

مقایسه مدل‌های غیرخطی در پیش‌بینی آسیب پیوسته در آلومینیوم در شرایط بارگذاری مختلف

محمدعلی فارسی*

استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران
کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

امیررضا صحت

چکیده

با توجه به اینکه آلومینیوم ۵۰۸۳ یکی از پرکاربردترین مواد در سازه موشک، حامل و کاوشگرهای فضایی است. در این مقاله، فرآیند آسیب پیوسته در آلومینیوم ۵۰۸۳ بر اساس مدل‌های غیرخطی بنورا و لیمیتر بررسی شده است. آزمون عملی بر روی چهار مدل قطعه با شرایط بارگذاری مختلف انجام شده و اثر بارگذاری سیکلی، تنش سه بعدی و دما بر روی گسترش آسیب مورد بررسی قرار گرفته است. برای پیش‌بینی رفتار ماده در مدل‌سازی عددی از هردو مدل غیرخطی بنورا و لیمیتر استفاده شد. شبیه‌سازی رفتار ماده در حین شکست در نرم افزار آباکوس به وسیله سابروتین (USDFLD) انجام شده و نتایج بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و صحت گذاری می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش تجربی همخوانی مناسبی با هم دارند و مقایسه آنها نشان می‌دهد که این مدل‌های غیرخطی توانایی خوبی در مدل‌سازی فرآیند گسیختگی و شکست ماده آلومینیومی در دمای محیط دارند، اما مدل بنورا دارای دقت بهتری برای پیش‌بینی رفتار ماده است. بررسی اثر دما نشان می‌دهد توانایی این مدل‌ها در پیش‌بینی لحظه شکست در هنگامی که دمای قطعه بالا است، رضایت بخش نیست.

واژه‌های کلیدی: مکانیک آسیب پیوسته، روش اجزای محدود، آلومینیوم ۵۰۸۳، مدل بنورا، مدل لیمیتر.

Comparison of Nonlinear Models for Prediction of Continuum Damage in Aluminum under Different Loading

M. A. Farsi
A. R. Sehat

Mechanical Engineering, Astronautic Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
Mechanical Engineering, Astronautic Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, the continuum damage mechanics principles based on Bonora model and limiter model as a non-linear model are studied. Nucleation, development and propagation of damage in Al 5083 are investigated. Different loading such as cyclic loading, triaxial stress and temperature influence on damage mechanism is investigated. The FE simulation of material behavior during failures is carried out by ABAQUS software package and USDFLD subroutine. The results are validated with experimental tests. These comparison show that the simulation results are verified by experimental tests, and the Bonora model accuracy to behavior modeling is better. Also, capability of model to prediction of fracture is not acceptable when the temperature is high.

Keywords: Continuum Damage Mechanics, FEM, Aluminum 5083, Bonora Model, Limiter Model.

۱- مقدمه

تئوری مکانیک آسیب پیوسته ابزاری است، قدرتمند برای حل مسائلی همچون تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ، که مکانیک شکست سازه از تحلیل تاثیرات آن عاجز است. این تئوری در چارچوب متغیرهای داخلی تئوری ترمودینامیک بیان شده و بر مدلسازی فرآیند ایجاد آسیب و گسیختگی و رشد آن استوار است. آلومینیوم ماده‌ای پرکاربرد در صنعت هوافضا است که اکثر مواقع شکست آن از نوع نرم بوده و بواسطه رشد میکرو حفره‌ها و ایجاد آسیب غیر خطی کوپل شده با تغییر شکل‌های پلاستیک است. مکانیک شکست، پدیده شکست را بررسی نموده و روش‌های طراحی برای عملکرد مطمئن سازه و یا قطعه را ارائه می‌نماید. با توسعه علم و تکنولوژی اگرچه امروزه تعداد سازه‌های که بر اثر پدیده شکست از هم گسیخته می‌شود، کاهش چشمگیری یافته است ولی هنوز عامل اصلی بسیاری از خرابی‌ها شکست ترد و نرم می‌باشد [۱]. لذا این امر یک تهدید جدی برای سازه‌ها، خصوصاً سازه‌های حساس در حوزه مهندسی هوافضا است [۲]. تحقیقات بسیاری در حوزه شکست ترد و مدل‌سازی آن انجام شده است [۳]. به عنوان مثال تور بورویک و همکارانش شکست شبه

ترد آلومینیوم ۷۰۷۵ عملیات شده در هنگام اعمال بار ضربه‌ای بررسی کردند [۴]. ولیکن حوزه شکست نرم کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. برخی از سازه‌ها و قطعات مهندسی در اثر شکست نرم و آسیب پیوسته از بین رفته و کارایی خود را از دست می‌دهند. یکی از روش‌های اصلی درمدلسازی و تحلیل شکست نرم، روش مکانیک آسیب پیوسته [۵] است.

۲- مرور مطالعات پیشین

با توجه به اهمیت موضوع شکست در سازه‌ها، تحقیقات زیادی انجام شده که در ادامه برخی از آنها ارائه می‌شوند. هاف نشان داد که برای یک میله تحت کشش، سطح مقطع به علت جریانی شبیه جریان لزج، صفر می‌شود [۶]. مطابقت نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از تئوری نشان داد که گسیختگی در کمتر از ۱۰ درصد از ازدیاد طول اتفاق می‌افتد. عدم پیش‌بینی تاثیر خزش در گسیختگی و یا عدم توزیع شکست در زمان کرنش‌های کوچک مهم‌ترین محدودیت‌های

¹ Continuum Damage Mechanic(CDM)

مدل هاف هستند. کاجانوف [۷] مدل جدیدی ارائه داد که مبنای مدلسازی شکست نرم در خزش گردید، وی برای نخستین بار مبنای و اصول مکانیک آسیب پیوسته را بیان نمود و مدلی برای بررسی شکست با توجه به از دست رفتن انعطاف پذیری ارائه نمود.

آسیب دیدن و گسیختگی مواد نرم، ناشی از رشد و ترکیب میکرو حفره ها است [۵]. رشد حفره ها مشابه فرآیند رشد ترک به عنوان یک مشکل جدی در بررسی رفتار سازه ها محسوب می شود. تریسی و ریس رابطه ای برای مشخص کردن میدان جریان در یک ماده الاستیک و مواد غیر قابل تراکم پلاستیک که حاوی حفره است، پیشنهاد دادند [۸]. سپس روش تقریبی ریلی-ریتز^۱ را توسعه دادند. آنها برای بررسی حفره های کروی در مواد، فرض کردند رفتار ماده به صورت الاستیک-پلاستیک کامل (بدون کارسختی) است. همچنین تغییرات حجم را بر اساس رشد حفره در سرتاسر قسمت های تغییر شکل یافته در نظر گرفتند. در نهایت نشان دادند که با افزایش کشش هیدرواستاتیک شکست نرم کاهش پیدا می کند.

در سال ۱۹۸۹، مدل غیرایزوتروپیک^۲ مکانیک شکست برای مشخص کردن رشد بحرانی ترک ها در صفحات آلومینیومی تحت تاثیر تغییر شکل های زیاد پلاستیک، توسط چو و وانگ توسعه داده شد [۹]. این مدل بر مبنای گسترش ترک های بحرانی همراه با روابط اجزاء محدود توسعه یافت. آنها همچنین بارهای بحرانی را با مقدار آزمایشگاهی مقایسه کردند.

یک مدل ایزوتروپیک آسیب پیوسته در چارچوب متغیرهای داخلی تئوری ترمودینامیک توسط چاندرخان و پاندیپیشنهاد داده شد [۱۰]. این مدل آسیب براساس تنش موثر و اصول کرنش معادل بنا نهاده شده است. این مدل تغییرات غیر خطی را با توجه به کرنش پلاستیک نشان می دهد. صحت سنجی این مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی آلیاژ آلومینیوم انجام شد. اشکال این مدل پیچیدگی زیاد آن و استفاده از پارامترهایی است که محاسبه آنها تجربی بوده و روش مشخصی برای تعیین آنها توسط نویسندگان ارائه نشده است.

بنورا مدلی غیر خطی را براساس مشاهدات تجربی توسعه داد، که نشان می داد رشد حفره ها، نتیجه آسیب غیرخطی همراه با تغییر شکل پلاستیک است [۱۱]. این مدل نشان می دهد در هنگام تغییر شکل های پلاستیک، تابع توزیعی برای پتانسیل شکست وجود دارد که، تابعی غیرخطی برحسب مجموع کرنش موثر پلاستیک است. در این مدل ۳ مرحله متفاوت گسیختگی نرم به خوبی مدل شده است. همچنین این مدل بعداً برای تشریح اثر تنش سه محوره برای پیش بینی شکست نرم در فولاد A533 توسعه داده شد [۱۲].

مکانیک آسیب پیوسته برای شکست خستگی نیز، در جایی که تغییر شکل پلاستیک نقش اصلی در ایجاد خرابی و گسیختگی دارد، قابل تعمیم است. بنورا مدل غیر خطی آسیب را برای بارگذاری های سیکلی تعمیم داد [۱۳]. مزیت اصلی مدل ارائه شده توسط بنورا، محاسبه پارامترهای مدل پیشنهاد شده با استفاده از نتایج آزمایش کشش یا بارگذاری سیکلی است.

برای مدلسازی رشد تقارن محوری و متصل شدن حفره های داخلی کوچک به یکدیگر در مواد الاستوپلاستیک، یک مدل جدید

توسط پارذئون پیشنهاد شد [۱۴]. وی در حقیقت، مدل گلوگنو-لیند و مدل تامسون را توسعه داد.

برونینگ به تحلیل عددی تغییر شکل های بزرگ الاستیک-پلاستیک و شکست غیر ایزوتروپیک براساس تئوری عمومی ماکروسکوپی داخل چارچوب مکانیک آسیب پیوسته غیر خطی پرداخت. وی از روش اجزا محدود برای خطی کردن مسائل در این تحلیل استفاده کرد و متغیرهای موثر را مورد بررسی قرار داد [۱۵].

عدم وجود مدل کلی برای نمایش آسیب، یک محدودیت جدی برای استفاده گسترده از تکنیک های محاسباتی در شبیه سازی و پیش بینی رفتار سازه تحت بارگذاری دینامیکی بوده است. بنورا در سال ۲۰۰۱ [۱۶]، یک مدل کلی برای فلزات نرم با استفاده از ترکیب رابطه حالت جامد میللا [۱۷] و مدل غیر خطی آسیب بنورا [۱۱] ارائه کرد. در این مدل تاثیرات متقابل نرخ کرنش و دما بر روی تنش تسلیم، جوانه زنی و رشد ترک در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه برخی از مواد با توجه به ماهیت خود یا تکنولوژی تولید دارای رفتار غیرایزوتروپیک هستند. بررسی شکست و گسیختگی نرم در این مواد نیز مورد توجه محققین بوده و مدلهایی برای پیش بینی رفتار این مواد در شکست نرم ارائه شده است [۱۸].

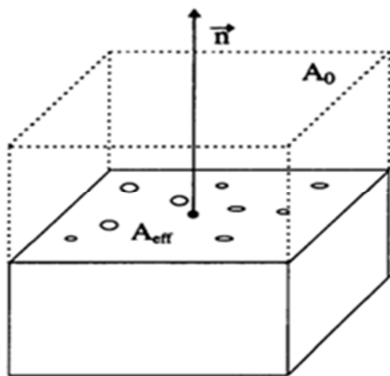
مشایخی و ضیایی از یک پروسه تجربی برای تعیین متغیرهای شکست A533-B1 فولاد استفاده کردند. آنها یک مدل آسیب کاملاً کوپل الاستیک - پلاستیک را در نرم افزار آباکوس توسعه دادند. سپس این مدل را برای شبیه سازی رفتار گسیختگی نرم بر روی قطعه شیار دار به کار گرفتند. متغیرهای آسیب حاصل در شبیه سازی قطعه تحت تست فشار مورد استفاده قرار گرفت. آنها نیروهای عکس العملی و بار بحرانی برای شروع ترک را محاسبه و با مقدار حاصل از آزمایش مقایسه کردند [۱۹].

تاکر و پاندی یک مدل برای تغییرات آسیب پیوسته ایزوتروپیک در چهارچوب متغیرهای داخلی ترمودینامیک ارائه دادند. این مدل براساس اصول تنش موثر و کرنش معادل است [۲۰]. بنورا اثر بارگذاری سیکلی در گسترش آسیب را بررسی نمود [۲۱]. ویگو اثر حفره داخلی بر روی شکست نرم هنگام اعمال باربرشی سازه با استفاده مدلسازی کرنش صفحه ای بررسی کرد [۲۲].

با وجود تحقیقات انجام شده، هنوز مدل جامعی برای پیش بینی و مدلسازی آسیب پیوسته ارائه نشده و برای مواد مختلف، شرایط بارگذاری مختلف و همچنین توزیع تنش های سه بعدی بویژه همراه با تمرکز تنش، دقت و کارایی این مدل ها متفاوت است. بنابراین لازم است تحقیقات در دو حوزه توسعه مدل ها و تطبیق مدل های ارائه شده با مواد و شرایط بارگذاری مختلف ادامه یابد. در این مقاله آلومینوم ۵۰۸۳ به خاطر کاربردهای فراوان در حوزه هوافضای کشور بویژه در ساخت سازه و قطعات فضایی، مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه مدل های ارائه شده توسط بنورا و لیمیتز از روابط مهم در این حوزه هستند، از آنها برای مدلسازی غیر خطی شکست نرم استفاده شد، تا مدل مناسب برای کاربرد عملی انتخاب شود. برای بررسی دقت مدل ها در بیان تنش های سه بعدی و مدلسازی آسیب، از نمونه های استاندارد و سوراخ دار در آزمون های تجربی و مدلسازی عددی استفاده شد. برای این کار قطعه ای از جنس آلومینیوم آلیاژی ۵۰۸۳، براساس استاندارد (ASTM E08) ساخته می شود و در دستگاه تست کشش

¹ Rayleigh-Ritz

² Nonisotropic



شکل ۱- سطح مقطع نامی در المان حجمی مرجع

با توجه به این که ماده مورد بررسی (آلومینیوم ۵۰۸۳) یک ماده ایزوتروپیک و همگن است، می توان فرض کرد توزیع ترک ها و حفره ها در المان حجمی یکنواخت است و متغیر آسیب (D) وابسته به جهت بردار $\vec{n}$ نیست و برابر است با:

$$D = 1 - A_{eff}/A_0 = \frac{A_D}{A_0} \quad (2)$$

که A_D بیانگر مساحت حفره ها در سطح مقطع المان حجمی است.

در حالت بارگذاری محوری که نیروی F عمود بر سطح مقطع در المان حجمی مرجع اعمال می شود و با در نظر گرفتن تعریف تنش $\sigma = F/A_0$ و جایگذاری $A_{eff} = A_0(1 - D)$ با فرض ایزوتروپیک بودن ماده، رابطه تنش موثر به صورت رابطه (۳) تعریف می شود.

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (3)$$

بر اساس تعریف تنش موثر، رفتار ماده در حالت آسیب دیده تنها تحت تاثیر تنش موثر است، به عبارت دیگر معادلات در حالت بررسی آسیب مثل معادلات در حالت عادی است با این تفاوت که تنش موثر جایگزین تنش در معادلات می شود.

برای بدست آوردن معادلات کلی یک ماده مشخص در چارچوب پدیده های برگشت ناپذیر ترمودینامیک از متغیرهای حالت استفاده می شود. همچنین برای توصیف یک ماده، یک حالت پتانسیلی معرفی می شود. معمولاً از انرژی آزاد هلمتز (Ψ) که تابع اسکالر تمام متغیرهای داخلی است، برای بیان آن استفاده می شود. قانون حالت بیانگر ارتباط بین متغیرهای داخلی x_i و متغیرهای وابسته داخلی y_i است (رابطه ۴).

$$y_i = \frac{\partial(\rho\Psi)}{\partial x_i} \quad (4)$$

که ρ چگالی ماده است.

برای حالت داده شده، آسیب تنها تنش های موثر را تغییر می دهد [۱۲]. براساس رابطه (۴)، این امکان وجود دارد که تاثیرات الاستیک با تاثیرات پلاستیک در پتانسیل حالت غیرکوپل باشد یا به عبارت دیگر مستقل از یکدیگر باشند (رابطه ۵).

$$\Psi = \Psi_e(\epsilon_{ij}^e, T, D) + \Psi_p(T, r, x) \quad (5)$$

که در این رابطه T دما، r متغیر داخلی سختی یکنواخت و x متغیر داخلی سختی جنبشی است.

تا لحظه گسیختگی مورد کشش قرار می گیرد. برای بررسی رفتار در محدوده پلاستیک، آزمون بار گذاری سیکلی قطعات نیز انجام می شود. برای بررسی اثر تنش غیر یکنواخت و توانایی مدل غیرخطی در پیش بینی رفتار ماده، یک نمونه سورخ دار برای شبیه سازی تمرکز تنش مورد استفاده قرار می گیرد و همچنین برای مدل سازی عددی رفتار ماده از نرم افزار آباکوس استفاده می شود و برای پیاده سازی مدل های بنورا و لیمتر جهت تعریف خواص ماده و تفاوت رفتار آن با حالت استاندارد موجود در نرم افزار، از کد نویسی و سابروتین (USDFLD) استفاده شده است. برای بررسی و تحلیل این مدل ها، نتایج حاصل از آزمایش های تجربی با نتایج تحلیل های عددی مقایسه می شوند.

۳- مدل مکانیک آسیب پیوسته

شکست در فلزات به دو دسته کلی شکست نرم و ترد رخ می دهد. با توجه به ساختار بلوری فلزات، درجه حرارت، میزان نیرو، نرخ بارگذاری و ابعاد قطعه یکی از این نوع شکست ها رخ می دهد. در این مقاله شکست نرم که همراه با تغییر فرم پلاستیک در ناحیه شکست است مورد بررسی قرار می گیرد. یکی از تکنیک های تحلیل شکست، مدل سازی آسیب در اثر اعمال خارجی است [۲۳].

آسیب یک متغیر ترمودینامیکی است که به عنوان از دست رفتن توانایی تحمل بار توسط ماده بیان می شود. آسیب در پی تغییر شکل پلاستیک شروع می شود و در نتیجه تغییرات برگشت ناپذیری مثل جوانه زنی ترک ها^۱ و رشد حفره ها در ماده به وجود می آید که منجر به گسیختگی در ماده می شود.

از دیدگاه فیزیکی، آسیب به صورت کاهش سطح مقطع نامی در المان حجمی مرجع^۲ که تمام متغیرها در این عنصر حجمی هموزن در نظر گرفته می شود، تعریف می شود.

کاهش سطح مقطع به خاطر جوانه زنی، رشد میکرو ترک ها و میکرو حفره ها است. ناپیوستگی ها و آسیب ها با توجه به اندازه المان حجمی کوچک هستند، اما در مقایسه با فضاهای اتمی ماده بزرگ هستند. آسیب همواره به کرنش برگشت ناپذیر پلاستیک و توزیع کرنش در مقیاس مسو، مقیاس المان حجمی مرجع و یا مقیاس میکرو مرتبط است.

در حالت کلی احتمالاً میکرو حفره ها و میکرو ترک ها همزمان وجود دارند، متغیر آسیب به صورت فیزیکی به وسیله چگالی سطحی میکرو ترک ها و فصل مشترک میکرو ترک ها با صفحه ای متقاطع از در المان حجمی مرجع تعریف می شود (شکل ۱). برای یک صفحه با بردار نرمال $\vec{n}$ رابطه (۱) برای تعریف متغیر آسیب ارائه می شود [۵].

$$D(\vec{n}) = 1 - \frac{A_{eff}^{(n)}}{A_0^{(n)}} \quad (1)$$

در این رابطه $\vec{n}$ بردار نرمال، $A_0^{(n)}$ سطح مقطع نامی در المان حجمی مرجع و $A_{eff}^{(n)}$ سطح موثر آن است. متغیر آسیب، وابسته به انتخاب بردار نرمال $\vec{n}$ است و باید برای توصیف آن از رابطه تانسوری استفاده شود.

¹ Crack Nucleation

² Representative Volume Element

در چارچوب ترموالاستیک خطی، معادلات حالت آسیب را می‌توان از پتانسیل Ψ_e به دست آورد، لذا رابطه‌های (۶) و (۷) برای متغیر وابسته آسیب بیان می‌شود.

$$Y = \rho \frac{\partial \Psi_e}{\partial D} \quad (6)$$

$$Y = -\frac{\sigma_{eq}}{2E(1-D)^2} f\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}\right) \quad (7)$$

در این روابط Y نرخ آزادسازی انرژی کرنش شکست، E مدول الاستیک، σ_{eq} معادل تنش ون میزز است و σ_H تنش هیدرواستاتیک است.

برای کامل کردن معادلات به قانون و قاعده‌ای برای بیان تغییرات متغیرهای داخلی نیاز است. در حالتی که پدیده برگشت‌ناپذیر است، لازمه قانون دوم ترمودینامیک این است که اتلاف مربوط به کار مکانیکی باید مثبت باشد، لذا:

$$\dot{\varepsilon}^p : \sum_k Y_k \dot{x}_k - \dot{D} Y - \sigma \gg 0 \quad (8)$$

در این رابطه $\dot{\varepsilon}^p$ نرخ کرنش، $\dot{D}$ نرخ تغییرات آسیب، x_k نرخ تغییرات سختی دینامیکی است.

براساس قانون ترمودینامیک، معیاری که تغییرات متغیرهای داخلی را کنترل می‌کند، از پتانسیل اتلاف (F) بدست می‌آید. از مشاهده نتایج آزمایشگاهی نتیجه می‌شود که جریان پلاستیک و خرابی در پتانسیل توزیع از یکدیگر می‌توانند جدا باشند [۱۱]. استفاده از تبدیل لژاندر -فرنچل به ما امکان بیان توزیع پتانسیل را به صورت تابعی از متغیرهای داخلی برای ارضای قانون دوم ترمودینامیک را می‌دهد [۱۱].

$$F = F_p(\sigma, R, X) + F_D(Y) \quad (9)$$

در این رابطه R سختی یکنواخت و X سختی دینامیکی وابسته است. رابطه تغییرات برای متغیر آسیب به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود.

$$\dot{D} = -\lambda \frac{\partial F_D}{\partial Y} \quad (10)$$

که در این رابطه λ نرخ کرنش پلاستیک و F_D توزیع پتانسیل آسیب است. این رابطه بیانگر کوپل بین نرخ گسیختگی و نرخ کرنش پلاستیک مجموع به وسیله ضریب پلاستیک ($-\lambda$) است.

برای کامل کردن معادلات کلی، نیاز به تعیین توزیع پتانسیل آسیب (F_D) است. براساس قانون دوم ترمودینامیک توزیع شکست باید مثبت باشد و همچنین پتانسیل آسیب باید یک تابع محدب باشد. این توزیع برای شکست نرم به خاطر مراحل جوانه زنی، رشد حفره‌ها و ترکیب آنها که به شدت غیر خطی است [۱۱]. مدل‌ها و توابع توزیع پتانسیل مختلفی ارائه شده است که در این مقاله بر اساس مطالعات انجام شده دو مدل بنورا و لیمیتر برای بررسی رفتار غیرخطی ایجاد و رشد گسیختگی در ماده انتخاب می‌شود [۲۳].

توزیع پتانسیلی که بنورا ارائه کرده به صورت رابطه (۱۱) است [۱۱].

$$F_D = \left[\left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{Y}{\sigma_0} \right)^2 \left(\frac{\sigma_0}{1-D} \right)^{\frac{p_{cr}-1}{p}} \right]^{\frac{S-1}{S}} \quad (11)$$

توزیع پتانسیل ارائه شده توسط لیمیتر به صورت رابطه (۱۲) است [۵].

$$F_D = \frac{\sigma_0}{(s+1)(1-D)} \left(\frac{Y}{\sigma_0} \right)^{(s+1)} \quad (12)$$

که σ_0 ثابت ماده، S توان مخصوص شکست ماده و n توان کار سختی است.

با توجه به قانون کارسختی رامبرگ - آسگود^۳ (رابطه ۱۳) و فرض این که مقدار آسیب در حالت اولیه برابر صفر باشد می‌توان رابطه نهایی گسترش آسیب را محاسبه نمود [۲۳].

$$\frac{\sigma_{eq}}{1-D} = K P^{1/n} \quad (13)$$

با مشتق‌گیری از رابطه‌های (۱۱ و ۱۲) و جایگذاری قانون کار سختی در تابع پتانسیل و انجام محاسبات مربوطه مقدار تابع آسیب برای هر مدل استخراج می‌شود. که نتیجه نهایی به ترتیب برای مدل بنورا و لیمیتر صورت زیر است:

$$D - D_0 = (D_{cr} - D_0) \left(1 - \left[1 - \frac{\ln(P/P_{th})}{\ln(\sigma_{cr}/\sigma_{th})} \right]^S \right) \quad (14)$$

$$D - D_{cr} = \left(\frac{Y}{\sigma_0} \right)^2 (P - P_{cr}) \quad (15)$$

با توجه به تست کشش و بدست آوردن σ_u و σ_R مقدار D_{cr} را با استفاده از رابطه (۱۶) بدست می‌آید [۵].

$$D_{cr} = 1 - \frac{\sigma_R}{\sigma_u} \quad (16)$$

لازم به در اکثر مواقع در حالت محوری نسبت $\frac{P_{cr}}{P_{th}}$ با نسبت $\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{th}}$ برابر است [۱۲] و در حالت تنش محوری $f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)$ برابر یک است.

۴- شبیه‌سازی عددی

با توجه به پیشرفت دانش مهندسی و توسعه نرم افزارها و سخت افزارها یکی از روش‌های مفید برای مطالعه یک پدیده مهندسی انجام شبیه‌سازی است. عموماً شبیه‌سازی عددی به کمک روش اجزاء محدود^۴ انجام می‌شود. این متد روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل رابطه‌های انتگرالی. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی است، که با روش‌های عددی مثل اویلر حل می‌شوند [۲۴].

نرم‌افزارهای مختلفی نظیر آباکوس^۵، انسیس^۶ و... در دهه‌های اخیر برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیندهای شکلدهی و پیش‌بینی شکست مواد بکار گرفته شده‌اند. در این تحقیق با توجه به توانمندی نرم افزار آباکوس در تحلیل مسائل غیرخطی، از آن برای مدل‌سازی و انجام تحلیل استفاده می‌شود.

برای مش بندی قطعات از المان C3D8 استفاده می‌شود (شکل ۲)، که یک المان خطی با هشت گره است که توانایی مدل‌سازی تغییر فرم‌های زیاد را دارد [۲۵]. ابعاد و تعداد المان به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که نتایج مستقل از مش ایجاد شود و با افزایش تعداد المان‌ها، تنش حداکثری ایجاد شده در قطعه در نقطه استحکام کششی

³ Ramberg-Osgood hardening law

⁴ Finite Element Method (FEM)

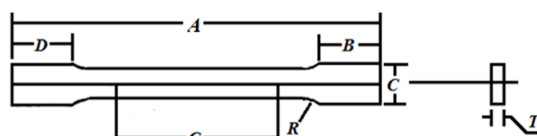
⁵ ABAQUS

⁶ ANSYS

¹ Isotropic hardening

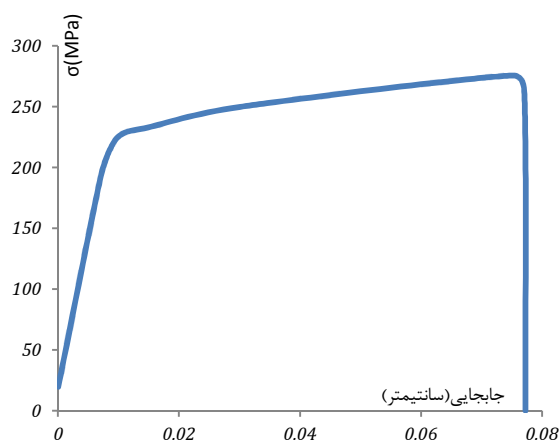
² kinematic hardening

ساخته و آزمون کششش بر روی آن انجام شد. شکل ۵ نمودار حاصل از آزمایش کشش را نشان می‌دهد. در این آزمایش خواص مکانیکی و نمودار تنش-کرنش مشخص شده و در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده می‌شود. مقادیر حاصل از آزمایش کشش به صورت جدول ۲ است و همچنین شکل قطعه آزمایش اول بعد از شکست در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۴ - قطعه آزمایش کشش استاندارد

جدول ۱ - ابعاد قطعه آزمایش اول	
پارامتر	اندازه (mm)
A	۲۰۳
B	۵۰/۸
C	۱۹/۳
D	۱۹/۳
G	۹۰/۶
R	۷/۲
T	۲



شکل ۵ - تغییرات تنش-جابجایی قطعه آزمایش اول



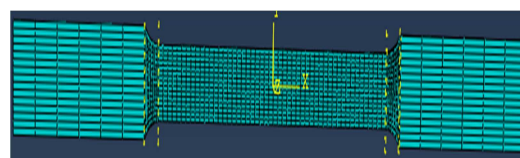
شکل ۶ - قطعه آزمایش اول بعد از شکست

در آزمایش دوم از قطعه‌ای کاملاً مشابه قطعه آزمایش اول استفاده شد. در این آزمایش مشابه آزمایش اول نمونه استاندارد تحت کشش قرار گرفته، ولی در منطقه پلاستیک، بارگذاری سیکلی بر قطعه وارد می‌شود. به کمک این آزمایش توانمندی مدل‌های غیر خطی در حالت بارگذاری سیکلی بررسی شده است. زیرا یکی از حالت‌های بارگذاری و اعمال نیرو در شرایط کاربردی، اعمال نیرو به صورت متناوب و سیکلی است و همچنین این آزمون بیانگر تاثیرپذیری قطعه از نیروها و

نهایی به یک مقدار مشخص رسیده و تغییرات آن بسیار ناچیز باشد. اندازه المان در این حالت تقریباً ۴.۵ میلی‌متر است.

تمام شرایط مرزی و نحوه بارگذاری در هنگام آزمایش تجربی، به صورت مشابه در نرم افزار آباکوس اعمال می‌شود. برای اسن منظور یک سمت قطعه (سطح انتهایی سمت چپ) به صورت اتصال کامل مدل شده و سمت دیگر (سطح انتهایی سمت راست) فقط مجاز به حرکت طولی است ولیکن سایر المان‌ها دارای شش درجه آزادی هستند. برای مشاهده تغییر آسیب به عنوان خروجی، گزینه SDV^۱ و FV^۲ در بخش تنظیم خروجی مورد نظر نرم افزار فعال می‌شود. این نرم افزار توانایی محاسبه و اعمال متغیر آسیب D در مدلسازی رفتار و خواص ماده را ندارد، بنابراین با کمک سابروتین (USDFLD) شرایط واقعی رفتار ماده و گسیختگی مدلسازی می‌شود.

سابروتین (USDFLD) برای تعریف متغیرهای میدانی در گره‌ها به عنوان تابعی از زمان یا هر مشخصه ماده که در پنجره متغیرهای خروجی مشخص شده و همچنین برای معرفی راه‌حل وابسته به خواص مواد استفاده می‌شود [۲۵]. در پیوست این سابروتین ارائه شده است.



شکل ۷ - قطعه مش‌زده شده

۵- آزمایش‌های تجربی

صحه‌گذاری نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و بررسی دقیق‌تر مدل‌ها و همچنین استخراج پارامترهای مورد نیاز ماده، نیازمند انجام آزمایش تجربی است. این آزمایش‌ها به صورت تست کشش انجام شده است. به همین منظور از دستگاه تست کشش یونیورسال هیدرولیک مدل GT-7001-LC مستقر در آزمایشگاه مواد و متالورژی پژوهشگاه استفاده شده است (شکل ۳).



شکل ۳ - دستگاه تست کشش یونیورسال هیدرولیک GT-7001-LC

در آزمایش اول قطعه‌ای از جنس آلومینیوم ۵۰۸۳ (شکل ۴) براساس استاندارد (ASTM E08) با ابعاد داده شده در جدول ۱

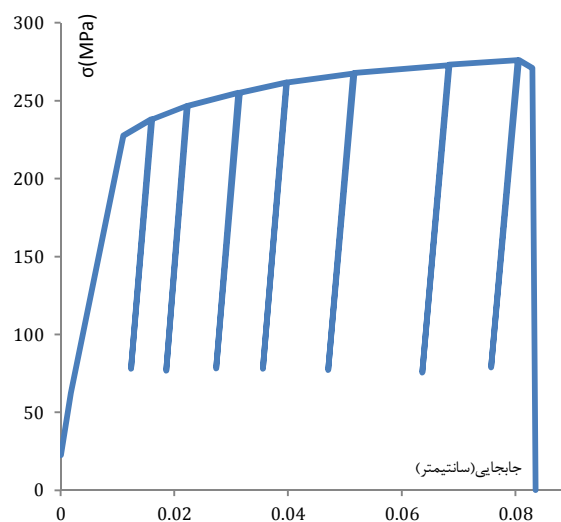
^۱ Solution dependent state variable (SDV)

^۲ Predefined field variable

بارگذاری قبلی است که در تحلیل شکست و آسیب می‌تواند بسیار مفید باشد. نتیجه آزمایش در شکل ۷ ارائه شده است.

جدول ۲- خواص مکانیکی بدست آمده از آزمایش کشش

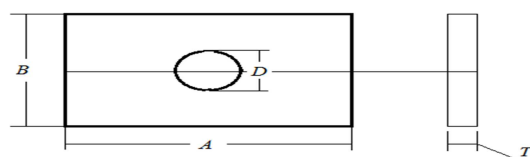
پارامتر	مقدار
تنش تسلیم	236MPa
میزان استحکام نهایی	275 MPa
تنش شکست	253 MPa
کرنش شکست	0.11164



شکل ۷- تغییرات تنش-جابجایی قطعه آزمایش دوم

برای بررسی توانایی مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار ماده هنگام اعمال تنش غیر یکنواخت، در آزمایش سوم از قطعه سوراخ‌دار مطابق شکل ۸ و با ابعاد مشابه جدول ۳ استفاده شد. نتیجه آزمایش سوم در شکل ۹ ارائه شده است و همچنین تصویر قطعه آزمایش سوم بعد از شکست در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

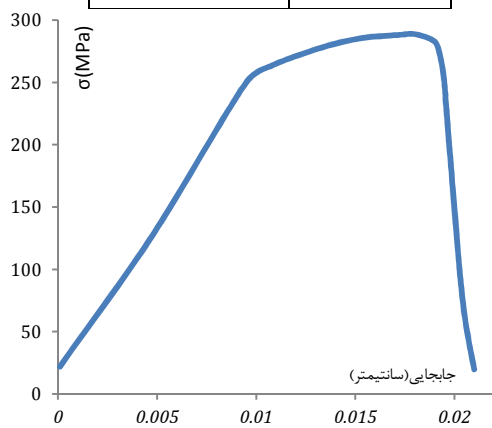
با توجه به این‌که این مدل‌های غیر خطی آسیب مبتنی بر قواعد ترمودینامیکی بنا نهاده شده‌اند، در این تحقیق سعی شده دقت آنها در پیش‌بینی رفتار ماده و گسترش آسیب در دمای نسبتاً بالا نیز بررسی شود. این موضوع مهم متأسفانه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا آزمایش چهارم برای بررسی اثر دما بر روی گسترش آسیب و پیش‌بینی دقت مدل غیر خطی در هنگام دما انجام شد. برای این منظور آزمون در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و نمونه استاندارد تحت کشش قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد. لازم به ذکر است برای شبیه سازی عددی باید مقادیر و پارامترها متناسب با تنش تسلیم و استحکام نهایی جدید اصلاح شوند.



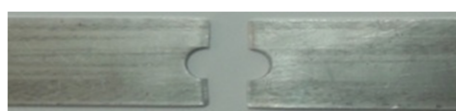
شکل ۸- قطعه سوراخ‌دار

جدول ۳- ابعاد قطعه سوراخ‌دار

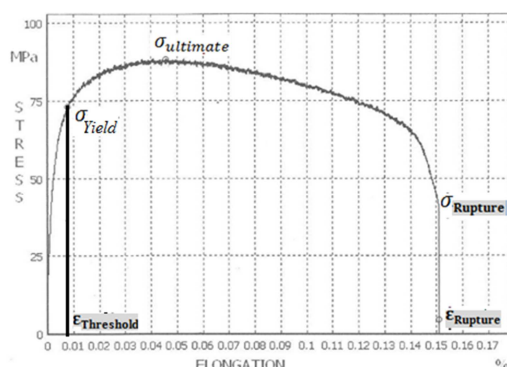
پارامتر	اندازه (mm)
A	۲۰۰
B	۲۸
D	۱۰
T	۲



شکل ۹- تغییرات تنش براساس جابه‌جایی، آزمایش سوم



شکل ۱۰- قطعه آزمایش سوم بعد از شکست



شکل ۱۱- تغییرات تنش-جابجایی قطعه آزمایش چهارم در دمای

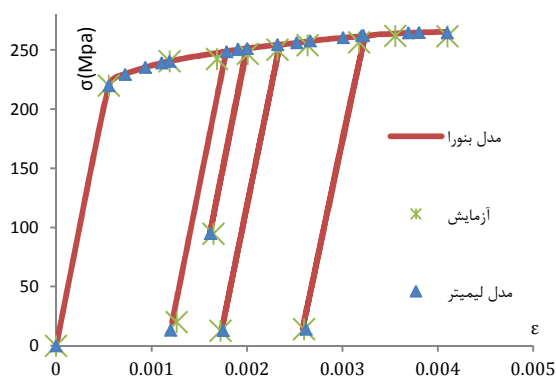
۲۵۰ سانتیگراد

۶- بررسی نتایج

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، فرایند آزمایش‌ها به صورت عددی به وسیله نرم افزار آباکوس و به کمک سابروتین (USDFLD) شبیه سازی شده و در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با مقادیر تجربی و نتایج آزمایش‌ها مقایسه و تحلیل می‌شوند. در شبیه سازی‌ها با توجه به نتایج حاصل از آزمون کشش در دمای محیط و مقادیر پیشنهادی توسط مرجع [۱۱] برای پارامتر S، پارامترهای مورد نیاز به صورت جدول ۴ در نظر گرفته شد.

مقدار نیرو در فرآیند باربرداری هنگام آزمون تجربی به صفر نزدیک شد ولیکن هیچگاه صفر نشد تا خطای ناشی از لقی و جابجایی اولیه دستگاه تأثیری در نتایج نداشته باشد. در تحلیل عددی نیز مشابه این شرایط شبیه‌سازی انجام شد. با استفاده از توانمندی نرم افزار آباکوس و استفاده از مراحل بارگذاری^۱ این فرآیند مدل‌سازی گردید.

نتایج حاصل در شکل ۱۳ و جدول ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل‌های غیر خطی در این حالت نیز دارای دقت خوبی برای مدل‌سازی بارگذاری سیکلی هستند. با توجه به این که مدول الاستیک (شیب نمودار تنش-کرنش در محدوده الاستیک هر بار بارگذاری) در هر بار بارگذاری تغییر می‌کند ولیکن مدل‌ها بخوبی این تغییر را در اعمال می‌کنند. با مقایسه نتایج آزمایش اول و دوم، در حالت بارگذاری متناوب در محدوده پلاستیک می‌توان گفت: با توجه به این که در این آزمون (مشابه آزمون کشش ساده) ماهیت تنش تک محوره چندان تغییر نمی‌کند، مدل‌های غیر خطی مذکور برای پیش‌بینی رفتار ماده و لحظه شکست از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. ولیکن دقت مدل بنورا در این حالت نیز بهتر از مدل لیمیت



شکل ۱۳ - تغییرات نیرو- کرنش بر مبنای مدل بنورا و لیمیت در مقایسه با نتایج آزمایش دوم

جدول ۶ - محاسبه درصد خطاهای مدل‌های بنورا و لیمیت نسبت به داده‌های آزمایش دوم

σ_{Test}	$\sigma_{Limiter}$	درصد خطا مدل لیمیت در مقایسه با تست %	σ_{Bonora}	درصد خطا مدل بنورا در مقایسه با تست %
2.32E+08	2.55E+8	۱/۷	2.54E+8	۱/۶
2.64E+8	2.58E+8	۱/۴	2.57E+8	۱/۳
3.18E+8	2.62E+8	۲/۳	2.58E+8	۰/۶
3.56E+08	2.64E+08	۰/۹۲	2.64E+8	۰/۸
4.10E+8	2.64E+8	۱/۱	2.65E+8	۱/۳
میانگین خطا		۱/۱۵		۱/۱۴

نتایج بدست آمده از آزمایش اول با نتایج حاصل از تحلیل عددی براساس مدل شکست بنورا و لیمیت مقایسه شده است (شکل ۱۲، جدول ۵).

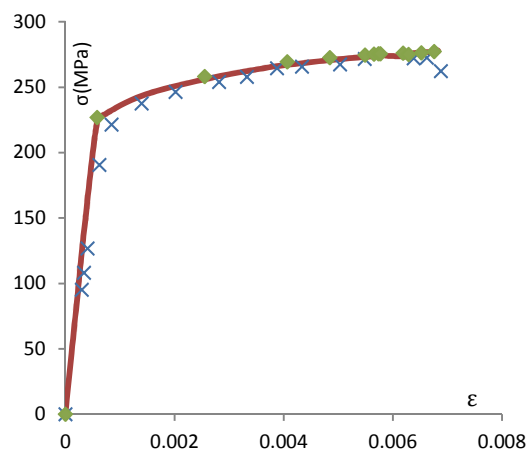
جدول ۴ - مقادیر در نظر گرفته شده برای شبیه سازی

$\epsilon_{Threshold}$	$\epsilon_{Rupture}$	D_{Cr}	α	E (GPa)	ν	s
0.0129	0.11164	0.36	0.75	70	0.3	0.5

همان‌طور که شکل ۱۲ و جدول ۵ نشان می‌دهند، مدل بنورا نتایج بهتری نسبت به مدل لیمیت برای پیش‌بینی رفتار ماده مورد نظر هنگام آزمون کشش ساده ارائه می‌دهد.

جدول ۵ - محاسبه درصد خطاهای مدل بنورا و لیمیت

σ_{Test}	$\sigma_{Limiter}$	درصد خطای مدل لیمیت در مقایسه با تست	σ_{Bonora}	درصد خطای مدل بنورا در مقایسه با تست
2.73E+8	2.78E+8	۲/۱	2.75E+8	۰/۹۱
2.72E+8	2.78E+8	۲/۱۴۴	2.75E+8	۰/۹۵
2.70E+8	2.76E+8	۲/۲۲	2.73E+8	۱/۰۲
2.65E+8	2.71E+8	۲/۲۵	2.68E+8	۱/۱۵
میانگین خطا %		۲/۱۵		۱/۰۷۵



شکل ۱۲ - تغییرات نیرو- کرنش بر مبنای مدل بنورا، مدل لیمیت و نتایج آزمایش اول

یکی از روش‌های ارزیابی مدل آسیب پیوسته بررسی و ارزیابی آن در پیش‌بینی لحظه شکست در هنگام بارگذاری متناوب و سیکلی به قطعات است. برای این منظور، نمونه‌ای تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفت و هنگام آزمون فرآیند بارگذاری و بار برداری در محدوده تغییر شکل پلاستیک به دفعات تکرار شد تا در نهایت شکست قطعه رخ دهد.

¹ Steps

یکی از خروجی‌های این تحلیل اندازه‌گیری مقدار پارامتر آسیب قبل از وقوع شکست نهایی است. با استفاده از رابطه زیر [۵] می‌توان مقدار پارامتر آسیب را در مراحل میانی به وسیله آزمون و روش عددی محاسبه نمود (رابطه ۱۷).

$$D_i = 1 - \frac{E_i}{E_{i-1}} \quad (17)$$

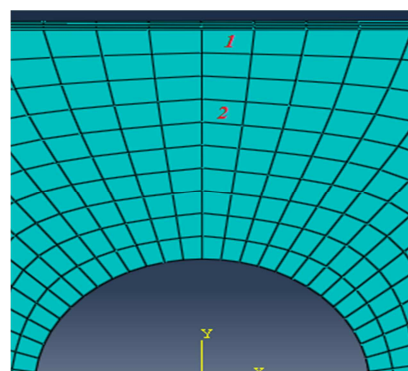
که E_i مدول الاستیک در هر بار بارگذاری است و E_{i-1} مدول الاستیک در بارگذاری قبلی و D_i مقدار پارامتر آسیب است. با استفاده از این نتایج پارامتر آسیب به صورت جدول ۷ است.

جدول ۷- تغییر پارامتر آسیب در فرآیند بارگذاری و باربرداری

پارامتر	D_1	D_2	D_{cr}
آزمایش	۰/۰۲۵۸	۰/۰۲۷۲	۰/۳۶
شبیه‌سازی	۰/۰۰۲۶	۰/۰۲۷	-

نتایج این جدول بیانگر همخوانی قابل قبول نتایج عددی و آزمون عملی است و همچنین نشان می‌دهد میزان آسیب در هر بار بارگذاری و باربرداری در محدوده تغییر فرم پلاستیک افزایش می‌یابد.

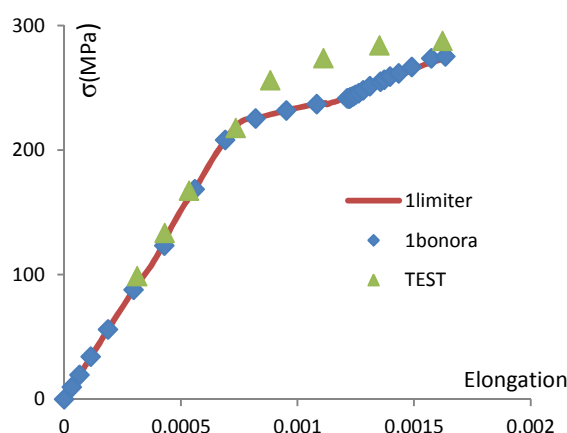
در آزمون‌های قبلی، توانایی مدل‌ها در پیش‌بینی آسیب هنگام اعمال تنش تک محوره بررسی شد. در قطعات و نمونه‌های واقعی و کاربردی تنش اعمالی عموماً به صورت غیر تک محوره و بخصوص سه محوره اعمال می‌شوند. برای بررسی اثر تنش سه بعدی و تغییرات هندسی سازه در پیش‌بینی رفتار سازه، از یک قطعه سوراخ‌دار استفاده شد. وجود سوراخ سبب به هم ریختن نحوه توزیع^۱ تنش شده و در محل آسیب توزیع تنش یکنواخت نیست. در آزمون تجربی فقط خروجی نیروی اعمالی و جابجایی کل ثبت شد. در تحلیل عددی چون توزیع تنش یکنواخت نبود مقدار تنش در نقاط مختلف متناسب با فاصله از لبه سوراخ مقدار تنش متغیر است. بنابراین برای دستیابی به جواب مناسب از روش میانگین‌گیری استفاده شد. برای این امر مقدار تنش در دو نقطه مطابق شکل ۱۴ محاسبه شد و میانگین آنها استفاده شد. این نقاط بر روی محیط بیرونی و در وسط نمونه (فاصله یکسان از لبه سوراخ و لبه قطعه) انتخاب شدند.



شکل ۱۳- المان‌های انتخاب شده برای تحلیل قطعه آزمایش سوم

با توجه به شکل ۱۴، میانگین مقادیر دو المان برای پیش‌بینی تنش و مقدار آسیب دارای دقت مناسبی است. بویژه در پیش‌بینی

رفتار ماده در محدوده الاستیک و تعیین لحظه وقوع گسیختگی و شکست این دقت قابل قبول است. دقت مدل‌ها در تعیین لحظه شکست در این حالت در مقایسه با حالت تک محوره و توزیع تنش یکنواخت کمتر است و خطا به حدود ۱۰٪ می‌رسد. یکی از مهمترین دلایل این اختلاف می‌تواند فرض $(f(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}})=1)$ باشد که در توسعه روابط متغیر آسیب در نظر گرفته شده است. زیرا در هنگامی که قطعه سوراخ‌دار است این فرض برقرار نیست و لازم است که این رابطه دقیق‌تر محاسبه شود. در تحقیق آتی نویسندگان مقاله، این مساله بررسی خواهد شد. همچنین این اختلاف ممکن است بخاطر فرض رفتار ایزوتروپیک ماده نیز باشد زیرا در حالت واقعی رفتار ماده به طور کامل ایزوتروپیک نیست. همچنین این نتایج بیانگر این نکته است که با وجود تحقیقات بسیار انجام شده و توسعه مدل‌های مختلف بررسی رفتار ماده در حالت تنش سه بعدی نیازمند تحقیقات بیشتر است.



شکل ۱۴- تغییرات تنش-جابجایی قطعه آزمایش سوم

یکی از عوامل و پارامترهای مهم و تاثیرگذار در فرآیند گسیختگی مواد، دما است. همچنین در توسعه مدل‌های غیر خطی آسیب پیوسته از مبانی ترمودینامیک بهره گرفته می‌شود، لذا بررسی توانایی این مدل‌ها در دمای بیش از دمای محیط ضروری است. این موضوع در تحقیقات پیشین کمتر مورد توجه واقع شده است. برای این منظور و با توجه به این که در کاربرد صنعتی این ماده در پروژه‌های کاوشگر پژوهشگاه هوافضا دمای سازه بخاطر گرمایش آیرودینامیک به ۲۵۰ درجه سانتی گراد می‌رسد [۲۶]، در این تحقیق، آزمایشی برای بررسی رفتار ماده در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. در شبیه‌سازی با توجه به دقت مدل غیر خطی بنورا از آن استفاده شد. نتایج حاصل در شکل ۱۶ ارائه شده است.

¹ Pattern

بارگذاری متناوب، مدلسازی اثر دما بویژه دمای بالا، استفاده از روابط کارسختی مناسب‌تر برای تکمیل و بهبود این مدل‌ها انجام شود.

۸- پیوست

سابروتین USDFLD برای تعریف متغیرهای میدانی در نقاط دلخواه مواد به عنوان تابعی از زمان یا هر مشخصه ماده که در پنجره متغیرهای خروجی مشخص شده و همچنین برای معرفی راه حل وابسته به خواص مواد استفاده می‌شود.

در اینجا نمونه‌ای از سابروتین (USDFLD) آورده شده است.

```
SUBROUTINE
USDFLD(FIELD,STATEV,PNEWDT,DIRECT,T,CELE
NT,
1
TIME,DTIME,CMNAME,ORNAME,NFIELD,NSTATV,
NOEL,LAYER,
2
KSPT,KSTEP,KINC,NDI,NSHR,COORD,JMAC,JMAT
YP,MATLAYO)
C
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
CHARACTER*80 CMNAME,ORNAME
CHARACTER*3 FLGRAY(15)
DIMENSION
FIELD(NFIELD),STATEV(NSTATV),DIRECT(3,3),
1 T(3,3),TIME(2)
DIMENSION
ARRAY(15),JARRAY(15),JMAC(*),JMATYP(*),COOR
D(*)
user coding to define FIELD and, if necessary, STATEV
and PNEWDT
RETURN
END
```

تعریف متغیرهای سابروتین (USDFLD) :

FIELD(NFIELD)

یک آرایه، حاوی متغیرهای میدانی در نقطه مورد نظر ماده است.

STATEV(NSTATV)

یک آرایه، حاوی راه حل وابسته به حالت متغیر هاست.

PNEWDT

افزایش زمان جدید نسبت به افزایش زمانی که در ابتدا استفاده می‌شود.

DIRECT(3,3)

یک آرایه حاوی کوسینوس‌های هادی ماده است.

CELENT

یک نمونه از طول در عرض المان درجه اول

TIME(1)

مقدار زمان هر مرحله در آغاز هر حل

CMNAME

نام مشخصه ماده

NFIELD

تعداد متغیرهای میدانی در نقاط دلخواه ماده

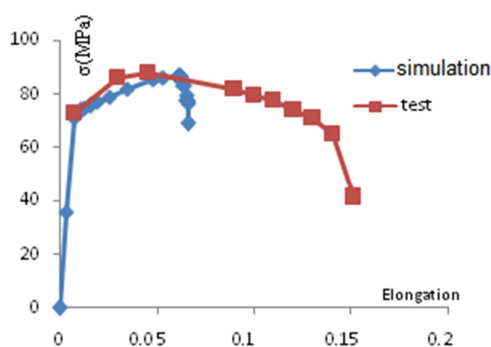
NSTATV

تعداد متغیرهای وابسته به راه حل

NOEL

تعداد المان‌ها

NPT



شکل ۱۶- تغییرات تنش-جابجایی مدل بنورا در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در دمای ۲۵۰ سانتی گراد

نتایج نشان می‌دهد هرچند دقت مدل در پیش بینی رفتار ماده و گسترش آسیب در ابتدا قابل قبول است و تقریباً بخوبی لحظه آغاز آسیب را پیش بینی می‌کند ولیکن با توجه به دمای بالا و احتمالاً تغییرات ساختاری و انجام عملیات تمپرینگ^۱، قانون کارسختی در نظر گرفته شده در مدل (قانون کارسختی رامبرگ - آسگود) چندان دقیق و قابل اتکاء نیست. بنابراین مدل توانایی شبیه‌سازی تغییر فرم با دقت مناسب را ندارد و نمی‌تواند لحظه شکست نهایی را پیش‌بینی کند. لذا لازم است محققین به این موضوع به عنوان یک نقص توجه ویژه داشته و تلاش شود که دقت مدل در این حالت نیز بهبود یابد.

۷- نتیجه‌گیری

گسترش آسیب یکی از عوامل مهم در گسیختگی و شکست نرم سازه‌ها است. علی‌رغم تحقیقات بسیار انجام شده، هنوز مدل کامل و جمعی برای بررسی رفتار آسیب پیوسته ارائه نشده است. در این مقاله ارزیابی دو مدل معروف آسیب پیوسته جهت مدلسازی رفتار ماده و فرایند گسیختگی به صورت تجربی و عددی انجام شد. با توجه به کاربرد گسترده آلومینیوم ۵۰۸۳ (مهم‌ترین آلیاژ مورد استفاده در سازه فضاپیماها و حامل‌های کشور) این ماده در آزمون‌های تجربی و شبیه سازی مورد مطالعه قرار گرفت. در مدلسازی عددی از مدل‌های غیر خطی بنورا و لیمیتز استفاده شده و آزمایش‌های تجربی بر روی چهار قطعه انجام گردید. در این مقاله مدل بنورا و لیمیتز در نرم افزار آباکوس به وسیله سابروتین (USDFLD) اعمال گردید. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد با یک آزمایش کشش ساده استاندارد، مقادیر لازم برای مدلسازی عددی استخراج شده و هر دو این مدل‌های غیر خطی توانایی خوبی در مدلسازی فرایند گسیختگی و شکست ماده آلومینیومی هنگام بارگذاری تک محوره دارند، اما مدل بنورا دارای دقت بهتری برای پیش‌بینی رفتار ماده است. در هنگامی که توزیع تنش اعمالی به قطعه سه بعدی است اندکی از دقت این مدل‌ها کاسته می‌شود. همچنین تحقیق انجام شده برای بررسی اثر دما در گسترش آسیب، نشان می‌دهد این مدل‌ها در پیش بینی رشد آسیب در دمای بالا دقت مناسبی نداشته و نیازمند بازنگری و بهبود هستند. در تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌گردد مطالعه بر روی مواد غیرایزوتوپ،

¹ Tempering

- [21] Pirondi A., Bonora N., Steglich D., Brocks, D. Hellmann W., Simulation of failure under cyclic plastic loading by damage models, *International Journal of Plasticity*, pp. 2146–2170, 2006.
- [22] Tvergaard, Viggo. Effect of initial void shape on ductile failure in a shear field, *Mechanics of Materials*, 2014.
- [23] Sehat A. R., study on aluminum damage using CDM theory, MSc. thesis, Aerospace Research Institute, 2013.
- [24] Reddy J. N., *An Introduction to the Finite Element Method*, McGraw Hill Series in Mechanical Engineering, 2006.
- [25] Abaqus analysis user manual 6.11
- [26] M A Farsi et al. Sounding rocket 6 structure analysis, ARI Report, 2013

KSTEP	تعداد نقاط انتگرال گیری
NDI	تعداد مراحل حل
COORD	تعداد اجزای تنش اصلی
JMAC	مختصات نقطه مورد نظر
متغیری است که باید در (GETVRM) برای بدست آوردن خروجی، قرار داده شود.	

۹- مراجع

- [1] Gross D., Seelig T., *Fracture Mechanic: With an introduction to Micromechanics* Springer, Second edition, 2011.
- [2] Sun C., Jin Z.-H., *Fracture Mechanics*, Elsevier, 2012.
- [3] Bui H. D., *Fracture Mechanics: Inverse Problem and Solutions*, Springer, 2006.
- [4] Børvik Tore, Odd Sture Hopperstad, and Ketill O. Pedersen. Quasi-brittle fracture during structural impact of AA7075-T651 aluminium plates, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37.5, pp. 537-551, 2010.
- [5] Lemaitre J., A continuous damage mechanics model for ductile fracture", *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 107, pp. 83-89, 1985.
- [6] Hoff N., The necking and the rupture of rods subjected to constant tensile loads, *Journal of Applied Mechanics*, vol. 20, No. 1, pp. 105-108, 1953.
- [7] Kachanov L. M., Rupture time under creep conditions, *International Journal of Fracture*, No.8, pp.26–31, 1958.
- [8] Rice J. R., Tracy D. M., On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 17, No.3, pp.201-217, 1969.
- [9] Wang J., Chow C. L., Subcritical crack growth in ductile fracture with continuum, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.33, No.2, pp.309-317, 1989.
- [10] Chandrakanth S., Pandey P. C., An isotropic damage model for ductile", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 50, No.4, pp.457-465, 1995.
- [11] N. Bonora, "A nonlinear CDM model for ductile failure, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 58, No.1/2, pp. 11–28, 1997.
- [12] Garrison W.M., Moody N.R., Ductile fracture, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Volume 48, Issue 11, PP 1035–1074, 1987.
- [13] Bonora N., On the effect of triaxial state of stress on ductility using nonlinear CDM model, *International Journal of Fracture*, Vol. 8, pp. 359–371, 1998.
- [14] T. Pardoen, and J. W. Hutchinson, "An extended model for void growth and coalescence", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48, pp.2467–2512, 2000.
- [15] Bruunig M., Numerical analysis of anisotropic ductile continuum damage, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 192, pp.2949–2976, 2003.
- [16] N. Bonora, and Milella, "Constitutive modeling for ductile metals behavior incorporating strain rate, temperature and damage", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 26, pp. 35-64, 2001.
- [17] Milella P. P., Temperature and strain rate dependence of mechanical behavior of body-centered cubic structure materials, *Proc. TMS Fall Meeting '98*, Chicago, Illinois, 1998.
- [18] Benzerga A. A., Besson J., and Pineau A., Anisotropic ductile fracture, Part II: theory, *Acta Materialia*, Vol. 52, pp.4639-4650, 2004.
- [19] Mashayekhi M., and ZiaeiRad S., Identification and validation of a ductile damage model for A533 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 17, pp.291-295, 2006.
- [20] Thakkar B. K., and Pandey P., A high-order isotropic continuum damage, *International Journal of Fracture*, Vol. 16, pp. 403-426, 2007.