پیچیده آن در هر گام زمانی نیست، این روش منجر به کاهش محاسبات و زمان حل می‌گردد. بنابراین در این پژوهش با بکارگیری گسسته‌سازی معادلات ساختاری به روش صریح به بررسی رفتار مکانیکی وابسته به نرخ پلیمرها در قالب کد سابروتین مادی صریح^۱ پرداخته شده است. با توجه به پیچیدگی طبیعت فیزیک مساله، رفتار بستر پلیمری و

کرد و همچنین کرنش کل که عمده آن را کرنش ویسکوپلاستیک شامل می‌شود با توجه به رابطه مستقیم با سطح تنش و میزان آسیب، با افزایش تعداد سیکل که سطح بارگذاری را به ۱۵۰۰ کیلوپاسکال برساند، در یک زمان ثابت کاهش می‌یابد. به‌طور مثال، با دقت در نتایج می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد سیکل دامنه افزایشی از ۱۰۰ تا ۱۵۰ تا رسیدن به سطح تنش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال آسیب تا حدود ۶۰ درصد کاهش یافته و باعث افزایش عمر ماده پلیمری تا حدود ۱/۴ برابر می‌شود.

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، میزان آسیب و کرنش ماندگار رابطه مستقیم با یکدیگر دارند که این مسئله با نتایج بدست‌آمده از نمودارهای فوق نیز مطابقت دارد. همچنین با توجه به اینکه نرخ افزایش آسیب با میزان آسیب رابطه مستقیم دارد، با کاهش سطح تنش بوسیله افزایش تعداد سیکل در بارگذاری افزایشی، آسیب و نرخ افزایش آن در ماده کاهش و عمر مفید افزایش می‌یابد. امروزه به علت وابستگی پاسخ مواد پلیمری به نرخ و زمان تحت اعمال بارگذاری خارجی، پیچیدگی رفتاری ماده پلیمری و همچنین تنظیم تمامی شرایط لازم جهت انجام آزمایش در تعداد سیکل بالا محققان بسیاری جهت مدل‌سازی و تعیین عمر پلیمر می‌کوشند.

۷- جمع‌بندی

در این پژوهش، برای بررسی پاسخ مواد پلیمری تحت بارگذاری

1 VUMAT Subroutine

این مطالعه بارگذاری خزش-بازیابی چرخه‌ای در حالت دامنه ثابت و افزایشی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج می‌توان رابطه مستقیم زمان و سطح بارگذاری را با میزان افزایش کرنش کل و آسیب در ماده مشاهده کرد. به طوری که با افزایش تعداد سیکل افزایش دامنه از ۱۰۰ تا ۱۵۰ با هدف رسیدن به سطح تنش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، میزان متغیر آسیب و کرنش کل بوجود آمده در بستر پلیمری، به شدت کاهش یافته است. به طور مثال با توجه به نتایج می‌توان دریافت که با اعمال ۸۰۰۰ ثانیه از بارگذاری خارجی به این دو شیوه، آسیب در حدود ۶۵ درصد و کرنش کل در حدود ۵۵ درصد کاهش می‌یابد. از دیگر عوامل مهم در بررسی رفتار پلیمرها، مقدار زمان بارگذاری و باربرداری است، که میزان وابستگی رفتاری این مواد به زمان را نشان می‌دهد. در این آزمایش کاهش حدود ۵۰ درصدی عمر مفید پلیمر را با گذشت ۵ سیکل پی‌درپی با تغییر زمان بارگذاری از ۶۰ ثانیه به ۱۲۰ ثانیه قابل مشاهده است. در طرف دیگر نیز مطالعه بر زمان باربرداری نشان داد که با افزایش این پارامتر میزان کرنش برگشت‌پذیر در ماده کاهش و ساختار ماده از نظر آرایش میکروساختار منظم‌تر گردیده است، که موجب کاهش میزان میکروحفره‌ها و میکروتَرَک‌ها و در نتیجه کاهش آسیب در مقایسه با حالت مشابه با زمان باربرداری کمتر را دارد؛ از این رو با افزایش این عامل می‌توان عمر مفید بیشتری را از پلیمر انتظار داشت. به طوری که با تغییر زمان باربرداری از ۶۰ ثانیه به ۱۲۰ ثانیه با گذشت ۵ سیکل پی‌درپی، عمر مفید بستر پلیمری حدود ۵۰ درصد افزایش می‌یابد.

فهرست علائم

علائم 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 |

تعداد سیکل بالای مورد نیاز برای بررسی تغییرشکل‌های دائمی و غیرممکن بودن انجام آزمایش‌های تجربی دقیق و بالا بودن هزینه‌های این آزمایشات تحت این تعداد چرخه، شبیه‌سازی رفتار این مواد از اهمیت بسزایی برخوردار است. قابل ذکر است، در طی این پژوهش با گسسته‌سازی زمانی و ارایه سابروتین توانمند و بکارگیری سوپر کامپیوتر تحلیل اجزای محدود این مساله امکان‌پذیر گشته است. با توجه به معادلات غیرخطی حاکمه، حل چنین روابطی به طور تحلیلی در طی انجام آزمایش غیر قابل دسترس بوده است، که در این جا ارزش کار عددی انجام شده بخوبی نمایان است. در این پژوهش برای نخستین بار فرم گسسته‌سازی صریح زمانی این معادلات ساختاری بدست آورده شده است و در غالب سابروتین برای تحلیل اجزای محدود ارایه گردیده است. در این روش گسسته‌سازی با بکارگیری روابط کوپل‌شده کرنش‌های ویسکوپلاستیک-ویسکوالاستیک-الاستیک و متغیر ویسکواسیب تمامی پارامترهای داخلی مساله در بازه زمانی جدید به‌روزرسانی شده و مقدار جدید هر یک از پارامترها در بازه زمانی حاضر بدست آمده است.

جهت بررسی حساسیت رفتار مکانیکی پلیمر نسبت به خواص مکانیکی از جمله خواص ویسکوالاستیک، ویسکوپلاستیک، آسیب با توجه به اهمیت این پارامترها به مطالعه پارامتری پارامتر مادی ویسکوالاستیک، پارامتر ویسکوزیته تغییرشکل پلاستیک و آسیب تحت بارگذاری‌های خزش، خزش-بازیابی و خزش-بازیابی چرخه‌ای پرداخته شده است، که پیش‌تر انجام نگرفته و به خوبی جنبه‌های مختلف این مدل ساختاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. رابطه مستقیم کرنش پلاستیک و آسیب از جمله مهم‌ترین روابطی است که در بستر پلیمری دیده شده که خود عامل ایجاد پدیده‌هایی همچون شیاردگی^۱ می‌باشد که ناشی از تجمع تغییرشکل دائمی در این مواد است.

در انتها به بررسی عوامل مختلف ناشی از بارگذاری خارجی در رفتار مکانیکی این مواد پرداخته شده است. زمان بارگذاری، زمان باربرداری و سطح تنش اعمالی از جمله عواملی پراهمیتی است که با توجه به ویژگی وابسته به نرخ بودن این مواد، نقش اساسی در پاسخ مکانیکی ماده پلیمری را نسبت به بارگذاری اعمالی ایفا می‌کند. با توجه به اهمیت آسیب و کرنش غیرقابل‌بازگشت در این مواد، در

(2011) 191-207.

- [4] R.K.A. Al-Rub, M.K. Darabi, D.N. Little, E.A. Masad, A micro-damage healing model that improves prediction of fatigue life in asphalt mixes, *International Journal of Engineering Science*, 48(11) (2010) 966-990.
- [5] H. Shahsavari, R. Naghdabadi, M. Baghani, S. Sohrabpour, A viscoelastic-viscoplastic constitutive model considering damage evolution for time dependent materials: Application to asphalt mixes, *International Journal of Damage Mechanics*, 25(7) (2016) 921-942.
- [6] J. Lemaitre, *A course on damage mechanics*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [7] E. Masad, L. Tashman, D. Little, H. Zbib, Viscoplastic modeling of asphalt mixes with the effects of anisotropy, damage and aggregate characteristics, *Mechanics of Materials*, 37(12) (2005) 1242-1256.
- [8] M.K. Darabi, R.K.A. Al-Rub, D.N. Little, A continuum damage mechanics framework for modeling micro-damage healing, *International Journal of Solids and Structures*, 49(3-4) (2012) 492-513.
- [9] M.K. Darabi, R.K.A. Al-Rub, E.A. Masad, D.N. Little, 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*, 35 (2012) 67-99.
- [10] R.K.A. Al-Rub, M.K. Darabi, A thermodynamic framework for constitutive modeling of time-and rate-dependent materials. Part I: Theory, *International Journal of Plasticity*, 34 (2012) 61-92.
- [11] R.K. Abu Al-Rub, M.K. Darabi, C.-W. Huang, E.A. Masad, D.N. Little, Comparing finite element and constitutive modelling techniques for predicting rutting of asphalt pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 13(4) (2012) 322-338.
- [12] M.M. S. Aghasizade Shaarbaaf, Identification of Tire Force Model Using Experimental Data of a New Scaled Test Rig for Design of Nonlinear Slip Controller, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(1) (2019) 187-200 (in Persian).
- [13] R.K. Abu Al-Rub, A.H. Tehrani, M.K. Darabi,

دما : T

پارامتر آسیب حساسیت مادی : X

علائم یونانی

پارامتر ویسکوزیته ویسکوآسیب : Γ^{vd}

پارامتر ویسکوزیته ویسکوپلاستیک : Γ^{vp}

تانسور کرنش : ϵ

مولفه حجمی کرنش : $\bar{\theta}$

ضریب لاگرانژ : λ

مدول برشی : μ

پارامتر مادی ویسکوآستیک : ζ

تانسور تنش کوشی : σ

مقدار تنش تسلیم : σ^y

نیروی آسیب مرجع : Y_0

تنش مؤثر معادل : Y_{eq}

انرژی آزاد هلمهولتز : ψ

زیرنویس

الاستیک : e

ویسکوآستیک : ve

ویسکوپلاستیک : vp

بالانویس

متغیر در وضعیت موثر : \sim

مشتق بر حسب زمان : \cdot

مراجع

- [1] H.F. Brinson, L.C. Brinson, *Polymer engineering science and viscoelasticity*, Springer, 2015.
- [2] W. Xu, G. Li, Constitutive modeling of shape memory polymer based self-healing syntactic foam, *International Journal of Solids and Structures*, 47(9) (2010) 1306-1316.
- [3] M.K. Darabi, R.K.A. Al-Rub, E.A. Masad, C.-W. Huang, D.N. Little, A thermo-viscoelastic-viscoplastic-viscodamage constitutive model for asphaltic materials, *International Journal of Solids and Structures*, 48(1)

Little, 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) (2012) 817-854.

Application of a large deformation nonlinear-viscoelastic viscoplastic viscodamage constitutive model to polymers and their composites, *International Journal of Damage Mechanics*, 24(2) (2015) 198-244.
[14] M.K. Darabi, R.K.A. Al-Rub, E.A. Masad, D.N.